



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA



Centro de Investigación y Desarrollo
de Educación en Línea



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO DE EDUCACIÓN EN LÍNEA
(CIDEL)



21,22 y 28,29 DE SEPTIEMBRE DEL 2007

Instructores:
Ing. Miguel Sánchez Mejía

**DIPLOMADO DE VIAS TERRESTRES
CMIC, PACHUCA, HGO. (sept 07)**

CONSTRUCCION DE CARRETERAS

I.- BANCOS DE MATERIALES Y SU TRATAMIENTO

II.- TERRACERIAS

III.- OBRAS DE DRENAJE

IV.- CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

IV. 1 Carpeta del concreto asfáltico

IV. 2 Mezclas en frío

IV. 3 Carpetas de riegos

V.- CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS

VI.- ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

VII.- ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA PAVIMENTOS

Bancos de Materiales

XII-1 INTRODUCCION

Uno de los costos más importantes en la construcción y mantenimiento de vías terrestres corresponde a los materiales, roca, grava, arena y otros suelos, por lo que su localización y selección se convierte en uno de los problemas básicos del ingeniero civil, en conexión estrecha con el geólogo. La experiencia diaria enseña que, si se da a estas tareas la debida importancia, podrán localizarse depósitos de materiales apropiados cerca del lugar de su utilización, abatiendo los costos de transportación, que suelen ser de los que más afectan los totales; otras veces se logrará obtener materiales utilizables en zonas que antes dependían de otras más alejadas en este aspecto. Por estas razones, no es de extrañar que la búsqueda científica y la explotación racional de los materiales ocupe más y más la atención de los grupos técnicos interesados.

De esta manera va habiendo en todas las instituciones dedicadas al proyecto y la construcción de vías terrestres en cada país, una información cada día más completa sobre las disponibilidades de materiales en cada zona cruzada por una vía terrestre. Desdichadamente, también es frecuente que esta información se pierda una vez realizada una obra, de manera que los ingenieros que hayan de construir otra vuelvan a enfrentarse al problema original de buscar materiales apropiados donde otros ya los habían encontrado. Parece una labor realmente urgente e importante centralizar de alguna manera toda la información que día a día va surgiendo sobre materiales utilizables, localización, volúmenes aprovechables, utilización, tratamientos, etcétera; una vez bien realizada esta tarea a nivel nacional, todas las instituciones constructoras del país podrán obtener considerables ahorros en la búsqueda de materiales y, a la vez, disponer para una utilización determinada, de toda la experiencia de quienes antes hayan usado el mismo banco, para los mismos o similares fines. Una tarea como la que se recomienda nunca estará terminada,

pero ya desde niveles muy iniciales de su ejecución podrá rendir provechosos frutos.

Durante muchos años la detección de bancos de materiales dependió de métodos exploratorios comunes, desde la simple observación sobre el terreno, hasta el empleo de pozos a cielo abierto, posteadoras, barrenos y aun máquinas perforadoras. En épocas más recientes, los estudios geofísicos, de gran potencialidad en estas cuestiones, han venido a sumarse a la técnica disponible, ahorrando mucho tiempo y esfuerzo humanos y mucha exploración.

El énfasis de este Capítulo se pondrá especialmente en los bancos de materiales, en la inteligencia de que mucho de lo que de ellos se diga será aplicable a los préstamos laterales y aun a los materiales que se obtengan por compensación longitudinal o transversal. Será necesario establecer ciertas distinciones entre los bancos de roca y los de suelo. La transición entre los dos materiales genéricos es, en este caso, todavía más difícil de establecer con precisión que en otros; la roca puede presentarse con muy diversos grados de alteración o el material que se encuentre puede ser mixto, en el sentido de conte-



Explotación con préstamo lateral. Nótese la exposición de la carretera a la acción del agua y el peligro para el tránsito.

ner tanto formaciones rocosas como auténticos suelos.

Un punto fundamental en la determinación de bancos de materiales es la valuación de las rocas o suelos contenidos, la que suele ser muy difícil de establecer en forma cuantitativa. En lo que se refiere a las rocas, dos puntos principales deben merecer atención (Ref. 1). El primero se refiere a los cambios físicos que la roca puede sufrir por fragmentación durante la extracción, por manejo o durante la colocación; el segundo a la alteración físico-química que pueda tener lugar durante la vida útil de la obra. Estos mismos factores han de ser considerados cuando se trate de suelos, pero revisten mayor importancia

en las rocas, pues los suelos seguramente han sufrido ya sus transformaciones físico-químicas importan durante su proceso anterior de descomposición, que les dio existencia a partir de la roca madre; las rocas, sobre todo las sanas trituradas o rotas, no han estado antes sujetas a procesos intensos de meteorización y éstos pudieran tener consecuencias muy notables.

La tabla XII-1 (Ref. 1) puede servir para proporcionar una valuación preliminar de las diferentes clases de rocas, en cuanto a sus características como materiales de construcción; un buen diagnóstico definitivo, sin embargo, depende de tantos factores específicos que no es posible aspirar a emitirlo en nin-

TABLA XII-1
Características de algunas rocas como materiales de construcción (Ref. 1)

<i>Roca</i>	<i>Método de Excavación requerido</i>	<i>Fragmentación</i>	<i>Susceptibilidad a la meteorización</i>
Granito Diorita	Explosivos	Fragmentos irregulares, que dependen del uso de los explosivos.	Probablemente resistente.
Basalto	Explosivos	Fragmentos irregulares, que dependen de las juntas y grietas.	Probablemente resistente.
Toba	Equipo o explosivos	Fragmentos irregulares, muchas veces con finos en exceso.	Algunas variedades se deterioran rápidamente.
Arenisca	Equipo o explosivos	En lajas, dependiendo de la estratificación.	Según la naturaleza del cementante.
Conglomerado	Equipo o explosivos	Exceso de finos, dependiendo del cementante.	Algunos se alteran para formar arenas limosas
Limonita Lutita	Equipo	Desde pequeños bloques a lajas.	Muchas se desintegran rápidamente para formar arcillas; debe considerárselas sospechosas, a menos que las pruebas indiquen otra cosa.
Caliza Masiva	Explosivos	Fragmentos irregulares; muchas veces, lajas.	Las vetas pizarrosas se deterioran, pero las otras son resistentes.
Coquina Creta	Equipo	Fragmentos porosos, usualmente con exceso de finos.	Algunas formas porosas se alteran por humedecimiento; otras se cementan con procesos alternados de humedecimiento y secado.
Cuarcita	Explosivos	Fragmentos irregulares, muy angulosos.	Probablemente resistente.
Pizarras Esquistos	Explosivos	Fragmentos irregulares o lajeados, según la foliación.	Algunas se deterioran con procesos de humedecimiento y secado.
Gneis	Explosivos	Fragmentos irregulares, muchas veces alargados.	Probablemente resistente.
Desechos industriales y de minas	Equipo	Depende del material, pero en la mayoría de los casos es irregular.	La mayoría de las variedades (excepto las ígneas de mina) deben considerarse deteriorables, en tanto las pruebas no indiquen otra cosa.

gún caso particular sólo con base en la información contenida en la tabla.

Cada caso requiere la realización de pruebas de campo y de laboratorio sobre las rocas que forman el banco en estudio. La mejor prueba de campo es, quizá, la duplicación de un proceso de excavación análogo al que después se usará en forma masiva, para ver objetivamente qué material se obtiene; ésta será, necesariamente, una prueba a escala suficientemente grande, como para ser realista.

La posibilidad de deterioro de la roca con el tiempo es mucho más difícil de establecer. Quizá la mejor orientación pueda tenerse observando lugares en que la roca haya estado expuesta durante mucho tiempo.

La valuación preliminar de los suelos se hace sobre todo con base en experiencia precedente; la clasificación en el Sistema Unificado ayuda en todos los casos, pues este sistema lleva aparejado al encasillamiento en un grupo determinado, todo un conjunto de índices de comportamiento. La valuación en detalle de los suelos constitutivos de un banco ha de hacerse con base en pruebas de laboratorio.

XII-2 LOCALIZACIÓN DE BANCOS

Pocos aspectos prácticos son tan importantes en la realización de una vía terrestre y, a la vez, resultan más elusivos para un tratamiento general, que el que se refiere al desarrollo de criterios y técnicas para la localización de bancos de materiales. El tema es de tal importancia que no puede considerarse completo un proyecto o digno de autorización para su ejecución, si no contiene una lista completa y detallada de los bancos de materiales de los que han de salir los suelos y rocas que forman la obra. En este caso, la expresión "bancos de materiales" ha de ser tomada en su sentido más general y puede referirse a los cortes de donde se construirá un terraplén o un balcón en un método de compensación longitudinal o transversal, a los materiales del terreno natural de donde se extraerá un préstamo lateral o a un banco propiamente dicho.

Localizar un banco es más que descubrir un lugar en donde exista un volumen alcanzable y explotable de suelos o rocas que pueda emplearse en la construcción de una determinada parte de una vía terrestre, satisfaciendo las especificaciones de calidad de la institución constructora y los requerimientos de volumen del caso. El problema tiene otras muchas implicaciones. Ha de garantizarse que los bancos elegidos son los mejores entre todos los disponibles en varios aspectos que se interrelacionan. En primer lugar, en lo que se refiere a la calidad de los materiales extraíbles, juzgada en relación estrecha con el uso a que se dedicarán. En segundo lugar, tienen que ser los más fácilmente accesibles y los que se puedan explotar por los procedimientos más eficientes y me-

nos costosos. En tercer lugar, tienen que ser los que produzcan las mínimas distancias de acarreo de los materiales a la obra, renglón éste cuya repercusión en los costos es de las más importantes. En cuarto lugar, tienen que ser los que conduzcan a los procedimientos constructivos más sencillos y económicos durante su tendido y colocación final en la obra, requiriendo los mínimos tratamientos. En quinto lugar, pero no el menos importante, los bancos deben estar localizados de tal manera que su explotación no conduzca a problemas legales de difícil o lenta solución y que no perjudiquen a los habitantes de la región, produciendo injusticias sociales. Es evidente que en cualquier caso práctico muchos de los requisitos anteriores estarán en contraposición y la delicada labor del ingeniero estriba precisamente en elegir el conjunto de bancos que concilie de la mejor manera las contradicciones que resulten en cada caso.

Por debajo de este primer estrato de condiciones básicas que han de conciliarse existe un segundo, muy tupido, formado por las interrelaciones entre los elementos del primero. Por ejemplo, de entre dos materiales posibles para un cierto uso podrá haber una diferencia en la calidad técnica cuando están en estado natural, pero esa diferencia podrá anularse o aún invertirse si el peor material recibe un tratamiento adecuado, se estabiliza de alguna manera o si, tal vez, el proyecto se modifica de manera que un material que no era originalmente apropiado, ahora resulta utilizable. De hecho, esta interrelación entre los materiales de construcción y el proyecto de la obra es esencial a tal grado que, como se dijo, el proyecto de una vía terrestre carece de sentido si no se le enfoca como un conjunto que comprenda los bancos de materiales disponibles y la utilización que de ellos pretenda hacerse.

Evidentemente todo el complicado balance que más arriba se ha insinuado comienza con una etapa de localización simple, al final de la cual el ingeniero debe disponer de un mapa donde aparezcan todos los posibles aprovechamientos de material que puedan interesar a su obra, habiéndose probablemente excluido otros muchos, por algún o algunos inconvenientes obvios. Entre todo este conjunto de bancos que se vean factibles, deberá el ingeniero desarrollar sus líneas de opción en estrecha vinculación con su proyecto.

La búsqueda y localización de bancos de materiales puede hacerse principalmente por fotointerpretación o por reconocimientos terrestres directos; estos últimos pueden auxiliarse, a su vez, por la fotointerpretación o por métodos de prospección geofísica.

En el Capítulo III de esta obra se trataron solamente tanto la fotointerpretación como los métodos geofísicos de exploración, por lo que no se considera necesario detallarlos más en este momento. Será preciso insistir, sin embargo, en que la fotointerpretación ofrece un método sin rival para explorar grandes áreas a bajo costo, en forma que fácilmente

puede equivaler en precisión a un reconocimiento terrestre, especialmente si la institución que busca los bancos utiliza geólogos bien entrenados en la aplicación del método; de hecho éste es, sin duda, uno de los aspectos en que la Geología Aplicada puede contribuir más eficazmente a la tecnología de las vías terrestres.

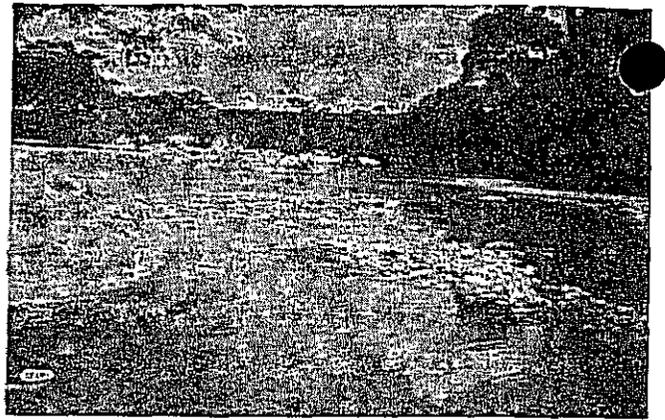
Bien sea que se utilice como único método de detección o como complemento de un estudio de foto-interpretación, el reconocimiento terrestre del futuro banco es indispensable. En él deberá definirse no sólo la posibilidad de la explotación, sino también el grado de dificultad de la misma, los problemas que pudieran acarrear aguas superficiales o subterráneas, los volúmenes disponibles, las facilidades legales, etcétera. El ingeniero que realice esta labor previa ha de recurrir siempre a la experiencia local, que podrá enseñarle muchas cosas útiles, de las que fácilmente pueden pasar inadvertidas.

Comúnmente es necesario localizar bancos para material de terracerías, para capa subrasante, para sub-base y base de pavimento y para carpeta, en el caso de carreteras. En ferrocarriles, habrán de localizarse bancos para terracería, capa subrasante, sub-balasto y balasto. En aeropistas las necesidades se enlistan igual que para carreteras. En añadidura, podrán requerirse bancos para la obtención de los materiales necesarios para la elaboración de concretos, de piedra para mampostería u otros especiales. Huelga decir que, muchas veces, un mismo banco puede proporcionar material para varios de esos usos, sometiendo su producto a diferentes tratamientos.

Los bancos para terracerías en general abundan y son fáciles de localizar, pues para ese fin sirven casi todos los materiales que sean económicamente explotables; las excepciones se analizaron en partes anteriores de este libro (suelos, *MH*, *CH* y *OH*, con límite líquido mayor que 100 % y suelos *P_t*). Sin embargo pueden presentarse algunos problemas, precisamente por aparecer esos materiales merecedores de rechazo por su mala calidad, en llanuras lacustres, zonas de inundación, depósitos de delta, grandes planicies aluviales y costeras y otras zonas, en donde abunden los depósitos muy finos. En todos estos casos, no es raro tener que buscar los aprovisionamientos de materiales fuera de esas zonas, si no son demasiado extensas.

Los bancos de terracerías conviene fijarlos no demasiado espaciados, para no dar lugar a distancias de acarreo excesivas; la separación óptima está en la mayoría de los casos de la práctica, allá donde se alcance el equilibrio de costos entre el acarreo, por un lado y el costo del despalle y preparación del banco por el otro. Las distancias que resultan no suelen exceder los 5 km entre banco y banco, aunque podrá haber casos especiales en que estas distancias sean mucho mayores, sobre todo en zonas agrícolas, en que los costos de afectación son muy altos.

En lo que se refiere a la capa subrasante, ya se



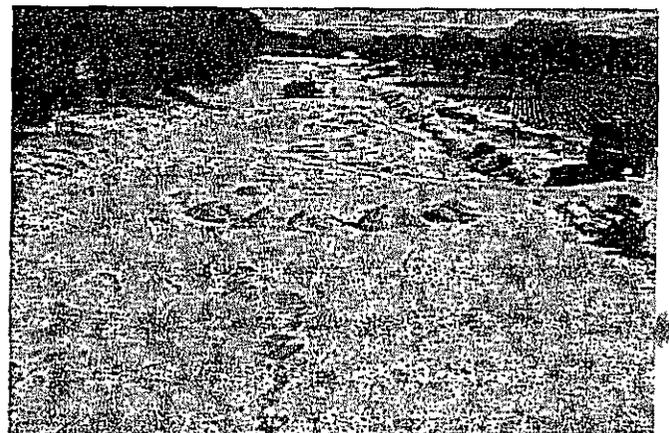
Un banco típico de playón de río.

mencionaron en el Capítulo IX los materiales que pueden utilizarse y los que deben rechazarse, de acuerdo con la práctica mexicana, que puede citarse como una norma de criterio. Un requisito que condiciona adicionalmente los bancos de materiales elegidos es ahora el de lograr homogeneidad en longitudes significativas, para evitar que las estructuras y espesores de las capas de pavimento suprayacentes varíen con demasiada frecuencia. Las distancias comunes entre bancos pueden extenderse en este caso hasta 10 km.

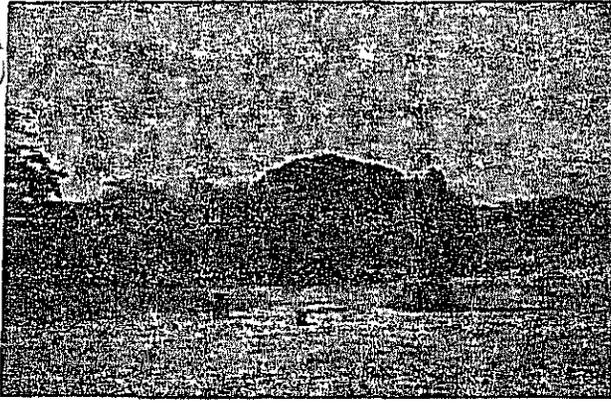
Los materiales para sub-base y base de pavimento, además del requisito anterior, suelen estar condicionados en forma importante por los tratamientos mecánicos que llegan a requerir para satisfacer las normas de calidad, mismos que, en añadidura, necesitan de la instalación de equipos especiales y plantas complejas, que no conviene mover mucho. Por todo ello, suelen estar mucho más espaciados, al grado que distancias del orden de 50 km no son difíciles de ver.

Los bancos para subrasante suelen encontrarse en los oteros bajos y extendidos, en formaciones de roca muy alterada, en las zonas limoarenosas de los depósitos de ríos, en zonas de depósito volcánico de naturaleza piroclástica, como conos cineríticos o tobáceos, en horizontes arenosos de formaciones estratificadas extensas, etcétera.

Los materiales para sub-base, y base suelen encon-



Explotación de grava y arena en el cauce de un río.



Exploración de un banco con métodos geofísicos.

trarse en playones y márgenes de ríos, en frentes y cantiles rocosos, cerros relativamente elevados y de pendiente abrupta, etcétera.

Los materiales para concretos asfálticos o hidráulicos se obtienen casi siempre por trituración, a partir de formaciones rocosas sanas. Las mamposterías se obtienen de formaciones rocosas fracturadas o de recolección superficial.

XII-3 EXPLORACION Y MUESTREO DE BANCOS

La exploración de una zona en la que se pretenda establecer un banco de materiales debe tener las siguientes metas:

1. Determinación de la naturaleza del depósito, incluyendo toda la información que sea dable obtener sobre su geología, historia de explotaciones previas, relaciones con escurrimientos de agua superficial, etcétera.
2. Profundidad, espesor, extensión y composición de los estratos de suelo o roca que se pretendan explotar.
3. Situación del agua subterránea, incluyendo posición y variaciones del nivel freático.
4. Obtención de toda la información posible sobre las propiedades de los suelos y las rocas, los usos que de ellos se hayan hecho, etc.

La investigación completa está formada por tres etapas:

1. Reconocimiento preliminar, que debe incluir la opinión de un geólogo. En esta etapa debe considerarse esencial el contar con el estudio geológico de la zona, por sencillo que sea.
2. La exploración preliminar, en la que por medio de procedimientos simples y expeditos, pueda obtenerse información sobre el espesor y composición del subsuelo, la profundidad del agua freática y demás datos que permitan, en principio, definir si la zona es prometedora

para la implantación de un banco de las características del que se busca y si, por consiguiente, conviene continuar la investigación sobre ella.

3. La exploración definitiva, en la que por medio de sondeos y pruebas de laboratorio han de definirse detalladamente las características ingenieriles de los suelos y las rocas encontradas.

Las armas de la exploración para localización y valuación de bancos son la fotointerpretación, los sondeos y la prospección geofísica. Como quiera que rara vez se requiere explorar a profundidades grandes, mayores de 10 m, los métodos de sondeo preliminar y definitivo pueden no ser diferentes. El pozo a cielo abierto, la posteadora y los barrenos helicoidales (Refs. 2 y 3) son los métodos más empleados en suelos. La diferencia entre el estudio preliminar y el definitivo suele radicar más bien en el número de sondeos, que en la investigación definitiva deben corroborar la información preliminar, definiendo claramente las distintas formaciones existentes y cubicar con la aproximación requerida el volumen de material que vaya a ser necesario. No debe excluirse, al realizar exploración definitiva en suelos, el empleo de métodos de exploración más refinados o capaces de ir a mayores profundidades, que pudieran requerirse en algunas ocasiones; se utilizarán entonces máquinas perforadoras, con técnicas de sondeo del tipo de las descritas en las mencionadas Referencias 2 y 3. En bancos de roca, lo normal es atenerse en mucho a los resultados del reconocimiento preliminar, extrayendo de él normas de juicio en cuanto a la extensión del banco y al volumen de material disponible; la razón es que la exploración en roca requiere del uso de métodos rotatorios, con máquinas de perforación, todo lo cual resulta costoso y no suele considerarse necesario más que en casos importantes en que existan incertidumbres de consideración.

Ya se ha descrito en el Capítulo III de esta obra la utilidad que es posible extraer en los estudios de suelos de las técnicas de fotointerpretación y de la prospección geofísica. Cabe añadir que un buen estudio de fotointerpretación puede cubrir con rapidez la etapa de reconocimiento preliminar, sin que, como se dijo, este método tenga rival en la detección de posibles bancos. Los métodos geofísicos, por su parte, son económicos y rápidos para cubicar los bancos en estudio y para distinguir las diferentes formaciones que es común encontrar en ellos. De entre ellos, el geosísmico es el más usual, con mucho.

Los bancos de suelo han de muestrearse para conocer en el laboratorio las características que interesen para definir o autorizar su uso. No existe ninguna regla para fijar el número de sondeos que es necesario hacer en un caso dado. Algunas instituciones fijan un determinado número de sondeos por cada número de metros cúbicos de material por ex-

plotar, lo cual no toma en cuenta ni la homogeneidad o heterogeneidad de la formación, ni ninguna otra de las características geológicas particulares, por lo que el anterior no parece ser un buen criterio para definir la exploración; será preferible ceñirse en cada caso a las características específicas del banco en estudio, teniendo muy en cuenta las condiciones geológicas locales, los frentes que han de atacarse, etcétera.

Naturalmente, la muestra que se extraiga dependerá de la utilización que pretenda hacerse del suelo. En bancos para terracerías es común realizar análisis granulométricos, límites de plasticidad, pruebas de compactación, cálculo del coeficiente de variación volumétrica, todo lo cual suele requerir muestras entre 50 y 100 kg, como mínimo. Se trata sencillamente de clasificar al suelo y conocer sus características en cuanto a compactación.

En materiales para pavimento, además de las pruebas anteriores, los bancos de suelos deberán sujetarse en general a pruebas de Valor Relativo de Soporte o similares, de acuerdo con el método de diseño que se pretenda utilizar. Se excluye, naturalmente, toda la gama de pruebas que en relación con los asfaltos han de hacerse a una carpeta, por considerarlas fuera de los alcances de esta obra.

En general, las pruebas que requieren los suelos que van a usarse en pavimentos, aunque sea las mismas que las de las terracerías, suelen hacerse con más acuciosidad y en mayor número; por ejemplo, una granulometría en material para terracería, muchas veces no va más allá de la separación de las porciones de grava, arena y finos, en tanto que los materiales de pavimento requieren la curva completa. De la misma manera los análisis de compactación y Valor Relativo de Soporte probablemente han de hacerse con mayor intensidad en la subrasante y demás capas de pavimento que en otras partes más bajas del terraplén.

Al tratar con bancos de suelo que vayan a usarse en pavimentación es también frecuente que se distinga un conjunto de pruebas dentro de una etapa de estudio preliminar, de otras pruebas que se hagan posteriormente con carácter definitivo. Este criterio permitirá seleccionar las zonas más prometedoras dentro de un banco dado o establecer racionalmente alternativas de uso entre varios bancos vecinos.

La tabla XII-2 presenta de un modo general el tipo de pruebas que se hace a los distintos materiales provenientes de los bancos, según el uso que de ellos pretenda realizarse.

En general las pruebas están divididas en tres tipos, las de clasificación, las que tienen por objeto establecer la calidad de los materiales, que entre otras cosas, permitirán establecer si se cumplen las normas mínimas que establezca la institución constructora y, finalmente, las pruebas de diseño propiamente dicho. Sobre todo en este último aspecto puede haber, como ya se comentó en los capítulos respectivos, criterios diferentes entre los diversos organismos que construyen; la tabla está hecha presupo-

TABLA XII-2

Pruebas de Laboratorio que se efectúan a los suelos que se extraen de bancos, según su utilización

- I. *Terracerías.*
 - a) Clasificación: Límites de plasticidad.
Granulometría.
 - b) Calidad: Peso volumétrico máximo.
A veces, Valor Relativo de Soporte.
- II. *Capa Subrasante.*
 - a) Clasificación: Límites de plasticidad.
Granulometría.
 - b) Calidad: Peso volumétrico máximo.
Valor Relativo de Soporte.
Expansión.
Equivalente de Arena.
 - c) Diseño: Determinación de Valor Relativo de Soporte (Método del Cuerpo de Ingenieros, U.S.A.), o bien:
Pruebas de Hveem, o bien:
Pruebas Triaxiales de Texas.
- III. *Base y Sub-base.*
 - a) Clasificación: Límites de plasticidad.
Granulometría.
 - b) Calidad: Peso volumétrico máximo.
Valor Relativo de Soporte.
Equivalente de Arena.
Expansión.
 - c) Diseño: Si se desea hacer un diseño estructural por capas, deberán realizarse las pruebas indicadas para la capa subrasante.
- IV. *Carpeta Asfáltica.*
 - a) Clasificación: Límites de plasticidad.
Granulometría.
 - b) Calidad: Pruebas de desgaste y/o alterabilidad.
Equivalente de Arena.
Expansión.
Afinidad con el Asfalto.
Pruebas para definir la forma de los agregados.
 - c) Diseño: Prueba de Marshall, o bien:
Pruebas de Hveem.
El contenido óptimo de Asfalto puede determinarse también por el Método C.K.E.

niendo un tanto que la prueba básica para el diseño de pavimentos sea la de Valor Relativo de Soporte. Otro punto en el que suele haber bastante diferencia institucional es el que se refiere a la fijación de las pruebas para fijar las características de expansividad de los suelos.

En términos generales todas las pruebas mencionadas en la tabla XII-2 han sido ya tratadas en páginas anteriores de esta obra, con excepción de la importantísima prueba de Equivalente de Arena, que originalmente desarrollada por F. N. Hveem en el Departamento de Carreteras de California, ha alcanzado hoy muy amplia y merecida difusión. Aunque esta prueba fue ya mencionada en el Capítulo IX, parece oportuno comentarla ahora, pues sus máximas virtudes destacan precisamente cuando se emplea para determinar la calidad de los suelos o la de los pro-

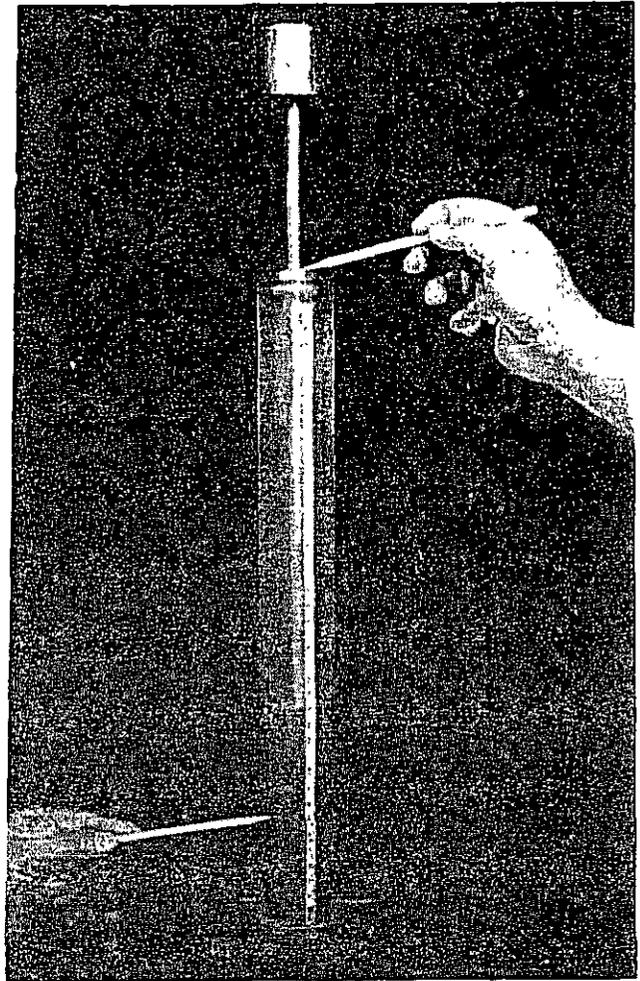
ductos de trituración procedentes de bancos. Los Reqs. 4, 5, 6, 7 y 8 contienen información de detalle sobre la prueba y en el Anexo XII-a de este capítulo se incluye un breve instructivo sobre su realización.

Todos los materiales térreos que se utilizan en las terracerías y los pavimentos contienen en mayor o menor grado partículas finas, de cuyo monto y actividad depende en gran parte, como es sabido, el comportamiento mecánico del conjunto. La prueba de Equivalente de Arena fue desarrollada por Hveem para valuar en forma cualitativa la cantidad y la actividad de los finos que existen en la mezcla de partículas que constituyen el suelo que se va a utilizar.

La prueba consiste en introducir una cantidad prefijada de la fracción del suelo que pasa la malla Nº 4 en una probeta estándar, parcialmente llena con una solución que, entre otros efectos, propicia la sedimentación de los finos. Tras un periodo de vigorosa agitación para homogeneizar la suspensión, la probeta se deja en reposo en su posición natural durante 20 min, al cabo de los cuales se ve el perfil de sedimentación en el fondo, que básicamente debe consistir de dos capas fácilmente distinguibles, una inferior que tendrá prácticamente todas las partículas de arena y otra, superior, formada por la cantidad de arcilla que haya alcanzado a depositarse en el tiempo transcurrido, bajo el efecto floculante que produzca

solución utilizada, el cual, obviamente, dependerá de la concentración con que se fabrique ésta. Así, por ejemplo, si la arcilla contenida es una montmorilnita o una bentonita, de alta actividad coloidal, la solución estándar, actuando durante 20 min, alcanzará a flocular y depositar una determinada cantidad, en tanto que, si la arcilla es una caolinita de actividad coloidal mucho menor, seguramente en los 20 min podrá llegarse a depositar toda la arcilla.

De esta manera, el estudio de perfil de sedimentación permite establecer un índice volumétrico de las respectivas proporciones de los materiales contenidos en el suelo original, que pueden en principio, clasificarse como arenas o como arcillas. Además, como se verá, el perfil de sedimentación permite obtener

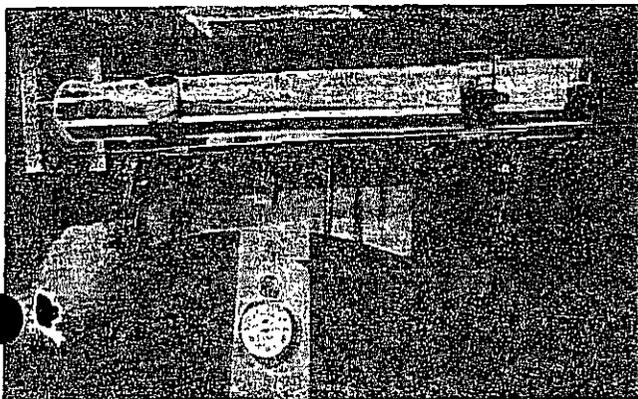


Lectura del equivalente de arena.

también una idea de carácter cualitativo, pero seguramente bastante apropiada, de la actividad que pueda atribuirse a la fracción arcillosa.

La solución está formada básicamente con cloruro de calcio, que es un material floculante; se le añade algo de glicerina, pues se vio que así se producía un efecto estabilizante que hacía la prueba más consistente al ser repetida por operadores diferentes y una porción de formaldehído, cuyo objeto es el de esterilizar la solución para neutralizar la posibilidad de desarrollo de organismos que pudiera contener el suelo original. La base de la solución es agua destilada o razonablemente limpia. Muy especialmente, la cantidad de cloruro de calcio determina el poder floculante de la solución; con cantidades diferentes se tienen volúmenes de arcilla depositadas muy diferentes y, por lo tanto, también muy distintos equivalentes de arena, pues este concepto se define y determina con base en los respectivos espesores de arena y arcilla en el perfil de sedimentación.

Una vez obtenido el perfil de sedimentación y anotado el nivel superior de la capa de arcilla, se introduce en la probeta un pisón de peso estándar, el cual se apoya sobre la arcilla, permitiendo que se hunda en ella, lo que ocurre prácticamente hasta



Agitador manual utilizado en la prueba de equivalente de arena.

que se alcanza la capa de arena; la altura a que queda este pisón se mide también y se considera la altura de la frontera superior de la capa de arena. El pisón es necesario, pues, como es natural, durante la deposición no se define nítidamente un plano de transición entre la arena y la arcilla. Se define como Equivalente de Arena la relación:

$$E. A. = 100 \frac{\text{Lectura en el nivel superior de la arena}}{\text{Lectura en el nivel superior de la arcilla}} \quad (12-1)$$

Un equivalente de arena cero se obtendría en una arcilla pura, en tanto que cuanto mayor sea el equivalente de arena se tendrá seguramente una mayor proporción de este último material en el conjunto.

Hasta aquí, tal parece que la prueba de equivalente de arena lo único que establece es una relación volumétrica entre el contenido de arena y el contenido de arcilla en la muestra. Si así fuera, no estaría dando más información que un análisis granulométrico rápido con cribado en las mallas Nos. 4 y 200, quizá más sencillo de realizar. El valor de la prueba de equivalente de arena es que, por lo menos cualitativamente, va algo más lejos que la simple información anterior, al dar una idea, como se dijo, de la actividad de la fracción arcillosa.

El primer punto a cuidar es la concentración de la solución floculante que se use, pues como se hizo notar, de su poder floculante depende que se deposite más o menos arcilla en el tiempo de prueba, lo que haría variar el equivalente de arena. Hveem intuyó que el carácter de la fracción fina se reflejaría de algún modo en la resistencia del suelo en conjunto y expresó esta resistencia por medio del parámetro *R*, obtenido en el estabilómetro y mencionado en el Capítulo IX.

La Fig. XII-1 (Ref. 8) muestra precisamente el efecto anterior, o sea la influencia de la actividad de los finos en el valor *R* dado por el estabilómetro.

Nótese que el efecto de un 5% de bentonita es similar al de un 21% de caolinita para la grava

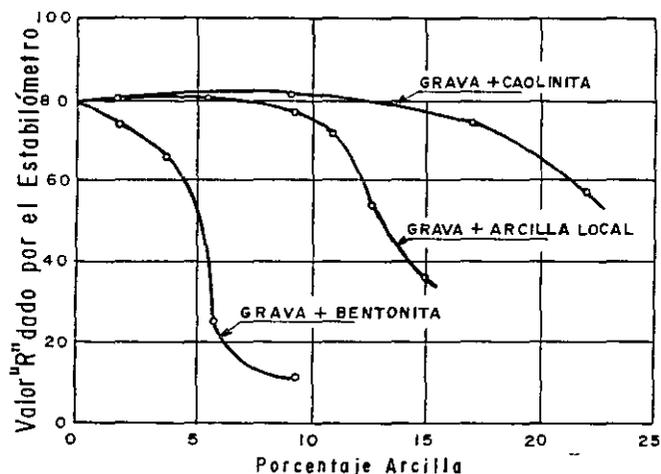


Figura XII-1. Efecto de la arcilla en el valor *R* (Ref. 8).

estudiada y ese es precisamente el nivel elegido por Hveem para fijar la concentración de la solución estándar. La solución estándar a utilizar en las pruebas de equivalente de arena es tal que proporcione el mismo valor para este último concepto en una grava que tenga 5% de bentonita y en la misma grava con 21% de caolinita.

Otra solución daría diferentes valores de equivalente de arena en todas las pruebas realizadas y desde luego es dudoso que la concentración elegida por Hveem posea ningún significado especial o sea la más apropiada para establecer la mejor correlación posible entre el valor del equivalente de arena y la actividad de los finos contenidos en el suelo.

Una vez fijada la concentración de la solución y estandarizada la prueba, la actividad de los finos se refleja en el resultado de la misma por lo menos de dos maneras. En primer lugar en la cantidad de arcilla que alcance a depositarse en los 20 min, que será diferente según sea el contenido y actividad de la fracción coloidal de la arcilla. En segundo lugar, la actividad de los finos se reflejará seguramente en la estructuración de la arcilla depositada en la solución estándar y a estructuras más cerradas o más abiertas, aun para la misma cantidad de arcilla, corresponderán diferentes valores de la 'altura de la arcilla' y, por lo tanto, diferentes valores del equivalente de arena. En general, en relación a este último aspecto puede decirse que cuanto más abierta sea la estructura, mayor actividad mostrarán los finos y se obtendrá un equivalente de arena menor.

No cabe duda de que los factores anteriores no están suficientemente estudiados, como no lo está la prueba en general, por lo que no es posible establecer cuantitativamente correlaciones entre el resultado

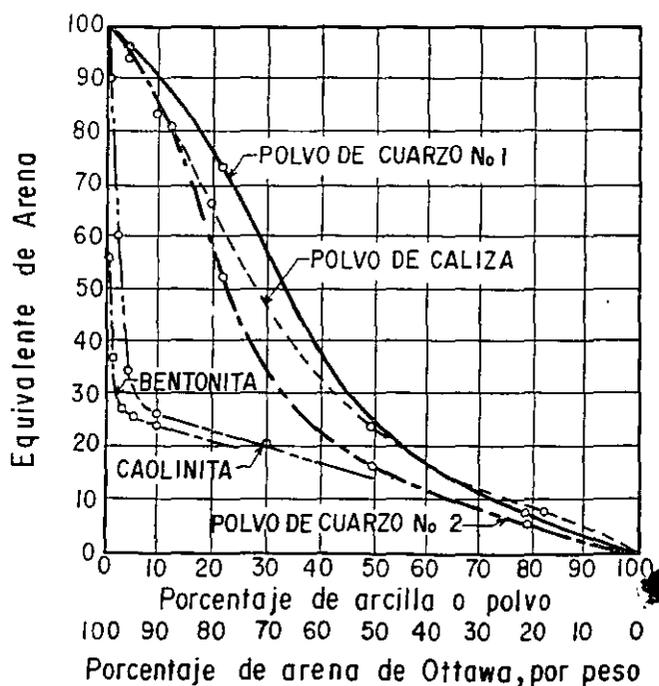


Figura XII-2. Efecto de varios materiales finos en el equivalente de arena (Ref. 8).

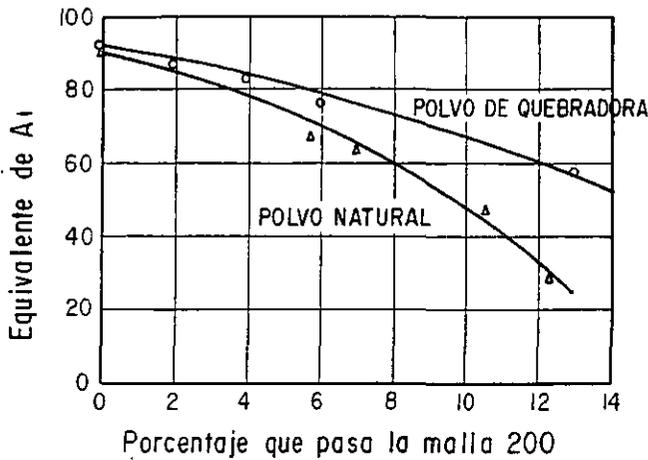


Figura XII-3. Efecto del polvo en el equivalente de arena del agregado fino de mezcla en planta, para carpeta (Ref. 8).

de la prueba de equivalente de arena y las propiedades mecánicas fundamentales, tales como la resistencia, la compresibilidad, la relación esfuerzo-deformación, la permeabilidad, etcétera; ni tan siquiera es posible decir, en el actual estado de conocimiento, si tales correlaciones existen en un sentido más o menos aproximado. Lo que queda entonces es calibrar la prueba con la experiencia personal de los ingenieros de campo y en este aspecto la prueba ha revelado y revela todos los días extraordinarias peculiaridades, muy especialmente como prueba para el control de la calidad de los materiales obtenidos de bancos.

Las Figs. XII-2, XII-3, XII-4, XII-5 y XII-6, todas ellas extraídas de la Ref. 8, muestran diversas corre-

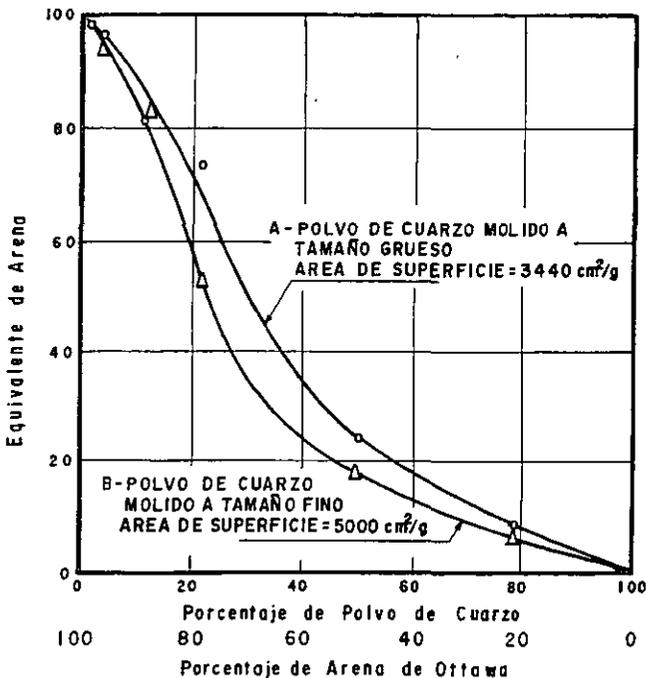


Figura XII-4. Polvo de cuarzo y arena de Ottawa. Efecto del tamaño de las partículas en el equivalente de arena (Ref. 8).

laciones experimentales de interés entre el valor del equivalente de arena y diferentes propiedades o condiciones del suelo. Las Figs. XII-2 y XII-4 deben interpretarse con cierto cuidado, en lo que se refiere al eje de abscisas. En la Fig. XII-2, por ejemplo, se mezcla a un cierto porcentaje de arena de Ottawa o bien los polvos de roca que se mencionan o bien las arcillas que se señalan, para obtener las diferentes gráficas que describen como varía el equivalente de arena al aumentar en la matriz de la arena los porcentajes de polvo de roca o los porcentajes de arcilla; de la misma manera funciona la Fig. XII-4.

En el Anexo XII-a de este Capítulo se describe en detalle la prueba de laboratorio correspondiente.

En lo que se refiere a las rocas, las principales pruebas que han de hacerse a los materiales producto de banco son las que definan su modo de fragmentación y su susceptibilidad a la meteorización. La tabla XII-3 contiene una relación de las pruebas índice que es más común hacer a las rocas, aún cuando en muchos casos de la práctica se omiten algunas de ellas o aun todas, utilizando el material simplemente con base en la observación del banco y en la experiencia precedente.

TABLA XII-3

Pruebas índice más comunes para materiales rocosos, con vistas a definir su comportamiento ingenieril (Ref. 9)

- Densidad de sólidos
- Peso volumétrico seco
- Contenido de agua
- Porosidad
- Índice de Alteración
- Permeabilidad al agua
- Permeabilidad al aire
- Alterabilidad
- Resistencia
- Deformabilidad

XII-4 MATERIALES ENCONTRADOS EN LOS BANCOS (Refs. 10 y 11)

A. Alteración de las rocas

Los materiales que el ingeniero encuentra en los lugares de posible explotación son suelos o rocas que han soportado en ese sitio numerosos cambios por evolución o por revolución, los que han dejado sus huellas, hasta formar los materiales que sea posible encontrar en la actualidad.

Probablemente toda la corteza terrestre procede, como se sabe, de algo que en origen fue un fluido viscoso y que lentamente se endureció hasta formar rocas ígneas. Los procesos de meteorización, favorecidos por agrietamientos y acciones tectónicas fueron formando, a partir de la matriz original, masas residuales, antecedentes de suelos residuales, producto "in situ" de la descomposición, la solución y la des-

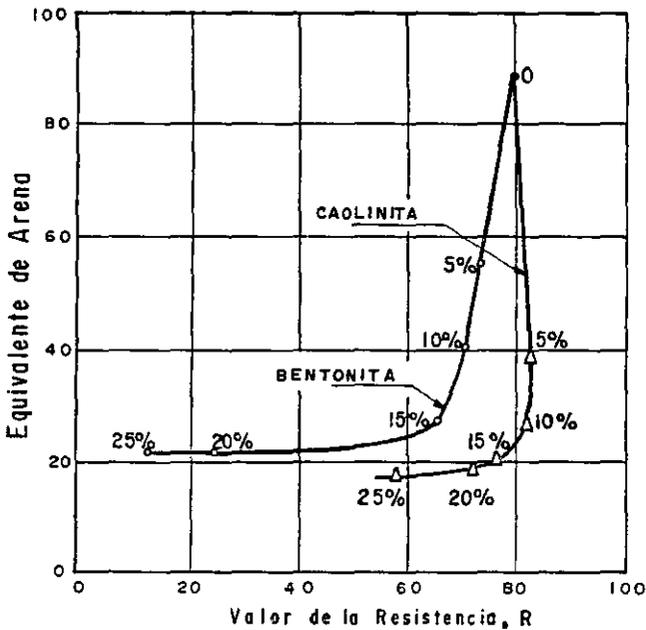


Figura XII-5. Valor de la resistencia en relación al equivalente de arena en roca triturada con contenido variable de arcilla (Ref. 8).

integración. Como ya se vio, muchos de estos productos pueden ser transportados por la gravedad, el viento, el agua o el hielo, para formar, en nuevas con-

Relación de componentes de la mezcla			
Componentes en Menor Proporción:	Componentes en Mayor Proporción		
	ARENA	LIMO	ARCILLA
ARENA	o	φ	⊖
LIMO	⊖	+	+
ARCILLA	⊖	+	-

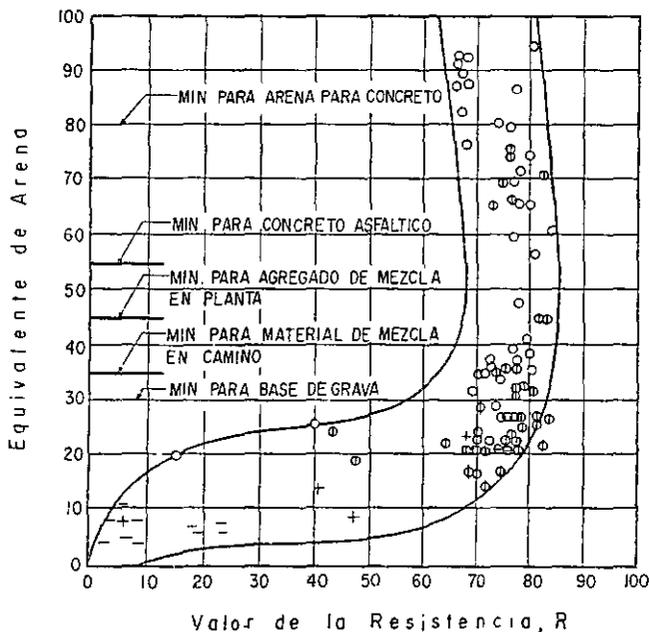


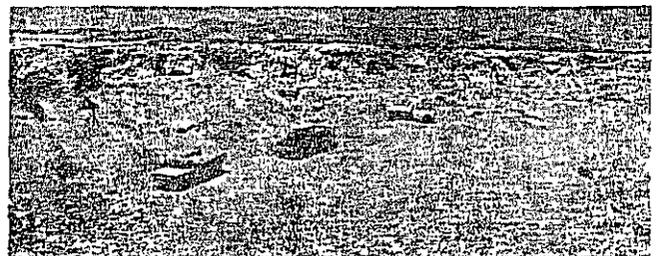
Figura XII-6. Equivalente de arena en relación al valor de la resistencia (Ref. 8).

diciones de localización y ambiente los suelos transportados.

Los suelos transportados y depositados en un nuevo lugar pueden continuar intemperizándose en ese lugar o ser retransportados y redepositados en un nuevo ambiente. Otros se endurecen por consolidación y cementación formando rocas sedimentarias. Muchos organismos marinos o que viven en las aguas contribuyen fundamentalmente a la transformación en rocas de los sedimentos previos producidos por meteorización. Las rocas sedimentarias quedan sujetas a la misma distorsión y fracturamiento que la tectónica produce en las rocas ígneas y, de la misma manera que a éstas, las afectan los cambios ambientales, que las meteorizan para producir nuevos suelos residuales, en los que recomienzan los procesos de erosión, transporte y creación de nuevos depósitos.

Además de estar sujetos a la meteorización y a la erosión, las rocas sedimentarias que van quedando cubiertas por sedimentos acumulados pueden ir quedando también sometidas a aumentos de temperatura, de presión y a la acción de nuevos estados de esfuerzos. Como consecuencia, su estructura mineral puede alterarse químicamente o reagruparse físicamente, para producir las rocas metamórficas. Estas nuevas rocas pueden parecerse a sus rocas madres, pero normalmente son más cristalinas, más densas y más duras. De nuevo, las rocas metamórficas quedan sujetas a meteorización donde quiera que queden bajo el efecto de un ambiente externo, por lo que pueden formar suelos residuales, que posteriormente pueden ser erosionados, transportados y mezclados en nuevos depósitos sedimentarios. En rigor, las rocas ígneas también pueden metamorfizarse por calor, presión o esfuerzo cortante, pero los cambios que sufren por ello suelen ser menos drásticos que los que se tienen en rocas sedimentarias. Finalmente, las rocas metamórficas se pueden retransformar en ígneas, por calor, presión o adición de nuevos minerales procedentes de masas fluidas.

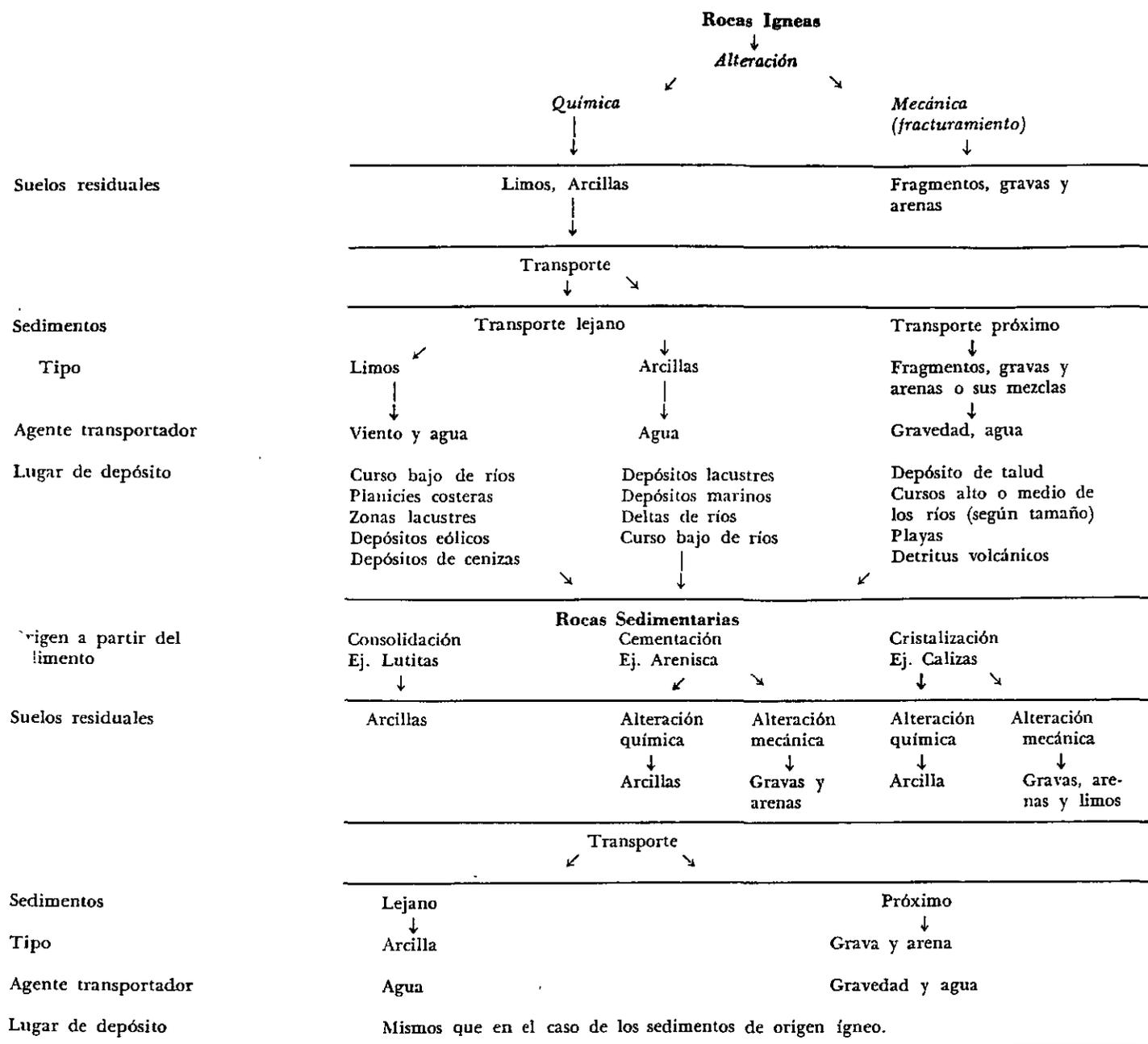
En el Capítulo II de esta obra se mencionaron desde un punto de vista mineralógico las principales rocas que el ingeniero encuentra en la corteza terrestre, así como los sedimentos más comunes que esas rocas pueden producir. De la misma manera se mencionaron allí someramente lo que podría considerarse las características geológicas de las rocas. No se insistirá aquí en esos aspectos, pero en cambio, convendrá insistir algo en la dinámica de la alteración de las



Explotación de un gran banco en roca alterada.

TABLA XII-4

Dinámica de la alteración de las rocas y la formación de suelos residuales y transportados



Rocas Metamórficas

Temperatura, presión, etc., actuando sobre los sedimentos. Análogos suelos residuales y transportados que las otras rocas. (Gravas, arenas, limos o arcillas.)

rocas, en la génesis de los suelos residuales y transportados y en una descripción, aunque sea breve, de las formaciones que el ingeniero puede encontrar en su búsqueda de bancos y de los materiales que más comúnmente aparecen en ellas.

La tabla XII-4 presenta en forma esquemática las transformaciones de las rocas que producen suelos, los distintos tipos de éstos y la influencia de los factores de meteorización y transporte.

La alteración de una roca es siempre un modo de adaptarse a su ambiente; por ello, cuando una

roca antes no expuesta queda sujeta a la meteorización, se altera para adaptarse al nuevo ambiente que le ha sido impuesto. Lo mismo sucede cuando la roca es fragmentada o triturada y colocada en una estructura ingenieril. Por tal motivo el ingeniero debe considerar que todas sus manipulaciones son fuente de alteración futura. En la gran mayoría de los casos, los procesos de alteración que el ingeniero desencadena ocurren a escalas de tiempo dentro de las cuales la vida útil de una obra representa un periodo insignificante, pero no siempre ocurre así y los casos

de alteración muy rápida son, naturalmente, los que más interesan desde un punto de vista práctico. Un ejemplo típico es la alteración de lutitas en arcillas, sobre todo en presencia de agua.

Las rocas que se usan en las diferentes estructuras de una vía terrestre procedentes de los bancos de materiales quedan sujetas en general a compresión y, muchas veces, a abrasión e impacto; todas estas son causas adicionales de alteración. Entre las formas de alteración, la rotura de granos puede producir cambios fundamentales en los materiales de pavimento en corto tiempo; el agua y el desarrollo de presiones neutrales también pueden producir efectos notorios dentro de la vida útil. Correspondientemente, el ingeniero deberá investigar las características de alterabilidad teniendo en mente estos hechos.

Algunos usos de materiales en las vías terrestres imponen condiciones muy especiales a los agregados de banco que vayan a usarse. La tecnología del concreto que se considera fuera del alcance de esta obra, ofrece abundantes ejemplos de la afirmación anterior, pero no es este material el único que impone condiciones. Las mezclas asfálticas también requieren características específicas en los agregados pétreos, llegándose en algunos casos al rechazo de los mismos al no verlas cumplidas. Las rocas que contienen un alto porcentaje de minerales de silicio (rocas ácidas) no sirven generalmente para carpetas, por no presentar una liga adecuada con el asfalto. También dan problemas en las mezclas asfálticas algunos agregados que tienen tendencia a alterarse rápidamente en arcillas, como sucede con algunos basaltos, a despecho de la excelente calidad que en general esta roca tiene cuando se usa en mezclas asfálticas.

La alteración química de las rocas produce como última consecuencia arcillas cuya mineralogía se relaciona con la de la roca madre; así por ejemplo los granitos tienden a formar arcillas caoliníticas, en tanto que los basaltos, ricos en minerales ferromagnesianos, dan lugar a arcillas montmoriloníticas. En el Capítulo VI se presentó el fundamental concepto de perfil de meteorización y los tipos más comunes de éstos de acuerdo con la roca en que se producen.

B. Tratamientos

Los materiales procedentes de bancos que van a ser usados en terracerías no suelen sujetarse a ningún tipo de tratamiento especial y se utilizan tal como se obtienen; en esa condición natural deberán cumplir las especificaciones constructivas y de calidad que se señalen, pero se considera universalmente irrazonable desde el punto de vista económico el empleo de tratamientos, salvo casos muy especiales.

En los trabajos de pavimentación, por el contrario, es usual, como ya se mencionó, someter los materiales a diversos tratamientos que los adecúen a sus funciones. Los tratamientos más usuales son:

1. Eliminación de desperdicios

Se trata, por ejemplo, de eliminar en bancos suelos un determinado porcentaje de partículas cuyo tamaño máximo sobrepasa el que se haya considerado en el proyecto (frecuentemente en el orden de 7.5 cm). Esta eliminación se hace muchas veces a mano.

2. Disgregación

Esta operación se hace generalmente en bancos de suelo duro, de roca muy alterada o en materiales con la consistencia de aglomerados poco cementados. La disgregación se hace muchas veces con arados y cuchillas dispuestas en las máquinas o con rodillos de compactación del tipo pata de cabra o similar.

3. Cribado

Generalmente se utiliza para lograr en un material de naturaleza friccionante una granulometría adecuada o para eliminar porcentajes altos de partículas mayores que el tamaño máximo requerido, que generalmente son desperdiciadas; se ha dicho que porcentajes arriba de 10 ó 15 % conviene ya eliminarlos cribando.

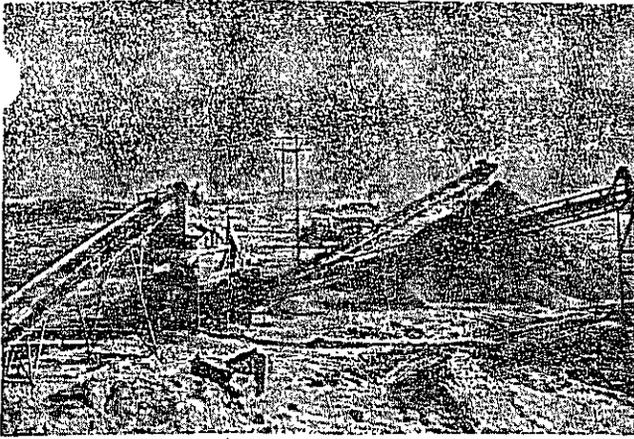
Las instalaciones de cribado para eliminación de tamaños grandes suelen ser muy sencillas. Normalmente el material se maneja por gravedad, recogiendo en un camión el material que pasa una criba determinada. Este método tiene peligros de segregación, que conduce a la obtención de materiales no uniformemente mezclados. Cuando se requiere una buena dosificación de materiales en diversos tamaños ha de recurrirse a plantas de cribado, con cribas vibratorias, dispuestas en dos o tres niveles; el ritmo de vibración suele ser de 1,200 ciclos por minuto. Estas plantas se utilizan generalmente en combinación con equipos de trituración.

En la actualidad se usan cada vez más cribadoras por centrifugación, con cribas cilíndricas concéntricas que giran a la vez, de manera que el material va pudiendo pasar de una a otra recorriendo, según su tamaño, diferente camino desde el centro a la periferia del sistema. Es obvio que este tipo de plantas garantizan mejor que ninguna otra la obtención de dosificaciones precisas.

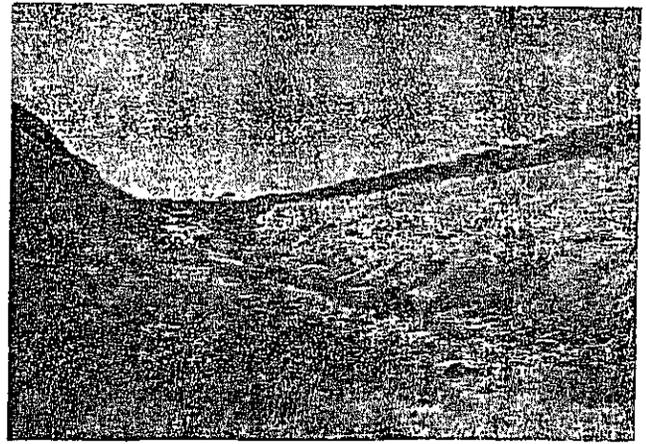
4. Trituración

Es el tratamiento a que generalmente se recurre para llegar a la granulometría adecuada a partir de materiales naturales muy gruesos o de fragmentos de roca. Es normal realizar la trituración en varios pasos o etapas, según el producto final a que deseé llegarse; así se habla de trituradoras primarias, secundarias o terciarias.

La trituración suele realizarse en plantas muy completas que incluyen alimentadores, bandas de



Vista de una planta de trituración de materiales.



Zanja para préstamo lateral.

transportación, plantas de cribado, elevadores de material y dispositivos trituradores de quijada, de impactos, de rodillos de diferente separación, etcétera.

Es importante la relación de tamaños de la partícula en las etapas iniciales y final del proceso, que define el tipo de equipo que ha de usarse y el costo de la operación. También es importante la forma que adquiera la partícula triturada, pues de ella depende en mucho el comportamiento mecánico posterior. Una forma equidimensional, con aristas vivas es obviamente la más deseable.

Es usual hablar de trituración total o parcial, dependiendo la intensidad del proceso requerido en un caso dado.

5. Lavado

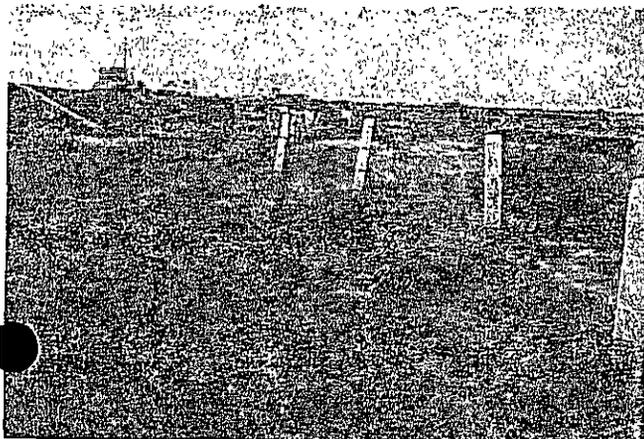
Se aplica en materiales contaminados por arcilla, materia orgánica o polvos; frecuentemente se usa en conexión con operaciones de trituración y cribado.

El lavado se realiza por diversos sistemas, desde el chiflonaje durante el cribado, hasta el empleo de tanques lavadores, en los que el material es removido con paletas mecánicas, mientras se le somete a riegos de agua a presión.

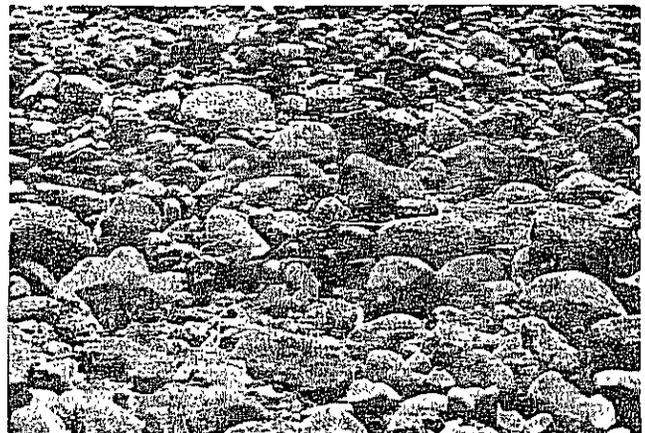
C. Tipos de Bancos

Ya se mencionó en otra parte de esta obra (párrafo XI-14) que las fuentes más típicas de aprovisionamiento de materiales son el préstamo lateral, la compensación longitudinal o transversal y el uso de bancos específicos. En lo que sigue se proporciona alguna información general sobre tipos de bancos que, si bien se enfoca al tercer tipo de fuente, pudiera comprender en algunos casos a las dos anteriores.

Los depósitos de río reciben el nombre genérico de aluviones. Debido a que el agua a lo largo del curso tiene ocasión de erosionar materiales muy diferentes, es normal que los aluviones estén formados por materiales muy variados; sin embargo la deposición sí ocurre siguiendo algunas leyes generales fáciles de entender. La capacidad del agua para transportar sedimentos depende de la velocidad de la corriente y de su gasto; esto condiciona un gran poder erosivo en las zonas de curso alto, en que la corriente suele tener fuertes pendientes y, por ende, grandes velocidades, por lo que el agua es capaz de arrastrar sedimentos muy gruesos, del tamaño de la grava y la arena y aún fragmentos de roca, que van rodando cauce abajo. En el curso medio, la pendiente de los ríos disminuye y correspondientemente lo hace



Aspecto de un préstamo lateral.



Detalle de un depósito aluvial grueso.

la velocidad, por lo que se restringe la fuerza erosiva por este concepto; es muy común que por esta razón en el curso medio de los ríos se depositen los materiales del tamaño de la grava y de la arena, siendo estas zonas muy apropiadas para la búsqueda de estos bancos. En la etapa final de su recorrido, el río usualmente pierde mucha velocidad, entra a zonas más planas, divaga y busca su salida en el mar, en un lago o en otro río importante; en esta etapa, el poder erosivo disminuye aun más, especialmente cerca de la desembocadura, en donde suele ejercerse un efecto de frenaje muy importante por parte de las masas de agua comparativamente estáticas a las que el río terminará por desembocar. Esta es la zona en la que la corriente deposita los materiales más finos, del tipo de los limos y las arcillas. Si el régimen se hace muy lento en la desembocadura, se formará un delta, con predominio notorio de sedimentos muy finos.

Al régimen anterior, que se podría considerar ligado al régimen de velocidad del escurrimiento, se superpone el efecto del gasto en el poder erosivo, que hasta cierto punto es contrario. En la parte alta del río se tenderá a tener gasto bajo y, por este concepto, el poder erosivo de la corriente será pequeño. El

gasto tenderá a aumentar en el curso medio y, sobre todo, en el inferior y, por ello, siempre considerando exclusivamente este efecto, el poder erosivo y de transporte de la corriente irá creciendo a medida que ésta se acerca al mar. El efecto del gasto es importante en los ríos que tienen tendencia a sufrir fuertes crecientes, tanto más, cuanto que a dichas crecientes suelen asociarse velocidades anormalmente altas.

En términos generales la influencia de la velocidad en el régimen de erosión es mayor que la del gasto, pero en ríos que se inundan con mucha violencia ambos efectos pueden igualarse y la situación aun pudiera invertirse.

El ingeniero que busca bancos suele tener información bastante precisa en cuanto a la naturaleza del río que tenga en estudio. Si éste no es susceptible de sufrir crecientes violentas en periodicidad corta, prevalecerá el esquema de depósito que se describió al hablar del efecto de la velocidad. Se podrá esperar encontrar boleos y gravas en el curso alto, gravas y arenas en el medio y limos y arcillas, en el bajo y en la desembocadura. Si el río tiene crecientes importantes relativamente poco espaciadas en el tiempo será muy probable encontrar sedimentos más gruesos en las zonas más bajas, especialmente en los meandros, en las llanuras de inundación o en las terrazas fluviales vecinas, lugares en donde la velocidad, aun en creciente extraordinaria, tenderá a disminuir.

Los sedimentos que sea dable encontrar en el curso de un río también dependen mucho de la naturaleza de las formaciones que el río atraviesa. Un ejemplo muy típico de esto lo constituyen muchos ríos de la vertiente Pacífico de la República Mexicana y muchos ríos andinos en Sudamérica. En estos lugares, las cadenas montañosas llegan hasta muy cerca del mar, dejando una planicie costera muy reducida, de manera que la mayor parte del curso de los ríos (nunca muy largos) ocurre por zonas de muy fuerte pendiente, que dan a la corriente mucho poder erosivo; además, por lo lluvioso de estas regiones en algunas épocas del año o por el efecto del deshielo, es normal que estos ríos tengan algunos meses de muy grande gasto. Todo lo anterior hace que en esas épocas el río se precipite hacia la exigua llanura costera con grandes cantidades de sedimento grueso, por lo menos del tamaño de la arena, arrancados de las formaciones rocosas de la montaña. La velocidad con que el río irrumpe en la planicie y el gasto importante hacen que se produzcan grandes inundaciones, durante las cuales se deposita el acarreo arenoso, el cual puede encontrarse prácticamente hasta la desembocadura. En el caso de los ríos mexicanos de la vertiente del Pacífico, este fenómeno se ve estimulado por las grandes formaciones de granito alterado que el río cruza en la serranía y que son fuente de grandes acarreos arenosos. En situaciones como ésta, el ingeniero podrá encontrar bancos de arena y grava, aun en zonas en que otros ríos de cauce más extendido depositan ya únicamente acarreos finos.



Un depósito aluvial típico.

En resumen, los depósitos que sea dable encontrar en valles fluviales, llanuras de inundación y en raras y abanicos aluviales son relativamente variables, no sólo en naturaleza mineralógica, sino también en tamaño y dependen del desarrollo de la corriente, de su régimen hidrológico y de las formaciones que se atraviesan.

En las zonas en que las serranías se juntan con las planicies de costa es muy frecuente encontrar sistemáticamente de trecho en trecho los denominados depósitos de pie de monte, grandes formaciones de arenas limosas y gravas, inclinadas y ondulantes, dejadas por los ríos, que bajan y pierden velocidad al entrar en la planicie.

Los lagos actúan como depósitos de sedimentación para las corrientes que a ellos llegan. Es común que cuando el río entra al lago tienda a depositar en la orilla los sedimentos más gruesos que aún traiga en suspensión, dependiendo el tamaño del régimen anterior del río; de esta manera, es frecuente que la desembocadura del río en el lago forme un delta más o menos importante, en el que será posible encontrar arenas o limos. Los sedimentos más finos penetran en el lago con el agua del río y se depositan en zonas más profundas. En épocas del año de aguas abundantes el depósito principal está formado por el material limoso que haya alcanzado a entrar al lago y las arcillas más gruesas, pero las arcillas más finas

depositan más bien en las épocas de estiaje, cuando las aguas del lago están más tranquilas. Por lo anterior, los depósitos lacustres suelen ser estratificados, con capas bastante homogéneas de materiales finos, en las que se manifiesta cierta tendencia a una alternancia de estratos limo-arcillosos con otros de arcillas muy finas. El estancamiento de las zonas lacustres suele propiciar la deposición de materia orgánica, por lo que no es raro que en los depósitos lacustres haya suelos de tal naturaleza o turbas, generalmente estas últimas en las partes más superficiales. También es común la presencia de esqueletos silicosos de microorganismos y conchas calcáreas, que se incorporan al conjunto.

En México es relativamente frecuente encontrar depósitos lacustres en lugares donde el correspondiente lago ha desaparecido desde hace mucho tiempo, dando lugar a zonas muy problemáticas, tanto desde el punto de vista de cimentación de obras viales, como de localización de bancos de materiales apropiados.

En México, al igual que en otras partes, son relativamente frecuentes en zonas desérticas y montañosas, ríos que no desembocan en ningún cuerpo de agua, sino que desaparecen, extendiéndose en una zona plana, en la cual forman un verdadero abanico aluvial. Naturalmente se trata de ríos de régimen intermitente, esencialmente muy esporádico, que no han tenido aun la oportunidad de labrarse un cauce completo y que, al perder abruptamente el confinamiento que tenían en el trayecto montañoso, quedan sin capacidad de

transporte. En estos abanicos aluviales se depositan al mismo tiempo prácticamente todos los sedimentos que traiga el río, sin ninguna clasificación por tamaños, por lo que en ellos puede encontrarse depósitos muy heterogéneos, con abundancia de grava, arenas y limos.

El viento es otro elemento de transporte fundamental; arrastra sobre el suelo partículas relativamente gruesas y suspende y transporta limos y arenas muy finas. La distancia de acarreo depende del tamaño de la partícula y de la fuerza del viento; varía desde pequeños trechos de algunos metros, hasta muchos kilómetros.

Un depósito eólico muy típico es el loes. El origen de los loes suele estar en depósitos glaciares o en zonas desérticas, a partir de los cuales sobrevino el transporte del viento; el loes primario está formado por partículas de limo tal como el viento las depositó, sin ninguna alteración química posterior, en tanto que en el loes secundario ha habido ya alteración química, generalmente por el agua. El predominio, de las partículas de limo es grande en todos los loes, pues las arenas generalmente son demasiado gruesas para sufrir tanto transporte aéreo y las arcillas se defienden mucho más del embate del viento. Al depositarse, las partículas adquieren una estructura panaloide extremadamente suelta, en cuyos nexos suelen depositarse arcillas, carbonatos de calcio y óxidos de hierro, que dan al conjunto buena estabilidad, que se pierde si el agua lava y disuelve esas ligas. Por esta causa, muchos ingenieros prefieren, con razón, exponer los loes en cortes verticales, obteniendo mejores resultados que con taludes inclinados, más expuestos a las lluvias.

Los loes son buenos y abundantes bancos para material de terracería, pero pueden presentar problemas de rebote elástico cuando se usan en la capa subrasante, por lo que no conviene aceptarlos para este fin sin pruebas especiales. En general, el material es muy sensible a la compactación, la cual puede mejorar grandemente su comportamiento mecánico. Como quiera que los loes aparecen en amplias extensiones y depósitos profundos, en las zonas cubiertas por ellos no suelen aparecer otros materiales, por lo que éstos deberán buscarse o fuera de la formación o en cerros no cubiertos; por su gran porosidad, las aguas superficiales se infiltran, de manera que en las zonas de loes, sobre todo primarios, tampoco habrá arroyos susceptibles de proporcionar gravas o arenas.

Otra formación eólica típica son los médanos de arena, fuente obvia de este material, aunque la cantidad que puede obtenerse no está muchas veces en correspondencia con la calidad, pues la arena resulta demasiado uniforme para muchos usos.

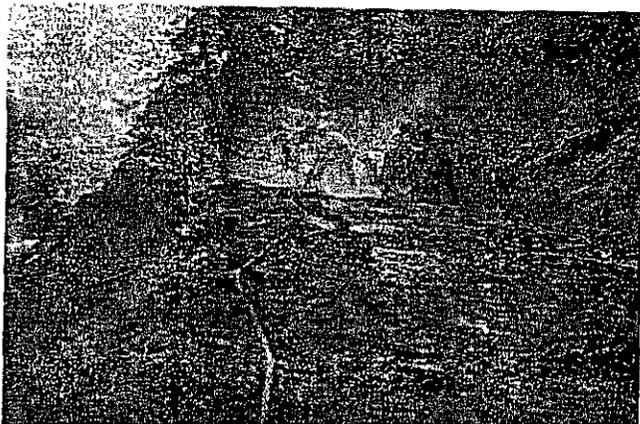
Los depósitos glaciares son otra fuente posible de materiales para construcción, aun cuando en México sean escasos. Pueden ser formados directamente por el hielo en movimiento o por las aguas del deshielo. Generalmente, en el primer caso, son depósitos muy

heterogéneos que adquieren la forma de un conjunto de boleos, empacados en una matriz areno-arcillosa. En el caso de los depósitos formados por el agua de deshielo, su naturaleza es mucho más parecida a un depósito fluvial, si bien la capacidad de arrastre de gruesos es en los glaciares, mayor.

Los suelos residuales constituyen otra frecuente fuente de materiales para construcción, cuya naturaleza varía mucho de acuerdo con la naturaleza de la roca madre y el grado de alteración sufrido. En general, las rocas sedimentarias producen suelos muy arcillosos, exceptuando las rocas muy silicosas. Las rocas ígneas pueden producir suelos arenosos o arcillosos dependiendo de lo seco o húmedo que sea el ambiente de alteración; las rocas de naturaleza ácida tienen mayor tendencia a producir suelos granulares, en tanto que las de naturaleza básica devienen casi siempre en arcillas.

Es común que los suelos residuales contengan partículas de todos los tamaños, puesto que no han sufrido ningún proceso de selección como los que producen los medios de transporte ya anteriormente tratados. Dependiendo del tamaño predominante, estas formaciones residuales pueden ser fuentes de abastecimiento de materiales para terracerías o subrasantes. En general, para este último caso es necesario someterlos a un proceso de eliminación a mano de fragmentos de roca más o menos intemperizada, mayores que 7.5 cm. De algunos suelos residuales provenientes de rocas muy silicosas o poco alteradas, es posible obtener materiales para sub-bases o bases, especialmente si se van a tratar con cemento o cal, sometiéndolos a procesos de lavado, que eliminen sus finos o a trituración parcial que eliminen los tamaños mayores que los convenientes.

En la búsqueda de materiales para pavimentación, una fuente indiscutible la constituyen las formaciones rocosas sanas donde quiera que aparezcan, exceptuando naturalmente aquellas cuya naturaleza arcillosa no las hace adecuadas para estos fines. Estos materiales deberán ser triturados totalmente y, en algunos casos, sujetos a tratamientos especiales para mejorar alguna característica específica como, por



Preparación de un lecho de roca para su remoción con explosivos (Barranación).

ejemplo, su afinidad con el asfalto. Durante la explotación de estos bancos deberá tenerse especial cuidado en evitar las zonas alteradas o la contaminación con arcilla que rellene fracturas o grietas, pudiendo llegarse en algunos casos al recurso del lavado para eliminar estos materiales indeseables.

Conviene dedicar algunos comentarios a algunos tipos de materiales especiales que se han utilizado con frecuencia en la técnica mexicana.

1. Conchuela

Se trata de formaciones de residuos calcáreos de conchas de moluscos, que se encuentran a veces en grandes volúmenes en zonas próximas al mar. Generalmente el material muestra un avanzado grado de alteración y está formado por pequeñas lajitas, fragmentos de la concha original. La granulometría del conjunto es defectuosa y no satisface requisitos de pruebas de desgaste. Sin embargo, la utilización de este material en calles, caminos y aun aeropistas ha dado resultados aceptables, inclusive en bases asfálticas, construidas por el método de mezcla en el lugar, sin adicionar a la conchuela ningún material pétreo.

2. Escorias de fundición

Son materiales frágiles, vidriosos y muy duros, que se trituran sin producción de finos, que se han utilizado exitosamente como base de pavimento en muchas partes. Su excesiva dureza ha llegado a ser un inconveniente en la trituración.

3. Desperdicios de minas

Resultan abundantes en las regiones mineras. Son materiales pétreos que generalmente aparecen con la granulometría excesivamente uniforme, consecuencia del proceso industrial que los produjo; dependiendo de éste, el tamaño de las partículas puede variar mucho, desde el correspondiente a las arenas muy finas hasta 5 ó 7 cm.

XII-5 EXPLOTACION DE BANCOS

La explotación de bancos de roca o suelo se hace utilizando determinados equipos con características y usos bien establecidos por la experiencia previa de construcción. La selección de equipo adecuado para un caso particular será función de tres factores fundamentales:

- La disponibilidad de equipo.
- El tipo de material por atacar.
- La distancia de acarreo del material.

Establecida la clase de equipo, su tamaño es sobre todo función del volumen de la obra por ejecutar,

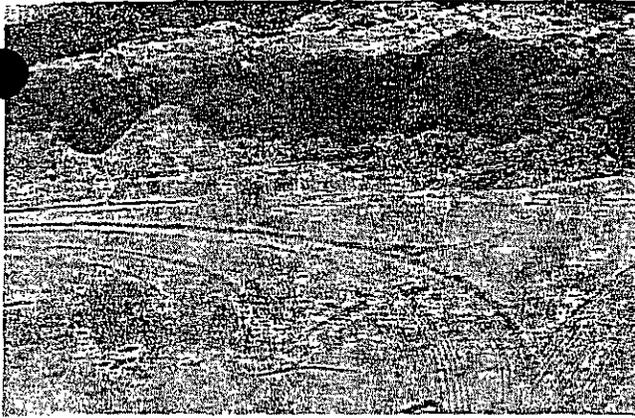
TABLA XII-5

Equipo común para explotación de bancos y transporte de materiales

Tipo de material	Despalme y limpieza (Si se requiere)	Preparación del banco	Excavación y carga		Transporte	
			Tamaño máximo (m)	Equipo	Distancia (m)	Equipo
ROCAS						
Roca sana (Superficialmente alterada)	Tractor de orugas con cuchilla frontal, inclinable	Barrenación y tronado de acuerdo al tipo de roca y al tamaño máximo por obtener	0.75 < x < 2.00	Pala mecánica	Menos de 150	Volquete o camión
			0.30 < x < 0.75	Pala mecánica o cargador frontal	De 150 a 2,500	Vagoneta o camión
			0.075 < x < 0.30	Pala mecánica o cargador frontal	De 2,500 a 100,000	Camión o remolque
Roca alterada (Superficialmente muy alterada)	Tractor de orugas o neumáticos con cuchilla frontal inclinable	Barrenación y tronado, escarificación y moneo o sólo escarificación	0.30 < x < 0.75	Pala mecánica o cargador frontal	Menos de 150	Volquete o camión
			0.075 < x < 0.30	Pala mecánica o cargador frontal	De 150 a 2,500	Vagoneta o camión
					Más de 2,500	Camión o remolque
Roca muy alterada (Suelo y fragmentos chicos superficiales)	Tractor de orugas o neumático, con cuchilla frontal inclinable o escrepa halada con tractor de orugas	Escarificación y moneo o sólo escarificación	0.075 < x < 0.75	Pala mecánica o Cargador frontal	Menos de 150	Volquete o camión
					De 150 a 2,500	Camión o vagoneta
					Más de 2,500	Camión o remolque
		Escarificación	x < 0.075	Escrepa	Menos de 150	Escrepa halada con tractor de orugas o motoescrepa
De 150 a 2,500	Escrepa halada con tractor neumático o motoescrepa					

SUELOS

	Tractor de orugas o neumático con cuchilla frontal inclinable	Escarificación y moneo	$0.30 < x < 0.75$	Pala mecánica o cargador frontal	Menos de 150	Volquete o camión
		Escarificación	$0.075 < x < 0.30$		De 150 a 2,500	Camión o vagoneta
	Draga	Ninguno	$x < 0.075$ Bajo el N. A. F.	Draga de almeja o de arrastre	Más de 2,500	Camión o remolque
Aluviones	Tractor de oruga o neumático con cuchilla frontal inclinable o escrepa halada con tractor de oruga	Escarificación	$x < 0.075$ Sobre N. A. F.	Escrepa	Menos de 150	Escrepa halada con tractor de orugas o motoescrepa
					De 150 a 2,500	Escrepa halada con tractor neumático o motoescrepa
Arenas, limos y arcillas	Tractor de orugas o neumático con cuchilla frontal inclinable	Escarificación cuando compacto, cementado o duro	$x < 0.005$	Pala mecánica Motoelevadora Cargador frontal	Menos de 150 De 150 a 2,500 Más de 2,500	Camión o volquete Camión o vagoneta Camión o remolque
	Escrepa halada con tractor de oruga o motoescrepa tractor	Escarificación cuando compacto, cementado o duro	$x < 0.005$	Escrepa	Menos de 150	Escrepa halada con tractor de oruga o motoescrepa
					De 150 a 250	Escrepa halada con tractor neumático o motoescrepa
	Draga de arrastre o de almeja	Ninguno	$x < 0.005$ Bajo el N. A. F.	Draga de arrastre o almeja	Menos de 150 De 150 a 2,500	Camión Camión o vagoneta
	Draga marina	Ninguno		Draga marina	Conducción hidráulica al	tanque de sedimentación



Banco típico de material para terracería.

del tiempo en que dicha obra debe realizarse y del espacio disponible para las maniobras.

En muchos países de desarrollo industrial limitado el aspecto de disponibilidad de equipo resulta decisivo. En la actualidad existen máquinas sumamente diversificadas, cuya utilización conjunta y racionalmente programada permite explotaciones muy eficientes y económicas, pero es norma común en muchas naciones el que no pueda disponerse en forma general de parques de maquinaria tan especializados; debe tenerse presente que, en esos países, la

quisición de máquinas es usualmente un renglón de importación que grava substancialmente un mercado de divisas que ha de cuidarse por muchas razones. De esta manera, haciendo a un lado algunas naciones de industrialización muy avanzada, lo común es que los procesos de explotación de bancos hayan de hacerse con base en algunos equipos tradicionales, de uso diverso y utilización frecuente. De hecho,

de ninguna manera debe excluirse la explotación manual, con pico y pala.

La tabla XII-5 presenta los equipos más comunes para la explotación de los bancos de materiales con que más frecuentemente trabaja el ingeniero de vías terrestres; en la misma tabla se anota el equipo de transporte usual, de acuerdo con la distancia de acarreo y el tipo de material.

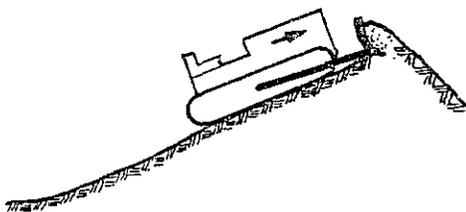
En la Fig. XII-7 se muestra en forma simplemente esquemática alguna de las operaciones que suele exigir la preparación de un banco, antes de ser explotado, que incluyen el desmonte y la limpieza superficial y un posible afloje del material para facilitar las maniobras de carga y transporte.

La Fig. XII-8 esquematiza alguno de los casos de explotación con pala mecánica, que es un equipo de uso frecuente (Tabla XII-5). El elemento de ataque de la pala es muy variable de acuerdo con la naturaleza y la posición relativa del banco. La cuchara normal se usa para cargar materiales rocosos o suelos, cuando están en frentes verticales o amontonados; la operación con draga de arrastre se utiliza cuando el material ha de ser recogido, como sucede cuando está a nivel inferior que la máquina o cuando está bajo agua; la almeja es útil cuando en una mezcla de abundantes fragmentos de roca y suelos, se desea seleccionar los primeros para su utilización.

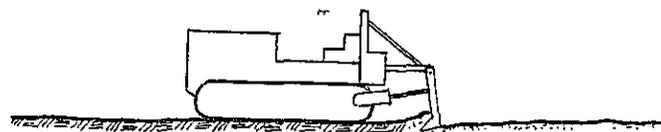
En la Fig. XII-9 se esquematiza el trabajo de un cargador frontal, muy utilizado en la práctica de las vías terrestres.

Las Figs. XII-10 y XII-11 muestran escepas, que pueden ser autocargables o que sirven únicamente para transportar (vagonetas), pero que han de ser cargadas en una maniobra adicional.

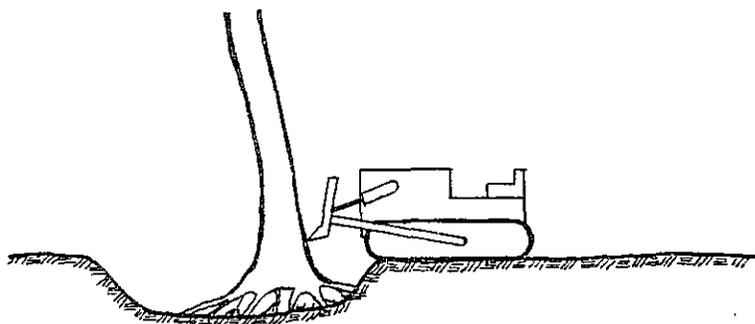
Es de señalar el uso cada vez mayor que se está



a) Limpieza del banco con tractor provisto de cuchilla frontal.



b) Preparación y afloje del banco con arado.



c) Desmonte.

Figura XII-7. Limpieza y preparación de un banco (Ref. 12).

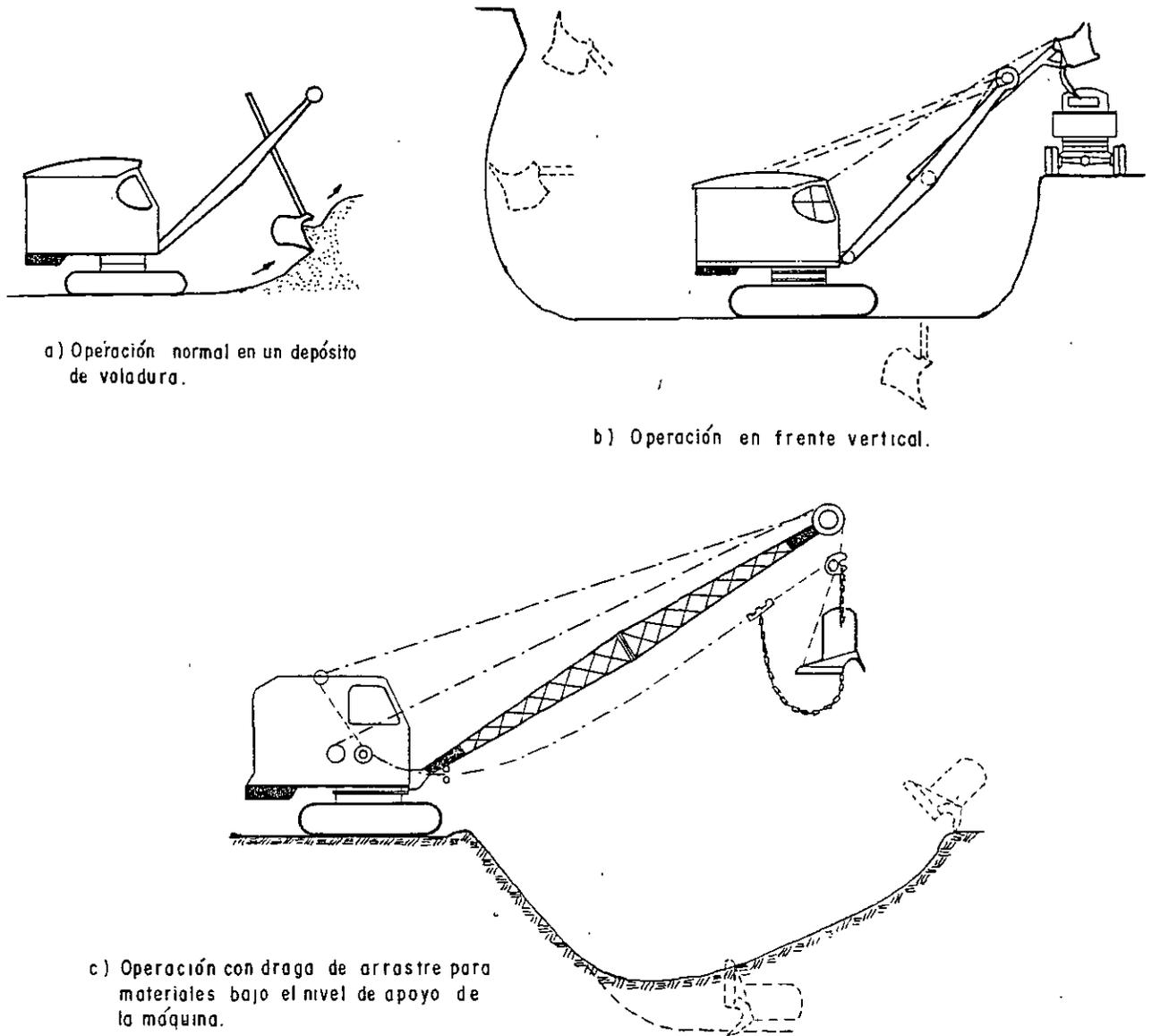


Figura XII-8. Explotación de un banco con pala mecánica.

haciendo de tractores pesados con arados para fragmentar los materiales hasta un grado tal que puedan ser removidos por el propio tractor o por otras máquinas, evitando así operaciones de barrenación y uso de explosivos, que siempre son más lentas y costosas. El tractor se utiliza también como máquina excavadora y empujadora, por efecto de su cuchilla frontal,

estando limitada la primera acción generalmente a no más de 50 cm; para estos trabajos suele recurrirse casi siempre al tractor de orugas, quedando reservado el de llantas neumáticas para maniobras de remolque de equipo de transporte a distancias cortas (entre 150 m y 2,500 m).

En la construcción pesada se impone cada vez más

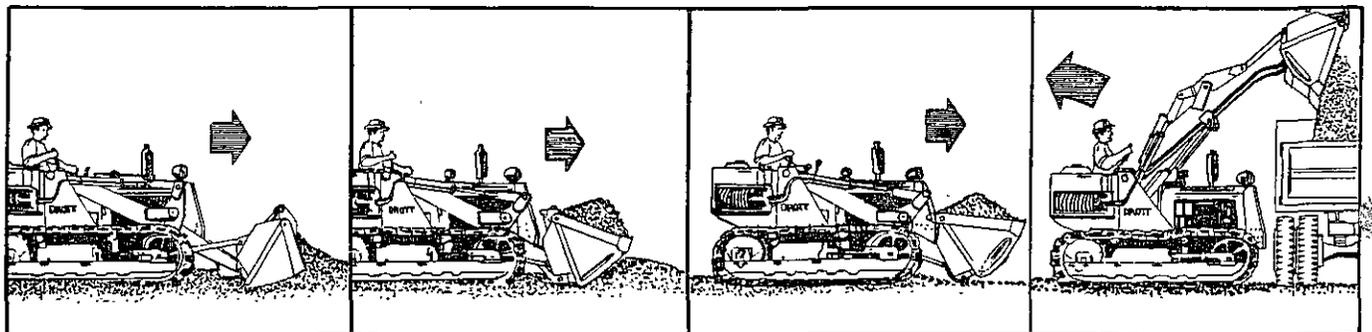


Figura XII-9. Trabajo de un cargador frontal en la explotación de un banco.

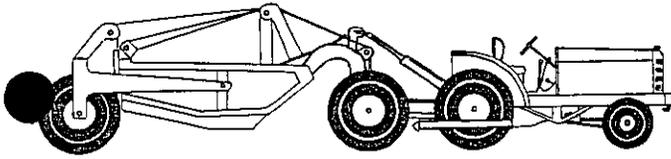


Figura XII-10. Croquis de una escrepa autocargable.

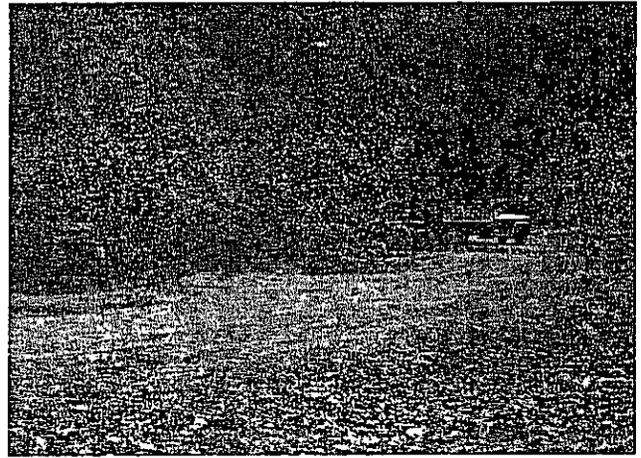
la utilización de escrepas auto-propulsadas y autocargables, cuando la naturaleza del material permite su operación, pues obviamente resultan equipos muy rápidos y versátiles en lo que se refiere tanto al material que con ellos se puede manejar, como a la distancia a que es económico efectuar el acarreo. Es frecuente que se ayude su capacidad de autocarga empujándolas con un tractor, el cual se emplea en la disgregación del material durante el tiempo de acarreo de la motoescrepa. Las escrepas no autopropulsadas se emplean remolcadas, generalmente por tractores de llantas y operan eficientemente en distancias de acarreo cortas.

También se ven cada vez con mayor frecuencia en los bancos de materiales cargadores frontales de brazos articulados, bien sea de orugas o sobre llantas; los primeros son más potentes y capaces de trabajar con fragmentos de roca más grandes o en terrenos más duros, pero los segundos son más rápidos en las idas y venidas y sobre todo en los giros. Acarreos muy cortos, de menos de cien metros se han hecho directamente con el cargador.

La pala mecánica exige frentes de ataque bien definidos y de volúmenes abundantes, de manera que no hayan de ser trasladadas con frecuencia. La gran mayoría opera sobre orugas, lo que permite que se adapten a cualquier tipo de terreno, aún con pendientes muy fuertes, conservando siempre buena estabilidad; las palas sobre llantas tienen mucha mayor capacidad de traslación, pero son inferiores en las cualidades nombradas inmediatamente atrás.

El transporte de los materiales suele hacerse en las vías terrestres casi universalmente en camión. Se exceptúan los acarreos muy cortos o los muy largos; en los primeros, como se dijo, pueden utilizarse vagonetas haladas por tractor de llantas u otros elementos similares, en tanto que en los acarreos muy largos, el ferrocarril o el transporte fluvial o marítimo suelen ser más económicos.

En la explotación de los bancos es fundamental establecer una relación adecuada entre la capacidad de las máquinas removedoras y excavadoras y los elementos de transporte; sólo así podrán evitarse costosas interferencias o tiempos ociosos. Conviene que la



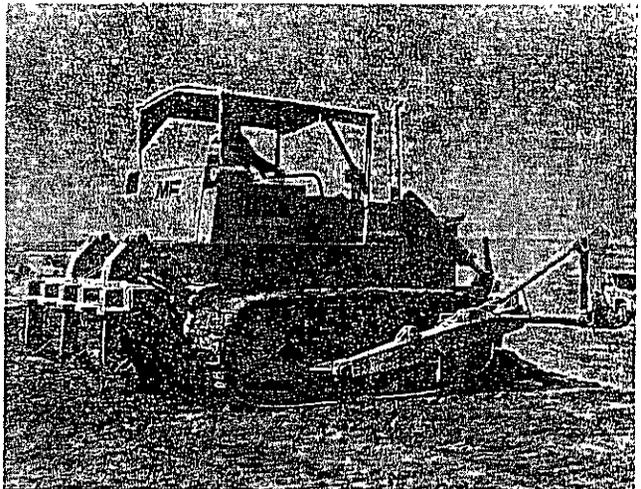
Explotación de suelos.

capacidad de la caja de los vehículos transportadores sea un múltiplo entero de la capacidad del elemento que excava o carga.

Un aspecto fundamental de la explotación de bancos de roca lo constituyen las operaciones de barrenación y uso de explosivos, que no serán tratadas en este lugar, pues constituyen toda una tecnología específica fuera del campo de acción de la Mecánica de Suelos aplicada. Obras especializadas, tales como por ejemplo la Ref. 13, podrán ser de ayuda a los ingenieros especialmente interesados en estos problemas.

Existen algunos casos especiales en la explotación de bancos que se presentan con cierta frecuencia y que ameritan un comentario particular.

En el caso de materiales para terracerías, a veces se explotan bancos en que se presentan en un mismo frente varios estratos de materiales todos aprovechables, pero de diferente calidad. En estos casos suele convenir efectuar la explotación de manera que se produzca la máxima mezcla posible de las distintas calidades, para llegar a un producto final lo más



Tractor equipado con arado para fragmentación de materiales térreos y rocas alteradas.

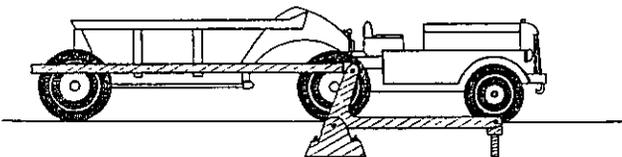


Figura XII-11. Croquis de una vagoneta para transporte de material.



Halado de escropa con tractor.

homogéneo posible. De otra manera se tendrán aleatoriamente situados en el cuerpo de la terracería capas de diferente comportamiento, lo cual nunca es conveniente.

En algunas zonas cársticas, de las que la Península de Yucatán es un buen ejemplo, existen grandes planicies en que los materiales aprovechables para terracerías (materiales más o menos finos de origen calizo, denominados sascab en el caso particular de Yucatán al que se ha hecho referencia) están situados bajo una costra de roca caliza, de espesor comprendido entre uno y uno y medio metros. Para poder extraer el material subyacente, ha de romperse la coraza que lo protege, lo que exige barrenación y explosivos. En estas zonas no es posible pensar en préstamos laterales y convendrá siempre recurrir a préstamos de banco, en los que rompiendo el área superficial mínima pueda obtenerse el máximo volumen del material, profundizando la excavación; lo anterior, a causa de lo cara que suele resultar la operación con explosivos. En estas zonas planas, los terraplenes nunca son altos y el uso de la roca caliza en ellos exige una fragmentación muy importante que no suele ser económica, pues el rendimiento de los



Explotación de un banco con pala mecánica.

explosivos en esta coraza de pequeño espesor es muy bajo; generalmente resulta preferible desperdiciar este material rocoso, retirándolo en grandes fragmentos.

La construcción de terraplenes ligeros, que suelen demandar los proyectos de terraplenes sobre suelos muy blandos y compresibles, suele imponer condiciones limitativas importantes en el uso de bancos de materiales y largas distancias de acarreo. El tezontle, espuma porosa de basalto, es un material muy utilizado en México para estos fines y en relación al cual hay, correspondientemente, bastante experiencia y mucha confianza. Los bancos de tezontle suelen presentar el problema de estar contaminados por frentes de basalto sano, de alto peso volumétrico, que, por lo tanto, deberán ser cuidadosamente evitados. En otras ocasiones aparecen mezclados en el tezontle grandes fragmentos de basalto, que han de ser removidos. Otras veces, los bancos de tezontle se presentan en frentes muy altos y son atacados por arriba, por razones de seguridad; como consecuencia, el material rueda mucho antes de amontonarse en el piso y ocurre que este tratamiento produce un excesivo porcentaje de polvos, que incrementa el peso volumétrico del suelo por arriba de lo conveniente. Frecuentemente este problema se conjuga con una explotación ingeniosa, produciendo rampas tendidas



Un gran banco de tezontle.

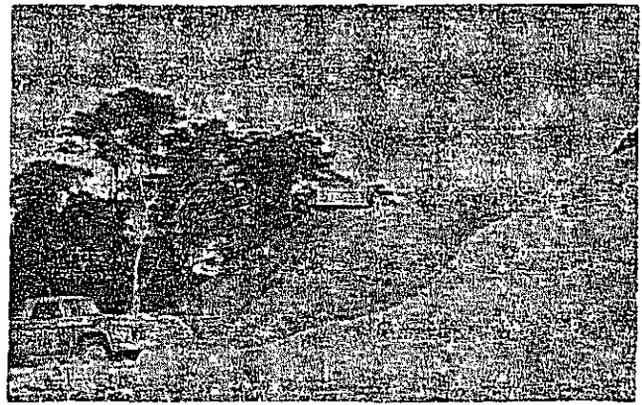
en que el material ruede poco y que, a la vez, puedan ser explotadas desde abajo sin riesgo, pero frecuentemente también, esta situación obliga al cribado del material.

En muchas llanuras costeras, en zonas pantanosas o en antiguas cuencas lacustres es común que no se encuentre superficialmente materiales de calidad apropiada para terracerías y, menos aún, para pavimentos. Ya se mencionó que en estos casos conviene localizar elevaciones y otros en que la probabilidad de encontrar materiales de mayor calidad será mucho mayor, pero si estos accidentes no existen ha de recurrirse a la explotación de materiales en elevaciones mínimas o en terrazas y ocurre que usualmente los suelos están demasiados húmedos, lo que no sólo impide su utilización inmediata, sino también la operación del equipo de explotación. En circunstancias como ésta, se ha encontrado útil abrir en cada banco varios frentes de ataque, extrayendo de cada uno capas de no más de 50 cm de espesor y procediendo alternadamente en los diversos frentes. Al dejar un frente sin ser atacado durante varios días, se logra que se seque por evaporación superficial y quede en condiciones de que se le extraiga una nueva capa.

En zonas lluviosas en que se trabaje por el método del préstamo lateral, se ha encontrado ventajoso iniciar la excavación en la parte más alejada del camino, a fin de que no se produzcan lugares de tránsito imposible en puntos intermedios del recorrido de acarreo.

En ocasiones, cuando se explotan bancos de suelos muy finos, resulta conveniente programar las operaciones de excavación de manera tal, que sea posible agregarles en el banco el agua necesaria para su compactación posterior en el terraplén. Como se sabe, los suelos muy finos, del tipo de las arcillas muy plásticas, poseen una baja permeabilidad y, por lo tanto, la incorporación de agua requiere de un tiempo considerable, siendo prácticamente imposible lograrla en el terraplén. Así, en algunos casos se ha encontrado satisfactorio inundar una cierta parte del banco o bien remover el material y apilarlo por capas delgadas a las que se les agrega el agua por el método de aspersión; transcurrido el tiempo necesario para la incorporación del agua, se carga el material y se transporta al sitio en que ha de ser utilizado, debiendo ser compactado de inmediato para evitar la pérdida de agua por evaporación.

Un caso similar al anterior se presenta cuando el material muy fino de un determinado banco contiene una cantidad apropiada de agua para su compactación. En este caso, deberán programarse las operaciones de manera que no se pierda dicha agua, ni en el banco, ni en el terraplén. Ha ocurrido que en un caso como el comentado anteriormente, una mala programación de los trabajos permitió, una vez abierto el banco y tendido el material en el terraplén, su secado durante un considerable lapso, habiéndose formado terrones muy duros, a tal grado difíciles de dis-



Almacenamiento de materiales para pavimento.

gregar y humedecer, que fue preferible desechar todo este material.

Los bancos localizados en depósitos fluviales deberán ser atacados en la época en que el río conserva los niveles más bajos, pues se corre el riesgo de que su explotación se vea imposibilitada durante las grandes avenidas, interrumpiendo el avance de toda la obra. Asimismo, un inconveniente adicional se encuentra en la contaminación que pueden sufrir los materiales por los suelos finos en suspensión que arrastran los ríos durante sus crecientes.

Algunos materiales, como los de composición calcárea, debido a su poca dureza, sufren una degradación importante en las manipulaciones necesarias para su carga, transporte, etcétera, por lo que, en estos casos, deberán evitarse todas las manipulaciones como almacenamientos provisionales o traslados de un depósito a otro, etcétera.

Durante la explotación de bancos de roca, en la que el estrato aprovechable se encuentra cubriendo otro de características inadecuadas, por ejemplo, una corriente de lava sobre una capa de arcilla, deberá atacarse el banco de manera que siempre se tenga sobre el piso constituido por el material inadecuado, una capa de por lo menos 30 a 50 cm de rezaga del propio banco, para evitar posibles contaminaciones.

Por último, se encuentra conveniente un comentario sobre el manejo de materiales almacenados para su posterior utilización. Todos los materiales constituidos por partículas de diferentes tamaños, tienden siempre a segregarse cuando se les coloca en un depósito, dejándolos caer desde la parte alta sobre el talud del mismo. Para corregir dicha segregación al cargar nuevamente el material deberá tomarse éste desde la parte baja, mezclando así todos los tamaños que presenta el frente completo del depósito y nunca mediante capas horizontales tomadas de la parte superior del depósito.

XII-6 ALTERACION DE ROCAS E IDENTIFICACION DEL GRADO DE ALTERACION

Tiene interés analizar, aunque sea someramente,

TABLA XII-6

Naturaleza de los problemas por la alteración de rocas en la Ingeniería Civil (Ref. 14)

Utilización de la roca	Problemas de seguridad		Características de superficie	Problemas de estética
	Estabilidad	Permeabilidad		
La roca como material de banco	X	X	X	X
La roca in situ	Cimentaciones	X	—	—
	Cortes	X	—	—
	Túneles	X	X	—

el problema de la alteración de las rocas, sobre todo con vistas a identificar el grado de alteración que puedan exhibir en un momento dado y a saber si una cierta roca se alterará apreciablemente en el periodo de vida útil de la obra. Esta degeneración podrá afectar directamente la estabilidad de una masa y, desde este punto de vista, el problema afectará sobre todo a la estabilidad de taludes y, en menor grado, a la técnica de cimentaciones; pero también puede ser preciso analizar el problema en materiales provenientes de bancos, pues la alteración rápida puede producir cambios de importancia en la permeabilidad de la masa, lo que preocupará sólo a los constructores de presas y más raramente a los de vías terrestres y también en las características de resistencia, deformabilidad y en la propia permeabilidad de materiales de pavimentos o balasto, lo cual sí constituye una preocupación específica de los ingenieros de vías terrestres.

La tabla XII-6, procedente de la Ref. 14, que, por otra parte sirve como glosario básico de los comentarios incluidos en este párrafo, sitúa al problema de la alteración de las rocas en el campo general de la ingeniería, distinguiendo a los materiales que se extraen de bancos para ser usados en la construcción, de los que ejercerán su función estructural permaneciendo en el lugar.

Deberá entenderse por alteración de la roca toda modificación que ésta sufra, la cual pueda tener interés para el ingeniero civil. La meteorización es un caso particular de la alteración, cuando las modificaciones son causadas por los agentes atmosféricos; el concepto se distingue de la erosión, porque este último implica disgregación y pérdida del material, de manera que según esta concepción del problema (Ref. 14), la erosión es, hasta cierto punto, un caso particular de la meteorización y ésta lo es de la alteración.

La tabla XII-7 (Ref. 14) sitúa la alteración en un marco concreto, distinguiendo sus agentes y los efectos específicos de éstos.

La tabla XII-8, procedente de la misma Ref. 14 relaciona las distintas sollicitaciones que actúan sobre las obras de la ingeniería civil, con los efectos finales

TABLA XII-7

Agentes de la alteración y sus efectos (Ref. 14)

Procesos	Agentes	Efectos
Meteorización	Atmosféricos	Cambios en la resistencia, la deformabilidad, la permeabilidad, el color, la textura, etc.
Desgaste	Erosión	Cambios en la geometría superficial
	Otros	

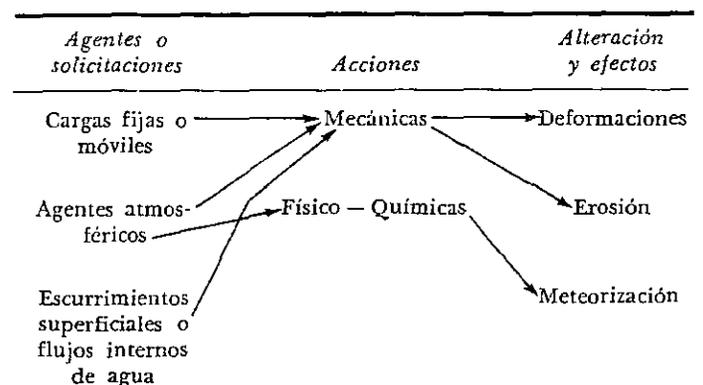
que producen, indicando el medio a través del que las diferentes sollicitaciones actúan.

La alteración de las rocas tanto puede empeorar como mejorar sus características desde el punto de vista de la ingeniería civil, pero naturalmente el interés del técnico está sobre todo centrado en los casos en que la alteración lo perjudica. De un modo general esta alteración tiene como límite la destrucción total de los nexos interparticulares y mineralógicos de la roca y su transformación en suelo. En lo anterior, se entienden por nexos interparticulares y mineralógicos de las rocas, los que no se modifican si éstas absorben agua (Ref. 15).

Los mecanismos de la alteración son esencialmente la disgregación, por fisuración o por pérdida de

TABLA XII-8

Mecanismos que producen alteración (Ref. 14)



nexos mineralógicos y la disolución, por erosión interna. Como consecuencia de estos mecanismos, la roca pierde peso y aumenta su porosidad y, por lo tanto, su capacidad de absorber agua y de expandirse como consecuencia de tal absorción. La pérdida de peso ocurre sólo por pérdida de material, en tanto que la absorción de agua es influenciada tanto por la pérdida de material, como por la disgregación. La expansión durante la absorción sólo es influenciada por la disgregación y, por ello, se utiliza como indicador específico de ese mecanismo de la alteración.

La absorción de agua que muestre una probeta de roca puede, por lo tanto, servir como índice del grado de alteración, si no se pretende conocer el mecanismo específico de esa alteración. Si se desea poner en evidencia el efecto específico de la disgregación deberá recurrirse a pruebas en que se analice tanto la absorción, como la expansión de la probeta al tomar agua. Si se desea conocer la influencia de la pérdida de material en la alteración, deberá investigarse en el laboratorio tanto la absorción de agua, como los cambios en el peso. Finalmente, si se pretende una investigación completa de los mecanismos de la alteración en un caso dado, deberán investigarse en el laboratorio tanto la absorción de agua, como la expansión de la probeta y los cambios de su peso (Refs. 14, 16 y 17).

Además de estos índices primarios de la alteración, habrá todo un conjunto de índices secundarios tales como los cambios en densidad, en resistencia o en permeabilidad, todos los cuales se ven afectados por la alteración.

La Fig. VI-17 del Volumen 1 de este libro puede servir para relacionar las características de resistencia de una roca, en este caso granito, con su comportamiento de absorción de agua en el laboratorio. Dado que las pruebas de absorción vienen utilizándose desde hace mucho tiempo, puede decirse que hay ya una experiencia acumulada bastante útil para correlacionar los dos efectos. Las medidas de expansión de muestras de roca se han realizado mucho menos, de manera que existe, correspondientemente, mucha mayor dificultad para establecer correlaciones experimentales confiables. La Fig. XII-12 proporciona resultados típicos de los que pueden obtenerse con pruebas de esta naturaleza. La prueba se realiza con inmersión total de una probeta cilíndrica, a cuya cabeza se ha conectado un extensómetro.

La Ref. 18 presenta algunas técnicas interesantes para desarrollar pruebas que permitan medir la porosidad y la permeabilidad al agua y al aire, que han servido de norma de partida a muchas técnicas de laboratorio.

Es probable que las propiedades de las rocas alteradas que determinan su utilización en las obras de la ingeniería, tales como su resistencia, su deformabilidad o su permeabilidad, constituyen índices más deseables del grado de alteración que otras propiedades, como la absorción de agua, cuyo sentido ingenieril estricto es mucho más difícil de establecer y que exige de correlaciones experimentales siempre subjetivas e inseguras. Sin embargo, es mucho lo que falta por investigar y estandarizar en estos terrenos.

La alterabilidad de una roca puede definirse como

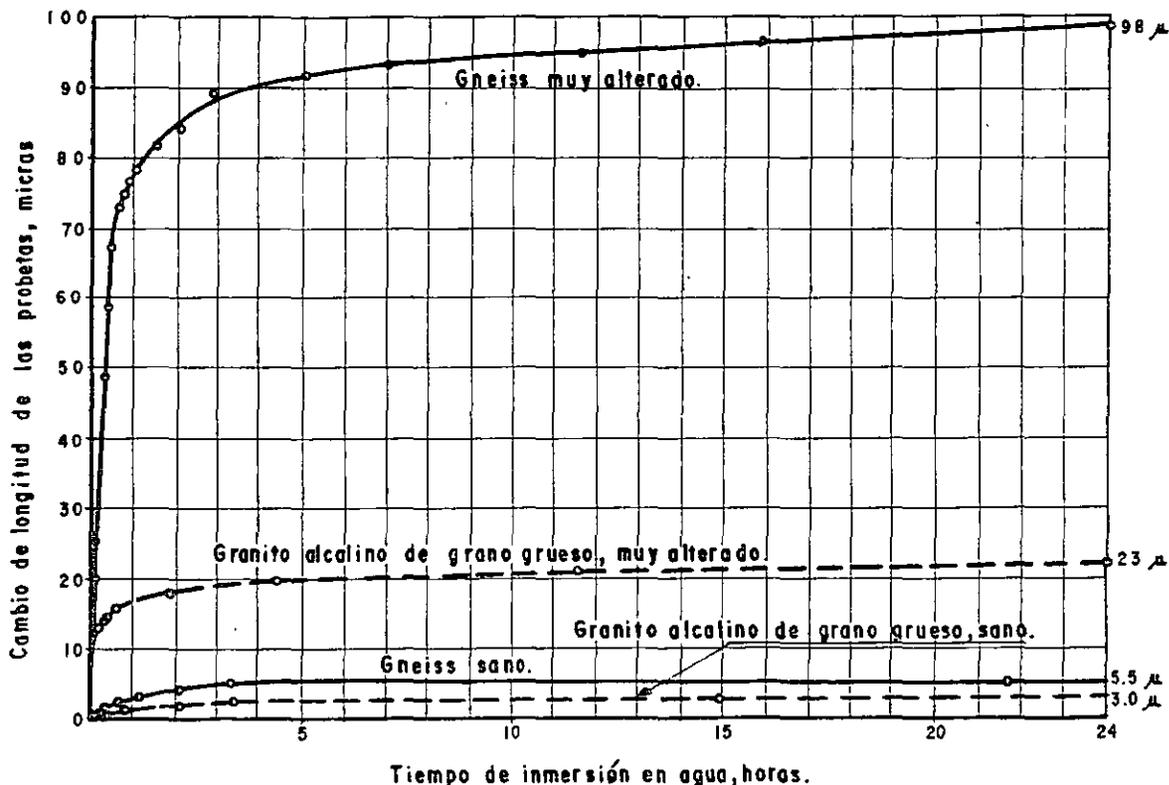


Figura XII-12. Resultados típicos en pruebas de expansión en muestras de roca (Ref. 14).

la velocidad con que evolucionan en ella los procesos de alteración. El conocimiento de esta propiedad es fundamental para extraer criterios sobre el efecto que la alteración de la roca podrá tener dentro de la vida útil de una obra dada.

La alterabilidad no es constante con el tiempo para una roca dada en unas condiciones dadas, puesto que no lo son los factores que pueden influir en ella y que han sido analizados más atrás. A la fecha no es posible seguir una técnica analítica o de laboratorio que permita establecer cuál va a ser la alterabilidad de una roca en un caso específico, pero para llegar al establecimiento de ciertas normas de criterio aproximadas al respecto, parece conveniente seguir la siguiente línea de reflexión (Ref. 14):

- Establecer las condiciones de alteración a las que la roca va a estar sujeta.
- Seleccionar entre los agentes de alteración aquel que sea más significativo en el caso estudiado y definir el estado de alteración inicial de la roca, en relación con ese parámetro y el estado final, en el sentido del que habría de alcanzarse para que la alteración de la roca representara un peligro decisivo para la función estructural.
- Someter una muestra de la roca a un proceso de alteración que sea representativo del que se tendrá en la obra, tratando de establecer la alterabilidad del material en relación a ese proceso. Si se logra llegar a una idea de este concepto podrá de él deducirse el tiempo que tardará en alterarse la roca en la obra en cuestión.

La línea de reflexión anterior tiene tres dificultades principales. La primera estriba en conocer las condiciones de alteración de la roca en el momento en que la obra inicia su función. La segunda estriba en establecer en el laboratorio una prueba que reproduzca las condiciones a que estará expuesta la roca en el futuro; estas pruebas, aunque puedan concebirse en forma razonable, exigirían un tiempo de ejecución muy largo. La tercera dificultad estriba en especificar con cierta precisión cuál será el grado de alteración futuro que comprometa el funcionamiento de la obra.

El conjunto de estas dificultades ha tratado de combatirse con el uso de pruebas de intemperismo y envejecimiento acelerados; con comparaciones experimentales respecto al comportamiento ya conocido de rocas similares con grados de alteración parecidos, que hayan sido utilizados en otras obras; con la identificación de bancos que hayan servido para construir obras de comportamiento estudiado, con fines de establecer comparación entre los grados de alteración del material en cantera y en obra, tras años de uso, todo ello para tratar de fundamentar correlaciones con el comportamiento de materiales parecidos que

ahora vayan a ser usados por primera vez; finalmente, será imprescindible para el técnico que aspire a resolver estos problemas en forma razonable, no desaprovechar ninguna ocasión de observar el comportamiento de masas de roca alterada y de obras hechas con ella, a fin de ir calibrando una experiencia personal sobre lo que significan los distintos grados de alteración en las diferentes rocas.

Muchas veces, de todos los estudios y análisis de laboratorios, lo más que puede concluirse es un razonamiento como el siguiente:

Si una roca A ha tenido un buen comportamiento en una obra y si una roca B va a usarse en otra obra de condiciones similares, si la alterabilidad de B parece ser menor que la de A, podrá recomendarse la utilización de B para los fines que se pretenden.

ANEXO XII-a

PRUEBA DEL EQUIVALENTE DE ARENA

XII-a.1 OBJETO

Se pretende que esta prueba sirva como una prueba rápida de campo para investigar la presencia o ausencia de materiales finos o de apariencia arcillosa, que sean perjudiciales para los suelos y para los agregados pétreos.

XII-a.2 APARATOS

Para la realización de la prueba se requiere el siguiente equipo:

a) Un cilindro transparente, graduado para medir volúmenes, con diámetro interior de 3.18 cm ($1\frac{1}{4}$ plg) y altura aproximada de 43 cm (17 plg), con graduaciones en décimos de centímetro a partir del fondo hasta 38.1 cm (15 plg) de altura.

b) Un tubo irrigador hecho con tubería de cobre o de latón, con diámetro exterior de 0.64 cm ($\frac{1}{4}$ plg). Uno de los extremos del tubo estará cerrado formando una punta en forma de cuña. Cerca de la punta, a través del lado de la cuña, se harán dos perforaciones laterales (con broca N° 60).

c) Una botella con capacidad de 3.8 lts (un galón), con equipo de sifón, consistiendo en un tapón con dos orificios y un tubo doblado de cobre. La botella se colocará 91.8 cm (3 pies) arriba de la mesa de trabajo.

d) Un tramo de manguera de hule de 0.48 cm ($\frac{3}{16}$ plg), con una pinza para poder obturarla. Esta tubería se usará para conectar el irrigador con el sifón.

e) Un pisón tarado, consistente en una varilla metálica de 45.8 cm (18 plg) de longitud con un pie cónico de 2.5 cm (1 plg) de diámetro, en su extremo

INDICE

INTRODUCCION	Pág.
CAPITULO I. AGREGADOS PETREOS.	1
1.1 Especificaciones generales	1
1.1.1 Agregados para concretos hidráulicos	1
1.1.2 Agregados para caminos y aeropistas	1
1.1.3 Agregados para ferrocarriles	2
1.2 Obtención de agregados	2
1.2.1 Clasificación de las rocas	2
1.2.2 Características que influyen en la selección del equipo de trituración	3
1.2.3 Extracción	3
1.2.4 Pruebas para determinar las características de una roca	6
CAPITULO 2. EQUIPO DE TRITURACION	8
2.1 Generalidades	8
2.2 Conceptos básicos	9
2.2.1 Efectos mecánicos	9
2.2.2 Índice de reducción	10
2.2.3 Coeficiente de forma	11
2.2.4 Proceso de producción de agregados	13
2.3 Trituración primaria	13
2.3.1 Quebradoras de quijadas	13
2.3.2 Quebradoras giratorias	17

2.4	Trituración secundaria y terciaria.	18
2.4.1	Trituradoras de rodillos	18
2.4.2	Trituradoras de impacto y martillo	20
2.4.3	Trituradoras de cono	23
CAPITULO 3.	EQUIPO COMPLEMENTARIO	29
3.1	Tolvas	29
3.1.1	Usos	31
3.1.2	Recomendaciones	32
3.2	Cribas	35
3.2.1	Cribas vibratorias inclinadas	37
3.2.2	Criba horizontal	39
3.2.3	Criba giratoria	39
3.2.4	Capacidad de las cribas vibratorias	39
3.3	Alimentadores	41
3.3.1	Alimentador de mandil o tablero metálico	42
3.3.2	Alimentador reciprocante o de plato	44
3.3.3	Alimentador vibratorio con o sin rejilla (Grizzly) de precibado	45
3.3.4	Otros tipos de alimentadores	47
3.3.5	Selección de alimentadores	47
3.4	Equipo de lavado y desenlodadores	49
3.4.1	Flautas de riego	49
3.4.2	Desenlodadores	57
3.5	Transportadores de banda	59
3.6.	Elevadores de cangilones	62
CAPITULO 4.	TENDENCIAS ACTUALES EN LA SELECCION DEL EQUIPO DE TRITURACION	63
CAPITULO 5.	EJEMPLO NUMERICO	82
CAPITULO 6.	SELECCION DE LOS ALIMENTADORES DE ROCA	91
	ANEXOS	94
1.	CAPACIDADES DE PRODUCCION	95
2.	CURVAS GRANULOMETRICAS DEL PRODUCTO TRITURADO	98
3.	CAPACIDAD DE CRIBAS VIBRATORIAS	101
4.	SELECCION DE BANDAS TRANSPORTADORAS	104

1

1. AGREGADOS PETREOS

1.1 ESPECIFICACIONES GENERALES

Los agregados pétreos son fragmentos duros y resistentes, libres de materiales contaminantes, conforme a las siguientes especificaciones granulométricas (materiales más utilizados en obras civiles).

1.1.1 Agregados para concretos hidráulicos

Generalmente se producen por vía húmeda, para evitar que con la presencia de finos, haya un consumo excesivo de cemento. Los tamaños utilizados, de acuerdo con normas de la ASTM son:

Arena:	1/4"	-	0
Grava # 1:	3/4"	-	1/4"
Grava # 2:	1 1/2"	-	3/4"
Grava # 3:	3"	-	1 1/2"
Grava # 4:	6"	-	3"

1.1.2 Agregados para caminos y aeropistas

Se producen por vía seca, por ser más económico y para producir los finos que le darán continuidad a la curva granulométrica indispensable en materiales para base y carpeta. Los tamaños recomendados son:

Material de sub-base	2"	-	0
Material de base:	1½"	-	0
Material de carpeta:	¾"	-	0
Material de sello:	⅜"	-	⅜"

1.1.3 Agregados para ferrocarriles

Se producen por vía seca por economía, los finos son desperdicio. Los tamaños recomendados son:

Balasto:	1½"	-	¾"
Balastino fino (screening):	¾"	-	¼"

Generalmente se da una tolerancia de + 5% tanto en sobretamaño como en subtamaño, existiendo normas estrictas para la composición granulométrica interna de las arenas para elaborar concretos hidráulicos (norma ASTM C33-61T), como sigue:

	Malla	Porcentaje de material que pasa
	3/8"	100
#	4 (4.76 mm)	95 a 100
#	8 (2.38 mm)	80 a 100
#	16 (1.19 mm)	50 a 85
#	30 (0.595 mm)	25 a 60
#	50 (0.297 mm)	10 a 30
#	100 (0.149 mm)	2 a 10

1.2 OBTENCION DE LOS AGREGADOS

La materia prima (material en greña) para la producción de agregados pétreos, se obtiene de bancos de roca o de yacimientos de agregados naturales de río o de depósitos de aluvión, conglomerados, etc., fundamentalmente. En mucha menor proporción, de escorias de alto horno, así como de productos sintéticos provenientes de la cocción de horno rotatorio de materiales sílico-aluminosos.

Antes de obtener los agregados debemos conocer las características de la materia prima que como se mencionó generalmente es la roca.

1.2.1 Clasificación de las rocas

Las rocas se dividen en tres grandes categorías geológicas:

- a) Rocas ígneas (basaltos, granitos, riolitas, andesitas)
- b) Rocas sedimentarias (caliza, arenisca, dolomitas)
- c) Rocas metamórficas (esquistos, gneiss, mármol)

Rocas ígneas.- Son aquellas que se originan por el enfriamiento del magma proveniente del interior de la tierra.

Este enfriamiento puede ocurrir de una manera lenta dentro de la corteza terrestre, dando origen a rocas de granos gruesos conocidas como intrusivas (el granito es un ejemplo de ellas) o bien, de una forma rápida en contacto con la atmósfera, lo que da lugar a rocas de grano fino conocidas con el nombre de rocas extrusivas (como es el caso del basalto).

Por lo general las rocas ígneas son muy duras y abrasivas ya que tienen un gran contenido de sílice (SiO_2).

Rocas sedimentarias.- Son aquellas que provienen del arrastre y consolidación de fragmentos de rocas ígneas ocasionados por las acciones de los elementos naturales como viento, lluvia, glaciares, etc. Los conglomerados, areniscas, calizas, etc. son ejemplo de este tipo de rocas.

Rocas metamórficas.- Son rocas que por altas temperaturas y presiones cambiaron su textura y propiedades físicas aún cuando las químicas no lo hicieron; pertenecen a este grupo: esquistos, marmol, gneiss, etc.

Los tres tipos de roca anteriormente descritos están formados por los mismos minerales, de tal manera que entre ellas se forma un ciclo, llamado "ciclo de las rocas" (Fig. 1).

1.2.2 Características que influyen en la selección del equipo de trituración.

Para poder seleccionar adecuadamente el equipo de trituración es necesario conocer las propiedades de las rocas que podrían afectar al equipo, éstas son principalmente dos: el grado de dureza generalmente dado por la escala de Mohs, tabla 1 y el grado de abrasividad, medido por el porcentaje de sílice. Si contiene más del 6% la roca es abrasiva y esto puede ser perjudicial para cierto tipo de equipo.

1.2.3 Extracción

La extracción de las rocas a cielo abierto, tiene dos series de operaciones:

- a) Trabajos preparatorios

Antes de proceder a la extracción del material, es necesario reg

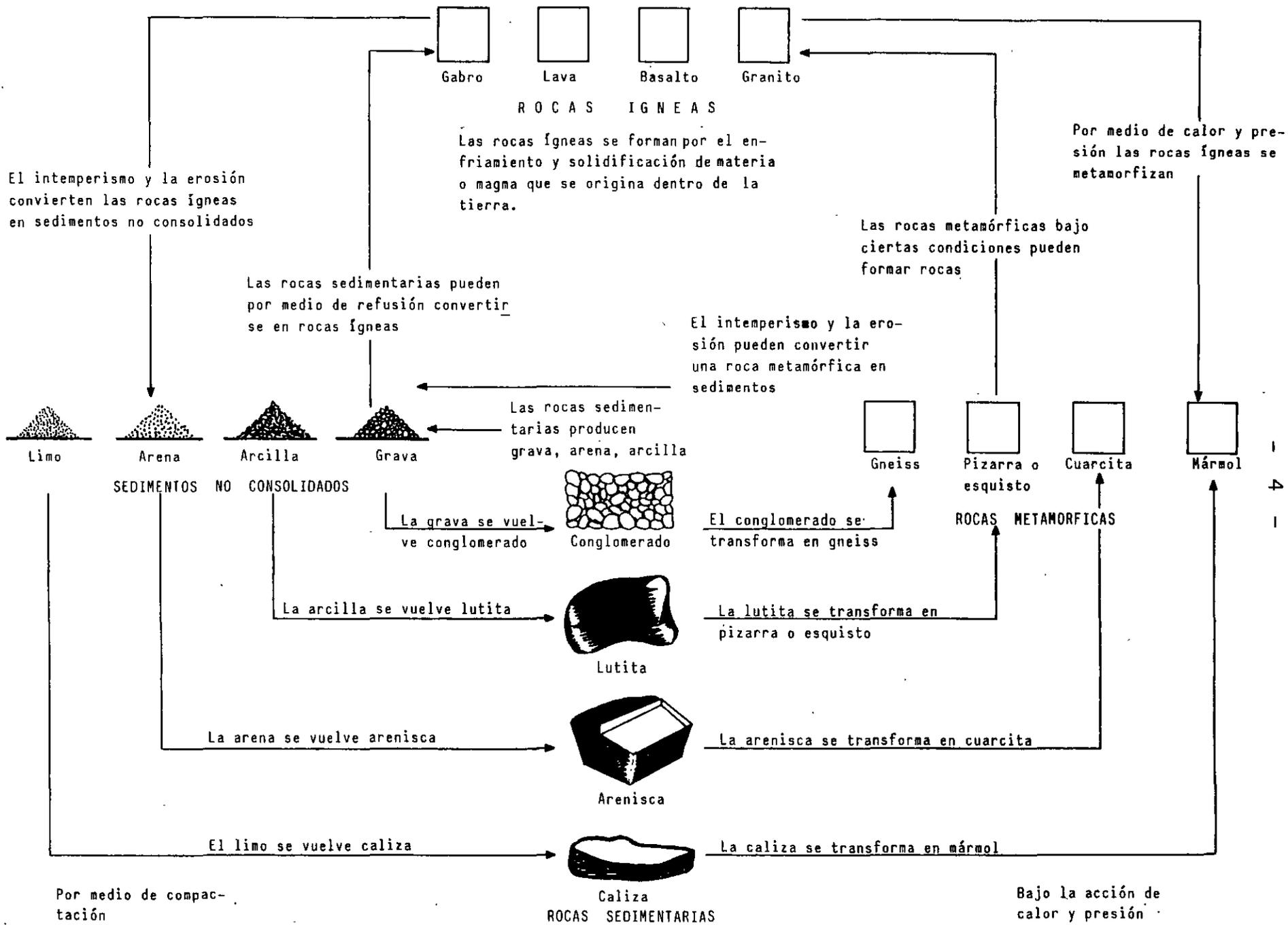


FIG. 1 CICLO DE LAS ROCAS

ESCALA DE MOHS

Dureza	Ejemplo
1	Talco, bauxita, grafito
2	Yeso, mica, caolinita
3	Calcita, mármol, pizarra
4	Fluorita, granito, areniscas.
5	Apatita, esquistos, hematita
6	Olivino, feldespato, calcedonia
7	Cuarzo, basalto
8	Topacio, circón
9	Corindón, serpentina, rubí
10	Diamante.

TABLA 1.

tirar los terrenos constituídos de tierra vegetal, tepetate, limos y arcillas, etc., realizando las operaciones de despalme y desenraice con escrepas, tractores, arados, etc., hasta dejar abierta a la piedra con su frente de ataque en uno o varios pisos, con las terrazas respectivas para permitir la evolución de las máquinas de perforación, del equipo de carga y del equipo de evacuación del material extraído.

b) Extracción propiamente dicha

La extracción puede realizarse manualmente (en desuso), por medios mecánicos y por explosivos.

Los materiales suaves (pizarra, calizas blandas, lignito, etc.), se extraen por medio de equipos análogos a los empleados para las operaciones de despalme.

El caso más general, es la extracción por medio de explosivos, con los cuales se dislocan los bancos de roca y se obtiene una fragmentación en bloques de un tamaño tal, que se permite su manejo con los medios de carga y de transporte disponibles, así como su entrada a la boca de la quebradora primaria.

En muchas ocasiones, a pesar de las precauciones tomadas en las voladuras masivas de los bancos de roca, un porcentaje medio del 20% al 30% de bloques, son demasiado grandes para manejarse con los medios de que se dispone. Es necesario una reducción secundaria de dichos bloques por medio de dinamita (barrenación secundaria o plastas) o por medios mecánicos (pilón o "drop-ball").

La carga se realiza por cargadores frontales sobre neumáticos o sobre orugas y por palas mecánicas y el transporte a la planta de trituración, por camiones de diversas capacidades. En caso de acarreos relativamente cortos, el cargador frontal sobre neumáticos, puede satisfactoriamente realizar la operación de transporte a la planta de trituración.

1.2.4 Pruebas para determinar las características de una roca

Para conocer las características de la roca que se piensa emplear, es necesario hacer algunas pruebas como son: Esfuerzo de compresión, gravedad específica, absorción, dureza de Dorry y de abrasión, a través de las pruebas Deval y Los Angeles, siendo esta última la más usual.

La prueba de Los Angeles evalúa la resistencia a la abrasión a partir del incremento en material fino que se produce al golpear los agregados con balas de acero dentro de un recipiente. La prueba se lleva a cabo de la siguiente manera:

Se carga un tambor como el que se muestra en la figura 2, con

5000 gr de material limpio y seco (A) cuya granulometría sea muy parecida o en su caso igual a la que se pretende utilizar.

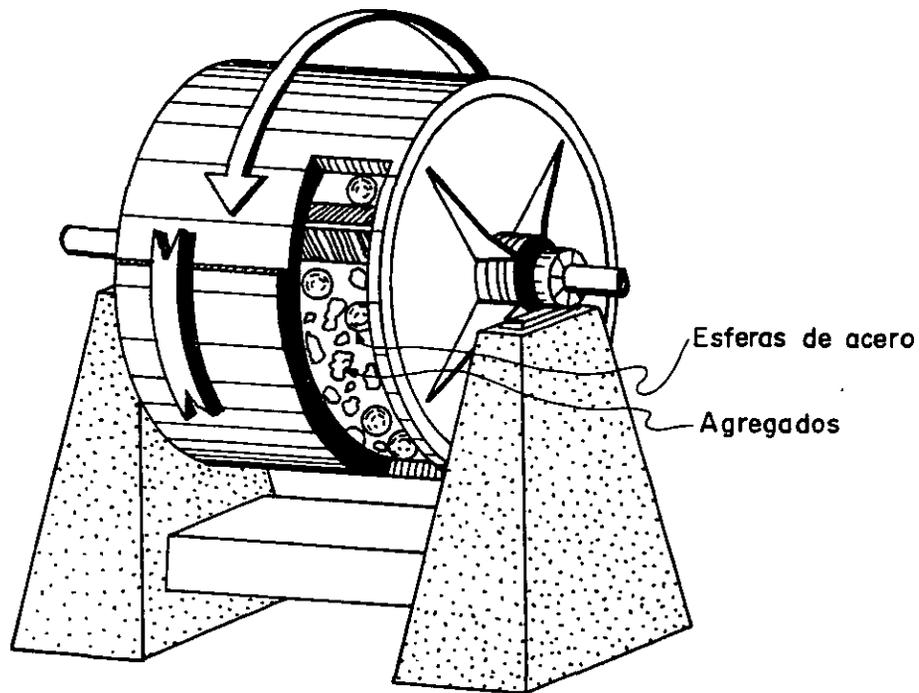


FIG. 2 TAMBOR PARA PRUEBA "LOS ANGELES"

A continuación, se coloca un peso normalizado de esferas de acero, las cuales habrán de actuar como carga abrasiva. El tambor se hace girar 500 veces a una velocidad de 30 a 33 R.P.M.; el agregado se saca y repasa por una criba del # 12, el material retenido se lava, se seca y se pesa (B) para calcular el porcentaje de desgaste.

$$\text{Porcentaje de desgaste} = \frac{A - B}{A} \times 100$$

Entre más bajo sea este coeficiente, más dura es la roca.

2

2. EQUIPO DE TRITURACION

2.1 GENERALIDADES

La preparación de los agregados tiene por objeto transformar el "Material en Greña" proveniente de la pedrera o de un banco de agregados naturales, y compuesto de elementos de todas dimensiones, desde bloques grandes hasta elementos finos e impurezas de arcilla y limo, en materiales limpios, clasificados en las categorías granulométricas requeridas.

Para realizar dichas operaciones, se cuenta con equipo de trituración propiamente dicho y equipo complementario, o sea aquellas máquinas que sin participar directamente en las operaciones de trituración, son indispensables para realizar los procesos necesarios en la transformación del material en greña o natural, a material útil que reúna ciertas especificaciones.

Por lo que respecta al equipo de trituración, desgraciadamente hasta la fecha no se ha diseñado una máquina universal que en un solo paso o etapa, convierta el material natural en agregados útiles, sino que dicha transformación se deberá realizar en varios pasos o etapas de acuerdo con el material natural disponible y con las especificaciones que deban cumplirse.

Se describirán someramente los siguientes tipos de equipos:

Equipo de Trituración

- | | |
|--|---|
| 1.- <u>Trituración Primaria</u>
Grefia a 10" - 4" | 1.1.- Quebradoras de Quijadas
1.2.- Quebradoras Giratorias |
| 2.- <u>Trituración Secundaria</u>
12" - 4" a 3" - 1" | 2.1.- Trituradoras de Cono "S"
2.2.- Trituradoras de Rodillo Doble
2.3.- Trituradoras de Impacto |
| 3.- <u>Trituración Terciaria</u>
3" - 1" a 3/4" - 1/4" | 3.1.- Trituradoras de Cono "FC"
3.2.- Trituradoras de Rodillo Triple
3.3.- Trituradoras de Martillos |
| 4.- <u>Trituración Cuaternaria</u>
<u>ó Molienda</u>
3/4" a 1/4" a menor de-
1/4" | 4.1.- Trituradora de Conos "VFC"
4.2.- Molinos de Barras
4.3.- Molinos de Bolas
4.4.- Pulverizadoras |

Equipo Complementario

- 5. Cribas vibratorias (horizontales e inclinadas)
- 6. Alimentadores (de delantal, de plano o reciprocantes, vibratorios)
- 7. Gusanos lavadores, ciclones, tanques clasificadores y tambores desenlodadores (scrubbers).
- 8. Bandas transportadoras
- 9. Elevadores de cangilones
- 10. Motores eléctricos y de combustión interna.

2.2 CONCEPTOS BASICOS

2.2.1 Efectos mecánicos

Todas las máquinas de trituración tiene como común denominador la reducción de tamaño de un material pétreo; para ello se le aplican esfuerzos a la roca hasta provocar su ruptura o falla a través de efectos mecánicos como: impacto, desgaste, corte y compresión.

Las máquinas de trituración más utilizadas en las obras civiles, emplean los métodos mecánicos de reducción indicados en el siguiente cuadro:

QUEBRADORA	METODO DE REDUCCION			
	IMPACTO 	DESGASTE 	CORTE 	COMPRESION 
IMPACTO	■			
PULVERIZADOR	■			
MARTILLOS	■	■	■	
RODILLOS			■	■
GIRATORIAS	■			■
QUIJADAS	■			■
CONO	■			■

Para decidir cuál es el equipo de trituración apropiado para resolver un determinado problema de producción de agregados, es necesario tener en consideración tanto la naturaleza de la materia prima por procesar, como el trabajo idóneo para cada tipo de trituradora, para poder hacer una selección de equipo, técnica y económicamente válida.

Dos de los conceptos básicos que definen el comportamiento y campo de aplicación de los diferentes tipos de quebradoras son: índice de reducción y coeficiente de forma.

2.2.2 Índice de reducción

Se define el índice de reducción de una máquina de trituración, a la relación:

$$I_R = \frac{D}{d}$$

entre el tamaño "D" del fragmento de roca a la entrada de la máquina y el tamaño "d" del producto de la trituración a la salida. Dicho índice de reducción varía con cada tipo de trituradora, de acuerdo con la mecánica de su construcción y con los métodos de reducción por ella utilizados (fig. 3).

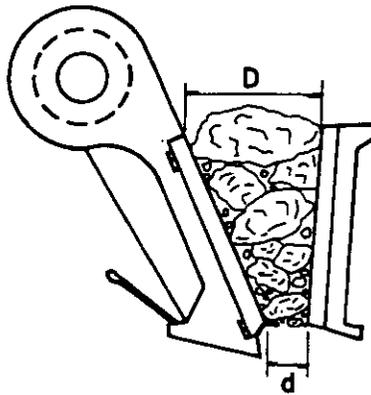


Fig. 3

Dicho índice varía según el tipo de la trituradora. Sus valores medios son:

TIPO DE TRITURADORA	INDICE DE REDUCCION
Quijada	8 a 1
Giratoria	8 a 1
Cono secundario	10 a 1
Rodillo doble	3 a 1
Impacto	30 a 1
Cono FC terciario	10 a 1
Rodillo triple	6 a 1
Martillos	20 a 1
VFC (cono cuaternario)	6 a 1
Molino de barras	15 a 1
Molino de bolas	30 a 1

2.2.3 Coeficiente de forma

Sea un fragmento de roca, cuya dimensión mayor sea representada por "L" y sea "V" el volumen de dicho fragmento y "v" el volumen de una esfera cuyo diámetro sea "L" (fig. 4).

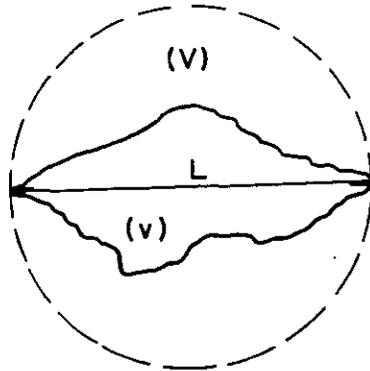


Fig. 4

Se define como "Coeficiente de Forma" de dicho fragmento a la relación:

$$C_f = \frac{v}{V} = \frac{v}{\frac{\pi L^3}{6}}$$

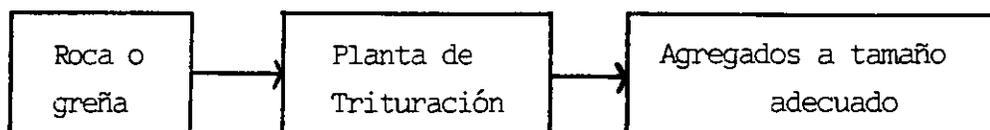
obteniéndose de la aplicación de dicha fórmula los valores promedio siguientes, en los fragmentos más comunes:

Forma de fragmento:	Valor del Coeficiente de Forma:
Esférico	1
Cúbico	$\frac{2}{\pi\sqrt{3}} = 0.37$
Tetraedro Regular	$\frac{1}{\pi\sqrt{2}} = 0.22$
Canto rodado	0.34
Grava triturada	0.22
Lajas	0.07
Agujas	0.01

Los dos últimos tipos de fragmentos (lajas y agujas), generalmente se prohíben por las normas de calidad de control de agregados pétreos admitiéndose como máximo de 5 a 8% en peso debido a que por su forma, son partículas débiles con mucha tendencia a fracturarse.

2.2.4 Proceso de producción de agregados

El proceso para la producción de agregados es el siguiente:



Los objetivos centrales en la producción de agregados son:

- Cumplir las normas de tamaño y calidad.
- Producir el agregado al costo mínimo posible.

El equipo de trituración, básicamente sigue siendo el mismo que hace 50 años, lo que se ha ido modernizando es el equipo complementario, incrementando la eficiencia de las Plantas de Proceso de Agregados Pétreos.

Para poder realizar una buena selección es necesario conocer las características del equipo de trituración.

2.3 TRITURACION PRIMARIA

Es la primera etapa de reducción de los materiales pétreos; en ella se convierte el material producto de la explotación del banco de roca o "greña", a fragmentos entre 12" y 4". Existen varios tipos de máquinas capaces de realizar esta reducción las más importantes son las quebradoras de quijadas y las giratorias.

2.3.1 Quebradoras de quijadas.

Definitivamente es la quebradora de quijadas de simple Togle con excéntrico superior (fig. 5), la que se utiliza para realizar la primera etapa de reducción de los materiales pétreos, en las plantas móviles camineras, en prácticamente todos los casos, así como en la mayoría de las instalaciones fijas de producción de agregados para la industria de la construcción.

Las trituradoras de quijadas se designan en base al ancho y longitud expresado en pulgadas del rectángulo que constituye la boca de admisión, las más comunes son 10"x 16", 10"x 21", 10"x 30", 12"x 36", 15"x 24", 20"x 36", 25"x 40", 30"x 42", 36"x46", 44"x48", 50"x60" y 66" x 84".

Equipo de mecánica simple. Se utiliza en las plantas portátiles, en tamaño que van desde 12"x48", con pesos de 5,300 Kg hasta 48,000 y producciones desde 18t/hr hasta 640 t/hr, de acuerdo con el tamaño de la máquina, abertura de salida y naturaleza geológica del material, alcanzado índices

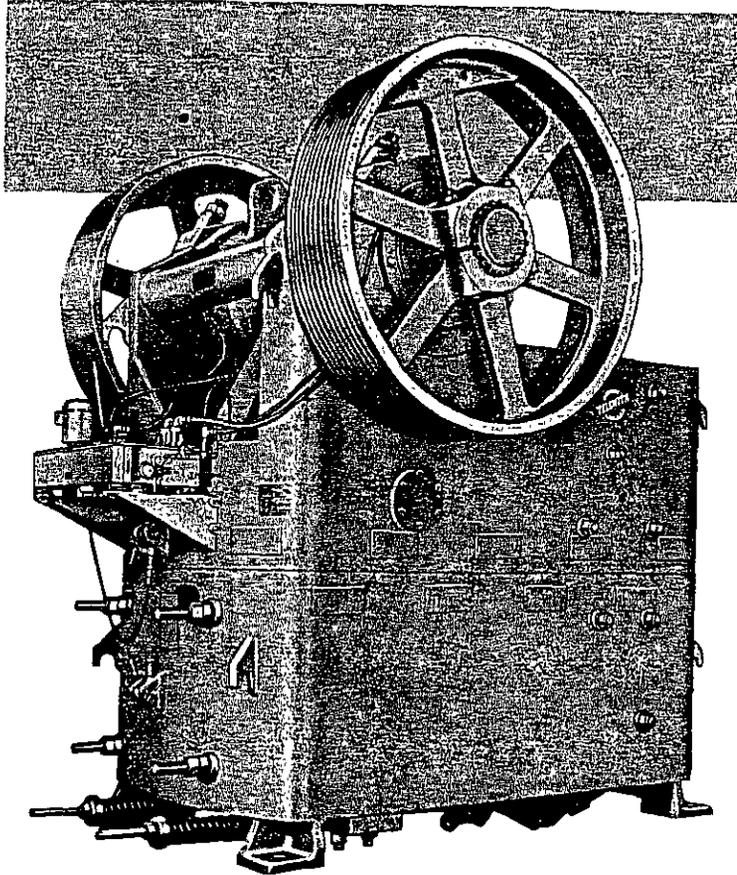


Fig. 5. Vista exterior. Quebradora de quijadas 44" x 48".

de reducción promedio de 8 a 1.

El trabajo de estas trituradoras se basa principalmente en los efectos de impacto y de compresión.

La quebradora de quijadas (Fig. 6) consta de un bastidor construido generalmente de placas de acero electrosoldadas y relevadas de esfuerzo (1), en el cual está apoyada una flecha (2) elaborada de acero de alta resistencia al impacto con aleaciones de níquel, cromo y molibdeno. De la flecha o árbol principal cuelgan la biela o pitman (3) unida a la flecha por rodamiento de alta resistencia, la biela se fabrica de placas de acero electrosoldadas y constituye la quijada móvil propiamente dicha. En la parte inferior está articulada a través de un elemento llamado togle o trampilla de articulación (4) que es un elemento fabricado a base de un material estructuralmente débil como es el fierro fundido, con el objeto de cumplir una doble misión; además de articular la quijada móvil, sirve como fusible en el caso que por accidente se introduzca a la máquina un fragmento de material no triturable como puede ser la cabeza de un martillo o el diente de un cucharón. En ese momento, el togle se rompe y permite el libre paso del fragmento sin ocasionar daños mayores a la máquina.

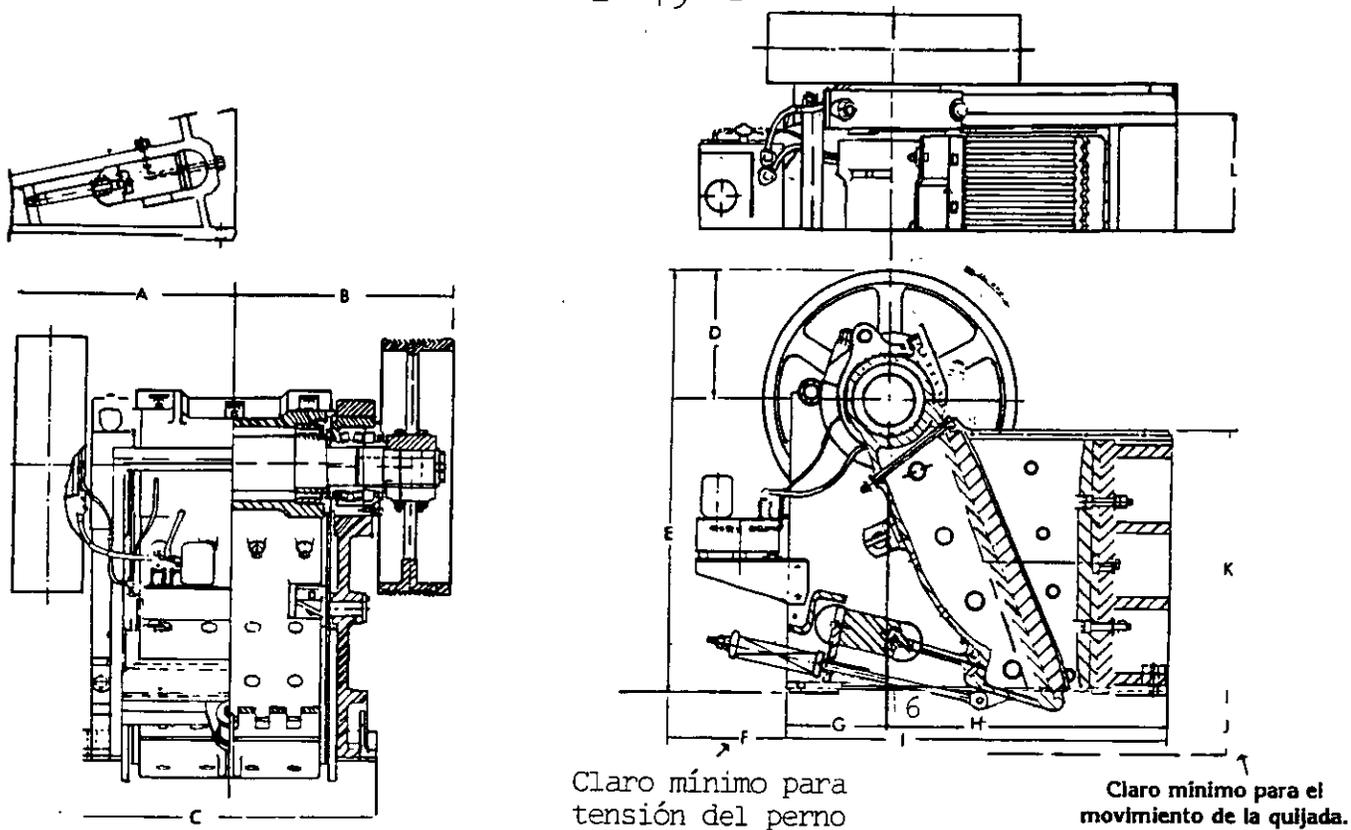


FIG. 6 CORTE ESQUEMATICO TRITURADORA DE QUIJADAS

Tanto la quijada móvil como la fija que está en el bastidor, están revestidas por las muelas o quijadas (5) que son piezas de desgaste intercambiables fabricadas de acero con 12% a 14% de manganeso. En las partes laterales de la cámara de trituración existen placas del mismo material de forma trapezoidal y triangular que periódicamente se sustituyen de acuerdo a la abrasión del material.

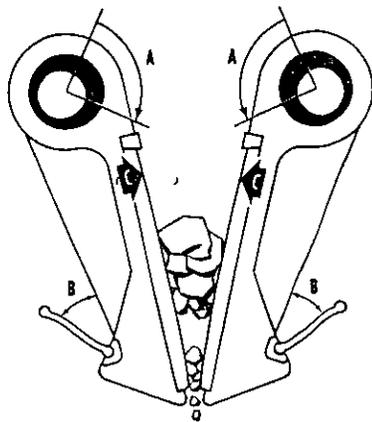
En la parte inferior de la quijada móvil existe un tirante (6) a base de una varilla que en su parte de apoyo al bastidor tiene un resorte para asegurar el retroceso adecuado de la máquina.

En el apoyo del togle se pueden quitar y poner libremente calzas o lanas de placa metálica de diversos calibres, si se quiere aumentar o reducir la abertura de salida (7).

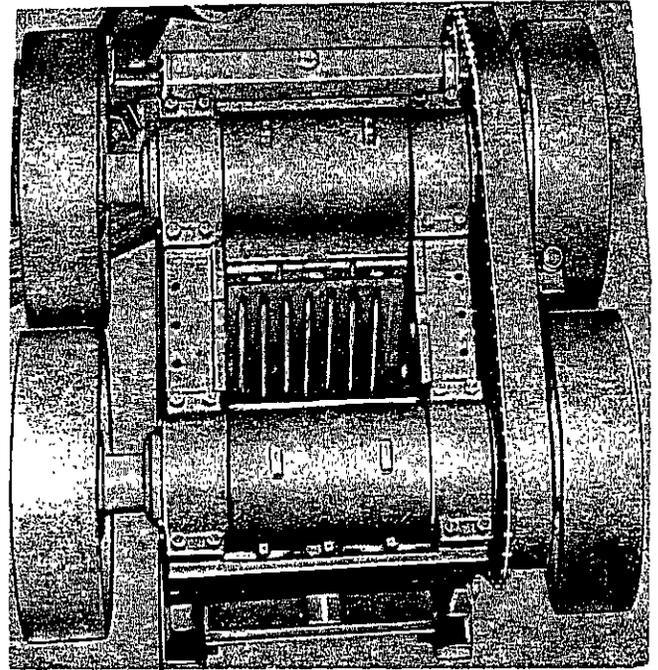
En la parte superior se encuentra la boca de entrada del material (8) y la flecha o eje excéntrico (2) que describe un movimiento de rotación, el cual provoca que el extremo superior de la Biela sufra un movimiento circular, mientras que el extremo inferior, describe también un arco de círculo, haciendo que la quijada tome de esta forma un movimiento complejo. El material es triturado por la compresión y el impacto que las quijadas le aplican hasta llegar al tamaño de salida.

La quebradora de quijadas, es una máquina que se diseñó a principios del siglo XX y que en realidad ha sufrido pocos cambios, pudiéndose señalar entre ellos la lubricación automática a base de aceites y la regulación hidráulica de la abertura de salida.

En algún tiempo se utilizaron las quebradoras de quijadas gemelas (Fig. 7) móviles, pero hoy prácticamente han quedado en desuso debido a su alto costo de adquisición y de operación así como la de doble Togle o Blake (Fig. 8). Existen también las tipo Dodge y de percusión que se usan exclusivamente para pruebas de laboratorio.



(a)



(b)

Fig. 7. Quebradora de Doble Quijada Móvil.

a).- Corte esquemático.

b).- Vista exterior.

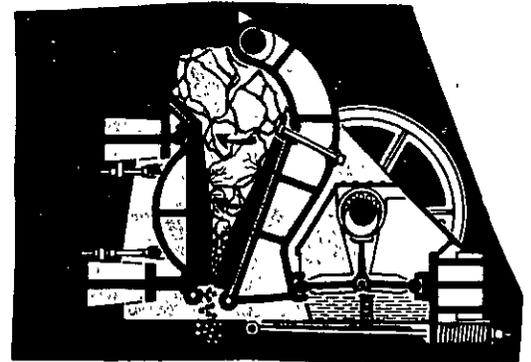


Fig. 8. Quebradora de Quijadas tipo Blake "Doble Togle" o "Doble Biela"

2.3.2 Quebradoras Giratorias

Este tipo de máquinas se utilizan generalmente en instalaciones mineras y cementeras o en obras de ingeniería donde se necesiten producciones de más de 1000 t/h.

En las trituradoras giratorias (Fig. 9), la reducción del material se obtiene por la presión entre un bastidor anular fijo (1) en forma de cono llamado anillo cóncavo y un pilón o cabeza (2) también en forma troncocónica, pero en sentido inverso el cual está apoyado en una flecha (3) que cuelga de una araña (4) localizada en la parte superior sostenida por un travesaño a través de la abertura de entrada (5). El apoyo inferior de la flecha está alojado en un mecanismo excéntrico (6), que al accionarse a través de la polea ranurada (7), flecha horizontal (8), piñón (9) y corona dentada produce un movimiento de campaneó que provoca a la roca alimentada por la parte superior los efectos de impacto y compresión, evacuándola por la parte inferior de acuerdo a un tamaño que dependerá de la abertura de salida (10).

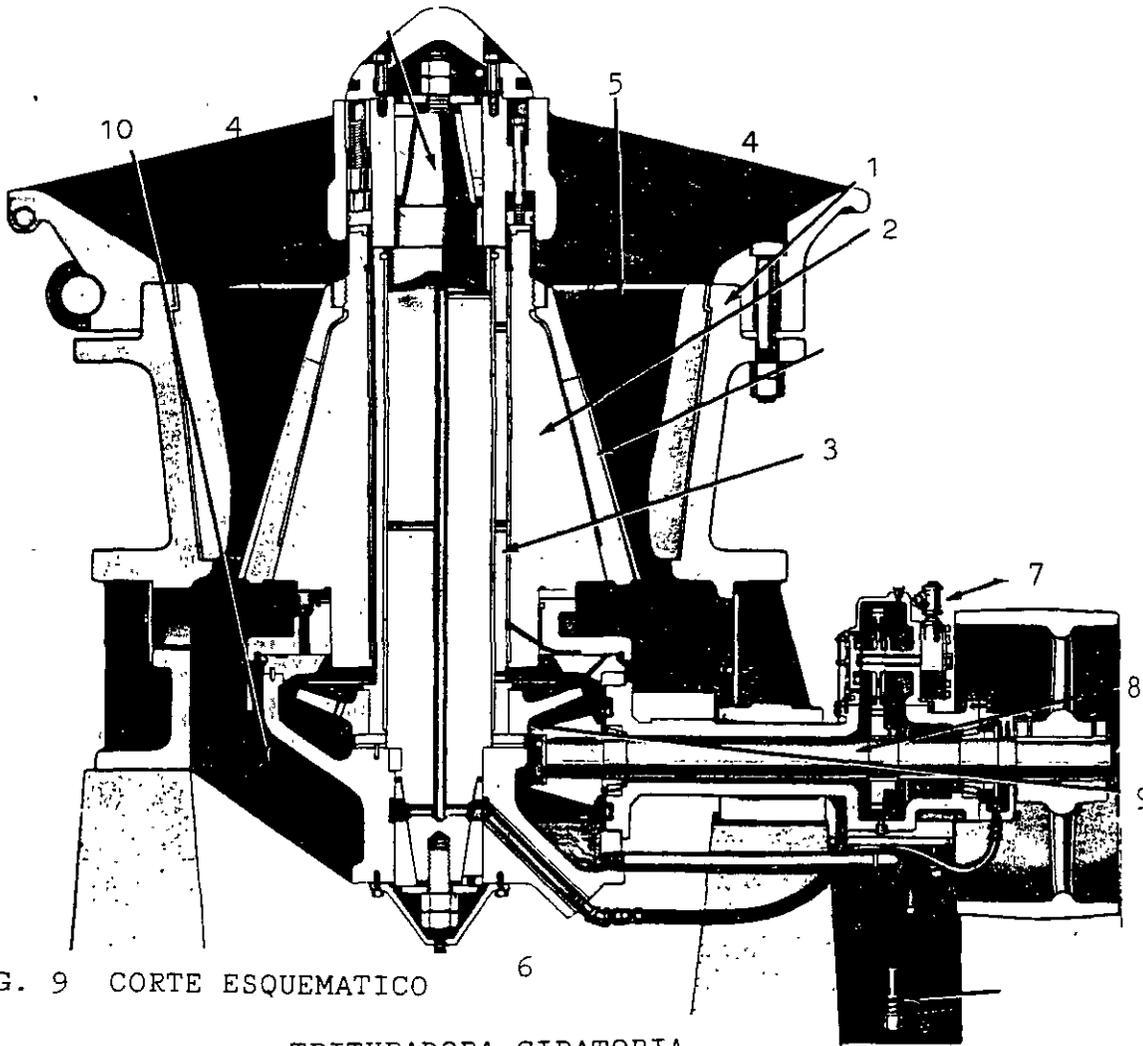


FIG. 9 CORTE ESQUEMATICO

TRITURADORA GIRATORIA

Estas máquinas tienen una gran capacidad de producción, pero a su vez son muy pesadas, muy costosas y con dimensiones en su altura superiores a los 5 metros, lo que las hace poco prácticas para instalarse en grupos móviles o plantas portátiles.

El tamaño de este tipo de trituradoras se designa por el diámetro de admisión en pulgadas, siendo las más comunes de 8, 10, 13, 16, 20, 25, 30, 36, 42, 48, 54 y 60 pulgadas.

2.4 TRITURACION SECUNDARIA Y TERCIARIA

El material producto de una trituración primaria puede ya usarse en la elaboración de concretos hidráulicos (grava # 4), para ornamento, etc. Sin embargo, para obras civiles es necesario reducirlo aún más de tamaño.

Si bien la etapa primaria de trituración, desde hace ya muchos años se ha definido a la quebradora de quijadas como el equipo idóneo para las instalaciones de producción de agregados, en la etapa secundaria han existido en los últimos años cambios sensibles en la preferencia de los usuarios de dichos equipos.

En la etapa secundaria se reduce el material producto de la trituración primaria, es decir de 12" a 14", a fragmentos entre 3" a 1", que bien podrían ser material útil como grava para concreto, material de subbase, etc.

Las máquinas comúnmente utilizadas para realizar esta etapa son las trituradoras de cono, impacto y martillo y de rodillos.

2.4.1 Trituradoras de rodillos

Este tipo de trituradoras de mecánica simple, utiliza los efectos de compresión y corte para efectuar la reducción de tamaño del agregado pétreo.

En el pasado éste era el equipo más popular, hoy en día, su utilización ha quedado reducida al tratamiento de materiales suaves y poco abrasivos como son caliza, carbón y yeso debido a que con rocas altamente abrasivas, el desgaste que se presenta en forma de surcos profundos en la superficie cilíndrica de los rodillos hace que se tengan altos costos de mantenimiento, presentándose también las siguientes limitaciones:

1.- El diámetro de los rodillos debe ser de 20 a 30 veces mayor al tamaño de los fragmentos en la alimentación para que pueda aprisionarlos y triturarlos.

2.- La producción es directamente proporcional al ancho de los rodillos (Fig. 10) sin embargo un ancho demasiado grande, provoca desgaste irregular y rápido más fuerte en el centro que en los extremos.

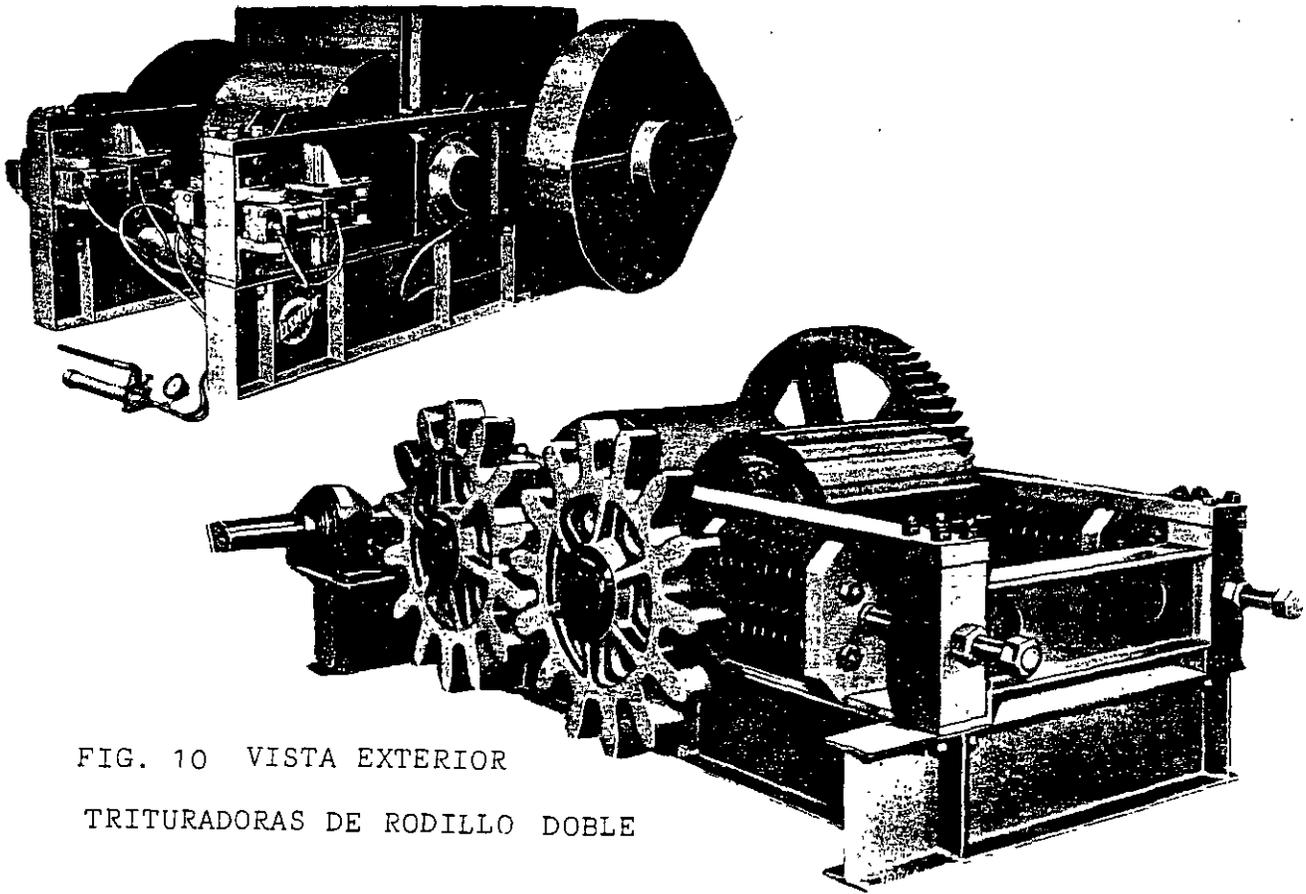


FIG. 10 VISTA EXTERIOR
TRITURADORAS DE RODILLO DOBLE

El índice de reducción que se logra con estas máquinas es relativamente bajo 3 a 1 como máximo debido fundamentalmente a las limitaciones que se tienen en los tamaños de los alimentadores. Se ha procurado disminuir un poco este inconveniente, introduciendo un tercer rodillo, obteniéndose así una máquina que puede trabajar con mayores índices de reducción, aún cuando más costosa en inversión inicial y en operación (Fig. 11).

Para disminuir los problemas de alto costo de mantenimiento en dinero y tiempo, en el rectificando de los surcos de desgaste, se han diseñado máquinas de soldadura automática (Fig. 12) que mitigan un poco estos inconvenientes.

Los rodillos pueden ser lisos, para producir material fino y corrugados que no lo producen tan fino pero admite tamaños mayores.

El coeficiente de forma del material triturado en los rodillos es por regla general bajo, con una gran tendencia a formar muchas laminas en cierto tipo de rocas.

Por los motivos anteriormente descritos, en muchas instalaciones de producción de agregados, las trituradoras de rodillo han venido siendo sustituidas por otro tipo de máquinas, limitándose el uso de las mismas al proceso de cierto tipo de materiales suaves y poco abrasivos como se había mencionado anteriormente.

El tamaño de estas máquinas se designa por dos cifras, diámetro del rodillo por ancho del mismo, generalmente en pulgadas. Los más usuales son 24 x 16, 40 x 30, 30 x 26 en rodillo doble y 24 x 30, 40, 50 y 60 y 30 x 40, 50, 60 y 72 en rodillo triple.

2.4.2 Trituradoras de impacto y de martillo

Tanto las trituradoras de impacto (Fig. 13) como las de martillos (Fig.14), utilizan básicamente el efecto de fuertes impactos de la roca contra las placas del bastidor, impulsadas por uno o dos rotores que están girando a elevadas revoluciones por minuto. En las trituradoras de martillo con rejilla que funciona como controlador del tamaño máximo del producto, existen también los efectos secundarios de corte y desgaste de la roca entre el martillo y la rejilla.

Con este tipo de máquinas se obtiene material cúbico de elevado coeficiente de forma, con índices de reducción de 20 a 1 y en ocasiones de 30 a 1. Desgraciadamente estas máquinas no son adecuadas para procesar rocas con más del 6% de contenido de sílice (SiO_2), por el fuerte desgaste que sufren sus martillos y barras de impacto, con los materiales pétreos abrasivos siendo aconsejable su empleo para tratar calizas, dolomitas, yesos, asbestos y en general todo tipo de minerales no abrasivos, pues de lo contrario se elevan muy fuertemente sus costos de mantenimiento.

El tamaño de estas trituradoras se designa con el diámetro del rotor por el ancho del mismo en pulgadas generalmente, indicando si es de simple o de doble rotor y si cuenta o no con rejilla de clasificación.

Generalmente las barras de impacto así como las cabezas de martillo se fabrican con aleaciones de acero resistentes a la abrasión ya que es necesario cambiarlas frecuentemente de acuerdo con el desgaste que les ocasiona el proceso de trituración.

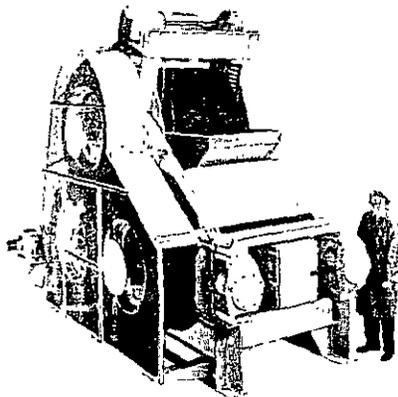
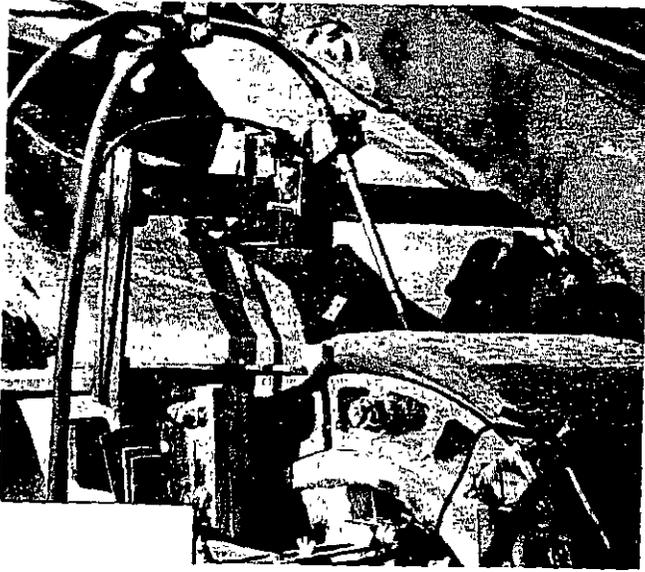
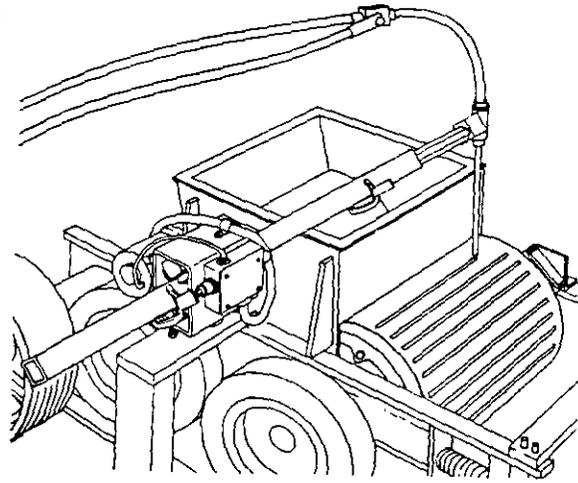


FIG. 11 TRITURADORA SECUNDARIA DE RODILLO TRIPLE

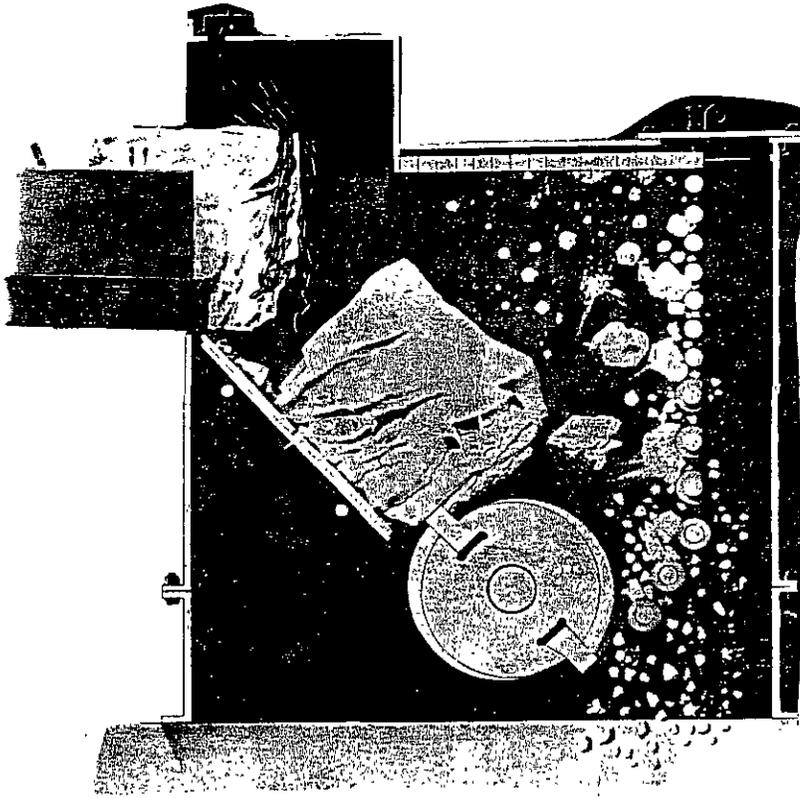


A) VISTA EXTERIOR

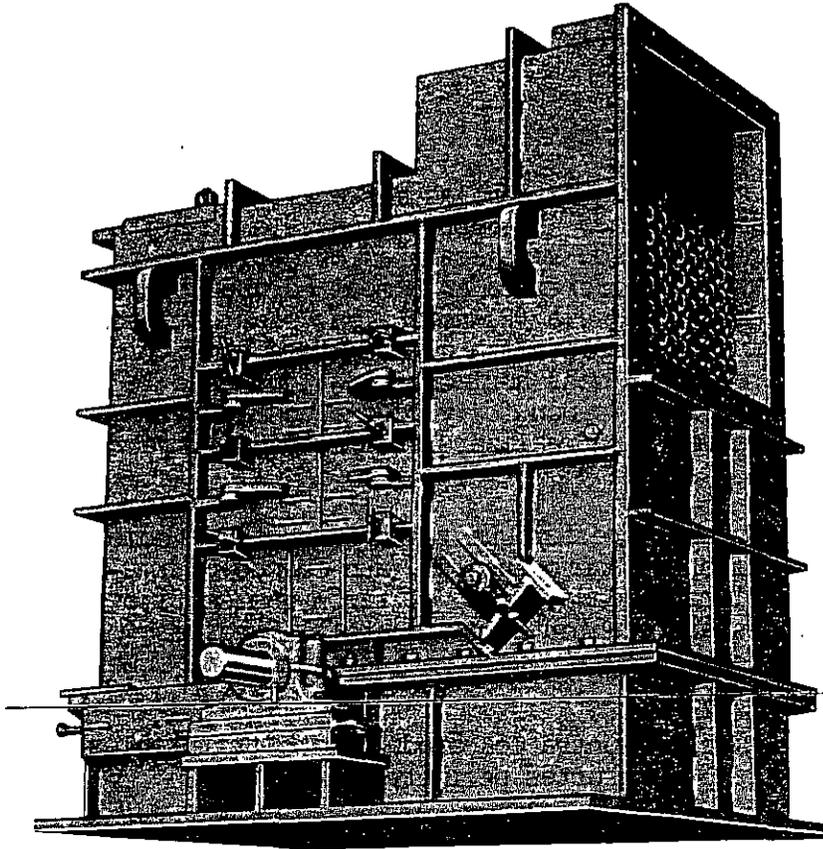


b) ESQUEMA DE APLICACION

FIG. 12 VISTA GENERAL Y ESQUEMA ILUSTRATIVO DE LA APLICACION CON EQUIPO AUTOMATICO, DE SOLDADURA RESISTENTE A LA ABRASION, PARA COMPENSAR EL DESGASTE SUFRIDO POR LAS SUPERFICIES CILINDRICAS DE UNA TRITURADORA DE RODILLO DOBLE.



(a) CORTE ESQUEMATICO



(b) VISTA EXTERIOR

FIG. 13 TRITURADORA DE IMPACTO DE SIMPLE ROTOR

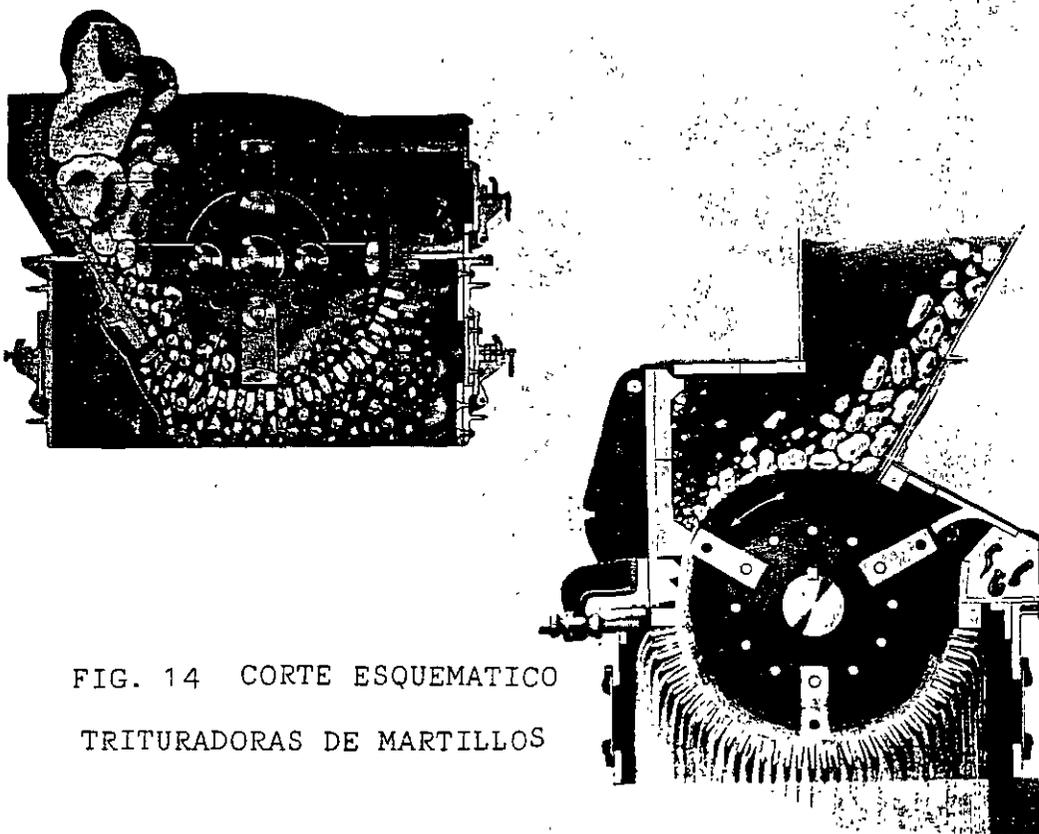


FIG. 14 CORTE ESQUEMATICO
TRITURADORAS DE MARTILLOS

2.4. 3 Trituradoras de Cono

Las trituradoras de cono (Fig. 15) son las más utilizadas en lo que respecta a trituración secundaria. Su fabricación y la constitución de sus principales componentes son semejantes a los de las quebradoras giratorias ya descritas. La diferencia principal es que la flecha (1) en que se apoya el pilón o cabeza (2) no cuelga, sino está sostenida en la parte inferior, donde se localiza el mecanismo excéntrico (3) que se acciona a través de una flecha horizontal (4) que trae la energía del motor (5) y a base de un piñón (6) y corona dentada (7) produce un movimiento de campeo para realizar los efectos de impacto y compresión.

En estas máquinas se puede apreciar que tanto el bastidor como el cono cabeza están contruidos de acero fundido, aún cuando últimamente ha habido diseños de placa soldada, tanto el tazón que es fijo (8) y la nuez o cono móvil están recubiertas por acero al manganeso (9). Son piezas de desgaste que deberán sustituirse periódicamente de acuerdo con la abrasividad del material.

El dispositivo de seguridad contra los productos no triturables está constituido por una serie de resortes perimetrales (Fig. 16).

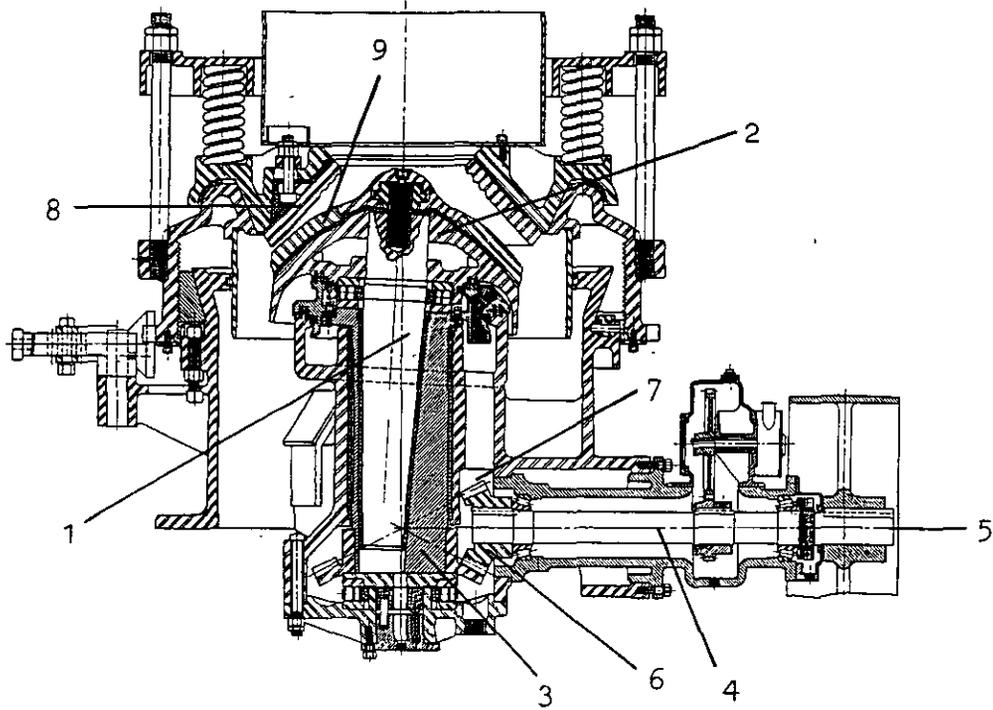


FIG. 15 CORTE ESQUEMATICO TRITURADORAS DE CONOS

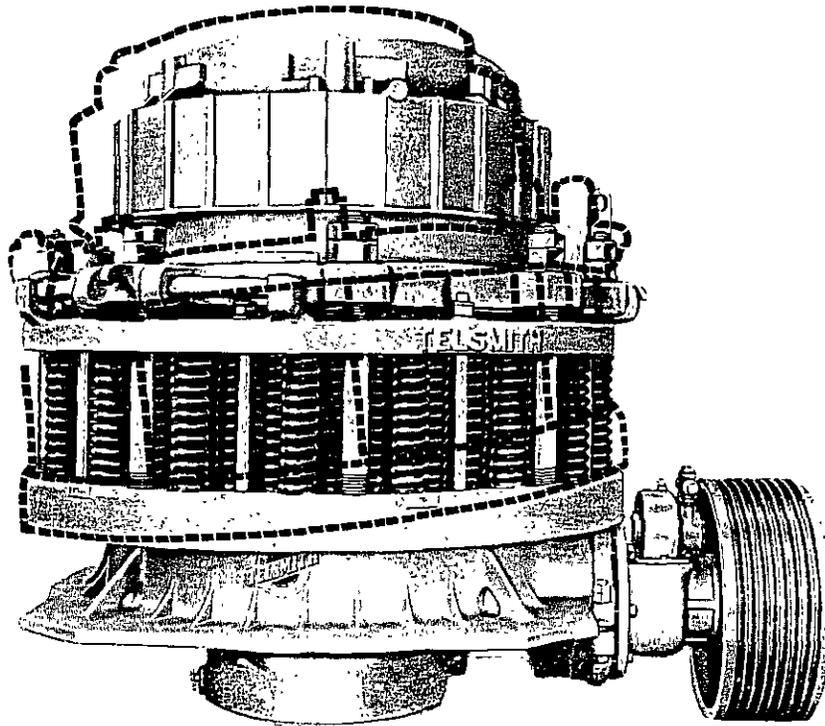


FIG. 16 ACCIONAMIENTO DE LOS RESORTES PERIMETRALES DE SEGURIDAD

Este tipo de máquinas son muy eficientes ya que tienen un alto índice de reducción que puede llegar hasta 10 a 1; sus dimensiones son compactas lo cual las hace prácticas para su instalación en grupos móviles de trituración y sus costos de mantenimiento muy bajos, por la elevada duración de sus piezas de desgaste.

La regulación del tamaño se logra subiendo o bajando el anillo cóncavo y generalmente puede procesar cualquier tipo de material por duro y abrasivo que sea.

La designación de este equipo es según el diámetro inferior del pilón expresado en pulgadas, siendo las más comunes 24", 36", 48" y 66".

Las trituradoras de cono más utilizadas en México son las de la marca Telesmith donde se conocen como giroesferas, así como las marcas Symmons-Rexnord, Allis-Chalmers, etc.

Los constructores de caminos empezaron a utilizar, en unidades portátiles, el tamaño de 36", que es una máquina aproximadamente de 11,000 kilogramos de peso, con una producción de 80 toneladas a una abertura de salida de 1" (para producir material de $1\frac{1}{2}$ "). Posteriormente los grandes volúmenes de materiales requeridos en los nuevos proyectos de autopistas, obligaron a utilizar los tamaños de 48", máquinas de 22,000 kilogramos de peso y producciones del orden de 170 toneladas por hora de materiales de $1\frac{1}{2}$ " y hoy en día ya los tamaños de 66" (Fig. 17), máquinas con peso de 42,000 kilogramos y producción de 275 toneladas por hora de material de base, tienen bastante demanda entre los grandes contratistas de caminos.

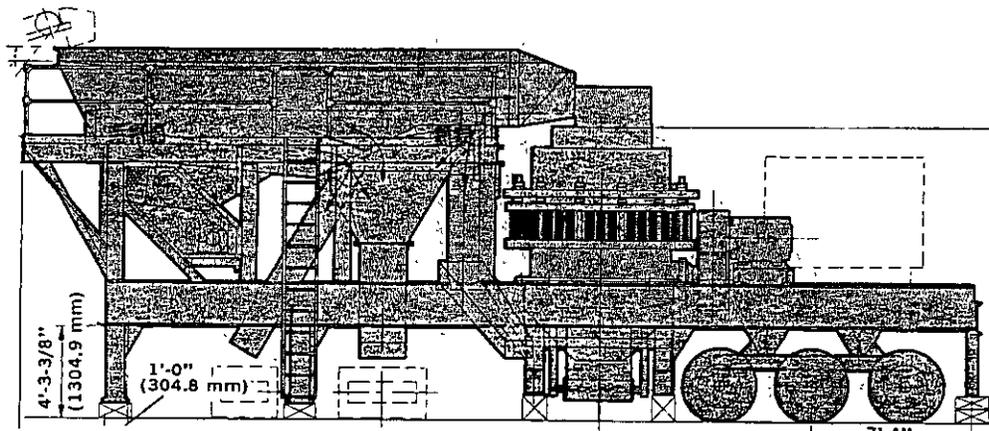


FIG. 17 USO DE LAS TRITURADORAS DE CONO EN LA CONSTRUCCION DE CAMINOS, (PLANTAS PORTATILES O GRUPOS MOVILES DE TRITURACION)

El material producto de la trituración secundaria puede ser utilizado como agregado para la producción de concretos hidráulicos y en la construcción de bases y sub-base de caminos y aeropistas, sin embargo en muchas ocasiones, como en el caso de la producción de concreto asfáltico y material de sello para carpetas, es necesaria la presencia de material aún más fino, para ello es necesaria la trituración terciaria que se encarga de reducir el material de $3/4''$ a $1\frac{1}{2}''$ producto de la trituración secundaria a tamaños de $1/4''$ a $3/4''$, para esta etapa se usan las mismas máquinas descritas anteriormente en la secundaria, es decir las trituradoras de cono, de rodillos y de impacto.

Las trituradoras de cono se fabrican en modelos especiales para cumplir las etapas secundaria, terciaria y cuaternaria de reducción, modelos que si bien desde el exterior presentan prácticamente el mismo aspecto (figura 18), la geometría de sus cámaras de trituración tiene grandes diferencias, según se trate de una trituradora secundaria (figura 19), terciaria (figura 20) o cuaternaria (figura 21), siendo lógicamente las máquinas que se pueden cerrar a menor dimensión para producir material más pequeño, las que admiten menor tamaño de piedra a la entrada. Para la trituración terciaria estas máquinas se designan por TelSmith como FC (Fine Crushing) y en la Symmons como Short-head (cabeza corta).

En lo que respecta a las otras trituradoras generalmente se utiliza la de rodillo triple, las de impacto y de martillo conservan las mismas características que en la trituración secundaria pero con menores dimensiones tanto en la abertura de admisión así como del rotor.

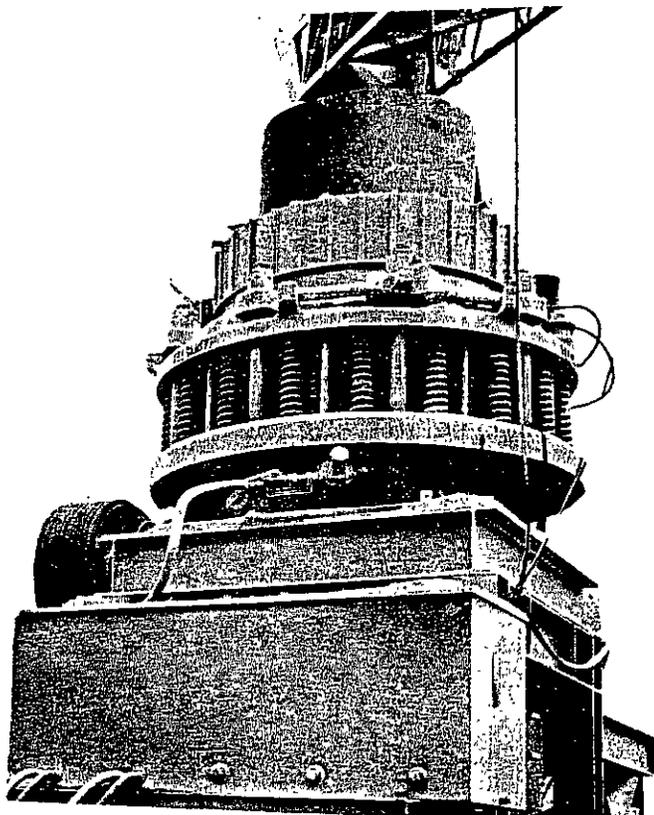


FIG. 18 ASPECTO EXTERIOR
TRITURADORAS DE CONO

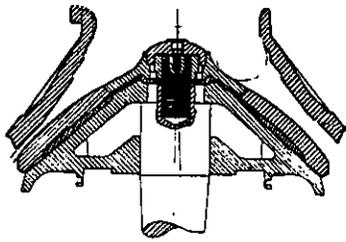


FIG. 19 CAMARA DE TRITURACION SECUNDARIA "S" O - STANDAR.

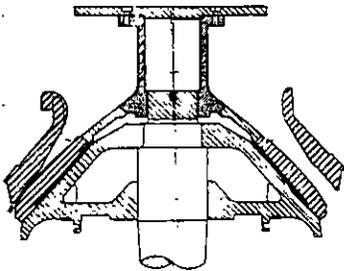


FIG. 20 CAMARA DE TRITURACION TERCIARIA, "FC" O - CABEZA CORTA.

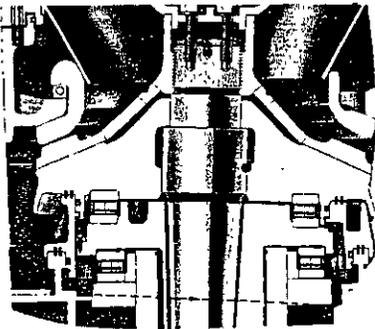
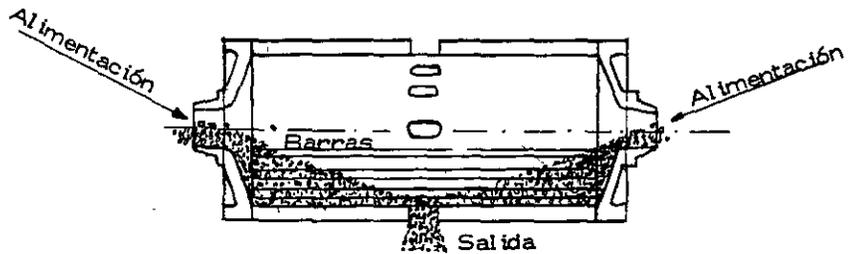


FIG. 21 CAMARA DE TRITURACION CUATERNARIA "VFC" O - "GYRADISC."

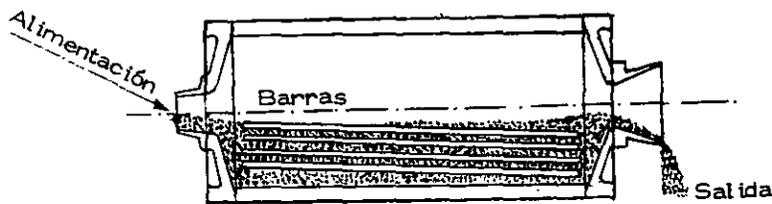
En algunos casos de producción de arenas calibradas, tanto para la elaboración de concretos hidráulicos, como para corregir las curvas granulométricas de los materiales producto de las trituraciones secundarias y terciarias que acusan déficit de partículas de 0 a 2 mm para cumplir con las especificaciones de los materiales de base y carpeta asfáltica para la construcción de caminos, es necesario efectuar una cuarta etapa en la reducción de los materiales pétreos, para lo cual se utilizan básicamente la trituradora de conos VFC (very fine crushing) anteriormente descrita y los molinos de barras y de bolas.

Los molinos de barras están constituidos esencialmente por un tambor cilíndrico de placa de acero estructural, horizontal, y revestido con placas de acero al manganeso para su protección interior, estando accionado bien a través de neumáticos con ejes horizontales, o bien a través de un Mecanismo de Piñón y Corona Dentada. El cilindro está cargado con barras cilíndricas de acero duro de 2" y 3" de diámetro, de longitud ligeramente inferior a la del cilindro. Estas barras accionadas por la rotación del tubo, ruedan las unas sobre las otras, y su movimiento relativo genera una acción intensa de molienda. Los molinos pueden trabajar por vía húmeda o por vía seca, y según el grado de finura del producto por obtener, existen tres tipos de alimentación y descarga, los cuales se ilustran en la figura 22. Existen

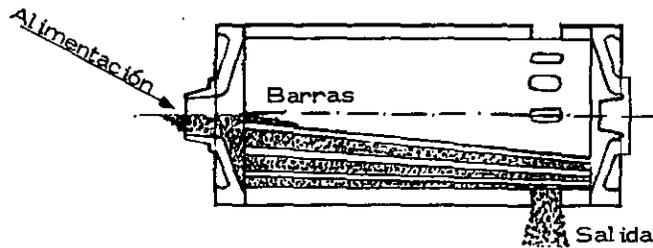
también los molinos de bolas que trabajan con el mismo principio que los anteriores, contando con los mismos elementos, pero en lugar de barras se utilizan esferas de diversos diámetros de acuerdo a la finura del material que se requiere.



Con doble entrada axial y salida periférica por la parte media. Finuras hasta malla # 4



Con entrada y salida axiales. Se obtienen finuras hasta malla # 50



Con entrada axial y salida periférica por un extremo. Finuras hasta malla # 20

FIG. 22 DIFERENTES TIPOS DE ALIMENTACION Y DESCARGA EN MOLINOS DE BARRAS.

3

3. EQUIPO COMPLEMENTARIO

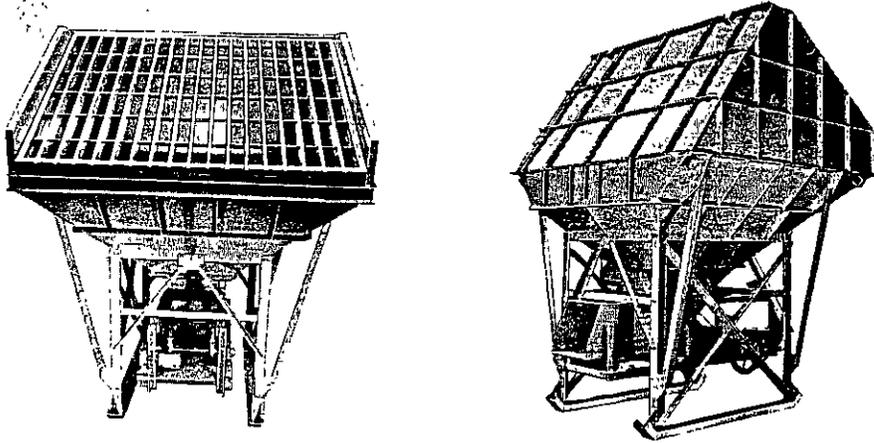
Como se indicó anteriormente, el equipo complementario no actúa directamente en el triturado de una roca, sino que ayuda de una u otra manera a transportar, depositar, distribuir y clasificar el material, existiendo un equipo idóneo para cada una de estas actividades. De igual forma que con el equipo de trituración, es necesario seleccionar el equipo complementario más adecuado, considerando las condiciones tanto del material como de la obra; para ello es necesario conocer las características específicas del equipo disponible.

En este capítulo se describen los equipos complementarios más utilizados, así como sus diferentes variantes.

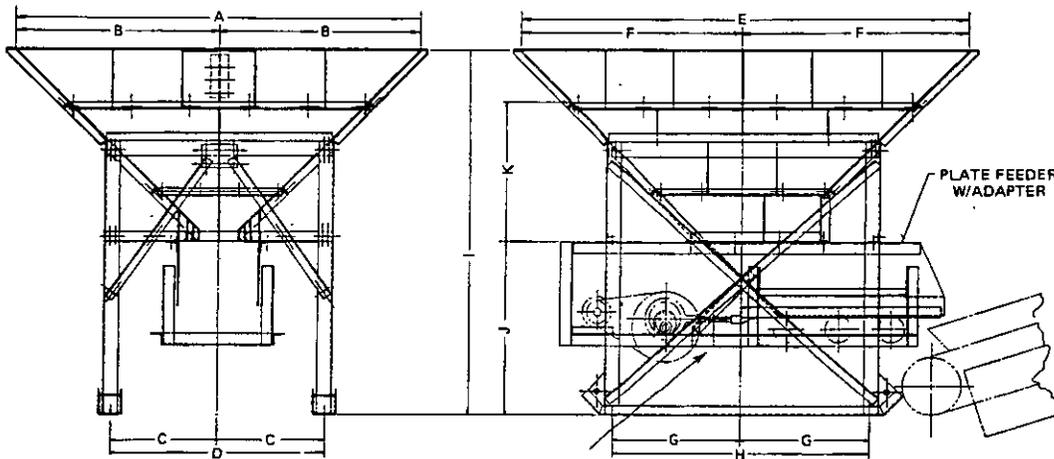
3.1 TOLVAS

La tolva es el componente de la planta donde el material se deposita por la parte superior y se extrae por la parte inferior.

La fig. 23 muestra en forma esquemática una tolva tipo.



a) VISTA GENERAL EN LA QUE SE APRECIA LA REJILLA SUPERIOR DE PRE-CRIBADO



b) ESQUEMA CON LOS CORTES TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL DEL CONJUNTO.

FIG. 23 VISTA GENERAL Y ESQUEMA DE TOLVA DE RECEPCION DE GRAVA-ARENA DE RIO, EQUIPADA CON ALIMENTADOR DE PLATO-RECIPROCANTE.

3.1.1 Usos de las tolvas

1. En la alimentación de las plantas, donde el material en greña es transportado por medio de camiones, bandas transportadoras, cargadores, etc. hasta la tolva. En la parte inferior se coloca un alimentador que irá dosificando la cantidad necesaria de material a la boca de admisión de la quebradora. Fig. 24.

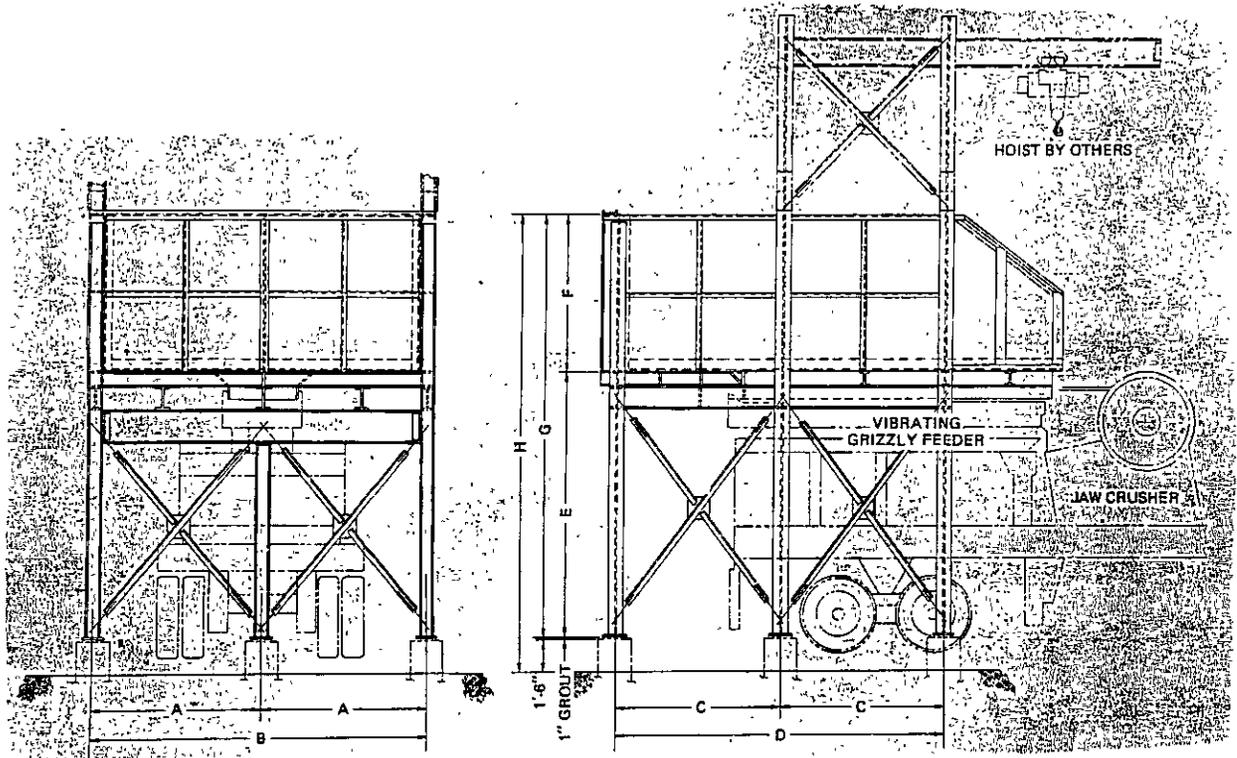


FIG. 24 CROQUIS CON LAS SECCIONES TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL DE UNA TOLVA DE RECEPCION, EQUIPADA CON ALIMENTADOR GRIZZLY VIBRATORIO PARA QUEBRADORA DE QUIJADAS.

2. Durante el proceso de trituración el material al salir de una quebradora, es depositado sobre bandas transportadoras, en donde se puede requerir de cambios de dirección del flujo, éstos se facilitan gracias al uso de pequeños canalones llamados chutes (Fig. 25).

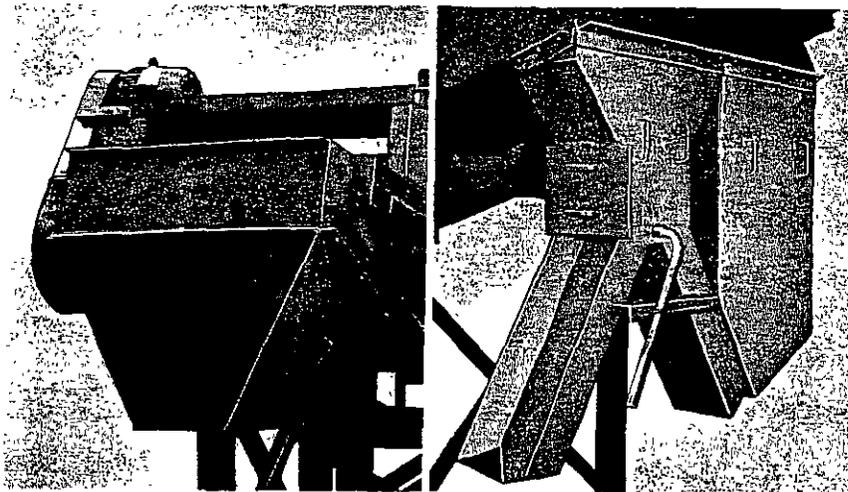


FIG. 25 CANALONES O "CHUTES" DE DESCARGA

3. Al finalizar el proceso de trituración el agregado es clasificado y depositado en tolvas, en donde se almacena temporalmente, mientras es requerido. Fig. 26.

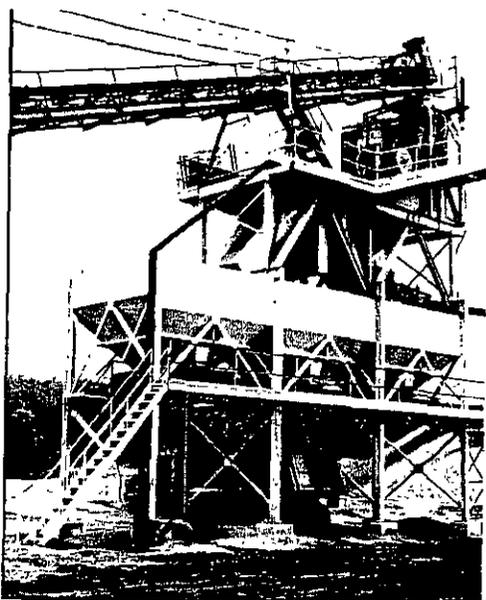


FIG. 26 DISTRIBUCION CON AYUDA DE TOLVAS

3.1.2 Recomendaciones

Una de las desventajas que presenta el uso de tolvas es su alto costo, debido al rápido desgaste que sufren sus componentes. En este sentido, es recomendable observar una serie de medidas preventivas a fin de incrementar su vida útil; algunas de las más utilizadas son las presentadas a continuación:

a) Encamisados (liners) de hule o de acero, dependiendo de la abrasividad del material. Estos se colocan en las paredes de la tolva, fijándose con tornillos de cabeza plana; en caso de desgaste pueden ser removidos con facilidad. Fig. 27

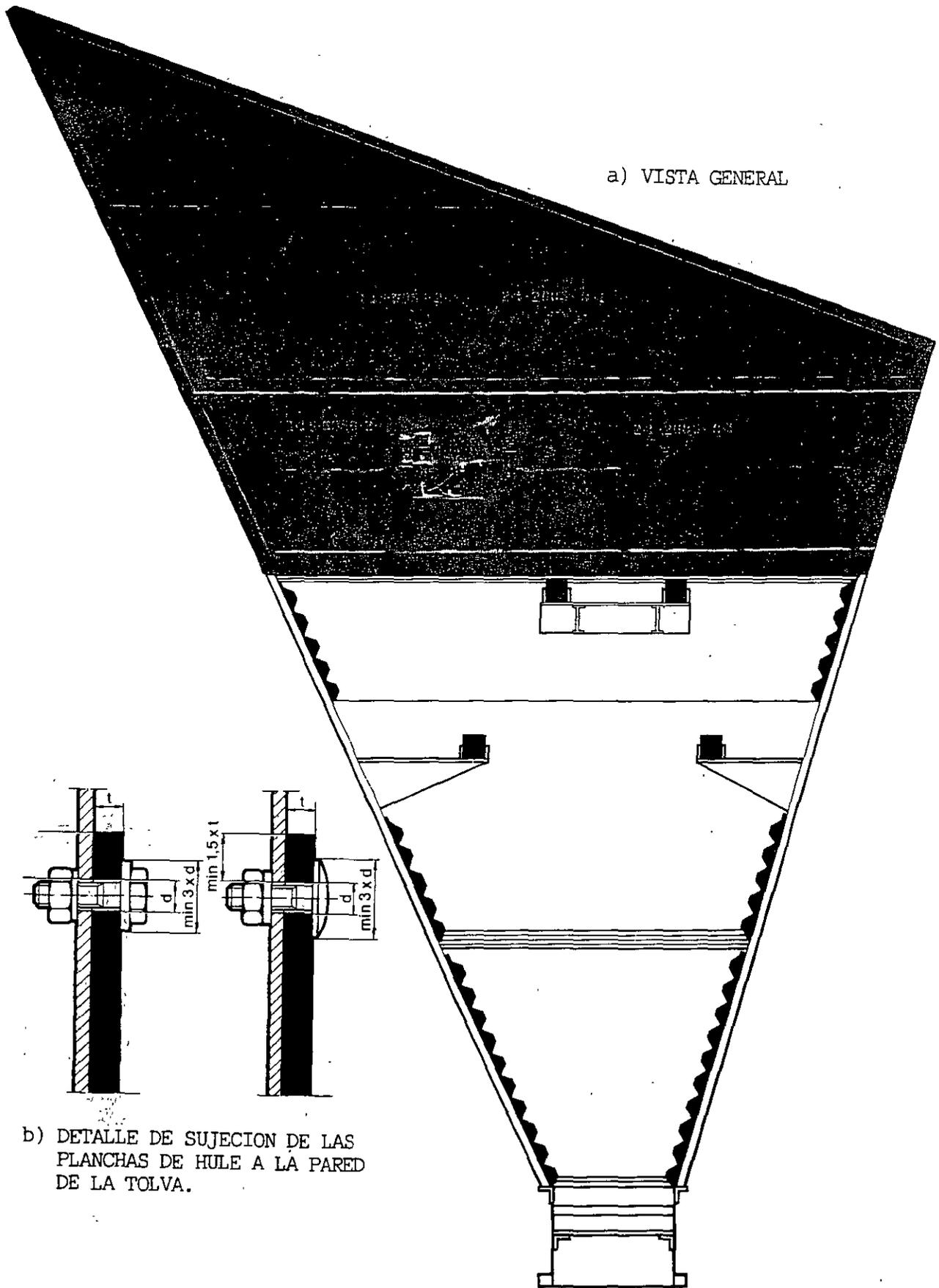


FIG. 27 ESQUEMA DE UNA TOLVA DE ACERO CON PROTECCION DE PLANCHAS DE HULE

b) Una forma muy recomendable para evitar el desgaste es provocar que el material, ya sea roca o agregado, se deslice sobre el mismo material. Esto se logra con un achatamiento en la parte posterior de la tolva, el cual deberá formar un ángulo α con respecto a la horizontal. Este ángulo debe ser ligeramente menor al ángulo de reposo del material γ , de tal manera que se provoque un acumulamiento de material, sobre el cual deslizará todo material depositado, posterior a éste, provocando impacto y fricción en la misma roca o agregado, evitando así el desgaste de la tolva. Fig. 28.

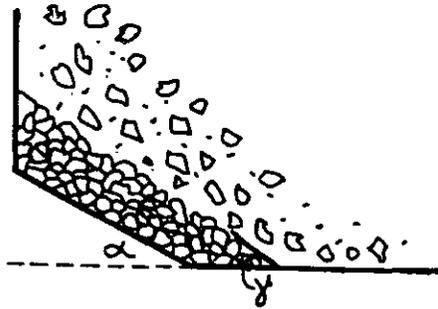
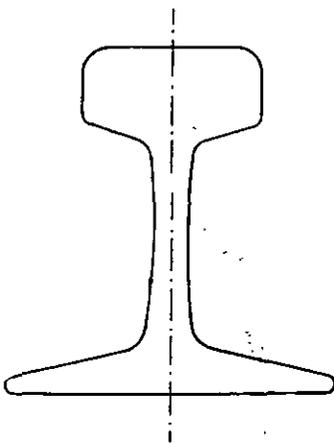


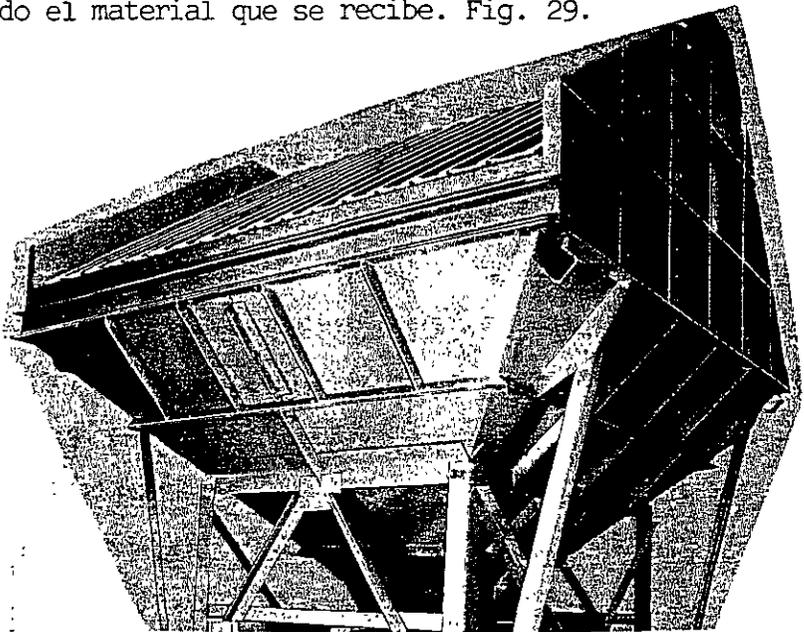
FIG. 28 DISPOSITIVO DE UNA TOLVA PARA EVITAR DESGASTE

Las dimensiones de las tolvas deben de ser acordes con la cantidad de material que se va a manejar; regimen de alimentación de la cantera y regimen de salida.

Las tolvas tienen en la parte superior rieles que impiden que el material caiga bruscamente sobre las bandas o quebradoras según sea el caso, estos rieles cuentan asimismo con una protección contra fricción y desgaste, precribando el material que se recibe. Fig. 29.



a) DETALLE



b) CONJUNTO

FIG. 29 RIELES DE PROTECCION Y PRE-CRIBADO EN LA PARTE SUPERIOR DE LAS TOLVAS DE RECEPCION

3.2 CRIBAS

En toda planta de producción de agregados es necesario clasificar el material; ésto se hace mediante el cribado, que además ayuda a dirigir, separar y controlar el material a través de todo el proceso de trituración.

Los principales objetivos del cribado son:

- 1) Clasificación del producto por tamaños.
- 2) Separación de los agregados que no tengan el tamaño adecuado.
- 3) Separación de los agregados finos que no necesiten más trituración.

El pre-cribado durante la etapa primaria de trituración, se lleva a cabo separando aquel material de un tamaño susceptible de usarse sin necesidad de trituración, reduciendo así la carga total de la quebradora y aumentando la capacidad total de la planta.

Durante las etapas secundaria y terciaria el cribado se realiza por la misma razón que en la etapa primaria, así como para separar los agregados mayores al tamaño máximo aceptado y regresarlos nuevamente al proceso de trituración. En estas etapas es importante el cribado ya que clasifica los tamaños del agregados ya producido.

Los pisos de clasificación son mallas cuadradas formadas por alambres entretejidos o bien por placas con perforaciones de diferentes aberturas de acuerdo al tamaño requerido, las más usuales en base a las especificaciones son las siguientes:

1. ESTADOS UNIDOS: NORMA A.S.T.M.

DESIGNACION DE MALLA	CLARO ENTRE MALLAS (mm)
3"	76
1½"	38
¾"	19
¼"	6.3
# 4	4.76
# 8	2.38
# 16	1.19
# 30	0.59
# 50	0.297
#100	0.149
#200	0.074
#400	0.037

2. FRANCIA: NORMA AFNOR NF-XII-501

DESIGNACION DE LA MALLA	CLARO ENTRE MALLAS (mm)
50	50
20	20
15	15
10	10
5	5
Módulo 37	4
35	2.5
32	1.25
28	0.50
25	0.25
22	0.125
20	0.080
17	0.040

3. INGLATERRA: NORMA BSA-410

DESIGNACION DE LA MALLA	CLARO ENTRE MALLAS (mm)
3"	76
1½"	38
¾"	19
¼"	6.3
# 5	3.35
#10	1.67
#22	0.699
#44	0.353
#85	0.178
#100	0.172
#200	0.076
#300	0.053

En México se utilizan las normas de la SCT, SARH, CFE, etc., basadas en las de la A.S.T.M.

Las cribas se pueden clasificar de la siguiente manera:

1. Cribas vibratorias inclinadas.
2. Cribas horizontales vibratorias.
3. Cribas giratorias (trommels).

3.2.1 Cribas vibratorias inclinadas

Este tipo de cribas tienen un plano inclinado para poder recibir el material. La vibración se provoca mediante un excéntrico simple, que gira en torno a un eje perpendicular al plano de la criba, la vibración hace que el material avance hacia abajo (fig. 30) sobre el plano inclinado de la misma. Estas cribas se utilizan generalmente en plantas fijas.

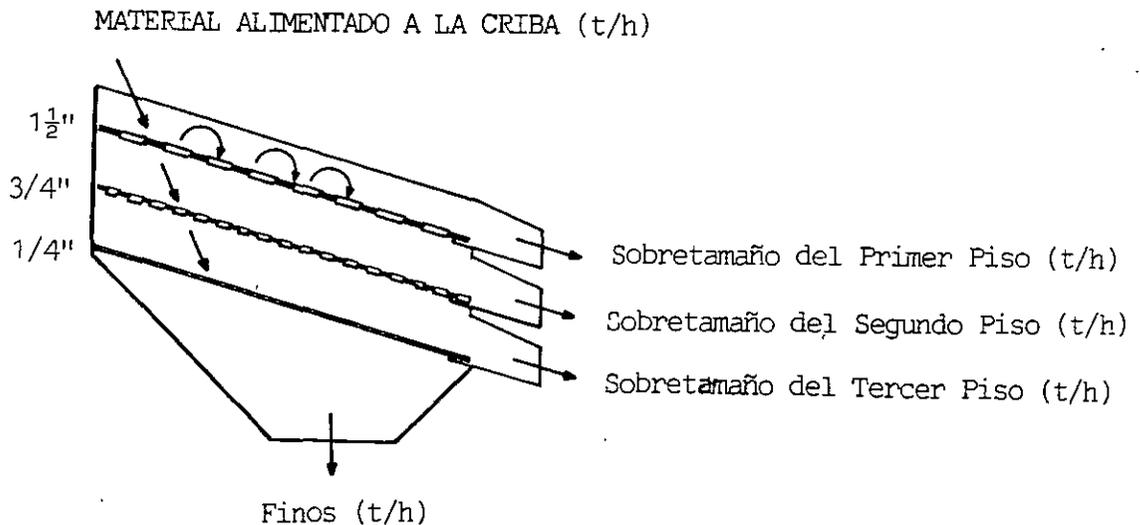
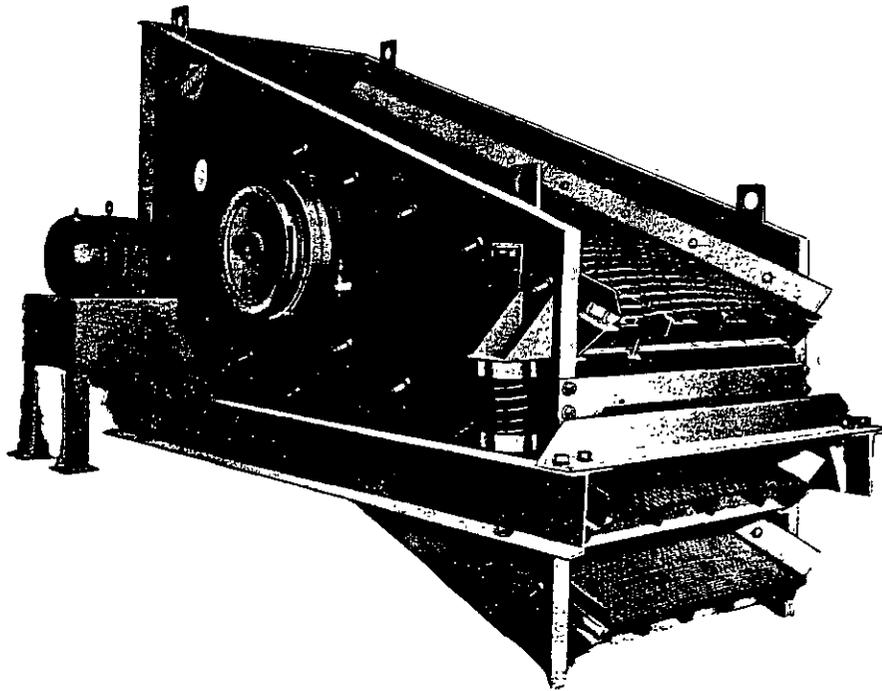


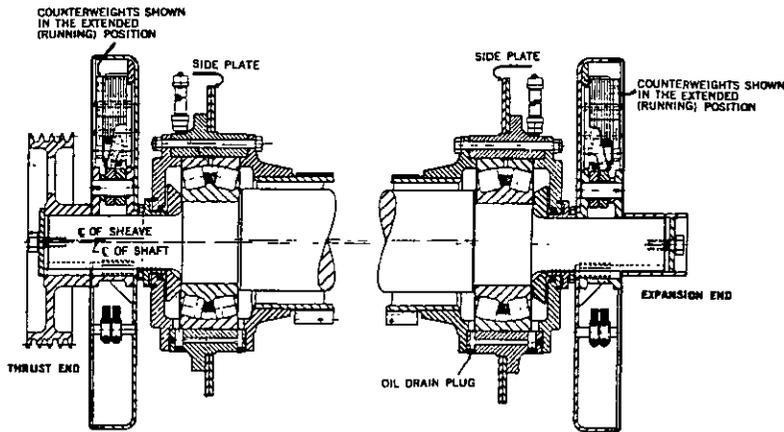
FIG. 30 CORTE ESQUEMATICO CRIBA VIBRATORIA INCLINADA DE TRES PISOS

La criba está dispuesta de amortiguadores que aíslan el bastidor que las soporta, de la vibración. Los tamaños más utilizados hablando de ancho por longitud de la superficie de cribado son:

3' 6', 3' x 8', 4' x 8', 4' x 10', 4' x 12', 5' x 8', 5' x 12', 5' x 14', 5' x 16', 6' x 16', 7' x 16', 7' x 18', 7' x 20', 8' x 18', 8' x 20', 8' x 22', 8' x 24', en sus versiones de uno, dos y tres pisos (fig. 31).



(a)



(b)

FIG. 31

- a) VISTA EXTERIOR DE UNA CRIBA VIBRATORIA INCLINADA DE TRES PISOS
- b) EXCENTRICO SIMPLE PARA CRIBA VIBRATORIA INCLINADA

3.2.2 Criba horizontal

Esta criba es similar a la vibratoria inclinada, la única diferencia es que tiene doble excéntrico como el que se muestra en la figura 32. En la Fig. 33 se muestra una criba de este tipo.

Con cualquiera de los dos tipos de criba descritos, horizontal e inclinada se logran las mismas producciones y eficiencias, siendo estas últimas las más económicas por su excéntrico simple, pero ocupan, para tamaños iguales, un mayor espacio vertical de instalación, que sus homólogas horizontales son aconsejables para equipar los grupos móviles siendo los tamaños más utilizados: 4' x 8', 4' x 10', 4' x 12', 5' x 12', 5' x 14', 5' x 16', 6' x 16', 6' x 18', 6' x 20', en sus versiones de uno, dos y tres pisos.

3.2.3 Criba giratoria

Esta criba consiste en un tambor grande de paredes cilíndricas perforadas el cual gira lentamente sobre su eje longitudinal inclinado. El material que se introduce por el extremo superior del cilindro, se mueve por el interior del mismo hasta que pasa por las aberturas; en cuanto a la cantidad de material que maneja este tipo de cribas, depende de la velocidad de rotación y de la inclinación, figura 34. En la actualidad, por su baja eficiencia con relación a las Cribas Vibratorias, este tipo de máquinas está prácticamente en desuso.

3.2.4 Capacidad de las cribas Vibratorias

Existen una gran variedad de tablas para obtener la capacidad de las cribas (dependiendo del fabricante) en base a la siguiente expresión:

$$\text{Area en piés cuadrados} = \frac{\text{Alimentación} - \text{Sobretamaño}}{A \times B \times C \times D \times E \times F}$$

Donde A, B, C, D, E y F son factores que dependen de las características de las cribas y del material. Estos factores se especifican en las tablas. Anexo III.

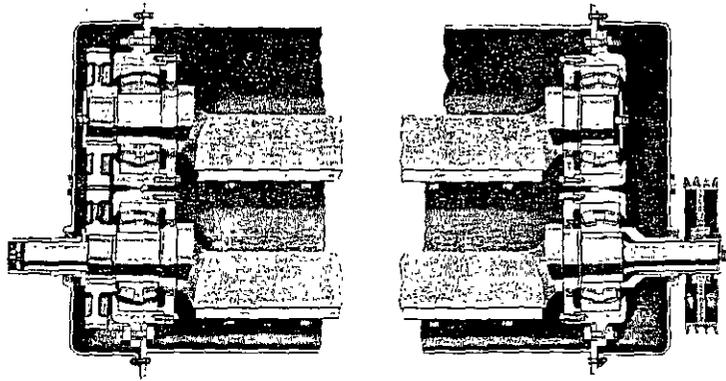
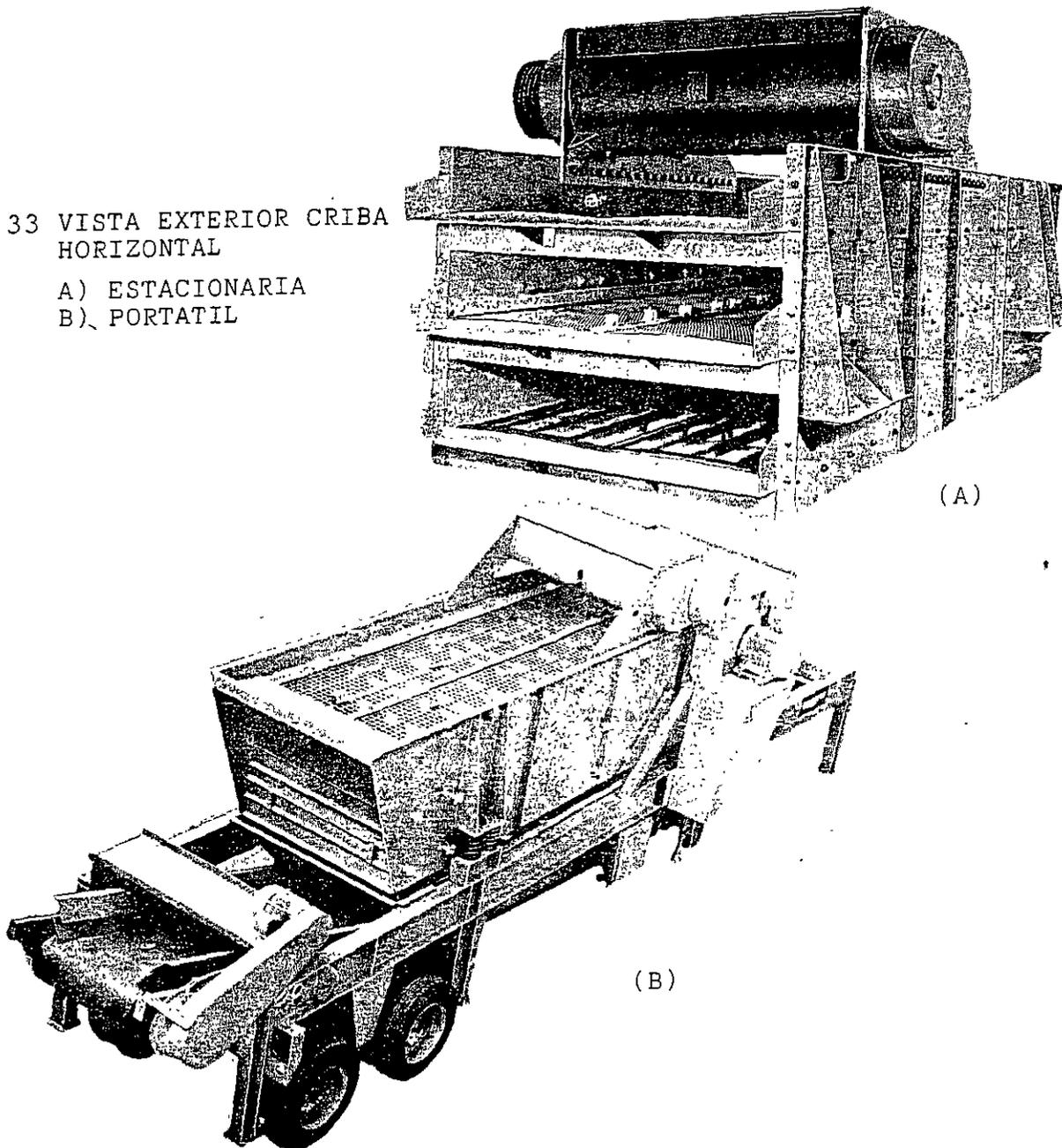


FIG. 32

DOBLE EXCENTRICO EN
CRIBA HORIZONTAL

FIG. 33 VISTA EXTERIOR CRIBA
HORIZONTAL

A) ESTACIONARIA
B) PORTATIL



(A)

(B)

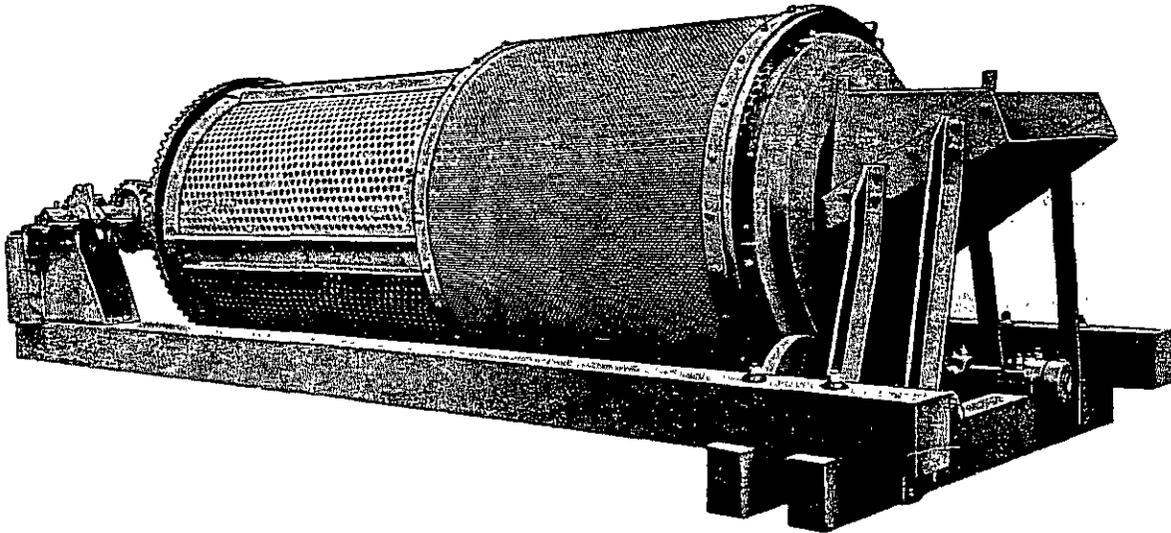


FIG. 34 VISTA GENERAL DE UNA CRIBA GIRATORIA (TROMMEL)

3.3 ALIMENTADORES

La alimentación del material en greña puede realizarse directamente en la boca de una trituradora, pero generalmente se hace por medio de tolvas en cuya parte inferior se encuentran los alimentadores, con o sin dispositivo de precibado, que conducirán el material hacia la quebradora.

Los principales propósitos de los alimentadores son:

1. Introducir el material a la planta de trituración.
2. Alimentarla uniforme, continuamente y sin fluctuación.
3. Proporcionar la cantidad requerida de material.
4. Recibir el material.
5. Adecuación de sus dimensiones a las condiciones y naturaleza de la alimentación.

Existen varios tipos de alimentadores, los más conocidos son:

Alimentador de mandil o de tablero metálico

Alimentador recíprocante o de plato.

Alimentador vibratorio con o sin rejilla (Grizzly) de precibado.

Alimentador de banda.

3.3.1 Alimentadores de mandil o tablero metálico (Apron Feeders)

Este alimentador está compuesto de paletas metálicas continuas que forman una especie de banda, la cual se mueve a una velocidad relativamente lenta (3 a 10 m/min.), accionado por un sistema de motor eléctrico, reductor, catarinas y cadenas; las paletas de acero forjado y la sobreposición de estas proveen al alimentador de un sistema de autolimpieza, por lo que está acondicionado para manejar material contaminado de arcilla; este tipo de equipo se recomienda para instalaciones de alta producción, donde se manejan grandes bloques de roca, en especial en plantas mineras y cementeras.

La alimentación que proporciona es continua y uniforme, pudiendo ser regulada equipando el alimentador con controles de velocidad.

Este equipo se puede encontrar en muy diversas dimensiones, siendo los anchos más utilizados:

24", 30", 36", 42", 48", 54", 60", 72" y 84" (Fig. 35)

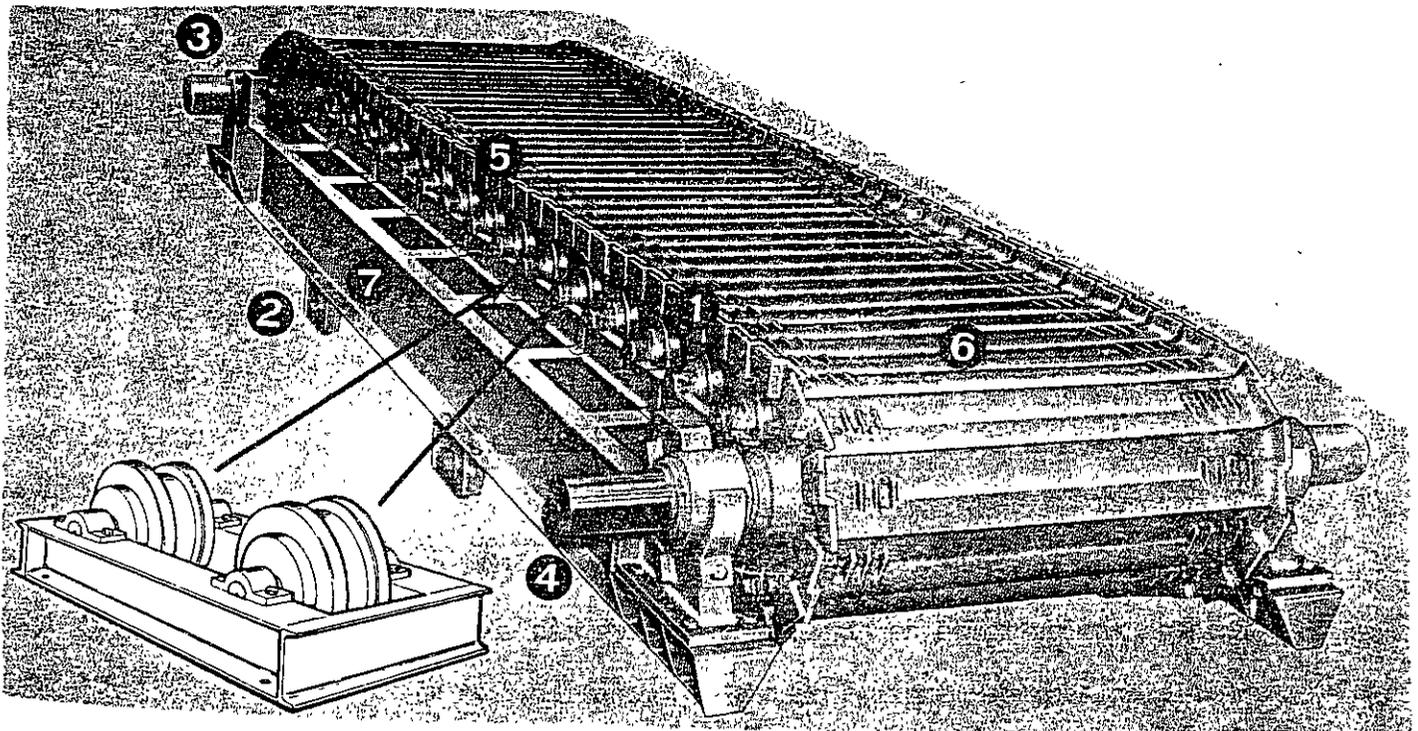


FIG. 35 ALIMENTADOR DE MANDIL O DE TABLERO METALICO (APRON FEEDER)

Tamaño mínimo del alimentador. Ancho x Longitud	Longitud máxima en pies	Capacidad en TPH para 25 PPM	H.P. REQUERIDOS PARA LAS LONGITUDES STANDAR.									Carga muy pesada. Mandil fabricado en fundición de acero al manganeso		Carga pesada. Mandil fabricado en placas de acero formadas	
			6'	9'	12'	15'	18'	21'	24'	27'	30'	Peso del alimentador de long. mínima (Lbs).	Peso por pie adicional (Lbs).	Peso del alimentador de long. mínima (Lbs).	Peso por pie adicional (Lbs).
24" x 6'	15'	150	1½	2	3	3	--	--	--	--			4565	465	
30" x 6'	18'	234	2	3	3	5	5	--	--	--			4975	500	
36" x 9'	21'	338	-	3	3	5	5	5	--	--	11215	780	9860	665	
42" x 9'	21'	459	-	5	5	7½	7½	10	--	--	11885	830	10365	695	
48" x 12'	27'	600	-	-	7½	7½	10	10	15	15	15605	865	13215	720	
54" x 12'	27'	759	-	-	10	10	15	15	15	20	17290	945	14740	770	
60" x 15'	30'	937	-	-	--	15	15	20	20	20	24250	1120	20650	910	
72" x 15'	30'	1350	-	-	--	15	20*	20*	20*	30*	31470	1580	22790	1075	
84" x 18'	30'	1838	-	-	--	--	20	30*	30*	40*	**	**	**	**	

TABLA DE CAPACIDADES Y CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS ALIMENTADORES DE MANDIL O DE TABLERO METALICO

*.- Potencia total con dos motores eléctricos

**.- tamaño disponible únicamente en fundición de acero al carbón

3.3.2 Alimentador reciprocante o de plato (Plate Feeder)

Se compone de una placa metálica rectangular montada sobre rodillos, animada de un movimiento de vaivén ocasionado por una biela excéntrica, con la cual se puede controlar el régimen de la alimentación.

Estos alimentadores se usan por lo general en instalaciones pequeñas para el manejo de arenas y gravas, son relativamente económicos tanto en costo como en mantenimiento.

Los anchos más utilizados son:

16", 20", 24", 30", 36", 48", 60" y 72". (Fig. 36).

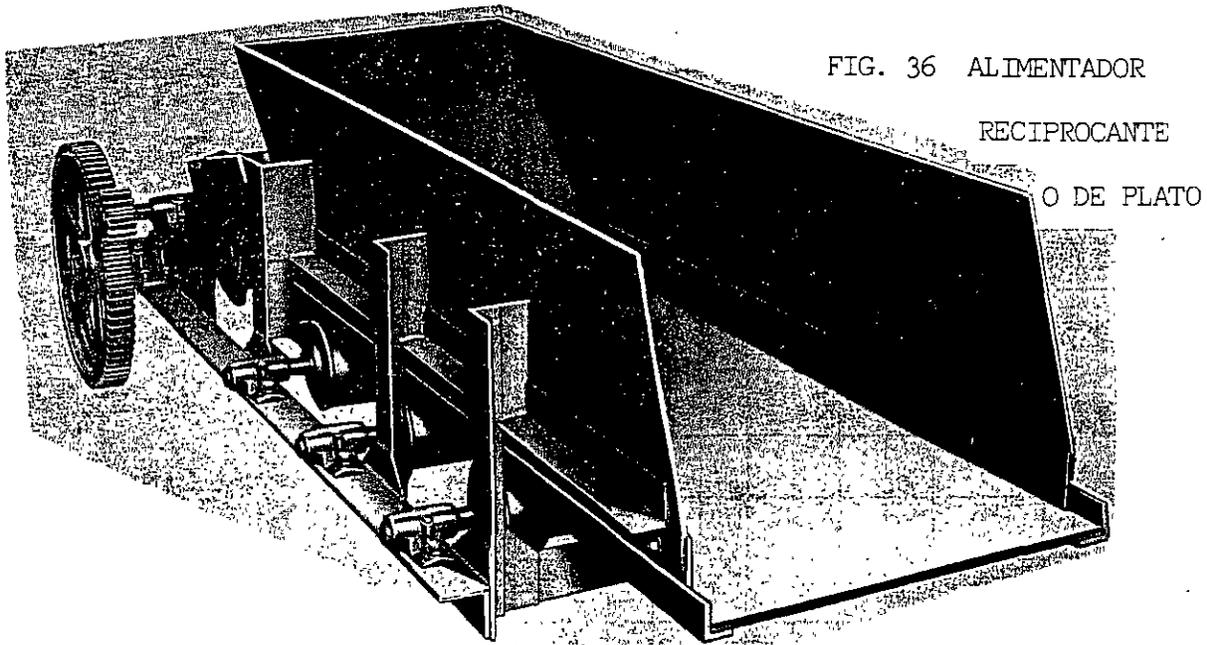


FIG. 36 ALIMENTADOR
RECIPROCANTE
O DE PLATO

Tamaño del Alimentador de Plato Estandar (ancho x long)	TRABAJO NORMAL				TRABAJO PESADO				
	16"x5'	20"x5'	24"x5'	*30"x5'-6"	*30"x5'-6"	36"x6'	*48"x7'	60"x8'	*72"x10'
Capacidad, en Tons. por hora	15-60	25-100	35-140	55-220	55-220	75-300	150-600	240-960	280-1100
Ajuste de la carrera, en pulg.	2-6	2-6	2-6	2-6	2-6	3-8	3-8	3-8	3-8
Velocidad de la flecha excéntrica, en R.P.M.	50	50	50	50	50	40	40	40	30
Caballos de fuerza requeridos	1½	1½	2	3	5	7½	10	20	40
Peso de la unidad, en lbs.	1100	1150	1320	2180	3200	4100	6700	10000	16700
Peso del empaque de madera para exportarse, en lbs.	1250	1300	1500	2450	3600	4600	7500	11250	18000
Volumen, en pies ³	70	90	100	170	170	250	520	650	930

* Alimentadores con dos excéntricos

TABLA DE CAPACIDADES Y CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS ALIMENTADORES
RECIPROCANTES DE PLATO

3.3.3 Alimentador vibratorio con o sin rejilla de precibado (Grizzly).

Este tipo de alimentador es el de mayor uso en la actualidad. Por medio de vibraciones a 45° con respecto a la horizontal, el material es conducido hacia adelante. El rango de alimentación puede ser controlado por un motor de velocidad variable y un control del mismo que regula la frecuencia de las vibraciones.

Se utilizan generalmente en instalaciones de mediana y elevada producción, para elaborar agregados pétreos para la industria de la construcción.

Las rejillas (Fig. 37) hacen una preclasificación del material enviando a la quebradora primaria únicamente el material que necesita de esta primera etapa de trituración. El material pequeño que pueda con tener la greña será almacenado o mandado a trituración secundaria o terciaria según sea el caso, evitándose así un desgaste innecesario del equipo, obteniéndose un mayor rendimiento en la producción. Los anchos más utilizados son: 36", 42", 48", 60" y 72" (Fig. 38).

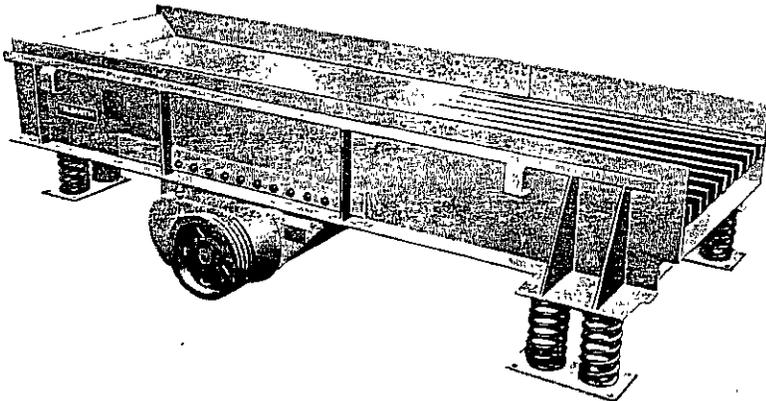


FIG. 37 ALIMENTADOR VIBRATORIO CON REJILLA DE PRECIBADO

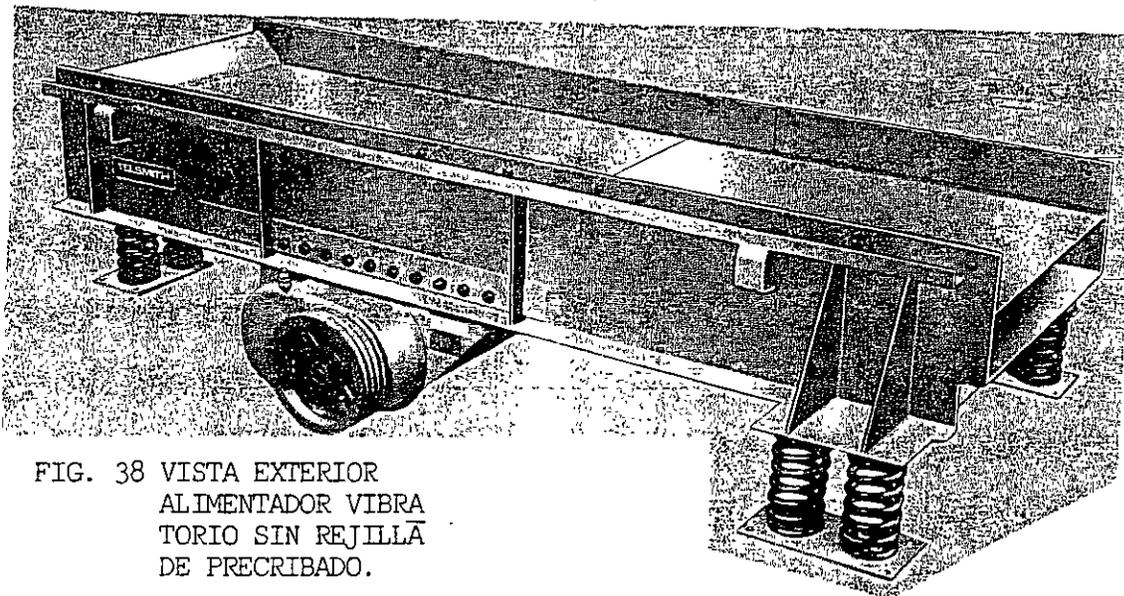


FIG. 38 VISTA EXTERIOR ALIMENTADOR VIBRATORIO SIN REJILLA DE PRECIBADO.

ESPECIFICACIONES Y CAPACIDADES DE LOS ALIMENTADORES GRIZZLY Y VIBRATORIOS

ANCHO ESTANDAR LONGITUD ESTANDAR	36" DE ANCHO			42" DE ANCHO			48" DE ANCHO					60" DE ANCHO				72" DE ANCHO			
	12'	14'	16'	12'	14'	16'	12'	14'	16'	18'	20'	16'	18'	20'	22'	16'	18'	20'	22'
Alimentador Vibratorio - Peso Total lb	6375	6910	8145	6800	7390	8260	7345	7765	9340	19000	20400	19850	21350	22600	24300	22450	24750	24350	25850
Alimentador Grizzly vibra- torio con seccion de rejilla de 5'-peso total lb	6525	7005	8310	7090	7625	8550	7640	8015	9625	19350	20750	20300	21800	23050	24750	22900	24550	24750	26300
Alimentador Grizzly vibratorio con Sección de rejilla de 8' peso total lb	--	--	8900	--	--	9270	--	--	11420	--	--	21800	23200	--	--	23550	--	--	--
Alimentador Grizzly vibratorio con Sección de rejilla de 9' Peso total lb	--	--	--	--	--	--	--	--	--	19900	21650	--	22850	24700	--	--	25250	27000	--
Alimentador Grizzly vibratorio con Sección de rejilla de 10' Peso total lb	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	25300	--	--	--	28000
Extensiones fuera de la zona de carga - ancho	7' 6"	7' 6"	7' 6"	8' 0"	8' 0"	8' 0"	8' 6"	8' 6"	8' 6"	8' 6"	8' 6"	9' 6"	9' 6"	9' 6"	9' 6"	10' 5"	10' 5"	10' 5"	10' 5"
Dentro de la zona - ancho	13' 6"	13' 6"	13' 6"	14' 0"	14' 0"	14' 0"	14' 6"	14' 6"	14' 6"	14' 6"	14' 6"	15' 6"	15' 6"	15' 6"	15' 6"	16' 5"	16' 5"	16' 5"	16' 5"
Extens. fuera de la zona de carga - peso	8950	10200	11250	9050	10350	11400	12050	12850	13500	14250	15850	13650	14450	16050	16950	13900	14700	16400	17200
Dentro de la zona - peso	13850	15250	16350	14000	15400	16500	18800	20600	22250	26000	28250	24800	26400	29650	30550	26900	26950	30250	31100
Motor eléctrico - H.P.	15	15	20	15	20	20	20	20	25	30	30	30	30	40	40	40	40	50	50
Rango de capacidades en tons. por hora	325- 975	325- 975	325- 975	400- 1150	400- 1150	400- 1150	450- 1325	450- 1325	450- 1325	450- 1325	450- 1325	575- 1700	575- 1700	575- 1700	575- 1700	700- 2050	700- 2050	700- 2050	700- 2050

TABLA DE CAPACIDADES Y CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS ALIMENTADORES VIBRATORIOS

La rejilla que caracteriza este tipo de alimentador es conocido como grizzly. Este tipo de alimentador necesita menor mantenimiento que cualquier otro tipo. Se fabrica en anchos de 36", 42", 48", 60" y 72".

3.3.4 Otros tipos de alimentadores

Alimentador de banda

Este tipo de alimentador trabaja con el mismo principio que el de tipo mandil pero se utiliza para material de menores dimensiones. Tiene una compuerta en la parte superior que ayuda a controlar la alimentación (Fig. 39).

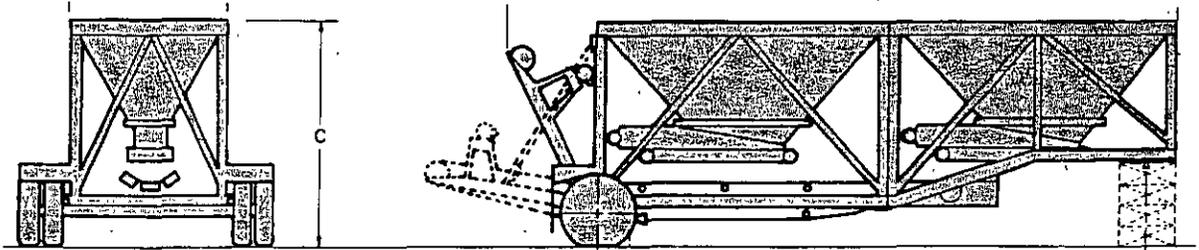


FIG. 39 TOLVAS EQUIPADAS CON ALIMENTADORES DE BANDA.

3.3.5 Selección de los alimentadores

Datos requeridos para seleccionar un Alimentador:

1. Toneladas por hora que deben ser manejadas, incluyendo alimentaciones máxima y mínima.
2. Peso volúmetrico del material.
3. Distancia a la cual debe transportarse el material.
4. Altura a la cual el material debe ser elevado.
5. Limitaciones de espacio.
6. Método utilizado para la carga del alimentador.
7. Características del material.

Procedimiento seguido para seleccionar un Alimentador:

Eta^a 1: Seleccionar el tipo de Alimentador de acuerdo con el cuadro de "APLICACION DE LOS ALIMENTADORES".

Eta^a 2: Seleccionar el ancho del Alimentador. El ancho puede depender de la quebradora que va a ser alimentada; por ejemplo, una Quebradora de Quijadas con una determinada boca de admisión o por el tamaño de la abertura de la Tolva que va a utilizarse. El ancho del Alimentador puede también ser determinado por el

tamaño máximo de la roca en la alimentación, o por la profundidad deseada del material y su velocidad de transporte. (ver nota).

Etapa 3: Verificar la capacidad del Alimentador seleccionado, contra las cifras indicadas en las páginas de capacidades respectivas.

Etapa 4: Determinar los HP (caballos de potencia) requeridos de las tablas de selección del tipo de Alimentador respectivo (Etapa 1).

Nota: La profundidad para un material con peso volumétrico de 100 libras por pié cúbico (aproximadamente 1600 kilogramos por metro cúbico), puede encontrarse por medio de la fórmula siguiente:

$$D = \frac{4 \times \text{TPH}}{W \times \text{FPM}}$$

en la cual:

- D = Profundidad en pulgadas
TPH = Toneladas por hora
FPM = Piés por minuto a los cuales es alimentado el material
W = Ancho neto del Alimentador en piés

APLICACION DE LOS ALIMENTADORES

TIPO DE TRABAJO	TIPO DE ALIMENTADOR RECOMENDADO
Carga de volteo de camión o carga directa por Bulldozer, pala o draga. El tamaño máximo de la roca no deberá exceder el 75% del ancho del Alimentador	Alimentador de tablero metálico tipo Apron, para trabajo extrapesado con paletas de acero al Manganeso.
Alimentación de una tolva de carga de material no abrasivo. El tamaño máximo de la roca no deberá exceder el 75% del ancho del Alimentador.	Alimentador de tablero metálico tipo Apron, para trabajo extrapesado con paletas de acero al carbón.
Carga de volteo de camión o carga directa por Bulldozer, pala o draga. El tamaño máximo de la roca no deberá exceder al 50% del ancho del Alimentador.	Alimentador de tablero metálico tipo Apron, para trabajo pesado.

TIPO DE TRABAJO	TIPO DE ALIMENTADOR RECOMENDADO
Alimentación de una tolva de carga de material no abrasivo. El tamaño máximo de la roca no deberá exceder al 30% del ancho del Alimentador.	Alimentador de tablero metálico tipo Apron, para trabajo Standard.
Carga de volteo de camión o carga directa por Bulldozer. El tamaño máximo de la roca no deberá exceder al 75% del ancho del Alimentador.	Alimentador vibratorio de charola o Alimentador vibratorio de rejilla.
Alimentador bajo la Quebradora Primaria para proteger a la Banda Transportadora de evacuación.	Alimentador Vibratorio de Rejilla.
Alimentador bajo tolvas o pilas de almacenamiento. El tamaño máximo del Agregado no deberá exceder al 50% del ancho del Alimentador.	Alimentador reciprocante de plato.
Alimentador bajo tolvas o pilas de almacenamiento. El tamaño máximo del Agregado no deberá exceder al 30% del ancho del Alimentador.	Alimentador de Banda.

3.4 EQUIPO DE LAVADO Y DESENLIDADORES

En la producción de agregados pétreos por vía húmeda, fundamentalmente para la elaboración de concretos hidráulicos, es necesario lavar el material, ésto se hace por medio del equipo de lavado, existiendo diversos tipos y modelos:

3.4.1 Flautas de Riego

1) Lavadores de grava. El lavado de la grava se hace durante el cribado aplicándole chorros de agua a alta velocidad (chiflones) los cuales remueven la arena y polvo adheridos. (Fig. 40).

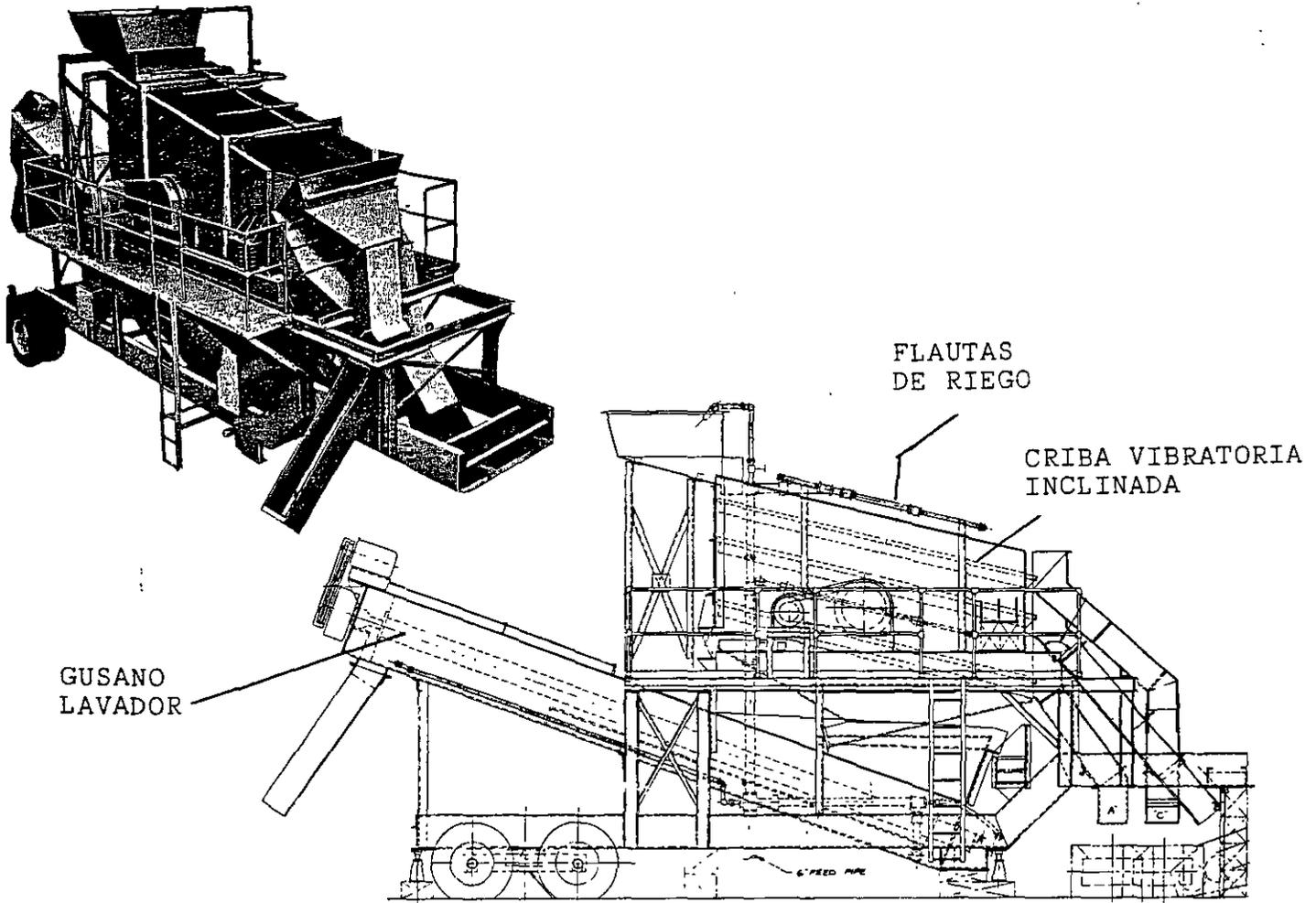
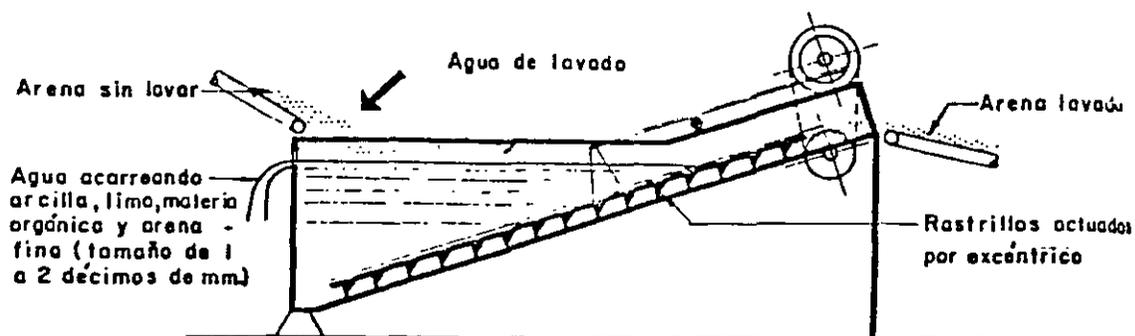


FIG. 40 PLANTA PORTATIL DE CRIBADO Y LAVADO DE AGREGADOS PETREOS

2) Rastrillos. Existen dos tipos de lavado por rastrillo, basándose en el mismo principio: El material contaminado entra por el mismo lado que lo hace el agua, los finos del material son capturados por ésta y el material grueso cae en los rastrillos que lo conducen al exterior por el extremo contrario. Los rastrillos pueden actuar mediante excéntricos o bien por medio de bandas o eslabones. (Fig. 41 a y b respectivamente).



a) ACTUADOS POR EXCENTRICO

b) EN ESLABON O BANDA

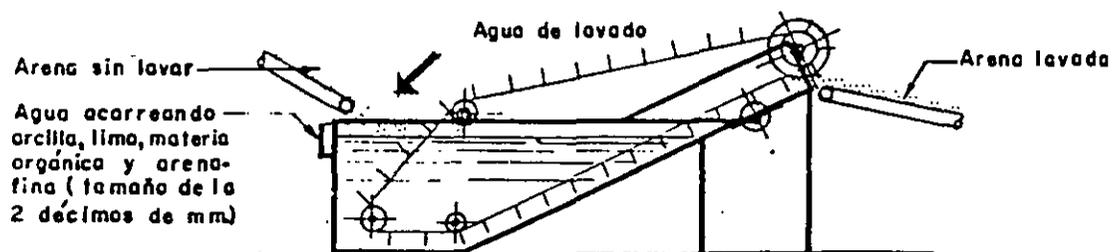


FIG. 41 RASTRILLOS

3) Gusano lavador o clasificador de tornillo de Arquímedes. Está compuesto de un recipiente metálico que por lo general se ensancha en la parte inferior formando un tanque de clasificación, en su interior se encuentra una espiral que lava las impurezas de las arenas escurriéndolas del agua excedente y evacuándolas por su parte antero-superior para su almacenamiento, (Figs. 42 y 43). Se fabrican en diámetros de 20", 24", 30", 36", 42", 48", 60" y 72", en sus versiones de Gusano Simple y Gusano Doble.



FIG. 42 CORTE ESQUEMATICO DE GUSANO LAVADOR

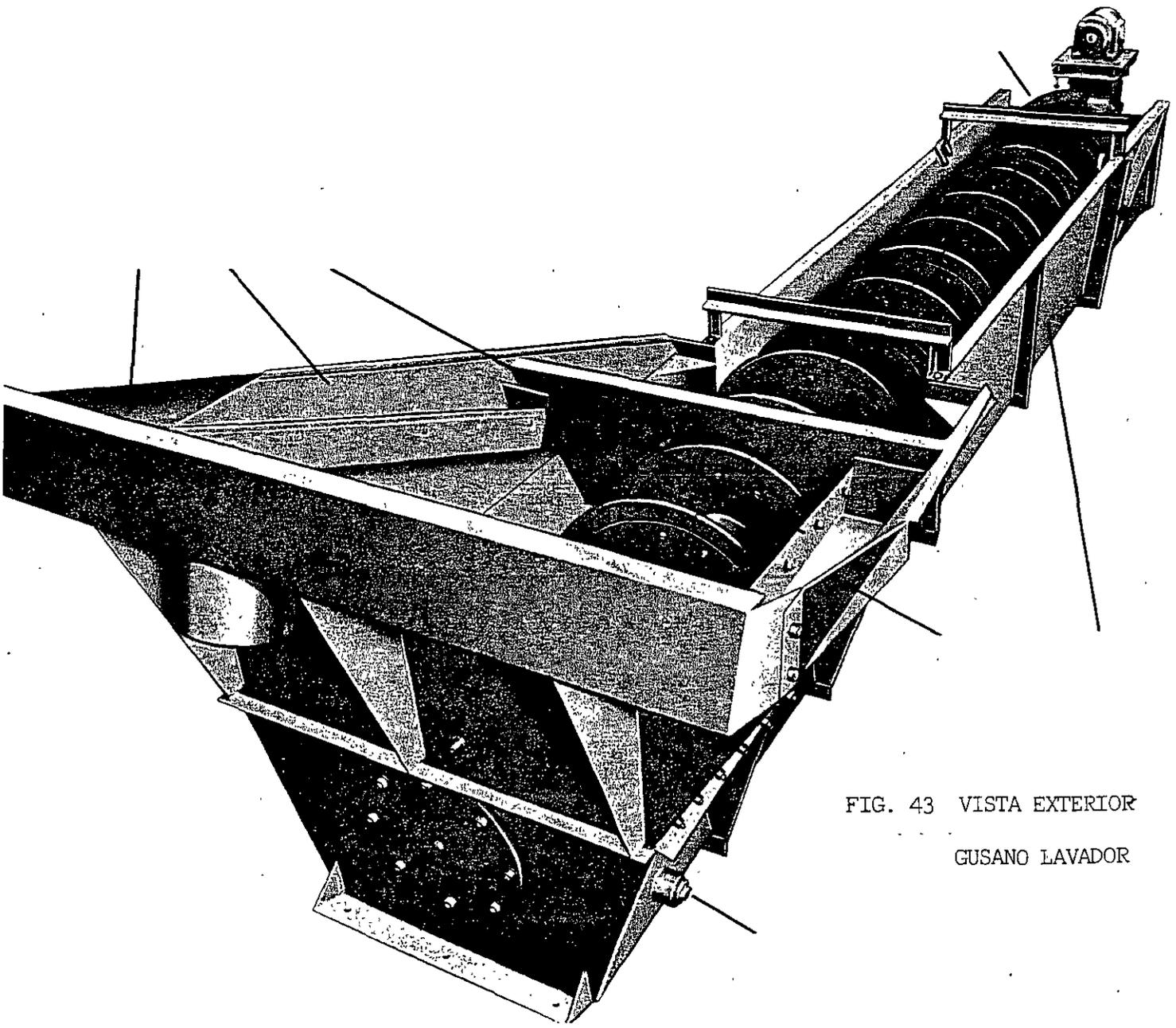


FIG. 43 VISTA EXTERIOR
GUSANO LAVADOR

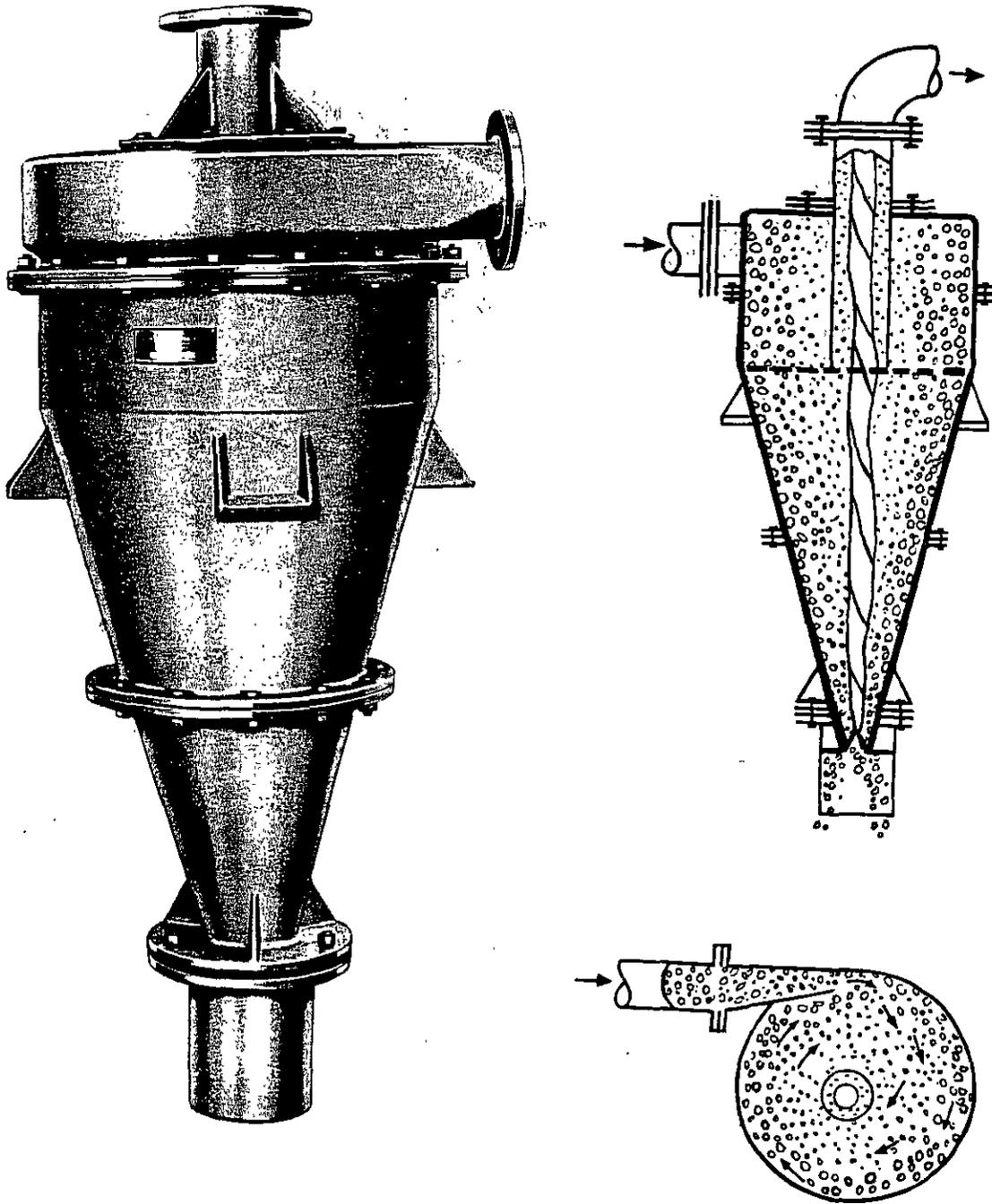


FIG. 44 CICLON HIDRAULICO PARA LA RECUPERACION DE PARTICULAS FINAS DE ARENA ARRASTRADAS EN EL VERTEDOR DE UN GUSANO LAVADOR. VISTA GENERAL Y CROQUIS LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL DE SU PRINCIPIO DE OPERACION.

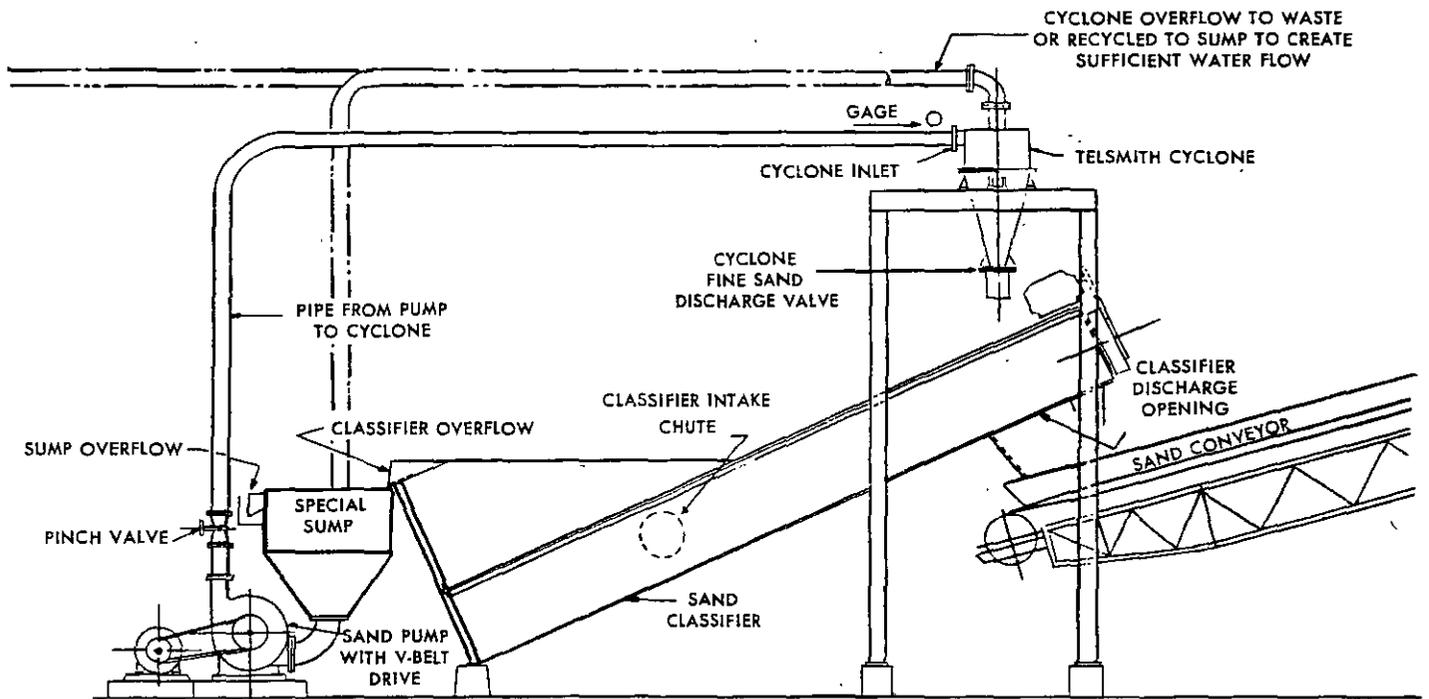


FIG. 45 VISTA GENERAL Y ESQUEMA DE INSTALACION DE UN GUSANO LAVADOR Y CICLON HIDRAULICO, PARA LA CLASIFICACION POR VIA HUMEDA Y RECUPERACION DE FINOS UTILES DE ARENAS DESTINADAS A LA ELABORACION DE CONCRETOS HIDRAULICOS.

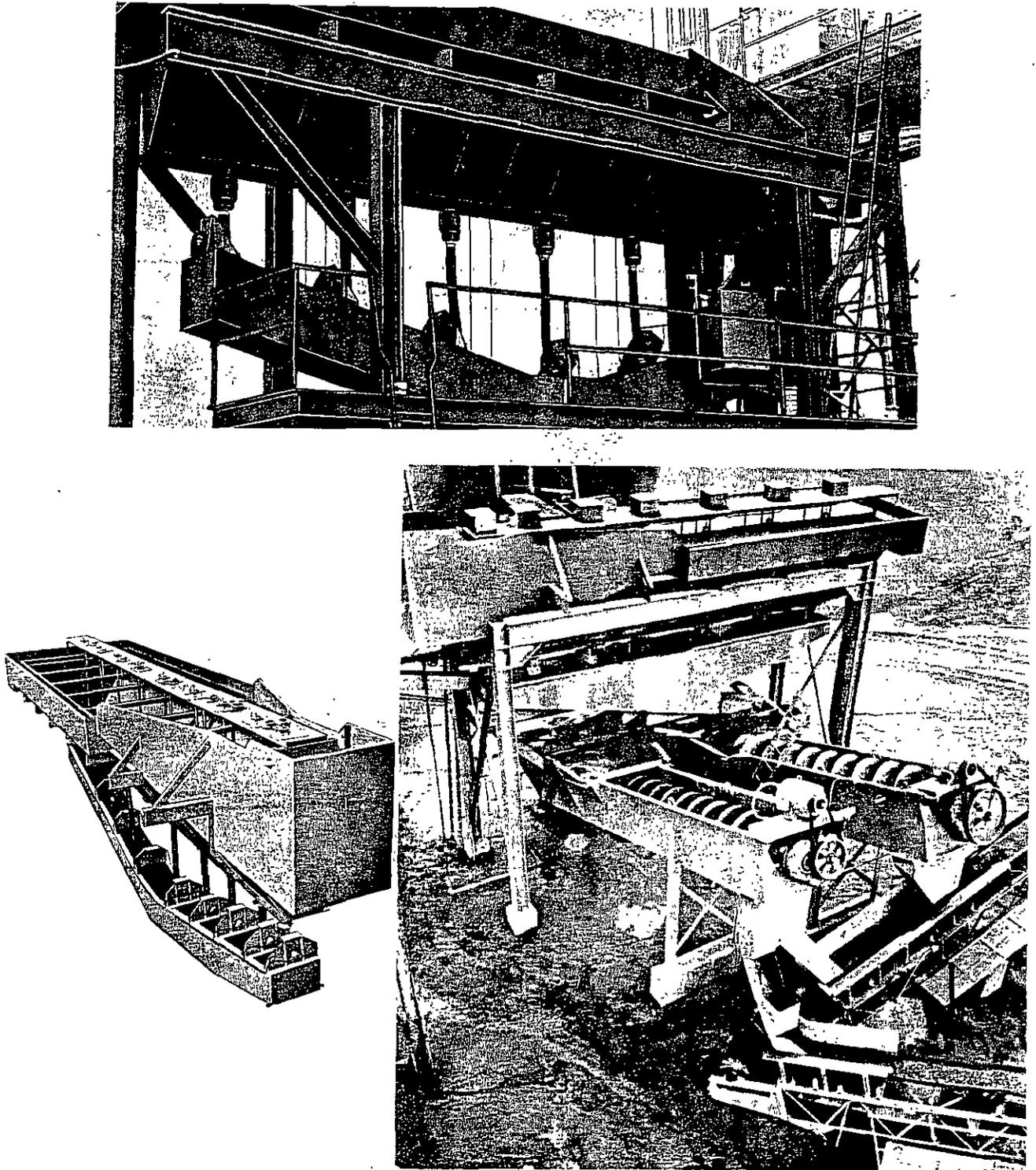


FIG. 46 VISTAS INFERIOR, SUPERIOR Y EN OPERACION, DE UN TANQUE CLASIFICADOR DE ARENAS POR SEDIMENTACION PROGRESIVA DE PARTICULAS GRUESAS, MEDIANAS Y FINAS, PARA EL CONTROL DE SU MODULO DE FINURA.

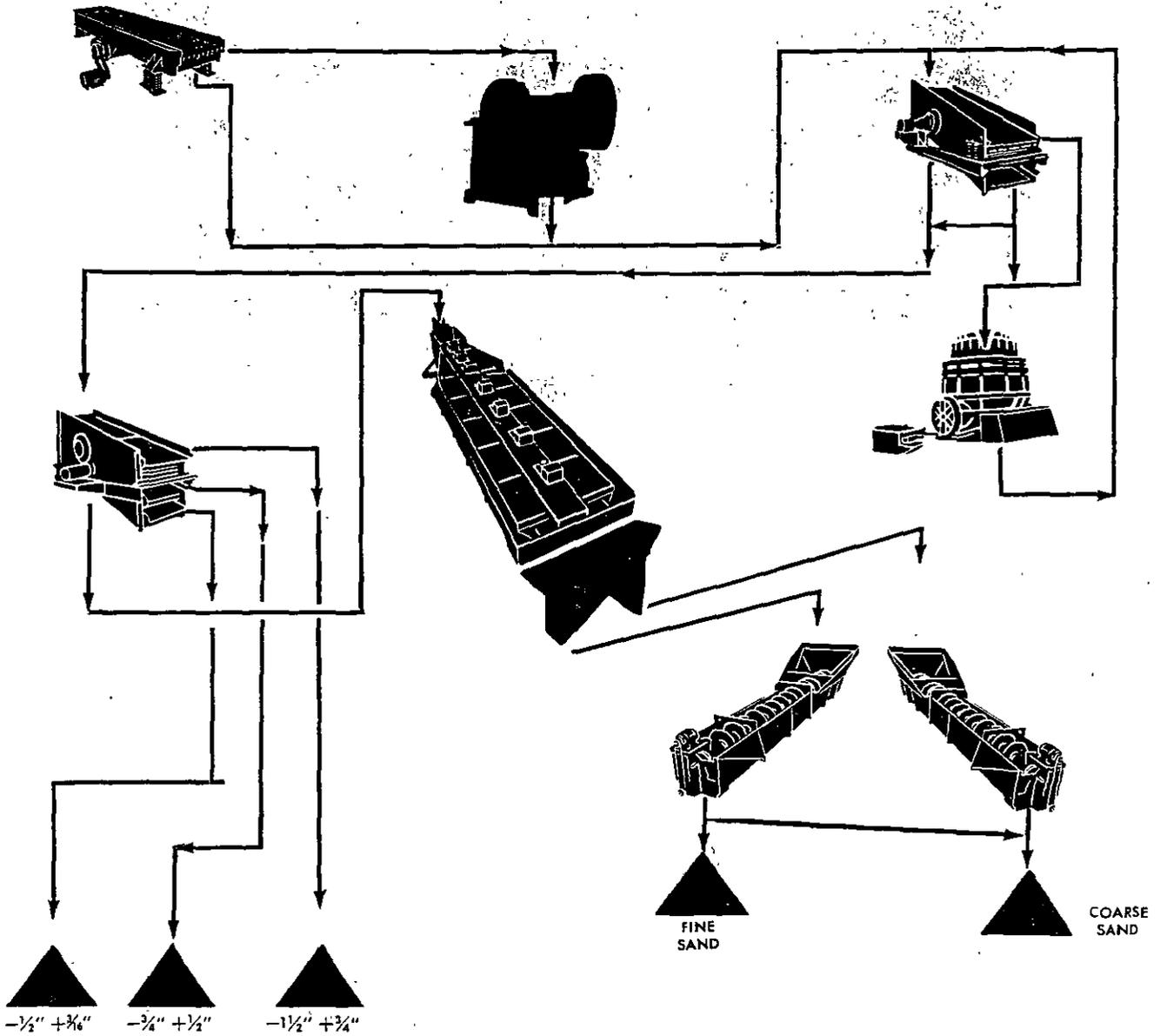


FIG. 47 ESQUEMA DE LA HOJA DE FLUJO (FLOW SHEET), DE UNA PLANTA DE PRODUCCION POR VIA HUMEDA, DE AGREGADOS LAVADOS DESTINADOS A LA ELABORACION DE CONCRETOS HIDRAULICOS CON ALIMENTADOR GRIZZLY VIBRATORIO, QUEBRADORA PRIMARIA DE QUIJADAS, CRIBAS VIBRATORIAS INCLINADAS, TRITURADORA SECUNDARIA DE CONOS, TANQUE CLASIFICADOR DE ARENAS Y GUSANOS LAVADORES-ESCURRIDORES.

3.4.2 Desenlodadores

Tambores desenlodadores. Para el lavado enérgico de minerales y de gravas naturales fuertemente contaminadas con arcilla, se emplean los tambores desenlodadores o scrubbers que constan de un cilindro o placa de acero en cuyo interior se montan espas o paletas metálicas, que mueven el material en su interior. A su vez constan de un dispositivo de riego de agua a presión para realizar dentro del tambor el lavado de los agregados, así como de orificios en la parte exterior para la evacuación del agua (Figs. 48 y 49). Se fabrican en diámetros de 72", 96" y 120".

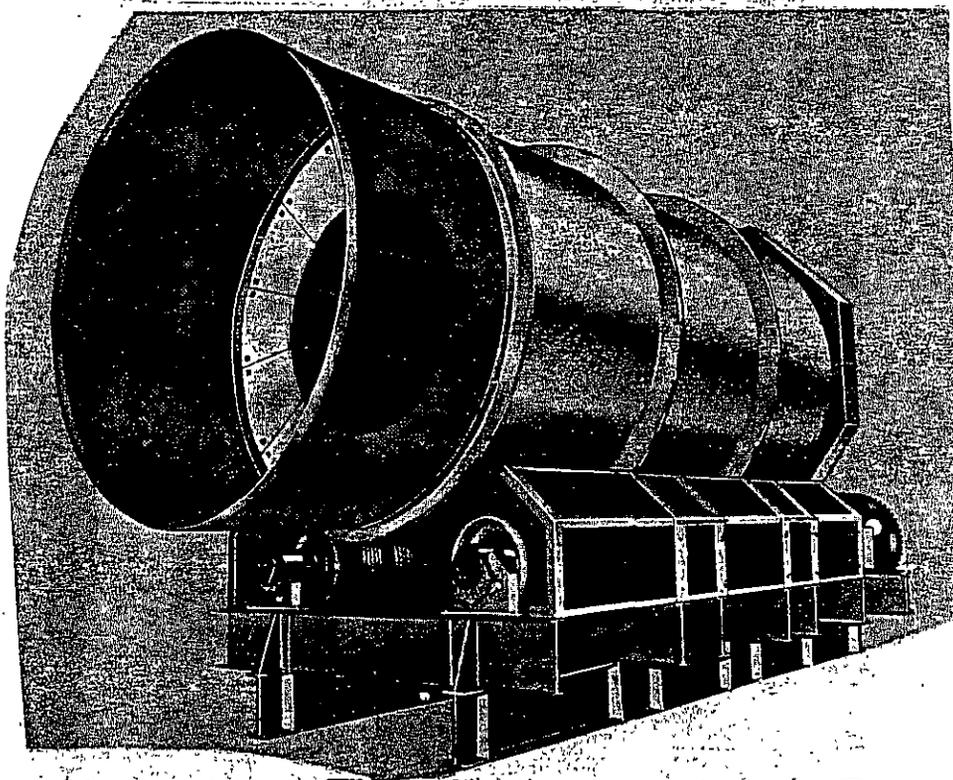


FIG. 48 VISTA EXTERIOR TAMBOR DESENLODADOR (SCRUBBER)

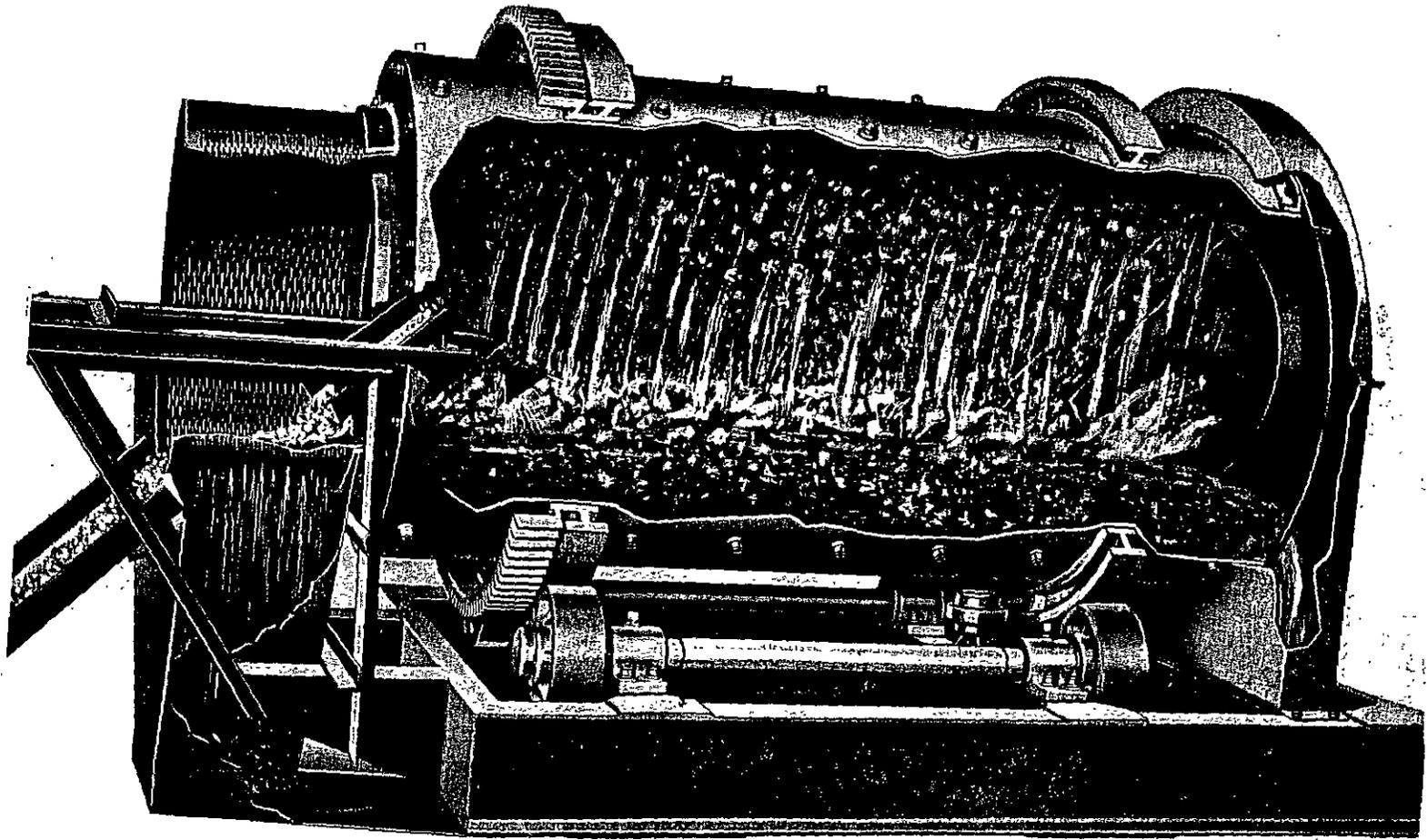


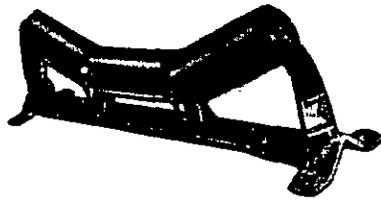
FIG. 49 VISTA INTERIOR DE UN TAMBOR LAVADOR-DESENLODADOR DE GRAVAS.

3.5 TRANSPORTADORES DE BANDA

Como se mencionó anteriormene, una de las opciones para el transporte y manejo de agregados pétreos, son los transportadores de banda, conocidos también como bandas transportadoras, siendo éste un equipo de mecánica simple y de gran eficiencia.

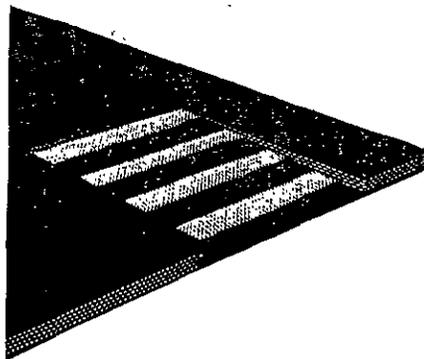
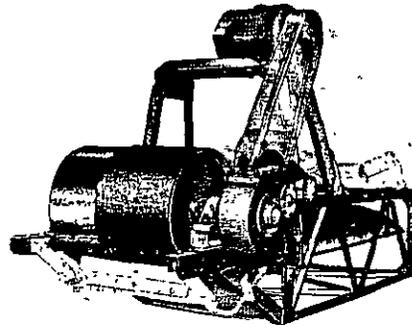
Existen varios tipos de transportadores de acuerdo a las necesidades de la industria en general, pero todos constan de una cinta o banda de hule reforzada con capas de lona o de nylon en diferentes anchos, montados en trenes con un número de rodillos variables (Fig. 50), generalmente tres con diversas inclinaciones uniformemente espaciadas y accionadas por una polea de cabeza motriz que a su vez es accionada por un moto-reductor eléctrico que le imprime a la banda una velocidad lineal que va de 30 a 180 metros por minuto, en la mayoría de los casos con el fin de transportar de ese modo un flujo uniforme del material.

FIG. 50 DETALLES DE BANDA TRANSPORTADORA.



TREN DE RODILLOS DE CARGA.

CABEZA MOTRIZ CON MOTOR,
POLEA, REDUCTOR Y
TRANSMISION.



CORTE DE UNA BANDA MOSTRANDO
LAS CAPAS DE LONA Y HULE.

En la figura 51 se muestran los componentes de un sistema de transportador de banda, se puede observar la estructura de soporte que es de acero tipo celosía para transportadores grandes y tipo viguetas de canal para los transportadores medianos y pequeños.

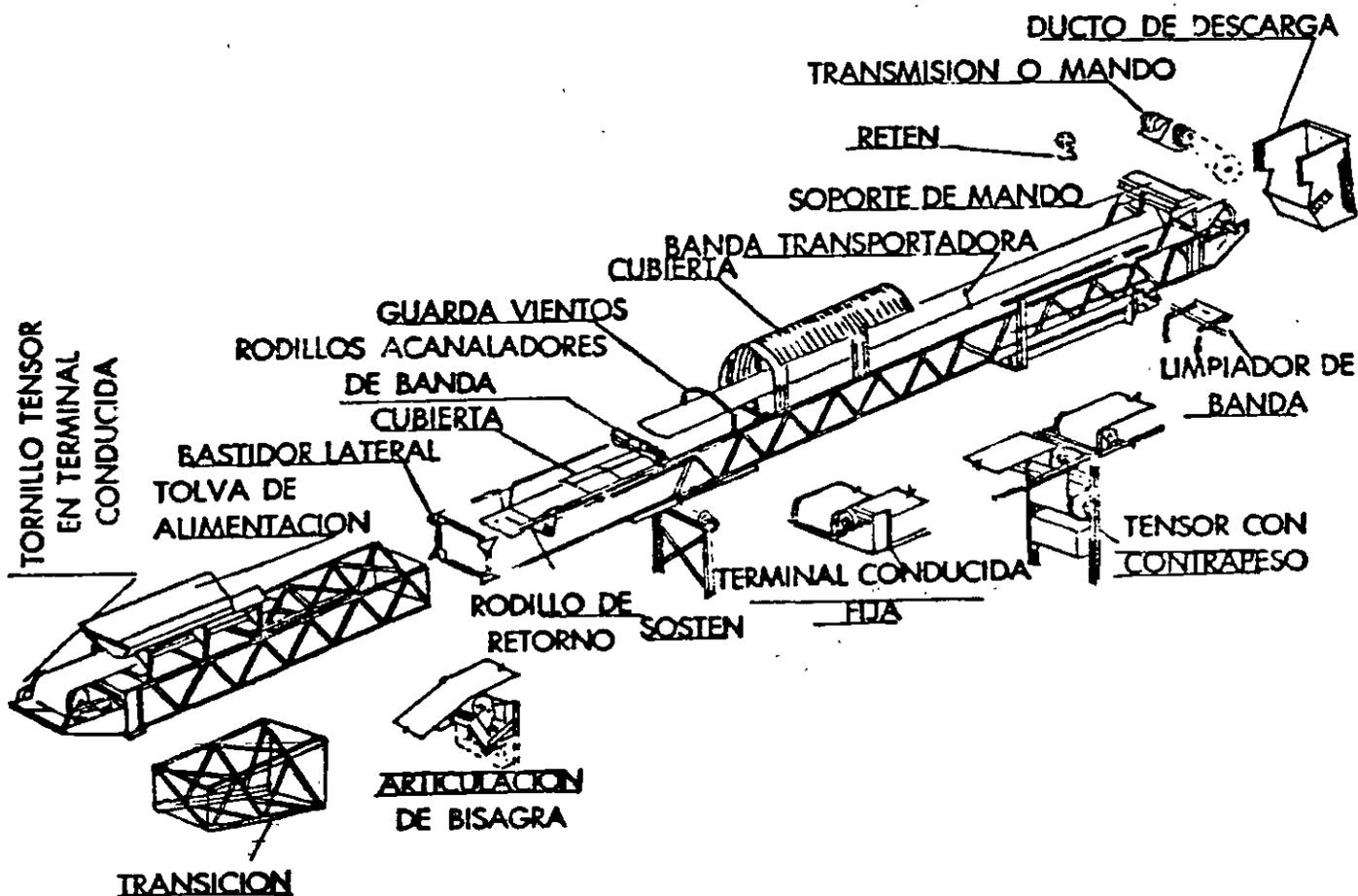


FIG. 51 COMPONENTES DE UNA BANDA TRANSPORTADORA

Existen sistemas de transporte por medio de bandas de varios kilómetros de longitud, sobre todo en la industria minera por ser un medio económico y eficaz, justificándose ampliamente la elevada inversión inicial.

Entre los tipos de banda están:

Banda transportadora radial (Stacker) para almacenamiento de agregados

en pailas sobre el terreno (Fig. 52).

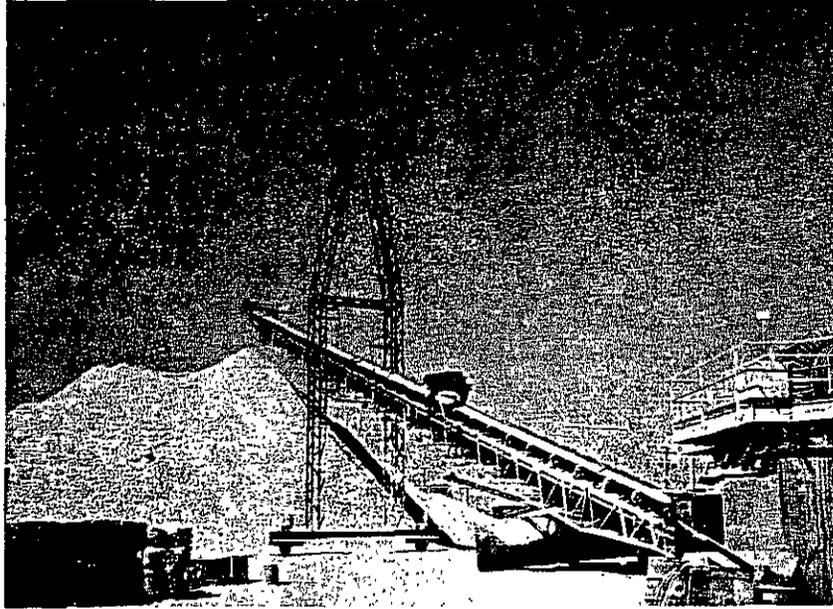


FIG. 52 BANDA DE ALMACENAMIENTO DE MATERIALES CON MOVIMIENTO RADIAL, O "STACKER".

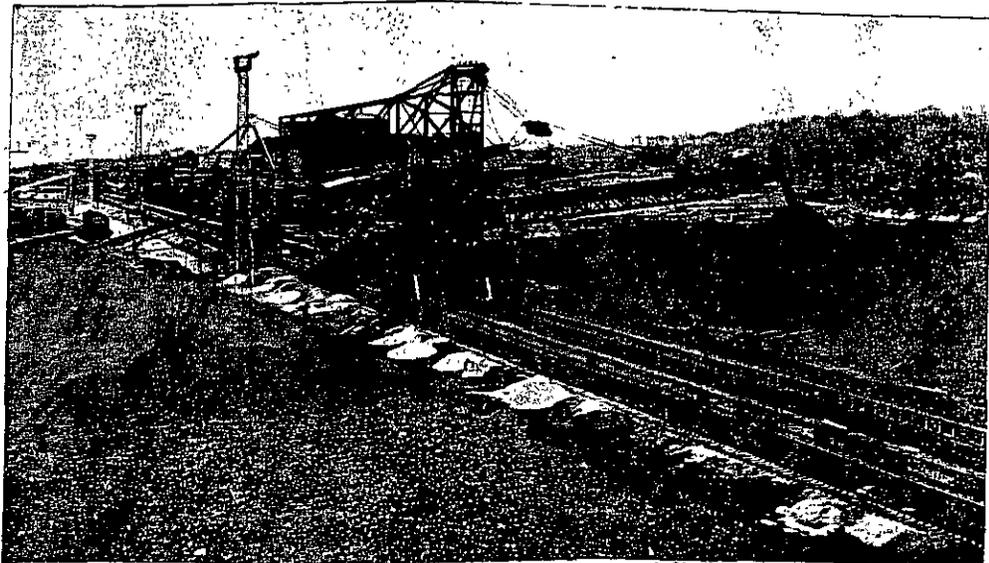


FIG. 53 SISTEMA ESTACIONARIO DE TRANSPORTE DE AGREGADOS Y ALMACENAMIENTO SOBRE EL TERRENO A BASE DE TRANSPORTADORES CON PUNTOS DE DESCARGA VARIABLES A LO LARGO DE SU LONGITUD (TRIPPER).

3.6 ELEVADORES DE CANGILONES

Es un tipo de equipo de elevación de materiales a granel que consiste básicamente en una serie de botes o cangilones montados ya sea sobre cadenas o sobre una banda de hule. Tanto las cadenas como la banda están animadas por un movimiento lineal que permite la elevación de los materiales recogidos por los botes, conocidos por cangilones, a la tolva de recepción, situada en la parte inferior del elevador.

Si bien es un equipo muy utilizado en las industrias de la cal, cemento, yeso y en la minería, en las instalaciones de agregados pétreos se ha visto muy disminuida su utilización, debido al desarrollo de los transportadores de banda, que en muchos casos sustituyen ventajosamente a los elevadores de cangilones.

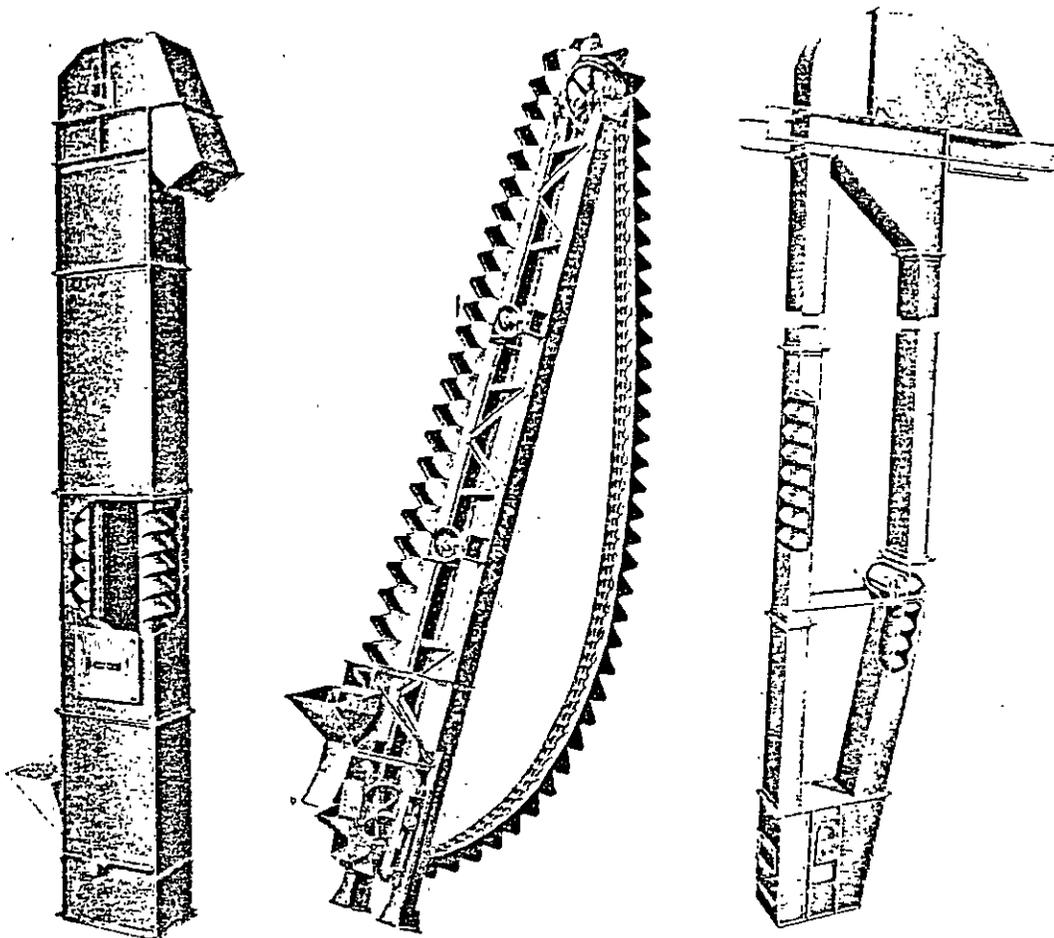


FIG. 54 DIFERENTES TIPOS DE ELEVADORES DE CANGILONES.

4

4. TENDENCIAS ACTUALES EN LA SELECCION DEL EQUIPO DE TRITURACION

Se hará especial referencia a los equipos de trituración destinados a elaborar los agregados pétreos necesarios para la construcción de sub-bases, bases, carpetas asfálticas y materiales de sello para la construcción de carreteras y aeropuertos.

Desde hace poco más de 20 años se ha venido observando en todo el mundo, una evolución muy rápida en las técnicas de construcción de caminos, evolución que ha puesto a los contratistas y a los productores de agregados pétreos, frente a problemas completamente nuevos que han ocasionado modificaciones sustanciales en el concepto de sus plantas, así como en las técnicas de producción. Dicha evolución parece haber alcanzado a la fecha, un cierto grado de estabilidad.

Los materiales pétreos destinados a formar las diversas capas que constituyen un camino, lógicamente han seguido muy de cerca la evolución de las técnicas de construcción. En efecto, en tiempos pretéritos se utilizaban términos tales como piedra de 2", grava de 3/4", arena a secas, etc., que generalmente definían un producto que era utilizado para todo tipo de trabajos de construcción. Hoy en día la tecnología de la construcción ha cambiado radicalmente. Por ejemplo, el diseño del concreto hidráulico requiere agregados pétreos completamente distintos a los que se necesitan en la construcción de una carretera. Por esta razón el equipo que necesite cada uno de estos productos, tendrá características peculiares de acuerdo con el tipo de agregados a producir, situación que no prevalecía, por ejemplo: en los años treinta en don-

de el productor de agregados con una sola quebradora producía un agregado adecuado para todas las necesidades.

Hoy en día una planta moderna, fija o portátil, es mucho más compleja y representa un capital elevado invertido, obteniéndose sin embargo, costos unitarios inferiores al utilizar el equipo idóneo, con producciones elevadas de productos de alta calidad.

Se hará aquí particular referencia al equipo de trituración utilizado en la elaboración de materiales para sub-bases, bases, carpetas y sellos empleados en la construcción de caminos y autopistas.

Las primeras de dichas máquinas (secundarias) producen materiales en el rango de 1" a 3" de tamaño, las terciarias con cámara fina materiales en el rango de 1/2" a 3/4" y las cuaternarias materiales en el rango de 1/4" a 3/8" de tamaño máximo, en términos generales.

Es de hacer notar, el hecho de que en problemas de trituración total, tanto en los materiales de base (0-1 1/2") como en los de carpeta, se encuentra un déficit de materiales finos abajo de la malla número 10 (2 milímetros aproximadamente). Para hacer que la curva granulométrica quede dentro de especificaciones, es necesario "levantarla" (figura 55) adicionando finos que bien pueden obtenerse a partir de arenas naturales en bancos próximos a la explotación, o bien producirlos artificialmente en un proceso cuaternario de reducción.

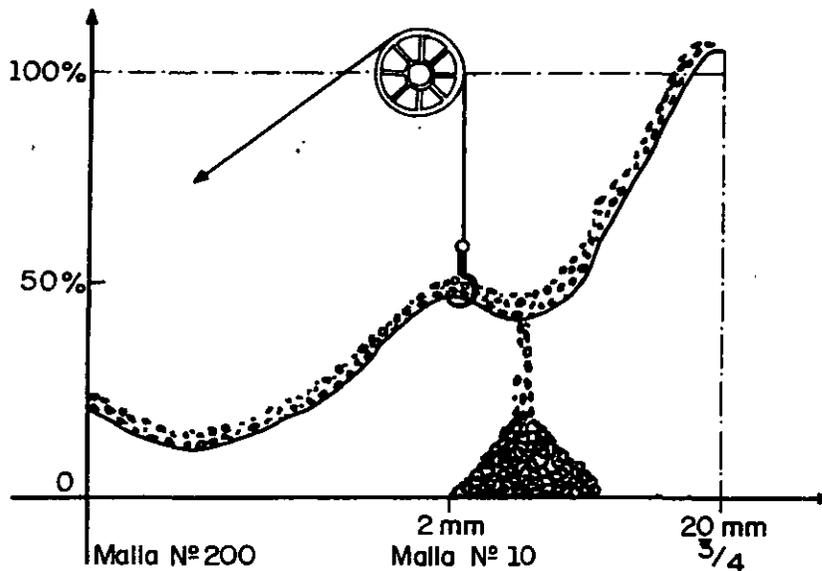
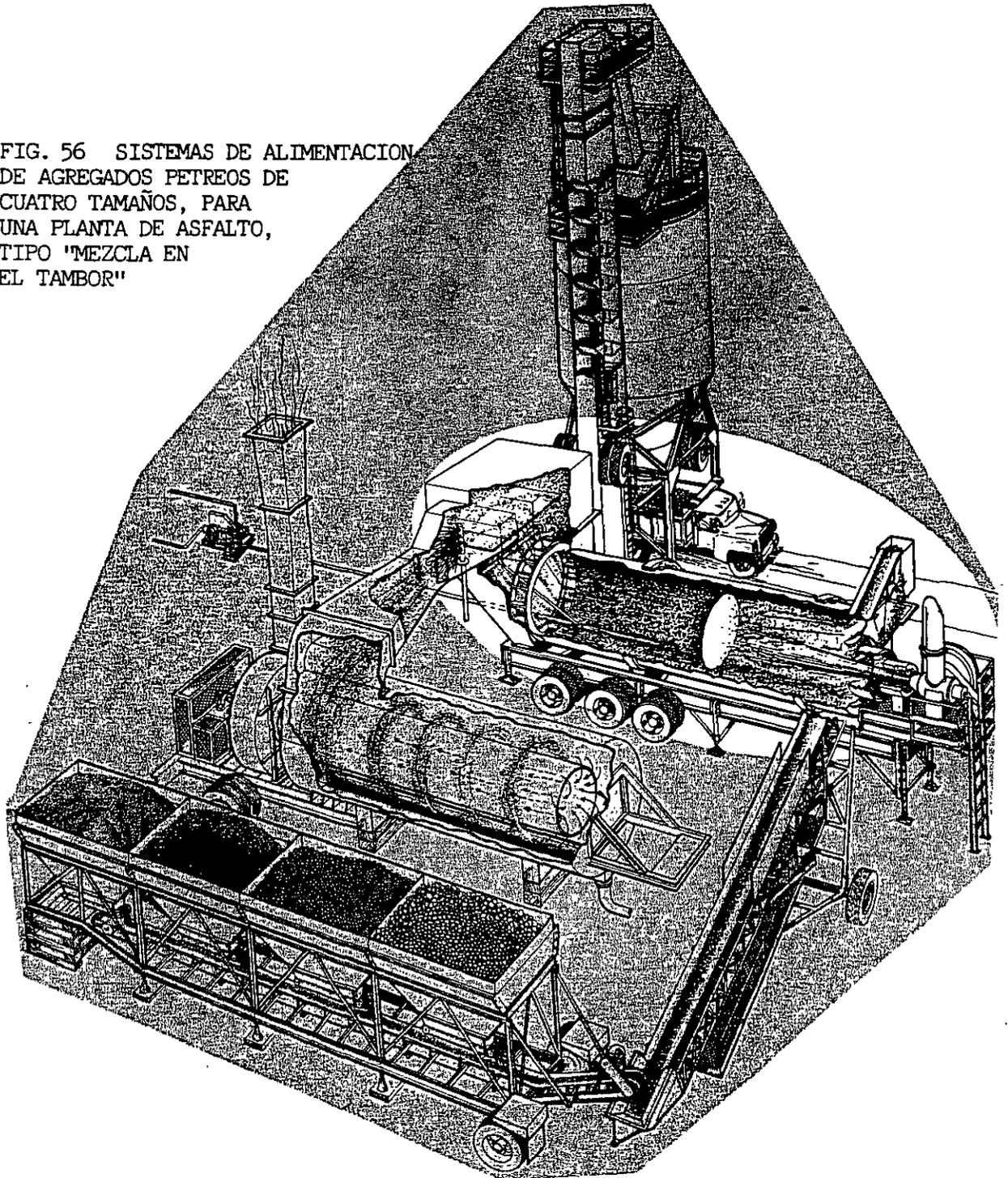


FIG. 55

Una mezcla asfáltica será tan buena, como buenos sean los agregados que se emplearon para elaborarla, por lo tanto, el control de calidad para el producto de una planta de asfalto sea del tipo continua o del tipo de bacha, debe empezar por los agregados pétreos en la alimentación de las mismas (figura 56). Si no se tienen agregados con la correcta granulometría a la entrada, será imposible obtener un producto de calidad. El problema de la construcción en bases y carpetas para caminos y autopistas, empieza pues, con el problema de trituración.

FIG. 56 SISTEMAS DE ALIMENTACION DE AGREGADOS PETREOS DE CUATRO TAMAÑOS, PARA UNA PLANTA DE ASFALTO, TIPO "MEZCLA EN EL TAMBOR"



Un problema de trituración quedará correctamente resuelto, si se cuenta con el equipo idóneo, en cada proceso de reducción establecido en la planta.

Se había visto, que en lo que respecta a la trituración primaria, el equipo seleccionado universalmente como el apropiado en todos los casos para integración de los grupos móviles camineros, lo constituyen las quebradoras de quijadas.

Por lo que respecta al equipo secundario y terciario, se puede resumir lo expresado anteriormente, en el cuadro siguiente:

Tipo de Trituradora	Índice de Reducción	Coefficiente de forma del producto	Grado de abrasividad recomendado de la roca	Consumo específico de energía
Rodillos	Bajo: 3÷1	Bajo: Muchas lajas	Poco abrasivo	Normal
Martillos e impacto	Muy alto: 30 ÷ 1	Muy bueno	No abrasiva	Muy alto
Conos	Alto: 10÷1	Bueno	Todo tipo de rocas	Normal

Del examen de la tabla anterior, se deduce que el tipo de trituradora más versátil, capaz de triturar eficiente y económicamente todo tipo de rocas, cualidad indispensable para los grupos móviles camineros, por la diversidad de bancos en los cuales van a trabajar a todo lo largo de su vida útil, son las trituradoras de cono, que cuentan además con un elevado índice de reducción y dan productos con un buen coeficiente de forma teniendo consumos específicos de energía (kilowatts por tonelada producida) muy razonables.

Por las razones anteriormente expuestas, y una vez roto el "tabu" de que las trituradoras de cono eran máquinas de mecánica complicada y de operación y mantenimiento delicados y complejos, su uso se ha popularizado entre los constructores de caminos y autopistas, para integrar los grupos móviles de trituración secundaria y terciaria, en un principio en los tamaños de 36" y en la actualidad en los tamaños de 48" y 66", de muy elevada capacidad, que si bien tienen mayores costos de adquisición, se compensa con creces este factor, por los bajos costos de producción que se obtienen y el poco tiempo en el que trituran los volúmenes asignados para cada banco.

El modo de disposición de las máquinas de trituración sobre los cha—

sis-remolque para integrar los grupos móviles ha variado desde el sistema "Dual" preferido hace 25 años aproximadamente, en tiempos de la postguerra; que fue cuando se inició el gran auge de las plantas portátiles o grupos móviles para equipar a los constructores de caminos.

Dicho sistema "Dual", consiste en instalar sobre el mismo chasis-remolque, la quebradora primaria de quijadas, la trituradora secundaria de rodillos, la criba vibratoria, la rueda de cangilones de elevación, las bardas de evacuación y recirculación, etc. En las figuras 57 y 58, pueden apreciarse el aspecto exterior de dichos grupos móviles "Dual", y en las figuras 59 y 60 dos ejemplos del flujo de materiales de dicho sistema "Dual".

Debido a que dicho dispositivo de arreglo daba unidades de grandes dimensiones, muy pesadas, de difícil mantenimiento y operación, en los últimos años se ha adoptado el sistema de grupos móviles "Unitarios".

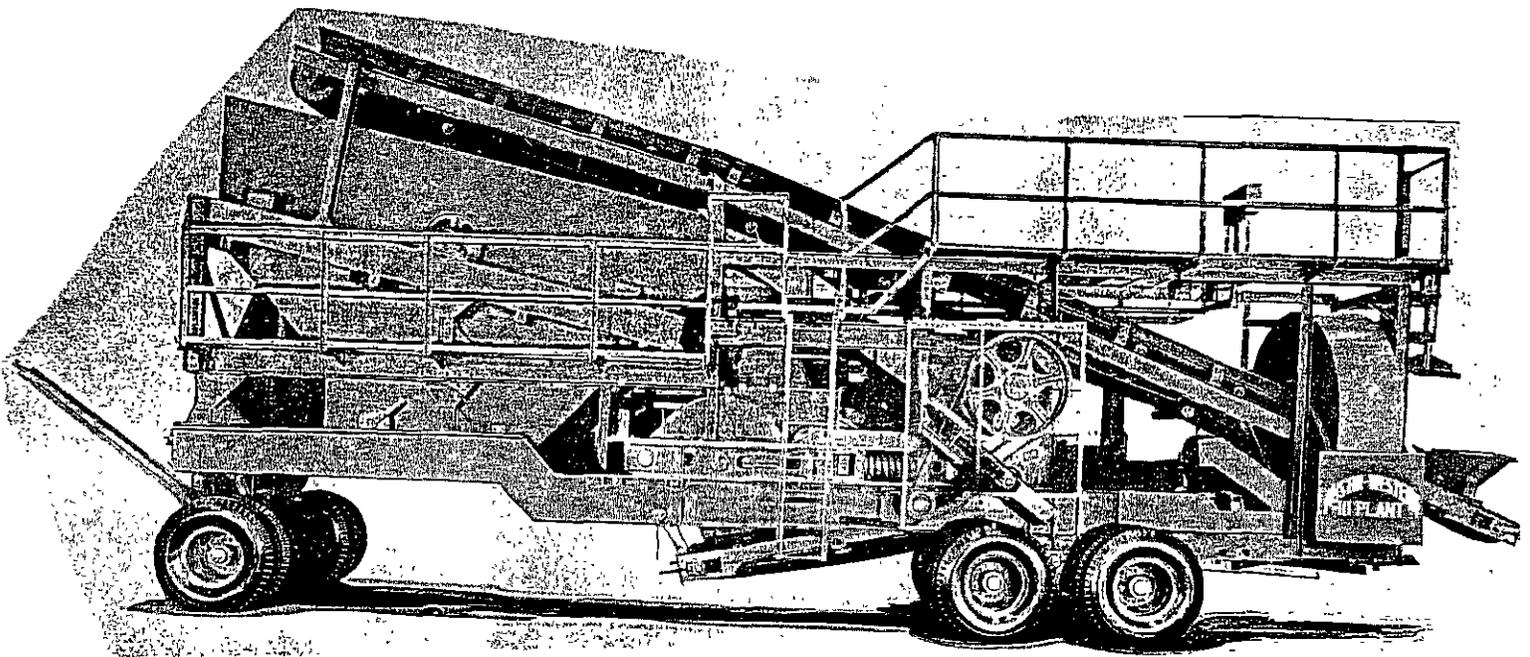


Figura 57. Grupo móvil "Dual" de trituración primaria y secundaria, con quebradora de quijadas, trituradora de rodillos y criba vibratoria horizontal, con rueda de cangilones de elevación. Vista exterior de conjunto.

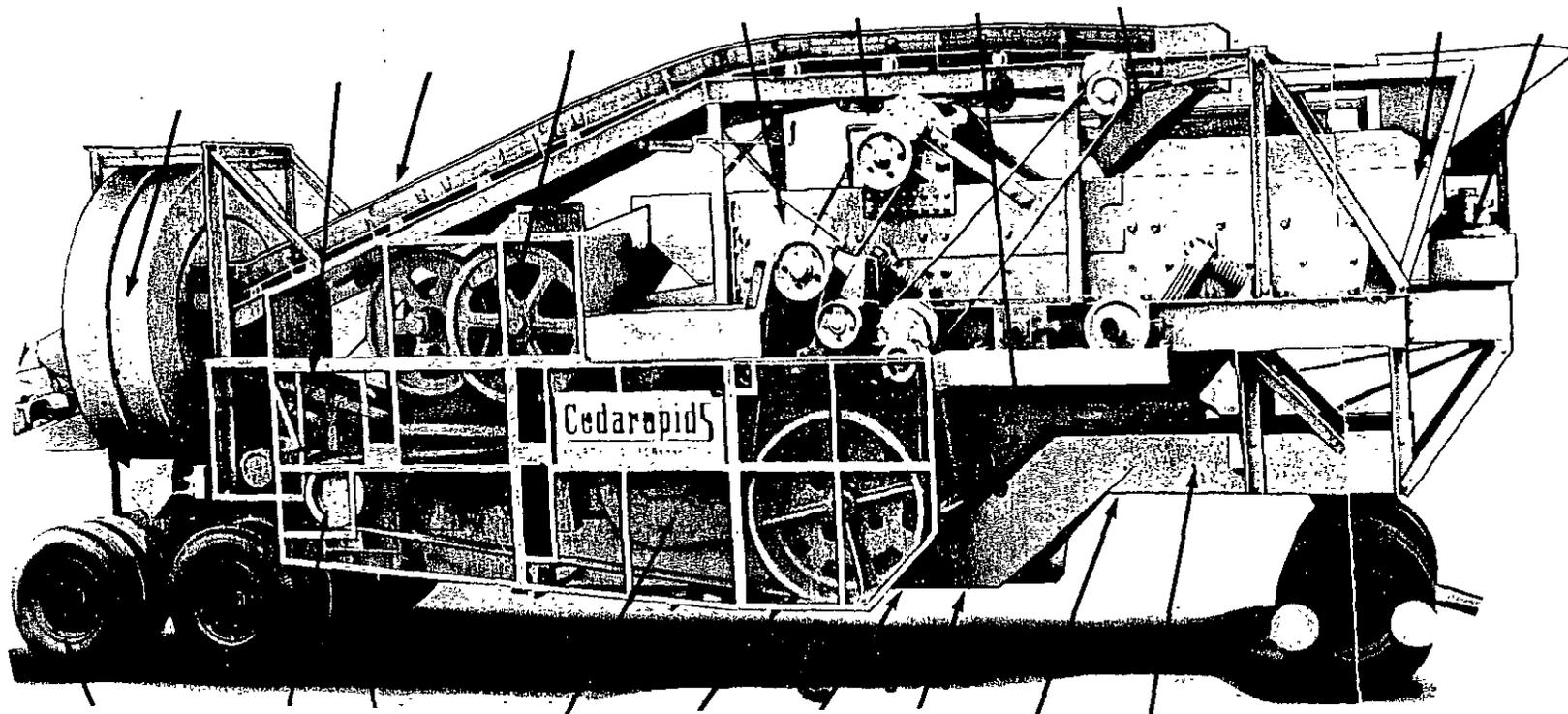


FIG. 58 VISTA EXTERIOR DE CONJUNTO DE UNA PLANTA "DUAL" DE TRITURACION, EQUIPADA CON QUEBRADORA PRIMARIA DE QUIJADAS, TRITURADORA DE RODILLO DOBLE, CRIBA VIBRATORIA HORIZONTAL, Y ELEVADOR ROTATORIO DE CANGILONES.

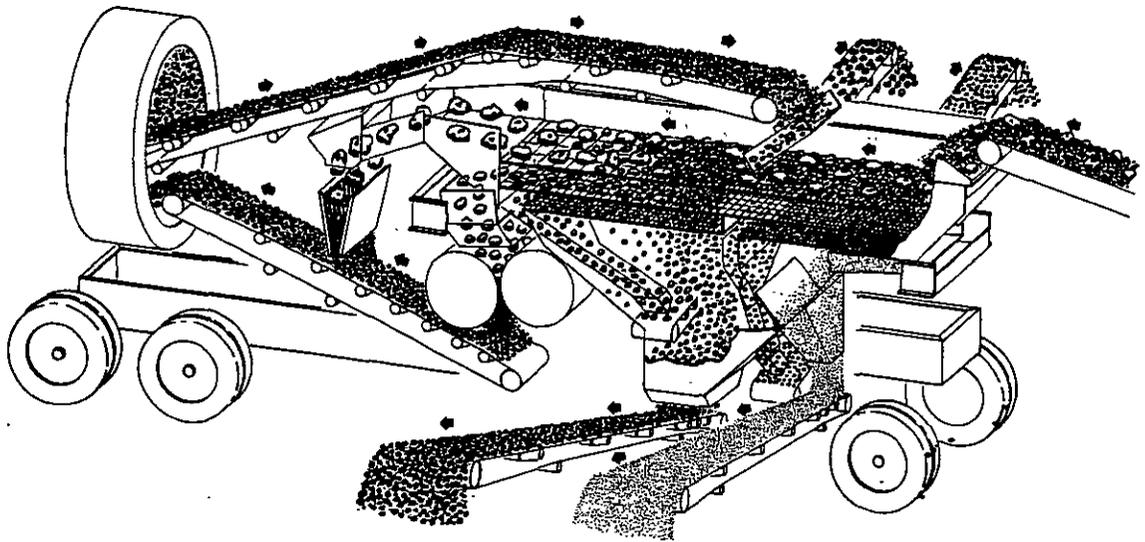


FIG. 59 ESQUEMA DEL FLUJO DE MATERIALES EN UNA PLANTA DE TRITURACION "DUAL", CON QUEBRADORA PRIMARIA DE QUIJADAS, Y TRITURADORA SECUNDARIA DE RODILLO DOBLE. CRIBA VIBRATORIA HORIZONTAL

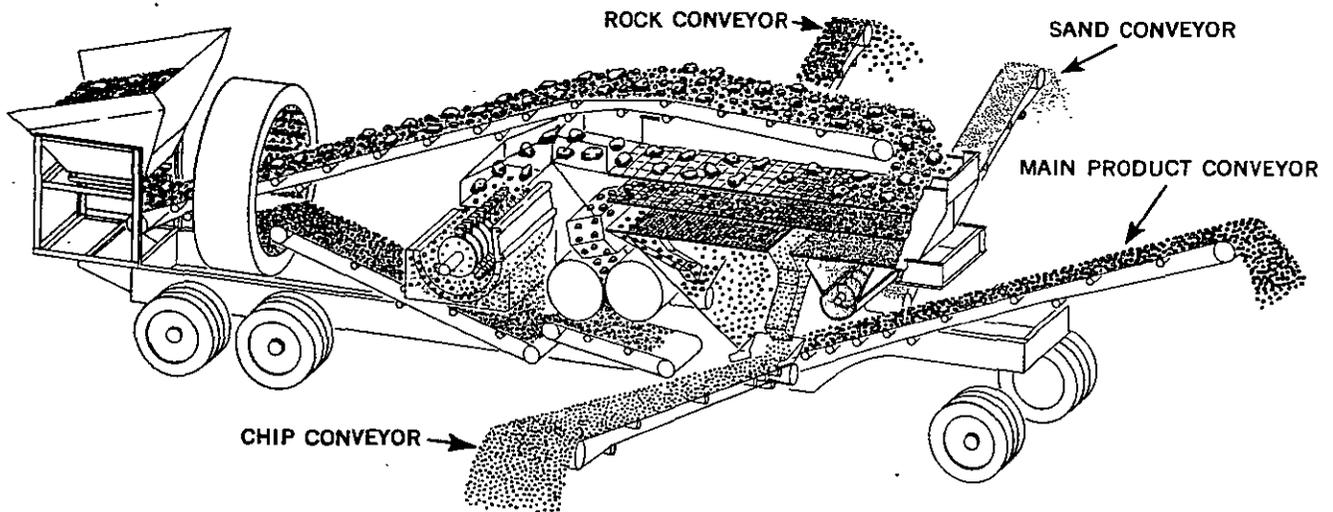


FIG. 60 ESQUEMA DEL FLUJO DE MATERIALES EN UNA PLANTA DE TRITURACION "DUAL", CON TRITURADORA PRIMARIA DE IMPACTO, SIMPLE ROTOR, Y TRITURADORA SECUNDARIA DE RODILLO DOBLE. CRIBA VIBRATORIA HORIZONTAL.

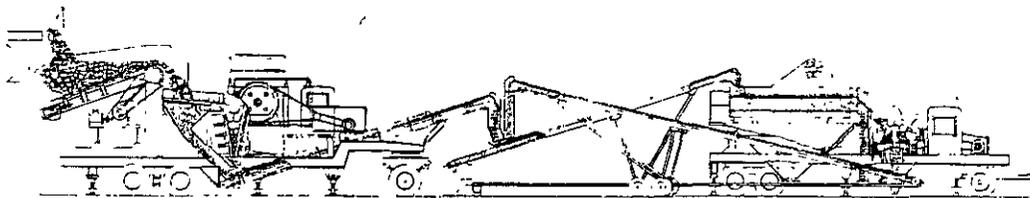
Para la integración de dichos grupos móviles "Unitarios", la experiencia ha indicado que la quebradora de quijadas es la máquina más adecuada para realizar la etapa primaria de trituración, mientras que las trituradoras de cono en sus versiones de cabeza standard y corta, son las máquinas apropiadas para realizar las etapas secundaria y terciaria de reducción de materiales pétreos.

En casos de unidades de muy elevada producción, se prefiere poner los alimentadores y cribas en remolques por separado, con el objeto de no tener unidades de pesos exagerados que hagan muy difícil su transporte por las carreteras ordinarias.

Se procurará trabajar la última etapa de trituración siempre en circuito cerrado, con el objeto de tener un control del tamaño máximo del producto, así como una mezcla de la fracción triturada con la natural, para tener un agregado homogéneo.

El esquema mostrado en la figura 61, se observa la disposición típica de un grupo móvil primario y de un grupo móvil secundario de trituración trabajando a circuito cerrado, con sus respectivas bandas transportadoras de conexión, recirculación y almacenamiento de los productos.

GRUPOS DE TRITURACION A CIRCUITO CERRADO



FLUJO DE MATERIALES CON PRIMARIO DE QUIJADAS Y SECUNDARIO DE CONOS

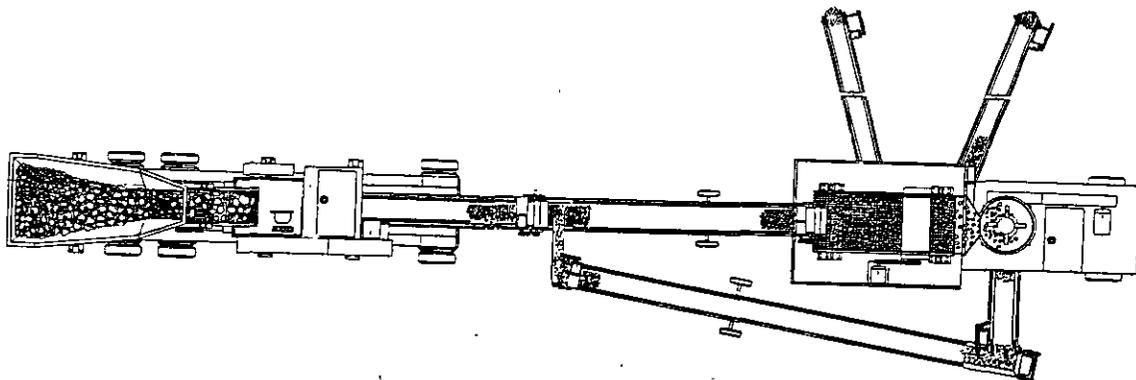
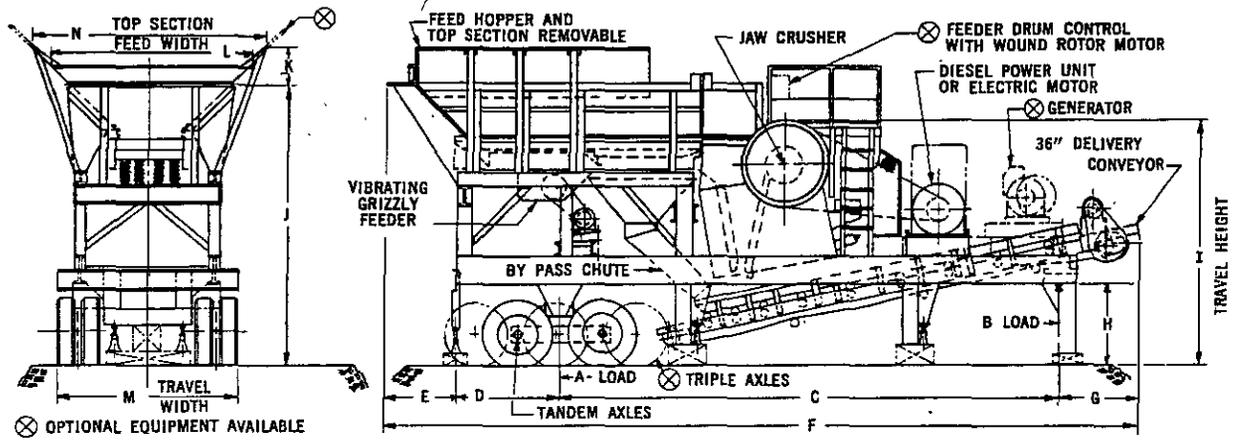


FIG. 61 PLANTA PORTATIL DE TRITURACION, CON GRUPO MOVIL PRIMARIO DE QUEBRADORA DE QUIJADAS Y GRUPO MOVIL SECUNDARIO CON TRITURADORA DE CONOS. BANDAS TRANSPORTADORAS PORTATILES DE CONEXION, RECIRCULACION Y ALMACENAMIENTO.

a) ESQUEMA



b) VISTA GENERAL

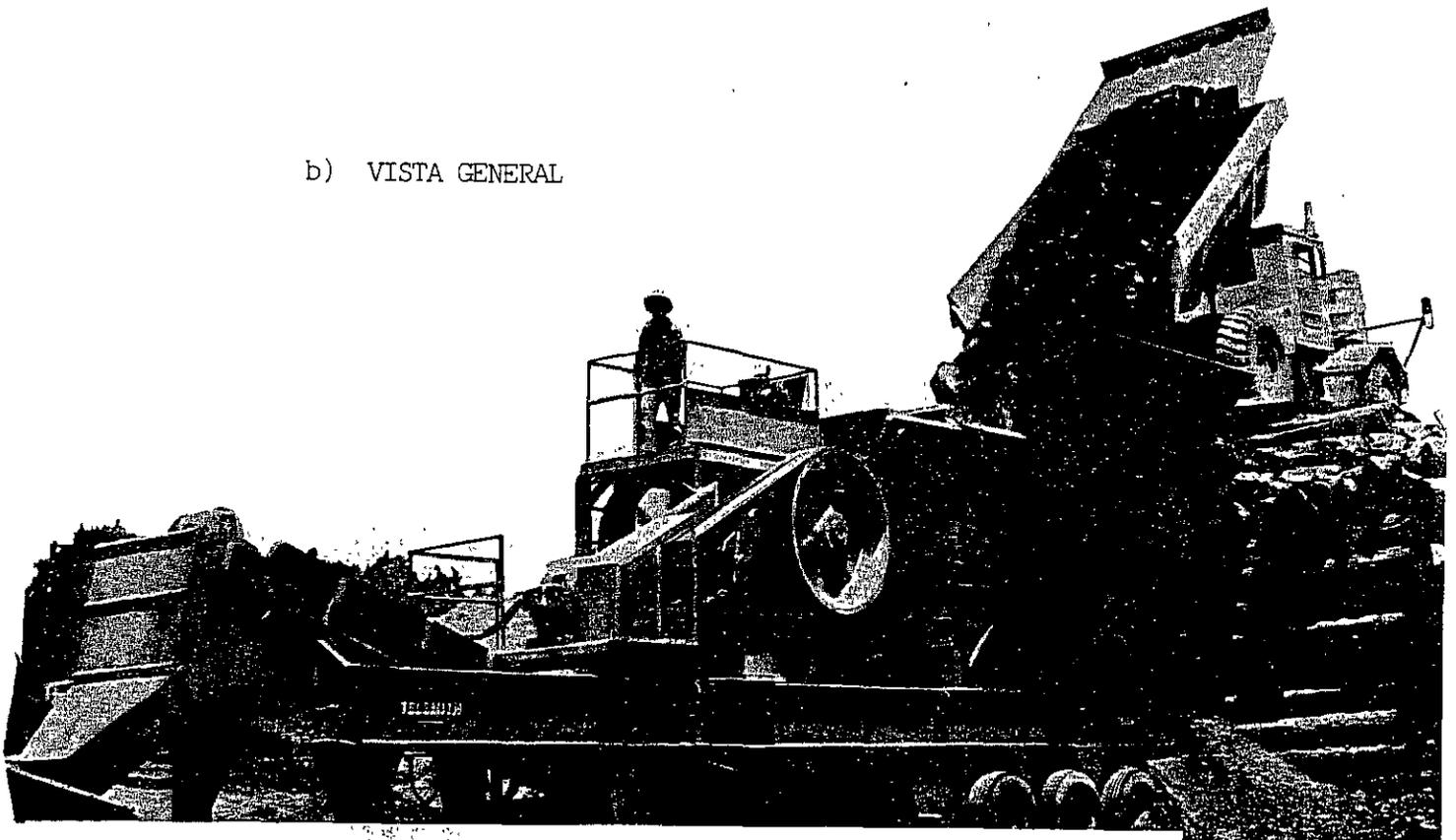
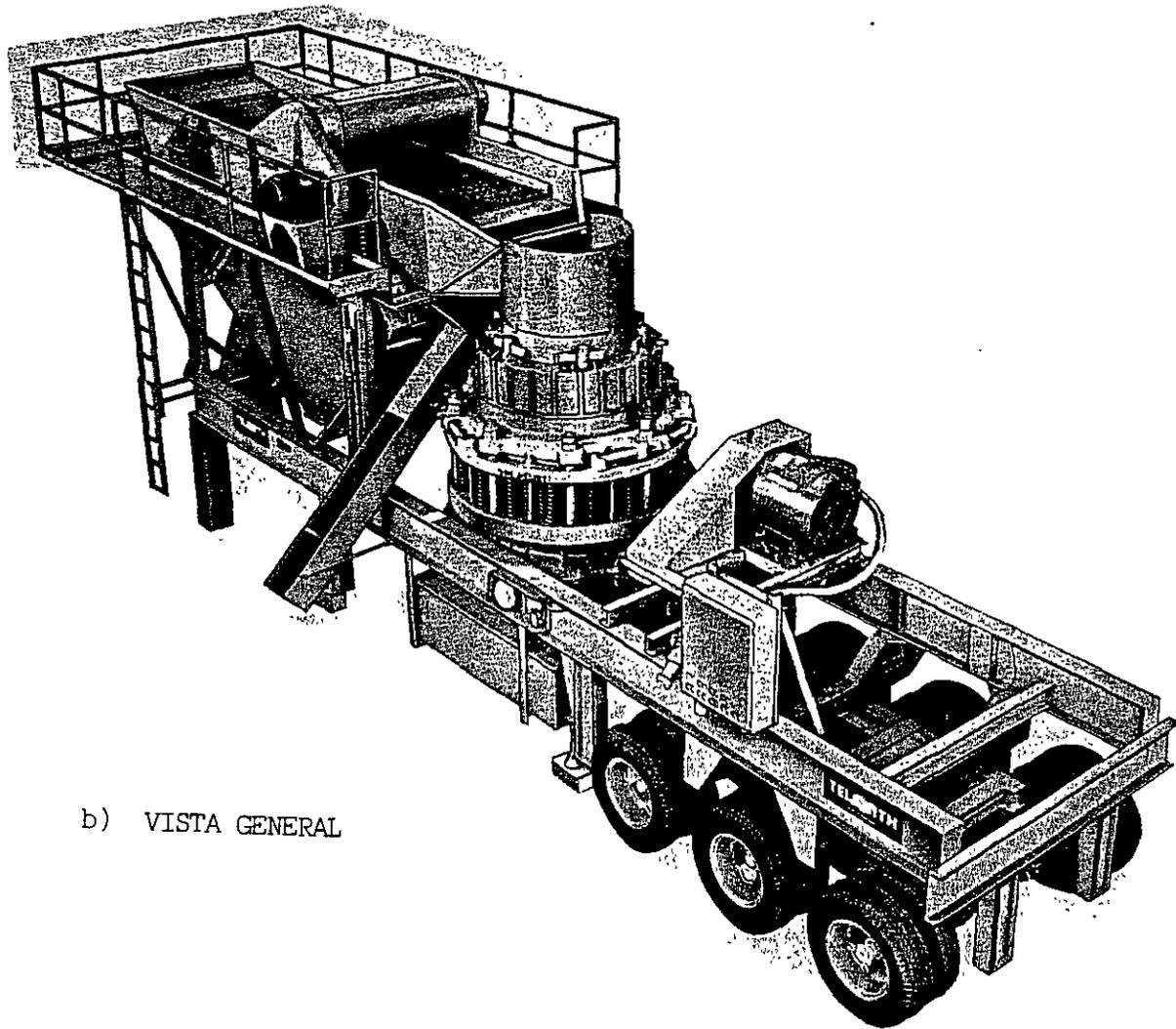
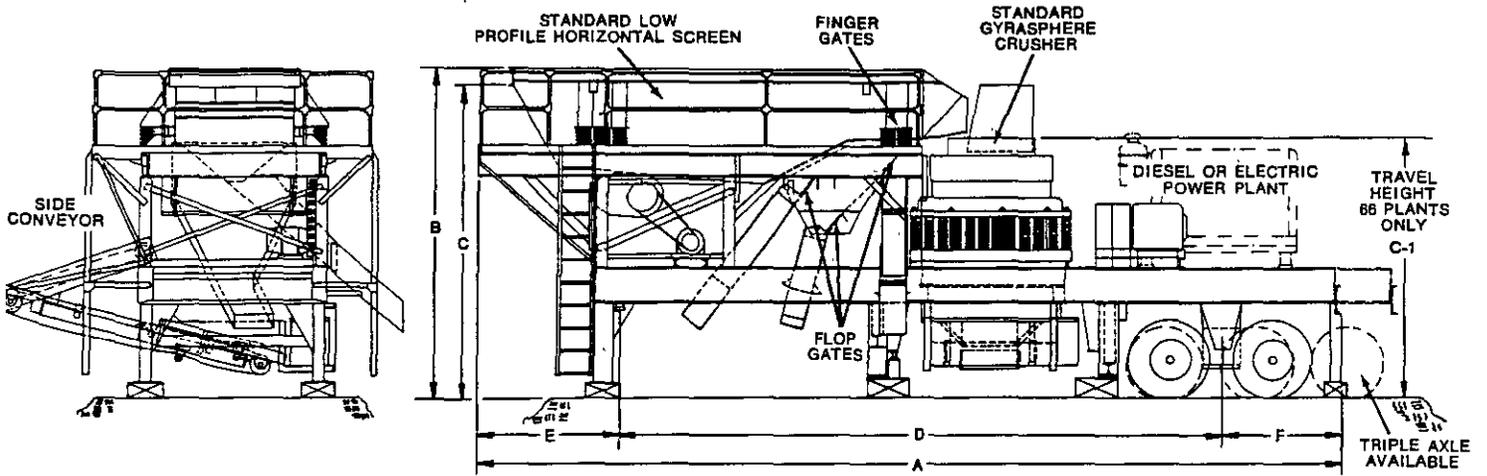


FIG. 62 ESQUEMA Y VISTA GENERAL DE UN GRUPO MOVIL DE TRITURACION PRIMARIA, EQUIPADO CON QUEBRADORA DE QUIJADAS

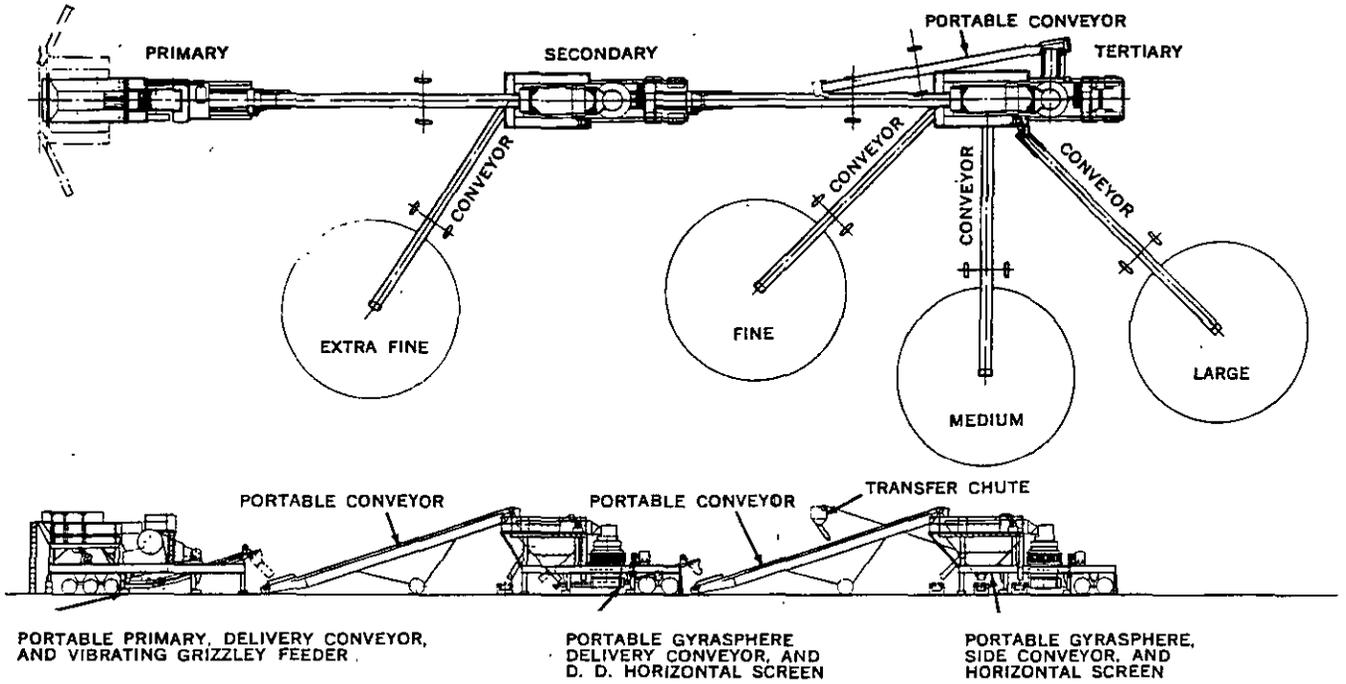
a) ESQUEMA



b) VISTA GENERAL

FIG. 63 ESQUEMA Y VISTA GENERAL DE UN GRUPO MOVIL DE TRITURACION SECUNDARIA, EQUIPADO CON CRIBA VIBRATORIA HORIZONTAL, Y TRITURADORA SECUNDARIA DE CONO.

a) ESQUEMA



b) VISTA GENERAL

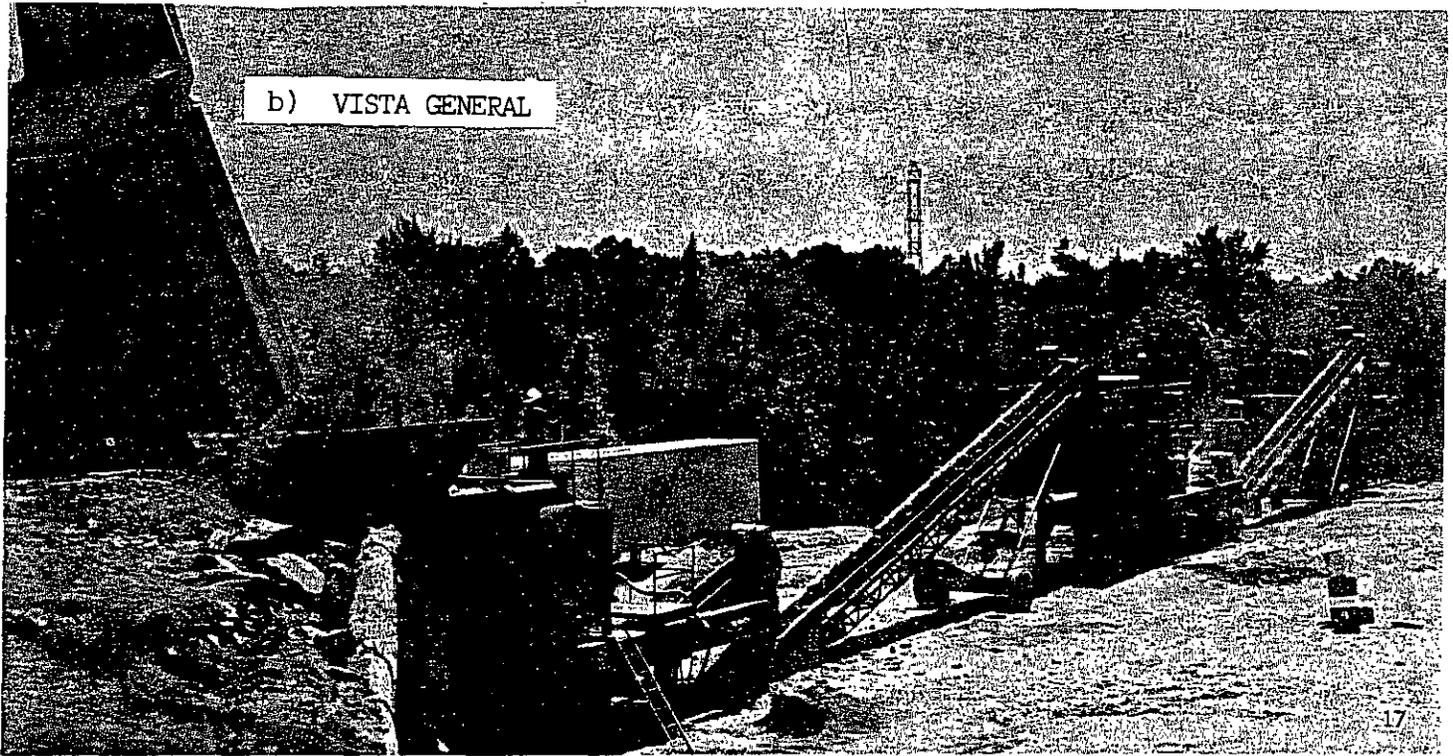
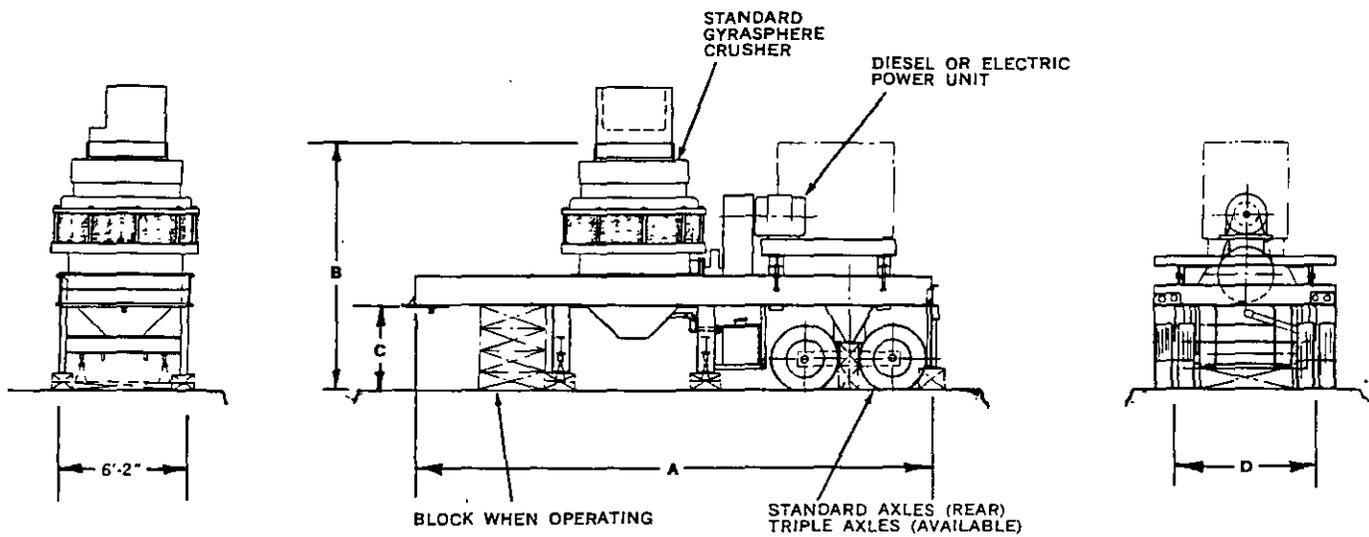


FIG. 64 ESQUEMA Y VISTA GENERAL DE UNA PLANTA PORTATIL DE TRITURACION DE TRES ETAPAS, CON LOS GRUPOS MOVILES PRIMARIO Y SECUNDARIO TRABAJANDO A CIRCUITO ABIERTO, Y EL GRUPO MOVIL TERCIARIO EN CIRCUITO CERRADO.

a) ESQUEMA



b) VISTA GENERAL

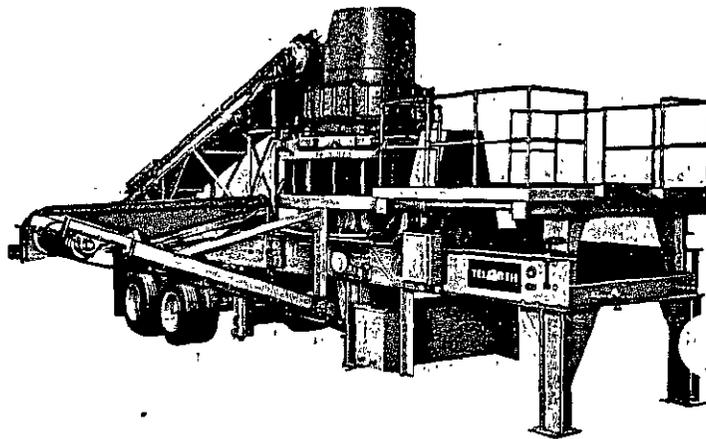


FIG. 65 ESQUEMA Y VISTA GENERAL DE UN GRUPO MOVIL DE TRITURACION SECUNDARIA CON TRITURADORA DE CONO 66 S ($5\frac{1}{2}'$). POR EL PESO Y DIMENSION DE ESTOS TAMAÑOS DE MAQUINAS LA CRIBA SE INSTALA POR SEPARADO EN UN GRUPO MOVIL DE CRIBADO.

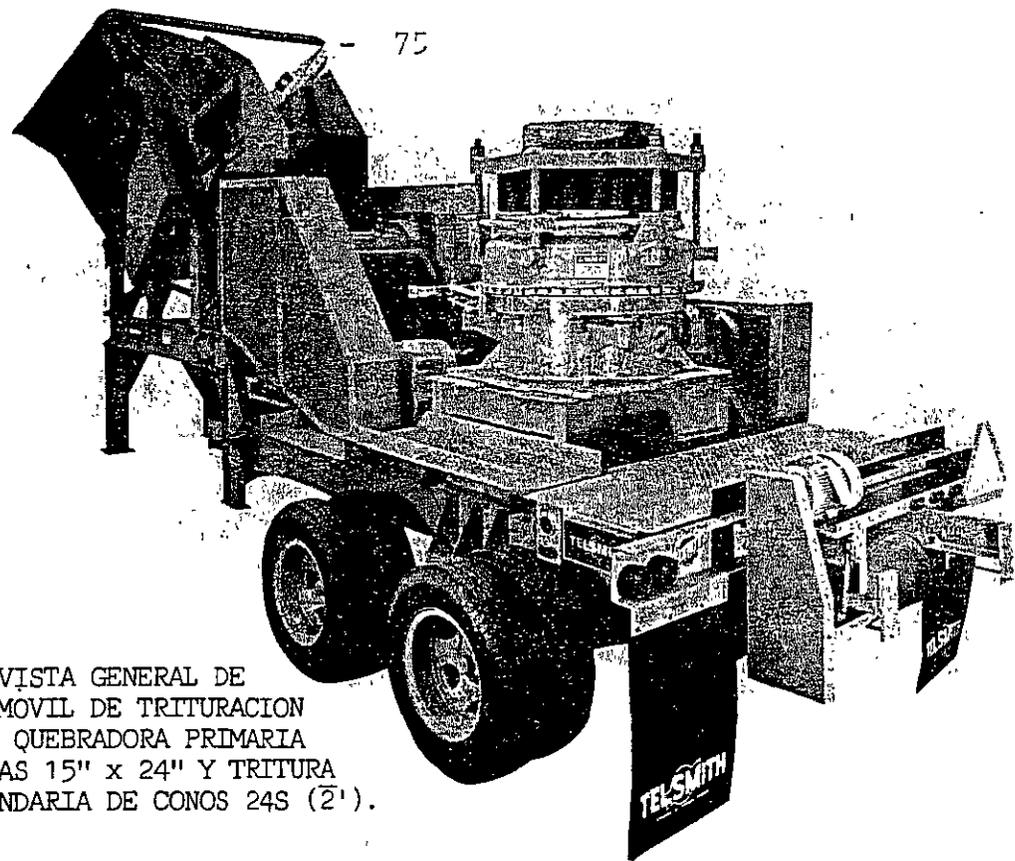


FIG. 66 VISTA GENERAL DE UN GRUPO MOVIL DE TRITURACION DUAL, CON QUEBRADORA PRIMARIA DE QUIJADAS 15" x 24" Y TRITURADORA SECUNDARIA DE CONOS 24S (2').

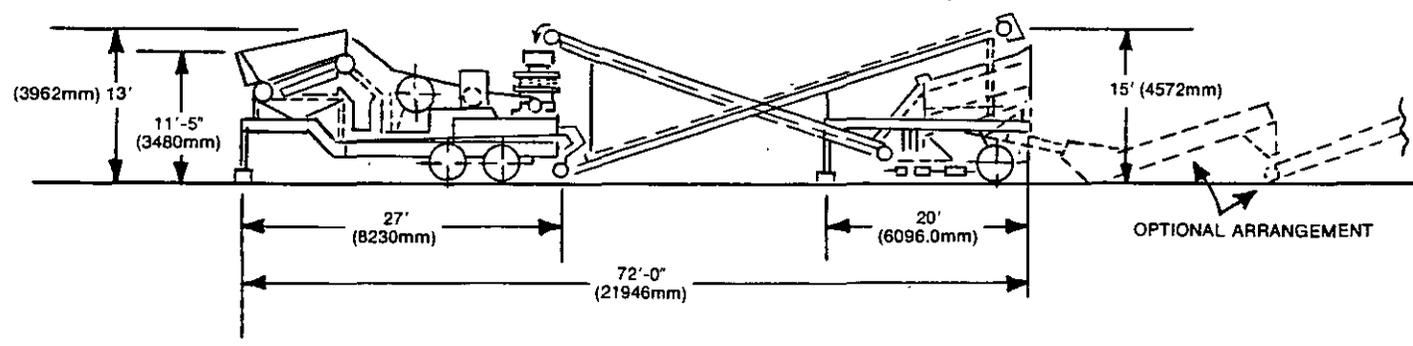
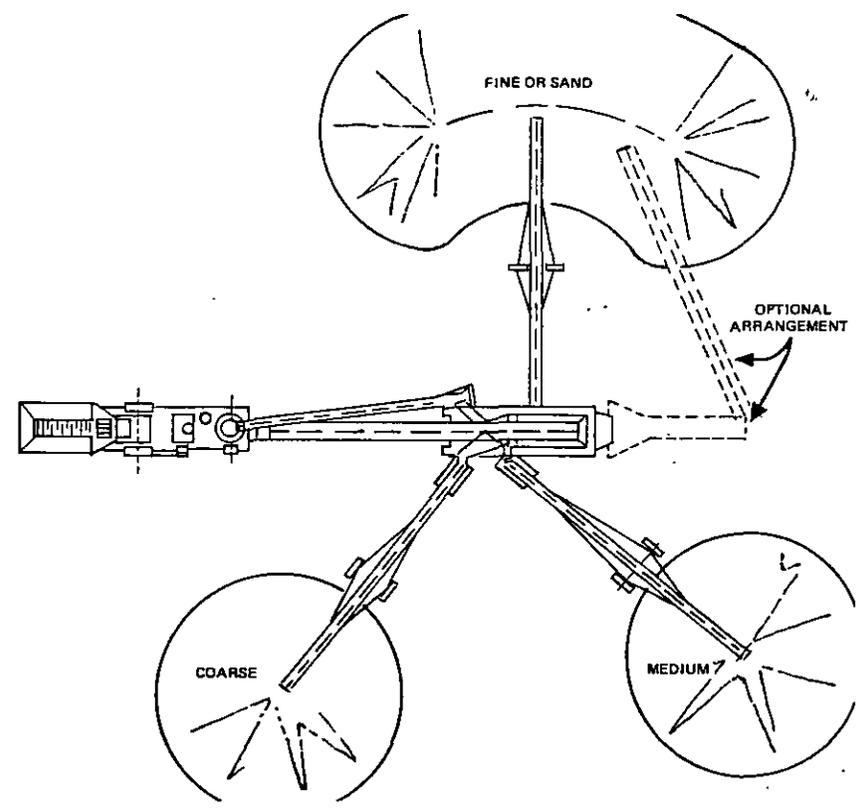


FIG. 67 PLANTA PORTATIL DE TRITURACION CON GRUPO MOVIL DUAL 15" x 24" Y 24S (2'), CRIBA VIBRATORIA INCLINADA DE 3' x 10' DE TRES PISOS, Y BANDAS TRANSPORTADORAS PORTATILES DE CONEXION, RECIRCULACION Y ALMACENAMIENTO.



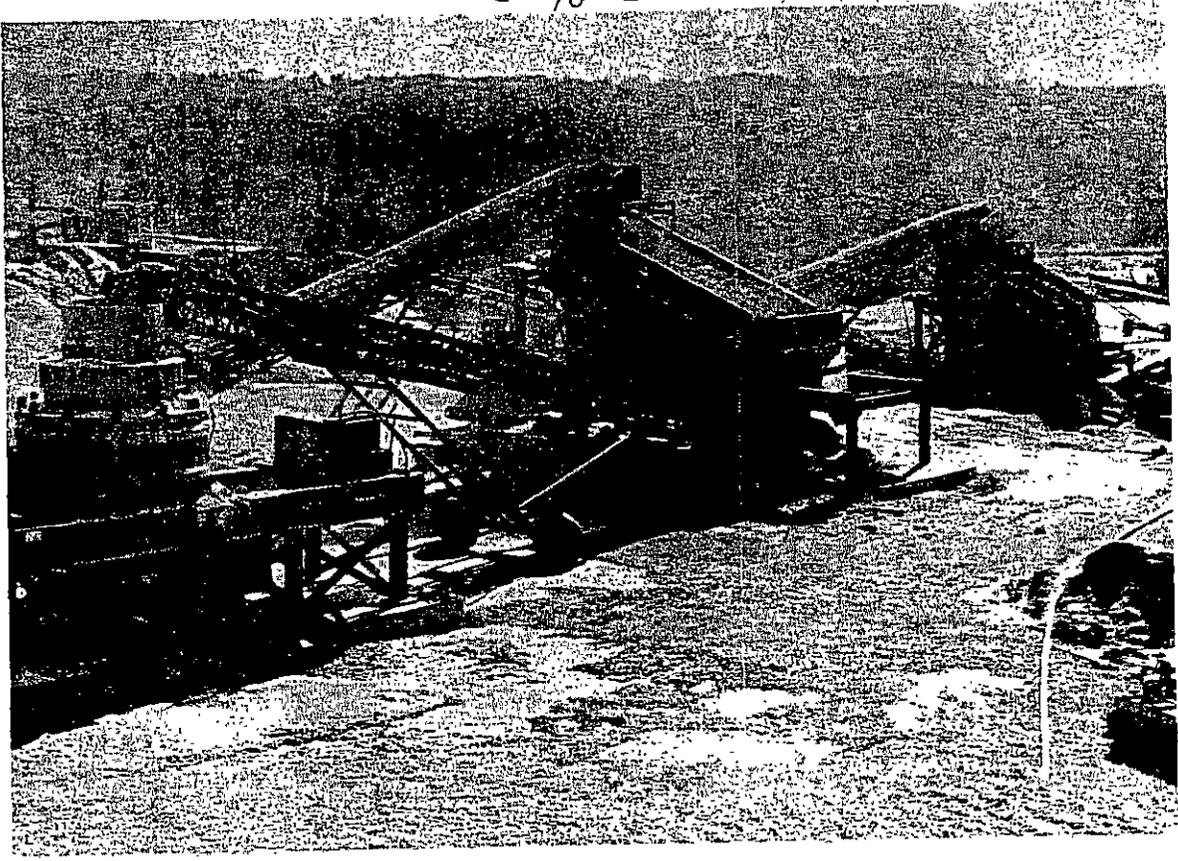


FIG. 68 GRUPO MOVIL DE TRITURACION SECUNDARIA CON CONO 66 S (5½'), INTERCONECTADO A UN GRUPO MOVIL DE CRIBADO POR VIA SECA, CON CRIBA VIBRATORIA INCLINADA 8' x 22', DE TRES PISOS.

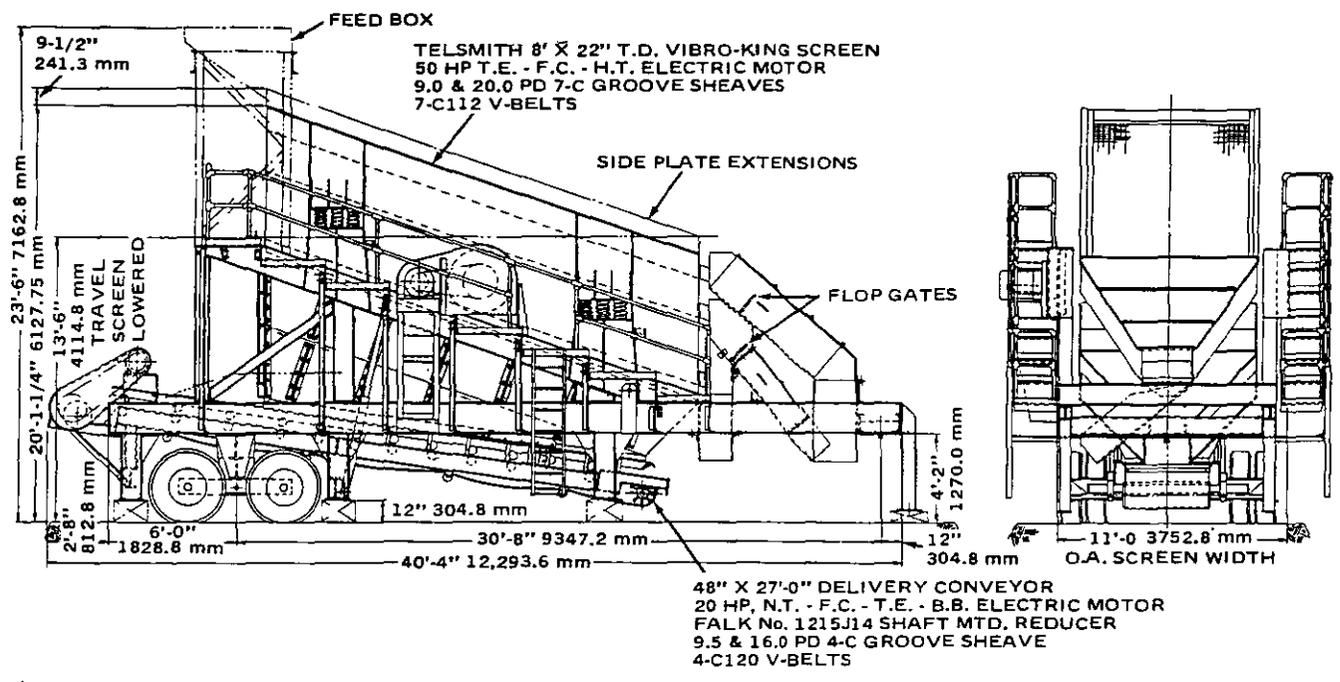


FIG. 69 CROQUIS LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL DE UN GRUPO MOVIL DE CRIBADO POR VIA SECA, CON CRIBA VIBRATORIA INCLINADA 8' x 22'.

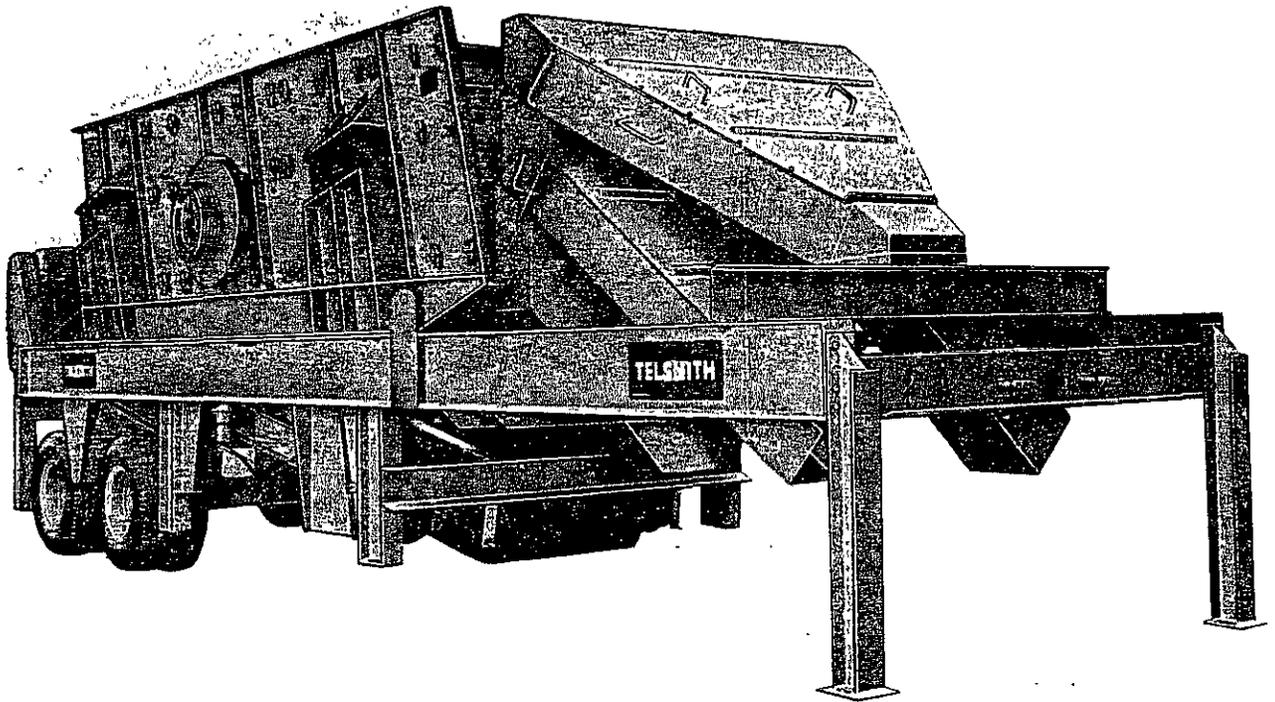


FIG. 70 GRUPO MOVIL DE CRIBADO POR VIA SECA, CON CRIBA VIBRATORIA INCLINADA 8' x 22', DE TRES PISOS, EN POSICION DE TRANSPORTE

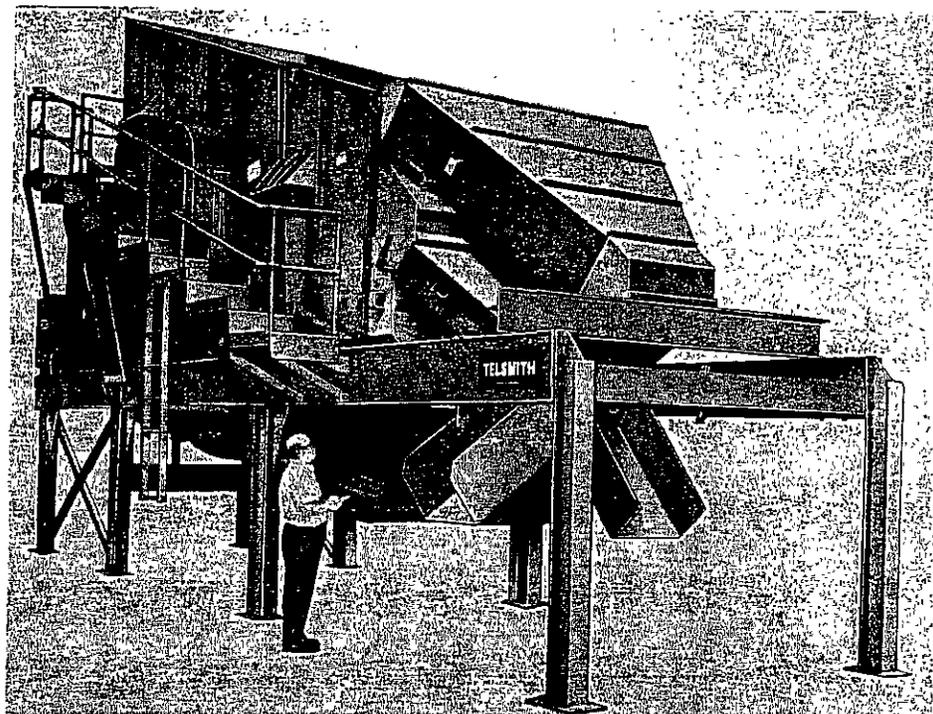


FIG. 71 GRUPO MOVIL DE CRIBADO POR VIA SECA 8' x 22', EN POSICION DE TRABAJO.

FIG. 72 VISTA GENERAL Y CROQUIS LONGITUDINAL DE UN GRUPO MOVIL DE CRIBADO POR VIA HUMEDA (LAVADO DE AGREGADOS) EQUIPADO CON CRIBA VIBRATORIA HORIZONTAL DE TRES PISOS, Y GUSANO LAVADOR DOBLE.

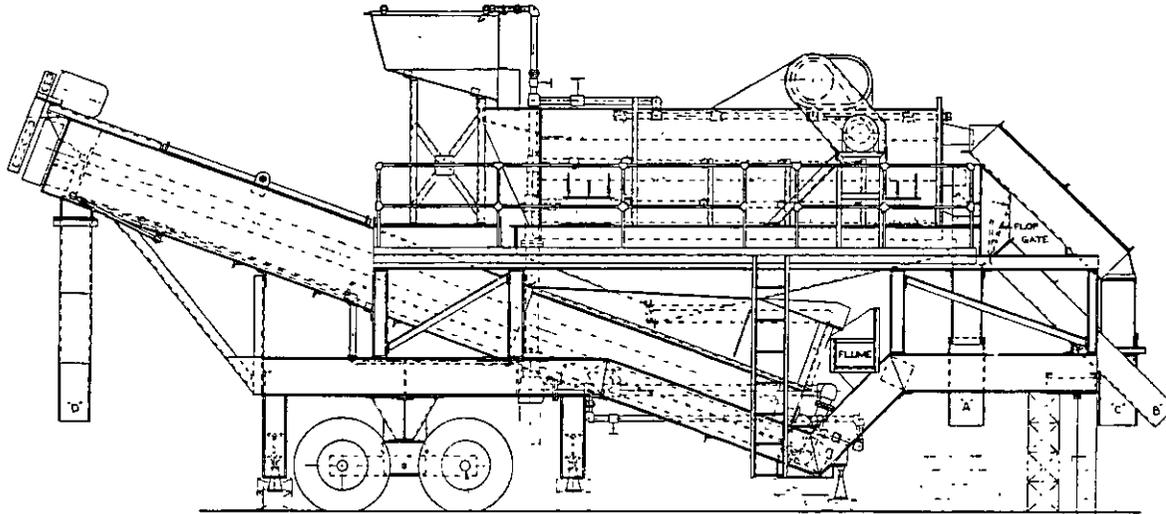
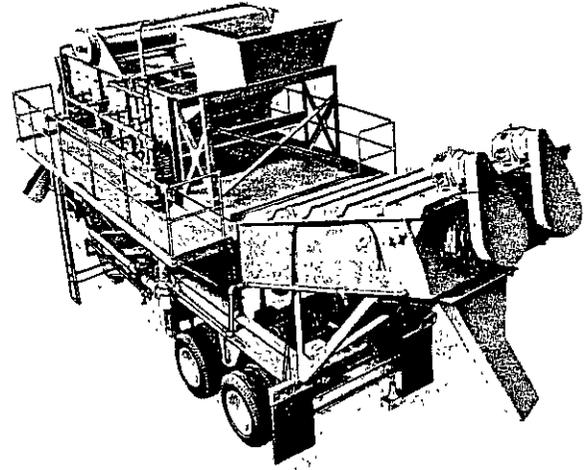
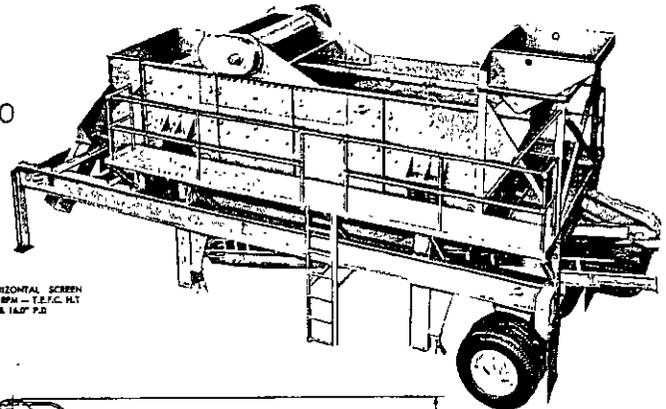
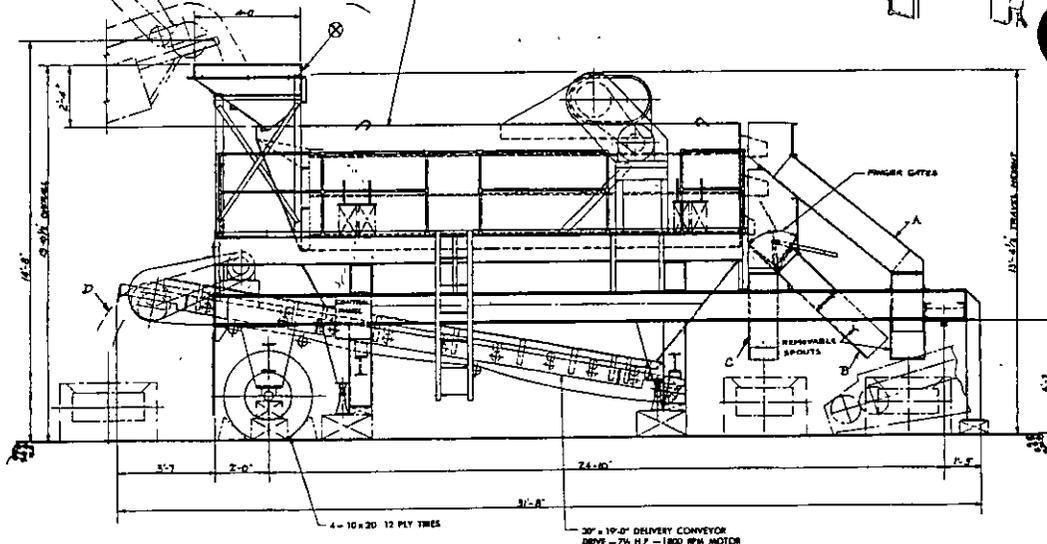


FIG. 73 VISTA GENERAL Y CROQUIS LONGITUDINAL DE UN GRUPO MOVIL DE CRIBADO POR VIA SECA, EQUIPADO CON CRIBA VIBRATORIA HORIZONTAL DE TRES PISOS Y BANDA TRANSPORTADORA DE EVACUACION.



S.G. 8PA-70 PORTABLE CONVEYOR 43'-0" @ 18"

TELAMITH - 3' x 16' F.D. HORIZONTAL SCREEN
 DRIVE - 25 H.P. MOTOR - 1800 RPM - T.E.F.C. M.T.
 4 - "C" GROOVE SHEAVES 8" & 14" P.D.
 4 - "C" 90° V-BELTS



En la integración de las plantas portátiles modernas de producción de agregados, se procura siempre que sea posible, equipar a las máquinas con motores eléctricos debido a que los motores de combustión interna son muy sensibles a desgastes por los polvos que se producen en este tipo de trabajo.

Si no existe suministro por línea de energía eléctrica, se deberá adquirir un grupo electrógeno que se instalará al abrigo de los polvos producidos, para proporcionar la energía eléctrica requerida por los motores de cada componente de la planta portátil.

Las tendencias actuales entre los grandes constructores de caminos, es la de utilizar equipos de elevadas producciones, sin más limitaciones que su portabilidad, para obtener bajos costos de producción, y poder cumplir con la elaboración de los volúmenes de agregados especificados, en un plazo de tiempo relativamente corto.

Por lo que respecta a las quebradoras primarias de quijadas, en la actualidad los tamaños preferidos por los constructores de caminos, para los cuales ya existen diseños de unidades portátiles son: 20" x 36", 25" x 40", 30" x 42", 36" x 46" y 44" x 48", cuya producción se balanceará con los tamaños respectivos de las trituradoras secundarias y terciarias de cono: 36" (3'), 48" (4'), 51" (4 $\frac{1}{4}$ '), y 66" (5 $\frac{1}{2}$ ').

Las cribas vibratorias más utilizadas, de preferencia horizontales, porque requieren menor espacio vertical de instalación, son en sus versiones de dos y tres pisos, las siguientes: 4' x 12', 4' x 14', 5' x 12', 5' x 14', 5' x 16', 6' x 16', 6' x 18', 6' x 20', 7' x 16', 7' x 18', 7' x 20', 8' x 18', 8' x 20' y 8' x 22'. Para los tamaños superiores a 5' x 16', se procurará instalar la criba por separado en un chasis-remolque individual, para no tener un grupo móvil secundario o terciario de muy elevados pesos y dimensiones.

Ultimamente, ciertos fabricantes de equipo de trituración, han diseñado un tipo de criba vibratoria horizontal con excéntrico inferior, la cual instalada en los grupos móviles de trituración secundaria y terciaria, permiten su transporte por carretera, sin necesidad de desmontar la criba, o bajarla en su posición de trabajo, para poder pasar los pasos superiores o inferiores que se encuentre en el curso de su trayecto de un sitio de explotación a otro (Fig. 74).

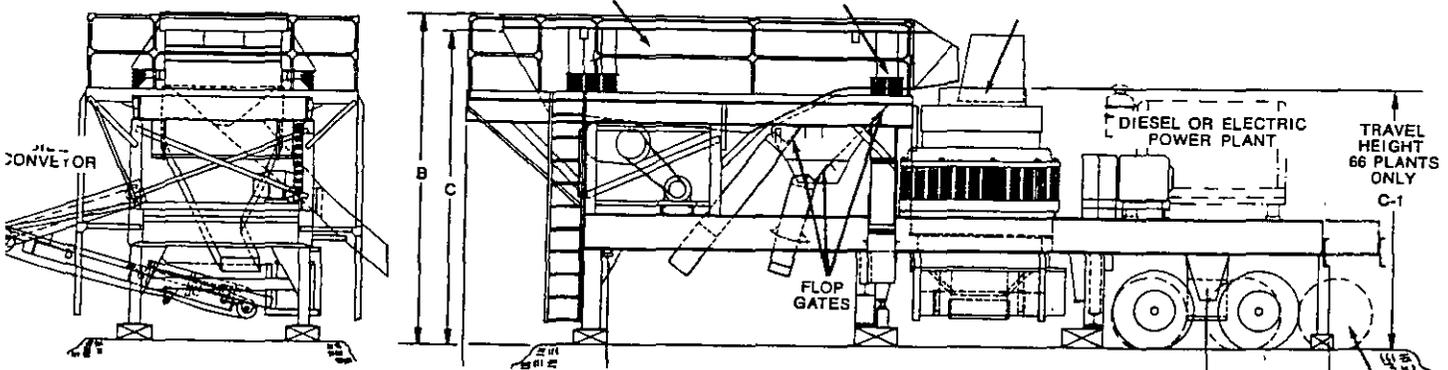
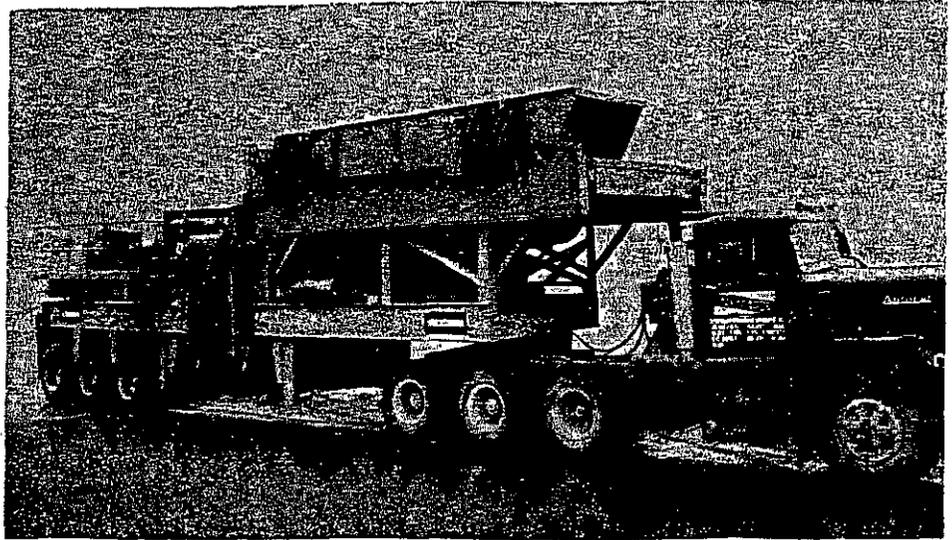
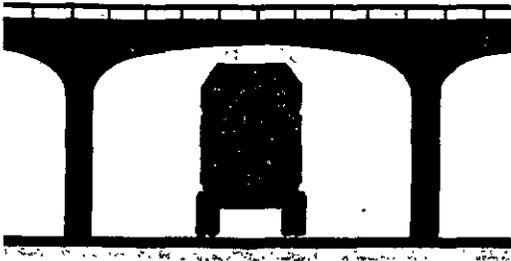


Fig. 74 Grupo móvil de trituración secundaria de "bajo perfil", en posición de trabajo, pocas horas después de haber llegado de su ubicación anterior, con criba vibratoria horizontal de excéntrico inferior 5' x 16' de dos pisos, y trituradora de cono 48 S (4').

Se pueden establecer de lo expuesto anteriormente, las siguientes:

CONCLUSIONES

10. La evolución en las técnicas de construcción de caminos y autopistas, ha conducido a establecer la utilización de agregados pétreos mucho más elaborados, con controles de calidad más estrictos que los que se utilizaban anteriormente, situación que se ha reflejado particularmente en los materiales de base y de carpeta, que tienen hoy en día especificaciones muy rigurosas.
20. Los productores de agregados pétreos han tenido que seguir muy de cerca la evolución de dichas especificaciones, debiendo adaptar sus equipos a la producción de los agregados de calidad exigidos.
30. Se considera que la trituradora de cono, es la máquina idónea para integrar los grupos móviles secundarios y terciarios, por sus cualidades intrínsecas y su versatilidad para procesar cualquier tipo de roca.

40. Las tendencias modernas en la constitución de las plantas portátiles de trituración, es la de emplear máquinas básicas cada vez de mayores capacidades, en quebradoras de quijadas los tamaños de 30" x 42" y 42" x 48" y en trituradoras de cono los tamaños de 48" y 66", capaces de producir del orden de 350 toneladas por hora de materiales de base (0-1½"), a costos de producción reducidos y cumpliendo los programas de trabajo en corto plazo, con las ventajas inherentes de estos hechos.

5

5. EJEMPLO NUMERICO DE CALCULO

Para que el constructor de obras de ingeniería, pueda seleccionar adecuadamente el equipo de trituración necesario para la producción de agregados pétreos, es indispensable que por lo menos, tenga los siguientes cuatro datos fundamentales:

- 1o. Naturaleza geológica de la roca.
- 2o. Tamaño máximo a la alimentación de la quebradora primaria y en caso de ser una trituración parcial, la granulometría media del banco de agregados naturales.
- 3o. Producción requerida en toneladas por hora.
- 4o. Granulometría del producto a la salida (dimensiones y porcentajes).

La ausencia de cualquiera de estas cuatro informaciones básicas puede dar como consecuencia el seleccionar o bien un equipo menor en capacidad del necesario, o bien un equipo de mayor capacidad y por lo tanto mayor costo; siendo en ambos casos los perjuicios técnicos y económicos muy considerables para el usuario.

Con ayuda de tablas de producciones y curvas granulométricas elaboradas por los fabricantes de este tipo de equipo, se resolverá el siguiente problema de selección de equipo de trituración y cribado.

PROBLEMA

Se tiene un banco de basalto limpio de dureza media, del cual se requiere obtener una producción de 90 t/hr. de agregado de

3/8" - 3/4"

0 - 3/8"

para la elaboración de carpeta asfáltica, si después de explotar el banco, el material se tira a volteo por camiones, el tamaño máximo de la roca es de 18", analice y determine cuál es el equipo de cribado y de trituración más conveniente para este caso.

En términos generales, en la etapa primaria de reducción, se reduce la roca natural a un tamaño máximo entre 4" y 10" por medio de una quebradora primaria. En la etapa secundaria, se reducirá el producto de la trituración primaria, a un tamaño entre 1½" y 3". En la trituración terciaria, se reducirá el producto de la trituración secundaria a un tamaño menor de 3/4".

La primera máquina que deberá seleccionarse es la quebradora primaria; siendo el alimentador seleccionado a continuación, de acuerdo con el ancho de la boca de la quebradora primaria.

Haciendo uso de las tablas de capacidades de las quebradoras de quijadas, que es el tipo de quebradora primaria utilizado en los trabajos de ingeniería civil, tabla I anexo 1, se ve que una quebradora de quijadas con boca de admisión de 20" x 36", además de admitir sin problemas rocas de 18", tiene una capacidad entre 70 a 125 toneladas por hora (de acuerdo con la dureza del material), a una abertura de salida de 3". Suponemos que para un basalto de dureza media, nos puede dar sin problema 90 toneladas por hora. En caso de materiales blandos (calizas, dolomitas, yeso, carbón), podemos considerar la capacidad máxima indicada de 125 toneladas por hora; mientras que en caso de materiales muy duros y abrasivos (cantos rodados de río, mineral de hierro y trapp), debemos considerar la capacidad mínima indicada de 70 toneladas por hora.

A continuación utilizando la curva granulométrica respectiva, tabla I Anexo 2, vemos que la quebradora de quijadas 20" x 36", con una abertura de salida de 3" nos da material con un tamaño máximo de 5", anotando para nuestro balance granulométrico, los porcentajes producidos de los tamaños entre 5" y 11/2", 11/2" y 3/4", 3/4" y 3/8" y 3/8" y 0, anotándolos en la tabla de registro elaborada para tal propósito.

La fracción entre 11/2" y 5", requerirá trituración secundaria, pa-

ra reducirla toda a material menor de $1\frac{1}{2}$ ". Utilizando la tabla de producción respectiva, Tabla II Anexo 1, seleccionamos una trituradora secundaria de cono modelo 36 S (3"), la cual abierta a $\frac{3}{4}$ " en la salida, tritura las 55 toneladas por hora de material de $1\frac{1}{2}$ " - 5".

Utilizando la curva granulométrica respectiva, Tabla II Anexo 2, se anotan en la tabla de registro los porcentajes y toneladas por hora de los materiales producidos.

Al realizar el balance granulométrico de las etapas primaria y secundaria, se ve que quedan 44.5 toneladas por hora de material entre $\frac{3}{4}$ " y $1\frac{1}{2}$ " que es necesario reducir en una etapa terciaria a material menor de $\frac{3}{4}$ ". Por medio de la tabla de capacidades respectiva, Tabla III Anexo 1, se selecciona para realizar esta reducción, una trituradora terciaria de cono, modelo 36 FC (3'), la cual abierta a $\frac{7}{16}$ " en la salida produce 44.5 toneladas por hora de material menor de $\frac{3}{4}$ ".

Después de efectuar la cuantificación de los porcentajes y toneladas por hora de materiales de 0 - $\frac{3}{8}$ " y $\frac{3}{8}$ " - $\frac{3}{4}$ " producidos en esta etapa, utilizando la curva granulométrica respectiva, Tabla III Anexo 2, se anotará el resumen final del producto producido en las tres etapas de reducción.

Se elaborará a continuación el diagrama de flujo (Flow-Sheet) del proceso, haciendo trabajar tanto la quebradora primaria de qui—
jadas 20" x 36" como la trituradora secundaria de conos 36 S (3'), en circuito abierto, y la trituradora de conos terciaria 36 FC (3'), en circuito cerrado, para tener control del tamaño máximo del producto final.

Si se trata de una instalación portátil o móvil, se dispondrán en chasis-remolques separados: alimentador y quebradora primaria de qui—
jadas, criba-scalper y trituradora secundaria, criba de productos y trituradora terciaria, con las bandas transportadoras de conexión, recirculación y almacenamiento necesarias para establecer el flujo de la planta.

La ventaja de disponer el equipo en grupos móviles de "función unitaria", además de tener unidades de más fácil transporte, operación y mantenimiento, es la de contar con grupos móviles autónomos que puedan trabajar por separado; es decir, en caso por ejemplo, de explotación de un banco de agregados naturales de río, pudiera no necesitarse el grupo primario, o el grupo primario y el secundario, solamente necesitándose el grupo terciario, y por lo tanto, se produciría el material necesario con un costo mínimo; ya que únicamente se utilizaría el equipo que realmente se requiriera de acuerdo con el material natural disponible y el producto que debe elaborarse.

Para el cálculo de la criba, con el auxilio de las tablas de factores, elaboradas por los fabricantes de este tipo de equipo, Anexo III, se aplicará la fórmula siguiente:

$$\text{Area en pies cuadrados} = \frac{\text{Alimentación menos sobretamaño}}{A \times B \times C \times D \times E \times F}$$

Fórmula en la cual:

- A = Capacidad específica de la malla en toneladas por hora por pie cuadrado de malla.
- B = Factor en función del porcentaje de sobretamaño en la alimentación a la criba.
- C = Factor en función del porcentaje de la eficiencia de cribado deseada.
- D = Factor en función del porcentaje de material menor a la mitad de la malla calculada, contenido en el material alimentado.
- E = Factor en función de la abertura de la malla en cribado por vía húmeda; cuando se criba por vía seca se tomará este factor igual a la unidad.
- F = Factor en función del orden que tenga la malla calculada en la criba. En la actualidad, se utilizan cribas de uno, dos y tres pisos. En caso de criba de dos o tres pisos, se calculará cada una de las mallas separadamente, y para seleccionar el tamaño de la criba, regirá la malla mayor.

En el problema resuelto anteriormente, la hoja de flujo muestra que la criba de productos tiene dos mallas: 3/4" y 3/8" y que trabaja en circuito cerrado.

1o. Cálculo de la malla de 3/4"

$$\text{Area en pies cuadrados} = \frac{184.5 - 44.5}{A \times B \times C \times D \times E \times F}$$

A = Para grava triturada: 1.80 toneladas por hora por pie cuadrado malla de 3/4"

B = Para sobretamaño de: $= \frac{44.5}{134.5} \times 100 = 33\% - 0.97$

C = Porcentaje de eficiencia de cribado deseada: 94% - 1.00'

D = Porcentaje de material inferior a 3/8": $\frac{46.1}{134.5} \times 100 = 34\% - .88$

E = Para cribado por vía seca: - 1.00

F = Para el primer piso: - 1.00

Sustituyendo estos valores en la fórmula

$$A_{3/4"} = \frac{90}{1.80 \times 9.7 \times 1.00 \times .88 \times 1 \times 1} = \frac{90}{1.54} = 58 \text{ pies cuadrados}$$

Para la malla de 3/8" del segundo piso, el cálculo será:

$$\text{Area en pies cuadrados} = \frac{90.0 - 43.9}{A \times B \times C \times D \times E \times F}$$

A = Para grava triturada, malla de 3/8" : 1.19 toneladas por hora por pie cuadrado.

B = Para sobretamaño de $\frac{43.9}{90} \times 100 = 49\%$: - 0.90

C = Porcentaje de material inferior a 3/16" : - 30%: - 0.80

E = Para cribado por vía seca: 1.00

F = Para el segundo piso: 0.90

Sustituyendo estos valores en la fórmula:

$$A_{3/8"} = \frac{46.1}{1.19 \times .9 \times 1 \times .8 \times 1 \times .9} = \frac{46.1}{.78} = 59 \text{ pies cuadrados}$$

Puesto que 59 pies cuadrados es mayor que 58 pies cuadrados en este caso regirá el piso inferior de malla 3/8" para seleccionar el tamaño de la criba.

Se seleccionará una criba vibratoria horizontal de dos pisos, de 5' de ancho por 12' de longitud, con una área efectiva de cribado de 5' x 12' = 60 pies cuadrados.

En la integración de plantas portátiles, se prefiere a las cribas horizontales sobre las cribas inclinadas, debido a que las primeras tienen necesidad de menor espacio vertical de instalación, cualidad muy importante para el traslado por carretera de los grupos móviles, ya que con las cribas horizontales se obtienen alturas de la unidad sensiblemente menores a las de los mismos grupos móviles equipados con cribas inclinadas.

BALANCE GRANULOMETRICO

TABLA DE REGISTRO

Tamaño de los materiales	Trituración primaria quebradora de qui- jadas 20" x 36" abier- ta a 3", produce 90 toneladas por hora		Trituración secundaria trituradora de conos 36 S abierta a 3/4", produce 55 toneladas por hora		Resumen de las etapas primaria y secundaria		Trituración terciaria trituradora de conos 36 FC abierta a produce 44.5 tonela- das por hora		Resumen fi- nal del pro- ducto	
	%	Ton/h	%	Ton/h	%	Ton/h	%	Ton/h	%	Ton/h
1½" - 5"	61%	55.0	—	—	—	—	—	—	—	—
3/4" - 1½"	22%	19.7	45%	24.8	49%	44.5	—	—	—	—
3/8" - 3/4"	9%	8.1	27%	14.8	26%	22.9	47%	21.0	49%	43.9
0 - 3/8"	8%	7.2	28%	15.4	25%	22.6	53%	23.5	51%	46.1
S U M A	100%	90.0	100%	55.0	100%	90.0	100%	44.5	100%	90.0

FLUJO DE LA INSTALACION
(FLOW-SHEET)

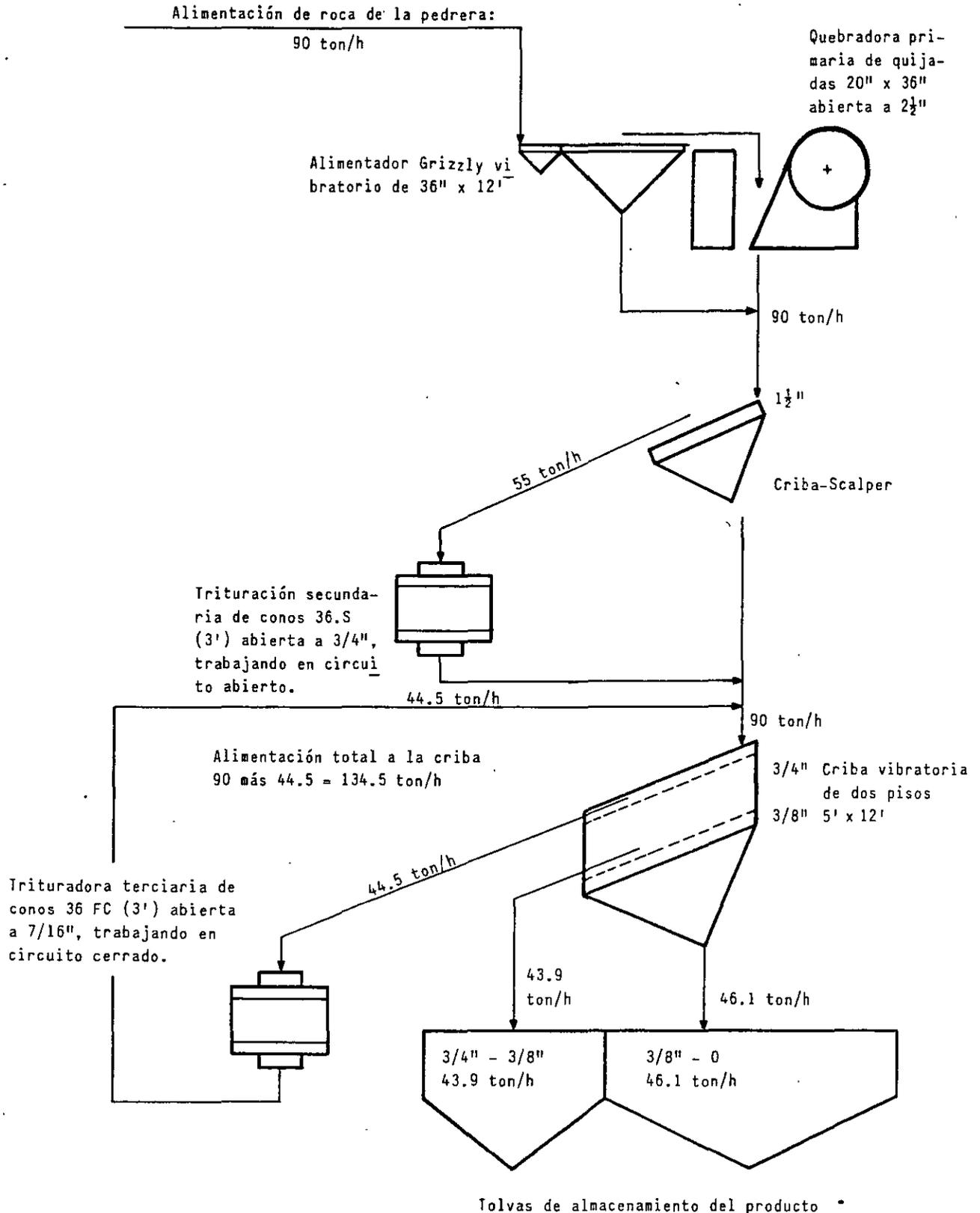


Figura 75.

PROBLEMA DE SELECCION DE EQUIPO

Resolver los siguientes problemas de seleccion de equipo de trituración y cribado, utilizando las tablas y gráficas correspondientes.

PROBLEMA No. 1

Se requiere una producción de 90 ton/hr, siendo los tamaños de los materiales que se necesitan, los siguientes:

Un producto de $1\frac{1}{2}$ " a $\frac{3}{4}$ "
Otro de $\frac{3}{4}$ " a $\frac{3}{8}$ "
y el último de $\frac{3}{8}$ " a 0

Se trata de un banco de basalto, el cual por medio de voladura de dinamita es fragmentado, obteniéndose un material en "greña" con tamaño máximo de 18".

El tamaño de los materiales es el siguiente:

- 18"	+	5"	80%
- 5"	+	$1\frac{1}{2}$ "	10%
- $1\frac{1}{2}$ "	+	$\frac{3}{4}$ "	4%
- $\frac{3}{4}$ "	+	$\frac{3}{8}$ "	4%
- $\frac{3}{8}$ "	+	0	2%

Obtener la solución óptima.

PROBLEMA No. 2

Producción 90 ton/hr

$\frac{3}{4}$ " a $\frac{3}{8}$ "
0 a $\frac{3}{8}$ "

El único cambio en este problema con respecto al anterior, es que ahora se requiere el 100% de material menor de $\frac{3}{4}$ ".

Obtener la solución para primaria y secundaria.

PROBLEMA No. 3

Mismos datos que el problema No. 2; pero ahora la solución es para

primaria, secundaria y terciaria.

PROBLEMA No. 4

Datos básicos:

- A) Explotación de un banco de agregados naturales, conglomerado an desítico.
- B) Tamaño máximo a la alimentación de 8" y una granulometría media del banco como sigue:

Tamaño:				Porciento
3"	-	8"	:-	40%
1½"	-	3"	:-	20%
¾"	-	1 ½"	:-	12%
¼"	-	¾"	:-	10%
0	-	¼"	:-	<u>18%</u>
		Suma	:-	100%

- C) Se desea producir material de base 0-1½" para construcción de un camino, necesitándose para cumplir el programa establecido, 225 toneladas métricas por hora de dicho material.
- D) Granulometría del producto: 0-1½", según especificaciones SCT para material de base.

Se pregunta lo siguiente:

- a) Equipo de trituración necesario para producir el material al tamaño y cantidad estipulados. (Seleccionar quebradora de quijadas para la etapa primaria, y trituradoras de cono tipo S y FC, para las etapas secundaria y terciaria respectivamente).
- b) Equipo de cribado necesario para integrar la planta.
- c) Tamaño y tipo del alimentador aconsejable para recibir el mate rial natural en greña (ver la siguiente parte 6).
- d) Establecimiento de la hoja de flujo (Flow Sheet) aconsejable, para el acomodo del equipo (alimentador, trituradoras, cribas) seleccionado, indicando las toneladas por hora y tamaño del material, en cada etapa del proceso de trituración y cribado.

**LIBRO: CMT. CARACTERÍSTICAS DE
LOS MATERIALES**

PARTE: 1. MATERIALES PARA TERRACERÍAS

TÍTULO: 01 Materiales para Terraplén

A. CONTENIDO

Esta Norma contiene los requisitos de calidad de los materiales que se utilicen en la construcción de terraplenes

B. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Los materiales para terraplén son suelos y fragmentos de roca, producto de los cortes o de la extracción en bancos, que se utilizan para formar el cuerpo de un terraplén hasta el nivel de desplante de la capa subyacente.

La clasificación de los suelos y fragmentos a que se refiere esta Norma, se describe en el Manual M·MMP·1·02, *Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos*.

C. REFERENCIAS

Esta Norma se complementa con los siguientes:

MANUALES	DESIGNACIÓN
Muestreo de Materiales para Terracerías	M·MMP·1·01
Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos	M·MMP 1 02
Contenido de Agua	M·MMP·1·04
Límites de Consistencia	M·MMP·1 07
Compactación AASHTO	M·MMP·1 09
Grado de Compactación	M·MMP·1·10
Valor Soporte de California (CBR) y Expansión en Laboratorio	M MMP·1 11

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N CMT-1-01/02

D. REQUISITOS DE CALIDAD

Los materiales que se utilicen para la formación de terraplenes cumplirán con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 1 de esta Norma, a menos que exista un estudio previamente aprobado por la Secretaría, que justifique el empleo de materiales con características distintas. En ningún caso se utilizarán materiales altamente orgánicos como turba (Pt), ni materiales producto de despalmes.

TABLA 1.- Requisitos de calidad de materiales para terraplén

Característica	Valor
Límite líquido; %, máximo	50
Valor Soporte de California (CBR) ^[1] ; %, mínimo	5
Expansión; %, máxima	5
Grado de compactación ^[2] ; %	90 ± 2

[1] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al del material en el banco a 1,5 m de profundidad.

[2] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa. Cuando el material sea no compactable, de acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP 1 02, *Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos*, se colocará en capas del espesor mínimo que permita el tamaño máximo del material y se bandeará, previa aplicación de un riego de agua a razón de 150 L/m², dando como mínimo tres pasadas en toda la superficie en cada capa, con un tractor de 36,7 t con orugas.

E. CRITERIOS PARA ACEPTACIÓN O RECHAZO

La aceptación de los materiales para terraplén por parte de la Secretaría, se hará considerando lo siguiente:

- E.1. El encargado de elaborar el estudio geotécnico o del banco, es el responsable de determinar, a nivel estudio, que el material cumpla con los requisitos de calidad indicados en esta Norma, según el tipo de material establecido en el proyecto, en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-1-01, *Muestreo de Materiales para Terracerías*, mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.
- E.2. En el caso de que el Contratista de Obra seleccione el material o el banco, él será el responsable de asegurar que el material cumpla con los requisitos de calidad señalados en esta Norma, considerando lo indicado en la Fracción anterior. El Contratista de

NORMAS

N-CMT 1 01/02

Obra entregará a la Secretaría un certificado de calidad que garantice el cumplimiento de todos los requisitos establecidos en esta Norma, expedido por su propio laboratorio o por un laboratorio externo aprobado por la Secretaría.

- E.3. Durante el proceso de producción, con objeto de controlar la calidad del material en la ejecución de la obra, el Contratista de Obra, por cada trescientos (300) metros cúbicos o fracción del material de un mismo tipo, extraído de un corte o un banco, realizará las pruebas necesarias que aseguren que cumple con el límite líquido indicado en esta Norma, entregando a la Secretaría los resultados de dichas pruebas. Las pruebas se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M·MMP·1·01, *Muestreo de Materiales para Terracerías* y mediante el procedimiento de prueba contenido en el Manual M·MMP·1·07, *Limites de Consistencia*. Será motivo de rechazo por parte de la Secretaría, el incumplimiento de ese requisito.
- E.4. Además de lo señalado en la Fracción anterior, el Contratista de Obra, por cada mil (1 000) metros cúbicos o fracción del material de un mismo tipo, extraído de un corte o un banco, realizará las pruebas necesarias que aseguren que cumple con todos los valores establecidos en esta Norma, entregando a la Secretaría los resultados de dichas pruebas. Las pruebas se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M·MMP·1·01, *Muestreo de Materiales para Terracerías* y mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma. Será motivo de rechazo por parte de la Secretaría, el incumplimiento de cualquiera de los requisitos establecidos.
- E.5. Una vez tendidas y compactadas las capas de terraplén, el Contratista de Obra realizará las pruebas necesarias que aseguren el cumplimiento del grado de compactación establecido en esta Norma, en el proyecto o señalado por la Secretaría, en el número y con la periodicidad indicada por los mismos, mediante el procedimiento contenido en el Manual M·MMP·1·10, *Grado de Compactación*, entregando a la Secretaría los resultados de dichas pruebas.
- E.6. En cualquier momento, la Secretaría puede verificar que el material suministrado cumpla con cualquiera de los requisitos de calidad establecidos en esta Norma, siendo motivo de rechazo el incumplimiento de cualquiera de ellos.

**LIBRO: CMT. CARACTERÍSTICAS DE
LOS MATERIALES**

PARTE: 1. MATERIALES PARA TERRACERÍAS

TÍTULO: 02. Materiales para Subyacente

A. CONTENIDO

Esta Norma contiene los requisitos de calidad de los materiales que se utilizan en la construcción de la capa subyacente de las terracerías

B. DEFINICIÓN

Los materiales para la capa subyacente son suelos y fragmentos de roca, producto de los cortes o de la extracción en bancos, que se utilizan para formar dicha capa inmediatamente encima del cuerpo de un terraplén.

La clasificación de los suelos y fragmentos a que se refiere esta Norma, se describe en el Manual M·MMP·1·02, *Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos*.

C. REFERENCIAS

Esta Norma se complementa con los siguientes:

MANUALES	DESIGNACIÓN
Muestreo de Materiales para Terracerías	M·MMP·1·01
Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos	M MMP 1·02
Contenido de Agua	M·MMP·1·04
Límites de Consistencia	M·MMP 1 07
Compactación AASHTO	M·MMP 1·09
Grado de Compactación	M·MMP·1·10

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT 1-02/02

Valor Soporte de California (CBR) y Expansión en Laboratorio M-MMP-1-11

D. REQUISITOS DE CALIDAD

Los materiales que se utilicen para la formación de la capa subyacente, en función de sus características y de la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de ocho comados (8,2) toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento (ΣL), cumplirán con lo que se indica a continuación, a menos que exista un estudio previamente aprobado por la Secretaría, que justifique el empleo de materiales con características distintas. En ningún caso se utilizarán materiales altamente orgánicos como turba (Pt).

D.1. Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea menor de diez mil (10 000) ejes equivalentes, no se requiere la capa subyacente.

D.2. Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea de diez mil (10 000) a un (1) millón de ejes equivalentes, el material cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 1 de esta Norma y tendrá un espesor mínimo de treinta (30) centímetros.

TABLA 1.- Requisitos de calidad de materiales para capa subyacente

Característica	Valor
Tamaño máximo y granulometría	Que sea compactable ^[1]
Límite líquido; %, máximo	50
Valor Soporte de California (CBR) ^[2] ; %, mínimo	10
Expansión; %, máxima	3
Grado de compactación ^[3] ; %	95 ± 2

[1] De acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP-1-02, *Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos*.

[2] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al del material en el banco a 1,5 m de profundidad.

[3] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

NORMAS

N CMT-1-02/02

- D.3. Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea de un (1) millón a diez (10) millones de ejes equivalentes, el material cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 1 de esta Norma y tendrá un espesor mínimo de setenta (70) centímetros.
- D.4. Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea mayor de diez (10) millones de ejes equivalentes, la capa subyacente será motivo de diseño especial.
- D.5. Si la capa subyacente se desplanta directamente sobre el terreno de cimentación y su espesor es menor que el señalado en las Fracciones D.2. o D.3. de esta Norma, según corresponda, cuando el material del terreno de cimentación no cumpla con los requisitos establecidos en la Tabla 1, se excavará una caja hasta la profundidad necesaria para completar el espesor mínimo.

E. TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE MATERIALES PARA SUBYACENTE

- E.1. Cuando el material para subyacente sea producto de los cortes, se podrá transportar utilizando tractores o motoescrapas.
- E.2. Cuando el material para subyacente sea extraído de bancos o sea necesario almacenarlo para su posterior utilización en la obra, se tendrá cuidado en su transporte y almacenamiento, con el propósito de evitar la alteración de sus características, atendiendo los siguientes aspectos:
- E.2.1. El material se almacenará en un sitio específicamente destinado para tal propósito. Cuando en dicho sitio no se cuente con un firme, previamente a su utilización se deberá:
- Remover la materia vegetal y limpiar la superficie.
 - Conformar, nivelar y compactar la superficie, dejando una sección transversal uniforme que permita el drenaje.
- E.2.2. Los materiales constituidos por partículas de diferentes tamaños que se almacenen en los depósitos, tienden a segregarse, por lo que será necesario que al cargar el material para llevarlo al frente de trabajo, se tome desde la parte baja del depósito.

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT 1 02/02

E.2.3. Los materiales se cargarán y transportarán al frente de trabajo, en vehículos con cajas cerradas o protegidas con lonas, que impidan la contaminación del entorno o que se derramen.

F. CRITERIOS PARA ACEPTACIÓN O RECHAZO

La aceptación de los materiales para subyacente por parte de la Secretaría, se hará considerando lo siguiente:

- F.1.** El encargado de elaborar el estudio geotécnico o del banco, es el responsable de determinar, a nivel estudio, que el material cumpla con los requisitos de calidad indicados en esta Norma, según el tipo de material establecido en el proyecto, en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-1-01, *Muestreo de Materiales para Terracerías*, mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.
- F.2.** En el caso de que el Contratista de Obra seleccione el material o el banco, él será el responsable de asegurar que el material cumpla con los requisitos de calidad señalados en esta Norma, considerando lo indicado en la Fracción anterior. El Contratista de Obra entregará a la Secretaría un certificado de calidad que garantice el cumplimiento de todos los requisitos establecidos en esta Norma, expedido por su propio laboratorio o por un laboratorio externo aprobado por la Secretaría.
- F.3.** Durante el proceso de producción, con objeto de controlar la calidad del material en la ejecución de la obra, el Contratista de Obra, por cada trescientos (300) metros cúbicos o fracción del material de un mismo tipo, extraído de un corte o un banco, realizará las pruebas necesarias que aseguren que cumple con el límite líquido indicado en esta Norma, entregando a la Secretaría los resultados de dichas pruebas. Las pruebas se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP 1-01, *Muestreo de Materiales para Terracerías* y mediante el procedimiento de prueba contenido en el Manual M-MMP-1-07, *Limites de Consistencia*. Será motivo de rechazo por parte de la Secretaría, el incumplimiento de ese requisito.
- F.4.** Además de lo señalado en la Fracción anterior, el Contratista de Obra, por cada ochocientos (800) metros cúbicos o fracción del

NORMAS

N-CMT-1-02/02

material de un mismo tipo, extraído de un corte o un banco, realizará las pruebas necesarias que aseguren que cumple con todos los valores establecidos en esta Norma, entregando a la Secretaría los resultados de dichas pruebas. Las pruebas se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-1-01, *Muestreo de Materiales para Terracerías* y mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma. Será motivo de rechazo por parte de la Secretaría, el incumplimiento de cualquiera de los requisitos establecidos.

- F.5. Una vez tendidas y compactadas las capas subyacentes, el Contratista de Obra realizará las pruebas necesarias que aseguren el cumplimiento del grado de compactación establecido en esta Norma, en el proyecto o señalado por la Secretaría, en el número y con la periodicidad indicada por los mismos, mediante el procedimiento contenido en el Manual M-MMP-1-10, *Grado de Compactación*, entregando a la Secretaría los resultados de dichas pruebas.
- F.6. En cualquier momento, la Secretaría puede verificar que el material suministrado cumpla con cualquiera de los requisitos de calidad establecidos en esta Norma, siendo motivo de rechazo el incumplimiento de cualquiera de ellos.

**LIBRO: CMT. CARACTERÍSTICAS DE
LOS MATERIALES**

PARTE: 1. MATERIALES PARA TERRACERÍAS

TÍTULO: 03. Materiales para Subrasante

A. CONTENIDO

Esta Norma contiene los requisitos de calidad de los materiales que se utilicen en la construcción de la capa subrasante de las terracerías.

B. DEFINICIÓN

Los materiales para la capa subrasante son los suelos naturales, seleccionados o cribados, producto de los cortes o de la extracción en bancos, que se utilizan para formar dicha capa inmediatamente encima de la cama de los cortes, de la capa subyacente o del cuerpo de un terraplén cuando ésta última no se construya, para servir de desplante a un pavimento.

La clasificación de los suelos a que se refiere esta Norma, se describe en el Manual M·MMP·1·02, *Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos*

C. REFERENCIAS

Esta Norma se complementa con los siguientes:

MANUALES	DESIGNACIÓN
Muestreo de Materiales para Terracerías	M·MMP·1·01
Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos	M·MMP·1·02
Contenido de Agua	M·MMP·1·04
Límites de Consistencia	M·MMP·1·07
Compactación AASHTO	M·MMP·1·09

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT 1 03/02

Grado de Compactación	M·MMP·1·10
Valor Soporte de California (CBR) y Expansión en Laboratorio	M·MMP·1·11

D. REQUISITOS DE CALIDAD

Los materiales que se utilicen para la formación de la capa subrasante, en función de sus características y de la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de ocho coma dos (8,2) toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento (ΣL), cumplirán con lo que se indica a continuación, a menos que exista un estudio previamente aprobado por la Secretaría, que justifique el empleo de materiales con características distintas. En ningún caso se utilizarán materiales altamente orgánicos como turba (Pt)

- D.1. Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea igual a un (1) millón de ejes equivalentes o menor, el material cumplirá con las características granulométricas y con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 1 de esta Norma y tendrá un espesor mínimo de veinte (20) centímetros
- D.2. Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea de un (1) millón a diez (10) millones de ejes equivalentes, el material cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 1 de esta Norma y tendrá un espesor mínimo de treinta (30) centímetros.
- D.3. Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea mayor de diez (10) millones de ejes equivalentes, la capa subrasante será motivo de diseño especial.
- D.4. Si la capa subrasante se desplanta directamente sobre el terreno de cimentación y su espesor es menor que el señalado en las Fracciones D.1. o D.2. de esta Norma, según corresponda, cuando el material del terreno de cimentación no cumpla con los requisitos establecidos en la Tabla 1, se excavará una caja hasta la profundidad necesaria para completar el espesor mínimo.

E. TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE MATERIALES PARA SUBRASANTE

- E.1. Cuando el material para subrasante sea producto de los cortes, se podrá transportar utilizando tractores o motoescrepas.

NORMAS

N-CMT 1 03/02

TABLA 1.- Requisitos de calidad de materiales para capa subrasante

Característica	Valor
Tamaño máximo; mm	76
Límite líquido; %, máximo	40
Índice plástico; %, máximo	12
Valor Soporte de California (CBR) ^[1] ; %, mínimo	20
Expansión máxima; %	2
Grado de compactación ^[2] ; %	100 ± 2

[1] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al del material en el banco a 1,5 m de profundidad.

[2] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa

E.2. Cuando el material para subrasante sea extraído de bancos o sea necesario almacenarlo para su posterior utilización en la obra, se tendrá cuidado en su transporte y almacenamiento, con el propósito de evitar la alteración de sus características, atendiendo los siguientes aspectos:

E.2.1. El material se almacenará en un sitio específicamente destinado para tal propósito. Cuando en dicho sitio no se cuente con un firme, previamente a su utilización se deberá.

- Remover la materia vegetal y limpiar la superficie.
- Conformar, nivelar y compactar la superficie, dejando una sección transversal uniforme que permita el drenaje

E.2.2. Los materiales constituidos por partículas de diferentes tamaños que se almacenen en los depósitos, tienden a segregarse, por lo que será necesario que al cargar el material para llevarlo al frente de trabajo, se tome desde la parte baja del depósito.

E.2.3. Los materiales se cargarán y transportarán al frente de trabajo, en vehículos con cajas cerradas o protegidas con

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-1-03/02

lonas, que impidan la contaminación del entorno o que se derramen.

F. CRITERIOS PARA ACEPTACIÓN O RECHAZO

La aceptación de los materiales para subrasante por parte de la Secretaría, se hará considerando lo siguiente:

- F.1. El encargado de elaborar el estudio geotécnico o del banco, es el responsable de determinar, a nivel estudio, que el material cumpla con los requisitos de calidad indicados en esta Norma, según el tipo de material establecido en el proyecto, en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-1-01, *Muestreo de Materiales para Terracerías*, mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.
- F.2. En el caso de que el Contratista de Obra seleccione el material o el banco, él será el responsable de asegurar que el material cumpla con los requisitos de calidad indicados en esta Norma, considerando lo indicado en la Fracción anterior. El Contratista de Obra entregará a la Secretaría un certificado de calidad que garantice el cumplimiento de todos los requisitos establecidos en esta Norma, expedido por su propio laboratorio o por un laboratorio externo aprobado por la Secretaría.
- F.3. Durante el proceso de producción, con objeto de controlar la calidad del material en la ejecución de la obra, el Contratista de Obra, por cada doscientos (200) metros cúbicos o fracción del material de un mismo tipo, extraído de un corte o un banco, realizará las pruebas necesarias para que aseguren que cumple con el límite líquido y el índice plástico señalados en esta Norma, entregando a la Secretaría los resultados de dichas pruebas. Las pruebas se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-1-01, *Muestreo de Materiales para Terracerías* y mediante el procedimiento de prueba contenido en el Manual M-MMP-1-07, *Límites de Consistencia*. Será motivo de rechazo por parte de la Secretaría, el incumplimiento de cualquiera de los requisitos mencionados en esta Fracción.
- F.4. Además de lo señalado en la Fracción anterior, el Contratista de Obra, por cada quinientos (500) metros cúbicos o fracción del

NORMAS

N CMT 1-03/02

material de un mismo tipo, extraído de un corte o un banco, realizará las pruebas necesarias que aseguren que cumple con todos los valores establecidos en esta Norma, entregando a la Secretaría los resultados de dichas pruebas. Las pruebas se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-1-01, *Muestreo de Materiales para Terracerías* y mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma. Será motivo de rechazo por parte de la Secretaría, el incumplimiento de cualquiera de los requisitos establecidos.

- F.5. Una vez tendidas y compactadas las capas subrasantes, el Contratista de Obra realizará las pruebas necesarias que aseguren el cumplimiento del grado de compactación establecido en esta Norma, en el proyecto o señalado por la Secretaría, en el número y con la periodicidad indicada por los mismos, mediante el procedimiento contenido en el Manual M-MMP-1-10, *Grado de Compactación*, entregando a la Secretaría los resultados de dichas pruebas.
- F.6. En cualquier momento, la Secretaría puede verificar que el material suministrado cumpla con cualquiera de los requisitos de calidad establecidos en esta Norma, siendo motivo de rechazo el incumplimiento de cualquiera de ellos.

LIBRO: **MMP. MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES**

PARTE: **1. SUELOS Y MATERIALES PARA TERRACERÍAS**

TÍTULO: **02. Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos**

A. CONTENIDO

Este Manual describe el procedimiento para clasificar los materiales para terracerías a que se refieren las Normas N·CMT·1·01, *Materiales para Terraplén*, N·CMT·1·02, *Materiales para Subyacente* y N·CMT·1·03, *Materiales para Subrasante*, de acuerdo con pruebas índice realizadas en campo y en laboratorio.

B. OBJETIVO

Clasificar los materiales para terracerías, que pueden ser fragmentos de roca o suelos, mediante pruebas índice, que permiten estimar algunas de las propiedades físicas y mecánicas del material y, con base en éstas, determinar su tipo de acuerdo con un sistema de clasificación de fragmentos de roca y suelos previamente definido.

C. REFERENCIAS

Este Manual se complementa con las siguientes:

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
Materiales para Terraplén	N CMT·1·01
Materiales para Subyacente	N CMT·1·02
Materiales para Subrasante	N·CMT·1·03
Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías	M·MMP·1·06
Límites de Consistencia	M·MMP 1 07

D. CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL DE ACUERDO CON SUS PROPIEDADES ÍNDICE

En esta Cláusula se describe el sistema de clasificación de los fragmentos de roca y de los suelos que se utilicen para terracerías

D.1. CLASIFICACIÓN DE FRAGMENTOS DE ROCA

Los fragmentos de roca son todos aquellos cuyo tamaño está comprendido entre 7,5 cm (3") y 200 cm. Según su tamaño se clasifican como se señala en la Tabla 1 de este Manual.

Los fragmentos de roca se identifican por su tamaño, forma, textura superficial y grado de alteración, utilizando para ello las características que se indican en la Tabla 2 de este Manual

TABLA 1.- Clasificación de los fragmentos de roca

Tipo	Subtipos	Identificación	Símbolo de grupo
Fragmentos de roca (tamaños mayores de 7.5 cm y menores de 2 m)	Grandes (mayores de 75 cm y menores de 2 m)	Fragmentos grandes, con menos del 10% de otros fragmentos o de suelo	Fg
		Fragmentos grandes mezclados con fragmentos medianos, predominando los grandes, con menos del 10% de fragmentos chicos o de suelo	Fgm
		Fragmentos grandes mezclados con fragmentos chicos, predominando los grandes, con menos del 10% de fragmentos medianos o de suelo	Fgc
		Fragmentos grandes mezclados con fragmentos medianos y chicos, predominando los grandes sobre los medianos y éstos sobre los chicos, con menos del 10% de suelo.	Fgmc
		Fragmentos grandes mezclados con fragmentos chicos y medianos, predominando los grandes sobre los chicos y éstos sobre los medianos, con menos del 10% de suelo	Fgcm
	Medianos (mayores de 20 cm y menores de 75 cm)	Fragmentos medianos, con menos del 10% de otros fragmentos o de suelo.	Fm
		Fragmentos medianos mezclados con fragmentos grandes, predominando los medianos sobre los grandes, con menos del 10% de fragmentos chicos o de suelo.	Fmg
		Fragmentos medianos mezclados con fragmentos chicos, predominando los medianos sobre los chicos, con menos del 10% de fragmentos grandes o de suelo	Fmc
		Fragmentos medianos mezclados con fragmentos grandes y chicos, predominando los medianos sobre los grandes y éstos sobre los chicos, con menos del 10% de suelo	Fmgc
		Fragmentos medianos mezclados con fragmentos chicos y grandes, predominando los medianos sobre los chicos y éstos sobre los grandes, con menos del 10% de suelo	Fmcm
	Chicos (mayores de 7.5 cm y menores de 20 cm)	Fragmentos chicos, con menos del 10% de otros fragmentos o de suelo	Fc
		Fragmentos chicos mezclados con fragmentos grandes, predominando los chicos, con menos del 10% de fragmentos medianos o de suelo.	Fcg
		Fragmentos chicos mezclados con fragmentos medianos, predominando los chicos, con menos del 10% de fragmentos grandes o de suelo	Fcm
		Fragmentos chicos mezclados con fragmentos grandes y medianos, predominando los chicos sobre los grandes y éstos sobre los medianos, con menos del 10% de suelo	Fcgm
		Fragmentos chicos mezclados con fragmentos medianos y grandes, predominando los chicos sobre los medianos y éstos sobre los grandes, con menos del 10% de suelo	Fcmg

TABLA 2.- Características de los fragmentos de roca

Forma	Redondeada Subredondeada Angulosa Lajeada Acicular ^[1]
Textura ^[2]	Lisa Rugosa Muy rugosa
Grado de alteración	Sanos Alterados Muy alterados

[1] En forma de aguja

[2] Cuando los fragmentos sean francamente porosos se hará notar también esta característica

D.2. CLASIFICACIÓN DE SUELOS CON BASE EN EL SISTEMA SUCS

Los suelos son materiales con partículas de tamaño menor de 7,5 cm (3") Se clasifican como se indica en la Tabla 3 de este Manual y se explica a continuación, con base en su composición granulométrica determinada mediante los procedimientos indicados en el Manual M-MMP 1 06, *Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías*, y en sus características de plasticidad, representada por los límites de consistencia determinados de acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP-1-07, *Límites de Consistencia*.

Los suelos se clasifican como *suelos gruesos* cuando más del 50% de sus partículas son de tamaño mayor que 0,075 mm (malla N°200) y como *suelos finos* cuando el 50% de sus partículas o más, son de tamaño menor.

D.2.1. Suelos gruesos

D.2.1.1. Los suelos gruesos se clasifican como *grava* cuando más del 50% de las partículas de la fracción gruesa tienen tamaño mayor que 4,75 mm (malla N°4) y como *arena* cuando el 50% de las partículas o más de la fracción gruesa, son de tamaño menor

D.2.1.2. La grava se identifica con el símbolo G (Gravel) y la arena con el símbolo S (Sand). Ambas a la vez se subdividen en ocho subgrupos:

a) Grava o arena bien graduada (GW o SW)

Si el material contiene hasta 5% de finos, cuando se trate de una grava cuyo coeficiente de uniformidad (C_u) es mayor de 4 y su coeficiente de curvatura (C_c) esté entre 1 y 3, determinados como se indica en el Inciso D.4.7 del Manual M-MMP-1 06, *Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías*, se clasifica como *grava bien graduada* y se identifica con el símbolo GW. Cuando se trate de una arena cuyo coeficiente de uniformidad (C_u) es mayor de 6 y su coeficiente de curvatura (C_c) esté entre 1 y 3, se clasifica como *arena bien graduada* y se identifica con el símbolo SW.

b) Grava o arena mal graduada (GP o SP)

Si el material contiene hasta 5% de finos y sus coeficientes de uniformidad y curvatura (C_u y C_c , respectivamente), no cumplen con lo indicado en el Punto anterior, se clasifica como *grava mal graduada* o *arena mal graduada*, según corresponda y se identifica con los símbolos GP o SP, respectivamente.

c) Grava o arena limosa (GM o SM)

Si el material contiene más de 12% de finos y estos son limo de acuerdo con lo indicado en el Párrafo D.2.2.1. de este Manual, se clasifica como *grava limosa* o *arena limosa*, según corresponda y se identifica con los símbolos GM o SM, respectivamente.

d) Grava o arena arcillosa (GC o SC)

Si el material contiene más de 12% de finos y estos son arcilla de acuerdo con lo indicado en el Párrafo D.2.2.2 de este Manual, se clasifica como *grava arcillosa* o *arena arcillosa*, según corresponda y se identifica con los símbolos GC o SC, respectivamente.

TABLA 3.- Clasificación de suelos con base en el SUCS

Tipo	Sub-Tipos	Identificación	Símbolo de Grupo				
Suelos (partículas menores de 7.5 cm)	SUELOS GRUESOS Mas de la mitad del material se retiene en la malla N°200 (0.075 mm)	GRAVA Más de la mitad de la fracción gruesa se retiene en la malla N°4	GRAVA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas)	Grava bien graduada, mezcla de grava y arena con poco o nada de finos. Debe tener un coeficiente de uniformidad (C _u) mayor de 4 y un coeficiente de curvatura (C _c) entre 1 y 3 ^[1]	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	GW	
			GRAVA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	Grava mal graduada, mezcla de grava y arena con poco o nada de finos. No satisface los requisitos de graduación para GW	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	GP	
			ARENA Más de la mitad de la fracción gruesa pasa la malla N°4	ARENA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas)	Arena bien graduada, mezcla de arena y grava con poco o nada de finos. Debe tener un coeficiente de uniformidad (C _u) mayor de 6 y un coeficiente de curvatura (C _c) entre 1 y 3 ^[1]	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	SW
				ARENA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	Arena mal graduada, mezcla de arena y grava con poco o nada de finos. No satisface los requisitos de graduación para SW	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	SP
		SUELOS FINOS Mas de la mitad del material pasa la malla N°200 (0.075 mm)	LIMO Y ARCILLA Límite líquido	Menor de 50%	Limo de baja compresibilidad, mezcla de limo de baja plasticidad, arena y grava, polvo de roca. Se localiza dentro de la zona I de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual	ML	
					Arcilla de baja compresibilidad, mezcla de arcilla de baja plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona II de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual	CL	
					Limo orgánico de baja compresibilidad, mezcla de limo orgánico de baja plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona I de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual	OL	
				Mayor de 50%	Limo de alta compresibilidad; mezcla de limo de alta plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona III de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual	MH	
	Arcilla de alta compresibilidad, mezcla de arcilla de alta plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona IV de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual				CH		
	Limo orgánico de alta compresibilidad, mezcla de limo orgánico de alta compresibilidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona III de la Carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual				OH		
	ALTAMENTE ORGANICOS	Turba, fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa	P _i				

[1] Los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c), que se utilizan para determinar la graduación de los suelos (GW, GP, SW y SP) están dados por las siguientes expresiones

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}, C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Donde D₁₀, D₃₀ y D₆₀ son los tamaño de las partículas para el cual el 10, 30 y 60% en masa del material es menor que esos tamaños, respectivamente, determinados graficamente de la curva granulométrica como se indica en el Manual M MMP 1 06, *Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías*

e) Grava o arena bien graduada limosa (GW-GM o SW-SM)

Si el material contiene entre 5 y 12% de finos y estos son limo de acuerdo con lo indicado en el Párrafo D.2.2.1. de este Manual, cuando se trate de una grava bien graduada, se clasifica como *grava bien graduada limosa* y se identifica con el símbolo GW-GM. Cuando se trate de una arena bien graduada, se clasifica como *arena bien graduada limosa* y se identifica con el símbolo SW-SM

f) Grava o arena mal graduada limosa (GP-GM o SP-SM)

Si la grava o la arena son mal graduadas, contienen entre 5 y 12% de finos y estos son limo de acuerdo con lo indicado en el Párrafo D.2.2.1. de este Manual, se clasifican como *grava mal graduada limosa* o *arena mal graduada limosa*, según corresponda y se identifican con los símbolos GP-GM o SP-SM, respectivamente.

g) Grava o arena bien graduada arcillosa (GW-GC o SW-SC)

Si la grava o la arena son bien graduadas, contienen entre 5 y 12% de finos y estos son arcilla de acuerdo con lo indicado en el Párrafo D.2.2.2. de este Manual, se clasifican como *grava bien graduada arcillosa* o *arena bien graduada arcillosa*, según corresponda y se identifican con los símbolos GW-GC o SW-SC, respectivamente.

h) Grava o arena mal graduada arcillosa (GP-GC o SP-SC)

Si la grava o la arena son mal graduadas, contienen entre 5 y 12% de finos y estos son arcilla de acuerdo con lo indicado en el Párrafo D.2.2.2. de este Manual, se clasifican como *grava mal graduada arcillosa* o *arena mal graduada arcillosa*, según corresponda y se identifican con los símbolos GP-GC o SP-SC, respectivamente

D.2.2. Suelos finos

Los suelos finos se clasifican según sus características de plasticidad, en.

D.2.2.1. Limo (M)

El suelo fino se clasifica como *limo* cuando su límite líquido (w_L) y su índice plástico (I_p), determinados como se indica en el Manual M-MMP-1-07, *Límites de Consistencia*, definen un punto ubicado en las zonas I o III de la Carta de plasticidad que se muestra en la Figura 1 de este Manual y se identifica con el símbolo M (del sueco *mo* y *mjala*). Si dicho punto se aloja en la zona I, el material se clasifica como *limo de baja compresibilidad* y se identifica con el símbolo ML, si se ubica en la zona III, se clasifica como *limo de alta compresibilidad* y se identifica con el símbolo MH.

Si el material contiene una cantidad apreciable de materia orgánica y el punto definido por su límite líquido (w_L) y su índice plástico (I_p) se ubica cercano y por debajo de la línea A de la Carta de plasticidad, se clasifica como *limo orgánico de baja compresibilidad* si su límite líquido (w_L) es menor de 50% y se identifica con el símbolo OL, o como *limo orgánico de alta compresibilidad* si su límite líquido (w_L) es mayor y se identifica con el símbolo OH.

D.2.2.2. Arcilla (C)

El suelo fino se clasifica como *arcilla* cuando su límite líquido (w_L) y su índice plástico (I_p), determinados como se indica en el Manual M-MMP-1-07, *Límites de Consistencia*, definen un punto ubicado en las zonas II o IV de la Carta de plasticidad que se muestra en la Figura 1 de este Manual y se identifica con el símbolo C (Clay) Si dicho

punto se aloja en la zona II, el material se clasifica como *arcilla de baja compresibilidad* y se identifica con el símbolo CL, si se ubica en la zona IV, se clasifica como *arcilla de alta compresibilidad* y se identifica con el símbolo CH.

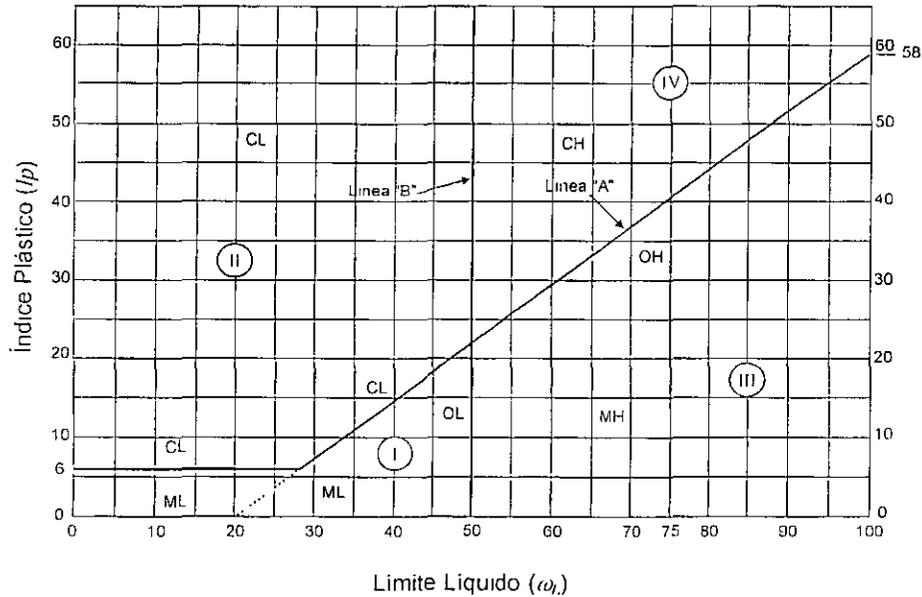


FIGURA 1 - Carta de plasticidad

D.2.2.3. Altamente orgánicos (P_t)

El suelo fino se clasifica como *altamente orgánico* cuando se identifica por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa; se le denomina *turba* y se identifica con el símbolo P_t .

D.3. CLASIFICACIÓN DE CAMPO

La clasificación de los fragmento de roca y de los suelos en campo se realiza en forma visual, por lo que se requiere experiencia para clasificar los diferentes materiales. La experiencia se obtiene mediante la enseñanza de quien ya la tiene y comparando las clasificaciones hechas en campo con las obtenidas en el laboratorio. Para la clasificación de campo se utiliza el formato que se muestra en la Tabla 4 de este Manual y se procede como sigue:

D.3.1. Clasificación de campo de fragmentos de roca

Se estiman los porcentajes de tamaños de los fragmentos de roca, tomando en cuenta la dimensión mayor de los fragmentos, de la siguiente manera:

- D.3.1.1. Según su tamaño los fragmentos se agrupan como se indica en la Tabla 5.
- D.3.1.2. Se determinan en forma aproximada los porcentajes, en volumen, de cada uno de los grupos indicados en el Párrafo anterior con relación al volumen total y con ellos se clasifican los fragmentos de acuerdo con lo indicado en la Tabla 1 de este Manual.
- D.3.1.3. Se estima en los fragmentos de los diferentes grupos, la forma, textura de la superficie y grado de alteración, utilizando para describirlos los adjetivos indicados en la Tabla 2 de este Manual.

TABLA 4.- Reporte de clasificación de campo

CLASIFICACIÓN DE CAMPO DE FRAGMENTOS DE ROCA Y SUELOS	
Obra: _____	Fecha: _____
Localización: _____	Laboratorista: _____
Muestra: _____	Fragmentos de roca (v_r): _____ (% volumen)
Sondeo: _____ Profundidad: _____	Suelos (v_s): _____ (% volumen)

FRAGMENTOS DE ROCA

Características	T a m a ñ o s		
	Chicos (de 7,5 a 20 cm)	Medianos (de 20 a 75 cm)	Grandes (de 75 a 200 m)
Porcentaje (en volumen)			
Forma (Redondeada, subredondeada, angulosa, lajeada, acicular)			
Textura superficial (lisa, rugosa, muy rugosa)			
Grado de alteración (sano, alterado o muy alterado)			
Clasificación petrográfica: _____			
Clasificación de los fragmentos: _____ (con base en la Tabla 1 de este Manual)			

S U E L O S

Tamaño máximo: _____ (mm)	Dilatancia (rápida, lenta o nula). _____
Grava _____ (% en masa)	Tenacidad (alta, media o nula) _____
Arena: _____ (% en masa)	Resistencia en el estado seco (alta, media o nula). _____
Finos: _____ (% en masa)	Color: _____
	Olor: _____
	Clasificación de finos _____
Clasificación del suelo: _____ (con base en la Tabla 6 de este Manual)	

Clasificación del material: _____

- Los porcentajes en volumen de los diferentes fragmentos de roca que contenga un material, se determinara en forma estimativa

TABLA 5.- Tamaño de los fragmentos de roca

Designación	Grupo de tamaños (mayor dimensión de la partícula) cm
Chico	de 7,5 a 20
Mediano	de 20 a 75
Grande	de 75 a 200

D.3.2. Clasificación de campo de suelos

La clasificación de los suelos en campo, se hace considerando su granulometría, plasticidad, color y olor, como sigue

D.3.2.1. Granulometría

Se extiende una muestra seca del material con tamaño menor de 7,5 cm, sobre una superficie plana con el propósito de estimar, en forma aproximada, los porcentajes de los tamaños de las partículas, forma y composición mineralógica. Para distinguir la grava de la arena se usa el tamaño de 5 mm como equivalente a la malla N°4 y para los finos basta considerar que las partículas del tamaño correspondiente a la malla N°200 son aproximadamente las más pequeñas que pueden distinguirse a simple vista. Para esto se procede como sigue:

- a) Se determina el tamaño de la partícula mayor, que se considera como tamaño máximo.
- b) Según su tamaño las partículas de material se agrupan en.
 - Partículas mayores de 5 mm (grava)
 - Partículas comprendidas entre las de menor tamaño que pueda observarse a simple vista y 5 mm (arena)
 - Partículas del menor tamaño que se pueda observar a simple vista (finos)
- c) Se determinan en forma aproximada los porcentajes de cada uno de los grupos mencionados en el Punto anterior con relación al volumen total y con ellos se clasifica el suelo como grava, arena, fino o sus mezclas, de acuerdo con el criterio indicado en la Tabla 6 de este Manual
- d) Cuando se aprecia que las partículas de menor tamaño del que puede observarse a simple vista constituyen menos del 12% del volumen total, se estima la graduación del material, como *bien graduada* cuando se observe una amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios, y como *mal graduada* cuando se observe la predominancia de un tamaño o de un rango de tamaños, faltando algunos intermedios.
- e) Cuando se aprecia que las partículas de menor tamaño que pueden observarse a simple vista constituyen más del 5% del volumen total, para identificar el grupo fino del material, se toma la fracción del material que pasa la malla N°40 (0,425 mm), si no se dispone de esta malla, el cribado puede sustituirse por una separación manual equivalente y se procede como se indica en los Párrafos D.3.2.2 a D.3.2.6

D.3.2.2. Dilatancia

- a) De la fracción que pasa la malla N°40 se toma una porción de aproximadamente 10 cm³ y se deposita en la mano donde se le agrega agua en cantidad tal que, al amasarla se obtenga una mezcla de consistencia suave que no presente flujo. Si al efectuar esta operación se excede la cantidad de agua agregada, la mezcla se extiende en la mano y se forma con ella una capa delgada que permita la pérdida por evaporación del exceso de agua.
- b) Una vez que la mezcla ha obtenido la consistencia deseada, se forma con ella una pastilla como la que se muestra en la Figura 2 de este Manual.

TABLA 6.- Clasificación aproximada de suelos en el campo

Tipo de suelo				Símbolo de grupo [1]	Denominación común	
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS [2] Más de la mitad del material es de tamaño mayor que el mínimo que se puede observar a simple vista	GRAVA Más de la mitad de la fracción gruesa es mayor de 5 mm (malla N°4) [3]	Menos del 5% respecto al total son partículas del tamaño mínimo que se puede observar a simple vista	Amplio rango en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios.	GW	Grava bien graduada, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos	
			Predominio de un tamaño o un rango de tamaños con ausencia de algunos tamaños intermedios	GP	Grava mal graduada, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos.	
	Más del 12% respecto al total son partículas del tamaño mínimo que se puede observar a simple vista	Fracción fina no plástica (para identificación véase grupo ML, abajo)	GM	Grava limosa, mezclas de grava, arena y limo, mal graduadas		
		Fracción fina plástica (para identificación véase grupo CL, abajo)	GC	Grava arcillosa, mezclas de grava, arena y arcilla, mal graduadas		
	ARENA Más de la mitad de la fracción gruesa es menor de 5 mm (malla N°4) [3]	Menos del 5% respecto al total son partículas del tamaño mínimo que se puede observar a simple vista	Amplio rango de los tamaños de partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	SW	Arena bien graduada, arena con grava y poco o nada de finos	
			Predominio de un tamaño o un rango de tamaños con ausencia de algunos tamaños intermedios	SP	Arena mal graduada, arena con grava y poco o nada de finos.	
Más del 12% respecto al total son partículas del tamaño mínimo que se puede observar a simple vista		Fracción fina no plástica (para identificación véase grupo ML, abajo)	SM	Arena limosa, mezclas de arena, grava y limo		
		Fracción fina plástica (para identificación véase grupo CL, abajo)	SC	Arena arcillosa, mezclas de arena, grava y arcilla		
SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material son partículas menores que el tamaño mínimo que se puede observar a simple vista [4]	Identificación de la fracción que pasa la malla N°40 (0,425 mm)					
	LIMO Y ARCILLA	Dilatancia	Tenacidad	Resistencia en estado seco		
		Rápida	Nula	Nula	ML	Limo y arena muy fina, polvo de roca, arena fina limosa
		Lenta	media	nula	MH	Limo de alta compresibilidad, limo micáceo o diatomáceo
		Lenta a nula	Media	Media	CL	Arcilla de baja o mediana compresibilidad, arcilla con grava, arcilla arenosa
		Nula	Alta	Alta	CH	Arcilla de alta compresibilidad
		Rápida	Media	Media	OL	Limo orgánico de baja compresibilidad
		Rápida a lenta	Media	Media	OH	Limo orgánico de alta compresibilidad
Suelos altamente orgánicos	Facilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa			Pt	Turba.	

[1] Tratándose de suelos con partículas gruesas, en que el por ciento en masa que pasa la malla N°200 queda comprendido entre 5 y 12%, son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles, como por ejemplo *GW-GP* que corresponde a una mezcla de grava y arena bien graduada con arcillosa, o *SW-SM* que corresponde a una arena bien graduada limosa

[2] Las cantidades y porcentajes que se manejan son en volumen

[3] Puede considerarse 5 mm como equivalente a la abertura de la malla N°4

[4] Se estima que las partículas más pequeñas apreciables a simple vista corresponden al tamaño de 0,075 mm (malla N°200)

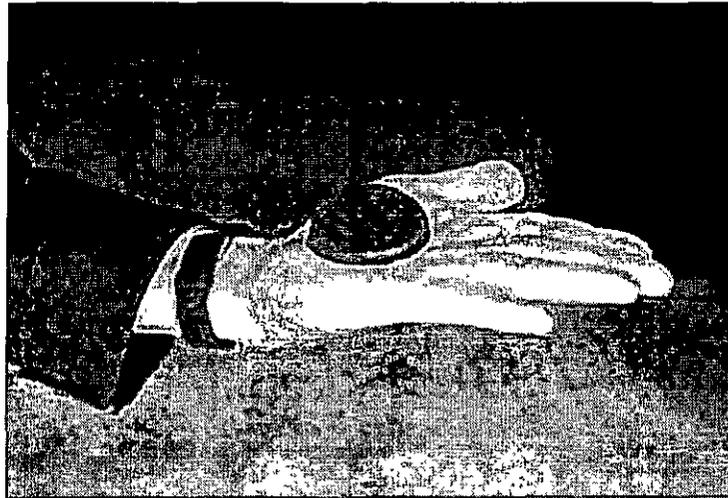


FIGURA 2.- Formación de la pastilla de prueba para determinar la dilatancia

- c) Con la palma de la mano ligeramente contraída se sujeta suavemente la pastilla y se sacude en dirección horizontal, golpeando varias veces y en forma vigorosa la mano que la contiene contra la otra mano, a fin de provocar la salida del agua a la superficie, lo cual queda de manifiesto cuando dicha superficie toma una apariencia lustrosa. Al ocurrir esto, se presiona ligeramente la pastilla con los dedos para provocar que el agua desaparezca de la superficie y ésta pierda su lustre
- d) Se estima la rapidez con que la superficie de la pastilla toma la apariencia lustrosa al golpear, así como la rapidez con que desaparece ese lustre al presionarla. Se reporta la dilatancia como:
- Rápida
 - Lenta
 - Nula

Una dilatancia rápida es típica de arena fina y de arena limosa (SM) no plástica, así como de algunos limos inorgánicos (ML). Una dilatancia extremadamente lenta o nula es típica de la arcilla (CL o CH).

D.3.2.3. Tenacidad

- a) De la pastilla a que se refiere el Punto b) del Párrafo anterior, se toma una porción y se rola con la mano hasta formar un pequeño rollo de aproximadamente 3 mm de diámetro. Se reamasas el material y se forma nuevamente el rollo, repitiéndose esta operación varias veces para que el material pierda el exceso de agua y el rollo se fragmente, lo que indica que el suelo ha alcanzado un contenido de agua similar al del límite plástico (w_p).
- b) Se estima el tiempo necesario para que el material alcance el contenido de agua correspondiente al límite plástico, así como la resistencia que opone a ser comprimido el rollo. La tenacidad se reporta como:
- Nula (Tiempo corto y resistencia muy pequeña)
 - Media (tiempo medio y resistencia media)

- Alta (Tiempo largo y resistencia alta)

Una tenacidad alta es típica de la arcilla (CL o CH), mientras mas alta sea la tenacidad, el material será más compresible. Una tenacidad media o nula es típica de limo y limo orgánico

D.3.2.4. Resistencia en estado seco

- a) De la fracción que pasa la malla N°40 se toma una porción de material, y se forma una pastilla de aproximadamente 4 cm de diámetro y 1 cm de espesor, como se muestra en la Figura 3 de este Manual
- b) La pastilla se coloca en un medio adecuado para que pierda lentamente su contenido de agua, hasta que se aprecie visiblemente seca; posteriormente se rompe y se desmorona con los dedos. Si al romper la pastilla se observa que aun contiene agua, se continúa con el secado del material y posteriormente se rompen y desmoronan las fracciones
- c) Se estima la dificultad que presenta la pastilla a romperse y desmoronarse; de acuerdo con lo anterior se reporta la resistencia en estado seco como:
 - Nula
 - Media
 - Alta

Una alta resistencia en estado seco es característica de una arcilla de alta compresibilidad (CH). Una resistencia en estado seco nula es típica de un limo (ML o MH)

D.3.2.5. Color

El color del suelo suele ser un dato útil para diferenciar los distintos estratos y para identificar tipos de suelo, cuando se posee experiencia. Existen algunos criterios relativos al color, por ejemplo, el color oscuro suele ser indicativo de la presencia de materia orgánica o de su naturaleza básica (ferromagnesianos), y los colores claros y brillantes son más bien propios de suelos ácidos (silices).

D.3.2.6. Olor

Los suelos orgánicos (OL y OH) tienen por lo general un olor distintivo, que puede usarse para su identificación. El olor es particularmente intenso si el suelo esta húmedo y disminuye con la exposición al aire, aumentando, por lo contrario, con el calentamiento de la muestra húmeda. Los suelos altamente orgánicos (Turba) prenden estando secos.

D.3.3. Clasificación de campo de mezclas de fragmentos de roca y suelos

- D.3.3.1. Con toda la información obtenida como se indica en las Fracciones D.3.1 y D.3.2., y anotada en el formato que se muestra en la Tabla 4, se procede a clasificar el material en su conjunto, conforme a los criterios contenidos en las Tablas 1 y 6 de este Manual.

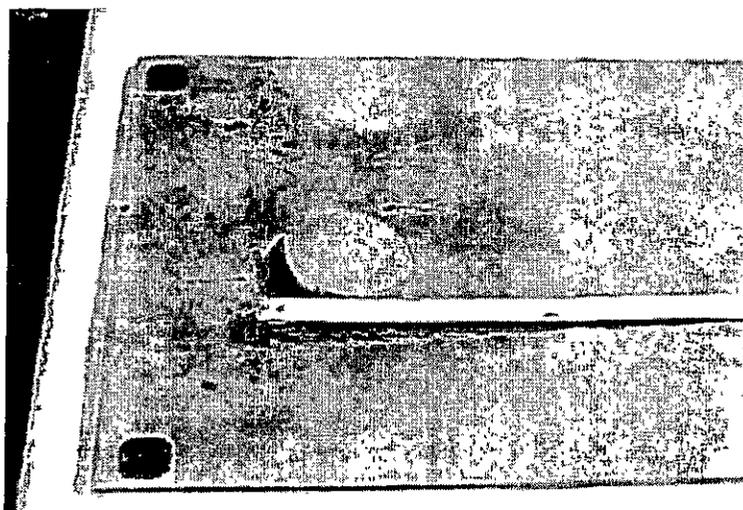


FIGURA 3 - Formación de la pastilla de prueba para determinar la resistencia en estado seco

D.3.3.2. Cuando se trate de materiales constituidos por mezclas de fragmentos de roca y suelo, una vez que se han clasificado individualmente como se indica en el Párrafo anterior de este Manual, se clasifican dichos materiales combinando los símbolos que corresponden a las porciones que los integran de acuerdo con lo que se indica a continuación:

- Cuando los fragmentos de roca contengan más del 10% de suelo, el material se clasificará con símbolo doble.
- Si el volumen de suelo es mayor del 50%, el símbolo de éste se antepondrá al de los fragmentos de roca, si el volumen de suelo está comprendido entre 10 y 50 %, su símbolo se colocará enseguida del símbolo de los fragmentos de roca, como se ejemplifica a continuación:

Ejemplo 1	Ejemplo 2
Un material contiene:	Un material contiene:
60% de GC	40% de Fm
40% de Fgm	30% de SM
	20% de Fc
	10% de Fg
Su símbolo sera.	Su símbolo será.
GC-Fgm	Fmcg-SM

E. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES SEGÚN LA POSIBILIDAD DE SER CONTROLADOS MEDIANTE PRUEBAS DE COMPACTACIÓN DE LABORATORIO

Para fines de la formación de terraplenes, los materiales que se empleen en la construcción de los mismos se clasificarán como:

- Compactables.- Son los materiales susceptibles de controlar su compactación con equipo de laboratorio, tales como los fragmentos de roca muy alterados que se disgreguen, areniscas blandas y suelos a que se refieren las Tablas 3 y 6 de este Manual, siempre y cuando, después de compactados, contengan como máximo el 20% de fragmentos de roca chicos, con respecto al volumen total y de esta fracción sólo el 5% sean mayores de 15 cm.
- No compactables.- Son aquellos materiales que no cumplan con las condiciones anteriores

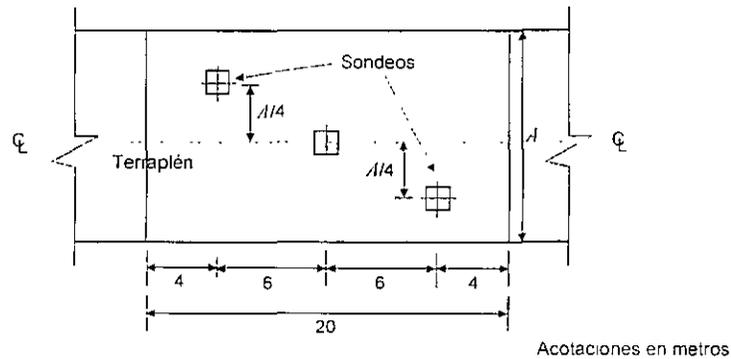
En caso de duda, para saber si un material es compactable, se someterá a la prueba que se describe a continuación:

E.1. EQUIPO

Tractor de orugas con peso de 20 ton en condiciones de operación.

E.2. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

- E.2.1. Se tiende una capa, del espesor que permita el tamaño máximo del material pero no menor de 30 cm, en todo el ancho del terraplén y en 20 m de longitud.
- E.2.2. Se rega agua sobre la capa, en cantidad aproximada a 100 L/m³ de material
- E.2.3. Se somete la capa regada con agua al tránsito del tractor, pasando 3 veces por cada punto de la superficie.
- E.2.4. Se excavan 3 pozos a cielo abierto en los 20 cm superiores de la capa, con un volumen aproximado de 0,5 m³, cada uno, ubicados como se muestra en la Figura 4 de este Manual, y se extiende el material sobre la superficie para estimar el porcentaje de fragmentos de roca.
- E.2.5. Si el material producto de cada pozo contiene como máximo 20% en volumen, de material retenido en la malla de 75 mm (3") y de esta fracción los fragmentos son chicos y menos del 5% quedan comprendidos entre 15 y 20 cm, el material es compactable
- E.2.6. Para los cálculos anteriores se toma el promedio de los resultados obtenidos en los 3 pozos efectuados



Donde

A = Ancho del terraplén en el sitio de prueba

FIGURA 4 - Distribución de sondeos

E.3. PRECAUCIONES PARA EVITAR ERRORES

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observarán las siguientes precauciones:

- E.3.1. Que el espesor de la capa de prueba no sea menor de 30 cm, en todo el ancho del terraplén.
- E.3.2. Que se agregue la cantidad de agua uniformemente sobre el material para alcanzar su homogeneidad.
- E.3.3. Que el paso del tractor sea uniforme en toda la superficie para cada una de las 3 pasadas, moviéndose el tractor transversalmente al eje del camino.

Usualmente las alcantarillas se construyen antes de iniciar la construcción de las terracerías, de manera de no alterar, ni tan siquiera temporalmente, el drenaje superficial de la zona. Sin embargo, en el caso de alcantarillas bajo terraplenes en suelos blandos, es conveniente postergar la construcción de las alcantarillas para varios meses después de la construcción de los propios terraplenes, cuando los mayores hundimientos previstos hayan ocurrido.

XI-14 ESTUDIOS GEOTECNICOS PARA VIAS TERRESTRES (Ref. 17)

Bajo este nombre específico se comprenden en la metodología mexicana del proyecto y la construcción de las vías terrestres, todo el conjunto de estudios de campo y laboratorio, recorridos e inspecciones, análisis y cálculos que conducen al conjunto de recomendaciones y conclusiones necesarias para establecer las normas geotécnicas a que han de ceñirse los proyectos y los procedimientos de construcción de tales vías terrestres.

El estudio geotécnico deberá poner a disposición del grupo encargado del proyecto, toda la información relevante sobre el terreno de cimentación, tipos de materiales a emplear y el partido conveniente que puede obtenerse de los disponibles, señalando su probable comportamiento futuro y los tratamientos que se requerirán en todos los suelos y rocas por usar, así como los procedimientos de construcción idóneos a utilizar.

Ya se ha insistido en otras partes en el carácter necesariamente simple y estadístico que han de tener las exploraciones, muestreos y pruebas que se hagan para fundamentar un estudio geotécnico. Esta es una condición que impone la vía terrestre (quizá con excepción de la aeropista) como obra civil, que deberá tenerse siempre en mente y que establece el estilo y alcances del estudio.

La información geotécnica deberá presentarse en forma sencilla, clara y sistematizada, traduciendo las características de las formaciones existentes en el campo y todos los datos pertinentes, a valores numéricos y recomendaciones escuetas, que puedan ser tomadas en cuenta por los restantes miembros del grupo de proyecto con seguridad y correcta comprensión, aún no siendo especialistas en las disciplinas geotécnicas.

En la ejecución de un estudio geotécnico pueden distinguirse dos etapas. La primera comprende reconocimientos, exploración, levantamiento de datos y las pruebas de laboratorio. En la segunda etapa se recopila la información disponible, se analiza, se producen recomendaciones detalladas y concretas y se redacta el informe correspondiente.

A. Reconocimientos. Zonificación fisiográfica y litológica

Para facilitar y ordenar los trabajos de campo con-

viene dividir la zona en que se construirá la futura vía terrestre en zonas de características similares, lo cual se hace a base de la fisiografía, tomando en cuenta características morfológicas. Los aspectos litológicos y de suelos permiten después hacer una división en subzonas. Cada una de esas subzonas deberá ser descrita con detalle y, puesto que presentarán características más o menos homogéneas, participarán de la misma clasificación y recomendaciones.

La descripción de cada subzona deberá hacerse verticalmente, clasificando cada una de las capas o estratos que la compongan, para lo que, por lo general, será necesario efectuar sondeos, tomar muestras, efectuar pruebas manuales en el campo y algunas pruebas de laboratorio, sobre todo en el caso de suelos. En el caso de rocas, será necesario estudiar los afloramientos, establecer su clasificación macroscópica y su estructura.

Para la primera zonificación ha de efectuarse un recorrido por la línea, llenando el cuestionario que figura como Anexo XI-a al final de este capítulo; deberá presentarse un cuestionario para cada una de las zonas delimitadas. En este primer caso, entrarán en juego los conocimientos geológicos del ingeniero que efectúe el estudio, siendo de la máxima utilidad contar con un plano fotogeológico de la región; en la práctica mexicana suele estimarse conveniente contar con el concurso de un ingeniero geólogo en este momento del estudio.

En el Anexo XI-a, el tipo de terreno se clasifica de acuerdo con la magnitud de los movimientos de tierra que será preciso efectuar para alojar a la vía terrestre; es decir, la clasificación se basa en las características topográficas del área.

En general, los cambios en la morfología corresponden a cambios en los materiales constituyentes. Una unidad morfológica podrá estar formada por diferentes materiales o por un mismo tipo con diferentes características estructurales. En el punto II del Anexo XI-a podrá detallarse este aspecto, llegando a establecer una serie de subdivisiones de la zona en estudio, de acuerdo con las características litológicas; dentro de las observaciones se incluirán el grado de fracturamiento, el de alteración y toda la información afín pertinente.

En el punto III del Anexo XI-a interesa establecer en forma especial el origen de los suelos y, si es posible, el tipo de acumulaciones que forman (aluvial, abanico aluvial, terraza fluvial, pantano, marisma, depósito lacustre, depósito de talud, etc.).

Al final del Anexo XI-a aparece una lista indicativa, pero no limitativa, de los principales problemas geotécnicos que es posible encontrar a lo largo de una zona en estudio; la detección de estos problemas es muy importante desde el punto de vista de análisis de alternativas de trazo, que es una etapa que surge siempre en el proyecto de una vía terrestre, además de que, en la etapa de estudios para el proyecto final, cada uno de estos problemas ha de con-

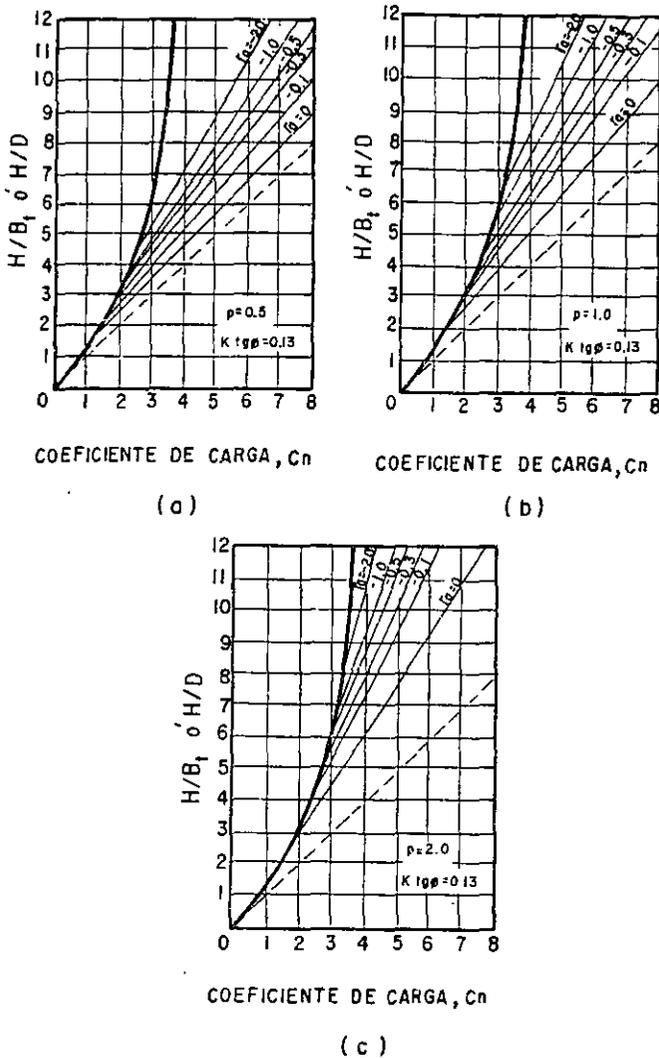


Figura XI-24. Valores del coeficiente de carga C_n .

B-2. Estudio de cargas vivas

Como ya se ha indicado, las alcantarillas soportan también cargas vivas que provienen del tráfico carretero, ferrocarrilero o aéreo que circula sobre ellas, según sea el caso. Los efectos de la carga viva dependen mucho del espesor del colchón de tierra que haya sobre el tubo, siendo naturalmente menores cuanto mayor sea aquél.

Todas las experiencias realizadas al presente, tanto en tubos en zanja como colocados sobre el terreno natural bajo un terraplén, indican que una carga superficial estática tal como la producida por una rueda inmóvil, transmite efectos al interior del terraplén que se pueden valuar con una aproximación aceptable si se utiliza la teoría de Boussinesq, para un medio linealmente elástico, semi-infinito, homogéneo e isótropo. Las cargas que se aplican a las alcantarillas son, sin embargo, debidas a vehículos en movimiento; este importante hecho se suele tomar en cuenta en las fórmulas que se usan para calcular carga viva, introduciendo en ellas un factor mayor que la unidad denominada factor de impacto, con

el que se trata de representar el efecto del movimiento. Para alcantarillas bajo terraplenes de carreteras y aeropistas, Holl (Ref. 15) propone la siguiente expresión para el cálculo de cargas vivas sobre tubos rígidos.

$$W_v = \frac{1}{L} w_0 F_i P \quad (11-13)$$

donde:

W_v = carga viva promedio actuante sobre el tubo por unidad de longitud del mismo.

L = longitud de una sección longitudinal del tubo, si éste se construye en tramos de un metro o menores. Si el tubo se construye en secciones de longitud mayor o es un tubo continuo deberá tomarse L precisamente igual a 1 m (longitud efectiva).

w_0 = factor de influencia de la carga superficial.

F_i = factor de impacto, usualmente comprendido entre 1.5 y 2.

P = carga de rueda, considerada como una carga concentrada.

El factor de influencia de la carga superficial, w_0 , depende de la longitud efectiva, L , del diámetro D (o ancho en el caso de una alcantarilla de losa o de un cajón) de la estructura, de la profundidad a que se encuentre la clave del tubo bajo la superficie del terraplén, H , y de la posición de la carga de la rueda con respecto al área en planta, del tubo proyectado sobre un plano horizontal tangente por la clave. Si se introducen los parámetros:

$$m = \frac{L}{H} \text{ y } n = \frac{D}{H}$$

donde m y n son intercambiables, el factor de influencia w_0 puede calcularse con la gráfica de Fadum correspondiente a carga uniformemente distribuida en un área rectangular (Ref. 16). Aquella gráfica da el factor de influencia para un punto localizado en la vertical trazada por una esquina del área rectangular. Similarmente, para este caso la gráfica se aplica cuando la carga de rueda, P , se encuentra sobre una esquina del área del tubo en que se quiere calcular la carga por unidad de longitud (esta área es, como se dijo, la proyección del tubo en el plano horizontal tangente a su clave). Es curioso hacer notar que aunque ahora la aplicación de la curva de Fadum se hace aparentemente a un caso muy diferente, los valores de los factores de influencia conservan su validez, según hizo notar Holl (Ref. 15); si la carga de rueda queda sobre el centro del área rectangular (posición en que, por cierto, la influencia de la carga es máxima), el factor w_0 se obtendrá multiplicando por cuatro el valor obtenido considerando una de las cuatro partes iguales en que puede dividirse el área rectangular, para la cual la carga de rueda quedará ya en esquina.

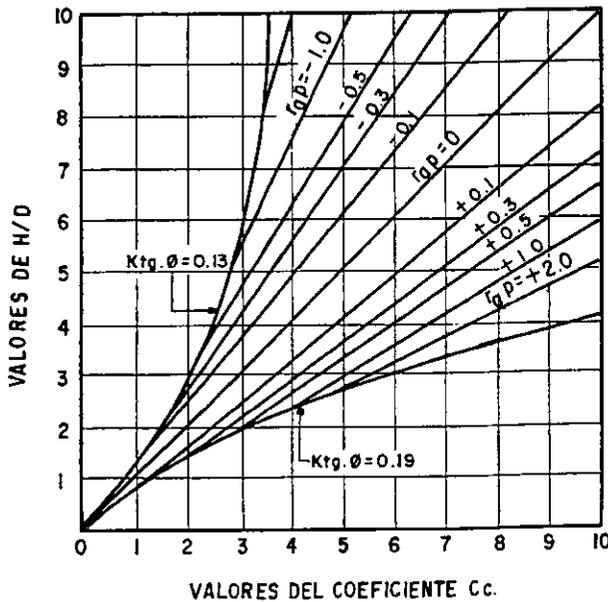


Figura XI-22. Valores de C_c .

más en la clave del tubo que a los lados de él. En este caso el valor de C_c depende del de $K \tan \phi$ (expresiones 11-8 y 11-9) y crece al decrecer el valor de este producto, por lo que es conservador calcularlo con un valor mínimo, aunque realista de $K \tan \phi$; en la gráfica, las curvas con r_a negativa se refieren a $K \tan \phi = 0.13$ que corresponde a un terraplén de arcilla. Las curvas correspondientes a r_a negativo parten de otra (trazo más grueso) que es la representación gráfica de la ecuación 11-8, de tal manera que la intersección de las líneas da el valor de H_e correspondiente a cada valor de $r_a p$ a partir de su ordenada. Cuando r_a es positivo, el producto $r_a p$ también lo es; diferentes valores de este producto generan las líneas a la derecha de la que se trazó a 45° para $r_a p = 0$. En este caso, el valor de C_c crece con $K \tan \phi$, por lo que ahora lo conservador es calcular las líneas con un valor alto y realista del producto; en la Fig. XI-22 el valor usado fue $K \tan \phi = 0.19$, que corresponde a suelos granulares sin finos. También

estas curvas parten de otra que representa la ecuación 11-8 para r_a positiva; nuevamente puede estimarse H_e a partir de las ordenadas de los puntos de partida.

En la práctica se tiene el inconveniente de que para aplicar las ideas y gráficas anteriores no se puede valorar a priori la relación de asentamiento r_a con que vaya a trabajar el tubo en proyecto. El inconveniente se supera partiendo de un valor de r_a supuesto con base en el comportamiento de alcantarillas construidas. La tabla XI-4 da valores recomendados por la experiencia para la relación en estudio (Ref. 15).

TABLA XI-4

Valores de r_a para proyecto (Ref. 15)

Condiciones prevalecientes	r_a
Tubo rígido sobre roca o suelo no cedente	+1.0
Tubo rígido sobre suelo, compresible	0 a +0.5
Tubo rígido sobre suelo común	+0.5 a +0.8

En el caso de alcantarillas en zanja, pero con terraplén suprayacente (Fig. XI-18.c), la carga muerta por metro de tubo puede estimarse con la expresión 11-11 que se muestra a continuación referida a la Fig. XI-23.

$$W_m = C_n \gamma_m B_t^2 \quad (11-11)$$

donde B_t es el ancho de la zanja y C_n es un coeficiente de carga que se obtiene de las gráficas de la Fig. XI-24.

En estas gráficas se usan respectivamente valores de la relación de proyección p (ver Fig. XI-23) de 0.5, 1.0 y 2.0. Para valores intermedios de p puede hacerse una interpolación lineal de los valores de C_n obtenidos. El significado de las distintas curvas que se muestran en las gráficas es similar al discutido para alcantarillas bajo terraplén, antes vistas. Se usó para cálculo un valor $K \tan \phi = 0.13$, lo que es conservador.

La experiencia proporciona pocos datos para fijar la relación de asentamiento a usar en el proyecto, estimándose que valores comprendidos entre -0.3 y -0.5 son adecuados para el caso.

Para el caso de alcantarillas colocadas en trinchera imperfecta (Fig. XI-18.d), la fórmula a aplicar es esencialmente la 11-11, substituyendo únicamente B_t por D , que es el ancho de la trinchera excavada. Así, para este caso la expresión sería:

$$W_m = C_n \gamma_m D^2 \quad (11-12)$$

donde C_n se obtiene también de las gráficas de la Fig. XI-24, pero usando la relación H/D en lugar de H/B_t . El valor de p es igual a la profundidad de la trinchera excavada, entre D .

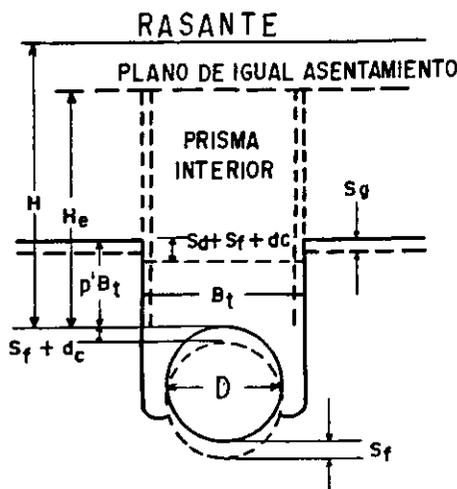


Figura XI-23. Trinchera en zanja bajo un terraplén.

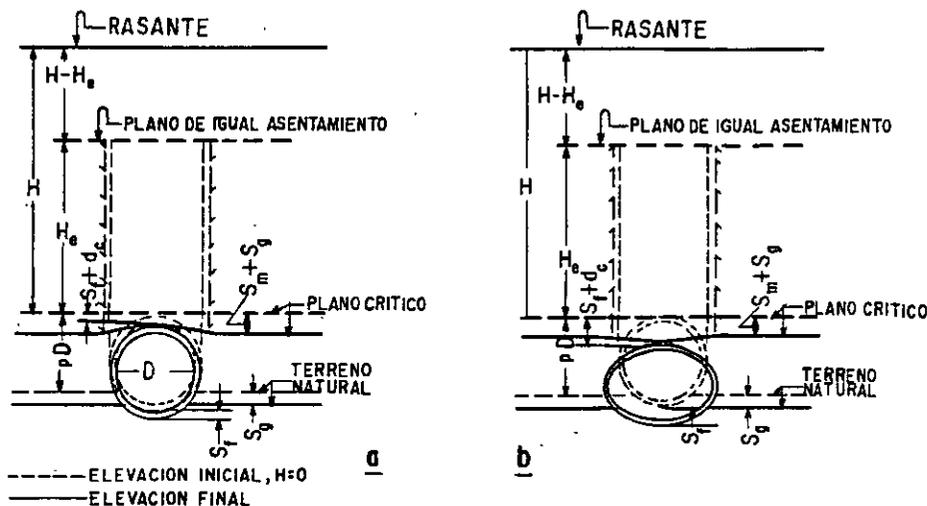


Figura XI-21. Tubos en terraplén.

ción, p , como el cociente entre el espesor del terraplén entre el terreno natural y el plano crítico y el ancho del tubo de concreto, D . Así el espesor del terraplén a los lados del tubo queda expresado por pD .

En terraplenes altos el efecto de arqueado sobre el tubo no abarca toda la altura, sino que tiende a disiparse según la elevación crece respecto al tubo, pudiendo definirse una altura, H_e en que estos efectos ya no son perceptibles. El plano horizontal que está a una altura H_e sobre el tubo se llama de igual asentamiento, pues se mueve ya lo mismo sobre la clave del tubo y a los lados del mismo; sobre el plano de igual asentamiento no hay los esfuerzos cortantes en los planos verticales imaginarios tangentes a los lados del tubo que se mencionaron atrás.

La fórmula a que llega la teoría de carga de Marston para tubos rígidos alojados en terraplén (Fig. XI-18.b) es:

$$W_m = C_c \gamma_m D^2 \tag{11-7}$$

donde las letras tienen el sentido ya definido en una lista precedente de este mismo párrafo y C_c es un Coeficiente de Carga, dado por las expresiones:

$$C_c = \frac{e^{\pm 2K \tan \phi H/D} - 1}{\pm 2K \tan \phi}, \text{ para } H \leq H_e \tag{11-8}$$

$$C_c = \frac{e^{\pm 2K \tan \phi H_e/D} - 1}{\pm 2K \tan \phi} + \left(\frac{H}{D} - \frac{H_e}{D} \right)$$

$$e^{\pm 2K \tan \phi H_e/D}, \text{ para } H > H_e \tag{11-9}$$

Los signos más deberán de usarse cuando la relación de asentamiento sea positiva y los menos cuando sea negativa.

En las fórmulas anteriores H_e indica la posición del plano de igual asentamiento (Fig. XI-21) y en principio puede valuarse con la expresión:

$$\left[\frac{1}{2K \tan \phi} \pm \left(\frac{H}{D} - \frac{H_e}{D} \right) \pm \frac{\tau_a p}{3} \right]$$

$$\frac{e^{\pm 2K \tan \phi H_e/D} - 1}{\pm 2K \tan \phi} \pm \frac{1}{2}$$

$$\left(\frac{H_e}{D} \right)^2 \pm \frac{\tau_a p}{3} \left(\frac{H}{D} - \frac{H_e}{D} \right)$$

$$e^{\pm 2K \tan \phi H_e/D} - \frac{1}{2K \tan \phi} \frac{H_e}{D} \mp \frac{HH_e}{D^2} =$$

$$= \pm \frac{\tau_a p H}{D} \tag{11-10}$$

Ahora los signos superiores deben usarse con relación de asentamiento positiva y los inferiores con negativa.

En la Fig. XI-22 se proporciona una gráfica que da lugar directamente el valor de C_c en función de los de la relación H/D y del producto $\tau_a p$.

Con la gráfica se hace innecesario aplicar las fórmulas 11-8 a 11-10, lo que por otro lado sería engorroso, ya que proporciona directamente los valores de C_c que se requieren para aplicar la expresión 11-7. Cuando $\tau_a p = 0$ pueden suceder dos cosas: $\tau_a = 0$, es decir que el asentamiento del plano crítico es el mismo a los lados del tubo y en su clave o bien $p = 0$, es decir que el tubo esté alojado en una zanja de profundidad igual a un diámetro. En ambos casos, la constante C_c resulta igual a H/D y la carga sobre el tubo es idéntica al peso del terraplén sobre él; en efecto:

$$W_m = \frac{H}{D} \gamma_m D^2 = \gamma_m HD$$

Para valores negativos del producto $\tau_a p$, τ_a es el negativo, puesto que p es siempre positivo, si existe y la carga sobre el tubo es menor que el peso de la tierra suprayacente, pues el plano crítico se hunde

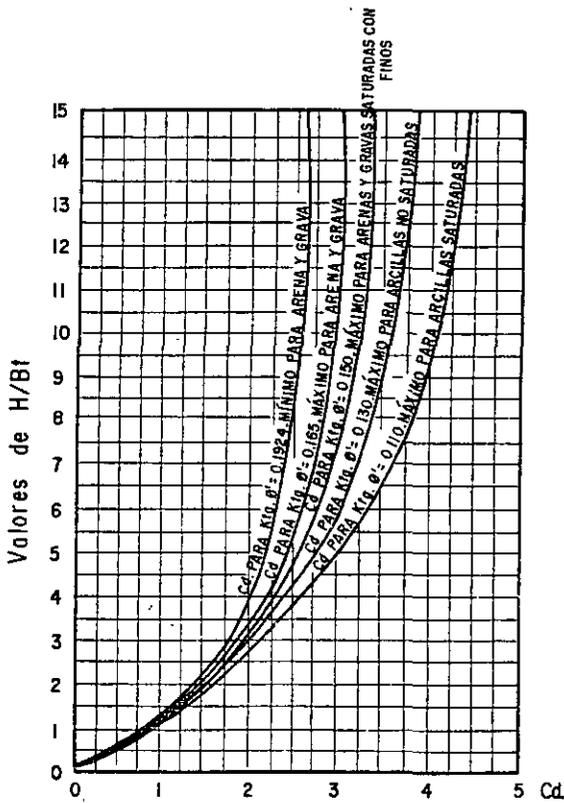


Figura XI-20. Valores del coeficiente de carga C_d .

$$C_d = \frac{2KH \tan \phi'}{1 - e^{-\frac{2KH \tan \phi'}{B_t}}} \quad (11-5)$$

En las fórmulas anteriores e es la base de los logaritmos neperianos.

La ecuación 11-4 permite calcular la carga muerta sobre una unidad de longitud de tubo y en ella puede utilizarse cualquier sistema homogéneo de unidades.

C_d es función del producto $K \tan \phi'$ y de la relación H/B_t . Se encuentra en las gráficas de la Fig. XI-20 para los diferentes tipos de suelos.

Si el tubo es de tipo muy rígido (y éste es el caso general de los de concreto), prácticamente toda la carga dada por la fórmula 11-4 será tomada por él, pues su rigidez será mucho mayor que la del suelo colocado a sus lados como relleno dentro de la zanja; si el tubo, por el contrario, es flexible y el suelo a sus lados está debidamente compactado, las rigideces de ambos pueden ser similares y en tal caso, para considerar la carga que soporta el tubo deberá multiplicarse el valor dado por la ecuación 11-4 por la relación D/B_t , con los sentidos usuales para esas letras.

Frecuentemente la trinchera en que se aloja el tubo no tiene paredes verticales, sino que éstas poseen un cierto talud, lo que da lugar a una dimensión B_t variable; cuando éste sea el caso, deberá hacerse intervenir en la ecuación 11-4 el ancho medido sobre el plano horizontal tangente al tubo en su clave.

Naturalmente, este criterio sólo será válido si los taludes de la trinchera no son muy tendidos, pues si lo son, la carga sobre el tubo deberá analizarse con la condición de tubo en terraplén (Fig. XI-18.b).

El caso de tubos en terraplén corresponde al croquis mostrado en la parte b) de la Fig. XI-18, como ya se dijo. Ahora pueden imaginarse dos planos verticales tangentes al tubo y llevados hasta la superficie del terraplén; las fuerzas cortantes que se desarrollen en esos planos como consecuencia del movimiento relativo del prisma interior respecto a las masas de suelo vecinas jugarán un importante papel en la carga que actúe a fin de cuentas sobre el tubo. Si el prisma interior tiende a bajar respecto a las masas vecinas se producirá arqueado favorable y la carga sobre el tubo será menor que el peso del citado prisma interior; por el contrario, si las masas vecinas tienden a bajar con respecto al prisma, la carga sobre el tubo será mayor que la correspondiente al peso de la columna de suelo sobre él. Para cuantificar la carga muerta que haya de obrar en un caso concreto, se considera el plano horizontal tangente al tubo en su clave, al que se llama plano crítico y se analiza el movimiento relativo de puntos de ese plano colocados precisamente en la clave del tubo y a los lados de éste. El asentamiento del plano crítico a los lados del tubo es igual (Fig. XI-21) al desplazamiento que sufre la superficie del terreno natural por el peso del terraplén (S_p), sumado al acortamiento que sufra la parte del terraplén localizada entre el terreno natural y el plano crítico (S_m). Así, en resumen, el asentamiento del plano crítico a los lados del tubo será $S_m + S_p$. Por su parte, el asentamiento que sufre el punto del plano crítico sobre la clave del tubo, está también formado por dos sumandos; el primero expresa lo que baja la base del tubo, S_f (generalmente $S_f > S_p$, pues el primero comprende lo que bajó el terreno natural, más la incrustación que el tubo pueda tener dentro de él) y el segundo, la deformación estructural propia del tubo en la dirección vertical por efecto de la carga actuante, d_c . Así, lo que baja el plano crítico sobre la clave del tubo es $S_f + d_c$. El movimiento relativo en el plano crítico es igual a $(S_m + S_p) - (S_f + d_c)$:

Se define como relación de asentamiento, r_a a:

$$r_a = \frac{(S_m + S_p) - (S_f + d_c)}{S_m} \quad (11-6)$$

que expresa la relación entre el movimiento relativo en el plano crítico y el acortamiento del terraplén a los lados del tubo.

Una relación de asentamiento positiva indica que las masas vecinas se mueven más que el prisma interior y que, por tanto, la carga sobre el tubo excede al peso del prisma sobre el tubo; inversamente, la relación de asentamientos negativa es signo de arqueado favorable.

Conviene definir también la relación de proyec-

de la zanja posterior a la excavación. Los tubos con terraplén [partes b) y c) de la figura] están colocados bajo el mismo y pueden quedar o no en una zanja dentro del terreno natural, siendo favorecidos por ésta, pues al alojarse dentro de ella, la carga vertical se reduce tanto más cuanto más suelto sea el relleno que se coloca sobre el tubo; dicho relleno suelto no necesita ocupar toda la zanja, bastando una faja de 30 ó 40 cm de espesor sobre el tubo para lograr un arqueado beneficioso.

En la parte d) de la figura se muestra un tipo bastante usado de colocación muy favorable para reducir la carga actuante sobre un tubo instalado en el terraplén. En este sistema llamado de trinchera imperfecta, primero se coloca el tubo sobre el terreno natural, sin utilizar ninguna zanja; después se coloca el terraplén perfectamente bien compactado a los lados del tubo, hasta una distancia de dos veces el diámetro del mismo y hasta una altura de unos 40 cm sobre su clave. En seguida se excava una zanja a lo largo del tubo, con ancho igual al diámetro del mismo y hasta una profundidad ligeramente menor que la parte superior del tubo (del orden de 10 cm arriba de la clave); esta zanja se rellena ahora de material suelto y compresible tras lo cual se prosigue la construcción del terraplén, compactándolo convencionalmente. Cuanto más compresible sea el material de relleno colocado cerca de la clave del tubo en el tema anterior, mayor será la reducción de la carga muerta actuante sobre el tubo; Marston (Refs. 13 y 14) ha sugerido añadir paja u hojarasca seca al relleno de la zanja para aumentar su compresibilidad. El mismo autor arriba mencionado ha desarrollado una teoría que permite valuar la carga muerta que actúa sobre el tubo de concreto en las diferentes condiciones de instalación que se muestran en la Fig. XI-18.

En primer lugar analiza el caso de los tubos en zanja (Fig. XI-18.a). Se aceptará la siguiente nomenclatura, con referencia a la Fig. XI-19. (Ref. 15).

W_m = carga muerta actuante sobre un plano horizontal tangente al tubo rígido en su clave.

γ_m = peso específico del suelo en el estado en que se encuentre.

F = carga vertical en el plano horizontal al nivel h .

D = diámetro exterior del tubo rígido.

B_t = ancho de la trinchera al nivel de la clave del tubo.

H = profundidad de la trinchera hasta el plano horizontal tangente al tubo por su clave.

h = distancia de la superficie del terreno natural a un plano horizontal en el relleno.

C_d = coeficiente de carga.

ϕ = ángulo de fricción interna del material de relleno.

ϕ' = ángulo de fricción entre el material de relleno y la pared de la zanja ($\phi' \leq \phi$).

K = coeficiente de presión de tierras.

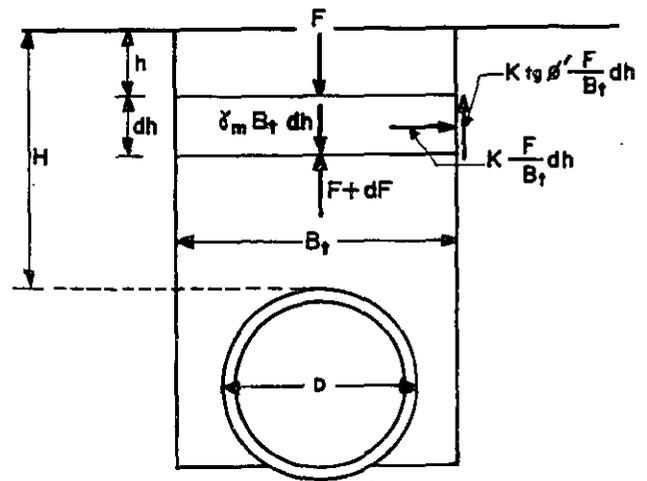


Figura XI-19. Deducción de la fórmula que da la carga muerta sobre tubos en zanja.

Con referencia a la Fig. XI-19 y analizando el equilibrio del elemento de relleno a la profundidad h , puede escribirse, respecto a un tramo unitario de tubo:

$$F + \gamma_m B_t dh = F + dF = 2K \tan \phi' \frac{F}{B_t} dh \quad (11-2)$$

Nótese que como el relleno siempre se coloca en estado suelto, por lo menos parcialmente, tenderá siempre a bajar, con lo que las fuerzas cortantes de reacción en las paredes de la zanja resultarán siempre hacia arriba, lo que es favorable para la situación del tubo. En la ecuación 11-2 Marston considera que K es el coeficiente de presión activa de tierras, lo que es discutible, puesto que las paredes de la zanja probablemente no ceden bajo el empuje; desde este punto de vista, tal parece que el coeficiente de presión de tierra en reposo (K_0) pudiera ser más razonable. Al valuar las fuerzas cortantes en las paredes de la zanja, considera que se desarrollan al unísono la resistencia al esfuerzo cortante última en todos los puntos de la pared y esto tampoco resulta muy realista. Sin embargo, una consideración tiende a compensarse con la otra y el hecho es que los ingenieros especialistas que suelen aplicar las fórmulas de Marston reportan generalmente buenos resultados, cuando se satisfacen plenamente los requisitos de colocación del tubo.

La ecuación 11-2 conduce a una ecuación diferencial lineal, cuya solución con la condición de frontera $F = 0$ para $h = 0$ es:

$$F = \gamma_m B_t^2 \frac{1 - e^{-\frac{2Kh \tan \phi'}{B_t}}}{2K \tan \phi'} \quad (11-3)$$

Lo cual, en la profundidad $h = H$, puede escribirse:

$$W_m = C_d \gamma_m B_t^2 \quad (11-4)$$

donde C_d es un factor de carga adimensional e igual a:

bajas. Son también fáciles de instalar y manejar y están disponibles en gran variedad de secciones, tamaños y calibres de lámina, lo que permite mucha libertad para llegar al diseño óptimo correspondiente a cada paso particular.

La principal desventaja de las alcantarillas metálicas es probablemente su costo alto en relación a obras de mampostería y aún de concreto, que resultan siempre más baratas en lugares en que el terreno de cimentación no plantea problemas especiales de capacidad de carga. También hacen inconvenientes a las estructuras metálicas todas las aguas de naturaleza corrosiva, so pena de usar protecciones sumamente costosas sobre la lámina de acero; el concreto y la mampostería resisten asimismo mucho mejor el efecto erosivo de aguas a alta velocidad.

B. Alcantarillas rígidas

El estudio de las alcantarillas construidas con materiales rígidos, tales como el concreto reforzado, debe comenzar con un análisis de cargas a que estará sujeta la estructura, pues éstas juegan un papel especialmente importante en el comportamiento de aquélla.

B-1. Estudio de cargas muertas

Para fines de proyecto deben considerarse los dos tipos de cargas tradicionales: las muertas y las vivas.

Las cargas muertas son causadas por la tierra que abraja al tubo rígido. A primera vista se diría que dicho efecto es igual al peso propio del material colocado sobre el tubo; de hecho la afirmación anterior se consideró correcta durante muchos años en la práctica ingenieril. Hoy se sabe, sin embargo, que el efecto del suelo suprayacente puede ser mayor o menor que el peso propio, y, en rigor, sólo por una rara casualidad será igual a éste. Lo anterior es debido a que entre un prisma de suelo de ancho igual al diámetro del tubo, situado sobre éste y prolongado hasta la superficie del terreno o terraplén y las masas de suelo a ambos lados de este prisma, se ejercen fuerzas cortantes cuando hay alguna tendencia al movimiento relativo. Si las fuerzas cortantes producidas son hacia arriba, porque el prisma considerado trate de bajar respecto a las masas vecinas, el efecto del prisma sobre el tubo es menor que su propio peso; por el contrario, si, por alguna razón las masas vecinas tratan de bajar respecto al prisma, las fuerzas cortantes de frontera se producen hacia abajo, sumándose al peso propio del prisma, por lo que el efecto de éste sobre el tubo es mayor que su peso propio.

Para el propósito de calcular cargas muertas, las alcantarillas de tubo rígido se clasifican en cuatro clases principales de acuerdo con las condiciones de instalación, que influyen en la magnitud y dirección de las fuerzas cortantes a que arriba se hizo referencia. Estas clases se muestran en la Fig. XI-18.

Los tubos sin terraplén [parte a) de la figura] se instalan en las zanjas estrechas bajo el nivel del terreno natural; sobre ellas se coloca solamente el relleno

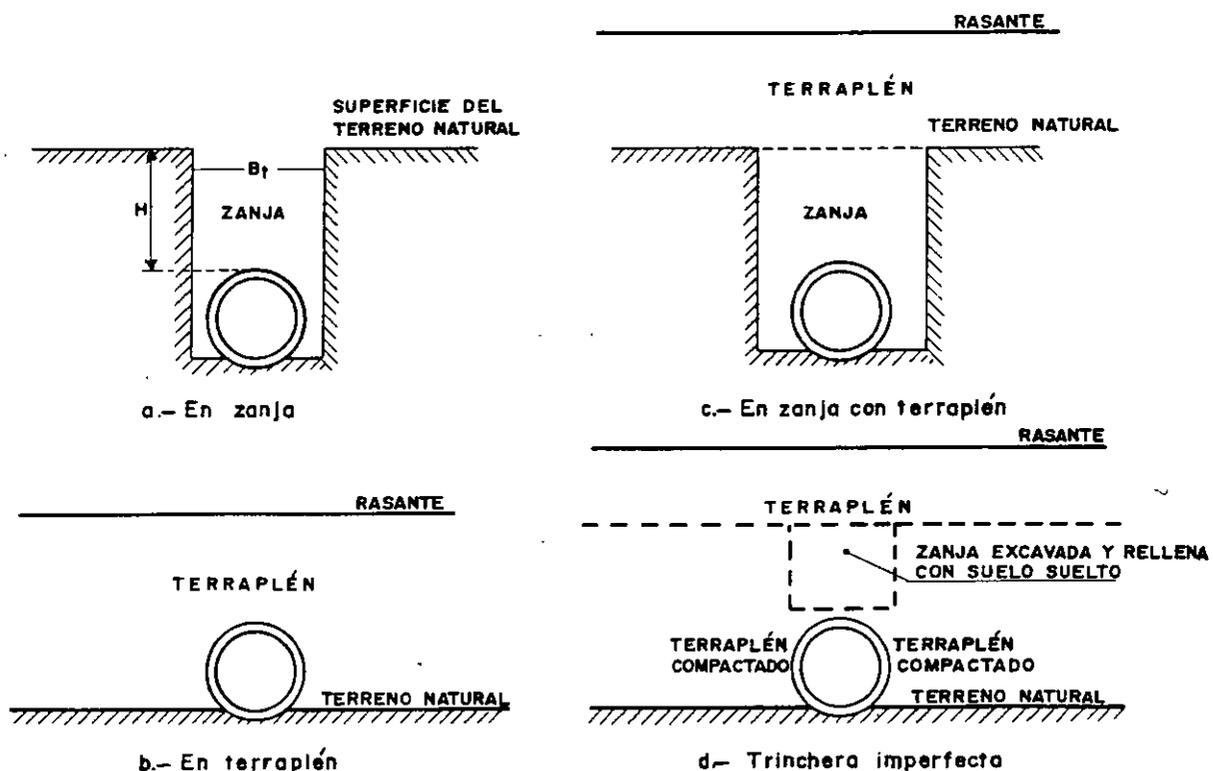


Figura XI-18. Clases de alcantarillado, según su colocación.

aumentar grandemente los efectos benéficos del arqueo, reduciendo mucho las cargas verticales en la estructura. Como regla práctica, no debe haber en un contorno a la estructura, con ancho de dos diámetros de la misma, material que no haya sido cuidadosamente compactado: estas operaciones pueden hacerse con equipo manual o de cualquier forma que garantice la buena ejecución del trabajo sin daño para la alcantarilla; en la compactación del colchón especialmente se comete con frecuencia el error de hacer circular sobre la obra equipo pesado de compactación antes de que se haya alcanzado un espesor de cubrimiento protector suficiente; ésta ha sido frecuente causa de fallas.

Si el colchón vertical es reducido, los empujes laterales pudieran predominar y tender a aperaltar a la alcantarilla; en este caso conviene recurrir a secciones tipo bóveda, más anchas y menos altas, que aumentan el colchón y contrarrestan en mal efecto anterior.

Es frecuente que las alcantarillas flexibles muestren defectos estructurales (deformaciones, cedencias, etcétera), durante su funcionamiento; estos efectos suelen tener siempre como origen la mala compactación de los rellenos que produce empujes de tierras superiores a los considerados en el proyecto que, lógicamente, toma en cuenta los espesores de colchón y terraplén bien compactados. La solución de estos defectos no puede ser otra que la radical, que consiste en retirar el relleno suelto y en sustituirlo por otro bien compactado.

Cuando el terreno que sirve de base a una alcantarilla flexible es compresible y ésta se hunde longitudinalmente, el mayor hundimiento bajo el centro del terraplén respecto al de sus hombros, hace que se abran las juntas entre las placas metálicas ensambladas que constituyen la alcantarilla; para resolver este problema e impedir la filtración de agua por las juntas abiertas puede colocarse por dentro un anillo expansor de acero corrugado, cuyas corrugaciones siendo la diferencia igual al monto de las fuerzas coincidan con las de las placas que forman la alcantarilla; este anillo puede expandirse desde dentro y actúa así como sellador. En algunos casos y siempre que se logre de un modo efectivo que el anillo trabaje solidariamente con la pared de la estructura, podrá considerársele como un refuerzo estructural. En caso en que el anillo anterior actúe como sellador es conveniente colocar entre él y la estructura una capa de asfalto, neopreno u otro material flexible similar.

A menudo se ha observado que la conservación de las alcantarillas, tanto flexibles como rígidas, se descuida lamentablemente, así como la de sus obras auxiliares (muros de cabeza, rompedores de energía del agua, obras de encauzamiento, lavaderos de descarga, etcétera); naturalmente esto se traduce en daños posibles para los terraplenes y en menor vida útil para el camino en general y para las alcantarillas en particular. El azolvamiento es un efecto particularmente

nocivo. Una buena conservación comprende la realización de obras de encauzamiento y de todas las necesarias para corregir, a la luz del funcionamiento, todos los defectos u omisiones de la construcción.

Un terraplén tubificado se reconoce por la presencia de irregularidades, oquedades, afloramientos de agua o manchas de humedad y otros signos de escurrimiento interno, especialmente en el talud de aguas abajo del terraplén. Si el proceso de tubificación ha avanzado poco, nada ofrece mejor garantía que la instalación de un filtro en el talud del terraplén aguas abajo y en torno a la alcantarilla; si el proceso está avanzado, además del filtro será preciso reponer el material tubificado, llegando incluso a construir galerías a través del terraplén para lograr que esa reposición se efectúe en forma completa.

Una fuente común de problemas de tubificación son los agujeros que se dejan sin sellar dentro de la alcantarilla; estos agujeros pueden haber sido necesarios para facilitar las maniobras de transportación e izado de las piezas que la constituyen; son especialmente peligrosos cuando el relleno que rodea la alcantarilla es susceptible a la tubificación (arenas finas y limos no plásticos con $I_p < 10$); en los agujeros se produce succión del material de relleno por la corriente de agua, lo cual inicia un proceso de erosión progresiva que conduce a la falla de la obra por falta de soporte; se han llegado a ver casos en que el agua puede cruzar el terraplén por un verdadero túnel formado en torno a la obra, ignorando a ésta. Los agujeros en cuestión deben ser sellados durante la construcción de la alcantarilla.

En terraplenes muy arcillosos, la sequía prolongada puede producir agrietamientos en torno a la alcantarilla y esas grietas constituyen una entrada natural para las aguas. Cuando éste sea el caso, deberán sellarse todas las grietas en torno a la alcantarilla, tuneleando el material de manera que se siga la grieta y colocando nuevo material debidamente compactado. Una buena protección de los taludes del terraplén con vegetación contribuye mucho a eliminar el problema de las grietas.

De los varios tipos de estructuras para drenaje que actualmente se usan en la tecnología de las vías terrestres, ninguno se debe considerar como la solución óptima de todos los problemas; todos tienen sus ventajas y sus inconvenientes. A continuación se hace un balance de las ventajas y desventajas que más comúnmente se atribuyen a las alcantarillas flexibles de tubo metálico.

Las principales ventajas radican en el hecho de trabajar con un producto fabricado con normas estrictas, lo que prácticamente elimina defectos graves de elaboración; también se tiene alta resistencia en comparación al peso. Las ventajas inherentes a la flexibilidad ya han sido suficientemente mencionadas. Los tubos metálicos funcionan convenientemente aún en suelos de muy baja capacidad de carga, pues comunican al terreno de cimentación presiones muy

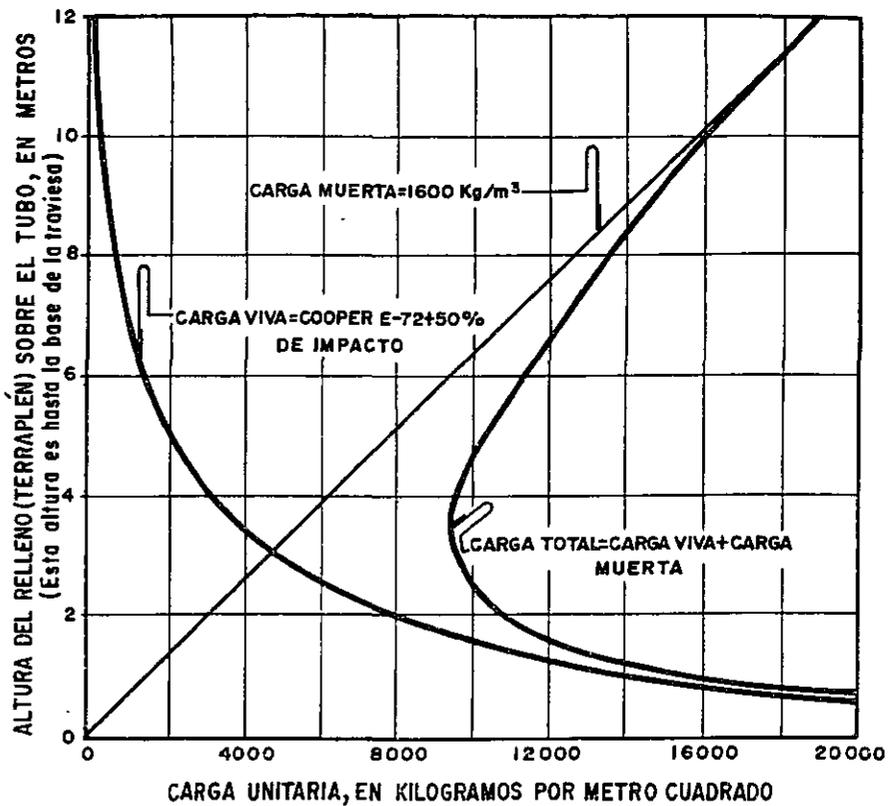


Figura XI-17. Combinación de cargas muerta y viva para alcantarillas flexibles en ferrocarriles para las condiciones que se citan.

Considerando el efecto de arqueado, las gráficas anteriores dan todavía resultados representativos para colchones de pequeño espesor, en los que el efecto casi no se desarrolla; en espesores mayores, la carga muerta ya no es ahora función lineal de la profundidad, sino que crece hasta un límite, a partir del cual ya se mantiene uniforme. De las gráficas se desprende que en cada caso existe un colchón para el que la combinación de cargas produce un efecto mínimo.

Para resistir correctamente a las cargas, la alcantarilla deberá estar apoyada en un suelo homogéneo en toda su longitud; si el terreno natural no lo es, deberá hacerse una sustitución de los materiales débiles o compresibles por material compactado. Bajo la obra deberá colocarse una plantilla, preferentemente de arena compacta. En terraplenes construidos sobre terrenos compresibles, el efecto diferencial de

mayor asentamiento en el centro respecto a las orillas puede hacer conveniente el dar a la obra una adecuada contraflecha.

La resistencia y el funcionamiento de cualquier tipo de estructura flexible para drenaje depende en gran parte de la calidad y las normas de colocación del material de relleno lateral y de colchón adyacentes a ella (Ref. 12).

Este relleno debe ser en lo posible inerte al agua, es decir, no susceptible a expansiones, agrietamientos, etc., fácilmente compactable y no susceptible tampoco a la tubificación. En el Capítulo III del Volumen I se han dado normas para estimar la susceptibilidad de los suelos a esos fenómenos; dichas normas son aplicables al caso ahora tratado.

Con el objeto de evitar distorsiones de la estructura metálica, el relleno lateral deberá colocarse por capas y alternativamente, de modo que vaya creciendo simultáneamente en los dos lados. El colchón debe comenzar a colocarse en el centro de la bóveda, extendiéndose en sentido transversal simultáneamente hacia los lados, con el mismo fin; es conveniente comenzar el cubrimiento en sentido longitudinal procediendo del centro hacia los dos extremos del tubo. Lo fundamental a cuidar en la colocación del relleno es la correcta compactación de las capas en que se vaya colocando; la despreocupación de este concepto, es, sin duda, fuente de un gran número de fallas en obras flexibles de drenaje. La compactación hace aumentar la estabilidad del suelo y al aumentar su resistencia al esfuerzo cortante, disminuye los empujes de tierras que el relleno ejerce lateralmente contra la estructura; la compactación del colchón hace



Compactación en torno a una alcantarilla flexible.

cialmente comprometida por el asentamiento y, al comunicar al terreno esfuerzos del orden de los que comunica el propio terraplén, se eliminan los problemas por asentamiento diferencial, de otro modo tan graves.

A. Estructuras flexibles

Las estructuras flexibles son aquellas construidas por tubos o arcos de lámina de acero corrugada, con recubrimiento adicional o sin él colocados en el terreno, bajo el terraplén, en una o más líneas (baterías).

Para fines de proyecto es preciso considerar en estas estructuras la influencia de las cargas muertas y la de las cargas vivas. Las primeras son debidas al peso propio (total o parcial) de la tierra colocada sobre la estructura (colchón); las cargas vivas son debidas al peso del equipo que transita sobre la estructura, antes o después de que ésta haya sido debidamente protegida por su colchón de tierra. Los impactos producidos por las cargas móviles y, en ciertos casos, las vibraciones transmitidas por las mismas se consideran también como cargas vivas. En general, el efecto de la carga viva disminuye al aumentar el espesor del colchón y al aumentar la velocidad del tránsito.

Además de los efectos verticales de las cargas consideradas, existen también presiones laterales y longitudinales a lo largo del eje de la estructura inducidas por las cargas verticales.

En general puede decirse que la pequeña cedencia inherente a una estructura metálica flexible alivia considerablemente los estados de esfuerzos actuantes en la propia estructura en comparación a una idealmente rígida. Ello es debido al fenómeno de arqueado

(Ref. 11), estudiado en el Capítulo 5 del Volumen I y en el Capítulo XIV de este volumen; el efecto hace que la presión vertical de tierra actuante en la bóveda de la alcantarilla sea menor que la que corresponde al espesor de colchón sobre ella; el efecto puede cuantificarse aproximadamente recurriendo a la teoría que se incluye en las referencias arriba mencionadas. Usualmente y desde el punto de vista estructural suele especificarse que la bóveda de una alcantarilla flexible no pueda ceder más de un 5 % de la máxima dimensión vertical; este límite cubre ampliamente las deformaciones necesarias para el desarrollo del efecto de arqueado, por lo que puede garantizarse que éste tendrá lugar siempre sobre obras metálicas flexibles del tipo utilizado por la práctica. El efecto de arqueado es más notorio en arenas que en arcillas y se ve influenciado por las vibraciones, que tienden a disminuirlo, sobre todo en el caso de las arenas. Sin embargo, debe recordarse que existe un espesor mínimo de colchón para que se desarrollen efectos de arqueado de importancia práctica; los límites respectivos se discuten también someramente en la Referencia 11.

Si se supone que los efectos de arqueado son inexistentes, los efectos de la combinación de carga muerta y carga viva sobre una alcantarilla son como los que se muestran para dos casos particulares en las Figs. XI-16 y XI-17 en referencia al caso de carreteras y ferrocarriles, respectivamente.

En ambos casos se ha considerado que la carga muerta, debida al colchón de tierra, aumenta linealmente con la profundidad; el efecto de la carga viva (en el caso de las figuras, H-20 para carreteras y Cooper E-72, más 50 % de impacto, para ferrocarril) sigue una ley de variación de tipo hiperbólico con la profundidad. La carga total, suma de ambas, se muestra en las dos figuras.

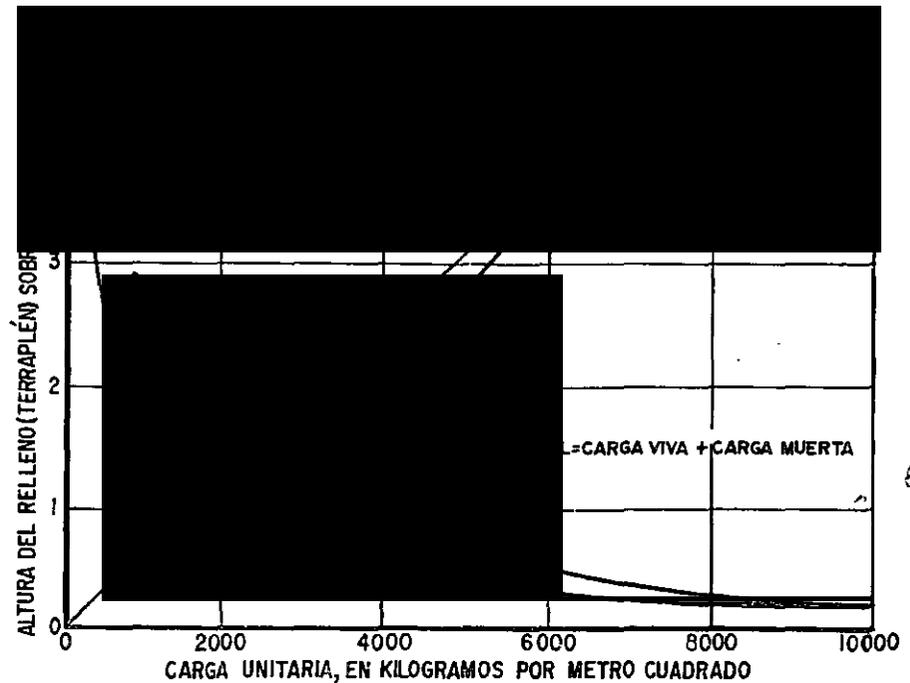


Figura XI-16. Combinación de cargas muerta y viva sobre alcantarillas flexibles en carreteras para las condiciones que se citan.

a partir de pendientes del orden del 15 %. Esta colocación de la obra puede resultar conveniente, pero también es común verla realizada con defectos serios que pueden comprometer tanto la eficiencia hidráulica de la alcantarilla como la seguridad del terraplén; es esencial que la entrada de la alcantarilla se encuentre a nivel del cauce natural, en el pie del terraplén de manera que toda el agua pueda circular a su través, sin cambios bruscos de dirección o de pendiente; muchas veces esto exige la colocación de muros encauzadores o alguna pequeña rectificación en el cauce. Si la entrada de la alcantarilla queda sobre el pie del terraplén y sobre el nivel del cauce, se habrá creado una zona de depósito e infiltración. La salida del agua debe hacerse también al cauce natural aguas abajo; para no prolongar excesivamente la alcantarilla, es común conducirla desde la salida de la obra hasta el cauce por algún canal, bajada o cualquier elemento de encauzamiento que cubra el mismo fin, controlando las erosiones remanentes. La Fig. XI-15 muestra una localización adecuada y una inadecuada, pero frecuente, de estas obras.

Otro aspecto importante de la localización de las alcantarillas es su desarrollo en planta. La tendencia natural y conveniente será alinear la obra con el cauce, de manera que la corriente de agua no altere su curso, evitándose así erosiones y remansos. Si el cauce natural está demasiado esviado respecto a la vía terrestre, la alcantarilla alineada puede resultar demasiado larga, pudiendo convenir entonces obligar a la corriente de agua a cruzar en forma más próxima a la perpendicular; lo anterior implica una serie de cambios de dirección en el agua, que sólo podrán ser aceptables si se logran por medio de canales rectificadores que encauzen las aguas sin provocar turbulencias erosivas. Las recomendaciones geotécnicas para la colocación de alcantarillas podrían resumirse como sigue:

1. Siempre que sea posible las alcantarillas deberán colocarse en el fondo del cauce natural y sin transiciones bruscas en alineamiento vertical u horizontal.

2. Cuando no sigan la línea de fondo del cauce natural, las alcantarillas deberán colocarse en una trinchera en suelo firme.

3. En cualquier localización que no sea el fondo del cauce natural se hará un estudio económico cuidadoso para establecer claramente que el costo de conservación de la localización escogida no hace nulo el ahorro en costo de construcción que con ella se tenga.

4. Cuando las alcantarillas no estén alineadas con el cauce natural, deberá tenerse especial cuidado en que su entrada y su salida resulte apropiada al agua, sin quiebres bruscos o salientes capaces de fomentar turbulencias o erosiones. La eliminación de tales obstáculos casi seguramente será siempre económica.

5. El gradiente hidráulico que exista dentro de

la alcantarilla deberá ser tal que la velocidad del agua en ella sea igual o mayor que la que tenía en el mismo trecho de cauce natural.

6. Deben evitarse en las alcantarillas contracciones en la vena líquida.

Una zona crítica es siempre la frontera entre el material térreo del terraplén y la alcantarilla propiamente dicha, pues en ella se dificulta la compactación del material de abrigo y se favorece la penetración del agua, que puede tubificar al material de terracería o humedecerlo; es frecuente que sobre las alcantarillas, los pavimentos muestren defectos especiales por este motivo, que deberá cuidarse siempre en forma muy especial durante la construcción.

Los problemas de cimentación de las alcantarillas se resuelven en principio con los métodos discutidos para cimentaciones superficiales en el Capítulo VIII de este mismo volumen. Se exceptúa el caso de los tubos, que por comunicar al terreno natural esfuerzos muy bajos quedan fuera de estas consideraciones. El problema radica, como ya se dijo, en la falta de estudios de que suele adolecerse en las alcantarillas, por su gran número y baja inversión individual. Por ello como también se discutió, las recomendaciones de cimentación de las alcantarillas suelen darse con base en observación o en estudios muy someros que han de hacer especialistas entrenados en la aplicación de las normas de la Mecánica de Suelos a estos problemas; los criterios en que tales especialistas han de moverse son los mismos detallados en el Capítulo VIII. Lo anterior, naturalmente, no excluye la necesidad de estudiar acuciosamente todos los casos que se detecten como especiales por alguna razón.

Cuando los terraplenes se colocan sobre terrenos muy blandos y compresibles, sus asentamientos resultan muy perjudiciales para las obras de drenaje que hayan de hacerse bajo ellos; estos asentamientos destruyen las obras rígidas convencionales o las deforman más allá de lo tolerable, cuando son flexibles. El problema de cimentación puede a veces resolverse colocando la obra sobre el material del terraplén, más resistente que el terreno de cimentación en este caso, pero esta solución está circunscrita al hecho de que al elevar la obra no se perjudique su comportamiento hidráulico o no se cree abajo de la plantilla un almacenamiento de agua, a partir del cual ésta pueda infiltrarse en el terraplén; generalmente el método anterior es apropiado en terraplenes sobre terrenos pantanosos e inundados o en lugares en que, por lo blando del terreno natural, parte del terraplén se incrusta en él desde un principio. El cajón de concreto (Ref. 10) es la estructura para alcantarilla grande (considerando los casos en que los tubos ya no resuelven el problema hidráulico) que transmite al terreno los menores niveles de esfuerzo; además este tipo de estructuras es el que soporta mejor los movimientos del terraplén sobre el terreno de cimentación compresible, pues aunque sufran agrietamientos que hayan de ser calafateados, su función no se ve esen-

más necesaria la periódica revisión de las obras y su limpieza sistemática, así como el uso de estructuras especiales de protección para evitar obturaciones.

El aumento de la velocidad a la salida de la obra puede producir problemas de erosión remontante en los suelos que reciban el embate del agua y frecuentemente obliga a pensar en dentellones, delantales de salida, canales de encauzamiento, disipadores de energía, etc.

En lo posible, una alcantarilla debe seguir la pendiente del cauce natural que la provoca; cualquier cambio brusco en la dirección del agua en cualquiera de sus extremos retarda la corriente y obliga a emplear un conducto de mayor sección. Sin embargo, hay ocasiones en que la pendiente natural resulta excesiva y daría lugar a velocidades no convenientes del agua dentro y a la salida de la obra, con las que se producirán erosiones en los materiales que forman la propia alcantarilla y harían demasiado peligrosas cualesquiera fugas que pudieran llegar a producirse en el recorrido interior del agua. En tales casos es frecuente recurrir a los trazos en perfil que se muestran en la Fig. XI-14.

En la parte *a* de la figura se muestra la colocación normal y conveniente, que es la que ha de darse a cualquier alcantarilla de bóveda, de cajón o de losa de concreto. La parte *b* representa un caso en que se reduce la pendiente de la obra alojándola en el terraplén; esta ubicación puede intentarse únicamente con tubos y guardando las precauciones que se indican someramente en la figura, en lo que se refiere a dentellones de entrada y salida, lavaderos o bajadas y a un muy especial cuidado en evitar cualquier posible fuga del agua en el interior de la obra. La parte *c* muestra una típica alcantarilla de alivio, de las que han de ser construidas en partes intermedias de cortes muy largos, para descongestionar las cunetas o para dar salida de trecho en trecho a la cuneta central de una autopista, cuando la haya; también en este caso resultará esencial respetar todas las precauciones necesarias, algunas de las cuales aparecen en el croquis.

Es frecuente que cuando el fondo del cauce natural tenga una pendiente excesiva se recurra a ubicar la alcantarilla sobre la ladera de la cañada; muchas veces esto se considera práctico o conveniente

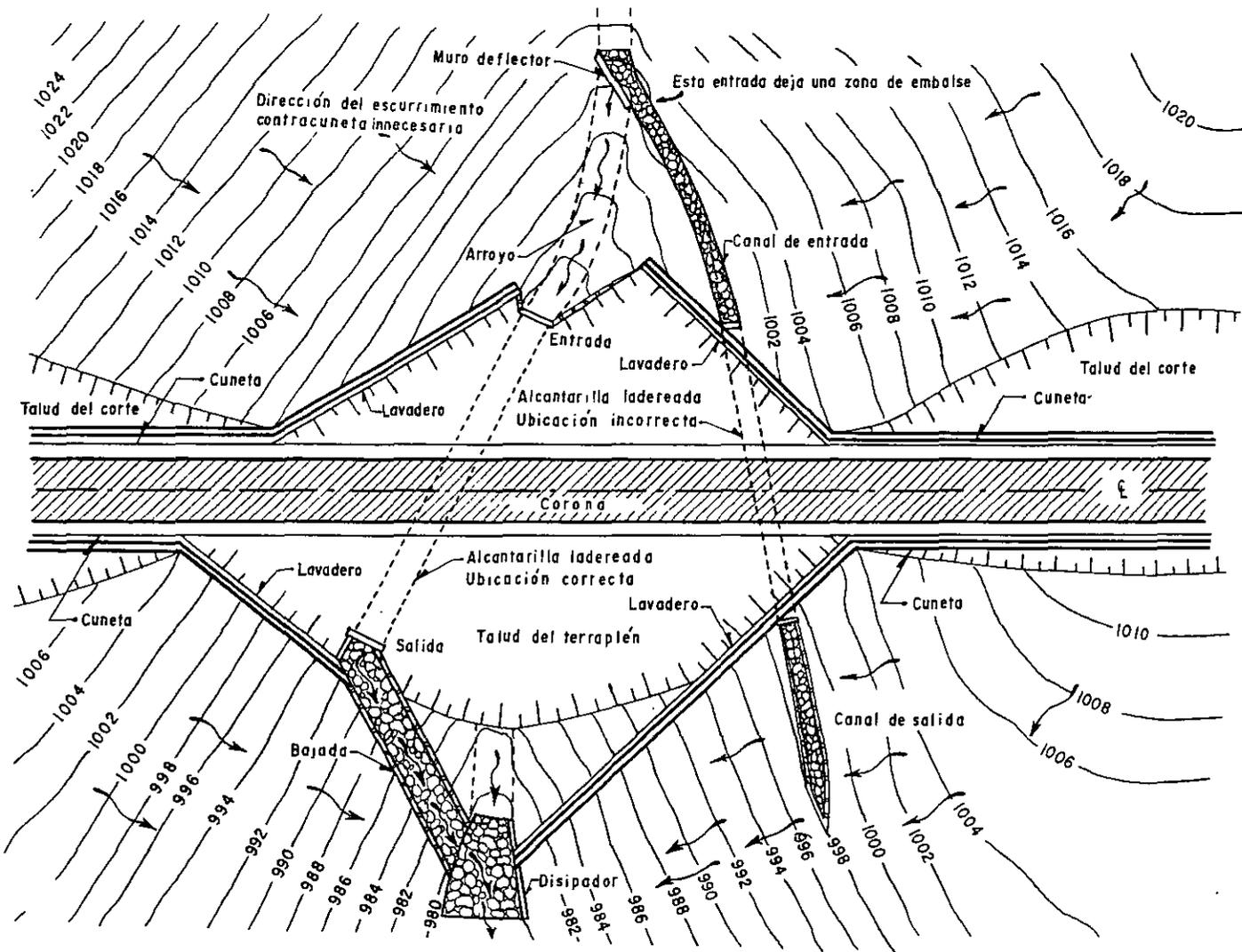


Figura XI-15. Ubicación de alcantarillas en laderas de cañadas.

Cuando lo exige el gasto que ha de desalojarse o en algunos casos que impone la topografía del lugar, todas estas obras pueden repetirse adosadas una a otra, dando lugar a alcantarillas múltiples. En suelos muy blandos suele recurrirse a la construcción de cajones de concreto.

El problema básico de las alcantarillas es el hidráulico, cuyo análisis queda fuera de las intenciones de este libro, pero que es detalladamente tratado en la Ref. 3, por citar un solo ejemplo de los muchos existentes. Aquí, será preciso únicamente hacer alguna referencia a los problemas geotécnicos ligados al funcionamiento de las alcantarillas, alguno de los cuales no carece de interés.

Una alcantarilla generalmente reduce en algo el área del cauce natural, ocasionando un embalse a la entrada y un aumento de la velocidad dentro y

a la salida de la obra. La profundidad del embalse y el aumento de la velocidad dependen del diseño hidráulico y son, por cierto, factores muy importantes para condicionar el mismo. Si el embalse es alto y duradero puede llegar a causar problemas en los terraplenes por erosión interna y tubificación; si rebasa la altura del terraplén producirá seguramente su falla catastrófica, pues naturalmente la obra de tierra nunca estará proyectada para tal condición, ya que siempre será más económico construir la alcantarilla necesaria. En general, la alcantarilla se diseñará para que su boca no quede sumergida en ningún caso por lo que los problemas anteriores están más bien ligados a falta de conservación y, concretamente, a obturaciones en el área hidráulica de la alcantarilla por sedimentos, arrastre de sólidos, ramajes, etc. Sin duda es este uno de los aspectos que hacen

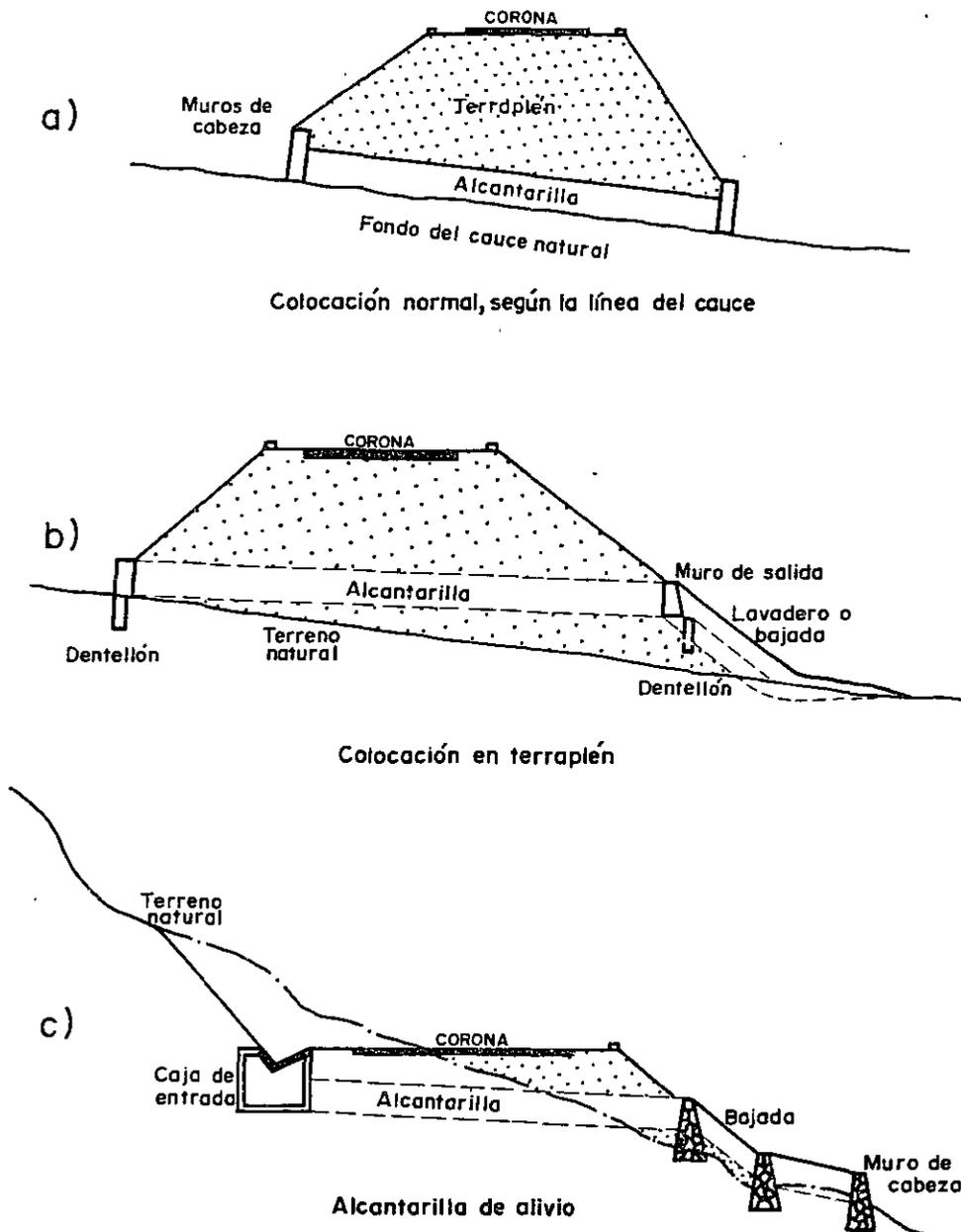
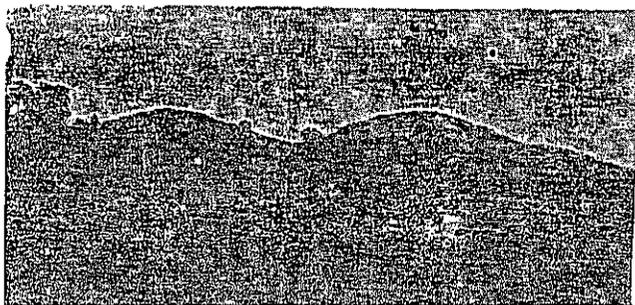


Figura XI-14. Diversos perfiles de alcantarillas.



Canal interceptor. En el centro el camino, arriba el canal.

tes tan fuertes que su revestimiento se hace indispensable; esto es desde luego, válido para los lavaderos que suele haber en sus extremos.

XI-12 LOS CANALES INTERCEPTORES

Se mencionan aquí los canales que se construyen con fines de encauzamiento de las aguas superficiales que escurrirían hacia la corona de una vía terrestre, causando en ella erosiones o depósitos inconvenientes. Su construcción es frecuente, sobre todo en los casos ya mencionados en los incisos anteriores (escurrimientos por laderas naturales con pendientes hacia la vía) o en conexión con la de alcantarillas, sea para llevar a su entrada las aguas que han de cruzarlas o para controlar la descarga de las que ya lo hayan hecho. En el primer caso, un canal interceptor funciona en forma análoga a la de una contracuneta y le son aplicables muchos de los comentarios previamente hechos en torno a estas obras; sin embargo, la costumbre reserva la expresión canales interceptores para los que se construyen a distancias relativamente grandes de la vía terrestre y no están específicamente ligados a un corte en particular, sino que defienden un tramo más o menos largo de la vía, independientemente de cual sea la naturaleza de su sección.

Los canales interceptores se construyen por excavación manual o con equipo, generalmente ligero, del tipo de máquinas zanjadoras, conformadoras o tractores más o menos livianos. El material producto de la excavación deberá colocarse siempre aguas abajo del canal. Los taludes de éste dependerán del material en que se efectúa la excavación y de sus propias dimensiones; taludes de 1:1 o $1\frac{1}{2}$:1 son frecuentes. Las dimensiones del canal deberán seleccionarse como conclusión de un estudio hidráulico, que podrá llegar a ser de importancia en los casos en que los gastos que se hayan de manejar sean considerables. Las Refs. 5 y 6 proporcionan criterios para realizar tales estudios, que se consideran, por lo demás, fuera de los objetivos de esta obra.

La lejanía a que suelen colocarse los canales in-

terceptores respecto a la vía terrestre hace que muchas veces pueda pensarse en construirlos sin revestimiento y ello sin mayor riesgo. Naturalmente, la anterior no es una regla fija y en cada caso deberá ponderarse con cuidado el riesgo de permitir las infiltraciones que inevitablemente ocurrirán a través de la plantilla no revestida, optando por la protección en todos los casos necesarios. Lo que trata de decirse es que, con mayor frecuencia que en las contracunetas, podrán encontrarse casos en relación al uso de canales interceptores en que el no utilizar revestimientos, no produzca malas consecuencias de importancia.

Cuando los canales se revisten, se utiliza generalmente la mampostería y, en los casos más importantes, el concreto. Conviene que la superficie del revestimiento quede lo más lisa posible, para propiciar el escurrimiento, aumentando la eficiencia de la obra.

Los canales que se construyen como complemento de alcantarillas tienen sobre todo motivación ligada al funcionamiento hidráulico de tales obras, por lo que escapan a la atención de este libro. Es frecuente que entre ellos se presenten más casos en los que el revestimiento sea recomendable o aún imprescindible.

XI-13 CONSIDERACIONES GEOTECNICAS EN TORNO AL DISEÑO DE ALCANTARILLAS

En todos los lugares en que el agua de escurrimiento superficial se concentre en un cauce natural, de funcionamiento estacional o permanente, será preciso en general disponer una estructura que permita el cruce de las aguas bajo la vía terrestre; estas estructuras son los puentes y las alcantarillas, cuya distinción es, como se dijo, arbitraria. También se señaló como en México se consideran alcantarillas las obras cuyos claros sean menores de 6 m. Las alcantarillas, según su importancia hidráulica pueden resolverse con uno o varios tubos de concreto, con estructuras de bóveda de mampostería sobre muros de mampostería o de concreto o con losas de concreto sobre estribos de mampostería o más comúnmente, también de concreto. Todas las anteriores constituyen el grupo de las llamadas obras rígidas, por ser muy pequeñas las deformaciones que pueden sufrir bajo el peso de terraplén sobre y a los lados de ellas. Además existen las alcantarillas flexibles, generalmente metálicas de lámina corrugada, que se usan mucho en secciones tubulares, pero que cada día se prodigan más en otras secciones, como la ovoidal y la elíptica, apropiadas para el manejo de gastos mayores que los que desalojan los tubos o aún para formar túneles cortos y pasos a desnivel; en estas obras de lámina metálica, las deformaciones bajo las presiones de tierra son importantes y ello impone diferencias geotécnicas notables, como más adelante se detallará.

suelos que más lo requieran. Ello ocurre, por ejemplo, en masas rocosas junteadas, con las juntas rellenas de materiales susceptibles al agua, sobre todo si los bloques de roca tienen cierta predisposición a caerse sobre la vía terrestre; otro tanto sucede en rocas estratificadas, con echado desfavorable hacia la vía.

En algunos países, México entre ellos, es práctica que tiene algunos defensores el construir en caminos modestos, en los que el bajo costo es una condición básica, un canal a modo de contracuneta, con desarrollo paralelo al propio camino, en todas aquellas zonas en que el terreno natural tiene, en extensiones importantes, pendiente sostenida hacia la vía; sobre todo, esto se hace en laderas naturales en plano inclinado, en que no existen prácticamente cauces naturales en que el agua se concentre y en donde puedan construirse alcantarillas. A veces, estas contracunetas se colocan en terrenos de pendiente tan ligera, que pueden merecer el calificativo de planos y, en tal caso, se adosan al camino, casi a modo de cunetas al pie del terraplén (de muy escasa altura, obviamente), en el lado aguas arriba, aunque no sea raro verlas hechas en ambos lados. Por razones de costo, estas zanjas naturalmente no se revisten.

La práctica anterior merece discusión y, desde luego, parece que puede asentarse desde un principio que no puede ser tan rutinaria como pretenden sus defensores más extremos.

En primer lugar ha de considerarse la sección hidráulica de la zanja que se coloque. Si ésta es pequeña, como es usual (como una contracuneta normal) cabe preguntarse qué escurrimientos será capaz de detener y realizar los cálculos necesarios antes de aceptarla, pues muchas veces se encontrarán escurrimientos tales que si se dejaran llegar al camino, con sus cunetas y su corona por lo menos revestida, tampoco serían causa de mayores problemas y en otras se verá que la capacidad de la zanja no basta sino para detener una mínima parte del escurrimiento por venir, pasando de todas maneras la mayoría del agua al camino, con lo que la propia zanja sería irrelevante. A cambio se tiene en la proximidad de la carretera una vía de entrada al agua que humedecerá los cortes y los pavimentos produciendo muchos trastornos y ello aún teniendo en cuenta que en los caminos modestos de que se habla, los cortes serán, en general, de poca altura, con lo que muchos de los problemas de estabilidad causados por el humedecimiento se atenúan grandemente. Parece mejor práctica en aquellos lugares en que se vea que por el plano inclinado de la ladera viene un gasto importante, susceptible de causar perjuicios, substituir la contracuneta no revestida por un verdadero canal interceptor, que responda en su sección a un cálculo hidráulico apropiado y, que se desarrolle a suficiente distancia del camino como para que el no revestirlo carezca de importancia; estos canales pueden combinarse con bordos de encauzamiento, con la ventaja

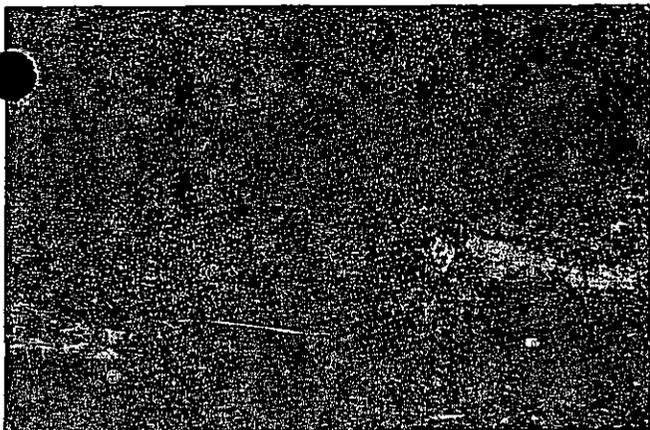
de que ambas estructuras pueden ser hechas a mano, a bajo costo.

En lo que se refiere a las cunetas de protección hechas al pie de taludes bajos, en terrenos casi planos cabe comentar que no puede verse claramente el objeto de colocarlas en ambos lados del camino; la lógica ordena preocuparse únicamente de interceptar las aguas ladera arriba, en el sentido de las pendientes crecientes. Además, esa cuneta o zanja no revestida, al pie del talud bajo, será seguramente causa de inestabilidad de las terracerías y el modesto pavimento, causando una mala condición general en el tramo. Parece aquí también mejor práctica pensar en canales interceptores suficientemente alejados o en bordos que encaucen el agua a cauces naturales más o menos alejados. Huelga decir que son válidos los comentarios hechos en párrafos anteriores sobre el cálculo de la capacidad hidráulica de todas estas estructuras. El agua que aparezca de un modo u otro aguas abajo del camino en estos casos ha de ser objeto de atención para encauzarla y no para interceptarla, a fin de que no cause trastornos en caseríos o terrenos de labor que pudieran existir.

La conservación de las contracunetas merece consideración especial, pues es siempre difícil por lo inaccesibles que suelen quedar, una vez que el camino está en operación. Esto hace que se inspeccionen pocas veces, por lo que sus defectos se enmascaran, de modo que no es raro verlas con deterioros muy graves, que pueden ser fuente de serios problemas ulteriores; los autores han visto contracunetas no revestidas que, a partir de las dimensiones iniciales usuales, se habían convertido por erosión en tajos de 3 ó 4 m de profundidad, a partir de los cuales el agua tenía la posibilidad de infiltrarse a la masa del corte con las peores consecuencias; en otras ocasiones, esa labor erosiva hace que desaparezcan pendientes originalmente apropiadas, creándose zonas de agua estancada, que también propician infiltraciones de consideración. Aún en las contracunetas revestidas, la falta sistemática de conservación conduce a infiltraciones a través de agrietamientos que inevitablemente van apareciendo en los revestimientos, sobre todo de suelo-cemento y suelo-asfalto, pero aún también en los de mampostería y concreto.

La conservación de las contracunetas ha de hacerse casi siempre a mano, pues resulta engorroso movilizar el equipo hasta ellas; ésta es, a veces, otra razón para que tal conservación se descuide. En resumen, la experiencia de los autores es que las labores de conservación de las contracunetas se descuidan tanto y con tan malas consecuencias, que los ingenieros proyectistas han de tomar seriamente en cuenta esta circunstancia antes de proponerlas y, sobre todo, antes de recetarlas rutinariamente; si la conservación no está realmente garantizada, probablemente valdrá más no utilizarlas, sobre todo si no se han de revestir.

Finalmente, ha de insistirse una vez más en que muy frecuentemente las contracunetas tienen pendien-



Fallas en corte propiciadas por contracunetas no revestidas.

se revisten, suelen usarse los mismos materiales que se mencionaron para el caso de las cunetas. En este caso las operaciones necesarias para el revestimiento se complican por la necesidad de llevar los materiales a los lugares elevados en que han de emplearse. Todos los criterios que suelen manejarse para definir si una contracuneta debe o no ser revestida son análogos también a los que se mencionaron para el caso de las cunetas, como también lo son todas las consideraciones en que tales criterios se fundamentan, tales como, ejemplo, la información contenida en la tabla

2. Las contracunetas presentan el caso especial de sus tramos extremos, de muy fuerte pendiente, en los que el uso de revestimiento suele ser mucho más frecuente e indiscutido.

Precisamente el aspecto del revestimiento de las contracunetas es el que da lugar a prácticas tan inconvenientes, que llega a ser razonable muchas veces el preguntarse si estas obras complementarias deben emplearse en absoluto. Por razones de costo, los ingenieros de vías terrestres tienden, como es natural, a no revertirlas casi nunca o nunca y en tal caso se llega a producir en la corona del corte una sección en la que se desarrolla una zanja permeable. Si el suelo del corte es arcilla relativamente permeable o suelo constituido por mezclas susceptibles a los cambios de humedad, esta zanja permite entrar agua al cuerpo del corte, con las consecuencias ya discutidas otras veces; por esta razón no es raro ver que en carreteras o vías férreas en que se han usado contracunetas no revestidas, el trazo de éstas es precisamente el inicio de la superficie de falla en la corona del corte, superficie que probablemente no se hubiera formado de no existir la obra complementaria de drenaje.

Es prácticamente seguro que puede afirmarse que todos los casos en que la contracuneta pueda ser o necesaria, o se pone revestida o será preferible no ponerla, pues los riesgos que implica colocarla en una mala condición (la eventual falla total del corte) superan con mucho a sus posibles beneficios (proteger la superficie del talud de erosiones y a las cune-

tas o a la propia corona de invasión de aguas no controladas). Una mala contracuneta conduce muy probablemente a un gran derrumbe; el no ponerla allí donde era necesaria, produce un tramo de mal comportamiento, susceptible de ser fácilmente detectable y corregido por varios métodos, incluyendo la construcción de una buena contracuneta.

Las reflexiones anteriores incluyen condicionantes en cuanto a la necesidad de construir contracunetas y es que, en efecto, pocas veces una obra complementaria se prodiga rutinariamente en tantos casos en que es inútil o muy poco útil y ello a pesar de su alto costo.

El criterio para definir la necesidad de contracunetas ha de basarse en consideraciones topográficas y de la naturaleza de los materiales que formen los cortes, los terraplenes vecinos y el terreno natural en la zona en estudio. La topografía define en mucho los escurrimientos que sea dable esperar sobre el talud; por ejemplo, en lomas muy pendientes hacia las cañadas que las limiten lateralmente, será de esperar que la gran mayoría de su escurrimiento superficial reconozca tales pendientes, ocurriendo por consecuencia paralelamente a la vía terrestre y no hacia ésta; allí no se precisarán contracunetas, muy especialmente si el terreno está vegetado o es superficialmente poco permeable, como suele suceder. En otras ocasiones, la topografía hace que la cuenca de captación sobre la corona del corte sea realmente muy pequeña. Naturalmente, la pendiente de esa cuenca también ha de considerarse.

La naturaleza de los materiales por proteger es determinante. Muchas veces es posible ver contracunetas construidas en zonas de suelos muy resistentes a la erosión o muy bien protegidos; los autores han visto contracunetas trabajosamente labradas sobre cortes en roca sana que no tenían problemas especiales de escurrimiento.

En resumen, será preciso pensar en la conveniencia de construir contracunetas, en primer lugar, en aquellos cortes no protegidos por una topografía apropiada, vale decir en los hechos en laderas y lomas con pendiente sostenida hacia la vía terrestre en extensiones grandes, que ofrezcan áreas de captación de lluvia de consideración y, en segundo, en los formados por materiales erosionables y capaces de proporcionar corrientes importantes de gasto sólido, tales como suelos limosos, limo-arenosos, arcillosos, de depósitos de talud, formados por mezclas de suelos gruesos y material de empaque variado, pero más fino. Sin embargo, es fácil ver que en todos estos casos la contracuneta ha de ser revestida, so pena de caer en riesgos mayores que los que se desea evitar con ella. A veces, en consideración a los escurrimientos superficiales que de otro modo llegarían inevitablemente a las cunetas puede ser conveniente la construcción de contracunetas en cortes en roca. En tales casos, muy bien puede suceder que la necesidad de revestimiento sea tan perentoria como en los casos de

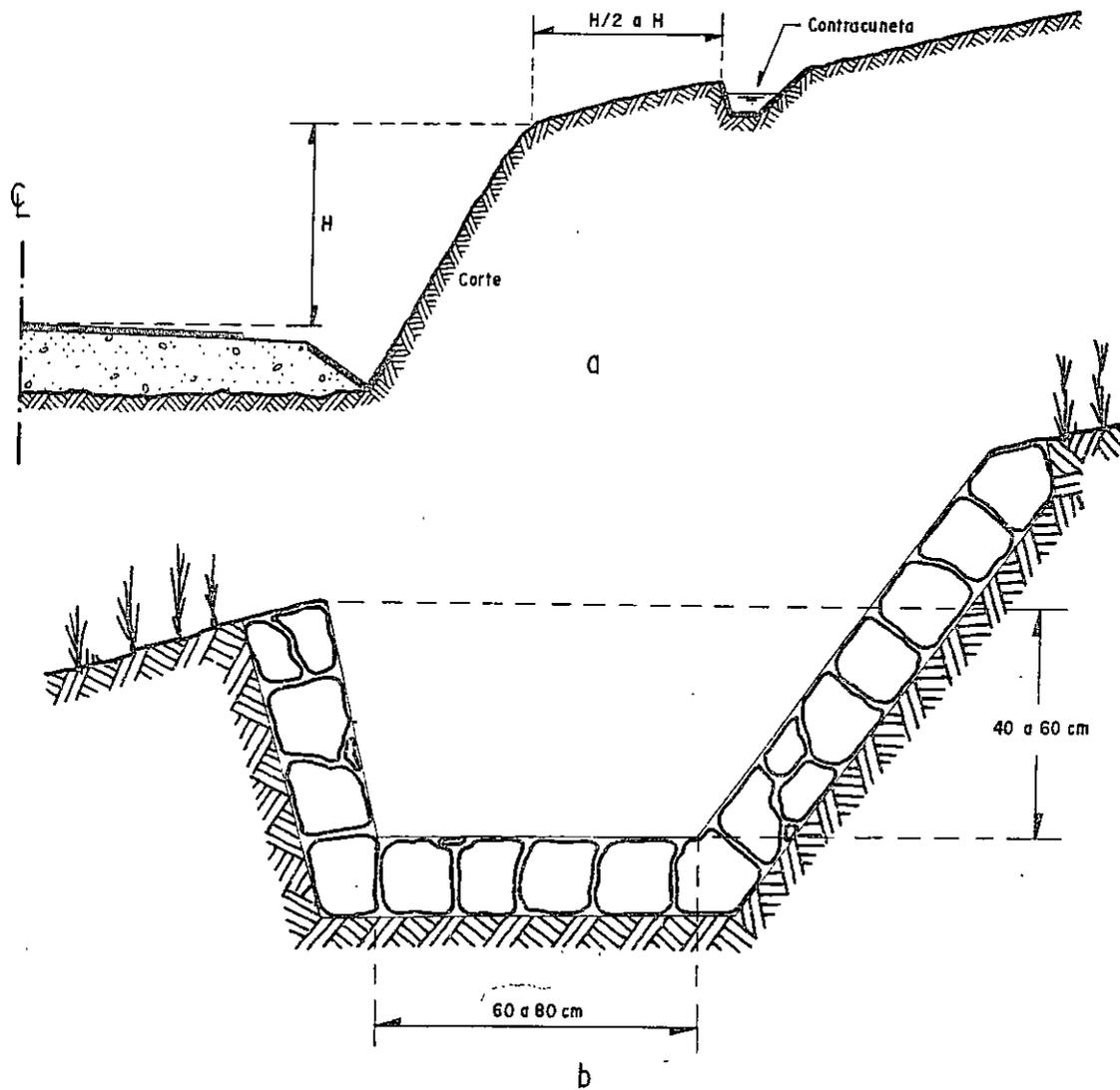
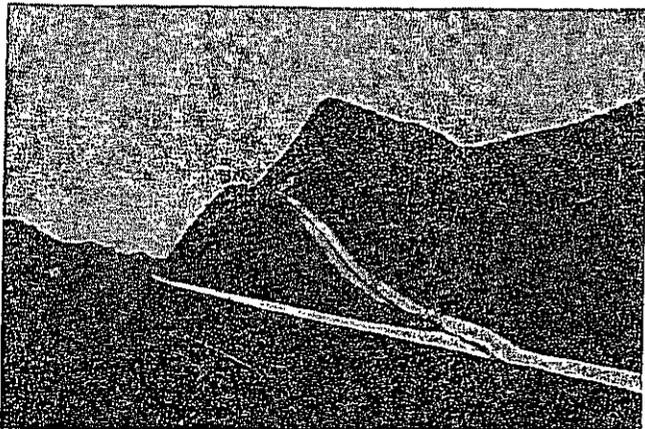


Figura XI-13. Contracuneta.

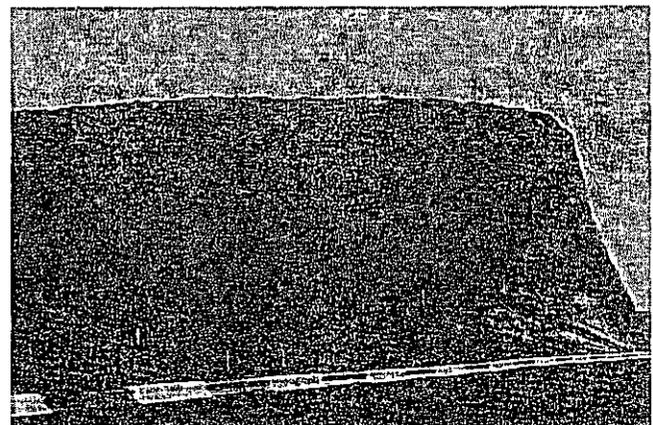
tracunetas formando un pequeño bordo, con material seleccionado de algún préstamo o con material producto de una excavación hecha en el mismo lugar, en cuyo caso ésta deberá efectuarse aguas arriba del bordo que se forme. Dicho bordo deberá situarse sobre

un pequeño despalme y estar formado por materiales apropiados y debidamente compactados.

Es norma relativamente común formar las contracunetas directamente en el terreno natural, sin revestirlas; sobre esta norma se harán comentarios en párrafos subsiguientes. Cuando las contracunetas



Una contracuneta bien impermeabilizada y complementada adecuadamente por escalonamiento en el corte.



Una gran contracuneta no revestida.

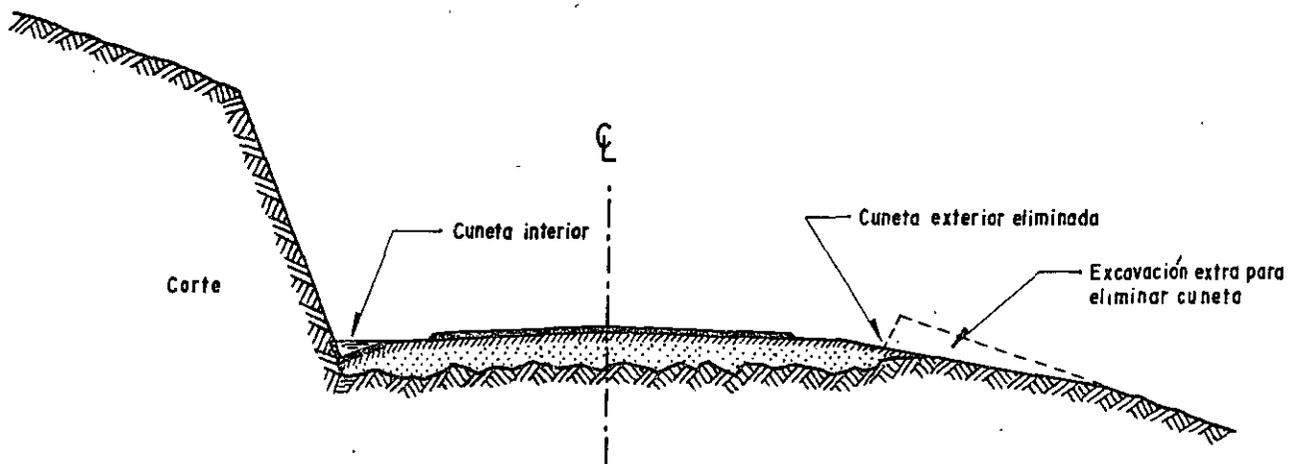


Figura XI-12. Eliminación de cunetas exteriores en cortes en cajón.

estas obras de eliminación es un punto delicado a contemplar siempre con cuidado en cada caso individual.

XI-11 LAS CONTRACUNETAS

Se denominan contracunetas a los canales, excavados en el terreno natural o formados con pequeños bordos, que se localizan aguas arriba de los taludes de los cortes, cerca de éstos, con la finalidad de interceptar el agua superficial que escurre ladera abajo desde mayores alturas, para evitar la erosión del talud, y el congestionamiento de las cunetas y la corona de la vía terrestre por el agua y su material de arrastre. (Fig. XI-13).

La contracuneta se construye a una distancia variable del coronamiento del corte y que depende de la altura de éste; se trata de que entre la contracuneta y el propio corte no quede un área susceptible de generar escurrimientos no controlados de importancia y, a la vez, de no colocarla demasiado cerca del corte, a fin de facilitar su trazo y permitir que se desarrolle sobre terreno que no se vea afectado por pequeños derrumbes que pudieran llegar a presentarse, pequeños abatimientos o trabajos de amacice que eventualmente hayan de hacerse, etc. En cortes de altura normal es frecuente que la contracuneta se encuentre a una distancia del coronamiento del corte comprendida entre la altura del mismo y la mitad de ese valor; en cortes altos, el punto más próximo de la contracuneta puede estar a unos 8 ó 10 m del coronamiento del corte.

El desarrollo de la contracuneta debe ser sensiblemente paralelo al propio corte; de esta manera el canal se va desarrollando con pendiente longitudinal. Si la loma en la que se construyó el corte es muy empinada, un trazo paralelo podría dar lugar a pendientes excesivas en la contracuneta, por lo que en ese caso su trazo deberá ceñirse más o menos a las curvas del nivel de la superficie de la loma, alejándose los extremos de la contracuneta de la vía terres-

tre; obviamente estos extremos deberán trazarse cortando dichas curvas de nivel, de modo que el canal vaya teniendo una pendiente apropiada.

La contracuneta debe conducir el agua captada a cañadas o cauces naturales en que existan obras que crucen la vía terrestre y es normal que para evitar excesivo desarrollo del canal los extremos lleguen a tener pendientes muy considerables, funcionando como auténticos lavaderos.

La sección del canal está, naturalmente, definida por su capacidad hidráulica, a su vez, relacionada con la frecuencia e intensidad de la precipitación pluvial en la zona, el monto del área drenada y las características de dicha área en cuanto a escurrimiento del agua superficial. Las Refs. 3 y 6 proporcionan criterios para efectuar el diseño hidráulico, estimando primeramente el gasto esperado y relacionando este dato después con la pendiente, a fin de llegar a una sección hidráulica; suele ser posible realizar este análisis con varias alternativas de trazo, para poder comparar los costos a que se llega estudiando algunas posibilidades de desarrollo y la necesidad de excavación, relacionada ésta con la magnitud de la sección requerida para el canal. A despecho de lo anterior y a causa de la falta de información, que produce grandes incertidumbres en los análisis hidráulicos e hidrológicos, las contracunetas suelen dimensionarse por proyecto tipo, formando un canal de sección trapezoidal con 60 u 80 cm de plantilla y taludes conformados de acuerdo con la naturaleza del terreno; la profundidad de este canal también está normalmente comprendida entre 40 y 60 cm. En contracunetas no revestidas el talud aguas arriba debe ser más tendido para evitar erosión, pero esta distinción se hace menos necesaria si se usan revestimientos. Cuando se construyen excavando un canal, las contracunetas se excavan a mano o con equipo ligero (zanjadoras, tractores livianos, conformadoras, etc.); el material producto de la excavación debe de colocarse aguas abajo de ella (por lo menos a 1 m) o, lo que generalmente es mejor, debe retirarse.

En algunas ocasiones se han construido las con-

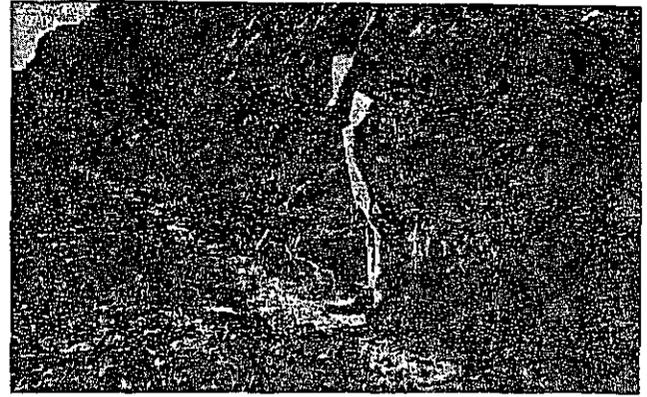
fondo de la cuneta, causada por el agua que circula, ni el humedecimiento de los materiales de las capas superiores del pavimento por el agua que eventualmente llegue a infiltrarse desde la cuneta. La primera condición indica que no deberán revestirse cunetas labradas en roca, suelos en grandes fragmentos o las que quedarán sujetas a un flujo de agua escaso o eventual, sea porque el área tributaria de la cuneta, hidrológicamente hablando, sea pequeña o porque la duración de las tormentas sea muy breve en el lugar y éstas sean esporádicas. La infiltración del agua de las cunetas al pavimento será relativamente inofensiva cuando la cama del corte sea muy permeable y cuando las capas superiores del pavimento, la subrasante y las terracerías lo sean también o cuando una base muy permeable y abierta sea la cama de un corte en roca y exista buena pendiente transversal en el lecho inferior de la base y longitudinal en el corte. Tampoco habrá necesidad de revestir las cunetas de cortes con muy fuerte pendiente longitudinal, siempre que su fondo no sea susceptible a la erosión.

Naturalmente que el enlistado anterior de casos no pretende ser exhaustivo, sino simplemente ilustrativo.

Debe observarse que algunos de los requisitos implícitos en las condiciones arriba señaladas son contradictorios; por ejemplo, los materiales muy permeables suelen ser muy erosionables, de manera que la decisión de revestir o no las cunetas debe ser producto de un balance de muchos factores generales y locales, que no siempre actúan en el mismo sentido, por lo que es natural que el punto sea debatible, independientemente de que también sea de los que dan poco margen de error, pues una mala decisión puede acarrear graves consecuencias.

En épocas recientes está tomando cierta fuerza la opinión de suprimir por completo las cunetas en los caminos pavimentados con carpetas asfálticas o con losas de concreto. En estos casos se prolonga la superficie del pavimento en todo el ancho del acotamiento, hasta el pie del corte, en donde es frecuente construir una pequeña guarnición, que no suele ser más que un realce o remate de un par de centímetros, para tener una buena liga con el talud del corte. Para facilitar la eliminación del agua que se concentra en la zona es común incrementar en el acotamiento el bombeo transversal de la sección, que si generalmente es de 1.5 ó 2 %, se hace pasar a 4 % en dicha zona. Esta práctica, combinada con una pendiente longitudinal apropiada, es suficiente, a juicio de sus defensores, para garantizar la eliminación del agua. Desde luego, una práctica constructiva tal tiene probablemente ventajas económicas en la construcción y obviamente las tiene en la conservación, pues a las costosas y engorrosas faenas de limpieza de cunetas opone la limpieza de un acotamiento, que es mucho más sencilla y puede hacerse con motoconformadora.

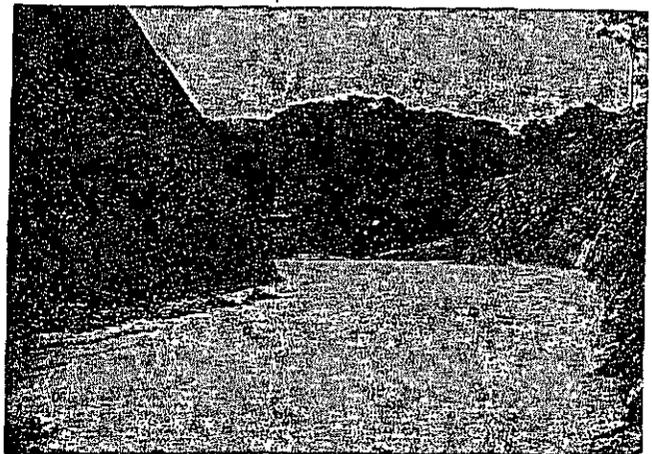
No parece haber aún suficiente experiencia para recomendar en forma general un criterio como el



Supresión de cunetas colocando una banqueta protegida por vegetación.

anterior, pero no cabe duda de que no carece de cierta lógica y de que se ve muy atractivo en algunos casos particulares, por ejemplo en aquellos caminos que poseyendo cunetas han de ser ampliados en ancho de sección; suprimir tales elementos contribuye al nuevo ancho de una manera muy tentadora. Tampoco parece haber duda de que se ha abusado de la construcción de cunetas, que se ha transformado en algo excesivamente rutinario, al grado que no es raro verlas en cortes en balcón, del lado del corte, en secciones en curva con sobre-elevación hacia el terraplén, en las que seguramente el agua no tiende a almacenarse en el lado en que se ponen. Otro caso en que con frecuencia resulta conveniente eliminar las cunetas es el de cortes en cajón, cuando uno de los lados es de muy pequeña altura y exista definida tendencia a que haya agua en ese lado, por bombeo, por sobre-elevación o por otra causa, de manera que se considere necesario hacer ahí cuneta. Sobre todo si ésta ha de revestirse, puede resultar mucho más económico y conveniente eliminar el lado bajo del corte con la excavación correspondiente. El caso se ilustra en la Fig. XI-12.

Al final de su recorrido las cunetas descargan por lavaderos y bajadas a alcantarillas, cañadas, cauces naturales, etc. Ya se ha mencionado que la liga con



Cunetas revestidas en una formación susceptible de producir pequeños derrumbes que las obstruyan.

critorio. Cuando el piso del túnel es roca o está recubierto, es frecuente que la cuneta sea una simple zanja en taludes verticales, construida bajo el balasto; también puede darse al piso del túnel pendiente de ambos lados hacia el centro, colocando ahí un tubo perforado o una simple zanja. Al no existir en las vías férreas la limitación psicológica del conductor del vehículo, que obliga a usar taludes muy tendidos en los lados de las cunetas vecinos a una carretera, los taludes de las cunetas de los ferrocarriles quedan condicionados sólo por consideraciones de capacidad hidráulica; es común verlas con taludes muy excarpados o aún verticales, lo que contribuye a paliar el problema de la profundidad de excavación en las cunetas, sin aumentar el ancho de las secciones en corte.

Especialmente en los llamados países en vías de desarrollo es práctica frecuente construir una carretera en lo que a sus terracerías se refiere, revistiéndola y abriéndola al tránsito, esperando para su pavimentación definitiva que éste se desarrolle convenientemente. Esta práctica conduce a la necesidad de construir cunetas provisionales, inclusive revestidas cuando sea necesario, por ejemplo con suelo-cemento, pues la alternativa de no hacerlas puede causar en muchos casos daños de importancia que transformen la imprescindible conformación de la sección en corte para los trabajos de pavimentación definitiva, en una verdadera reconstrucción sumamente costosa.

Durante la construcción de caminos, aún cuando vayan a pavimentarse de inmediato, es común en ciertos cortes tener que construir también cunetas provisionales para facilitar los trabajos. De hecho esta práctica se ha convertido en rutina para algunas instituciones, lo cual no se ve justificado en principio, pues seguramente no todos los cortes requerirán tales obras provisionales.

Cuando un camino originalmente revestido se pavimenta en forma definitiva no es raro que se cometa el error que se representa en la Fig. XI-11.

En ella se acepta, en primer lugar, que se ha construido la cuneta definitiva, supuesta revestida a partir del hombro de la corona, respecto a lo cual caben los comentarios ya hechos, pero el error que ahora se desea resaltar es otro. Suele ser condición que el ancho de la corona del camino revestido (nivel I) y el del pavimento definitivo (nivel II) sea el mismo; también suelen levantarse los niveles necesarios conservando en la cuneta definitiva las mismas dimensiones que se tenían en la cuneta provisional (dimensiones m y d en la figura). La combinación de estas condiciones conduce a la aparición del pequeño rellano de ancho s que se muestra en la propia Fig. XI-11. En algunos casos y cuando la cuneta se reviste con concreto puede verse que el constructor prolonga el revestimiento hasta cubrir todo el espesor s , pero en muchas ocasiones éste se deja descubierto, siendo origen de problemas de humedecimiento del pavimento, por proporcionar una entrada de agua, además de que la cuneta recubierta resultará inestable y fácil de dañarse. Sin duda resultará mejor práctica evitar el escalón s , bien sea prolongando la cuneta definitiva en lo necesario o aumentando ligeramente el ancho de la corona en el pavimento definitivo. Si la nueva cuneta no ha de revestirse, la práctica normal será prolongarla lo necesario, sin formar el escalón tantas veces citado, pues el ingeniero constructor no tendrá ya la compulsión del ahorro del concreto en el revestimiento, que es seguramente la causa de la práctica viciosa que se ha señalado.

El cuando revestir las cunetas o cuando poder ahorrarse el trabajo, que suele resultar costoso, es uno de los aspectos más apasionadamente debatidos en la construcción de las obras complementarias de drenaje. No parece posible establecer reglas generales al respecto, dado el número grande de elementos de decisión que han de ponderarse, juicio que, se comprende, no ha de contribuir a evitar discusiones. En términos generales podrá prescindirse del revestimiento cuando no sea de temer ni la erosión del

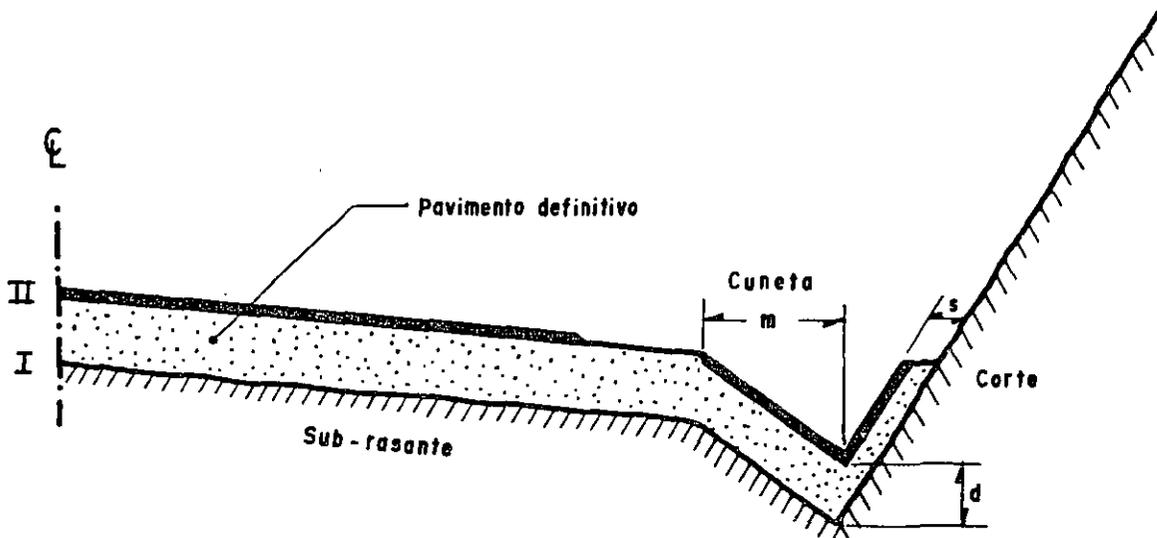


Figura XI-11. Un defecto común al convertir una cuneta provisional en definitiva.

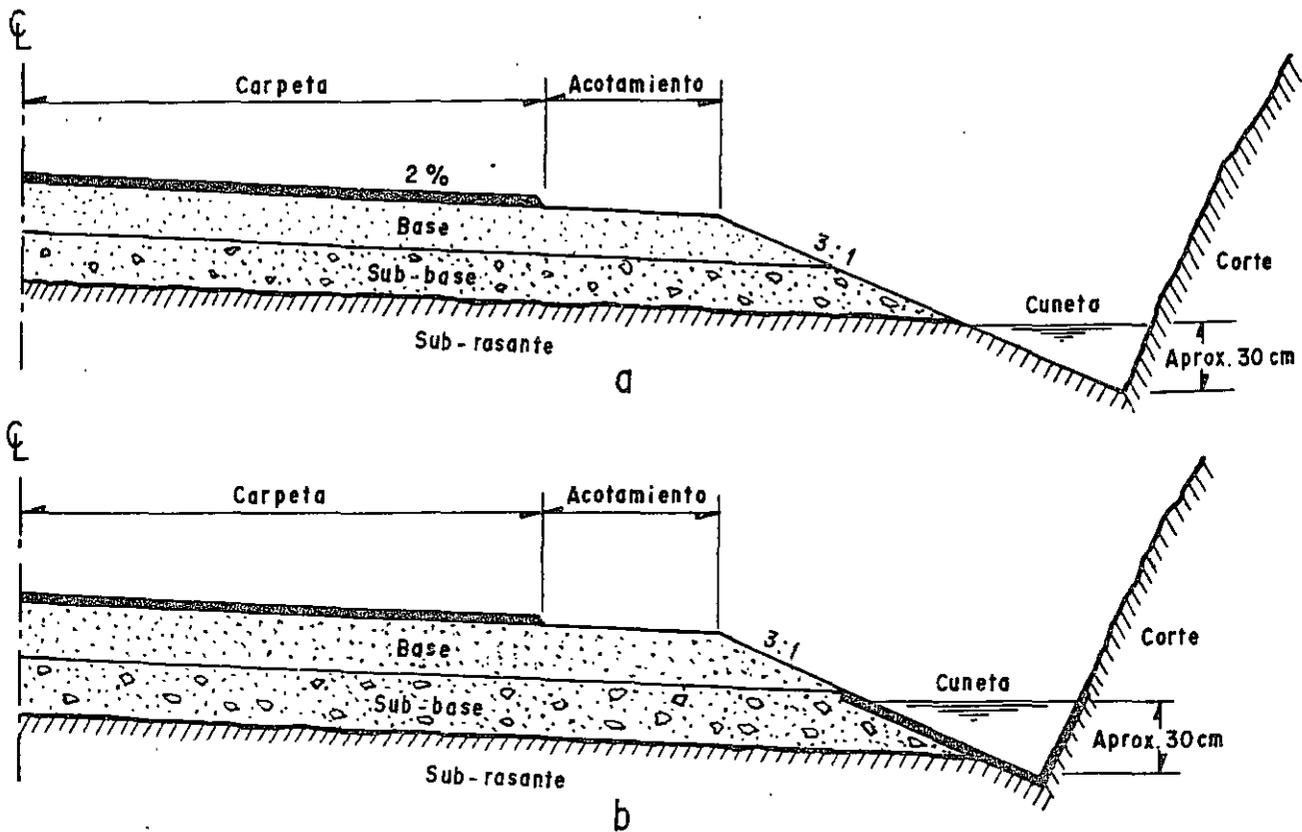


Figura XI-10. Disposición más conveniente de la cuneta, respecto al pavimento. Sección en corte, sin subdrenaje.

por abajo de la sub-base, a fin de fomentar la función drenante de esta capa.

Debido a los costos, es muy frecuente que las exigencias anteriores no se respeten. Algunos ingenieros se ven animados a esta actitud por el hecho de que consideran inconveniente el remate de una base o una sub-base al extremo del acotamiento, con talud 3:1, pero sin ningún confinamiento. Dicha objeción se ve razonable, pero no insuperable; simplemente daría lugar a la situación que, por otro lado, prevalece en todos los terraplenes y balcones. Parece más conveniente circunscribir la decisión al costo. Esto conduce a que en muchos países sea muy común ver a la cuneta, revestida o no, comenzando en el lecho superior de la base, inmediatamente al fin del acotamiento; de esta manera, la base y la sub-base quedan expuestas a la invasión del agua de la cuneta, muy especialmente cuando, como es tan normal, ésta sufra alguna interrupción por pequeños derrumbes u otras causas. Una práctica como la anterior puede producir fallas en pavimentos que de otra manera no fallarían.

Los autores piensan que es difícil tomar en torno a este problema una decisión que desemboque en una regla general; creen que la política debe definirse en cada caso, tomando en cuenta la cantidad de agua que haya de ser eliminada, la duración de estaciones lluviosas en la zona y las calidades de los materiales que constituirán el pavimento como un conjunto, es

decir, considerado desde el terreno de cimentación hasta la carpeta.

Naturalmente que si la sección en corte tiene subdrenaje lateral, el problema anterior no se presenta y todas las capas se continúan hasta el subdrén y desfogan en él. La Fig. VII-17, del Tomo I de esta obra, puede servir de ejemplo de cómo se dispone la cuneta en estos casos, encima del subdrén, junto al acotamiento y sin problemas de drenaje en las capas del pavimento.

Si alguna de las capas de pavimento ha sido proyectada específicamente como capa drenante o como capa rompedora de capilaridad (Capítulo VII del Tomo I), esta condición deberá tomarse en cuenta al reflexionar en torno a los problemas arriba planteados y llegar a la decisión que convenga. En la capa drenante siempre habrá que dejar desfogar y en la rompedora no podrá permitirse que se anegue, so pena de nulificar su función.

En las vías férreas las cunetas se disponen sistemáticamente de manera que su lámina de agua quede bajo el lecho inferior del balasto. Respecto al subbalasto caben los mismos comentarios que se hicieron para la sub-base de las carreteras, si bien ha de notarse que suele ser práctica común de los constructores de vías férreas comenzar sus cunetas a partir del lecho inferior del sub-balasto respetando siempre su función drenante. Para evitar problemas de filtraciones los túneles de las vías férreas deberán llevar invariablemente cunetas, construidas con el mismo

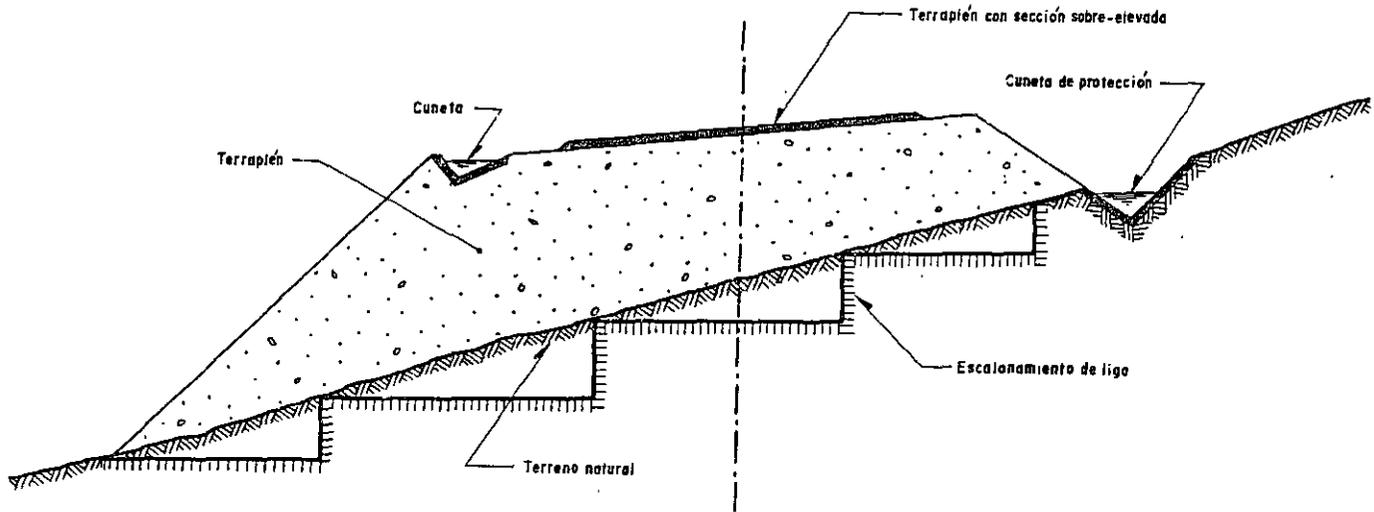


Figura XI-9. Cunetas en secciones en terraplén.

Podría evitarse la construcción de lavaderos haciendo continuar esta cuneta, con la pendiente adecuada, hasta verter el agua en el terreno natural; así la cuneta ocuparía diferentes elevaciones respecto a la sección transversal a lo largo del terraplén hasta quedar alojada en su pie. De adoptar este criterio deberán cuidarse todos los aspectos relacionados con la ubicación de la cuneta en el talud, que es una zona de materiales poco compactados, susceptibles al movimiento y muy vulnerables a la acción del agua. También deberá notarse que las cunetas que se alojen sea en la corona del terraplén o en su talud requerirán ser sistemáticamente recubiertas de concreto.

La misma Fig. XI-9 muestra otro tipo de cuneta que a veces se construye en las secciones en terraplén. Se trata de una cuneta de protección en el pie del talud aguas arriba; se pretende evitar la acumulación del agua en esa zona y la posibilidad de que se infiltre bajo el terraplén, lo que, como ya se comentó, da lugar a problemas delicados. Obviamente estas cunetas deberán también recubrirse sistemáticamente con concreto. Constituyen una solución cara, pero que pudiera ser muy conveniente en muchos casos e indispensables en muchos lugares en donde se reconstituyen zonas falladas.

Es importante la relación de niveles entre la lámina de agua en la cuneta y las capas de pavimento. La función drenante de la base hace necesario que la frontera superior de la lámina de agua en la cuneta quede por abajo del lecho inferior de la base; indudablemente también es conveniente que la lámina de

agua de referencia quede inclusive bajo el lecho inferior de la sub-base, para evitar el humedecimiento de ésta, cuando la cuneta no está revestida. La Fig. XI-10.a muestra la disposición ideal respecto a las capas del pavimento en esta situación. Si la cuneta está revestida y debidamente impermeabilizada, por el contrario no será necesario profundizarla tanto, bastando que quede su lámina de agua bajo el nivel de la base, pues ya no existirá el peligro de que el agua colectada invada la sub-base. En la Fig. XI-10.b se muestra esta situación, considerando la cuneta revestida.

Dado que el espesor combinado de la base y la sub-base es fácilmente del orden de 40 cm y frecuentemente es mayor, la disposición de la Fig. XI-10.a puede conducir a una excavación importante para conformar la cuneta, en la que se rebasa en todo el espesor de las capas superiores del pavimento lo que sería indispensable excavar para lograr la capacidad hidráulica necesaria; al considerar que el talud de la cuneta hacia la vía será por lo menos de 3:1, se llega a concluir que una exigencia como la anterior conduce a incrementar el ancho de la corona en las secciones en corte en balcón, en un metro y en las de corte en cajón, en dos metros, lo cual resultará costoso. En el caso de la cuneta revestida (Fig. XI-10.b), la exigencia anterior conduce a incrementos en el ancho de la corona del orden de la mitad de los anteriores, lo que también encarece correspondientemente la construcción. En este último caso aún sería discutible si no convendría colocar la cuneta también

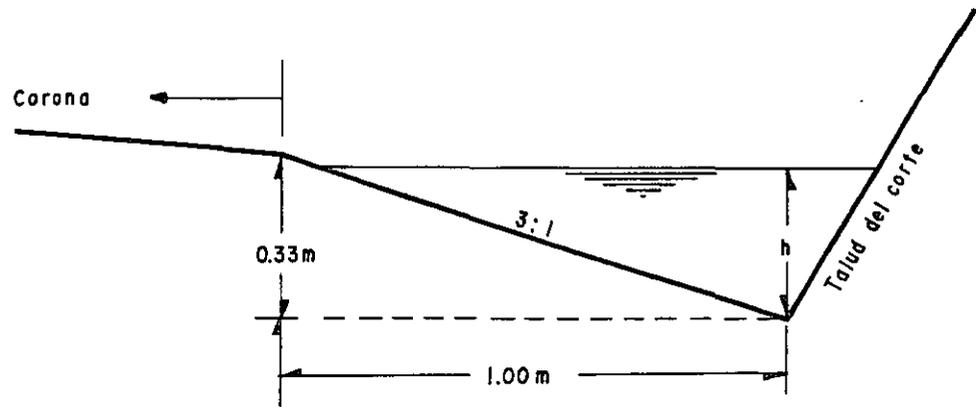


Figura XI-8. Sección triangular típica de una cuneta.

proporciona los gastos que pueden calcularse en la cuneta de la Fig. XI-8 para distintas pendientes del camino y velocidades del agua.

Las cunetas se construyen generalmente de sección trapecial o triangular. En la práctica mexicana, la triangular es con mucho la más frecuente (Fig. XI-8). El talud hacia la vía es como mínimo 3:1, preferentemente 4:1 y el del lado del corte sigue sensiblemente la inclinación de éste. Se prevé una lámina de agua de no más de 30 cm.

La sección rectangular ha sido generalmente abandonada por razones de ingeniería de tránsito, debido al efecto canalizador que produce la sensación de peligro que siente quien transita cerca de ella. Por esta misma razón, la sección trapecial se hace cada vez menos, como no sea con el borde vecino a la carretera muy tendido. La sección triangular es la más conveniente y fácil de construir; se conforma al terminar la capa subrasante y el trabajo puede hacerse con motoconformadora. Su conservación es también la más sencilla. En vías férreas, algunas de las virtudes anteriores de la cuneta triangular desaparecen, por lo que es más frecuente el uso de las otras dos secciones, si bien también se usa frecuentemente la sección triangular.

Cuando las cunetas se revisten, usualmente ello se hace con mampostería o concreto hidráulico. En el primer caso suele utilizarse mortero con proporción 1:4 (90 kg de cemento por cada metro cúbico de mampostería) y en el segundo pueden utilizarse losas coladas en el sitio o precoladas. La menor rugosidad del concreto lo hace más eficiente hidráulicamente que el zampeado de mampostería; con el concreto puede también construirse con mayor rapidez. Las losas utilizadas suelen tener alrededor de 1 m de longitud y tener juntas selladas, para evitar fugas de agua. Cabe decir que la política más usual en muchos países es no revestir las cunetas en absoluto y esto por razones fundamentalmente económicas: es también de comentar que su recubrimiento con vegetación puede constituir una magnífica protección si las velocidades del agua no son altas (1 ó 1.5 m/seg Ref. 8), aunque la capacidad hidráulica de la cuneta se vea disminuida por el correspondiente aumento en el coeficiente de rugosidad.

Los recubrimientos con suelo-cemento y suelo-asfalto se han empleado relativamente poco en la práctica mexicana y algo más en la de algunos otros países. Resultarán recomendables cuando se tengan a mano materiales arenosos, susceptibles de alcanzar una resistencia y unas condiciones de permanencia altas con contenidos relativamente bajos de material estabilizante. Proporciones de aumento del orden de 6% a 7%, en peso, y de cemento asfáltico del orden de un 4% a un 6%, también en peso, son probablemente frecuentes en la mayor parte de los trabajos prácticos. Antes de adoptar una solución de este estilo deberán ponderarse con cuidado todas las dificultades constructivas que implica, entre las que destacan el mezclado del estabilizante, los transportes y el tendido y la compactación de las mezclas; es común que los análisis económicos cuidadosos hagan ver como inconveniente el uso de productos estabilizados en casos que a primera vista parecían muy favorables. Además, ha de tenerse en cuenta que la duración de estos recubrimientos es siempre inferior al concreto y a la mampostería y que, lógicamente, los problemas de conservación son mayores. La compactación de estos recubrimientos suele hacerse con equipos manuales vibratorios.

En algunas ocasiones se han utilizado las cunetas en terraplenes (Fig. XI-9).

Se muestra una sección en curva, con la sobre-elevación correspondiente. En la corona se muestra un tipo de cuneta que se dispone en algunas ocasiones, con la función que en otros casos corresponde a los bordillos. Es posible que esta solución pueda resultar eficiente desde el punto de vista hidráulico en zonas de precipitación pluvial intensa y en carreteras de corona ancha. Por otra parte, habrá que cuidar mucho los aspectos de ingeniería de tránsito relacionados con esta práctica, que exigirán que la cuneta se construya allende el acotamiento, lo que ocasiona un ancho extra de corona; de otra manera, la interferencia con la circulación de los vehículos podría ser importante. Obviamente, esta solución exige la construcción de lavaderos o bajadas, si bien su número podría ser menor que en el tratamiento convencional a base de bordillos, por la mayor área hidráulica de la cuneta. Se ocurre que en algunos casos



Cuneta en la zona central de una autopista.

cuneta, si la hubiere o el terreno natural aguas arriba del corte, si no hay contracunetas. También puede recibir la cuneta agua que haya caído sobre la corona de la vía, cuando la pendiente transversal de ésta tenga la inclinación apropiada para ello.

La capacidad hidráulica de la cuneta como canal define principalmente la posibilidad de cumplir su función de canalizar y eliminar con rapidez el agua que colecte. El gasto por drenar depende del área de influencia, del coeficiente de escurrimiento y de la intensidad de lluvia durante un tiempo igual al de concentración. El proyecto hidráulico de detalle (Refs. 5 y 6), que se considera, por otra parte, fuera del alcance de esta obra, se dificulta generalmente por falta de registros adecuados y suficientes de las intensidades de lluvia, que han de ser establecidas con base en información de pobladores de la región o de datos pluviométricos que existan en los lugares más próximos, todo lo cual introduce importantes elementos de incertidumbre a los cálculos que puedan hacerse.

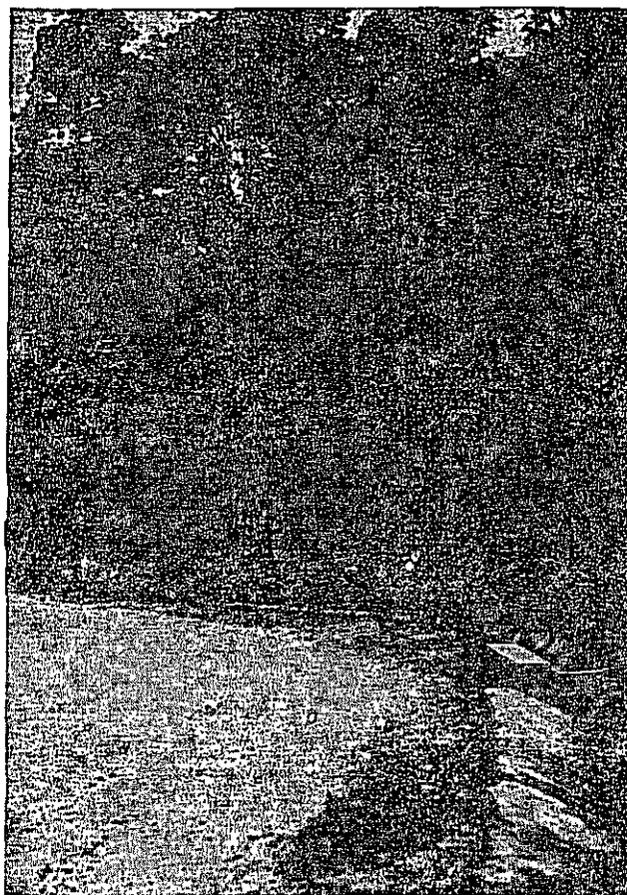
La pendiente longitudinal mínima que debe existir en una cuneta es de 0.5 %. La velocidad con la que el agua circule sobre ella debe quedar comprendida entre los límites de depósito y erosión, ambos indeseables.

La tabla XI-2 (Ref. 7) proporciona, como norma

TABLA XI-2

Valores máximos de velocidades no erosivas en cunetas (Ref. 7)

<i>Material</i>	<i>Velocidad (m/seg)</i>
Arenas finas y limos	0.40-0.60
Arcilla arenosa	0.50-0.75
Arcilla	0.75-1.00
Arcilla firme	1.00-1.50
Grava limosa	1.00-1.50
Grava fina	1.50-2.00
Pizarras suaves	1.50-2.00
Grava gruesa	2.00-3.50
Zampeados	3.00-4.50
Rocas sanas y concreto	4.50-7.50



Cuneta revestida mostrando caja de entrada a una alcantarilla de alivio.

de criterio, la máxima velocidad que puede alcanzar el agua sobre los materiales que se citan sin provocar erosión.

A despecho de los altos valores señalados en el último renglón de la tabla XI-2, parece conveniente limitar la velocidad del agua en las cunetas a 3.00 m/seg en zampeados y a 4.00 m/seg en concreto (Ref. 1).

El gasto que puede eliminar la cuneta es una función muy sensible de su pendiente longitudinal, pero es dudoso que pueda exceder en ningún caso de 0.5 m³/seg (Ref. 1); valores mayores producen derrame. Como norma de criterio la tabla XI-3 (Ref. 9)

TABLA XI-3

Valores del gasto en la cuneta triangular de la Fig. XI-8 para distintas pendientes del camino y velocidades del agua (Ref. 9)

<i>Pendiente del camino %</i>	<i>Velocidad del agua m/seg</i>	<i>Gasto m³/seg</i>
1	0.63	0.11
2	0.89	0.15
3	1.09	0.19
4	1.26	0.22
5	1.41	0.24
6	1.54	0.27

vía terrestre, por ejemplo para conducir el agua colectada por un talweg hacia una cañada, que probablemente cruzará a la vía terrestre con una obra, convendrá que la excavación se ejecute aguas arriba del bordo, dando a la plantilla del canal así formado la pendiente necesaria para que el agua que llegue a caer en él sea conducida también hacia el cauce natural; de hecho, si este canal es profundo y formal, hará innecesario al bordo y el problema se habrá resuelto con un canal interceptor, que es una solución alternativa a contemplar. Cuando el canal producto de la excavación no sea profundo, ni esté conformado o cuando la zona de préstamo no esté inmediatamente próxima y alineada con el bordo, será cuando haya de hablarse de éste.

Los bordos de tierra suelen construirse con taludes 2:1 ó 3:1, en alturas que rara vez rebasan 2 m y con un ancho de corona en el orden de los 50 cm. En muchos países es común que se construyan a mano, realizando de esta manera también una compactación elemental del material que se coloca; para ello se utilizan pisones. Si se espera que el agua se mueva con cierta velocidad a lo largo del talud aguas arriba, podrá pensarse en proteger éste con piedra o en substituir el bordo por un murete de mampostería.

Antes de construirse el bordo debe despalmarse el terreno, exclusivamente bajo él, respetando la vegetación vecina y guardando el material de despalme aguas arriba para después colocarlo, todo o en parte, sobre el talud del bordo, para fomentar su vegetación.

Los bordos que encauzan las aguas hacia alcantarillas y obras de drenaje son en general estructuras bastante más formales que los anteriores, pues han de sufrir el embate de aguas rápidas. En estos casos serán comunes las protecciones de taludes con enrocamiento, la construcción con mampostería de buena calidad y aún el uso de muros de concreto (deflectores).

En muchas ocasiones los propios taludes del terraplén de la vía funcionarán como bordos encauzadores de escurrimiento hacia obras de drenaje; estos casos han de ser cuidadosamente detectados para planear las protecciones correspondientes, con vegetación, enrocamiento, mamposterías o muros de concreto, según las velocidades que se esperen en el agua encauzada.

Los ingenieros a cargo del drenaje de los caminos descuidan a veces la descarga de las aguas colectadas y encauzadas, la cual ocurre aguas abajo de la vía terrestre. Esta descarga, en ocasiones, causa daños en terrenos de labor, pastizales y aún en caseríos. Debe tenerse muy presente que la vía terrestre al interrumpir el drenaje general de una zona con su presencia y concentrar la descarga de las aguas que la cruzan en algunos puntos aislados, puede fácilmente generar problemas hidráulicos aguas abajo en zonas en que no existían previamente. Prever y solucionar estos problemas y eliminar las aguas que perjudicarían a su obra sin perjuicios de terceros debe ser una obli-

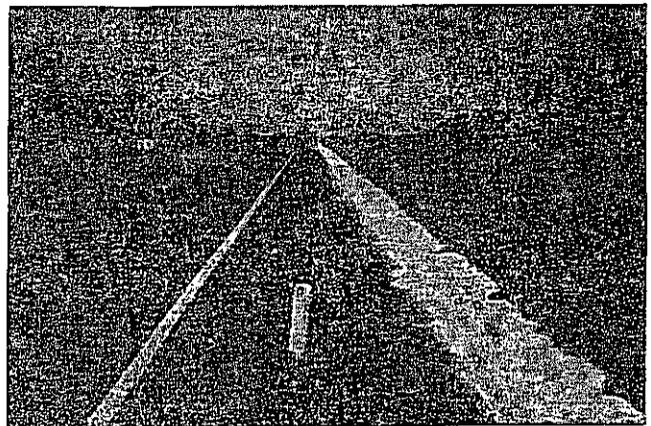
gación ineludible de los ingenieros a cargo del drenaje de la vía. Esta obligación conduce muchas veces a la construcción de bordos y canales que viertan las aguas en donde no perjudiquen a nadie; frecuentemente los bordos que han de construirse por este concepto son largos e importantes.

También pueden ser de envergadura los bordos de protección a cuya construcción obligue la presencia de un río o arroyo susceptible de erosionar, una zona de inundación o los perimetrales que han de hacerse en torno a pistas de aeropuertos que invadan terrenos pantanosos, inundables o zonas lacustres. Obviamente en todos estos casos, en que han de erigirse bordos altos, de cuya estabilidad depende en mucho la vida de la vía terrestre, habrán de emplearse recursos tecnológicos adecuados, dedicándoles un proyecto especial y cuidadoso, fundamentado por un estudio geotécnico de detalle. Los métodos para realizar tales estudios serán los mismos que se empleen en la vía terrestre que protegen, como también serán análogos los métodos constructivos.

XI-10 LAS CUNETAS

Las cunetas constituyen las obras complementarias de drenaje de uso más extendido y universal, hasta el grado de que muchos objetan su inclusión en un enlistado de obras "complementarias". Aquí se incluyen en esa categoría, considerando que dicha calificación no implica escasa frecuencia de utilización, sino tipificación dentro de un grupo de obras con objetivo común.

Las cunetas son canales que se adosan a los lados de la corona de la vía terrestre, en el lado del corte en secciones de tal naturaleza; en cortes en balcón hay entonces cuneta en un solo lado y en cortes en cajón, en los dos. La cuneta se dispone en el extremo del acotamiento, en contacto inmediato con el corte. Su situación le permite recibir los escurrimientos de origen pluvial propios del talud y los del área comprendida entre el coronamiento del corte y la contra-



Vista de una cuneta bien canalizada. Nótese también la protección de vegetación en taludes.

sobre todo en el caso de escalonamientos en cortes con materiales susceptibles y estos elementos podrían contribuir a auspiciarlos, pues es frecuente que en la dirección de su desarrollo longitudinal presenten largos trechos con poca pendiente. En estos casos, los escalonamientos deberán protegerse o no hacerse. La protección puede ir desde dar al escalón una ligera pendiente hacia el interior del corte, poniendo en ese borde interior una cuneta con pendiente suficiente para eliminar rápidamente el agua recolectada, hasta una completa impermeabilización de las huellas, incluyendo la cuneta mencionada. Esta última se ha hecho con suelo-cemento, suelo-asfalto o aún con concreto.

Los materiales más susceptibles a la infiltración de agua en escalones son las rocas juntas o agrietadas, sobre todo si su echado es desfavorable a la vía y los suelos residuales que contengan estructuras heredadas en formación desfavorable; también hay suelos que por su constitución son muy susceptibles, tales como los loes o muchos suelos limosos. Son tan malas las consecuencias de la infiltración de agua en los escalonamientos formados en materiales susceptibles, que en todos los casos de duda en que no sea posible emplear una impermeabilización de completa garantía, será preferible no hacerlos.

En ocasiones se aprovechan estos escalones para plantar pequeños arbustos que una vez desarrollados protegen muy efectivamente la superficie del talud contra la erosión.

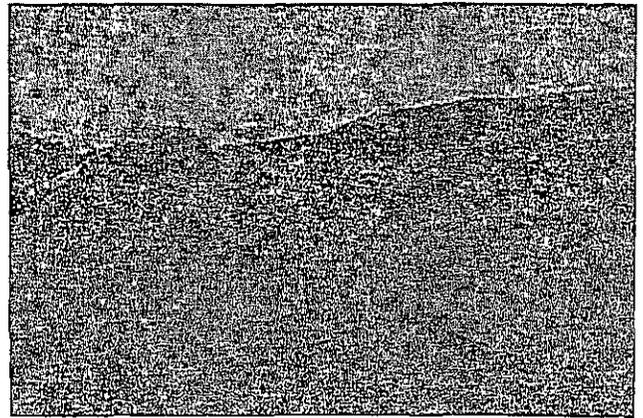
XI-8 LA VEGETACION

Una de las más efectivas protecciones de los taludes de un corte o un terraplén o del terreno natural contra la acción erosiva del agua superficial es la plantación de especies vegetales; éstas retardan el escurrimiento, disminuyendo mucho la energía del agua y contribuyen a fomentar una condición de equilibrio en los suelos en cuanto a contenido de agua.

Siempre que la vegetación exista, el ingeniero deberá respetarla. La deforestación sistemática, el



Protección de la zona central de vía autopista con vegetación.



Protección de un talud con vegetación.

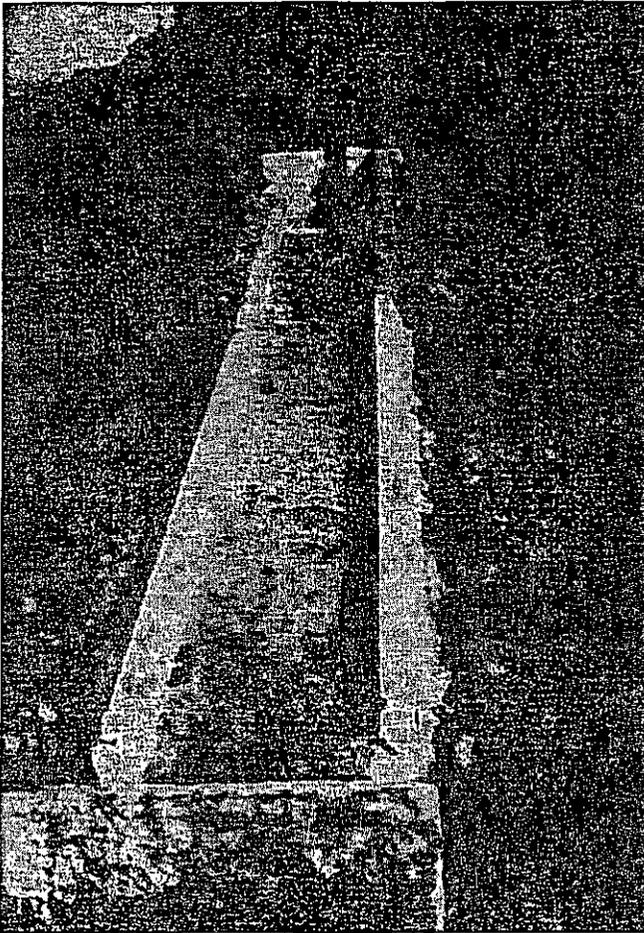
deshierbe o el desenraice excesivos en la zona de derecho de vía o en la zona de influencia de una vía terrestre deben verse como una de las peores prácticas en que es dado caer a un ingeniero constructor. Más bien sus esfuerzos deberán tender a fomentar la protección vegetal en todos sus aspectos. Cuando ésta no exista, su plantación puede contribuir a proteger muy eficazmente la vía. Como ya se ha indicado, la plantación de especies vegetales debe estar a cuidado de especialistas, que utilicen variedades apropiadas en la región, cuyo crecimiento pueda ocurrir con los mínimos cuidados iniciales.

En los taludes son especialmente útiles especies trepadoras o pastos tupidos, en tanto que para las barreras protectoras en el terreno natural suelen dar mejor resultado los arbustos.

XI-9 LOS BORDOS

Se mencionan ahora los bordos de tierra u, ocasionalmente de mampostería, que se construyen para encauzar las aguas, sean en el terreno natural próximo a la vía terrestre, para que el agua llegue a gargantas, cauces naturales, etcétera, o sea en la entrada de las alcantarillas o puentes, con el fin de que el agua cruce apropiadamente por tales estructuras. Este segundo tipo de bordos es, con mucho, el más común y su planteamiento debe ser parte de un estudio hidrológico general que trasciende los objetivos de estos comentarios. El bordo de encauzamiento sobre el terreno natural, mencionado en primer lugar debe responder a una necesidad topográfica, generalmente conectada con la existencia de talwegs que, de no existir los bordos, vaciarían sus aguas de manera peligrosa para la vía terrestre; con el bordo, éstas se dirigen, como se dijo, hacia cualquier clase de cauce natural por el que puedan ser eliminadas sin riesgo.

Los bordos se construyen generalmente con material producto de excavación; es normal que dicha excavación se desarrolle en forma más o menos paralela al propio bordo y debe procurarse que no constituya un tajo profundo. En el caso de los bordos interceptores que se construyen aguas arriba de la



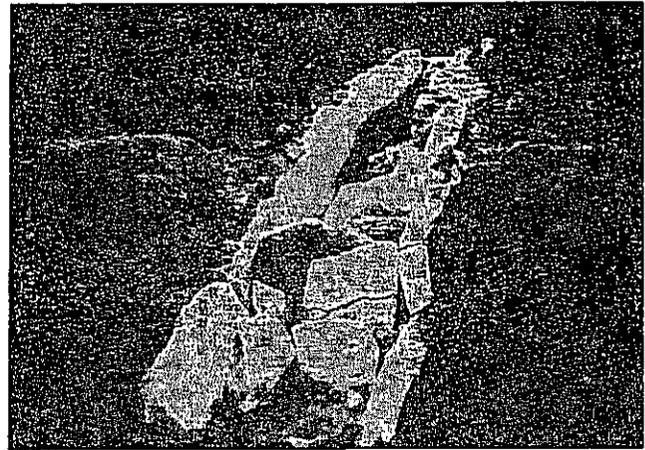
Una bajada para defensa de la salida de una alcantarilla.

asentamiento del terraplén o del terreno en que se coloque el tubo.

En lugares de precipitación escasa o en donde la velocidad de escurrimiento no vaya a ser demasiado alta podrá utilizarse también el concreto hidráulico para hacer los tubos. Si se protege al concreto contra la erosión en forma efectiva podrá extenderse mucho el campo de aplicación de este material en el sentido de las velocidades crecientes. Finalmente, se ha usado también la tubería de barro vitrificado, junteada con campana. El diámetro mínimo en los tubos de la bajada deberá ser de 45 cm, pero no es difícil ver diámetros mayores, 60 cm o más, en lugares en donde se prevé la necesidad de eliminar grandes gastos.

Las bajadas tienen el inconveniente de la dificultad de inspección, que en algunas ocasiones puede llegar a obligar a la utilización de sondeos.

Uno de los usos más frecuentes de las bajadas se tiene cuando dentro de la longitud de un corte queda comprendido un talweg en el coronamiento; el agua que ahí cae no puede dejarse escurrir libremente sobre el talud del corte, porque es demasiada, ni puede ser canalizada a la cuneta por la misma razón. La bajada es la solución típica al problema, con un tubo que atraviese la corona del camino y conduzca el agua a donde no dañe.



Bajada destruida por falta de anclaje.

XI-7 LAS BERMAS

En rigor, las bermas que ahora se mencionan ya han sido tratadas anteriormente (Capítulo VI del Volumen I de esta obra), aunque predominantemente ligadas a problemas de estabilidad de terraplenes; bajo el nombre de escalonamientos se trataron elementos estructurales similares que se construyen en los cortes, para cuidar también la estabilidad de los mismos.

Estas bermas o escalonamientos pueden cumplir también funciones de drenaje superficial, de control de aguas broncas y de conducción y eliminación; es en este sentido, como vuelven a ser tratadas en este sitio.

Las bermas construidas en los terraplenes con fines de drenaje suelen tener una relación peralte:huella en el orden de 1:1 a 1:1.5 y son de dimensiones pequeñas, verdaderos escalones; aquellos valores pueden aumentar a 1:2 ó 1:3 en las que se construyen sobre el terreno natural, para control de las aguas que bajan por él amenazando la vía terrestre, dando lugar a una estructura análoga en sus objetivos a las que se hacen en terrenos de labor en declive como protección contra la erosión (Ref. 1). Los escalonamientos en los cortes, cuando se construyen para interrumpir la trayectoria de bajada de las aguas suelen tener su relación peralte:huella gobernada por la inclinación general del corte, por lo que ésta difícilmente podrá pasar de 0.75:1 ó 1:1.

El efecto de la berma o del escalonamiento es disminuir la fuerza erosiva del agua que escurre superficialmente por los taludes de un terraplén o un corte o por el terreno natural. Estos elementos pueden encauzar más convenientemente al agua colectada si se les da una pendiente apropiada hacia lavaderos, bajadas o estructuras análogas; esta agua erosionaría de otra manera los taludes causando arrastres que provocarían problemas en las cunetas o se infiltraría en el propio talud con malos efectos sobre su estabilidad general.

Los problemas de infiltración pudieran ser graves

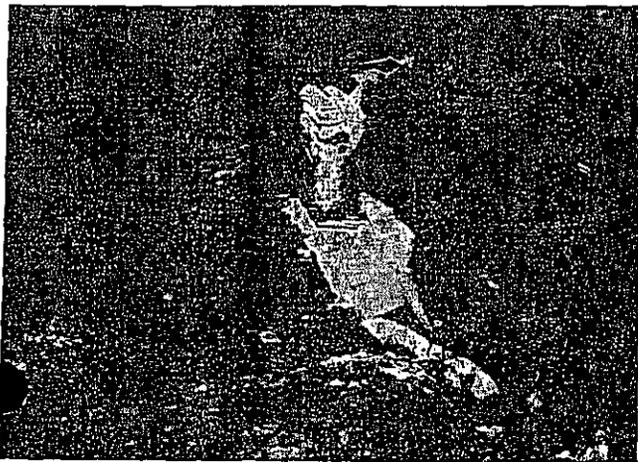


Sistema de lavaderos en un camino modesto. Nótese la buena integración a la topografía.

el lavadero, erosionando y disminuyendo su sustentación, con riesgo de falla (Ref. 5). Para evitar este peligro es recomendable que esta zona de unión sea amplia y sin quiebres y que el lavadero tenga un dentellón de entrada, para protegerlo del efecto de filuación; dicho dentellón puede tener una profundidad tan pequeña como 50 cm.

Caben respecto a los lavaderos los mismos comentarios ya hechos en relación a otras obras complementarias de drenaje. No son estructuras que deban proyectarse indefectiblemente, sino únicamente cuando se hagan realmente necesarias. Esto está ligado a la necesidad de proteger terraplenes formados por materiales erosionables y no suficientemente protegidos por otros métodos, tales como por ejemplo, la vegetación.

En carreteras de especificaciones modestas es relativamente frecuente ver que alcantarillas de tubo desembocan dentro del cuerpo del terraplén, por encima del nivel del lecho del cauce que las originó; como se comentará más adelante, es difícil concebir un caso en que ésta sea una buena práctica, pero cuando ello ocurra será indispensable dotar a la alcantarilla de un lavadero de salida o de una bajada



Lavadero destruido por falta de anclaje y otras obras de defensa.

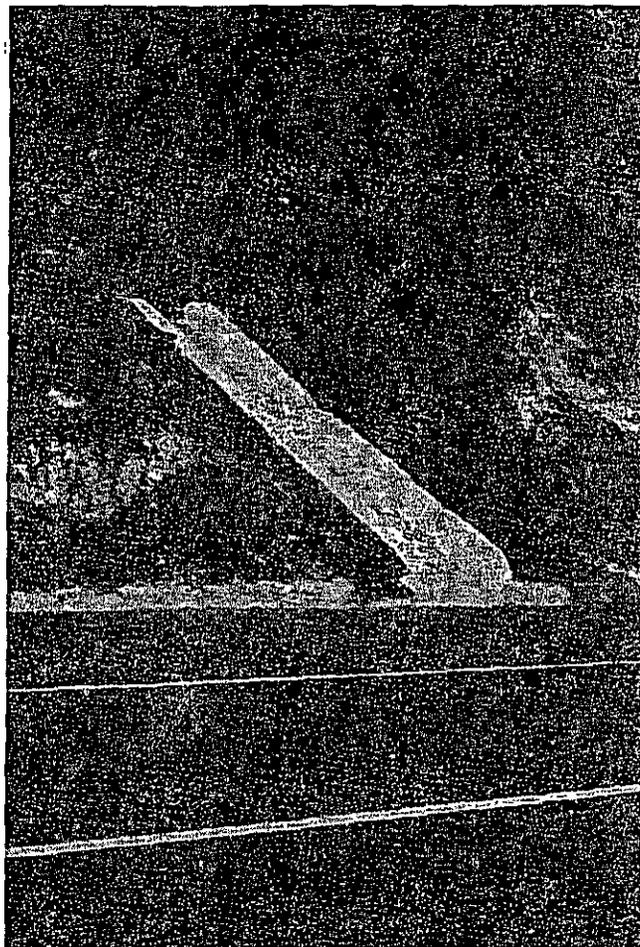
del tipo de las que se describen en el siguiente inciso de este Capítulo. El lavadero podrá entonces ser mucho más amplio que los convencionales de que hasta ahora se ha hablado; guardando los lineamientos generales que se han señalado, su capacidad hidráulica debe ser suficiente para eliminar todo el gasto de la alcantarilla.

El costo de conservación de los lavaderos es alto y la vigilancia que sobre ellos ha de ejercerse, intensa, pues es frecuente que sufran distorsiones por todos los movimientos que son comunes en los taludes de los terraplenes, aun en buenas condiciones de estabilidad.

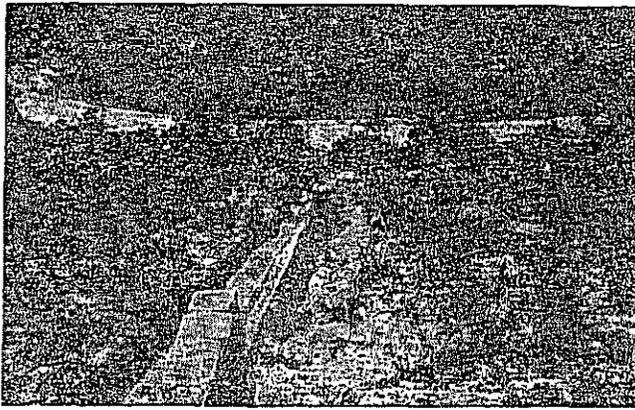
XI-6 LAS BAJADAS

Se denomina así a estructuras de función análoga a los lavaderos, pero constituidas por un tubo apoyado en la superficie inclinada del terreno o enterrado en él. En rigor la distinción respecto a los lavaderos es un tanto de simple nomenclatura y muchos ingenieros consideran a las bajadas como lavaderos entubados.

La tubería que se ha empleado con más éxito es la de lámina, provista de alguna junta capaz de absorber pequeños movimientos por temperatura o por



Bajada en funcionamiento correcto.



Defecto de andaje en un lavadero metálico.

porciona las velocidades permisibles para el pie del lavadero de plantilla rugosa, en función del material del terraplén, del que constituya el terreno natural en el lugar de la descarga o de la protección que se haga en dicho lugar.

Es interesante hacer notar que los cálculos hidráulicos parecen concluir (Ref. 1) que la velocidad máxima que el agua alcanza en los lavaderos de plantilla rugosa se produce a muy corta distancia del umbral de entrada, por lo que la vigilancia en lo que respecta a la erosión al pie de la estructura deberá centrarse más bien con base en los materiales que existan en el lugar de descarga, ejerciéndose en forma prácticamente independiente de la longitud del lavadero.

Un punto importante en la construcción de los lavaderos es darles suficiente estabilidad dentro del cuerpo del terraplén, por lo que suelen hundirse en éste, llegando la corona de sus muretes de borde al nivel del material del talud. La práctica de la colocación directa del lavadero sobre el talud debe verse siempre como inadecuada.

Los lavaderos se construyen muy frecuentemente de mampostería con junteo de lechada de cemento en proporción 1:4. También se hacen de concreto, como se dijo y, finalmente, se construyen de media sección de tubo de lámina galvanizada corrugada con juntas atornilladas; en este último caso, el tubo debe salir de una plantilla de mampostería o de concreto, con cuyos materiales deberá construirse invariablemente la entrada, así como rematar en un final de bajada también de mampostería o de concreto; es muy recomendable que en zonas intermedias de su desarrollo, el tubo se amarre con silletas de mampostería.

En terraplenes muy altos puede convenir colocar los lavaderos transversal y longitudinalmente, colocando algunas secciones en la dirección longitudinal sobre la superficie del talud, para captar y eliminar las aguas que caen directamente sobre éste, formando así una verdadera retícula canalizadora.

Los lavaderos se colocan también como elementos eliminadores del agua captada por cunetas y contracunetas, estructuras de drenaje que se mencionan más adelante. En este caso se presenta una zona crítica en la unión entre ambas estructuras, pues existe entonces el peligro de que el agua se introduzca bajo

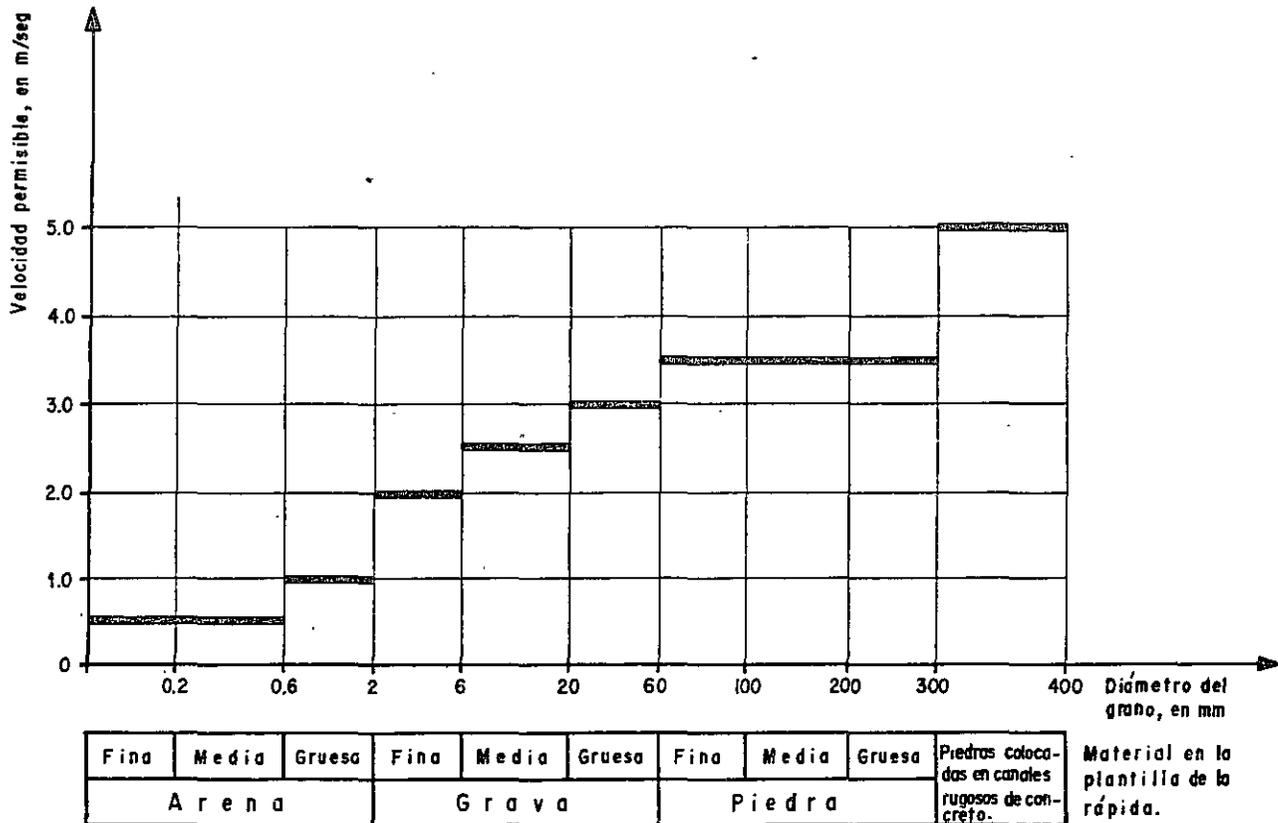


Figura XI-7. Velocidades permisibles al pie de lavaderos de plantilla rugosa (Ref. 3).

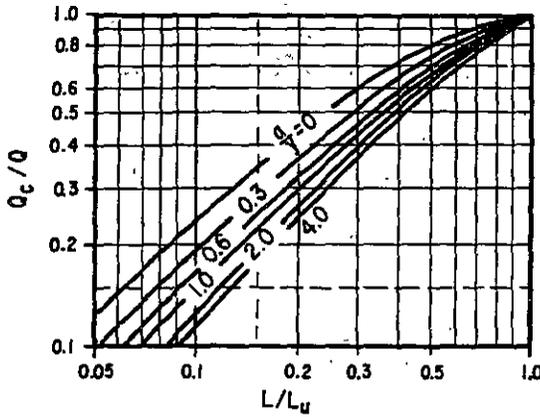


Figura XI-5. Porción del gasto total que es capaz de captar una entrada de lavadero de longitud L. (Ref. 3).

En las Figs. XI-5 y XI-6, a y y (y_e) tienen los sentidos que se describieron en relación a la fórmula 11-1. El lavadero propiamente dicho es la rápida revestida que va desde el umbral de entrada en la parte alta del terraplén hasta los ceros del mismo o, yendo aún más adelante, hasta donde se efectúe la descarga final del agua para que ésta sea inofensiva. Es usual que la bajada tenga una sección estándar (Fig. IX-4) el dimensionamiento hidráulico se hace verificando, a partir del gasto de entrada, la altura en los

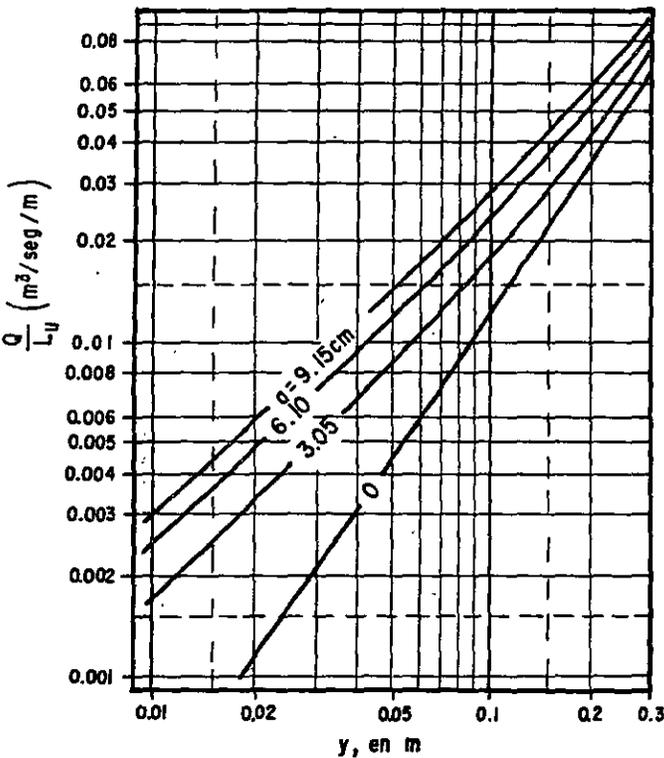
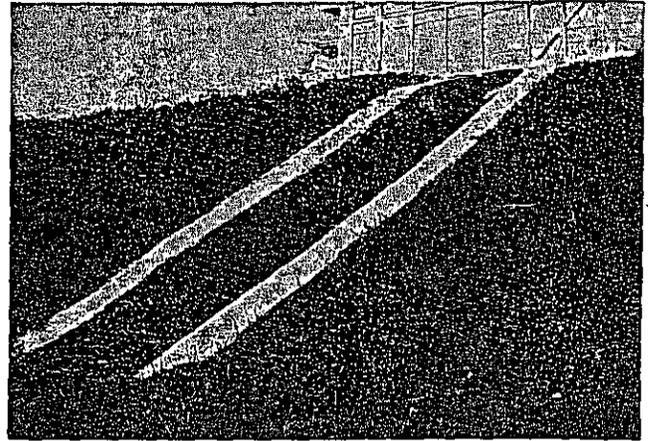


Figura XI-6. Longitud de entrada a un lavadero para captar todo el gasto de llegada (Ref. 3).



Lavadero de mampostería sin adecuada protección de salida.

bordos del lavadero. En la Ref. 3 se mencionan los criterios para efectuar este diseño hidráulico.

Las fuertes velocidades con que el agua baja por el lavadero harían en principio necesaria la construcción de una caja disipadora de energía al pie del mismo, con objeto de evitar erosiones del propio lavadero al pie del terraplén; la alternativa sería la prolongación del lavadero en un abanico de amortiguación y en la longitud suficiente. La construcción de la caja disipadora sería quizá todavía más imperativa si en lugar de utilizar bajada abierta se proyectase al lavadero de un tubo de caída. Una solución tan completa desde el punto de vista hidráulico resultaría demasiado costosa, por lo que desde las primeras investigaciones sobre estos temas se procuró hallar otra solución diferente que amortiguase la energía adquirida por el agua en la bajada a menos costo; la solución parece ser dar gran rugosidad a la plantilla del lavadero provocando un flujo de bajada fuertemente turbulento, con arrastre de aire en la vena líquida, lo que parece reducir la energía de la bajada en forma suficiente. La mampostería muy rugosa o el escalonamiento de la plantilla parecen producir muy buenos resultados. De todas maneras, cuando la altura del terraplén es grande y el gasto que se elimina de consideración, subsiste el problema de la erosión a la salida del lavadero, en el pie del talud, donde pueden producirse erosiones muy peligrosas, que en añadidura son remontantes y pueden conducir a la destrucción de la obra. En estos casos será imprescindible que el ingeniero responsable ejerza una vigilancia especial, construyendo obras de disipación y encauzamiento donde se vean necesarias.

La rugosidad necesaria en la plantilla puede incrementarse también colocando piedras ahogadas parcialmente en el concreto, cuando los lavaderos se hacen con este material. Los detalles del funcionamiento hidráulico de estas plantillas rugosas pueden verse también en la multicitada Ref. 3. De la misma se extrae, como norma de criterio la Fig. XI-7, que pro-



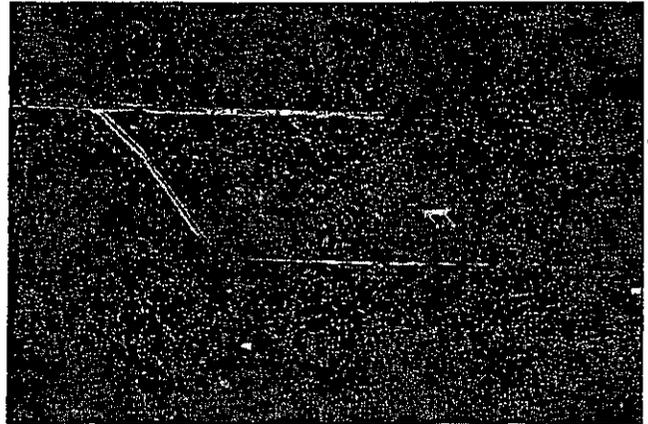
Un lavadero de mampostería, con plantilla de acero, en correcto funcionamiento.

donde:

- L_u , es la longitud del umbral de entrada al lavadero, en m.
- Q , es el gasto que llega al lavadero y ha de descender por él, en m^3/seg .
- a , es el desnivel entre el acotamiento y la sección más deprimida del umbral de entrada al bordillo, en m. Generalmente es del orden de 0.06 m.
- y , es el tirante de escurrimiento sobre el acotamiento, en una sección próxima al umbral de entrada, en m.

Por lo difícil que es de lograr que todo el gasto que baja confinado por el bordillo sea captado por el lavadero, dado el brusco viraje que el agua ha de hacer, es usual aceptar que únicamente entre el 80 y 90 % del agua sea captada.

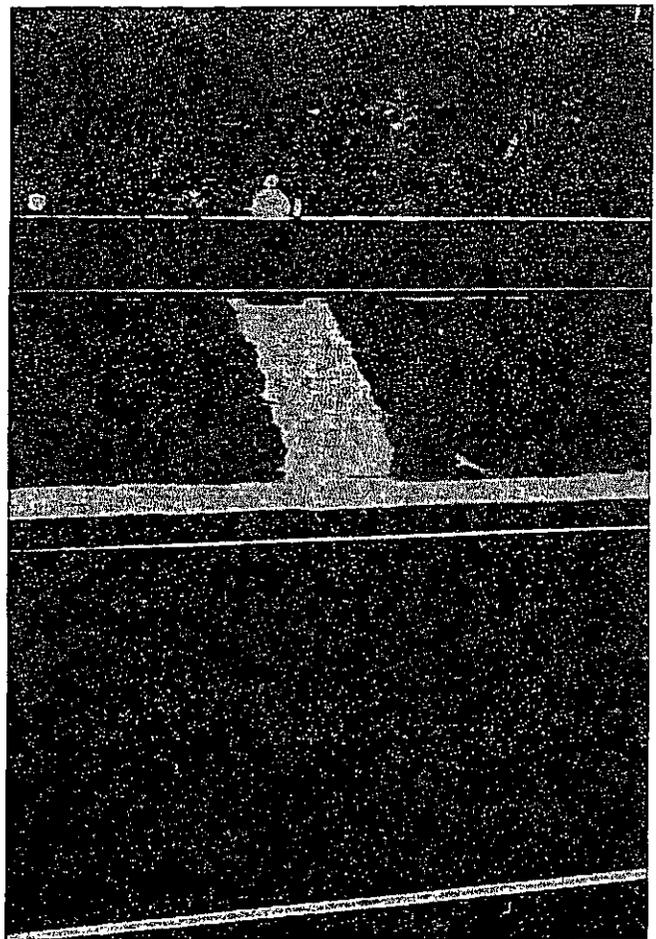
A despecho de la fórmula anterior, lo común es que las entradas de todos los lavaderos sean iguales, con capacidades de descarga muy similares, manejándose las diferentes necesidades de captación más bien con base en la separación entre lavaderos. Si L es la longitud del umbral de entrada del lavadero elegida como estándar y L_u es la longitud necesaria para



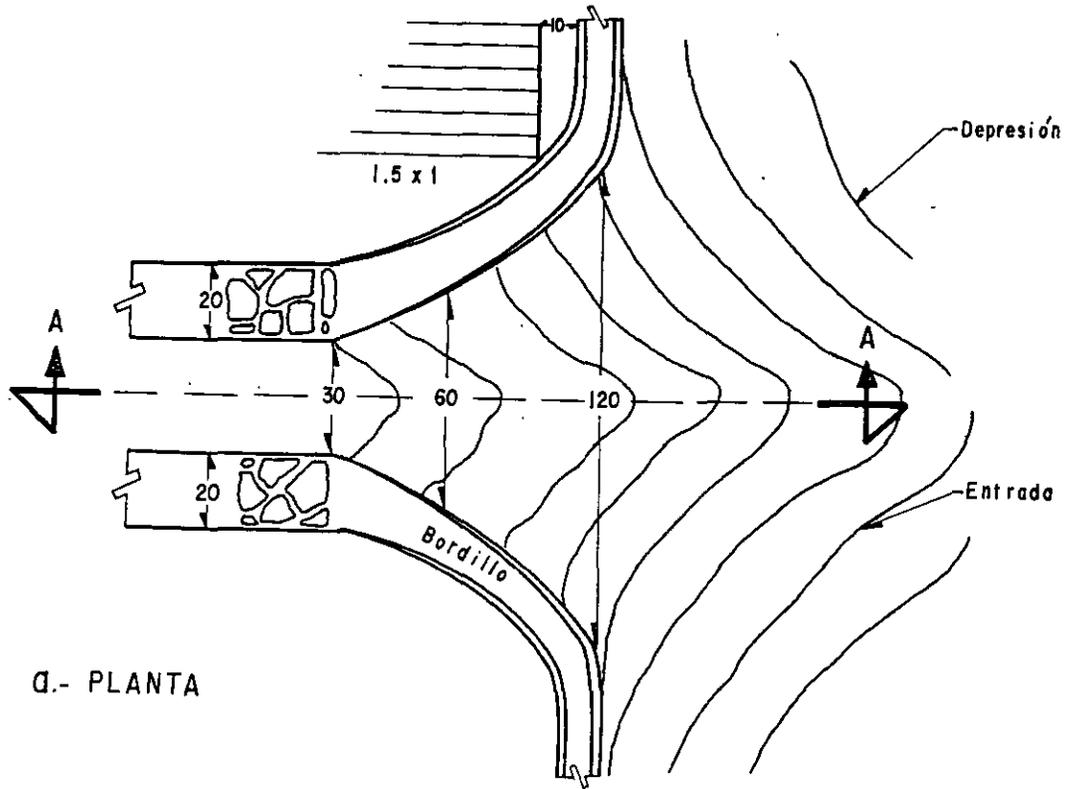
Integración de un lavadero a los sistemas generales de drenaje.

captar todo el gasto que llegue, la Fig. XI-5 (Ref. 3) proporciona la porción del gasto total que es capaz de captar la entrada de longitud L ; en la figura se denomina Q al gasto total que llega y Q_c al gasto captado.

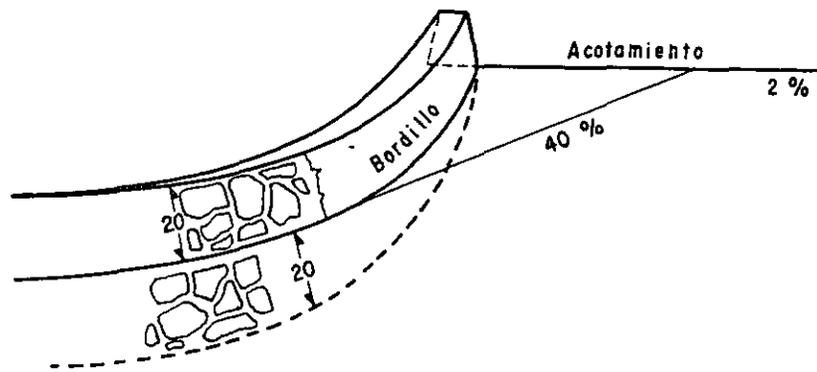
En la Fig. XI-6 (Ref. 3), complementaria de la anterior, puede calcularse la longitud necesaria en la entrada del lavadero (L_u) para captar todo el gasto Q que llega a ella.



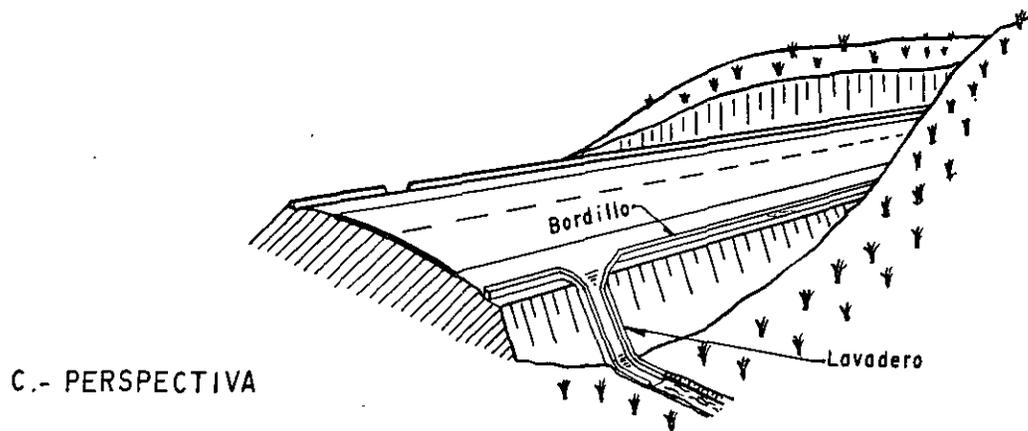
Un lavadero instalado en la zona central de una autopista con bandas separadas.



a.- PLANTA

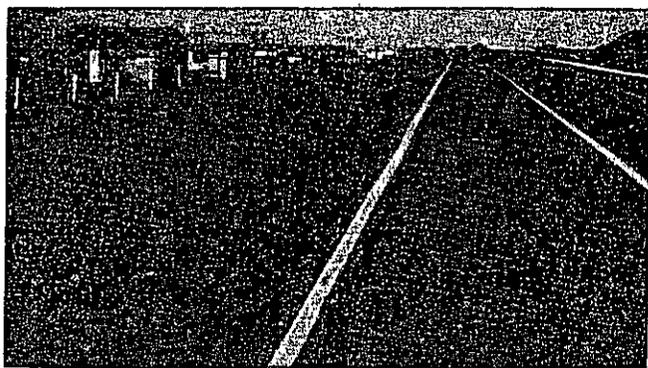


b.- CORTE A-A



c.- PERSPECTIVA

Figura XI-4. Lavadero (Ref. I).



Acotamiento, bordillo y terraplén bien vegetado.

disminuyen el requerimiento de área hidráulica, el tirante y el ancho de la lámina de agua. Todos los anteriores son efectos deseables y contribuyen a fundamentar el criterio de que es siempre conveniente que exista algo de pendiente longitudinal en las carreteras. Los efectos anteriores también se favorecen si el coeficiente de rugosidad de los acotamientos es bajo, lo que conduce a la conveniencia de tener un buen acabado superficial en esas zonas. Por otro lado cabe comentar que el tirante o el ancho de la lámina que escurre confinada por el bordillo son funciones muy poco sensibles a la pendiente longitudinal, de manera que bastará disponer un pequeño valor de este concepto en la vía terrestre para tener garantizado un escurrimiento adecuado. La Ref. 3 contiene una exposición bastante completa de los métodos para el análisis hidráulico de los bordillos, tema que se considera fuera de la esfera de interés de este libro.

La liga entre los bordillos y los lavaderos o bajadas que finalmente eliminan al agua de la corona de la vía debe ser motivo de atención, para el mantenimiento eficiente del sistema; a este respecto conviene deprimir ligeramente la superficie del acotamiento cerca de la entrada de los lavaderos. En algunos países de Europa se construyen los bordillos en forma de L, siendo la parte vertical el bordillo propiamente dicho y la horizontal, de unos 50 cm, parte del acotamiento; si esta última se maneja con una pendiente adecuada puede llegarse prácticamente a la construcción de una cuneta, con base en la cual es muy fácil canalizar convenientemente el agua y establecer una liga muy adecuada con lavaderos y bajadas. El uso de una sección como ésta es caro y seguramente sólo se justifica en caminos importantes, en zonas excepcionalmente lluviosas y cuando se utilizan materiales muy erosionables.

Lo usual es unir el bordillo con los lavaderos por medio de dos curvas, confinando la zona deprimida del acotamiento. La curva correspondiente al lado aguas arriba del bordillo respecto al lavadero suele hacerse más amplia que la de aguas abajo, para facilitar el paso del agua.

Como todas las obras complementarias de drenaje los bordillos no deben verse como soluciones rutina-

rias de uso indiscriminado, sino sólo proyectarse en donde realmente sean necesarios. En principio un bordillo es un obstáculo a la rápida eliminación del agua en la dirección transversal; por ende resultará contraproducente desde este punto de vista. Sólo deberán utilizarse, por lo tanto, en aquellos lugares en que el escurrimiento del agua sobre los terraplenes cause trastornos, porque el material que forme los taludes sea realmente erosionable y esté desprotegido. Es importante considerar que la protección con vegetación en los taludes de los terraplenes es una alternativa a la construcción de bordillos, pues materiales bien protegidos por especies vegetales ya no se erosionan. Otra protección que puede hacer innecesarios a los bordillos es la que se obtiene en forma natural en terraplenes muy bajos (menos de 1.50 m de altura), es los que el agua no puede alcanzar velocidades erosivas. Finalmente, otro factor a ponderar será evidentemente la intensidad y duración de los periodos de precipitación pluvial.

La conservación de los bordillos es costosa. En ocasiones, llega a ser innecesaria, cuando los taludes se vegetan suficientemente con el tiempo; en tales casos los bordillos deberán eliminarse.

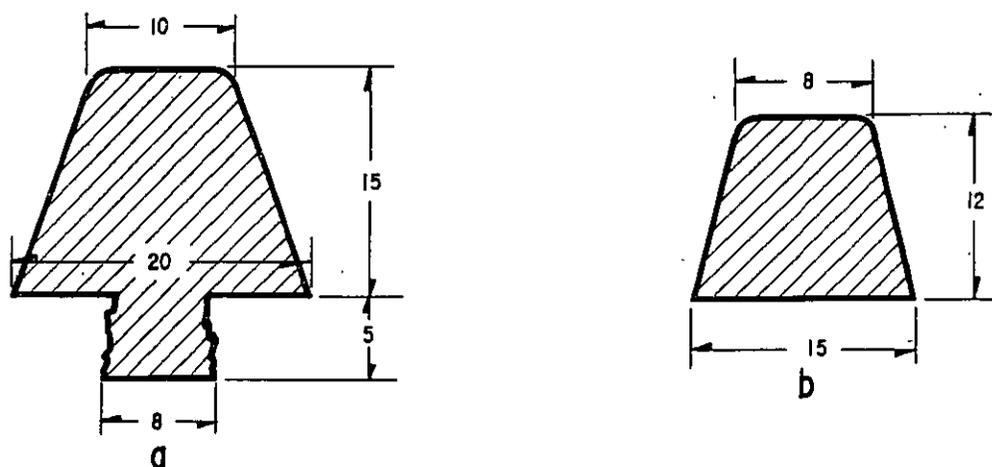
XI-5 LOS LAVADEROS

Los lavaderos son canales que se conectan con los bordillos y bajan transversalmente por los taludes, con la misión de conducir el agua de lluvia que escurre por los acotamientos hasta lugares alejados de los terraplenes, en donde ya sea inofensiva. En general son estructuras de muy fuerte pendiente y en esta circunstancia radica la mayoría de los peligros que los aquejan.

Cuando se disponen en los caminos están sobre los terraplenes, sobre los lados en terraplén de cortes en balcón (generalmente a la entrada y a la salida) o en los lados interiores de curvas, cuando corresponden a secciones también en terraplén. En tramos en tangentes suelen disponerse cada 60 ó 100 m, pero esta separación puede ser variable, dependiendo de la pendiente longitudinal de la vía terrestre y del régimen de precipitación pluvial en la zona. La Fig. XI-4 (Ref. 1) muestra la planta típica de un lavadero construido en mampostería, un corte según su eje longitudinal y una perspectiva de su disposición en una carretera.

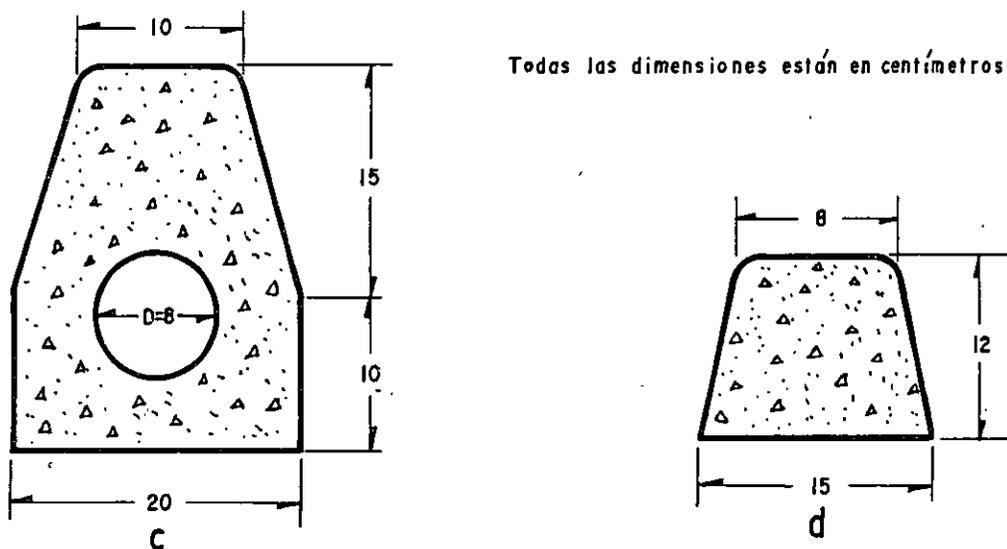
La capacidad del umbral de entrada del lavadero dependerá de la separación entre ellos, del gasto total que escurre por el bordillo y del tirante en una sección inmediatamente antes del umbral. Izzard (Refs. 3 y 4) proporciona la siguiente fórmula para el cálculo de la longitud del umbral de entrada al lavadero, que toma en cuenta el cambio brusco de dirección que ha de sufrir el agua en ese lugar:

$$L_u = \frac{Q}{0.386 (a + y)^{3/2}} \quad (11-1)$$



Bordillo con anclaje

Bordillos de concreto asfáltico, elaborado con material pétreo de tamaño máximo de 3/4" y cemento asfáltico No.6 en proporción aproximada de 100 kg/m³ de material pétreo



Todas las dimensiones están en centímetros

Bordillos de concreto hidráulico, con $f'_c = 150 \text{ km/cm}^2$

Figura XI-3. Tipos de bordillos comunes en la práctica mexicana (Ref. 1).

bajas producen estructuras poco consistentes, por manejarse un producto de excesiva viscosidad. Ciento treinta grados centígrados es quizá un valor recomendable para la temperatura, en condiciones normales (Ref. 1).

Especialmente los bordillos de concreto hidráulico requieren juntas de expansión, que suelen disponerse cada 10 m. En este mismo material deberá cuidarse especialmente el curado.

La tabla XI-1 (Ref. 1) proporciona los límites entre los que debe mantenerse la curva de distribución granulométrica del material pétreo que se incorpore a la planta en la que se fabrique el concreto áltico para bordillos.

El gasto que debe esperarse para ser canalizado por un bordillo puede calcularse en función del área drenada (entre lavaderos), de la precipitación máxima por hora y de la duración de ésta.

TABLA XI-1

Requerimientos granulométricos de materiales pétreos utilizados en el concreto asfáltico para bordillos, según la práctica mexicana (Ref. 1)

Malla	% que pasa, en peso
3/4"	—100
1/2"	100-85
3/8"	100-75
Nº 4	80-60
Nº 8	60-45
Nº 50	30-18
Nº 200	15-5

Al aumentar la pendiente longitudinal de la carretera aumenta la velocidad de escurrimiento del agua confinada por los bordillos y, por consiguiente,

construyen en entronques, isletas de pasos a nivel, etcétera.

Las guarniciones tienen relación con el drenaje, aunque ese no sea su objetivo principal, pues canalizan el agua que escurre en la superficie de rodamiento, guiándola hacia salidas especialmente dispuestas.

(La forma típica de las guarniciones se presenta en la Fig. XI-2 Ref. 1).

La forma trapecial se dispone para dar mayor resistencia a la sección al vuelco; el mismo objetivo se busca con la esbeltez de la sección, que permite una longitud de empotramiento conveniente.

Es práctica de algunos países colocar una verdadera guarnición enterrada entre la orilla de la carpeta y los acotamientos; se busca proteger al pavimento dándole, el confinamiento que le falta en las zonas de borde. Si esta guarnición se pinta adecuadamente, constituye un excelente medio de señalización; si la parte ligeramente sobresaliente es corrugada es una muy buena advertencia para el conductor que permite que su vehículo salga de la zona de carpeta (Ref. 1). Si se adopta esta solución, ha de prevverse desde la construcción de las capas inferiores del pavimento, adoptando las precauciones necesarias para que no impida el drenaje lateral del mismo (Ref. 2).

Las guarniciones se construyen usualmente de concreto, pero la piedra pudiera ser conveniente, si existe este material y abunda la mano de obra. La construcción presenta el problema específico del curado, que siempre será molesto y, a veces, de difícil y costosa solución en zonas en que el agua escasea mucho; generalmente se requieren 6 riegos al día. Se han empleado con éxito productos comerciales que facilitan el curado de la mezcla.

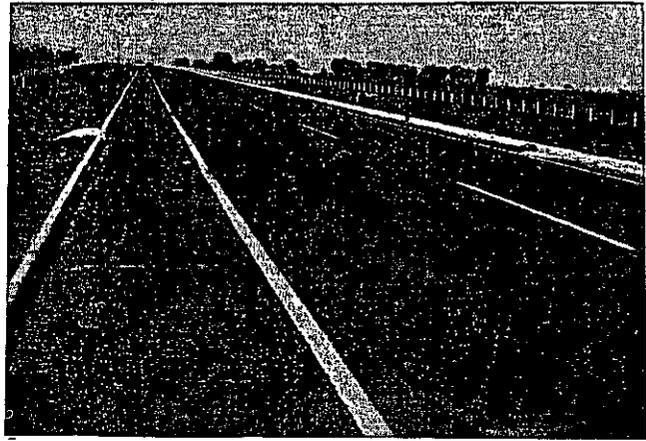
En la construcción de guarniciones de concreto se utiliza cimbra deslizante, de madera o de lámina de acero, siendo preferible las últimas por ser más fáciles de manejar y más durables, además de que logran mejor acabado en la guarnición.

Conviene siempre vibrar el concreto.

Se ha dicho en algunas ocasiones que la guarnición, sobre todo si es relativamente alta puede constituir un obstáculo psicológico para el tránsito, lo que produce un efecto de canalización que reduce los anchos efectivos; por este concepto, no conviene que sobresalgan más de 15 ó 20 cm.

XI-4 LOS BORDILLOS

Los bordillos son estructuras que se colocan en el lado exterior del acotamiento en las secciones en tangente, en el borde opuesto al corte en las secciones en balcón o en la parte interior de las secciones de terraplén en curva. Son pequeños bordos que forman una barrera para conducir el agua hacia los lavaderos y las bajadas, evitando erosiones en los taludes



Vista de un bordillo.

y saturación de éstos por el agua que cae sobre la corona del camino (Ref. 1).

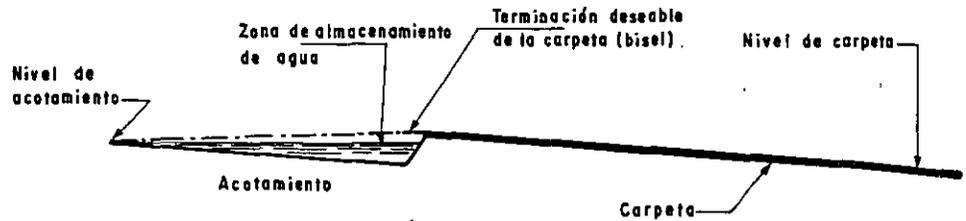
La práctica mexicana utiliza generalmente bordillos de sección trapecial, de concreto asfáltico o hidráulico (Fig. XI-3. Ref. 1).

El anclaje que muestra el bordillo tipo a lo fija muy adecuadamente al material del acotamiento, protegiendo el alineamiento; el anclaje no se construye continuo, sino intermitente, por ejemplo, en pequeños tramos de 8 ó 10 cm cada 6 m. Seguramente el bordillo del tipo b es el que con más frecuencia puede verse en las carreteras mexicanas.

La altura del bordillo debe ser suficiente para que no sea rebasado por el agua almacenada, pero no debe rebasar ciertos límites, arriba de los cuales crea una sensación psicológica de confinamiento que es inconveniente para el vehículo que ha de estacionarse en el acotamiento o eventualmente circular por él; los bordillos demasiado altos también pueden impedir la apertura de puertas de los vehículos estacionados. Seguramente no debe pasarse de 25 cm en la altura de los bordillos, pero funcionarán muy bien en la gran mayoría de los casos estructuras con 12 ó 15 cm.

Para la construcción de los bordillos se utiliza preferentemente el concreto asfáltico o el hidráulico; podría pensarse en utilizar la piedra en donde exista y se desee el empleo masivo de mano de obra. En la construcción de bordillos de concreto asfáltico o hidráulico ha de emplearse cimbra metálica o de madera, a no ser que se disponga de máquinas especiales, que permitan la construcción en forma mucho más expedita de lo que permite el empleo de cimbra, que da lugar a operaciones lentas y caras. Las máquinas especiales tienen un molde de la estructura que es alimentado del material correspondiente por un tornillo sin fin; en estos casos es esencial vigilar la velocidad de avance de la máquina, que define la consistencia estructural y el buen acabado de la obra. En el uso del concreto asfáltico es también muy importante un adecuado control de la temperatura; valores elevados de ésta conducen a obras sin la debida liga, que se desintegran, en tanto que temperaturas

Figura XI-1. Terminación de la carpeta para evitar encharcamiento en zonas interiores de curvas.



evitar o, por lo menos, reducir el problema, que tiene su importancia práctica, pues no debe olvidarse que las eventuales renivelaciones futuras habrían de hacerse con material de carpeta, que es el más costoso.

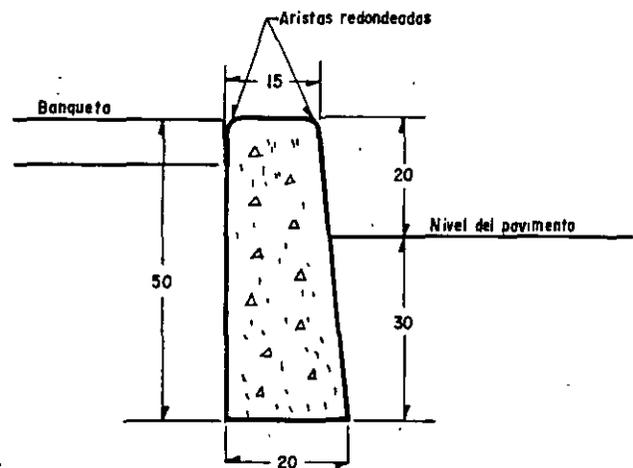
En caminos revestidos seguramente conviene que el bombeo no baje de 4% para dar muy rápida salida al agua transversalmente; en estos caminos modestos hay tendencia a transitar por la zona central, lo que provoca la formación de surcos en el revestimiento, con desplazamiento del material hacia afuera, formando zonas de encharcamiento muy perjudiciales, si el bombeo no es fuerte.

En las autopistas de 4 o más bandas de circulación y camellón central suele ser un grave problema la acumulación en el camellón de toda el agua que se colecta en el ala más elevada de las curvas con sobre-elevación; eventualmente ha llegado a suceder que inclusive el agua rebasa el camellón que la retiene, invadiendo la otra ala de la autopista; para evitar este peligro se dejan pequeñas interrupciones en el camellón, de trecho en trecho, con lo que el agua se concentra en ellas y pasa al ala opuesta. La solución definitiva de este problema es la construcción de un colector subterráneo bajo el camellón, al que pueda llegar el agua por bocas de tormenta situadas en el propio camellón y dispuestas en un tramo de longitud suficiente; el agua que se concentre en el colector subterráneo ha de ser eliminada en forma conveniente. Obviamente ésta es una solución cara, si se piensa que habría de ser aplicada en todas las curvas de la autopista. No existe una solución barata de tipo general a este problema. Cuando la conformación de la superficie de la curva es favorable, podría sustituirse el colector profundo por una caja de concreto con una sola entrada y su salida correspondiente; esto podrá hacerse pocas veces, pues la mayoría de las curvas serán amplias. Otra solución ocasional podría ser la construcción de una pequeña cuneta en el espacio del camellón, guardando todas las normas que la Ingeniería de Tránsito impondría a una depresión tal, vecina de las bandas de circulación de alta velocidad. El problema es difícil y sus efectos, muy perjudiciales para el tránsito; en cada caso deberá buscarse la solución que mejor se adapte a las condiciones geométricas.

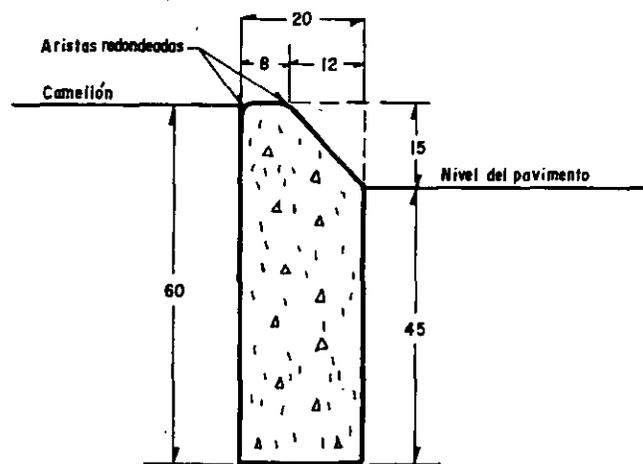
XI-3 LAS GUARNICIONES

En zonas urbanas, las guarniciones se construyen

en las orillas de las banquetas, para contener a las mismas y evitar que deslicen sobre la superficie de rodamiento; a la vez tienen la función de proteger a las banquetas contra la acción del tránsito. En las carreteras, las guarniciones se construyen con los mismos objetivos en las banquetas de los puentes, de las casetas de cobro de peaje y de pasos a desnivel y en algunos tipos de los camellones que separan las bandas de circulación de las autopistas o que se



C.- Guarnición en camellones laterales y banquetas



D.- Guarnición en camellón central

EN AMBOS CASOS:

- 1.- Dimensiones en cm
- 2.- Juntas de Dilatación de cartón asfaltado de 0.3 cm de espesor deberán disponerse a cada 6.0m como máximo
- 3.- Concreto de $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2$

Figura XI-2. Formas típicas de guarniciones (Ref. 1).

socavación, con erosión o con tubificación de los terraplenes de acceso. La compactación del colchón de tierra sobre y a los lados de la alcantarilla juega también un papel de importancia. La mala ubicación de la alcantarilla en relación al cauce que se drena o a la terracería que la abriga contribuye muchas veces a generar o a agravar estos problemas.

En lo que a las consideraciones geotécnicas se refiere, los estudios de las alcantarillas tienen las mismas limitaciones que se comentaron para los problemas hidráulicos. La necesidad de fundamentar las recomendaciones de proyecto de cimentación, por ejemplo, en estudios someros y expeditos lleva a establecer la conveniencia de que éstos queden en manos de ingenieros con sólida preparación y sólida experiencia en el campo de la Mecánica de Suelos Aplicada. Conviene incorporar la responsabilidad de estas recomendaciones a los estudios geotécnicos generales, que necesariamente han de estar en manos de especialistas.

Además de estas obras bien conocidas de drenaje deben disponerse en un ferrocarril o en una carretera otras obras menos conocidas fuera del campo especializado, que contribuyen a encauzar y eliminar las aguas superficiales que de otro modo causarían daños. Suele darse a estas obras el nombre genérico de Obras Complementarias de Drenaje. Como tales se entenderán en esta obra a las siguientes:

- El bombeo
- Las guarniciones
- Los bordillos
- Los lavaderos
- Las bajadas
- Las bermas
- El uso apropiado de vegetación
- Los bordos
- Las cunetas
- Las contracunetas
- Los canales interceptores

Además de las anteriores, de definición y clasificación bien conocida, existe todo un conjunto de obras de canalización, conducción y eliminación que suelen construirse en un caso dado, según las necesidades específicas de ese caso, pero que carecen de encasillamiento general.

Las obras complementarias de drenaje no son de uso universal o rutinario; por lo menos, no deben serlo. Son obras que deben hacerse sólo en el lugar en que se requieran, pues de otra manera se derrochará dinero y se producirán, inclusive, resultados contraproducentes.

En lo que sigue se analizarán someramente estas obras, así como los criterios para su ubicación y construcción. Desgraciadamente lo que puede decirse al respecto es poco, pues aunque el tema reviste gran importancia práctica ha sido poco estudiado y menos, seriamente investigado, por lo que puede decirse que básicamente se encuentra aún dentro de las nor-

mas del arte del constructor, pero un tanto ajeno a una metodología científica.

XI-2 EL BOMBEO

Dentro de la terminología de las Obras Complementarias de Drenaje, se denomina Bombeo a la pendiente transversal que se da en las carreteras y en las aeropistas para permitir que el agua que directamente cae sobre ellas escurra hacia sus dos hombros. En los caminos normales de dos bandas de circulación y en secciones en tangente es común que el bombeo se disponga con un 2 % de pendiente desde el eje del camino hasta el hombro correspondiente; en las secciones en curva, el bombeo se superpone con la sobreelevación necesaria, de manera que según se entra a la curva, esta última domina rápidamente, de manera que la pendiente transversal ocurre sin discontinuidades, desde el hombro más elevado al más bajo; en este caso y dentro de la transición de la sección en tangente a la de plena curva, suele haber un trecho en el que se complica un poco la conformación de una pendiente transversal adecuada, siendo éste un problema que debe resolverse en cada caso, pero al que ayuda siempre la existencia de pendiente longitudinal. En las carreteras con pavimento rígido el bombeo puede ser un poco menor, por ejemplo del orden de 1.5 %.

En las aeropistas se dispone también el bombeo desde el eje hacia los hombros, con pendiente de 1.5 %, generalmente. En México se ha llegado a aceptar 1.25 %.

En las carreteras de más de dos bandas de circulación pueden presentarse dos casos típicos. O se tiene un camellón central relativamente estrecho o se tiene uno muy amplio, generalmente sembrado de pasto. En el primer caso, es común que el bombeo tenga lugar del camellón hacia ambos hombros, pero en el segundo es común que se disponga un bombeo mixto, en dos vertientes, con pendientes desde el eje de cada banda hacia el hombro respectivo y hacia la sección central de la vía, en la cual suele existir un elemento de canalización.

Es común que en las curvas se produzca una zona de almacenamiento de agua en la parte del acotamiento que linda con la carpeta en el hombro más alto cuando, como sucede a veces, dicha carpeta tiene un nivel algo más alto que el del acotamiento. Para evitar esta zona de almacenamiento de agua e infiltración es recomendable terminar la orilla de la carpeta en bisel (Fig. XI-1).

Cuando se construyen terraplenes sobre suelos blandos, el bombeo, tiende a perderse con el tiempo, porque se produce mayor asentamiento en el centro de la sección que en sus hombros; el cálculo de asentamientos permite conocer esa diferencia en el valor de dicho asentamiento, a fin de hacer una previsión en el proyecto, exagerando el bombeo inicial, para

tratamiento definitivamente diferente. En primer lugar con muchas y, en segundo representan individualmente niveles de inversión mucho más bajos. Esto hace que tradicionalmente el nivel de estudio que se dedica a los puentes sea distinto que el que se dedica a una alcantarilla. En los primeros se realizan rutinariamente estudios de exploración de suelos e investigaciones de laboratorio y sus cimentaciones son objeto de proyectos muchas veces muy elaborados, que hacen uso de las técnicas más sofisticadas, tales como los pilotes de punta o de fricción, los cilindros o los grandes cajones de cimentación (naturalmente no se hace aquí ninguna referencia a los muy importantes estudios hidrológicos e hidráulicos, que constituyen una parte medular del proyecto de los puentes). En las alcantarillas, por el contrario constituye la tónica común que los estudios de cimentación que se hacen para cada una de ellas sean sumamente sencillos; se trata, debe tenerse en cuenta, de llegar a garantizar en el terreno una capacidad de carga no muy elevada (generalmente son suficientes capacidades comprendidas entre 1.0 y 3.0 kg/cm²) y es raro ir más lejos de la simple inspección visual de muestras obtenidas en pozos a cielo abierto, con posteaerómetros u otras herramientas de uso barato y alcance restringido. El proyecto de la cimentación en sí, así como el estructural suele ser cuestión de proyecto y por lo tanto tampoco suelen hacerse en las alcantarillas los estudios hidráulicos que son de rutina en los puentes. A despecho de lo generalizado que estén los criterios anteriores, debe pensarse que el gran número de alcantarillas que existen en las carreteras y en los ferrocarriles hace que, a fin de cuentas, su inversión total represente una cantidad mayor que la que se dedica a los puentes del mismo tramo. Para dar ideas y citando números toscamente aproximados, puede decirse que el número común de alcantarillas puede no ser inferior a 3 ó 4 por kilómetro, y tanto que la inversión total que en las alcantarillas se hace puede alcanzar un 15 ó un 20 % del costo total de la vía. Ante magnitudes de inversión de tal orden y considerando que el colapso de una alcantarilla produce una interrupción local, pero generalmente completa de la vía, ha de plantearse la pre-

gunta de si la atención que se da tradicionalmente a estas estructuras es suficiente o está en los límites de lo prudente. La experiencia de los autores de este libro es que la falla de las alcantarillas es relativamente sistemática aunque sólo sea en el sentido de provocar problemas de conservación anormal y ocurre en un número muy superior a lo deseable; sin embargo, la misma experiencia indica que la mayoría de las alcantarillas que fallan no lo hacen por problemas de cimentación o por razones en las cuales la Mecánica de Suelos Aplicada juegue un papel relevante, sino por provisiones absolutamente insuficientes en lo que a la capacidad hidráulica de la estructura se refiere, relacionadas muchas veces con problemas de arrastre de sólidos, sedimentación y protección de las obras contra el embate de las aguas. Así, parece que el primer punto a preocupar en la búsqueda de una mejoría en los métodos para proyecto y construcción de alcantarillas deberá ser el procurar fundamentar mejor de lo que hasta ahora comúnmente se hace, su trabajo desde todos los puntos de vista hidráulicos. Es evidente que el gran número de estructuras por construir hará imposible la realización de un estudio hidráulico de detalle, bien fundado para cada una de ellas; también es cierto que quien pretendiera realizar tales estudios se encontraría en la imposibilidad de efectuarlos por la inexistencia de los datos estadísticos del comportamiento de los arroyos y las corrientes de agua que tales estudios suelen requerir. Se está, una vez más, ante la disyuntiva que es tan común en muchos aspectos del proyecto y la construcción de las vías terrestres y el problema ha de ser enfocado en la misma forma que se ha preconizado para otros similares en otras partes de este libro. Ha de renunciarse, como norma general de criterio, al estudio detallado de cada caso, adoptando en cambio métodos de obtención de información general, en que a un costo razonable pueda obtenerse un conocimiento panorámico suficiente para un tramo o una zona, que permita, junto con la aplicación de un criterio suficientemente generoso en la adopción de las secciones hidráulicas de detalle, llegar a proyectos de funcionamiento razonable. Desde este punto de vista, los estudios geológicos ya mencionados, especialmente los de fotointerpretación pueden ser de una ayuda invaluable, pero sobre todo serán útiles en este caso los estudios hidrológicos regionales, fuera del alcance de esta obra, que han revelado capacidad para proporcionar a un costo muy bajo por kilómetro de vía, información de carácter general lo suficientemente útil para poner al ingeniero proyectista al cubierto de errores de consideración.

Aun cuando los problemas hidráulicos sean los más destacados y frecuentes en el comportamiento de las alcantarillas, no deja de haber otros relacionados más o menos directamente con la Mecánica de Suelos Aplicada; dejando a un lado los obvios de cimentación, seguramente los problemas más importantes de esta clase son los que tienen que ver con



Construcción de una alcantarilla de losa.

OBRAS DE DRENAJE

XI-1. INTRODUCCION

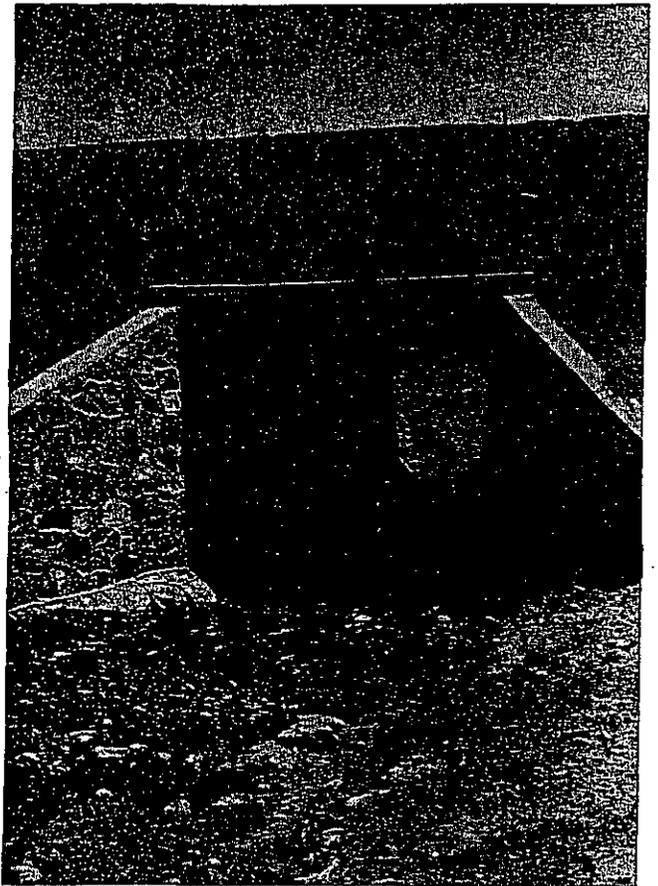
Como ya se ha mencionado en diversas ocasiones precedentes, el drenaje de una vía terrestre comprende varios matices que han de ser tratados separadamente. En el Capítulo VII de esta obra se discutieron ya los métodos que han ido imponiendo la teoría y la experiencia para el control de las aguas subterráneas, que afectan de un modo u otro a la vía terrestre llegando a ella por infiltración; se adoptó en aquella ocasión el nombre genérico de Subdrenaje para las técnicas de control de esas aguas, dejando el término Drenaje para la metodología de control de las aguas que llegan a la vía y la afectan por escurrimiento superficial, independientemente de que dichas aguas hayan caído sobre o fuera de la vía terrestre propiamente dicha.

Las estructuras de drenaje más espectaculares de una vía terrestre son los puentes y las alcantarillas, responsables principales del drenaje transversal; es decir, del paso de grandes masas de agua, arroyos, ríos, etcétera a través de la obra, en una dirección más o menos perpendicular a ella. Suele llamarse a los puentes obras de drenaje mayor y a las alcantarillas de drenaje menor. La frontera entre ambos tipos de estructura no está, naturalmente, definida; convencionalmente, se acepta en México que un puente es la obra que tiene algún claro de longitud mayor que 6 m, reservándose el nombre alcantarilla para estructuras resueltas con claros menores, independientemente del hecho de que esos claros menores de 6 m pudieran repetirse varias veces, dando a la obra en conjunto una longitud más grande que ese límite. Una convención tal como ésta, aunque no necesariamente la misma, sirve para distinguir los puentes de las alcantarillas en todas las instituciones interesadas en otras partes del mundo.

Básicamente los puentes interesan desde el punto de vista de la Mecánica de Suelos Aplicada sólo en lo que se refiere a su cimentación, cuyos problemas ya fueron tratados en un Capítulo anterior de esta

obra; también lo fueron, si bien someramente, los criterios de exploración de suelos que con ellos se relacionan (Capítulo III), así como aspectos que interesan a los terraplenes de acceso y algunos otros que en un momento u otro fueron discutidos en páginas anteriores de este libro. Así, no se siente la necesidad de insistir ahora en estas estructuras, por otra parte tan interesantes.

Las alcantarillas son, como se dijo, en muchos aspectos similares a los puentes, pero se diferencian en dos que bastan para hacerlas merecedoras de un



Alcantarilla típica en una carretera. Losa de concreto.

LIBRO: CTR. CONSTRUCCIÓN
TEMA: CAR. Carreteras
PARTE: 1. CONCEPTOS DE OBRA
TÍTULO: 04. Pavimentos
CAPÍTULO: 006. Carpetas Asfálticas con Mezcla en Caliente

A. CONTENIDO

Esta Norma contiene los aspectos por considerar en la construcción de carpetas asfálticas con mezcla en caliente, para pavimentos de carreteras de nueva construcción

B. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Las carpetas asfálticas con mezcla en caliente, son aquellas que se construyen mediante el tendido y compactación de una mezcla de materiales pétreos y cemento asfáltico, modificado o no, utilizando calor como vehículo de incorporación. Según la granulometría del material pétreo que se utilice, pueden ser de granulometría densa, semiabierta o abierta.

Las carpetas asfálticas con mezcla en caliente se construyen para proporcionar al usuario una superficie de rodadura uniforme, bien drenada, resistente al derrapamiento, cómoda y segura. Cuando son de un espesor igual a cuatro (4) centímetros o mayor, las carpetas de granulometría densa tienen además la función estructural de soportar y distribuir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores del pavimento. Las carpetas de granulometría semiabierta o abierta, no tienen función estructural y generalmente se construyen sobre una carpeta de granulometría densa, con la finalidad principal de permitir que el agua proveniente de la lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, ocupando los vacíos de la carpeta, con lo que se incrementa la fricción de las llantas con la superficie de rodadura, se

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR-CAR-1-04-006/04

minimiza el acuaplaneo, se reduce la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos adyacentes y se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal

C. REFERENCIAS

Son referencias de esta Norma, las normas E 670 *Standard Test for Side Force Friction on Paved Surfaces Using the Mu-Meter* y E 1274, *Standard Test for Measuring Pavement Roughness Using a Profilograph*, publicadas por la *American Society for Testing and Materials* (ASTM)

Además, esta Norma se complementa con las siguientes:

NORMAS Y MANUAL	DESIGNACIÓN
Ejecución de Obras	N-LEG-3
Riegos de Impregnación	N-CTR-CAR-1-04-004
Riegos de Liga	N-CTR-CAR-1-04-005
Carpetas por el Sistema de Riegos	N-CTR-CAR-1-04-008
Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas	N-CMT-4-04
Calidad de Materiales Asfálticos	N-CMT-4-05-001
Calidad de Materiales Asfálticos Modificados	N-CMT-4-05-002
Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras	N-CMT-4-05-003
Criterios Estadísticos de Muestreo	M-CAL-1-02

D. MATERIALES

- D.1. Los materiales que se utilicen en la construcción de carpetas asfálticas con mezcla en caliente, cumplirán con lo establecido en las Normas N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, N-CMT-4-05-001, *Calidad de Materiales Asfálticos*, N-CMT-4-05-002, *Calidad de Materiales Asfálticos Modificados* y N-CMT-4-05-003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*, salvo que el proyecto indique otra cosa o así lo apruebe la Secretaría. Los materiales pétreos procederán de los bancos indicados en el proyecto o aprobados por la Secretaría.
- D.2. Si dados los requerimientos de la obra, es necesario modificar las características de los materiales pétreos, del material asfáltico o de la interacción entre ambos utilizando aditivos, éstos estarán

NORMAS

N CTR-CAR 1 04 006/04

establecidos en el proyecto o serán aprobados por la Secretaría. Si el Contratista de Obra propone la utilización de aditivos, lo hará mediante un estudio técnico que los justifique, sometiéndolo a la consideración de la Secretaría para su análisis y aprobación. Dicho estudio ha de contener como mínimo, las especificaciones y los resultados de las pruebas de calidad, así como los procedimientos para el manejo, uso y aplicación de los aditivos.

- D.3. No se aceptará el suministro y utilización de materiales que no cumplan con lo indicado en la Fracción D.1. de esta Norma, ni aun en el supuesto de que serán mejorados posteriormente en el lugar de su utilización por el Contratista de Obra.
- D.4. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, los materiales presentan deficiencias respecto a las características establecidas como se indica en la Fracción D.1. de esta Norma, se suspenderá inmediatamente el trabajo en tanto que el Contratista de Obra las corrija o los remplace por otros adecuados, por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

E. EQUIPO

El equipo que se utilice para la construcción de carpetas asfálticas con mezcla en caliente, será el adecuado para obtener la calidad especificada en el proyecto, en cantidad suficiente para producir el volumen establecido en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, conforme al programa de utilización de maquinaria, siendo responsabilidad del Contratista de Obra su selección. Dicho equipo será mantenido en óptimas condiciones de operación durante el tiempo que dure la obra y será operado por personal capacitado. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, el equipo presenta deficiencias o no produce los resultados esperados, se suspenderá inmediatamente el trabajo en tanto que el Contratista de Obra corrija las deficiencias, lo remplace o sustituya al operador. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

E.1. PLANTA DE MEZCLADO

Contará como mínimo con:

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N-CTR CAR 1-04 006/04

- E.1.1. Secador con inclinación ajustable colocado antes de las cribas clasificadoras y con capacidad suficiente para secar una cantidad de material pétreo igual a la capacidad de producción de la planta o mayor
- E.1.2. Un pirógrafo a la salida del secador para registrar automáticamente la temperatura del material pétreo.
- E.1.3. Cribas para clasificar el material pétreo por lo menos en tres (3) tamaños, con capacidad suficiente para mantener siempre en las tolvas material pétreo disponible para la mezcla.
- E.1.4. Tolvas para almacenar el material pétreo, protegidas de la lluvia y el polvo, con capacidad suficiente para asegurar la operación continua de la planta por lo menos durante quince (15) minutos sin ser alimentadas, y divididas en compartimentos para almacenar los materiales pétreos por tamaños
- E.1.5. Dispositivos para dosificar los materiales pétreos por masa, y sólo en casos excepcionales, cuando así lo apruebe la Secretaría, por volumen y que permitan un fácil ajuste de la dosificación de la mezcla en cualquier momento, para poder obtener la granulometría que indique el proyecto
- E.1.6. Equipo para calentar el cemento asfáltico en forma controlada, que garantice que este no se contamine y que esté provisto de un termómetro con rango de veinte (20) a doscientos diez (210) grados Celsius
- E.1.7. Dispositivos para dosificar el cemento asfáltico, con una aproximación de más menos dos (± 2) por ciento de la cantidad requerida según el proporcionamiento de la mezcla.
- E.1.8. Mezcladora equipada con un dispositivo para el control del tiempo de mezclado.
- E.1.9. Recolector de polvo.
- E.1.10. Dispositivo para agregar finos.

E.2. PAVIMENTADORAS

Autopropulsadas, capaces de esparcir y precompactar la capa de carpeta que se tienda, con el ancho, sección y espesor establecidos en el proyecto, incluyendo los acotamientos y zonas

similares. Estarán equipadas con los dispositivos necesarios para un adecuado tendido de la carpeta asfáltica, como son: un enrasador o aditamento similar, que pueda ajustarse automáticamente en el sentido transversal, ser calentado en caso necesario y proporcionar una textura lisa y uniforme, sin protuberancias o canalizaciones; una tolva receptora de la mezcla asfáltica con capacidad para asegurar un tendido homogéneo, equipada con un sistema de distribución mediante el cual se reparta la mezcla uniformemente frente al enrasador; y sensores de control automático de niveles.

Los dispositivos externos que se utilicen como referencia de nivel para los sensores de niveles, estarán colocados en zonas limpias de piedras, basura o cualquier otra obstrucción que afecte las lecturas. Si durante la ejecución de los trabajos, los controles automáticos operan deficientemente, la Secretaría, a su juicio, podrá permitir al Contratista de Obra terminar el tendido del día, mediante el uso del control manual de la pavimentadora, sin embargo, el tendido se podrá reiniciar sólo cuando los controles automáticos funcionen adecuadamente.

Es recomendable contar además, con un equipo especial para verter la mezcla asfáltica a la pavimentadora, evitando que el camión vacie directamente a las tolvas de la misma, mejorando así la uniformidad superficial de la carpeta.

E.3. COMPACTADORES

E.3.1. Compactadores de rodillos metálicos

Autopropulsados, reversibles y provistos de petos limpiadores para evitar que el material se adhiera a los rodillos. Pueden ser de tres (3) rodillos metálicos en dos (2) ejes, o de dos (2) o tres (3) ejes con rodillos en tándem, con diámetro mínimo de un (1) metro (40 in), en todos los casos.

E.3.2. Compactadores neumáticos

Remolcados o autopropulsados. Tendrán nueve (9) ruedas como mínimo, de igual tamaño, montadas sobre dos ejes unidos a un chasis rígido, equipado con una plataforma o cuerpo que pueda ser lastrado, de forma que la masa total del compactador se distribuya uniformemente en ellas, dispuestas de manera que las llantas del eje trasero cubran, en una pasada, el espacio completo entre las llantas

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N-CTR CAR-1-04-006/04

adyacentes en el eje delantero. Las llantas serán lisas, con tamaño mínimo de 7.50-15 de cuatro (4) capas e infladas uniformemente a la presión recomendada por el fabricante, con una tolerancia máxima de treinta y cuatro coma cinco (34,5) kilopascales (5 lb/in²).

E.4. BARREDORAS MECÁNICAS

Autopropulsadas o remolcadas. Tendrán una escoba rotatoria con el tipo de cerdas adecuadas según el material por remover y la superficie por barrer.

F. TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO

El transporte y almacenamiento de todos los materiales son responsabilidad exclusiva del Contratista de Obra y los realizará de forma tal que no sufran alteraciones que ocasionen deficiencias en la calidad de la obra, tomando en cuenta lo establecido en las Normas N CMT-4 04, *Matenales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, N CMT 4 05-001, *Calidad de Materiales Asfálticos*, N-CMT-4-05-002, *Calidad de Materiales Asfálticos Modificados* y N-CMT 4-05 003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*. Se sujetarán, en lo que corresponda, a las leyes y reglamentos de protección ecológica vigentes.

- F.1. El transporte de la mezcla se hará siempre sobre superficies pavimentadas.
- F.2. La distancia del transporte será de sesenta (60) kilómetros como máximo, la que se reducirá un diez (10) por ciento por cada grado de pendiente ascendente, medida como el desnivel entre la planta de mezclado y el punto de tiro, dividido entre la longitud de transporte.

G. EJECUCIÓN

G.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Para la construcción de carpetas asfálticas con mezcla en caliente se considerará lo señalado en la Cláusula D. de la Norma N-LEG-3, *Ejecución de Obras*.

G.2. PROPORCIONAMIENTO DE MATERIALES

- G.2.1. Los materiales pétreos, asfálticos y aditivos que se empleen en la elaboración de las carpetas asfálticas con mezcla en caliente, se mezclarán con el proporcionamiento necesario

NORMAS

N-CTR-CAR-1 04-006/04

para producir una mezcla asfáltica homogénea, con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría.

G.2.2. El proporcionamiento se determinará mediante un diseño de mezclas asfálticas en caliente, para obtener las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría. Este diseño será responsabilidad del Contratista de Obra.

G.2.3. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, con las dosificaciones de los distintos tipos de materiales pétreos, asfálticos y aditivos utilizados en la elaboración de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, no se obtiene una mezcla con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría, se suspenderá inmediatamente el trabajo en tanto que el Contratista de Obra las corrija por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

G.3. CONDICIONES CLIMÁTICAS

Los trabajos serán suspendidos en el momento en que se presenten situaciones climáticas adversas y no se reanudarán mientras éstas no sean las adecuadas, considerando que no se construirán carpetas asfálticas con mezcla en caliente:

G.3.1. Sobre superficies con agua libre o encharcada.

G.3.2. Cuando exista amenaza de lluvia o esté lloviendo.

G.3.3. Cuando la temperatura de la superficie sobre la cual serán construidas esté por debajo de los quince (15) grados Celsius.

G.3.4. Cuando la temperatura ambiente esté por debajo de los quince (15) grados Celsius y su tendencia sea a la baja. Sin embargo, las carpetas de granulometria densa pueden ser construidas cuando la temperatura ambiente esté por arriba de los diez (10) grados Celsius y su tendencia sea al alza. La temperatura ambiente será tomada a la sombra lejos de cualquier fuente de calor artificial.

G.4. TRABAJOS PREVIOS

- G.4.1.** Inmediatamente antes de iniciar la construcción de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, la superficie sobre la que se colocará estará debidamente terminada dentro de las líneas y niveles, exenta de materias extrañas, polvo, grasa o encharcamientos de material asfáltico, sin irregularidades y reparados satisfactoriamente los baches que hubieran existido. No se permitirá la construcción sobre superficies que no hayan sido previamente aceptadas por la Secretaría
- G.4.2.** Si así lo indica el proyecto o lo aprueba la Secretaría, cuando la carpeta se construya sobre una base, ésta debe estar impregnada de acuerdo con lo indicado en la Norma N CTR CAR 1 04-004, *Riegos de Impregnación*. Es responsabilidad del Contratista de Obra establecer el lapso entre la impregnación y el inicio de la construcción de la carpeta.
- G.4.3.** Si así lo indica el proyecto o lo aprueba la Secretaría, inmediatamente antes de iniciar el tendido de la carpeta, se aplicará un riego de liga en toda la superficie, de acuerdo con lo indicado en la Norma N CTR CAR 1-04-005, *Riegos de Liga*
- G.4.4.** Los acarrees de la mezcla hasta el sitio de su utilización, se harán de tal forma que el tránsito sobre la superficie donde se construirá la carpeta, se distribuya sobre todo el ancho de la misma, evitando la concentración en ciertas áreas y, por consecuencia, su deterioro. No se permitirá que los camiones que transportan la mezcla asfáltica, hagan maniobras que puedan distorsionar, disgregar u ondular las orillas de una capa recién tendida. En el caso de que por algún motivo esta situación llegue a suceder, el Contratista de Obra reparará inmediatamente los daños causados, por su cuenta y costo.

G.5. ELABORACIÓN DE LA MEZCLA

- G.5.1.** El procedimiento que se utilice para la elaboración de la mezcla es responsabilidad del Contratista de Obra, quien tendrá los cuidados necesarios para el manejo de los materiales a lo largo de todo el proceso, para que la mezcla

NORMAS

N-CTR-CAR-1-04-006/04

cumpla con los requerimientos de calidad establecidos en el proyecto o aprobados por la Secretaría y atenderá lo indicado en la Norma N-CMT-4-05-003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*.

- G.5.2. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, la calidad de la mezcla asfáltica difiere de la establecida en el proyecto o aprobada por la Secretaría, se suspenderá inmediatamente la producción en tanto que el Contratista de Obra la corrija por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.
- G.5.3. Durante el proceso de producción no se cambiará de un tipo de mezcla a otro, hasta que la planta haya sido vaciada completamente y los depósitos de alimentación del material pétreo sean cargados con el nuevo material.

G.6. TRAMO DE PRUEBA

Sobre la superficie donde se construirá la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, el Contratista de Obra ejecutará previamente un tramo de prueba con una longitud de cuatrocientos (400) metros, con la finalidad de evaluar el procedimiento y los equipos que se utilizarán, considerando que.

- G.6.1. La construcción del tramo de prueba se hará cumpliendo con todo lo establecido en esta Norma.
- G.6.2. Una vez compactada la carpeta del tramo de prueba, se verificará que cumpla con lo establecido en la Cláusula H. de esta Norma. En caso negativo, el Contratista de Obra construirá el número de tramos de prueba necesarios hasta que cumpla con lo indicado en dicha Cláusula.
- G.6.3. Si el tramo de prueba construido cumple con lo indicado en el Inciso anterior, podrá considerarse como parte de la obra y será objeto de medición y pago, de lo contrario no se medirá ni pagará y la Secretaría, a su juicio, determinará si es necesario o no que el Contratista de Obra retire el tramo de prueba por su cuenta y costo.

G.7. TENDIDO DE LA MEZCLA

- G.7.1.** Después de elaborada la mezcla asfáltica, se extenderá y se conformará con una pavimentadora autopropulsada, de tal manera que se obtenga una capa de material sin compactar de espesor uniforme. Sin embargo, en áreas irregulares, la mezcla asfáltica puede tenderse y terminarse a mano.
- G.7.2.** Si la mezcla está quemada, no se permitirá su tendido.
- G.7.3.** El Contratista de Obra determinará, mediante la curva *Viscosidad-Temperatura* del material asfáltico utilizado, las temperaturas mínimas convenientes para el tendido y compactación de la mezcla
- G.7.4.** El tendido se hará en forma continua, utilizando un procedimiento que minimice las paradas y arranques de la pavimentadora
- G.7.5.** En el caso de carpetas de granulometría densa, cuando el tendido se haga en dos (2) o más franjas, con un intervalo de más de un día entre franjas, éstas se ligarán con cemento asfáltico o con emulsión de rompimiento rápido. Esto se puede evitar si se elimina la junta longitudinal utilizando pavimentadoras en batería.
- G.7.6.** Cuando se trate de carpetas de granulometría semiabierta o abierta, se pueden evitar las juntas longitudinales utilizando pavimentadoras en batería. Cuando esto no sea posible, no se utilizarán productos asfálticos para ligar las juntas de dos franjas sucesivas o en la continuación de una franja con otra, debido a la obstrucción que pueden producir al drenaje dentro de la carpeta. Es importante que, por ningún motivo, se obstruya el drenaje interior en cualquier tramo.
- G.7.7.** En el caso de carpetas de granulometría densa, la cara expuesta de las juntas transversales se recortará aproximadamente a cuarenta y cinco (45) grados antes de iniciar el siguiente tendido, ligando las juntas con cemento asfáltico o con emulsión de rompimiento rápido. Si se trata de carpetas de granulometría semiabierta o abierta, se considerará lo indicado en el Inciso anterior.

NORMAS

N-CTR-CAR-1-04-006/04

- G.7.8.** En cualquier caso, se tendrá especial cuidado para que el enrasador traslape las juntas de tres (3) a cinco (5) centímetros y que el control del espesor sea ajustado de tal manera que el material quede ligeramente por arriba de la capa previamente tendida, para que al ser compactado, el pavimento quede con los niveles y dentro de las tolerancias establecidos en el proyecto o aprobados por la Secretaría.
- G.7.9.** En el caso de carpetas de granulometría densa, de ser necesario, la mezcla se extenderá en capas sucesivas, con un espesor no mayor que aquel que el equipo sea capaz de compactar como se indica en la Fracción G.8. de esta Norma, hasta que se obtengan la sección y el espesor establecidos en el proyecto. Cuando el tendido se haga por capas, la capa sucesiva no se tenderá hasta que la temperatura de la capa anterior sea menor de setenta (70) grados Celsius en su punto medio. El tendido de las carpetas de granulometría semiabierta o abierta se hará en una sola capa.
- G.7.10.** Cada capa de mezcla asfáltica se colocará cubriendo como mínimo el ancho total del carril
- G.7.11.** Durante el tendido de la mezcla, la tolva de descarga de la pavimentadora permanecerá llena, para evitar la segregación de los materiales. No se permitirá el tendido de la mezcla si existe segregación. Es recomendable utilizar un equipo especial para verter la mezcla asfáltica a la pavimentadora, evitando que el camión vacíe directamente a las tolvas de la misma, mejorando así la uniformidad superficial de la carpeta.
- G.7.12.** Al final de cada jornada y con la frecuencia necesaria, se limpiarán perfectamente todas aquellas partes de la pavimentadora que presenten residuos de mezcla.
- G.7.13.** La longitud de tendido de la mezcla es responsabilidad del Contratista de Obra, tomando en cuenta que no se tenderán tramos mayores de los que puedan ser compactados de inmediato.
- G.7.14.** En el caso de carpetas de granulometría semiabierta o abierta, el tiempo de almacenamiento de la mezcla no excederá de treinta (30) minutos, por lo que habrá una coordinación adecuada entre la producción, el transporte y la colocación de la carpeta.

G.8. COMPACTACIÓN

- G.8.1.** Inmediatamente después de tendida la mezcla asfáltica, será compactada.
- G.8.2.** En el caso de carpetas de granulometría densa, la capa extendida se compactará lo necesario para lograr que cumpla con las características indicadas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría
- G.8.3.** En el caso de carpetas de granulometría semiabierta o abierta, la mezcla se compactará mediante dos pasadas con compactadores de rodillo liso metálico estático, con una masa mínima de diez (10) toneladas. Si así lo aprueba la Secretaría, se dará solamente una pasada cuando, a su juicio, se detecte un posible fracturamiento del material pétreo.
- G.8.4.** La compactación se hará longitudinalmente a la carretera, de las orillas hacia el centro en las tangentes y del interior al exterior en las curvas, con un traslape de cuando menos la mitad del ancho del compactador en cada pasada.
- G.8.5.** El uso de compactadores vibratorios sólo se permitirá para la compactación de capas mayores de cuatro (4) centímetros de espesor, en carpetas de granulometría densa.
- G.8.6.** La compactación se terminará cuando la mezcla asfáltica tenga una temperatura igual a la mínima conveniente para la compactación, que haya determinado el Contratista de Obra conforme a lo indicado en el Inciso G.7.3 de esta Norma, o mayor.
- G.8.7.** Por ningún motivo se estacionará el equipo de compactación, por periodos prolongados, sobre la carpeta recién compactada, para evitar que se produzcan deformaciones permanentes en la superficie terminada

G.9. ACABADO

- G.9.1.** Una vez concluida la compactación en todo el ancho de la corona de la última capa de la carpeta de granulometría densa, se formará un chafán en las orillas, cuya base será igual a uno coma cinco (1,5) veces el espesor de la carpeta

asfáltica, compactándolo con el equipo adecuado. Para ello se utilizará mezcla asfáltica adicional, colocándola inmediatamente después del tendido, o bien directamente con las pavimentadoras si están equipadas para hacerlo.

- G.9.2.** En el caso de carpetas de granulometría semiabierta o abierta, una vez concluida la compactación en todo el ancho de la corona, se verificará que no se haya obstruido el drenaje lateral en ningún tramo. En el caso de que existan obstrucciones, el Contratista de Obra las eliminará por su cuenta y costo.

G.10. CONSERVACIÓN DE LOS TRABAJOS

Es responsabilidad del Contratista de Obra la conservación de la carpeta asfáltica hasta que haya sido recibida por la Secretaría, cuando la carretera sea operable.

H. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O RECHAZO

Además de lo establecido anteriormente en esta Norma, para que la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, de cada tramo de un (1) kilómetro de longitud o fracción, se considere terminada y sea aceptada por la Secretaría, con base en el control de calidad que ejecute el Contratista de Obra, mismo que podrá ser verificado por la Secretaría cuando lo juzgue conveniente, se comprobará:

H.1. CALIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

- H.1.1.** Que los materiales pétreos, asfálticos y aditivos utilizados en la mezcla asfáltica, hayan cumplido con las características establecidas como se indica en la Fracción D.1. de esta Norma
- H.1.2.** Que las características de la mezcla asfáltica hayan cumplido con las establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría.
- H.1.3.** Que la estabilidad de la carpeta de granulometría densa, determinada en corazones extraídos al azar mediante un procedimiento basado en tablas de números aleatorios, conforme a lo indicado en el Manual M-CAL-1-02, *Criterios Estadísticos de Muestreo*, haya cumplido con lo establecido en el proyecto o lo aprobado por la Secretaría, considerando que:

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR-CAR-1-04-006/04

H.1.3.1. El número de corazones por extraer se determinará aplicando la siguiente fórmula:

$$c = L/50$$

Donde:

c = Número de corazones por extraer, aproximado a la unidad superior

L = Longitud del tramo, (m)

H.1.3.2. Los corazones se extraerán sin dañar la parte contigua de los mismos.

H.1.3.3. Tan pronto se concluya la extracción de los corazones, se rellenarán los huecos con el mismo tipo de mezcla asfáltica utilizada en la carpeta, compactándola y enrasando su superficie con la original de la carpeta.

H.1.3.4. Todas las estabilidades que se determinen en los corazones, deberán estar dentro de las tolerancias que fije el proyecto o apruebe la Secretaría.

H.2. ÍNDICE DE PERFIL

Que el índice de perfil de la última capa de la carpeta asfáltica de granulometría densa compactada, en cada línea de tendido de cada subtramo de doscientos (200) metros de longitud o fracción, haya sido de catorce centímetros por kilómetro (14 cm / km) como máximo, a menos que el proyecto indique otro valor. El Contratista de Obra hará esta verificación conforme a la norma ASTM E 1274, dentro de las cuarenta y ocho (48) horas siguientes a la terminación de la compactación, considerando lo que a continuación se señala. La Secretaría evaluará diariamente los resultados que se obtengan.

H.2.1. Equipo

El Contratista de Obra dispondrá y mantendrá durante el tiempo que dure la obra, de un perfilógrafo tipo California que cumpla con la norma ASTM E 1274. Antes de su utilización, el equipo se calibrará como se indica en esa norma, pudiendo la

NORMAS

N-CTR-CAR-1-04 006/04

Secretaría verificar la calibración en cualquier momento y si a su juicio, el perfilógrafo presenta deficiencias o no está bien calibrado, se suspenderá inmediatamente la evaluación en tanto que el Contratista de Obra lo calibre adecuadamente, corrija las deficiencias o lo remplace. En ningún caso se medirán para efecto de pago carpetas que no hayan sido verificadas.

H.2.2. Tramo de prueba

Para que el tramo de prueba a que se refiere la Fracción G 6. de esta Norma sea aceptado por la Secretaría, debe tener un índice de perfil de catorce centímetros por kilómetro (14 cm / km) como máximo.

H.2.3. Determinación del índice de perfil

H.2.3.1. La obtención del índice de perfil, en cada línea de tendido, se hará a lo largo de la línea imaginaria ubicada a noventa más menos veinte (90 ± 20) centímetros de la orilla interior de la línea de tendido por evaluar. Las mediciones serán divididas en secciones consecutivas de doscientos (200) metros, con el propósito de establecer subtramos en los que se otorgue al Contratista de Obra un estímulo por mejoramiento de calidad o se le aplique una sanción por incumplimiento de calidad, respecto al precio unitario fijado en el contrato, según la calidad obtenida en la superficie terminada y de acuerdo con el criterio establecido en la Cláusula J. de esta Norma.

H.2.3.2. Cuando la longitud de un subtramo construido en un día de trabajo, no alcance los doscientos (200) metros, será agrupado con el tramo inmediato que se construya el día siguiente. En este caso, la medición del índice de perfil deberá hacerse tan pronto como sea práctico y posible, pero no después de cuarenta y ocho (48) horas de terminado el último subtramo de ese día. Si el Contratista de Obra no es el responsable del tendido de un tramo subsecuente, no se medirá el índice de perfil en los cinco (5) últimos metros del tendido de su tramo.

H.2.3.3. Si el índice de perfil determinado en alguna línea de tendido de un subtramo de doscientos (200) metros o fracción, resulta menor de diez coma un centímetros por kilómetro (10,1 cm / km), el Contratista de Obra se hará acreedor a un estímulo por mejoramiento de calidad, calculado con base en el precio unitario de la carpeta asfáltica. En su caso, el estímulo se determinará mediante el factor que se establece en la Cláusula J. de esta Norma

H.2.4. Índice de perfil promedio diario

H.2.4.1. Cada día de trabajo se determinará el índice de perfil promedio diario, obteniendo el promedio aritmético de todos los índices de perfil determinados ese día. Si el índice de perfil promedio diario, resulta mayor de veinticuatro centímetros por kilómetro (24 cm / km), se suspenderá de inmediato la construcción de la carpeta asfáltica, hasta que el Contratista de Obra corrija la carpeta defectuosa, según se indica en el Inciso H.2.5. Para reanudar la construcción de la carpeta, el Contratista de Obra debe construir otro tramo de prueba según lo indicado en la Fracción G.6 de esta Norma, como si se tratara del inicio de los trabajos. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

H.2.4.2. Para determinar el índice de perfil promedio diario se puede utilizar el formato que se muestra en la Tabla 1 de esta Norma, en el que, para un mismo día de trabajo y cada línea de tendido y subtramo, se anota el índice de perfil obtenido. Se calcula el promedio aritmético de todos los índices de perfil obtenidos el mismo día y se anota en el último renglón del formato. Si el tramo tiene más de dos (2) líneas de tendido, al formato se le agregan las columnas que sean necesarias para completar el número de líneas de tendido. Los índices de perfil que se obtengan en subtramos que hayan sido corregidos como se indica en el Inciso H.2.5. de esta Norma, serán registrados en la columna correspondiente, pues los valores originales deberán conservarse sin alterar.

NORMAS

N-CTR CAR-1-04-006/04

TABLA 1.- Formato para el cálculo del índice de perfil promedio diario

Fecha de construcción:

Tramo ^[1]		Subtramo ^[2]		<i>I_p</i> cm/km		<i>I_{p_c}</i> cm/km		
del km	al km	del km	al km	Línea de tendido 1	Línea de tendido 2	Fecha de obtención	Línea de tendido 1	Línea de tendido 2
+	+	+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					
+	+	+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					
+	+	+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					

$\bar{I}_p =$

- I_p* = Índice de perfil original del subtramo y línea de tendido correspondientes
- \bar{I}_p = Índice de perfil promedio diario. Promedio aritmético de todos los *I_p* obtenidos en un mismo día. (cm/km)
- I_{p_c}*
 = Índice de perfil después de corregido el subtramo y línea de tendido correspondientes
- [1] = Tramo de 1 km o fracción
- [2] = Subtramo de 200 m o fracción

H.2.5. Corrección de la superficie de la carpeta asfáltica

H.2.5.1. El Contratista de Obra realizará las correcciones de la superficie de la carpeta asfáltica que se requieran para obtener el índice de perfil adecuado.

H.2.5.2. Después de obtenido el índice de perfil de cada línea de tendido en un subtramo de doscientos (200) metros, todas aquellas áreas en las que el perfilograma presente una desviación igual a un (1) centímetro o mayor, en siete coma cinco (7,5) metros o menos, serán corregidas mediante fresado. Concluida la corrección, se obtendrá nuevamente el índice de perfil del subtramo para verificar el cumplimiento de lo aquí estipulado.

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR-CAR-1-04 006/04

H.2.5.3. Una vez realizadas las correcciones individuales de todas las desviaciones a que se refiere el Párrafo anterior, cualquier subtramo de doscientos (200) metros que presente un índice de perfil mayor de veinticuatro centímetros por kilómetro (24 cm / km) en cualquiera de sus líneas de tendido, será corregido mediante alguno de los procedimientos que se indican a continuación u otros que apruebe la Secretaría. En cualquier caso, concluida la corrección se determinarán nuevamente los índices de perfil de todas las líneas de tendido del subtramo para verificar el cumplimiento de lo aquí estipulado.

- a) Fresado continuo de la superficie de la carpeta de granulometría densa, en tramos no menores de cincuenta (50) metros y a todo el ancho de la corona en carreteras de dos (2) carriles, o en todos los carriles de un mismo sentido en carreteras con carriles múltiples, para reducir el índice de perfil a veinticuatro centímetros por kilómetro (24 cm / km) o menos. Sobre la superficie fresada, se colocará un tratamiento superficial aprobado por la Secretaría, con un espesor de dos (2) centímetros como mínimo, a menos que el proyecto establezca la construcción de una carpeta de granulometría abierta o semiabierta
- b) Colocación sobre la carpeta de granulometría densa, de una sobrecarpeta de tres (3) centímetros de espesor como mínimo, en tramos no menores de cincuenta (50) metros y a todo el ancho de la corona en carreteras de dos (2) carriles, o en todos los carriles de un mismo sentido en carreteras con carriles múltiples, elaborada con la misma mezcla utilizada en la carpeta, que cumpla con todo lo indicado en esta Norma y tenga un índice de perfil de veinticuatro centímetros por kilómetro (24 cm / km) como máximo.

H.2.5.4. Cuando el índice de perfil de alguna línea de tendido de un subtramo de doscientos (200) metros esté entre catorce coma uno y veinticuatro centímetros por kilómetro (14,1 a 24 cm / km), el Contratista de Obra podrá elegir entre corregir la superficie terminada como

NORMAS

N CTR-CAR 1-04-006/04

se indica en el Párrafo H.2.5.3., o aceptar una sanción por incumplimiento de calidad, calculada con base en el precio unitario de la carpeta asfáltica, mediante el factor que se establece en la Cláusula J. de esta Norma.

H.2.5.5. Todos los trabajos de corrección serán por cuenta y costo del Contratista de Obra, y previamente a su ejecución, los procedimientos de corrección de la superficie de la carpeta serán sometidos a la aprobación de la Secretaría. No se permitirá efectuar trabajos de corrección con equipos de impacto que puedan dañar la estructura del pavimento, ni con resanes superficiales adheridos. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que se ocasionen por motivo de las correcciones, serán imputables al Contratista de Obra.

H.2.5.6. Todos los trabajos de corrección de la superficie de la carpeta, se efectuarán antes de que se verifiquen sus líneas, pendientes y espesores, como se indica en la Fracción H.3. de esta Norma, salvo que la corrección se realice mediante una sobrecarpeta, en cuyo caso la verificación de los espesores se hará antes de colocarla.

H.3. LÍNEAS, PENDIENTES Y ESPESORES

Que el alineamiento, perfil, sección y espesor de la carpeta, cumplan con lo establecido en el proyecto, con las tolerancias que se indican en esta Fracción, como sigue:

H.3.1. Previamente a la construcción de la carpeta, en las estaciones cerradas a cada veinte (20) metros, se nivelará la corona terminada de la capa inmediata inferior, obteniendo los niveles en el eje y en ambos lados de éste, en puntos ubicados a una distancia igual al semiancho de la corona de la carpeta menos setenta (70) centímetros, a la mitad del espacio comprendido entre éstos y el eje, y en las orillas de la carpeta.

H.3.2. Una vez compactada la carpeta, verificados sus índices de perfil y, en su caso, hechas las correcciones a que se refiere el Inciso H.2.5., se volverán a nivelar las mismas secciones que se indican en el Inciso H.3.1., determinando las

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N-CTR-CAR-1-04 006/04

elevaciones de los mismos puntos ahí indicados para obtener las pendientes transversales entre ellos, y se medirán, en cada sección, las distancias entre el eje y las orillas de la carpeta, para verificar que esas pendientes y distancias estén dentro de las tolerancias que se indican en la Tabla 2 de esta Norma.

TABLA 2.- Tolerancias para líneas y pendientes

Característica	Tolerancia
Ancho de la carpeta, del eje a la orilla	± 1 cm
Pendiente transversal	$\pm 0,5\%$

- H.3.3.** Si para corregir la superficie de la carpeta se opta por colocar una sobrecarpeta como se señala en el Punto b) del Párrafo H.2.5.3 o por cualquier otro procedimiento aprobado por la Secretaría, que eleve esa superficie, antes de su ejecución se nivelarán las mismas secciones a que se refiere el Inciso H.3.1. de esta Norma, determinando las elevaciones de los mismos puntos ahí indicados para obtener los espesores de la carpeta antes de ser corregida.
- H.3.4.** Las nivelaciones se ejecutarán con nivel fijo y comprobación de vuelta, obteniendo los niveles con aproximación al milímetro. Las distancias horizontales se medirán con aproximación al centímetro.
- H.3.5.** A partir de las cotas obtenidas en las nivelaciones a que se refieren los Incisos H.3.1., H.3.2. y H.3.3. de esta Norma, según sea el caso, en todos los puntos nivelados se determinarán los espesores de la carpeta compactada, los que deberán ser iguales al fijado en el proyecto o, para cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, cumplir con lo establecido en los Incisos H.3.6. y H.3.7. de esta Norma.
- H.3.6.** El espesor promedio correspondiente a todas las determinaciones hechas en el tramo, deberá ser igual a noventa y ocho centésimos (0,98) del espesor de proyecto o mayor.

NORMAS

N-CTR-CAR 1 04-006/04

$$\bar{e} \geq 0.98e$$

Donde:

e = Espesor de proyecto, (cm)

\bar{e} = Espesor promedio correspondiente a todas las determinaciones hechas en el tramo, (cm), obtenido mediante la siguiente fórmula:

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n}$$

Donde:

e_i = Espesor obtenido en cada determinación, (cm)

n = Número de determinaciones hechas en el tramo

H.3.7. La desviación estándar de todos los espesores determinados en el tramo, deberá ser igual a diez centésimos (0,10) del espesor promedio o menor:

$$\sigma_e \leq 0.10\bar{e}$$

Donde:

σ_e = Desviación estándar correspondiente a todas las determinaciones hechas en el tramo, (cm), calculada con la siguiente fórmula:

$$\sigma_e = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n - 1} \right)^{1/2}$$

\bar{e} , e_i y n tienen el significado indicado en el Inciso anterior.

H.4. RESISTENCIA A LA FRICCIÓN

H.4.1. Que la superficie de rodadura de la carpeta asfáltica compactada, haya tenido una resistencia a la fricción en condiciones de pavimento mojado, igual a seis décimas (0,6) o mayor, medida con el equipo *Mu-Meter*, a una velocidad de setenta y cinco (75) kilómetros por hora, por lo menos sobre la huella de la rodada externa de cada línea de tendido. El

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR-1-04-006/04

Contratista de Obra hará esta verificación conforme a la norma ASTM E 670. La prueba se hará sobre la superficie de rodadura compactada y, en su caso, corregida de acuerdo con lo indicado en el Inciso H.2.5. de esta Norma.

- H.4.2.** Cuando la resistencia a la fricción de una carpeta de granulometría densa, sea menor de seis décimas (0,6) y el proyecto no establezca la construcción sobre ella de una carpeta de granulometría abierta o semiabierta, el Contratista de Obra, por su cuenta y costo, corregirá la superficie terminada mediante la colocación de una carpeta de un riego, conforme a lo indicado en la Norma N-CTR-CAR-1-04-008, *Carpetas por el Sistema de Riegos*, en tramos no menores de cincuenta (50) metros y a todo el ancho de la corona en carreteras de dos (2) carriles, o en todos los carriles de un mismo sentido en carreteras con carriles múltiples. La corrección también podrá hacerse mediante alguno de los procedimientos indicados en los Puntos a) y b) del Párrafo H.2.5.3, en cuyo caso, una vez concluida, se determinarán nuevamente la resistencia a la fricción y los índices de perfil de todas las líneas de tendido del subtramo, para verificar el cumplimiento de lo estipulado tanto en el inciso anterior como en la Fracción H.2 de esta Norma.

I. MEDICIÓN

Cuando la construcción de carpetas asfálticas con mezcla en caliente se contrate a precios unitarios por unidad de obra terminada y sea ejecutada conforme a lo indicado en esta Norma, a satisfacción de la Secretaría, se medirá según lo señalado en la Cláusula E. de la Norma N-LEG-3, *Ejecución de Obras*, para determinar el avance o la cantidad de trabajo realizado para efecto de pago, tomando como unidad el metro cúbico de carpeta terminada, según su tipo y para cada banco en particular, con aproximación a la unidad. El volumen de cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, se determinará mediante la siguiente fórmula.

$$V = L \times \bar{e} \times \bar{u}$$

Donde:

V = Volumen de la carpeta asfáltica de cada tramo de 1 km o fracción, (m³)

L = Longitud del tramo, (m)

NORMAS

N-CTR-CAR-1-04 006/04

\bar{e} = Espesor promedio correspondiente a todas las determinaciones hechas en el tramo, (m), obtenido como se indica en el Inciso H.3.6 de esta Norma

\bar{a} = Ancho promedio de la carpeta asfáltica, obtenido con base en las distancias entre el eje y las orillas de la corona, determinadas en todas las secciones del tramo como se indica en el Inciso H.3.2. de esta Norma, (m).

La Secretaría medirá y pagará como máximo el volumen de la carpeta asfáltica que resulte del espesor de proyecto más un (1) centímetro por el ancho de proyecto más un (1) centímetro.

Para el cálculo del volumen en el tramo medido se puede usar el formato que se muestra en la Tabla 3 de esta Norma.

TABLA 3.- Formato para el cálculo de los volúmenes, los estímulos o sanciones y los importes a pagar

Tramo ⁽¹⁾		L m	e m	a m	V' m ³	PU \$	Importe \$ ⁽²⁾	\bar{F}	E \$
del km	al km								
+	+								
+	+								
+	+								
+	+								
+	+								
Sumas =						\$		\$	
Importe total =						\$			

L = Longitud del tramo correspondiente

e = Espesor promedio del tramo correspondiente (espesor de proyecto más 1 cm como máximo)

a = Ancho promedio del tramo correspondiente (ancho de proyecto más 1 cm como máximo)

V' = Volumen del tramo correspondiente ($V' = L \times e \times a$)

PU = Precio unitario de la carpeta

\bar{F} = Factor promedio de estímulo o sanción del tramo correspondiente, obtenido de la Tabla 5

E = Estímulo o sanción del tramo correspondiente ($E = V' \times PU \times \bar{F}$)

[1] = Tramo de 1 km o fracción

[2] = Importe de la carpeta (Importe = V' × PU)

J. BASE DE PAGO

Cuando la construcción de carpetas asfálticas con mezcla en caliente se contrate a precios unitarios por unidad de obra terminada y sea medida de acuerdo con lo indicado en la Cláusula I. de esta Norma, se pagará al precio fijado en el contrato para el metro cúbico de carpeta terminada en cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, según su tipo y

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR-CAR 1-04 006/04

para cada banco en particular. Estos precios unitarios, conforme a lo indicado en la Cláusula F. de la Norma N-LEG-3, *Ejecución de Obras*, incluyen lo que corresponda por

- Valor de adquisición o producción de los materiales asfálticos para la carpeta y para el riego de liga, así como de los aditivos que se requieran. Limpieza del tanque en que se transporten, movimientos en la planta de producción y en el lugar de destino, carga al equipo de transporte, transporte al lugar de almacenamiento, descarga en el depósito, cargo por almacenamiento y todas las operaciones de calentamiento y bombeo requeridas.
- Desmonte y despalle de los bancos; extracción del material pétreo aprovechable y del desperdicio, cualesquiera que sean sus clasificaciones; cribados y desperdicios de los cribados; trituración parcial o total, lavado o eliminación del polvo superficial adherido a los materiales; cargas, descargas y todos los acarrees de los materiales y de los desperdicios; formación de los almacenamientos y clasificación de los materiales pétreos separándolos por tamaños
- Instalación, alimentación y desmantelamiento de las plantas
- Secado del material pétreo, dosificación, calentamiento y mezclado de los materiales pétreos, asfálticos y aditivos.
- Barrido y limpieza de la superficie sobre la que se construirá la carpeta
- Aplicación del riego de liga según lo indicado en la Norma N-CTR-CAR 1-04-005, *Riegos de Liga*.
- Cargas en la planta de la mezcla asfáltica al equipo de transporte y acarreo al lugar de tendido.
- Tendido y compactación de la mezcla asfáltica.
- Los tiempos de los vehículos empleados en los transportes de todos los materiales durante las cargas y las descargas.
- La conservación de la carpeta asfáltica hasta que sea recibida por la Secretaría.
- Y todo lo necesario para la correcta ejecución de este concepto.

Cuando procedan estímulos por mejoramiento de calidad o sanciones por incumplimiento de calidad, de acuerdo con los índices de perfil de la carpeta asfáltica; que se obtengan según se señala en la Fracción H.2., se pagará al Contratista de Obra una bonificación o se le hará una

NORMAS

N-CTR-CAR:1-04 006/04

deducción, según corresponda, calculada para cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, medido como se indica en la Cláusula I. de esta Norma, mediante la siguiente fórmula:

$$E = V \times PU \times \bar{F}$$

Donde:

- E = Estimulo a pagar como bonificación cuando resulta positivo o sanción aplicada como deducción cuando resulta negativo, para cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, (\$)
- V = Volumen de la carpeta asfáltica del tramo, (m³)
- PU = Precio unitario de la carpeta asfáltica fijado en el contrato, (\$/m³)
- \bar{F} = Factor promedio de estímulo o sanción del tramo. Promedio aritmético de los factores de estímulo o sanción (F_i) para cada subtramo de doscientos (200) metros en cada línea de tendido, tomados de la Tabla 4 de esta Norma, (adimensional)

TABLA 4.- Factores de estímulo o sanción, según el índice de perfil

Índice de perfil * cm / km	Factores de estímulo o sanción (F_i)	
4,0 o menos	Estímulo	+ 0,05
4,1 a 5,5		+ 0,04
5,6 a 7,0		+ 0,03
7,1 a 8,5		+ 0,02
8,6 a 10,0		+ 0,01
10,1 a 14,0	0	
14,1 a 16,0	Sanción	- 0,02
16,1 a 18,0		- 0,04
18,1 a 20,0		- 0,06
20,1 a 22,0		- 0,08
22,1 a 24,0		- 0,10
Mayor de 24,0	CORREGIR	

* Para cada tramo de 200 m o fracción en cada línea de tendido

Para calcular el factor promedio de estímulo o sanción (\bar{F}) se puede utilizar el formato que se muestra en la Tabla 5, en el que, para cada línea de tendido y subtramo, se anota el factor de estímulo o sanción (F_i) tomado de la Tabla 4, de acuerdo con el índice de perfil (I_p)

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N-CTR CAR-1-04 006/04

obtenido de la Tabla 1 y se calcula el promedio aritmético de todos los factores de estímulo o sanción (F_j) de cada tramo, que se anota en la última columna del formato, en el cuadro correspondiente. Para subtramos que hayan sido corregidos como se indica en el Inciso H.2.5 de esta Norma, el factor de estímulo o sanción (F_j) correspondiente se determina con base en el índice de perfil (I_{p_c}) logrado después de la corrección. Si el tramo tiene más de dos (2) líneas de tendido, al formato se le agregan las columnas que sean necesarias para completar el número de líneas de tendido.

TABLA 5.- Formato para el cálculo del factor promedio de estímulo o sanción de cada tramo

Mes: Año:

Tramo ^[1]		Subtramo ^[2]		Línea de tendido 1			Línea de tendido 2			\bar{F}
del km	al km	del km	al km	Día ^[3]	I_p cm/km	F_j	Día ^[3]	I_p cm/km	F_j	
+ ---	+ ---	+ ---	+ ---							
		+ ---	+ ---							
		+ ---	+ ---							
		+ ---	+ ---							
+ ---	+ ---	+ ---	+ ---							
		+ ---	+ ---							
		+ ---	+ ---							
		+ ---	+ ---							
+ ---	+ ---	+ ---	+ ---							
		+ ---	+ ---							
		+ ---	+ ---							
		+ ---	+ ---							

I_p = Índice de perfil del subtramo y línea de tendido correspondientes, obtenido de la Tabla 1. Para subtramos que hayan sido corregidos como se indica en el Inciso H.2.5 de esta Norma, se utiliza el índice de perfil (I_p) logrado después de la corrección.

F_j = Factor de estímulo o sanción para el subtramo y línea de tendido correspondientes, obtenido de la Tabla 4.

\bar{F} = Factor promedio de estímulo o sanción. Promedio aritmético de los F_j del tramo correspondiente.

[1] = Tramo de 1 km o fracción

[2] = Subtramo de 200 m o fracción

[3] = Día en el que se construyó la carpeta

Asimismo, para calcular el estímulo o la sanción (E) de cada tramo, se puede usar la Tabla 3, en la que se anotan los factores promedio de estímulo o sanción (\bar{F}) correspondientes, calculados en la Tabla 5 de esta Norma.

NORMAS

N·CTR·CAR·1·04·006/04

K. ESTIMACIÓN Y PAGO

La estimación y pago de las carpetas asfálticas con mezcla en caliente, se efectuará de acuerdo con lo señalado en la Cláusula G. de la Norma N·LEG·3, *Ejecución de Obras*.

L. RECEPCIÓN DE LA OBRA

Una vez concluida la construcción de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, la Secretaría la aprobará y al término de la obra, cuando la carretera sea operable, la recibirá conforme a lo señalado en la Cláusula H. de la Norma N·LEG·3, *Ejecución de Obras*, aplicando en su caso, las sanciones a que se refiere la Cláusula I. de la misma Norma.

LIBRO: CTR. CONSTRUCCIÓN
TEMA: CAR. Carreteras
PARTE: 1. CONCEPTOS DE OBRA
TÍTULO: 04 Pavimentos
CAPÍTULO: 007 *Carpetas Asfálticas con Mezcla en Frio*

A. CONTENIDO

Esta Norma contiene los aspectos por considerar en la construcción de carpetas asfálticas con mezcla en frío, para pavimentos de carreteras de nueva construcción.

B. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Las carpetas asfálticas con mezcla en frío, son aquellas que se construyen mediante el tendido y compactación de una mezcla de materiales pétreos y un material asfáltico, modificado o no, que puede ser rebajado con solventes o en emulsión. Según su función y su composición granulométrica, las carpetas asfálticas con mezcla en frío pueden ser:

B.1. CARPETAS DE MEZCLA ASFÁLTICA

Las carpetas de mezcla asfáltica se construyen para proporcionar al usuario una superficie de rodadura uniforme, bien drenada, resistente al derrapamiento, cómoda y segura. Cuando son de un espesor igual a cuatro (4) centímetros o mayor, tienen además la función estructural de soportar y distribuir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores del pavimento. Están constituidas por una mezcla en frío de materiales pétreos, generalmente de granulometría densa y un producto asfáltico, que puede ser una emulsión o un rebajado.

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N-CTR-CAR-1-04-007/04

B.2. CARPETAS DE MORTERO ASFÁLTICO

Las carpetas de mortero asfáltico no tienen función estructural y se construyen para proporcionar al usuario una superficie de rodadura uniforme, bien drenada, resistente al derrapamiento, cómoda y segura. Están constituidas por una mezcla en frío de materiales pétreos de granulometría fina y emulsión asfáltica o un asfalto rebajado

C. REFERENCIAS

Son referencias de esta Norma, las normas E.670 *Standard Test for Side Force Friction on Paved Surfaces Using the Mu-Meter* y E.1274, *Standard Test for Measuring Pavement Roughness Using a Profilograph*, publicadas por la *American Society for Testing and Materials (ASTM)*

Además, esta Norma se complementa con los siguientes:

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
Ejecución de Obras	N-LEG-3
Riegos de Impregnación	N-CTR-CAR-1-04-004
Riegos de Liga	N-CTR-CAR-1-04-005
Carpetas por el Sistema de Riegos	N-CTR-CAR-1-04-008
Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas	N-CMT-4-04
Calidad de Materiales Asfálticos	N-CMT-4-05-001
Calidad de Materiales Asfálticos Modificados	N-CMT-4-05-002
Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras	N-CMT-4-05-003
Criterios Estadísticos de Muestreo	M-CAL-1-02

D. MATERIALES

D.1. Los materiales que se utilicen en la construcción de carpetas asfálticas con mezcla en frío, cumplirán con lo establecido en las Normas N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, N-CMT-4-05-001, *Calidad de Materiales Asfálticos*, N-CMT-4-05-002, *Calidad de Materiales Asfálticos Modificados* y N-CMT-4-05-003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*, salvo que el proyecto indique otra cosa o así lo apruebe la Secretaría. Los materiales pétreos procederán de los bancos indicados en el proyecto o aprobados por la Secretaría.

NORMAS

N CTR-CAR-1-04-007/04

- D.2. Si dados los requerimientos de la obra, es necesario modificar las características de los materiales pétreos, del material asfáltico o de la interacción entre ambos utilizando aditivos, éstos estarán establecidos en el proyecto o serán aprobados por la Secretaría. Si el Contratista de Obra propone la utilización de aditivos, lo hará mediante un estudio técnico que los justifique, sometiéndolo a la consideración de la Secretaría para su análisis y aprobación. Dicho estudio ha de contener como mínimo, las especificaciones y los resultados de las pruebas de calidad, así como los procedimientos para el manejo, uso y aplicación de los aditivos.
- D.3. No se aceptará el suministro y utilización de materiales que no cumplan con lo indicado en la Fracción D.1. de esta Norma, ni aun en el supuesto de que serán mejorados posteriormente en el lugar de su utilización por el Contratista de Obra.
- D.4. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, los materiales presentan deficiencias respecto a las características establecidas como se indica en la Fracción D 1 de esta Norma, se suspenderá inmediatamente el trabajo en tanto que el Contratista de Obra las corrija o los remplace por otros adecuados, por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra

E. EQUIPO

El equipo que se utilice para la construcción de carpetas asfálticas con mezcla en frío, será el adecuado para obtener la calidad especificada en el proyecto, en cantidad suficiente para producir el volumen establecido en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, conforme al programa de utilización de maquinaria, siendo responsabilidad del Contratista de Obra su selección. Dicho equipo será mantenido en óptimas condiciones de operación durante el tiempo que dure la obra y será operado por personal capacitado. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, el equipo presenta deficiencias o no produce los resultados esperados, se suspenderá inmediatamente el trabajo en tanto que el Contratista de Obra corrija las deficiencias, lo remplace o sustituya al operador. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

E.1. PLANTA DE MEZCLADO

Contará como mínimo con:

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N-CTR-CAR-1 04-007/04

- E.1.1. Cribas para clasificar el material pétreo por lo menos en tres (3) tamaños, con capacidad suficiente para mantener siempre en las tolvas material pétreo disponible para la mezcla
- E.1.2. Tolvas para almacenar el material pétreo, protegidas de la lluvia y el polvo, con capacidad suficiente para asegurar la operación continua de la planta por lo menos durante quince (15) minutos sin ser alimentadas, y divididas en compartimentos para almacenar los materiales pétreos por tamaños.
- E.1.3. Dispositivos para dosificar los materiales pétreos por masa, y sólo en casos excepcionales, cuando así lo apruebe la Secretaría, por volumen y que permitan un fácil ajuste de la dosificación de la mezcla en cualquier momento, para poder obtener la granulometría que indique el proyecto.
- E.1.4. Dispositivos para dosificar el cemento asfáltico, con una aproximación de más menos dos (± 2) por ciento de la cantidad requerida según el proporcionamiento de la mezcla.
- E.1.5. Mezcladora equipada con un dispositivo para el control del tiempo de mezclado
- E.1.6. Recolector de polvo.
- E.1.7. Dispositivo para agregar finos.

E.2. PAVIMENTADORAS

Autopropulsadas, capaces de esparcir y precompactar la capa de carpeta que se tienda, con el ancho, sección y espesor establecidos en el proyecto, incluyendo los acotamientos y zonas similares. Estarán equipadas con los dispositivos necesarios para un adecuado tendido de la carpeta asfáltica, como son: un enrasador o aditamento similar, que pueda ajustarse automáticamente en el sentido transversal y proporcionar una textura lisa y uniforme, sin protuberancias o canalizaciones; una tolva receptora de la mezcla asfáltica con capacidad para asegurar un tendido homogéneo, equipada con un sistema de distribución mediante el cual se reparte la mezcla uniformemente frente al enrasador; y sensores de control automático de niveles.

NORMAS

N-CTR-CAR-1-04-007/04

Los dispositivos externos que se utilicen como referencia de nivel para los sensores de niveles, estarán colocados en zonas limpias de piedras, basura o cualquier otra obstrucción que afecte las lecturas. Si durante la ejecución de los trabajos, los controles automáticos operan deficientemente, la Secretaría, a su juicio, podrá permitir al Contratista de Obra terminar el tendido del día, mediante el uso del control manual de la pavimentadora; sin embargo, el tendido se podrá reiniciar sólo cuando los controles automáticos funcionen adecuadamente.

Es recomendable contar además, con un equipo especial para verter la mezcla asfáltica a la pavimentadora, evitando que el camión vacíe directamente a las tolvas de la misma, mejorando así la uniformidad superficial de la carpeta.

E.3. MEZCLADORAS/EXTENEDORAS MÓVILES

Contarán con.

- E.3.1. Tolva capaz de recibir los materiales pétreos directamente de los camiones.
- E.3.2. Depósitos para el material fino (filler), el material asfáltico, los aditivos y el agua
- E.3.3. Dispositivos para la dosificación de los materiales. La bomba de presión, así como los dispositivos de medición del material pétreo y del material asfáltico, estarán calibrados adecuadamente y serán revisados periódicamente para que el mortero se elabore con la dosificación adecuada, según la Fracción G.2. de esta Norma.
- E.3.4. Cámara mezcladora que asegure la correcta incorporación de los materiales para producir un mortero uniforme, que cuente con una compuerta para el control de la descarga. El mecanismo de mezclado será examinado diariamente para detectar desgastes excesivos o un funcionamiento defectuoso.
- E.3.5. Barra rociadora para humedecer la superficie por cubrir.
- E.3.6. Distribuidor que asegure un flujo continuo y un extendido uniforme en todo el ancho de aplicación.

E.4. COMPACTADORES**E.4.1. Compactadores de rodillos metálicos**

Autopropulsados, reversibles y provistos de petos limpiadores para evitar que el material se adhiera a los rodillos. Pueden ser de tres (3) rodillos metálicos en dos (2) ejes, o de dos (2) o tres (3) ejes con rodillos en tándem, con diámetro mínimo de un (1) metro (40 in), en todos los casos.

E.4.2. Compactadores neumáticos

Remolcados o autopropulsados. Tendrán nueve (9) ruedas como mínimo, de igual tamaño, montadas sobre dos ejes unidos a un chasis rígido, equipado con una plataforma o cuerpo que pueda ser lastrado, de forma que la masa total del compactador se distribuya uniformemente en ellas, dispuestas de manera que las llantas del eje trasero cubran, en una pasada, el espacio completo entre las llantas adyacentes en el eje delantero. Las llantas serán lisas, con tamaño mínimo de 7.50-15 de cuatro (4) capas e infladas uniformemente a la presión recomendada por el fabricante, con una tolerancia máxima de treinta y cuatro coma cinco (34,5) kilopascales (5 lb/in²).

E.5. BARREDORAS MECÁNICAS

Autopropulsadas o remolcadas. Tendrán una escoba rotatoria con el tipo de cerdas adecuadas según el material por remover y la superficie por barrer.

F. TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO

El transporte y almacenamiento de todos los materiales son responsabilidad exclusiva del Contratista de Obra y los realizará de forma tal que no sufran alteraciones que ocasionen deficiencias en la calidad de la obra, tomando en cuenta lo establecido en las Normas N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, N-CMT-4-05-001, *Calidad de Materiales Asfálticos*, N-CMT-4-05-002, *Calidad de Materiales Asfálticos Modificados* y N-CMT-4-05-003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*. Se sujetarán, en lo que corresponda, a las leyes y reglamentos de protección ecológica vigentes.

NORMAS

N CTR CAR 1-04-007/04

- F.1. El transporte de la mezcla elaborada en planta, se hará siempre sobre superficies pavimentadas.
- F.2. La distancia del transporte será de sesenta (60) kilómetros como máximo, la que se reducirá un diez (10) por ciento por cada grado de pendiente ascendente, medida como el desnivel entre la planta de mezclado y el punto de tiro, dividido entre la longitud de transporte.

G. EJECUCIÓN

G.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Para la construcción de carpetas asfálticas con mezcla en frío se considerará lo señalado en la Cláusula D. de la Norma N-LEG-3, *Ejecución de Obras*.

G.2. PROPORCIONAMIENTO DE MATERIALES

- G.2.1. Los materiales pétreos, asfálticos y aditivos que se empleen en la elaboración de las carpetas asfálticas con mezcla en frío, se mezclarán con el proporcionamiento necesario para producir una mezcla o mortero asfáltico homogéneo, con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría
- G.2.2. El proporcionamiento se determinará mediante un diseño de mezclas asfálticas en frío, para obtener las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría. Este diseño será responsabilidad del Contratista de Obra.
- G.2.3. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, con las dosificaciones de los distintos tipos de materiales pétreos, asfálticos y aditivos utilizados en la elaboración de la carpeta asfáltica con mezcla en frío, no se obtiene una mezcla o un mortero con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría, se suspenderá inmediatamente el trabajo en tanto que el Contratista de Obra las corrija por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

G.3. CONDICIONES CLIMÁTICAS

Los trabajos serán suspendidos en el momento en que se presenten situaciones climáticas adversas y no se reanudarán

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR-CAR-1 04-007/04

mientras éstas no sean las adecuadas, considerando que no se construirán carpetas asfálticas con mezcla en frío:

- G.3.1. Sobre superficies con agua libre o encharcada.
- G.3.2. Cuando exista amenaza de lluvia o esté lloviendo.
- G.3.3. Cuando la temperatura de la superficie sobre la cual serán construidas esté por debajo de los cuatro (4) grados Celsius.
- G.3.4. Cuando la temperatura ambiente esté por debajo de los cuatro (4) grados Celsius. La temperatura ambiente será tomada a la sombra lejos de cualquier fuente de calor artificial.

G.4. TRABAJOS PREVIOS

- G.4.1. Inmediatamente antes de iniciar la construcción de la carpeta asfáltica con mezcla en frío, la superficie sobre la que se colocará estará debidamente terminada dentro de las líneas y niveles, exenta de materias extrañas, polvo, grasa o encharcamientos de material asfáltico, sin irregularidades y reparados satisfactoriamente los baches que hubieran existido. No se permitirá la construcción sobre superficies que no hayan sido previamente aceptadas por la Secretaría
- G.4.2. Si así lo indica el proyecto o lo aprueba la Secretaría, cuando la carpeta se construya sobre una base, ésta debe estar impregnada de acuerdo con lo indicado en la Norma N-CTR-CAR-1-04-004, *Riegos de Impregnación*. Es responsabilidad del Contratista de Obra establecer el lapso entre la impregnación y el inicio de la construcción de la carpeta.
- G.4.3. Si así lo indica el proyecto o lo aprueba la Secretaría, inmediatamente antes de iniciar el tendido de la carpeta, se aplicará un riego de liga en toda la superficie, de acuerdo con lo indicado en la Norma N-CTR-CAR-1-04-005, *Riegos de Liga*.
- G.4.4. Los acarreos de la mezcla hasta el sitio de su utilización, se harán de tal forma que el tránsito sobre la superficie donde se construirá la carpeta, se distribuya sobre todo el ancho de la misma, evitando la concentración en ciertas áreas y, por

NORMAS

N-CTR-CAR 1 04 007/04

consecuencia, su deterioro. No se permitirá que los camiones que transportan la mezcla asfáltica, hagan maniobras que puedan distorsionar, disgregar u ondular las orillas de una capa recién tendida. En el caso de que por algún motivo esta situación llegue a suceder, el Contratista de Obra reparará inmediatamente los daños causados, por su cuenta y costo.

G.5. ELABORACIÓN DE LA MEZCLA O DEL MORTERO

- G.5.1. El procedimiento que se utilice para la elaboración de la mezcla o del mortero, es responsabilidad del Contratista de Obra, quien tendrá los cuidados necesarios para el manejo de los materiales a lo largo de todo el proceso, para que la mezcla o el mortero cumpla con los requerimientos de calidad establecidos en el proyecto o aprobados por la Secretaría y atenderá lo indicado en la Norma N CMT-4-05 003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*.
- G.5.2. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, la calidad de la mezcla o del mortero asfáltico, difiere de la establecida en el proyecto o aprobada por la Secretaría, se suspenderá inmediatamente la producción en tanto que el Contratista de Obra la corrija por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra
- G.5.3. Durante el proceso de producción no se cambiará de un tipo de mezcla a otro, hasta que la planta haya sido vaciada completamente y los depósitos de alimentación del material pétreo sean cargados con el nuevo material.

G.6. TRAMO DE PRUEBA

Sobre la superficie donde se construirá la carpeta asfáltica con mezcla en frío, el Contratista de Obra ejecutará previamente un tramo de prueba con una longitud de cuatrocientos (400) metros, con la finalidad de evaluar el procedimiento y los equipos que se utilizarán, considerando que:

- G.6.1. La construcción del tramo de prueba se hará cumpliendo con todo lo establecido en esta Norma.
- G.6.2. Una vez compactada la carpeta del tramo de prueba, se verificará que cumpla con lo establecido en la Cláusula H. de

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR-1 04-007/04

esta Norma. En caso negativo, el Contratista de Obra construirá el número de tramos de prueba necesarios hasta que cumpla con lo indicado en dicha Cláusula.

- G.6.3.** Si el tramo de prueba construido cumple con lo indicado en el Inciso anterior, podrá considerarse como parte de la obra y será objeto de medición y pago, de lo contrario no se medirá ni pagará y la Secretaría, a su juicio, determinará si es necesario o no que el Contratista de Obra retire el tramo de prueba por su cuenta y costo.

G.7. TENDIDO DE LA MEZCLA O DEL MORTERO

- G.7.1.** Después de elaborada la mezcla o el mortero asfáltico, se extenderá y se conformará con una pavimentadora autopropulsada o con una mezcladora/extendedora, de tal manera que se obtenga una capa de material sin compactar de espesor uniforme. Sin embargo, en áreas irregulares, la mezcla o el mortero asfáltico puede tenderse y terminarse a mano.
- G.7.2.** El tendido se hará en forma continua, utilizando un procedimiento que minimice las paradas y arranques de la pavimentadora o la mezcladora/extendedora.
- G.7.3.** Cuando el tendido se haga en dos (2) o más franjas, con un intervalo de más de un día entre franjas, éstas se ligarán con emulsión de rompimiento rápido. Esto se puede evitar si se elimina la junta longitudinal utilizando pavimentadoras o mezcladoras/extendedoras, en batería.
- G.7.4.** En el caso de carpetas de mezcla asfáltica, la cara expuesta de las juntas transversales se recortará aproximadamente a cuarenta y cinco (45) grados antes de iniciar el siguiente tendido, ligando las juntas con emulsión de rompimiento rápido.
- G.7.5.** En cualquier caso, se tendrá especial cuidado para que el enrasador traslape las juntas de tres (3) a cinco (5) centímetros y que el control del espesor sea ajustado de tal manera que el material quede ligeramente por arriba de la capa previamente tendida, para que al ser compactado, el pavimento quede con los niveles y dentro de las tolerancias establecidos en el proyecto o aprobados por la Secretaría.

NORMAS

N-CTR-CAR 1-04-007/04

- G.7.6.** En el caso de carpetas de mezcla asfáltica, de ser necesario, la mezcla se extenderá en capas sucesivas, con un espesor no mayor que aquel que el equipo sea capaz de compactar como se indica en la Fracción G.8. de esta Norma, hasta que se obtengan la sección y el espesor establecidos en el proyecto. El tendido de las carpetas de mortero asfáltico se hará en una sola capa.
- G.7.7.** Cada capa de mezcla o de mortero asfáltico se colocará cubriendo como mínimo el ancho total del carril.
- G.7.8.** Durante el tendido de la mezcla o del mortero asfáltico, la tolva de descarga de la pavimentadora o de la mezcladora/extendedora permanecerá llena, para evitar la segregación de los materiales. No se permitirá el tendido de la mezcla o del mortero si existe segregación. Es recomendable utilizar un equipo especial para verter la mezcla asfáltica a la pavimentadora o a la mezcladora/extendedora, evitando que el camión vacíe directamente a las tolvas de las mismas, mejorando así la uniformidad superficial de la carpeta.
- G.7.9.** Al final de cada jornada y con la frecuencia necesaria, se limpiarán perfectamente todas aquellas partes de la pavimentadora o de la mezcladora/extendedora que presenten residuos de mezcla o de mortero.
- G.7.10.** La longitud de tendido de la mezcla o del mortero es responsabilidad del Contratista de Obra, tomando en cuenta que no se tenderán tramos mayores de los que puedan ser compactados de inmediato.

G.8. COMPACTACIÓN

- G.8.1.** Inmediatamente después de tendida la mezcla asfáltica, o bien cuando la emulsión haya comenzado a romper, será compactada.
- G.8.2.** La capa extendida se compactará lo necesario para lograr que cumpla con las características indicadas en el proyecto o aprobadas por la Secretaria.

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N-CTR CAR-1-04 007/04

- G.8.3.** La compactación se hará longitudinalmente a la carretera, de las orillas hacia el centro en las tangentes y del interior al exterior en las curvas, con un traslape de cuando menos la mitad del ancho del compactador en cada pasada.
- G.8.4.** El uso de compactadores vibratorios sólo se permitirá para la compactación de capas mayores de cuatro (4) centímetros de espesor.
- G.8.5.** Por ningún motivo se estacionará el equipo de compactación, por periodos prolongados, sobre la carpeta recién compactada, para evitar que se produzcan deformaciones permanentes en la superficie terminada.

G.9. ACABADO

Una vez concluida la compactación en todo el ancho de la corona de la última capa de las carpetas de mezcla asfáltica, se formará un chaflán en las orillas, cuya base será igual a uno coma cinco (1,5) veces el espesor de la carpeta asfáltica, compactándolo con el equipo adecuado. Para ello se utilizará mezcla asfáltica adicional, colocándola inmediatamente después del tendido, o bien directamente con las pavimentadoras si están equipadas para hacerlo.

G.10. CONSERVACIÓN DE LOS TRABAJOS

Es responsabilidad del Contratista de Obra la conservación de la carpeta asfáltica hasta que haya sido recibida por la Secretaría, cuando la carretera sea operable.

H. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O RECHAZO

Además de lo establecido anteriormente en esta Norma, para que la carpeta asfáltica con mezcla en frío, de cada tramo de un (1) kilómetro de longitud o fracción, se considere terminada y sea aceptada por la Secretaría, con base en el control de calidad que ejecute el Contratista de Obra, mismo que podrá ser verificado por la Secretaría cuando lo juzgue conveniente, se comprobará:

H.1. CALIDAD DE LA MEZCLA O DEL MORTERO ASFÁLTICO

- H.1.1.** Que los materiales pétreos, asfálticos y aditivos utilizados en la mezcla o en el mortero asfáltico, hayan cumplido con las

NORMAS

N-CTR-CAR-1-04-007/04

características establecidas como se indica en la Fracción D.1. de esta Norma.

H.1.2. Que las características de la mezcla o del mortero asfáltico hayan cumplido con las establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría

H.1.3. Que la estabilidad de la carpeta de mezcla asfáltica, determinada en corazones extraídos al azar mediante un procedimiento basado en tablas de números aleatorios, conforme a lo indicado en el Manual M-CAL-1-02, *Criterios Estadísticos de Muestreo*, haya cumplido con lo establecido en el proyecto o lo aprobado por la Secretaría, considerando que.

H.1.3.1. El número de corazones por extraer se determinará aplicando la siguiente fórmula:

$$c = L/50$$

Donde:

c = Número de corazones por extraer, aproximado a la unidad superior

L = Longitud del tramo, (m)

H.1.3.2. Los corazones se extraerán sin dañar la parte contigua de los mismos.

H.1.3.3. Tan pronto se concluya la extracción de los corazones, se rellenarán los huecos con el mismo tipo de mezcla asfáltica utilizada en la carpeta, compactándola y enrasando su superficie con la original de la carpeta.

H.1.3.4. Todas las estabilidades que se determinen en los corazones, deberán ser estar dentro de las tolerancias que fije el proyecto o apruebe la Secretaría.

H.2. ÍNDICE DE PERFIL

Que el índice de perfil de la última capa de la carpeta de mezcla asfáltica, compactada, en cada línea de tendido de cada subtramo de doscientos (200) metros de longitud o fracción, haya sido de

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N-CTR-CAR-1-04 007/04

catorce centímetros por kilómetro (14 cm / km) como máximo, a menos que el proyecto indique otro valor. El Contratista de Obra hará esta verificación conforme a la norma ASTM E 1274, dentro de las cuarenta y ocho (48) horas siguientes a la terminación de la compactación, considerando lo que a continuación se señala. La Secretaría evaluará diariamente los resultados que se obtengan.

H.2.1. Equipo

El Contratista de Obra dispondrá y mantendrá durante el tiempo que dure la obra, de un perfilógrafo tipo California que cumpla con la norma ASTM E 1274. Antes de su utilización, el equipo se calibrará como se indica en esa norma, pudiendo la Secretaría verificar la calibración en cualquier momento y si a su juicio, el perfilógrafo presenta deficiencias o no está bien calibrado, se suspenderá inmediatamente la evaluación en tanto que el Contratista de Obra lo calibre adecuadamente, corrija las deficiencias o lo remplace. En ningún caso se medirán para efecto de pago carpetas que no hayan sido verificadas

H.2.2. Tramo de prueba

Para que el tramo de prueba a que se refiere la Fracción G.6. de esta Norma sea aceptado por la Secretaría, debe tener un índice de perfil de catorce centímetros por kilómetro (14 cm / km) como máximo.

H.2.3. Determinación del índice de perfil

H.2.3.1. La obtención del índice de perfil, en cada línea de tendido, se hará a lo largo de la línea imaginaria ubicada a noventa más menos veinte (90 ± 20) centímetros de la orilla interior de la línea de tendido por evaluar. Las mediciones serán divididas en secciones consecutivas de doscientos (200) metros, con el propósito de establecer subtramos en los que se otorgue al Contratista de Obra un estímulo por mejoramiento de calidad o se le aplique una sanción por incumplimiento de calidad, respecto al precio unitario fijado en el contrato, según la calidad obtenida en la superficie terminada y de acuerdo con el criterio establecido en la Cláusula J. de esta Norma.

NORMAS

N-CTR-CAR 1-04-007/04

- H.2.3.2.** Cuando la longitud de un subtramo construido en un día de trabajo, no alcance los doscientos (200) metros, será agrupado con el tramo inmediato que se construya el día siguiente. En este caso, la medición del índice de perfil deberá hacerse tan pronto como sea práctico y posible, pero no después de cuarenta y ocho (48) horas de terminado el último subtramo de ese día. Si el Contratista de Obra no es el responsable del tendido de un tramo subsecuente, no se medirá el índice de perfil en los cinco (5) últimos metros del tendido de su tramo.
- H.2.3.3.** Si el índice de perfil determinado en alguna línea de tendido de un subtramo de doscientos (200) metros o fracción, resulta menor de diez coma un centímetros por kilómetro (10,1 cm / km), el Contratista de Obra se hará acreedor a un estímulo por mejoramiento de calidad, calculado con base en el precio unitario de la carpeta asfáltica. En su caso, el estímulo se determinará mediante el factor que se establece en la Cláusula J de esta Norma

H.2.4. Índice de perfil promedio diario

- H.2.4.1.** Cada día de trabajo se determinará el índice de perfil promedio diario, obteniendo el promedio aritmético de todos los índices de perfil determinados ese día. Si el índice de perfil promedio diario, resulta mayor de veinticuatro centímetros por kilómetro (24 cm / km), se suspenderá de inmediato la construcción de la carpeta asfáltica, hasta que el Contratista de Obra corrija la carpeta defectuosa, según se indica en el Inciso H.2.5. Para reanudar la construcción de la carpeta, el Contratista de Obra debe construir otro tramo de prueba según lo indicado en la Fracción G.6. de esta Norma, como si se tratara del inicio de los trabajos. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.
- H.2.4.2.** Para determinar el índice de perfil promedio diario se puede utilizar el formato que se muestra en la Tabla 1 de esta Norma, en el que, para un mismo día de trabajo y cada línea de tendido y subtramo, se anota el índice de perfil obtenido. Se calcula el promedio aritmético de

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR-CAR-1-04-007/04

todos los índices de perfil obtenidos el mismo día y se anota en el último renglón del formato. Si el tramo tiene más de dos (2) líneas de tendido, al formato se le agregan las columnas que sean necesarias para completar el número de líneas de tendido. Los índices de perfil que se obtengan en subtramos que hayan sido corregidos como se indica en el Inciso H.2.5. de esta Norma, serán registrados en la columna correspondiente, pues los valores originales deberán conservarse sin alterar.

TABLA 1.- Formato para el cálculo del índice de perfil promedio diario

Fecha de construcción:

Tramo ^[1]		Subtramo ^[2]		<i>I_p</i> cm/km		<i>I_{p_c}</i> cm/km		
del km	al km	del km	al km	Línea de tendido 1	Línea de tendido 2	Fecha de obtención	Línea de tendido 1	Línea de tendido 2
+	+	+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					
+	+	+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					
+	+	+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					

$\bar{I}_p =$

I_p = índice de perfil original del subtramo y línea de tendido correspondientes

\bar{I}_p = índice de perfil promedio diario. Promedio aritmético de todos los *I_p* obtenidos en un mismo día, (cm/km)

I_{p_c} = índice de perfil después de corregido el subtramo y línea de tendido correspondientes

[1] = Tramo de 1 km o fracción

[2] = Subtramo de 200 m o fracción

NORMAS

N-CTR-CAR-1-04 007/04

H.2.5. Corrección de la superficie de la carpeta de mezcla asfáltica

- H.2.5.1. El Contratista de Obra realizará las correcciones de la superficie de la carpeta de mezcla asfáltica que se requieran para obtener el índice de perfil adecuado.
- H.2.5.2. Después de obtenido el índice de perfil de cada línea de tendido en un subtramo de doscientos (200) metros, todas aquellas áreas en las que el perfilograma presente una desviación igual a un (1) centímetro o mayor, en siete coma cinco (7,5) metros o menos, serán corregidas mediante fresado. Concluida la corrección, se obtendrá nuevamente el índice de perfil del subtramo para verificar el cumplimiento de lo aquí estipulado.
- H.2.5.3. Una vez realizadas las correcciones individuales de todas las desviaciones a que se refiere el Párrafo anterior, cualquier subtramo de doscientos (200) metros que presente un índice de perfil mayor de veinticuatro centímetros por kilómetro (24 cm / km) en cualquiera de sus líneas de tendido, será corregido mediante alguno de los procedimientos que se indican a continuación u otros que apruebe la Secretaría. En cualquier caso, concluida la corrección se determinarán nuevamente los índices de perfil de todas las líneas de tendido del subtramo para verificar el cumplimiento de lo aquí estipulado.
- a) Fresado continuo de la superficie de la carpeta de mezcla asfáltica, en tramos no menores de cincuenta (50) metros y a todo el ancho de la corona en carreteras de dos (2) carriles, o en todos los carriles de un mismo sentido en carreteras con carriles múltiples, para reducir el índice de perfil a veinticuatro centímetros por kilómetro (24 cm / km) o menos. Sobre la superficie fresada, se colocará un tratamiento superficial aprobado por la Secretaría, con un espesor de dos (2) centímetros como mínimo, a menos que el proyecto establezca la construcción de una carpeta de granulometría abierta o semiabierta
 - b) Colocación sobre la carpeta de mezcla asfáltica, de una sobrecarpeta de tres (3) centímetros de espesor como mínimo, en tramos no menores de cincuenta

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N-CTR CAR-1-04-007/04

(50) metros y a todo el ancho de la corona en carreteras de dos (2) carriles, o en todos los carriles de un mismo sentido en carreteras con carriles múltiples, elaborada con la misma mezcla utilizada en la carpeta, que cumpla con todo lo indicado en esta Norma y tenga un índice de perfil de veinticuatro centímetros por kilómetro (24 cm / km) como máximo.

H.2.5.4. Cuando el índice de perfil de alguna línea de tendido de un subtramo de doscientos (200) metros esté entre catorce coma uno y veinticuatro centímetros por kilómetro (14,1 a 24 cm / km), el Contratista de Obra podrá elegir entre corregir la superficie terminada como se indica en el Párrafo H.2.5.3., o aceptar una sanción por incumplimiento de calidad, calculada con base en el precio unitario de la carpeta asfáltica, mediante el factor que se establece en la Cláusula J. de esta Norma.

H.2.5.5. Todos los trabajos de corrección serán por cuenta y costo del Contratista de Obra, y previamente a su ejecución, los procedimientos de corrección de la superficie de la carpeta serán sometidos a la aprobación de la Secretaría. No se permitirá efectuar trabajos de corrección con equipos de impacto que puedan dañar la estructura del pavimento, ni con resanes superficiales adheridos. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que se ocasionen por motivo de las correcciones, serán imputables al Contratista de Obra.

H.2.5.6. Todos los trabajos de corrección de la superficie de la carpeta, se efectuarán antes de que se verifiquen sus líneas, pendientes y espesores, como se indica en la Fracción H.3 de esta Norma, salvo que la corrección se realice mediante una sobrecarpeta, en cuyo caso la verificación de los espesores se hará antes de colocarla.

H.3. LÍNEAS, PENDIENTES Y ESPESORES

Que el alineamiento, perfil, sección y espesor de la carpeta, cumplan con lo establecido en el proyecto, con las tolerancias que se indican en esta Fracción, como sigue:

H.3.1. Previamente a la construcción de la carpeta, en las estaciones cerradas a cada veinte (20) metros, se nivelará la

NORMAS

N-CTR CAR-1 04-007/04

corona terminada de la capa inmediata inferior, obteniendo los niveles en el eje y en ambos lados de éste, en puntos ubicados a una distancia igual al semiancho de la corona de la carpeta menos setenta (70) centímetros, a la mitad del espacio comprendido entre éstos y el eje, y en las orillas de la carpeta.

- H.3.2.** Una vez compactada la carpeta, verificados sus índices de perfil y, en su caso, hechas las correcciones a que se refiere el Inciso H.2.5., se volverán a nivelar las mismas secciones que se indican en el Inciso H.3.1., determinando las elevaciones de los mismos puntos ahí indicados para obtener las pendientes transversales entre ellos, y se medirán, en cada sección, las distancias entre el eje y las orillas de la carpeta, para verificar que esas pendientes y distancias estén dentro de las tolerancias que se indican en la Tabla 2 de esta Norma

TABLA 2.- Tolerancias para líneas y pendientes

Característica	Tolerancia
Ancho de la carpeta, del eje a la orilla	± 1 cm
Pendiente transversal	$\pm 0,5\%$

- H.3.3.** Si para corregir la superficie de la carpeta se opta por colocar una sobrecarpeta como se señala en el Punto b) del Párrafo H.2.5.3 o por cualquier otro procedimiento aprobado por la Secretaría, que eleve esa superficie, antes de su ejecución se nivelarán las mismas secciones a que se refiere el Inciso H.3.1. de esta Norma, determinando las elevaciones de los mismos puntos ahí indicados para obtener los espesores de la carpeta antes de ser corregida.
- H.3.4.** Las nivelaciones se ejecutarán con nivel fijo y comprobación de vuelta, obteniendo los niveles con aproximación al milímetro. Las distancias horizontales se medirán con aproximación al centímetro.
- H.3.5.** A partir de las cotas obtenidas en las nivelaciones a que se refieren los Incisos H.3.1., H.3.2. y H.3.3. de esta Norma, según sea el caso, en todos los puntos nivelados se determinarán los espesores de la carpeta compactada, los

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N:CTR-CAR-1-04-007/04

que deberán ser iguales al fijado en el proyecto o, para cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, cumplir con lo establecido en los Incisos H.3.6. y H.3.7. de esta Norma.

- H.3.6.** El espesor promedio correspondiente a todas las determinaciones hechas en el tramo, deberá ser igual a noventa y ocho centésimos (0,98) del espesor de proyecto o mayor.

$$\bar{e} \geq 0,98e$$

Donde:

e = Espesor de proyecto, (cm)

\bar{e} = Espesor promedio correspondiente a todas las determinaciones hechas en el tramo, (cm), obtenido mediante la siguiente fórmula.

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n}$$

Donde.

e_i = Espesor obtenido en cada determinación, (cm)

n = Número de determinaciones hechas en el tramo

- H.3.7.** La desviación estándar de todos los espesores determinados en el tramo, deberá ser igual a diez centésimos (0,10) del espesor promedio o menor.

$$\sigma_e \leq 0,10\bar{e}$$

Donde:

σ_e = Desviación estándar correspondiente a todas las determinaciones hechas en el tramo, (cm), calculada con la siguiente fórmula:

$$\sigma_e = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1} \right)^{1/2}$$

\bar{e} , e_i y n tienen el significado indicado en el Inciso anterior.

H.4. RESISTENCIA A LA FRICCIÓN

- H.4.1.** Que la superficie de rodadura de la carpeta asfáltica compactada, haya tenido una resistencia a la fricción en condiciones de pavimento mojado, igual a seis décimas (0,6) o mayor, medida con el equipo *Mu-Meter*, a una velocidad de setenta y cinco (75) kilómetros por hora, por lo menos sobre la huella de la rodada externa de cada línea de tendido. El Contratista de Obra hará esta verificación conforme a la norma ASTM E 670. La prueba se hará sobre la superficie de rodadura compactada y, en su caso, corregida de acuerdo con lo indicado en el Inciso H.2.5. de esta Norma.
- H.4.2.** Cuando la resistencia a la fricción de una carpeta de mezcla asfáltica, sea menor de seis décimas (0,6) y el proyecto no establezca la construcción sobre ella de una carpeta de granulometría abierta o semiabierta, el Contratista de Obra, por su cuenta y costo, corregirá la superficie terminada mediante la colocación de una carpeta de un riego, conforme a lo indicado en la Norma N CTR-CAR-1-04-008, *Carpetas por el Sistema de Riegos*, en tramos no menores de cincuenta (50) metros y a todo el ancho de la corona en carreteras de dos (2) carriles, o en todos los carriles de un mismo sentido en carreteras con carriles múltiples. La corrección también podrá hacerse mediante alguno de los procedimientos indicados en los Puntos a) y b) del Párrafo H.2.5.3. en cuyo caso, una vez concluida, se determinarán nuevamente la resistencia a la fricción y los índices de perfil de todas las líneas de tendido del subtramo, para verificar el cumplimiento de lo estipulado tanto en el Inciso anterior como en la Fracción H.2. de esta Norma.

I. MEDICIÓN

Cuando la construcción de carpetas asfálticas con mezcla en frío se contrate a precios unitarios por unidad de obra terminada y sea ejecutada conforme a lo indicado en esta Norma, a satisfacción de la Secretaría, se medirá según lo señalado en la Cláusula E. de la Norma N-LEG 3, *Ejecución de Obras*, para determinar el avance o la cantidad de trabajo realizado para efecto de pago, tomando como unidad el metro cúbico de carpeta terminada, según su tipo y para cada banco en particular, con aproximación a la unidad. El volumen de cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, se determinará mediante la siguiente fórmula:

**CTR. CONSTRUCCIÓN
CAR. CARRETERAS**

N-CTR CAR 1 04 007/04

$$V = L \times \bar{e} \times \bar{a}$$

Donde:

V = Volumen de la carpeta asfáltica de cada tramo de 1 km o fracción, (m³)

L = Longitud del tramo, (m)

\bar{e} = Espesor promedio correspondiente a todas las determinaciones hechas en el tramo, (m), obtenido como se indica en el Inciso H.3.6. de esta Norma.

\bar{a} = Ancho promedio de la carpeta asfáltica, obtenido con base en las distancias entre el eje y las orillas de la corona, determinadas en todas las secciones del tramo como se indica en el Inciso H.3.2. de esta Norma, (m).

La Secretaría medirá y pagará como máximo el volumen de la carpeta asfáltica que resulte del espesor de proyecto más un (1) centímetro por el ancho de proyecto más un (1) centímetro.

Para el cálculo del volumen en el tramo medido se puede usar el formato que se muestra en la Tabla 3 de esta Norma

TABLA 3.- Formato para el cálculo de los volúmenes, los estímulos o sanciones y los importes a pagar

Tramo ^[1]		L m	e m	a m	V' m ³	PU \$	Importe \$ ^[2]	F	E \$
del km	al km								
+	+								
+	+								
+	+								
+	+								
+	+								
Sumas =							\$		\$
Importe total =							\$		\$

L = Longitud del tramo correspondiente

e = Espesor promedio del tramo correspondiente (espesor de proyecto más 1 cm como máximo)

a = Ancho promedio del tramo correspondiente (ancho de proyecto más 1 cm como máximo)

V' = Volumen del tramo correspondiente ($V' = L \times e \times a$)

PU = Precio unitario de la carpeta

F = Factor promedio de estímulo o sanción del tramo correspondiente, obtenido de la Tabla 5

E = Estímulo o sanción del tramo correspondiente ($E = V' \times PU \times F$)

[1] = Tramo de 1 km o fracción

[2] = Importe de la carpeta (Importe = $V' \times PU$)

J. BASE DE PAGO

Cuando la construcción de carpetas asfálticas con mezcla en frío se contrate a precios unitarios por unidad de obra terminada y sea medida de acuerdo con lo indicado en la Cláusula I. de esta Norma, se pagará al precio fijado en el contrato para el metro cúbico de carpeta terminada en cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, según su tipo y para cada banco en particular. Estos precios unitarios, conforme a lo indicado en la Cláusula F. de la Norma N-LEG-3, *Ejecución de Obras*, incluyen lo que corresponda por:

- Valor de adquisición o producción de los materiales asfálticos para la carpeta y para el riego de liga, así como de los aditivos que se requieran. Limpieza del tanque en que se transportan, movimientos en la planta de producción y en el lugar de destino, carga al equipo de transporte, transporte al lugar de almacenamiento, descarga en el depósito, cargo por almacenamiento y todas las operaciones de calentamiento y bombeo requeridas.
- Desmonte y despalme de los bancos; extracción del material pétreo aprovechable y del desperdicio, cualesquiera que sean sus clasificaciones; cribados y desperdicios de los cribados; trituración parcial o total; lavado o eliminación del polvo superficial adherido a los materiales; cargas, descargas y todos los acarreos de los materiales y de los desperdicios; formación de los almacenamientos y clasificación de los materiales pétreos separándolos por tamaños.
- Instalación, alimentación y desmantelamiento de las plantas.
- Dosificación y mezclado de los materiales pétreos, asfálticos y aditivos.
- Barrido y limpieza de la superficie sobre la que se construirá la carpeta.
- Aplicación del riego de liga según lo indicado en la Norma N-CTR CAR-1-04-005, *Riegos de Liga*.
- Cargas en la planta de la mezcla asfáltica al equipo de transporte o carga de los materiales a la mezcladora/extendedora para la elaboración del mortero asfáltico, y transporte al lugar de tendido.
- Tendido y compactación de la mezcla asfáltica o tendido del mortero asfáltico.
- Los tiempos de los vehículos empleados en los transportes de todos los materiales durante las cargas y las descargas.

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR-CAR-1-04-007/04

- La conservación de la carpeta asfáltica hasta que sea recibida por la Secretaría.
- Y todo lo necesario para la correcta ejecución de este concepto.

Cuando procedan estímulos por mejoramiento de calidad o sanciones por incumplimiento de calidad, de acuerdo con los índices de perfil de la carpeta asfáltica, que se obtengan según se señala en la Fracción H.2., se pagará al Contratista de Obra una bonificación o se le hará una deducción, según corresponda, calculada para cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, medido como se indica en la Cláusula I. de esta Norma, mediante la siguiente fórmula:

$$E = V \times PU \times \bar{F}$$

Donde:

E = Estimulo a pagar como bonificación cuando resulta positivo o sanción aplicada como deducción cuando resulta negativo, para cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, (\$)

V = Volumen de la carpeta asfáltica del tramo, (m³)

PU = Precio unitario de la carpeta asfáltica fijado en el contrato, (\$/m³)

\bar{F} = Factor promedio de estímulo o sanción del tramo. Promedio aritmético de los factores de estímulo o sanción (F_i) para cada subtramo de doscientos (200) metros en cada línea de tendido, tomados de la Tabla 4 de esta Norma, (adimensional)

Para calcular el factor promedio de estímulo o sanción (\bar{F}) se puede utilizar el formato que se muestra en la Tabla 5, en el que, para cada línea de tendido y subtramo, se anota el factor de estímulo o sanción (F_i) tomado de la Tabla 4, de acuerdo con el índice de perfil (I_p) obtenido de la Tabla 1 y se calcula el promedio aritmético de todos los factores de estímulo o sanción (F_i) de cada tramo, que se anota en la última columna del formato, en el cuadro correspondiente. Para subtramos que hayan sido corregidos como se indica en el Inciso H.2.5. de esta Norma, el factor de estímulo o sanción (F_i) correspondiente se determina con base en el índice de perfil (I_{p_c}) logrado después de la corrección. Si el tramo tiene más de dos (2) líneas de tendido, al formato se le agregan las columnas que sean necesarias para completar el número de líneas de tendido.

NORMAS

N-CTR-CAR-1-04-007/04

TABLA 4.- Factores de estímulo o sanción, según el índice de perfil

Índice de perfil * cm / km	Factores de estímulo o sanción (F)	
4,0 o menos	Estímulo	+ 0,05
4,1 a 5,5		+ 0,04
5,6 a 7,0		+ 0,03
7,1 a 8,5		+ 0,02
8,6 a 10,0		+ 0,01
10,1 a 14,0	0	
14,1 a 16,0	Sanción	- 0,02
16,1 a 18,0		- 0,04
18,1 a 20,0		- 0,06
20,1 a 22,0		- 0,08
22,1 a 24,0		- 0,10
Mayor de 24,0	CORREGIR	

* Para cada tramo de 200 m o fracción en cada línea de tendido

Asimismo, para calcular el estímulo o la sanción (E) de cada tramo, se puede usar la Tabla 3, en la que se anotan los factores promedio de estímulo o sanción (\bar{F}) correspondientes, calculados en la Tabla 5 de esta Norma.

K. ESTIMACIÓN Y PAGO

La estimación y pago de las carpetas asfálticas con mezcla en frío, se efectuará de acuerdo con lo señalado en la Cláusula G. de la Norma N-LEG-3, *Ejecución de Obras*.

L. RECEPCIÓN DE LA OBRA

Una vez concluida la construcción de la carpeta asfáltica con mezcla en frío, la Secretaría la aprobará y al término de la obra, cuando la carretera sea operable, la recibirá conforme a lo señalado en la Cláusula H. de la Norma N-LEG 3, *Ejecución de Obras*, aplicando en su caso, las sanciones a que se refiere la Cláusula I. de la misma Norma.

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR-CAR 1-04-007/04

TABLA 5.- Formato para el cálculo del factor promedio de estímulo o sanción de cada tramo

Mes: Año:

Tramo ^[1]		Subtramo ^[2]		Línea de tendido 1			Línea de tendido 2			F
del km	al km	del km	al km	Día ^[3]	<i>I_p</i> cm/km	<i>F_i</i>	Día ^[3]	<i>I_p</i> cm/km	<i>F_i</i>	
+ ----- +	+ ----- +	+-----+	+-----+							
		+-----+	+-----+							
		+-----+	+-----+							
		+-----+	+-----+							
		+-----+	+-----+							
+ ----- +	+ ----- +	+-----+	+-----+							
		+-----+	+-----+							
		+-----+	+-----+							
		+-----+	+-----+							
		+-----+	+-----+							
+ ----- +	+ ----- +	+-----+	+-----+							
		+-----+	+-----+							
		+-----+	+-----+							
		+-----+	+-----+							
		+-----+	+-----+							

I_p = Índice de perfil del subtramo y línea de tendido correspondientes, obtenido de la Tabla 1. Para subtramos que hayan sido corregidos como se indica en el Inciso H.2.5 de esta Norma, se utiliza el índice de perfil (*I_p*) logrado después de la corrección.

F_i = Factor de estímulo o sanción para el subtramo y línea de tendido correspondientes, obtenido de la Tabla 4.

I = Factor promedio de estímulo o sanción. Promedio aritmético de los *F_i* del tramo correspondiente.

[1] = Tramo de 1 km o fracción

[2] = Subtramo de 200 m o fracción

[3] = Día en el que se construyó la carpeta

LIBRO: CTR. CONSTRUCCIÓN
TEMA: CAR. Carreteras
PARTE: 1. CONCEPTOS DE OBRA
TÍTULO 04 Pavimentos
CAPÍTULO 008. Carpetas por el Sistema de Riegos

A. CONTENIDO

Esta Norma contiene los aspectos a considerar en la construcción de carpetas por el sistema de riegos para carreteras y autopistas

B. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Las carpetas por el sistema de riegos son las que se construyen mediante la aplicación de uno o dos riegos de un material asfáltico, intercalados con una, dos o tres capas sucesivas de material pétreo triturado de una composición granulométrica determinada, con el objeto de hacer resistente al derrapamiento y proteger contra el desgaste la superficie de rodamiento.

Las carpetas por el sistema de riegos se clasifican en carpetas de uno, de dos y de tres riegos. Las carpetas de un riego o la última capa de las carpetas de dos o tres riegos, pueden ser premezcladas o no

C. REFERENCIAS

Esta Norma se complementa con las últimas versiones de las siguientes.

	NORMAS	DESIGNACIÓN
Ejecución de Obras	N·LEG-3
Materiales Pétreos para Carpetas y Mezclas Asfálticas	N·CMT-4 04

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR 1 04 008/00

Calidad de Materiales Asfálticos N CMT-4-05-001

Riegos de Impregnación N-CTR-CAR 1-04-004

D. MATERIALES

- D.1. Los materiales que se utilicen en la elaboración de carpetas por el sistema de riegos, serán del tipo y con las características establecidas en el proyecto. Además, los materiales pétreos procederán de los bancos indicados en el proyecto o aprobados por la Secretaría.
- D.2. No se aceptará el suministro y colocación de materiales que no cumplan con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría, ni aun en el supuesto de que serán mejorados posteriormente en el lugar de trabajo por el Contratista de Obra.
- D.3. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, los materiales presentan deficiencias respecto a las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la misma, se suspenderá inmediatamente el trabajo hasta que el Contratista de Obra las corrija por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

E. EQUIPO

El equipo que se utilice para la construcción de carpetas por el sistema de riegos, será el adecuado para obtener la calidad especificada en el proyecto, en cantidad suficiente para producir el volumen establecido en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, y conforme con el programa de utilización de maquinaria, siendo responsabilidad del Contratista de Obra su selección. Dicho equipo debe estar y ser mantenido en óptimas condiciones de operación durante el tiempo que dure la obra y ser operado por personal capacitado. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, el equipo presenta deficiencias o no produce los resultados esperados, se suspenderá inmediatamente el trabajo hasta que el Contratista de Obra corrija las deficiencias o lo reemplace con el equipo adecuado. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

NORMAS

N CTR CAR 1-04 008/00

En la selección del equipo el Contratista de Obra considerará lo siguiente

E.1. ASPERSORES

Los aspersores serán capaces de establecer a una temperatura constante, un flujo uniforme del material asfáltico sobre la superficie por regar, en anchos variables y en dosificaciones controladas. Estarán adosados a barras de circulación que puedan ajustarse vertical y lateralmente, y equipados con medidores de presión, dispositivos adecuados para la medición del volumen aplicado, termómetro para medir la temperatura del material asfáltico dentro del tanque y bomba. El vehículo en que se monten, ya sea una petrolizadora u otro equipo autopropulsable, contará con un odómetro para medir la longitud del tramo que se riegue.

E.2. ESPARCIDORES

El Contratista de Obra contará con el número suficiente de esparcidores para cubrir de inmediato, con los materiales pétreos, todo el riego de material asfáltico recién aplicado. Pueden ser mecánicos autopropulsados, remolcados por camión o bien del tipo de compuerta colocada en la tapa de la caja de los camiones de volteo, que garanticen la aplicación uniforme y en la cantidad adecuada de los materiales pétreos. Estos esparcidores serán calibrados y operados de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

E.3. COMPACTADORES

Los compactadores serán ligeros, autopropulsados, reversibles y provistos de petos limpiadores para evitar que el material pétreo se adhiera a los rodillos. Pueden ser de tres (3) rodillos metálicos en dos (2) ejes, o de dos (2) o tres (3) ejes con rodillos en tándem con diámetro mínimo de un (1) metro (40").

E.4. BARREDORAS MECÁNICAS

Las barredoras mecánicas que se utilicen para la limpieza de las superficies tendrán una escoba rotatoria autopropulsada.

F. TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO

El transporte y el almacenamiento de todos los materiales son responsabilidad exclusiva del Contratista de Obra y los realizará de tal forma que no sufran alteraciones que pudieran ocasionar deficiencias en la calidad de la obra, tomando en cuenta lo establecido en las Normas N-CMT-4 04, *Materiales Pétreos para Carpetas y Mezclas Asfálticas* y N CMT 4 05 001, *Calidad de Materiales Asfálticos*, y sujetándose, en lo que corresponda, a las leyes y reglamentos de protección ecológica vigentes

G. EJECUCION

Además de lo señalado en la Cláusula D. de la Norma N LEG-3, *Ejecución de Obras*, para la construcción de carpetas por el sistema de riegos se tiene que considerar lo siguiente:

G.1. DOSIFICACIÓN DE MATERIALES

G.1.1. La dosificación de los materiales asfálticos y pétreos que se empleen en la elaboración de la carpeta por el sistema de riegos, se efectuara según lo establecido en el proyecto o lo indicado por la Secretaría.

G.1.2. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, las dosificaciones de los distintos tipos de materiales pétreos y/o del material asfáltico, utilizados en la elaboración de la carpeta por el sistema de riegos, difieren de las establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría, se suspenderá inmediatamente el trabajo hasta que el Contratista de Obra las corrija por su cuenta y costo.

G.2. CONDICIONES CLIMÁTICAS

Los trabajos serán suspendidos en el momento en que se presenten situaciones climáticas adversas y no se reanudarán mientras éstas no sean las adecuadas, considerando que no se construirán carpetas por el sistema de riegos en las siguientes condiciones:

G.2.1. Sobre superficies con agua libre o encharcadas.

NORMAS

N CTR CAR 1-04-008/00

- G.2.2. Cuando exista amenaza de lluvia o esté lloviendo.
- G.2.3. Cuando la velocidad del viento impida que la aplicación del material asfáltico sea uniforme.
- G.2.4. Cuando la temperatura de la superficie sobre la cual serán construidas esté por debajo de los quince (15) grados Celsius.
- G.2.5. Cuando la temperatura ambiente esté por debajo de los quince (15) grados Celsius y su tendencia sea a la baja. Sin embargo, pueden ser construidas cuando la temperatura ambiente esté por arriba de los diez (10) grados Celsius y su tendencia sea al alza. La temperatura ambiente será tomada a la sombra lejos de cualquier fuente de calor artificial.

G.3. TRABAJOS PREVIOS

- G.3.1. Inmediatamente antes de la construcción de la carpeta por el sistema de riegos, la superficie sobre la que se colocará deberá estar debidamente preparada, exenta de materias extrañas, polvo, grasa o encharcamientos de material asfáltico, sin irregularidades y reparados los baches que hubieran existido. No se permitirá su construcción sobre tramos que no hayan sido previamente aceptados por la Secretaría. Cuando se construya sobre una base, ésta debe estar impregnada de acuerdo con lo indicado en la Norma N-CTR CAR-1-04-004, *Riegos de Impregnación*. Es responsabilidad del Contratista de Obra la protección o reparación del riego de impregnación en el lapso entre su aplicación y el inicio de la construcción de la carpeta.
- G.3.2. Previamente a la construcción de la carpeta por el sistema de riegos, las estructuras de la carretera o contiguas, tales como banquetas, guarniciones, camellones, parapetos, postes, pilas, estribos, caballetes y barreras separadoras, entre otras, que pudieran mancharse directa o indirectamente durante la aplicación del material asfáltico, se protegerán con papel u otro material similar, de manera que concluido el trabajo y una vez retirada la protección, se encuentren en las mismas condiciones de limpieza en que se hallaban.

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR:1 04 008/00

- G.3.3.** Cuando se utilicen emulsiones asfálticas, para retrasar su rompimiento y mejorar la absorción de la superficie, ocasionalmente es necesario un riego de agua antes del riego del material asfáltico, sin embargo, este último no se iniciará sino hasta que el agua superficial se haya evaporado lo suficiente para que no existan encharcamientos.

G.4. APLICACIÓN DEL MATERIAL ASFÁLTICO

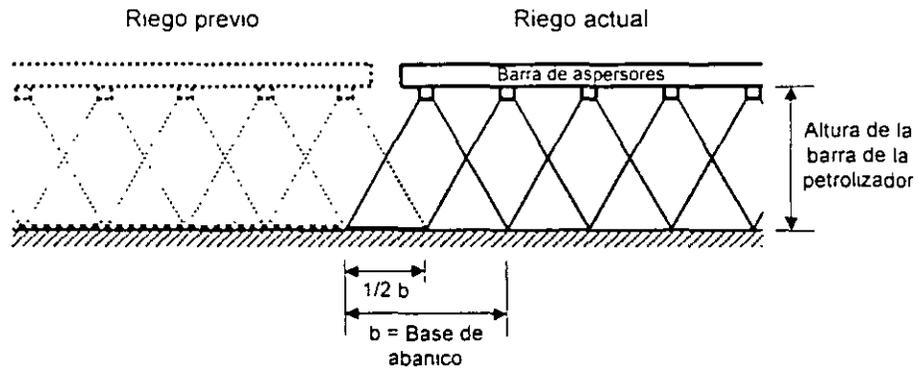
El material asfáltico, del tipo y con la dosificación establecidos en el proyecto o aprobados por la Secretaría, debe ser aplicado uniformemente sobre la superficie por cubrir, tomando en cuenta lo siguiente:

- G.4.1.** En las juntas transversales, antes de iniciar un nuevo riego, se colocarán tiras de papel u otro material similar para proteger el riego existente, de tal manera que el nuevo riego se inicie desde dicha tira y al retirarse ésta, no quede un traslape de material asfáltico.
- G.4.2.** Se ajustará la altura de la barra de los aspersores para aplicar el material asfáltico uniformemente, con la dosificación establecida en el proyecto, de manera que la base del abanico que se forma al salir el material por un aspersor, cubra hasta la mitad de la base del abanico del aspersor contiguo (*cubrimiento doble*), o que la base del abanico de un aspersor cubra las dos tercias ($2/3$) partes de la base del abanico del aspersor contiguo (*cubrimiento triple*), como se muestra en la Figura 1 de esta Norma
- G.4.3.** La aplicación del material asfáltico en una franja contigua a otra en la que previamente se haya construido la carpeta por el sistema de riegos, se hará de tal manera que el nuevo riego de material asfáltico se traslape con el de la franja anterior, en un medio ($1/2$) o dos tercios ($2/3$) del ancho de la base del abanico del aspersor extremo de la barra, según se trate de cubrimiento doble o triple, como se muestra en la Figura 1 de esta Norma, con el propósito de que la dosificación del producto asfáltico en la orilla de la franja precedente sea la indicada en el proyecto. No se permitirá que el nuevo riego cubra de material asfáltico y se traslape con los materiales pétreos de la franja contigua.

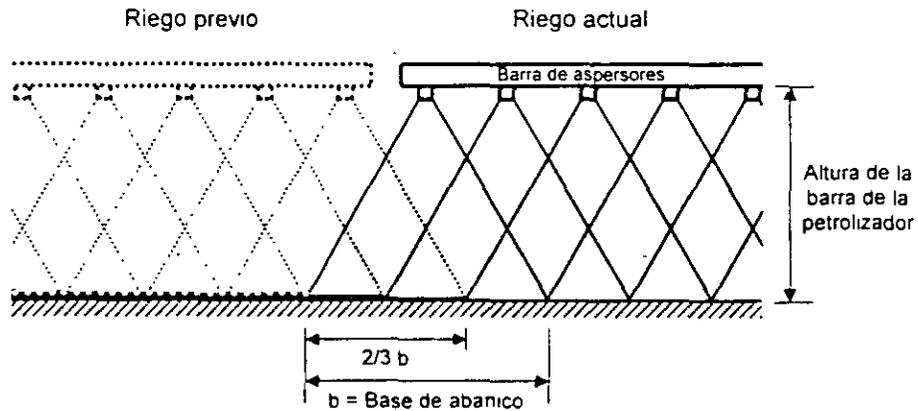
NORMAS

N-CTR CAR 1 04 008/00

- G.4.4.** Antes del tendido del material pétreo, el exceso del material asfáltico aplicado será removido de la superficie. Las deficiencias que por esta causa se presenten, deben ser corregidas por cuenta y costo del Contratista de Obra



CUBRIMIENTO DOBLE



CUBRIMIENTO TRIPLE

FIGURA 1.- Aplicación del material asfáltico

- G.4.5.** La cantidad, temperatura, ancho y longitud de aplicación del material asfáltico son responsabilidad del Contratista de Obra, tomando en cuenta que no se aplicará en tramos mayores de los que puedan ser cubiertos de inmediato con material pétreo

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR 1-04 008/00

- G.4.6.** Cuando se trate de una carpeta de un riego o de la última capa de las carpetas de dos o tres riegos, que sea premezclada, el riego de material asfáltico se hará con una dosificación igual a la mitad de la establecida en el proyecto y la otra mitad será premezclada con el material pétreo

G.5. TENDIDO DEL MATERIAL PÉTREO

De ser necesario, el día anterior al tendido o al premezclado del material pétreo, éste se puede lavar para eliminar o reducir el polvo que lo cubre y mejorar sus características de adhesión.

Para el tendido del material pétreo, solo o premezclado, se tomará en cuenta lo siguiente

G.5.1. Carpetas de uno o dos riegos

G.5.1.1. Inmediatamente después de la aplicación del material asfáltico y sólo sobre la superficie regada con la dosificación correcta, se tenderá mecánicamente el material pétreo, del tipo y con la dosificación establecidos en el proyecto o aprobados por la Secretaría, formando una capa de espesor uniforme y adicionando material o retirando el excedente, según sea el caso, para lograr la uniformidad adecuada. En zonas no accesibles para los esparcidores mecánicos se hará el tendido manualmente. Enseguida se pasará una rastra ligera con cepillo, para tener una mejor distribución del material y dejar la superficie exenta de ondulaciones, bordos y depresiones, y se planchará como se indica en la Fracción G 6. de esta Norma.

G.5.1.2. En su caso, en la aplicación del último riego, se atenderán los criterios señalados en la Fracción G.4. y en el Párrafo G.5 1 1 de esta Norma. Entre la aplicación del último riego de material asfáltico y la terminación de la capa correspondiente al material pétreo del riego precedente, es conveniente un lapso no menor de cuatro (4) días

G.5.1.3. En ningún caso se aceptarán traslapes excesivos, zonas rayadas o no cubiertas. Cuando a juicio de la Secretaría la aplicación de los materiales pétreos no sea la adecuada, se suspenderá inmediatamente el trabajo

NORMAS

N CTR-CAR-1-04 008/00

hasta que el Contratista de Obra realice los ajustes necesarios para obtener una superficie con la calidad y acabados establecidos en el proyecto. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

G.5.2. Carpetas de tres riegos

G.5.2.1. Sobre la superficie preparada a que se refiere el Inciso G.3.1 de esta Norma, se tenderá mecánicamente el material pétreo del primer riego, del tipo y con la dosificación establecidos en el proyecto o aprobados por la Secretaría, formando una capa de espesor uniforme y adicionando material o retirando el excedente, según sea el caso, para lograr la uniformidad adecuada. En zonas no accesibles para los esparcidores mecánicos se hará el tendido manualmente. Enseguida se pasará una rastra ligera con cepillo, para tener una mejor distribución del material y dejar la superficie exenta de ondulaciones, bordos y depresiones.

G.5.2.2. Inmediatamente después de tendido y rastreado el material pétreo del primer riego, se cubrirá con el material asfáltico conforme a lo indicado en la Fracción G.4 de esta Norma, cuidando que todo el ancho de la franja de material pétreo sea cubierto con la dosificación correcta de material asfáltico, sin excederse más allá de la mitad de la base del abanico del aspersor, de la orilla interior de la capa de material pétreo. Este riego se cubrirá inmediatamente con la segunda capa de material pétreo, como se indica en el siguiente Párrafo.

G.5.2.3. En el tendido de los materiales pétreos de los riegos subsecuentes, se atenderán los criterios señalados en el Inciso G.5.1. de esta Norma.

G.6. PLANCHADO DEL MATERIAL PÉTREO

Inmediatamente después de tendido y rastreado el material pétreo de carpetas de uno o dos riegos, como se indica en el Inciso G.5.1. de esta Norma, y con el propósito de que quede embebido en el material asfáltico, se acomodará mediante un planchado con un compactador ligero de rodillos metálicos, que se ejecute

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR 1 04 008/00

longitudinalmente, de las orillas de la carpeta hacia su centro en las tangentes y en las curvas, de su lado interior al exterior, efectuando un traslape de cuando menos la mitad del ancho del compactador en cada pasada, siempre a una velocidad lo suficientemente lenta para prevenir que se desplace o levante el material pétreo y evitando su deterioro o trituración por exceso de pasadas o por el uso de compactadores demasiado pesados. El planchado se completará el mismo día de la aplicación del material pétreo, terminándolo cuando haya roto la emulsión asfáltica o fraguado el asfalto rebajado. En el caso de las carpetas de tres riegos se procederá de la misma manera, con la excepción de que el primer planchado se ejecutará una vez que, sobre la primera capa de material pétreo, se hayan aplicado el primer riego de material asfáltico y la segunda capa de material pétreo

G.7. TERMINADO

Una vez concluido el planchado de la última capa de la carpeta por el sistema de riegos y transcurrido un tiempo no menor de tres (3) días, durante el cual la carpeta estará cerrada a todo tipo de tránsito, o cuando la Secretaría juzgue que el material asfáltico tiene la consistencia adecuada que evite el desprendimiento excesivo del material pétreo, todo el material que no se haya adherido se recolectará dejando la superficie libre de material suelto, depositándolo en la forma y en el sitio indicados en el proyecto, donde quedará a disposición de la Secretaría.

G.8. CONSERVACIÓN DE LOS TRABAJOS

Es responsabilidad del Contratista de Obra la conservación de la carpeta por el sistema de riegos hasta que haya sido recibida por la Secretaría, considerando que solo se podrá recibir hasta que estén terminados todos los riegos parciales que integren la carpeta.

H. CRITERIOS PARA ACEPTACIÓN O RECHAZO

Además de lo establecido anteriormente en esta Norma, para que una carpeta por el sistema de riegos sea aceptada por la Secretaría, se verificará que:

- H.1. Las dosificaciones de los diferentes materiales empleados correspondan a las indicadas en el proyecto o a las que haya aprobado la Secretaría

NORMAS

N CTR-CAR 1-04 008/00

H.2. El acabado final de la superficie de rodamiento no presente deformaciones, afloramiento del material asfáltico, pérdida sensible de material pétreo o cualquier defecto que, a juicio de la Secretaría, afecte la calidad y/o buen comportamiento de las carpetas construidas por este método

H.3. El ancho de la carpeta sea el establecido en el proyecto, con una tolerancia del eje a la orilla de más menos cinco (± 5) centímetros

I. MEDICIÓN

Cuando la construcción de carpetas por el sistema de riegos se contrate a precios unitarios por unidad de obra terminada y sean ejecutadas conforme a lo indicado en esta Norma, a satisfacción de la Secretaría, se medirán según lo señalado en la Cláusula E. de la Norma N LEG-3, *Ejecución de Obras*, para determinar el avance o la cantidad de trabajo realizado para efecto de pago, tomando como unidad el metro cuadrado de carpeta construida según su tipo, con aproximación a la unidad y para cada banco de material pétreo en particular.

J. BASE DE PAGO

Cuando la construcción de carpetas por el sistema de riegos se contrate a precios unitarios por unidad de obra terminada y sean medidas de acuerdo con lo indicado en la Cláusula I. de esta Norma, se pagarán, según su tipo y para cada banco en particular, al precio fijado en el contrato para el metro cuadrado. Estos precios unitarios, conforme con lo indicado en la Cláusula F. de la Norma N-LEG-3, *Ejecución de Obras*, incluyen lo que corresponda por: valor de adquisición o producción del material asfáltico, limpieza del tanque en que se transporte, movimientos en la planta de producción y en el lugar de destino, carga al equipo de transporte, transporte al lugar de almacenamiento, descarga en el depósito, cargo por almacenamiento y todas las operaciones de calentamiento y bombeo requeridas; desmonte y despilme de los bancos, extracción del material pétreo aprovechable y del desperdicio, cualesquiera que sean sus clasificaciones, instalación y desmantelamiento de la planta, alimentación de la planta, cribados y desperdicios de los cribados, trituración total, lavado o eliminación del polvo superficial adherido a los materiales, cargas, descargas y todos los acarreos locales necesarios para los tratamientos así como de los desperdicios y formación de los

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR 1 04-008/00

almacenamientos, barrido y limpieza de la superficie sobre la que se construirá la carpeta, protección de las estructuras o parte de ellas, precauciones para no mancharlas con el material asfáltico y para evitar traslapes excesivos; cargas en el depósito del material asfáltico y en los almacenamientos de los materiales pétreos al equipo de transporte y acarreo al lugar de utilización y/o riego, aplicaciones del material asfáltico en la forma que fije el proyecto y, en su caso, su premezclado con el material pétreo, tendido y planchado de los materiales pétreos, rastreos, recolección, remoción, depósito en la forma y en el sitio indicados en el proyecto, del material pétreo excedente; los tiempos de los vehículos empleados en los transportes y riego de todos los materiales durante las cargas y las descargas, y todo lo necesario para la correcta ejecución del concepto

K. ESTIMACIÓN Y PAGO

La estimación y pago de las carpetas construidas por el sistema de riegos, se efectuará de acuerdo con lo señalado en la Cláusula G. de la Norma N LEG-3, *Ejecución de Obras*.

L. RECEPCIÓN DE LA OBRA

Una vez concluida la construcción de la carpeta, la Secretaría la recibirá conforme con lo señalado en la Cláusula H. de la Norma N-LEG-3, *Ejecución de Obras*, aplicando en su caso, las sanciones a que se refiere la Cláusula I. de la misma Norma.

N·CTR·CAR·1·04·004/00

LIBRO: CTR. CONSTRUCCIÓN
TEMA: CAR. Carreteras
PARTE: 1. CONCEPTOS DE OBRA
TÍTULO: 04. Pavimentos
CAPÍTULO: 004 Riegos de Impregnación

A. CONTENIDO

Esta Norma contiene los aspectos a considerar en la aplicación de riegos asfálticos de impregnación en la construcción de carreteras y autopistas.

B. DEFINICIÓN

Consiste en la aplicación de un material asfáltico, sobre una capa de material pétreo como la base del pavimento, con objeto de impermeabilizarla y favorecer la adherencia entre ella y la carpeta asfáltica. El material asfáltico que se utiliza normalmente es una emulsión, ya sea de rompimiento lento o especial para impregnación, o bien un asfalto rebajado. La aplicación del riego de impregnación puede omitirse si la capa por construir encima es una carpeta asfáltica con espesor mayor o igual que diez (10) centímetros.

C. REFERENCIAS

Esta Norma se complementa con las últimas versiones de las siguientes:

NORMAS	DESIGNACIÓN
Ejecución de Obras	N-LEG-3
Calidad de Materiales Asfálticos	N-CMT-4 05-001

D. MATERIALES

- D.1. Los materiales que se utilicen en la aplicación de riegos de impregnación, serán del tipo y con las características establecidas en el proyecto.
- D.2. No se aceptará el suministro y aplicación de materiales que no cumplan con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría, ni aún en el supuesto de que serán mejorados posteriormente en el lugar de trabajo por el Contratista de Obra
- D.3. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, los materiales presentan deficiencias respecto a las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la misma, se suspenderá inmediatamente el trabajo hasta que el Contratista de Obra las corrija por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

E. EQUIPO

El equipo que se utilice para la aplicación de riegos de impregnación, será el adecuado para obtener la calidad especificada en el proyecto, en cantidad suficiente para producir el volumen establecido en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, y conforme con el programa de utilización de maquinaria, siendo responsabilidad del Contratista de Obra su selección. Dicho equipo debe estar y ser mantenido en óptimas condiciones de operación durante el tiempo que dure la obra y ser operado por personal capacitado. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, el equipo presenta deficiencias o no produce los resultados esperados, se suspenderá inmediatamente el trabajo hasta que el Contratista de Obra corrija dichas deficiencias o lo reemplace con el equipo adecuado. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra

En la selección del equipo el Contratista de Obra considerará lo siguiente

E.1. PETROLIZADORAS

Las petrolizadoras serán capaces de establecer a temperatura constante, un flujo uniforme del material asfáltico sobre la superficie por cubrir, en anchos variables y en dosificaciones

NORMAS

N CTR CAR 1 04-004/00

controladas, estar equipadas con odómetro, medidores de presión, dispositivos adecuados para la medición del volumen aplicado y termómetro para medir la temperatura del material asfáltico dentro del tanque; y contar con una bomba y barras de circulación completas, que puedan ajustarse vertical y lateralmente.

E.2. BARREDORAS MECÁNICAS

Las barredoras mecánicas que se utilicen para la limpieza de las superficies tendrán una escoba rotatoria autopropulsada.

F. TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO

El transporte y el almacenamiento de todos los materiales son responsabilidad exclusiva del Contratista de Obra y los realizará de tal forma que no sufran alteraciones que pudieran ocasionar deficiencias en la calidad de la obra, tomando en cuenta lo establecido en la Norma N-CMT-4-05-001, *Calidad de Materiales Asfálticos*, y sujetándose, en lo que corresponda, a las leyes y reglamentos de protección ecológica vigentes.

G. EJECUCIÓN

Además de lo señalado en la Cláusula D de la Norma N LEG-3, *Ejecución de Obras*, para la aplicación de riegos de impregnación se tiene que considerar lo siguiente.

G.1. DOSIFICACIÓN DE MATERIALES

- G.1.1. La dosificación de los materiales asfálticos que se empleen en la aplicación de riegos de impregnación, se realizará según lo establecido en el proyecto o lo indicado por la Secretaría.
- G.1.2. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, la dosificación del material asfáltico difiere de la establecida en el proyecto o aprobada por la Secretaría, se suspenderá inmediatamente el trabajo hasta que el Contratista de Obra la corrija por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

G.2. CONDICIONES CLIMÁTICAS

Los trabajos serán suspendidos en el momento en que se presenten situaciones climáticas adversas y no se reanudarán mientras éstas no sean las adecuadas, considerando que no se aplicarán riegos de impregnación en las siguientes condiciones:

- G.2.1. Sobre superficies con agua libre o encharcadas
- G.2.2. Cuando exista amenaza de lluvia o esté lloviendo
- G.2.3. Cuando la velocidad del viento impida que la aplicación del material asfáltico sea uniforme.
- G.2.4. Cuando la temperatura de la superficie sobre la cual serán aplicados esté por debajo de los quince (15) grados Celsius.
- G.2.5. Cuando la temperatura ambiente esté por debajo de los quince (15) grados Celsius y su tendencia sea a la baja. Sin embargo, pueden ser aplicados cuando la temperatura ambiente esté por arriba de los diez (10) grados Celsius y su tendencia sea al alza. La temperatura ambiente será tomada a la sombra lejos de cualquier fuente de calor artificial
- G.2.6. Cuando se utilicen asfaltos rebajados, éstos no podrán aplicarse cuando la capa por cubrir esté húmeda

G.3. TRABAJOS PREVIOS

- G.3.1. Inmediatamente antes de la aplicación del riego de impregnación, toda la superficie por cubrir deberá estar debidamente preparada, exenta de materias extrañas, polvo, grasa o encharcamientos, sin irregularidades y reparados los baches que hubieran existido. No se permitirá el riego sobre tramos que no hayan sido previamente aceptados por la Secretaria
- G.3.2. Previamente al riego de impregnación, las estructuras de la carretera o contiguas, que pudieran mancharse directa o indirectamente durante la aplicación del material asfáltico, tales como banquetas, guarniciones, camellones, parapetos, postes, pilas, estribos, caballetes y barreras separadoras,

NORMAS

N CTR CAR 1-04 004/00

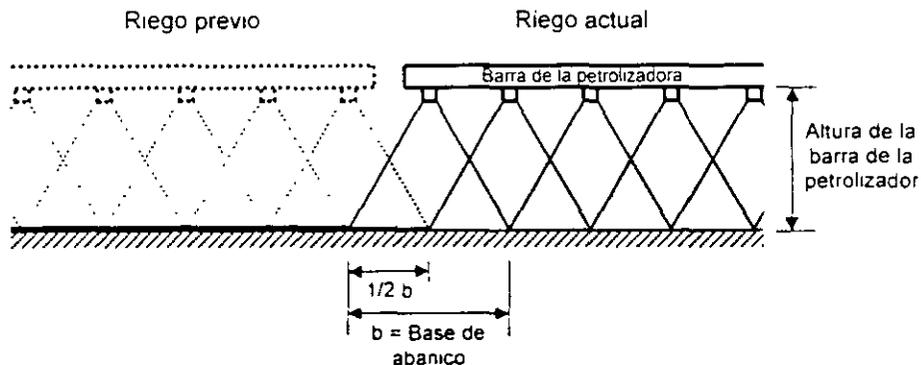
entre otras, se protegerán con papel u otro material similar, de manera que concluido el trabajo y una vez retirada la protección, se encuentren en las mismas condiciones de limpieza en que se hallaban.

- G.3.3.** Cuando se utilicen emulsiones asfálticas, para retrasar su rompimiento y mejorar la absorción de la superficie, ocasionalmente es necesario un riego de agua previo, sin embargo, el material asfáltico no se aplicará sino hasta que el agua superficial se haya evaporado lo suficiente para que no exista agua libre o encharcamientos.

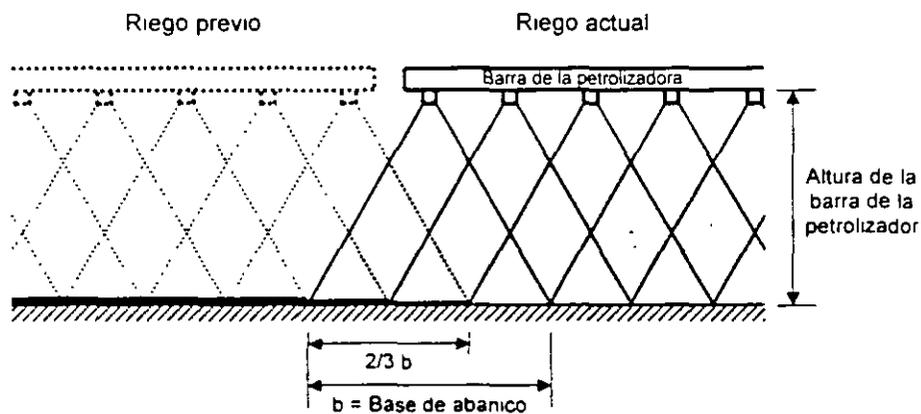
G.4. APLICACIÓN DEL MATERIAL ASFÁLTICO

El material asfáltico, del tipo y con la dosificación establecidos en el proyecto o aprobados por la Secretaría, debe ser aplicado uniformemente sobre la superficie por cubrir, tomando en cuenta lo siguiente:

- G.4.1.** En las juntas transversales, antes de iniciar un nuevo riego, se colocarán tiras de papel u otro material similar para proteger el riego existente, de tal manera que el nuevo riego se inicie desde dicha tira y al retirarse ésta, no quede un traslape de material asfáltico.
- G.4.2.** Se ajustará la altura de la barra de la petrolizadora para aplicar el material asfáltico uniformemente, con la dosificación establecida en el proyecto, de manera que la base del abanico que se forma al salir el material por una boquilla, cubra hasta la mitad de la base del abanico de la boquilla contigua (*cubrimiento doble*), o que la base del abanico de una boquilla cubra las dos terceras ($2/3$) partes de la base del abanico de la boquilla contigua (*cubrimiento triple*), como se muestra en la Figura 1 de esta Norma
- G.4.3.** La aplicación del material asfáltico en una franja contigua a otra previamente regada, se hará de tal manera que el nuevo riego se traslape con el anterior en un medio ($1/2$) o dos tercios ($2/3$) del ancho de la base del abanico de la boquilla extrema de la petrolizadora, según se trate de cubrimiento doble o triple, como se muestra en la Figura 1 de esta Norma, con el propósito de que la dosificación del producto asfáltico en la orilla de la franja precedente sea la indicada en el proyecto



CUBRIMIENTO DOBLE



CUBRIMIENTO TRIPLE

FIGURA 1 - Aplicación del material asfáltico

- G.4.4.** En su caso, el exceso del material asfáltico que se hubiera aplicado debe ser removido. Las deficiencias que por esta causa se presenten, deben ser corregidas por cuenta y costo del Contratista de Obra.
- G.4.5.** La cantidad, temperatura, ancho y longitud de aplicación del material asfáltico son responsabilidad del Contratista de Obra; sin embargo, la Secretaria se reserva el derecho de no recibir el trabajo si, a su juicio, el riego tiene alguna deficiencia.

NORMAS

N CTR CAR 1 04 004/00

- G.4.6.** A menos que el proyecto indique otra cosa o así lo ordene la Secretaría, la penetración del riego de impregnación debe ser mayor o igual a cuatro (4) milímetros
- G.4.7.** No se iniciará la construcción de la siguiente capa sino hasta que haya pasado el tiempo suficiente para que el material aplicado en el riego de impregnación penetre y el agua o solvente, según sea el caso, se haya eliminado.
- G.4.8.** La superficie impregnada permanecerá cerrada a cualquier tipo de tránsito hasta que la penetración establecida en el proyecto u ordenada por la Secretaría se haya producido. Cualquier deterioro que se origine en la capa impregnada por la apertura anticipada al tránsito u otras causas imputables al Contratista de Obra, tendrá que ser reparado por su cuenta y costo
- G.4.9.** Cuando por causas de fuerza mayor y previa autorización de la Secretaría, sea necesario abrir al tránsito una superficie impregnada antes de que ocurra la penetración requerida o si a juicio de la Secretaría existe exceso de material asfáltico en la superficie y éste no amerita ser removido, el riego de impregnación se cubrirá con arena u otro material de esas características, en la cantidad y con el procedimiento que apruebe la Secretaría

G.5. CONSERVACIÓN DE LOS TRABAJOS

Es responsabilidad del Contratista de Obra la conservación del riego de impregnación hasta que haya sido recibido por la Secretaría.

H. CRITERIOS PARA ACEPTACIÓN O RECHAZO

Para que un riego de impregnación sea aceptado por la Secretaría, éste deberá cumplir con todo lo establecido en esta Norma

I. MEDICIÓN

Cuando la aplicación de los riegos de impregnación se contrate a precios unitarios por unidad de obra terminada y sean ejecutados conforme a lo indicado en esta Norma, a satisfacción de la Secretaría,

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N-CTR-CAR-1-04 004/00

se medirán según lo señalado en la Cláusula E. de la Norma N-LEG-3, *Ejecución de Obras*, para determinar el avance o la cantidad de trabajo realizado para efecto de pago, tomando en cuenta lo siguiente:

- I.1. La medición del material asfáltico se hará tomando como unidad el metro cuadrado de riego de impregnación aplicado, según el tipo y dosificación del material asfáltico establecidos en el proyecto, con aproximación a la unidad.
- I.2. A menos que la Secretaría indique otra cosa, la medición de la arena o cualquier otro material utilizado para cubrir el riego de impregnación, se hará tomando como unidad el metro cúbico colocado, determinando el volumen del material en los vehículos de transporte inmediatamente antes de su colocación, verificándolo a partir de la cantidad en litros por metro cuadrado, que sea tendido de acuerdo a lo establecido en el proyecto u ordenado por la Secretaría.

J. BASE DE PAGO

Cuando la aplicación de los riegos de impregnación se contrate a precios unitarios por unidad de obra terminada y sean medidos de acuerdo con lo indicado en la Cláusula I. de esta Norma, se pagarán de la siguiente manera

- J.1. El material asfáltico se pagará al precio fijado en el contrato para el metro cuadrado de riego de impregnación aplicado, según el tipo y dosificación del material asfáltico establecidos en el proyecto. Estos precios unitarios, conforme con lo indicado en la Cláusula F. de la Norma N-LEG 3, *Ejecución de Obras*, incluyen lo que corresponda por valor de adquisición o producción del material asfáltico, limpieza del tanque en que se transporte, movimientos en la planta de producción y en el lugar de destino, carga al equipo de transporte, transporte al lugar de almacenamiento, descarga en el depósito, cargo por almacenamiento y todas las operaciones de calentamiento y bombeo requeridas; barrido y limpieza de la superficie sobre la que se aplicará el riego; protección de las estructuras o parte de ellas, precauciones para no mancharlas con el material asfáltico y para evitar traslapes excesivos; cargas en el depósito del material asfáltico al equipo de transporte y acarreo al lugar de utilización; aplicaciones del material asfáltico en la forma que fije el proyecto;

NORMAS

N CTR CAR 1 04 004/00

los tiempos de los vehículos empleados en los transportes y riego de los materiales durante las cargas y las descargas; y todo lo necesario para la correcta ejecución del concepto

- J.2.** A menos que la Secretaría indique otra cosa, la arena o cualquier otro material que se haya utilizado para cubrir el riego de impregnación, se pagará al precio fijado en el contrato para el metro cúbico. Los precios unitarios, conforme con lo indicado en la Cláusula F. de la Norma N-LEG-3, *Ejecución de Obras*, incluyen lo que corresponda por: desmonte y despálme de los bancos, extracción del material pétreo aprovechable y del desperdicio, cualesquiera que sean sus clasificaciones, instalación y desmantelamiento de la planta, alimentación de la planta, cribados y desperdicios de los cribados, trituración total, lavado o eliminación del polvo superficial adherido a los materiales, cargas, descargas y todos los acarrees locales necesarios para los tratamientos así como de los desperdicios, y formación de los almacenamientos; cargas en los almacenamientos de los materiales al equipo de transporte y acarreo al lugar de utilización; tendido del material; recolección, remoción, depósito en la forma y en el sitio indicado en el proyecto, del material excedente; los tiempos de los vehículos empleados en los transportes de todos los materiales durante las cargas y las descargas, y todo lo necesario para la correcta ejecución del concepto.

K. ESTIMACIÓN Y PAGO

La estimación y pago de los riegos de impregnación aplicados, se efectuará de acuerdo con lo señalado en la Cláusula G. de la Norma N LEG 3, *Ejecución de Obras*

L. RECEPCIÓN DE LA OBRA

Una vez concluida la aplicación del riego de impregnación, la Secretaría lo recibirá conforme con lo señalado en la Cláusula H. de la Norma N LEG 3, *Ejecución de Obras*, aplicando en su caso, las sanciones a que se refiere la Cláusula I de la misma Norma.

LIBRO: CTR. CONSTRUCCIÓN

TEMA: CAR. Carreteras

PARTE: 1. CONCEPTOS DE OBRA

TÍTULO: 04. Pavimentos

CAPÍTULO: 005 Riegos de Liga

A. CONTENIDO

Esta Norma contiene los aspectos a considerar en la aplicación de riegos asfálticos de liga en la construcción de carreteras y autopistas.

B. DEFINICIÓN

Consiste en la aplicación de un material asfáltico sobre una capa de pavimento, con objeto de lograr una buena adherencia con otra capa de mezcla asfáltica que se construya encima. Normalmente se utiliza una emulsión asfáltica de rompimiento rápido. La aplicación del riego de liga puede omitirse si la carpeta asfáltica que se construirá encima tiene un espesor mayor o igual que diez (10) centímetros

C. REFERENCIAS

Esta Norma se complementa con las últimas versiones de las siguientes.

NORMAS	DESIGNACIÓN
Ejecución de Obras	N·LEG 3
Calidad de Materiales Asfálticos	N CMT·4·05·001
Carpetas Asfálticas en Caliente	N·CTR·CAR·1·04·006
Carpetas Asfálticas en Frio	N CTR·CAR 1·04·007

D. MATERIALES

- D.1. Los materiales que se utilicen en la aplicación de riegos de liga, serán del tipo y con las características establecidas en el proyecto.
- D.2. No se aceptará el suministro y aplicación de materiales que no cumplan con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría, ni aún en el supuesto de que serán mejorados posteriormente en el lugar de trabajo por el Contratista de Obra
- D.3. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, los materiales presentan deficiencias respecto a las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la misma, se suspenderá inmediatamente el trabajo hasta que el Contratista de Obra las corrija por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra

E. EQUIPO

El equipo que se utilice para la aplicación de riegos de liga, será el adecuado para obtener la calidad especificada en el proyecto, en cantidad suficiente para producir el volumen establecido en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, y conforme con el programa de utilización de maquinaria, siendo responsabilidad del Contratista de Obra su selección. Dicho equipo debe estar y ser mantenido en óptimas condiciones de operación durante el tiempo que dure la obra y ser operado por personal capacitado. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, el equipo presenta deficiencias o no produce los resultados esperados, se suspenderá inmediatamente el trabajo hasta que el Contratista de Obra corrija dichas deficiencias o lo reemplace con el equipo adecuado. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

En la selección del equipo el Contratista de Obra considerará lo siguiente:

E.1. PETROLIZADORAS

Las petrolizadoras serán capaces de establecer a temperatura constante, un flujo uniforme del material asfáltico sobre la superficie por cubrir, en anchos variables y en dosificaciones controladas, estar equipadas con odómetro, medidores de presión,

NORMAS

N CTR CAR 1 04 005/00

dispositivos adecuados para la medición del volumen aplicado y termómetro para medir la temperatura del material asfáltico dentro del tanque, y contar con una bomba y barras de circulación completas, que puedan ajustarse vertical y lateralmente

E.2. BARREDORAS MECÁNICAS

Las barredoras mecánicas que se utilicen para la limpieza de las superficies tendrán una escoba rotatoria autopropulsada

F. TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO

El transporte y el almacenamiento de todos los materiales son responsabilidad exclusiva del Contratista de Obra y los realizará de tal forma que no sufran alteraciones que pudieran ocasionar deficiencias en la calidad de la obra, tomando en cuenta lo establecido en la Norma N-CMT-4-05 001, *Calidad de Materiales Asfálticos*, y sujetándose, en lo que corresponda, a las leyes y reglamentos de protección ecológica vigentes.

G. EJECUCIÓN

Además de lo señalado en la Cláusula D de la Norma N-LEG 3, *Ejecución de Obras*, para la aplicación de riegos de liga se tiene que considerar lo siguiente:

G.1. DOSIFICACIÓN DE MATERIALES

- G.1.1. La dosificación de los materiales asfálticos que se empleen en la aplicación de riegos de liga, se realizará según lo establecido en el proyecto o lo indicado por la Secretaría.
- G.1.2. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, la dosificación del material asfáltico difiere de la establecida en el proyecto o aprobada por la Secretaría, se suspenderá inmediatamente el trabajo hasta que el Contratista de Obra la corrija por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

G.2. CONDICIONES CLIMÁTICAS

Los trabajos serán suspendidos en el momento en que se presenten situaciones climáticas adversas y no se reanudarán mientras éstas no sean las adecuadas, considerando que no se aplicarán riegos de liga en las siguientes condiciones:

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR 1 04 005/00

- G.2.1.** Sobre superficies con agua libre o encharcadas.
- G.2.2.** Cuando exista amenaza de lluvia o esté lloviendo.
- G.2.3.** Cuando la velocidad del viento impida que la aplicación del material asfáltico sea uniforme.
- G.2.4.** Cuando la temperatura de la superficie sobre la cual serán aplicados esté por debajo de los quince (15) grados Celsius.
- G.2.5.** Cuando la temperatura ambiente esté por debajo de los quince (15) grados Celsius y su tendencia sea a la baja; sin embargo, pueden ser aplicados cuando la temperatura ambiente esté por arriba de los diez (10) grados Celsius y su tendencia sea al alza. La temperatura ambiente será tomada a la sombra lejos de cualquier fuente de calor artificial.

G.3. TRABAJOS PREVIOS

- G.3.1.** Inmediatamente antes de la aplicación del riego de liga, toda la superficie por cubrir deberá estar debidamente preparada, exenta de materias extrañas, polvo, grasa o encharcamientos, sin irregularidades y reparados los baches que hubieran existido. No se permitirá el riego sobre tramos que no hayan sido previamente aceptados por la Secretaría.
- G.3.2.** Previamente al riego de liga, las estructuras de la carretera o contiguas, que pudieran mancharse directa o indirectamente durante la aplicación del material asfáltico, tales como banquetas, guarniciones, camellones, parapetos, postes, pilas, estribos, caballetes y barreras separadoras, entre otras, se protegerán con papel u otro material similar, de manera que concluido el trabajo y una vez retirada la protección, se encuentren en las mismas condiciones de limpieza en que se hallaban
- G.3.3.** Cuando se utilicen emulsiones asfálticas, para retrasar su rompimiento y mejorar la absorción de la superficie, ocasionalmente es necesario un riego de agua previo, sin embargo, el material asfáltico no se aplicará sino hasta que el agua superficial se haya evaporado lo suficiente para que no exista agua libre o encharcamientos.

NORMAS

N-CTR-CAR-1 04 005/00

G.4. APLICACIÓN DEL MATERIAL ASFÁLTICO

El material asfáltico, del tipo y con la dosificación establecidos en el proyecto o aprobados por la Secretaría, debe ser aplicado uniformemente sobre la superficie por cubrir, tomando en cuenta lo siguiente:

- G.4.1. En las juntas transversales, antes de iniciar un nuevo riego, se colocarán tiras de papel u otro material similar para proteger el riego existente, de tal manera que el nuevo riego se inicie desde dicha tira y al retirarse ésta, no quede un traslape de material asfáltico.
- G.4.2. Se ajustará la altura de la barra de la petrolizadora para aplicar el material asfáltico uniformemente, con la dosificación establecida en el proyecto, de manera que la base del abanico que se forma al salir el material por una boquilla, cubra hasta la mitad de la base del abanico de la boquilla contigua (*cubrimiento doble*), o que la base del abanico de una boquilla cubra las dos terceras ($2/3$) partes de la base del abanico de la boquilla contigua (*cubrimiento triple*), como se muestra en la Figura 1 de esta Norma.
- G.4.3. La aplicación del material asfáltico en una franja contigua a otra previamente regada, se hará de tal manera que el nuevo riego se traslape con el anterior en un medio ($1/2$) o dos tercios ($2/3$) del ancho de la base del abanico de la boquilla extrema de la petrolizadora, según se trate de cubrimiento doble o triple, como se muestra en la Figura 1 de esta Norma, con el propósito de que la dosificación del producto asfáltico en la orilla de la franja precedente sea la indicada en el proyecto.
- G.4.4. En su caso, el exceso del material asfáltico que se hubiera aplicado debe ser removido. Las deficiencias que por esta causa se presenten, deben ser corregidas por cuenta y costo del Contratista de Obra.
- G.4.5. La cantidad, temperatura, ancho y longitud de aplicación del material asfáltico son responsabilidad del Contratista de Obra, tomando en cuenta que no se aplicará en tramos mayores de los que puedan ser cubiertos de inmediato con la carpeta asfáltica. La Secretaría se reserva el derecho de no recibir el trabajo si, a su juicio, el riego tiene alguna deficiencia.

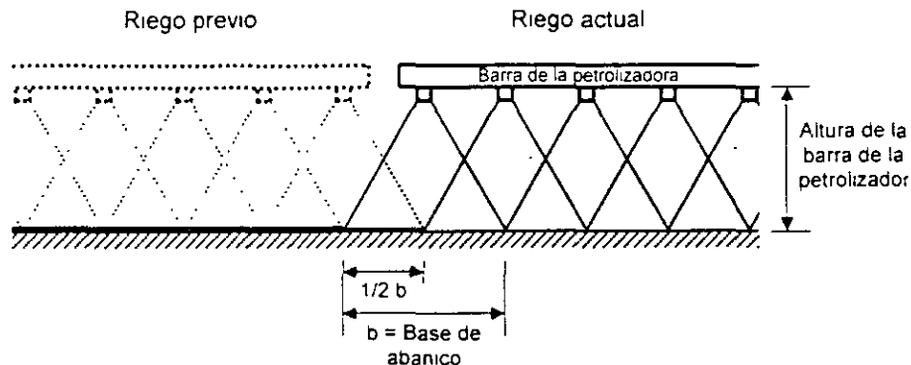
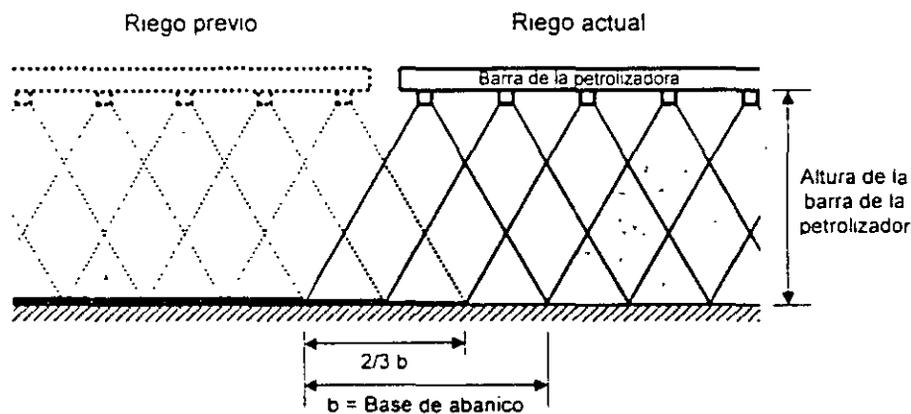
**CUBRIMIENTO DOBLE****CUBRIMIENTO TRIPLE**

FIGURA 1 - Aplicación del material asfáltico

G.4.6. La superficie cubierta por el riego de liga debe permanecer cerrada a cualquier tipo de tránsito hasta que sea construida la carpeta asfáltica. Cualquier deterioro que se origine en el riego aplicado, por el tránsito de vehículos u otras causas imputables al Contratista de Obra, será reparado por su cuenta y costo.

G.5. CONSERVACIÓN DE LOS TRABAJOS

Es responsabilidad del Contratista de Obra la conservación del riego de liga hasta que haya sido cubierto por la carpeta asfáltica.

NORMAS

N CTR CAR 1 04 005/00

H. CRITERIOS PARA ACEPTACIÓN O RECHAZO

Para que un riego de liga sea aceptado por la Secretaría, éste deberá cumplir con todo lo establecido en esta Norma

I. MEDICIÓN

Cuando la obra se contrate a precios unitarios por unidad de obra terminada y el riego de liga sea ejecutado conforme a lo indicado en esta Norma, a satisfacción de la Secretaría, éste se medirá como parte de la carpeta asfáltica, según se indica en las Cláusulas I de las Normas N CTR CAR 1 04 006, *Carpetas Asfálticas en Caliente* y N CTR CAR 1 04 007, *Carpetas Asfálticas en Frío*.

J. BASE DE PAGO

Cuando la obra se contrate a precios unitarios por unidad de obra terminada, el riego de liga ejecutado a satisfacción de la Secretaría, estará incluido en la base de pago de la carpeta asfáltica, según se indica en las Cláusulas J de las Normas N CTR CAR 1 04 006, *Carpetas Asfálticas en Caliente* y N CTR CAR 1 04 007, *Carpetas Asfálticas en Frío*.

K. ESTIMACIÓN Y PAGO

La estimación y pago de los riegos de liga aplicados, se incluirá en la que corresponda a la carpeta asfáltica, que se indica en las Cláusulas K de las Normas N CTR CAR 1 04 006, *Carpetas Asfálticas en Caliente* y N CTR CAR 1 04 007, *Carpetas Asfálticas en Frío*.

L. RECEPCIÓN DE LA OBRA

La Secretaría recibirá el riego de liga como parte de la carpeta asfáltica cuando ésta haya sido terminada, según se indica en las Cláusulas L de las Normas N CTR CAR 1 04 006, *Carpetas Asfálticas en Caliente* y N CTR CAR 1 04 007, *Carpetas Asfálticas en Frío*.

LIBRO: **CTR. CONSTRUCCIÓN**
TEMA: **CAR. Carreteras**
PARTE: **1. CONCEPTOS DE OBRA**
TÍTULO 04 Pavimentos
CAPÍTULO: *009. Carpetas de Concreto Hidráulico*

A. CONTENIDO

Esta Norma contiene los aspectos por considerar en la construcción de carpetas de concreto hidráulico para pavimentos de carreteras de nueva construcción

B. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Las carpetas de concreto hidráulico, son las que se construyen mediante la colocación de una mezcla de agregados pétreos, cemento Pórtland y agua, para proporcionar al usuario una superficie de rodadura uniforme, bien drenada, resistente al derrapamiento, cómoda y segura. Tienen además la función estructural de soportar y distribuir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores del pavimento.

Las carpetas de concreto hidráulico pueden construirse a base de:

B.1. LOSAS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON JUNTAS

Son aquellas que se construyen mediante el colado de concreto hidráulico con juntas longitudinales y transversales, con o sin pasajuntas, para formar elementos rectangulares.

B.2. LOSAS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON REFUERZO CONTINUO

Son aquellas que se construyen mediante el colado de concreto hidráulico sin juntas transversales y con acero de refuerzo

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR 1 04 009/04

colocado longitudinalmente en forma continua con el objeto de resistir los esfuerzos a tensión, y asegurar que las grietas que se produzcan queden totalmente cerradas

B.3. LOSAS DE CONCRETO PRESFORZADO

Son aquellas que se construyen con secciones de concreto hidráulico sujetas a compresión, mediante un sistema de presfuerzo, con relativamente pocas juntas transversales.

C. REFERENCIAS

Son referencias de esta Norma, las normas E 670 *Standard Test for Side Force Friction on Paved Surfaces Using the Mu-Meter* y E 1274, *Standard Test for Measuring Pavement Roughness Using a Profilograph*, publicadas por la *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, así como las Normas aplicables del Título 06 *Materiales para Losas de Concreto Hidráulico*, de la Parte 4 *Materiales para Pavimentos*, del Libro CMT *Características de los Materiales*.

Además, esta Norma se complementa con las siguientes:

NORMAS Y MANUAL	DESIGNACIÓN
Ejecución de Obras	N-LEG 3
Riegos de Impregnación	N CTR CAR 1-04-004
Criterios Estadísticos de Muestreo	M-CAL 1-02

D. MATERIALES

D.1. Los materiales que se utilicen en la construcción de carpetas de concreto hidráulico, cumplirán con lo establecido en las Normas aplicables del Título 06. *Materiales para Losas de Concreto Hidráulico*, de la Parte 4 *Materiales para Pavimentos*, del Libro CMT *Características de los Materiales*, salvo que el proyecto indique otra cosa o así lo apruebe la Secretaría. Los agregados pétreos procederán de los bancos indicados en el proyecto o aprobados por la Secretaría.

D.2. Si dados los requerimientos de la obra, es necesario modificar las características del concreto hidráulico, utilizando aditivos, éstos estarán establecidos en el proyecto o serán aprobados por la Secretaría. Si el Contratista de Obra propone la utilización de

NORMAS

N-CTR CAR-1 04 009/04

aditivos, lo hará mediante un estudio técnico que los justifique, sometiéndolo a la Secretaría para su análisis y aprobación. Dicho estudio ha de contener como mínimo, las especificaciones y los resultados de las pruebas de calidad, así como los procedimientos para el manejo, uso y aplicación de los aditivos.

- D.3. No se aceptará el suministro y utilización de materiales que no cumplan con lo indicado en la Fracción D.1. de esta Norma, ni aun en el supuesto de que serán mejorados posteriormente en el lugar de su utilización por el Contratista de Obra.
- D.4. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, los materiales presentan deficiencias respecto a las características establecidas como se indica en la Fracción D.1. de esta Norma, se suspenderá inmediatamente el trabajo en tanto que el Contratista de Obra las corrija o los remplace por otros adecuados, por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

E. EQUIPO

El equipo que se utilice para la construcción de carpetas de concreto hidráulico, será el adecuado para obtener la calidad especificada en el proyecto, en cantidad suficiente para producir el volumen establecido en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, conforme con el programa de utilización de maquinaria, siendo responsabilidad del Contratista de Obra su selección. Dicho equipo será mantenido en óptimas condiciones de operación durante el tiempo que dure la obra y será operado por personal capacitado. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, el equipo presenta deficiencias o no produce los resultados esperados, se suspenderá inmediatamente el trabajo en tanto que el Contratista de Obra corrija las deficiencias, lo remplace o sustituya al operador. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

E.1. PLANTA DE MEZCLADO

Contará como mínimo con

- E.1.1. Tolvas o silos para almacenar los agregados pétreos y el cemento Portland, protegidos de la lluvia y el polvo, con capacidad suficiente para asegurar la operación continua de

la planta por lo menos quince (15) minutos sin ser alimentadas, y divididas en compartimentos para almacenar los agregados pétreos por tamaños

- E.1.2.** Dispositivos para dosificar los agregados pétreos por masa, con una aproximación de más menos uno (± 1) por ciento de la masa acumulada, o en más menos dos (± 2) por ciento de la masa individual de cada fracción, y sólo en casos excepcionales, cuando así lo apruebe la Secretaría, por volumen y que permitan un fácil ajuste de la mezcla en cualquier momento, para poder obtener la granulometría que indique el proyecto
- E.1.3.** Dispositivos para dosificar el cemento Pórtland por masa, con una aproximación de más menos uno (± 1) por ciento de la cantidad requerida según el proporcionamiento
- E.1.4.** Dispositivos para dosificar el agua, con una aproximación de más menos uno (± 1) por ciento de la cantidad requerida, y los aditivos con una aproximación de más menos tres (± 3) por ciento de la cantidad necesaria según el proporcionamiento. En el caso del agua y los aditivos líquidos, éstos pueden medirse por volumen con una precisión aceptable.
- E.1.5.** Cámara mezcladora equipada con un dispositivo para el control del tiempo de mezclado.
- E.1.6.** Un dispositivo de suma acumulada, sin restitución, para contar correctamente el número de bachas producidas durante su operación

E.2. EXTENDEDORAS DE CONCRETO

Autopropulsadas, con la suficiente potencia y tracción para esparcir uniformemente en espesor y pendiente el concreto hidráulico sin desplazarlo, ya sea mediante una cuchilla oscilante o bien un transportador de banda o tornillo

E.3. PAVIMENTADORAS

- E.3.1.** Autopropulsadas de cimbra deslizante, capaces de extender, vibrar, enrasar y terminar el concreto hidráulico colocado en una sola pasada, sin la necesidad de acabado manual, de tal

manera que se obtenga una losa de concreto hidráulico uniforme que cumpla con las especificaciones del proyecto. Estarán equipadas con sensores de control automático de niveles para la línea guía de pavimentación y la pendiente, y tendrán la capacidad de insertar en forma automática las barras de amarre en las juntas longitudinales.

Los dispositivos externos que se utilicen como referencia de nivel para los sensores, deben estar colocados en zonas limpias de piedras, basura o cualquier otra obstrucción que pudiera afectar las lecturas. Si durante la ejecución de los trabajos, los controles automáticos operan deficientemente, la Secretaría, a su juicio, podrá permitir al Contratista de Obra terminar el colado del día, mediante el uso del control manual de la pavimentadora, sin embargo, el colado se podrá reiniciar sólo cuando los controles automáticos funcionen adecuadamente.

E.3.2. Las pavimentadoras para la construcción de losas de concreto presforzado contarán con:

- Bandas para transportar el concreto fresco desde los camiones situados a un costado de la pavimentadora hasta el frente de ésta, sin interferir con los tendones de presfuerzo.
- Sistema de vibradores de inmersión y de alta frecuencia colocados a la mitad de la separación entre los tendones longitudinales, provisto de un mecanismo para sumergir los vibradores y extraerlos en las intersecciones con los tendones transversales y en los extremos de las losas.

E.4. VIBRADORES

E.4.1. Vibradores de inmersión fijos

Los vibradores de inmersión fijos que formen parte de la pavimentadora, estarán espaciados a no más de sesenta (60) centímetros y equipados con unidades sincronizadas de vibración con una frecuencia en el aire no menor de ocho mil (8 000) ciclos por minuto, con el objeto de proporcionar una consolidación uniforme en el ancho y espesor total de la losa de concreto.

E.4.2. Vibradores de inmersión manuales

En zonas de juntas o de difícil acceso para los vibradores fijos, se pueden utilizar vibradores de inmersión manuales, con la capacidad suficiente para consolidar la losa en todo su espesor. Estos vibradores serán lo suficientemente rígidos para asegurar el control de la posición de operación de la cabeza de vibrado.

E.4.3. Vibradores superficiales

Los vibradores superficiales que se coloquen directamente sobre la superficie de la losa, tendrán una frecuencia de operación de tres mil quinientos a cuatro mil doscientos (3 500 a 4 200) ciclos en el aire.

E.5. RASTRA DE TEXTURIZADO

De tela de yute o de algodón, sin costuras y de dos (2) capas, la inferior de aproximadamente quince (15) centímetros más ancha que la superior. Humedecida para llevar a cabo el texturizado longitudinal, de manera que se produzca una superficie uniforme de textura abrasiva, a todo lo ancho del pavimento.

Para pavimentos con un ancho mayor de cinco (5) metros, la rastra estará montada en un puente que pueda deslizarse sobre la cimbra o bien como parte integral del equipo de texturizado.

Las dimensiones de la rastra serán tales que proporcione una franja de contacto de cuando menos un (1) metro de ancho sobre la superficie del pavimento.

E.6. TEXTURIZADORA

Operada de manera independiente a la pavimentadora y al equipo de curado. Contará con un dispositivo mecánico equipado con dientes de acero de cien (100) a ciento cincuenta (150) milímetros de longitud, con sección transversal de uno (1) por dos (2) milímetros aproximadamente, espaciados aleatoriamente entre veinte (20) y treinta (30) milímetros centro a centro y ajustable para formar pequeños surcos de tres (3) milímetros de profundidad, como mínimo, transversales al eje de la carretera.

E.7. EQUIPO DE CURADO

Diseñado para asegurar una aplicación uniforme de la membrana de curado sobre la carpeta de concreto. Contará con un tanque de almacenamiento dotado de un dispositivo interior de agitación para mantener el producto de curado completamente mezclado durante el proceso. La aplicación de la membrana de curado se realizará mediante el uso de rociadores mecánicamente operados a presión, equipados con boquillas que cuenten con un dispositivo tipo escudo o capuchón para evitar la desviación del rocío por efectos del viento.

E.8. EQUIPO DE CORTE

Con disco abrasivo o de diamante, del tamaño, la potencia y la capacidad que se requieran para formar las juntas mediante cortes con la profundidad mínima establecida en el proyecto.

E.9. UNIDADES DE AGUA A PRESIÓN

Provistas de boquillas capaces de producir una presión mínima de catorce (14) megapascales ($\pm 143 \text{ kg/cm}^2$ aprox.).

E.10. COMPRESORES DE AIRE

Capaces de producir una presión mínima de seiscientos veinte (620) kilopascales ($\pm 6 \text{ kg/cm}^2$ aprox.) provistos con los dispositivos necesarios para evitar la contaminación del aire con agua o aceite.

E.11. DISPOSITIVOS PARA LA COLOCACIÓN DE MATERIAL DE RELLENO PREFORMADO

Capaces de colocar el material preformado de una manera uniforme a todo lo largo de la junta, a la profundidad establecida en el proyecto, sin restirarlo o punzarlo.

E.12. EQUIPO PARA LA INYECCIÓN DEL MATERIAL DE SELLADO

Consistente en bombas de extrusión con la suficiente capacidad para inyectar el volumen requerido de material de sellado hasta la profundidad adecuada, equipadas con una boquilla cuya forma ajuste dentro de las juntas, y con la cual se pueda formar una cama de ancho y profundidad uniforme entre las caras de las juntas.

E.13. FRESADORAS

Autopropulsadas, con la masa suficiente para corregir el acabado de las losas de concreto hidráulico mediante un fresado uniforme. Contarán con:

- Cabezas de corte de aproximadamente un (1) metro de ancho o más, montadas en marcos interiores que permitan controlar la profundidad del fresado.
- Discos de corte con diamantes para cortar las protuberancias o ranurar la superficie del pavimento, adosados a las cabezas de corte. Cada cabeza, con el ancho indicado anteriormente, tendrá entre cincuenta y cuatro (54) y cincuenta y nueve (59) discos, uniformemente distribuidos en todo su ancho. El tamaño, la cantidad y la pasta de adherencia de los diamantes, serán los adecuados para la dureza de los agregados pétreos del concreto por tratar.
- Cilindros hidráulicos para mantener constante la presión sobre las cabezas de corte.

F. TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO

El transporte y almacenamiento de todos los materiales son responsabilidad exclusiva del Contratista de Obra y los realizará de forma tal que no sufran alteraciones que ocasionen deficiencias en la calidad de la obra, tomando en cuenta lo establecido en las Normas aplicables del Título 06 *Materiales para Losas de Concreto Hidráulico*, de la Parte 4. *Materiales para Pavimentos*, del Libro CMT. *Características de los Materiales*. Se sujetarán, en lo que corresponda, a las leyes y reglamentos de protección ecológica vigentes.

G. EJECUCIÓN**G.1. CONSIDERACIONES GENERALES**

Para la construcción de carpetas de concreto hidráulico se considerará lo señalado en la Cláusula D de la Norma N-LEG-3, *Ejecución de Obras*.

G.2. PROPORCIONAMIENTO DE MATERIALES

- G.2.1.** Los agregados pétreos, el cemento Pórtland y aditivos que se empleen en la elaboración de las carpetas de concreto hidráulico, se mezclarán con el proporcionamiento necesario.

NORMAS

N CTR CAR 1 04 009/04

para producir un concreto hidráulico homogéneo, con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría

- G.2.2.** El proporcionamiento se determinará en el laboratorio para obtener las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría. Esta determinación será responsabilidad del Contratista de Obra.
- G.2.3.** Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaría, con las dosificaciones de los distintos tipos de agregados pétreos, cemento Portland y aditivos utilizados en la elaboración de carpetas de concreto hidráulico, no se obtiene un concreto hidráulico con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría, se suspenderá inmediatamente el trabajo en tanto que el Contratista de Obra las corrija por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

G.3. CONDICIONES CLIMÁTICAS

Los trabajos serán suspendidos en el momento en que se presenten situaciones climáticas adversas y no se reanudarán mientras éstas no sean las adecuadas, considerando que no se construirán carpetas de concreto hidráulico

- G.3.1.** Sobre superficies con agua libre o encharcada.
- G.3.2.** Cuando exista amenaza de lluvia o esté lloviendo.
- G.3.3.** Cuando la temperatura de la superficie sobre la cual serán construidas, esté por debajo de los cuatro (4) grados Celsius
- G.3.4.** Cuando la temperatura ambiente sea de cuatro (4) grados Celsius y su tendencia sea a la baja. Sin embargo las carpetas de concreto hidráulico pueden ser construidas cuando la temperatura ambiente esté por arriba de dos (2) grados Celsius y su tendencia sea al alza. La temperatura ambiente será tomada a la sombra lejos de cualquier fuente de calor artificial

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR 1-04-009/04

- G.3.5** Cuando la evaporación sobre la superficie de la losa sea mayor de un (1) kilogramo por metro cuadrado por hora, determinada de acuerdo con las recomendaciones de la *Portland Cement Association (PCA)*, a menos que se levanten rompevientos para proteger el concreto hidráulico y lo apruebe la Secretaría

G.4. TRABAJOS PREVIOS

- G.4.1.** Inmediatamente antes de la construcción de la carpeta de concreto hidráulico, la superficie sobre la que se colocará estará debidamente terminada dentro de las líneas y niveles, exenta de materias extrañas, polvo, grasa o encharcamientos, sin irregularidades y reparados satisfactoriamente los baches que hubieran existido. No se permitirá la construcción sobre superficies que no hayan sido previamente aceptadas por la Secretaría.
- G.4.2.** Si así lo indica el proyecto o lo aprueba la Secretaría, cuando la carpeta se construya sobre una capa de materiales pétreos, como una subbase, ésta debe estar impregnada de acuerdo con lo indicado en la Norma N-CTR-CAR-1-04-004, *Riegos de Impregnación* o se colocará sobre ella una membrana de polietileno. Es responsabilidad del Contratista de Obra establecer el lapso entre la impregnación y el inicio de la construcción de la carpeta.
- G.4.3.** Los acarrees del concreto y los materiales hasta el sitio de su utilización, se harán de tal forma que el tránsito sobre la superficie donde se construirá la carpeta, se distribuya sobre el ancho total de la misma, evitando la concentración en ciertas áreas y, por consecuencia, su deterioro.

G.5. ELABORACIÓN DEL CONCRETO HIDRÁULICO

- G.5.1.** El procedimiento que se utilice para la elaboración del concreto hidráulico es responsabilidad del Contratista de Obra, quien tendrá los cuidados necesarios para el manejo de los materiales a lo largo de todo el proceso, para que el concreto cumpla con los requerimientos de calidad establecidos en el proyecto o aprobados por la Secretaría y atenderá lo indicado en las Normas aplicables del Título 06, *Materiales para Losas de Concreto Hidráulico*, de la Parte 4, *Materiales para Pavimentos*, del Libro CMT. *Características de los Materiales*

NORMAS

N CTR CAR 1 04 009/04

- G.5.2.** Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la Secretaria, la calidad del concreto hidráulico difiere de la establecida en el proyecto o aprobada por la Secretaria, se suspenderá inmediatamente la producción en tanto que el Contratista de Obra la corrija por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.
- G.5.3.** Durante el proceso de producción no se cambiará de un tipo de concreto a otro, hasta que las tolvas de la planta hayan sido vaciadas completamente y los depósitos de alimentación de los agregados pétreos sean cargados con el nuevo material.

G.6. TRAMO DE PRUEBA

Sobre la superficie donde se construirá la carpeta de concreto hidráulico, el Contratista de Obra ejecutará previamente un tramo de prueba en todo el ancho de la corona o de la franja por construir, con una longitud de doscientos (200) metros, con la finalidad de evaluar el procedimiento y los equipos que utilizarán, considerando que

- G.6.1.** La construcción del tramo de prueba se hará cumpliendo con todo lo establecido en esta Norma.
- G.6.2.** Una vez terminada la carpeta del tramo de prueba, se verificará que cumpla con lo establecido en la Cláusula H de esta Norma. En caso negativo, el Contratista de Obra construirá el número de tramos de prueba necesarios hasta que cumpla con lo indicado en dicha Cláusula.
- G.6.3.** Si el tramo de prueba construido cumple con lo indicado en el Inciso anterior, podrá considerarse como parte de la obra y será objeto de medición y pago, de lo contrario no se medirá ni pagará y la Secretaria, a su juicio, determinará si es necesario o no que el Contratista de Obra retire el tramo de prueba por su cuenta y costo.

G.7. PASAJUNTAS Y BARRAS DE AMARRE

- G.7.1.** Las pasajuntas y barras de amarre para losas de concreto hidráulico con juntas, se colocarán de acuerdo con lo indicado en el proyecto o aprobado por la Secretaria.

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR-1 04-009/04

G.7.2. Las pasajuntas que se utilicen en las juntas transversales de contracción, serán barras lisas con las características indicadas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría y con sus extremos libres de rebabas cortantes. Se colocarán antes del colado del concreto hidráulico, mediante silletas o canastas metálicas de sujeción que las aseguren en la posición correcta durante el colado y el vibrado del concreto, sin impedir sus movimientos longitudinales. Una vez colocadas, la superficie expuesta de las pasajuntas se someterá a un tratamiento antiadherente, con grasa, una funda de plástico u otro procedimiento aprobado por la Secretaría, para garantizar el libre movimiento longitudinal de las losas en la junta. Las pasajuntas que se pongan en las juntas transversales de construcción, de expansión y de emergencia, serán iguales a las que se utilicen en las juntas de contracción y se colocarán con el mismo alineamiento y espaciamiento.

G.7.3. Las barras de amarre que se coloquen en las juntas longitudinales, serán corrugadas, con las características indicadas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría, y se colocarán mediante silletas, o insertadas por vibración si se usa equipo de cimbra deslizante. En una longitud de cuarenta y cinco (45) centímetros antes y después de una junta transversal, no se deben colocar barras de amarre.

G.8. ACERO DE REFUERZO

G.8.1. En losas de concreto hidráulico con refuerzo continuo

El refuerzo continuo se puede hacer con varillas de acero o mallas prefabricadas electrosoldadas, colocadas a la altura y con los traslapes que indique el proyecto o apruebe la Secretaría, utilizando los dispositivos adecuados para asegurar la continuidad del refuerzo. En algunos casos, las varillas se pueden colocar y alinear con un equipo especial ubicado frente a la pavimentadora, el cual guía y posiciona las varillas con el espaciamiento y la elevación de proyecto, mientras se coloca el concreto.

G.8.2. En losas de concreto presforzado

Los tendones necesarios para las losas de concreto presforzado, se colocarán sobre asientos de apoyo situados en las posiciones que indique el proyecto o apruebe la

NORMAS

N CTR-CAR-1 04 009/04

Secretaría. Los tendones transversales en las zonas de curva, se apoyarán en medias cimbras, colocadas a lo largo de la cara interior de la franja por pavimentar

G.9. COLADO DEL CONCRETO HIDRÁULICO

- G.9.1.** Después de elaborado el concreto hidráulico, será colocado extendiéndolo y consolidándolo con una pavimentadora autopropulsada, de tal manera que se obtenga una capa de material de espesor uniforme. Sin embargo, en áreas irregulares, el concreto puede extenderse y terminarse a mano
- G.9.2.** El colado se hará en una forma continua, utilizando un procedimiento que minimice las paradas y arranques de la pavimentadora.
- G.9.3.** Cuando el colado sea suspendido por más de treinta (30) minutos, se procederá a construir una junta transversal de emergencia, como se indica en el Inciso G.13 4. de esta Norma.
- G.9.4.** Cada franja de concreto hidráulico se colará cubriendo como mínimo el ancho total del carril o, de preferencia, el ancho total de la calzada y sus acotamientos
- G.9.5.** No se permitirá el colado del concreto hidráulico si existe segregación.
- G.9.6.** Al final de cada jornada y con la frecuencia necesaria, se limpiarán perfectamente todas aquellas partes de la pavimentadora que presenten residuos de concreto hidráulico.
- G.9.7.** La longitud de colado del concreto hidráulico es responsabilidad del Contratista de Obra, tomando en cuenta que no se colará en tramos mayores de los que puedan ser terminados y curados de inmediato, así como aserrados oportunamente.

G.10. VIBRADO

- G.10.1.** Inmediatamente después de colado el concreto hidráulico, se consolidará mediante vibrado

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR 1 04-009/04

G.10.2. El vibrado se hará uniformemente en todo el volumen de la carpeta, utilizando vibradores mecánicos, cuidando que no entren en contacto con la cimbra.

G.10.3. Para el caso de áreas no accesibles a los vibradores de las pavimentadoras, se emplearán vibradores de inmersión manuales

G.10.4. Cuando la pavimentadora sea detenida, los vibradores no deben operar por más de cinco (5) segundos después del paro

G.11. TEXTURIZADO

Salvo que el proyecto indique otra cosa, el acabado de la carpeta de concreto hidráulico, se hará pasando sobre su superficie la rastra de texturizado y la texturizadora, o bien, mediante el método de denudado químico, que consiste en rociar un retardante de fraguado sobre la superficie del concreto fresco y, después de que la masa de concreto ha endurecido, aplicar un cepillado enérgico con un dispositivo de cerdas metálicas para eliminar el mortero de la superficie

En cualquier caso, el acabado superficial proporcionará una superficie de rodadura con la resistencia a la fricción establecida en la Fracción H.5. de esta Norma, como mínimo.

G.12. CURADO

Después de terminado el texturizado, cuando el concreto empiece a perder su brillo superficial, con el equipo de curado se aplicará el material que indique el proyecto o apruebe la Secretaría para formar la membrana de curado en la superficie de la carpeta. En el caso de juntas aserradas, sus caras expuestas serán curadas inmediatamente después de que se concluya el corte.

G.13. JUNTAS

G.13.1. En el caso de carpetas de concreto hidráulico con juntas, una vez que el concreto haya endurecido lo suficiente para que no se desportille y antes de que se formen grietas naturales por contracción, se aserrará la carpeta para formar una junta como las mostradas en las Figuras 1 a 3 de esta Norma. Los cortes se ajustarán al alineamiento, dimensiones y características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría

NORMAS

N CTR CAR 1 04 009/04

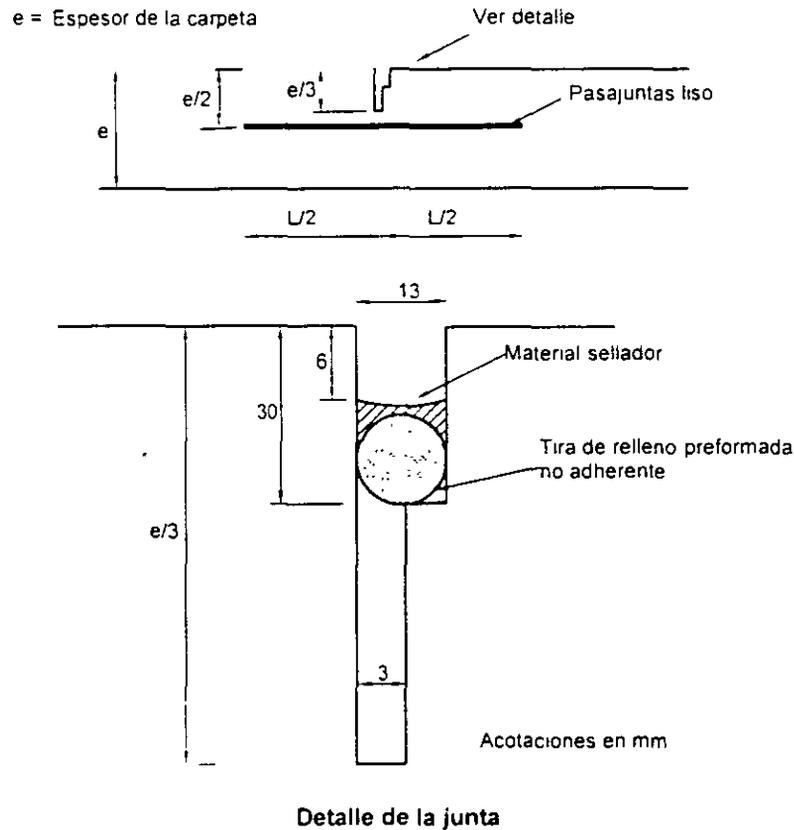


FIGURA 1 - Corte y sellado de juntas de contracción (Tipo A) con pasajuntas

G.13.2. Primero se aserrarán las juntas transversales de contracción e inmediatamente después las longitudinales. Es responsabilidad del Contratista de Obra elegir el momento propicio para efectuar el aserrado. Las losas que se agrieten por aserrado inoportuno serán demolidas y reemplazadas, o reparadas si la Secretaría así lo aprueba, por cuenta y costo del Contratista de Obra. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra

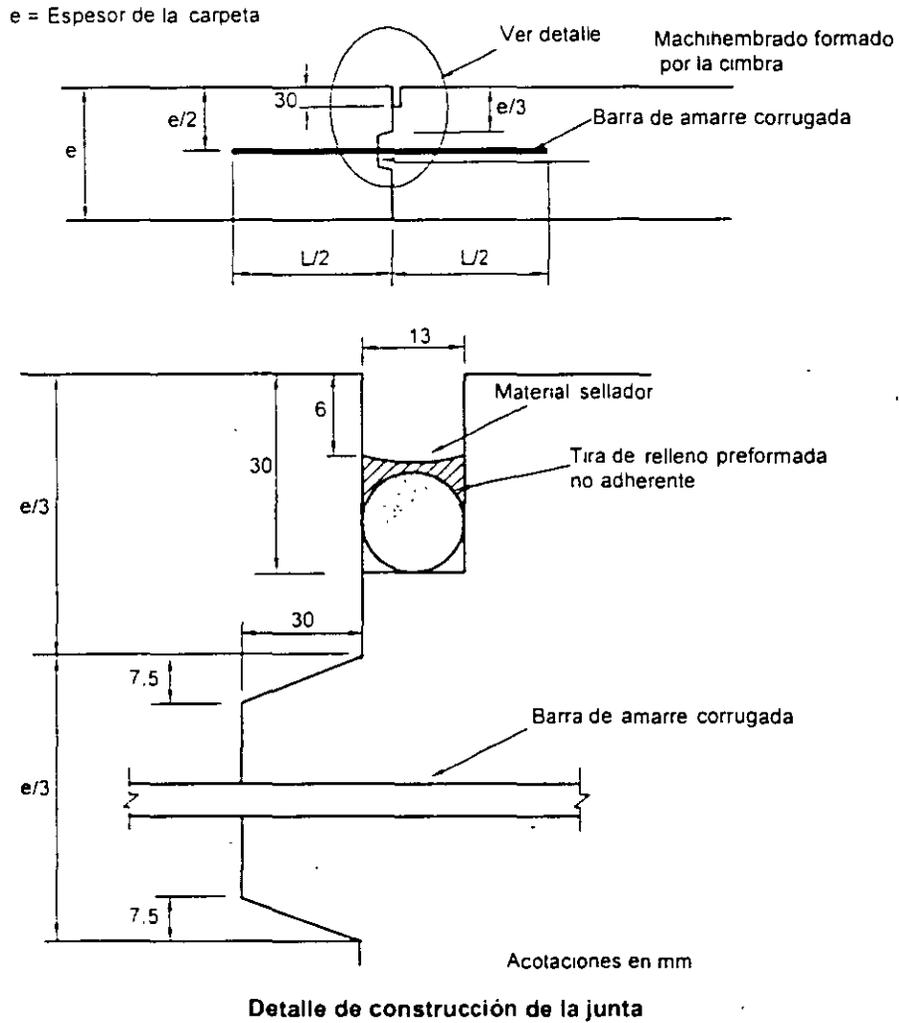
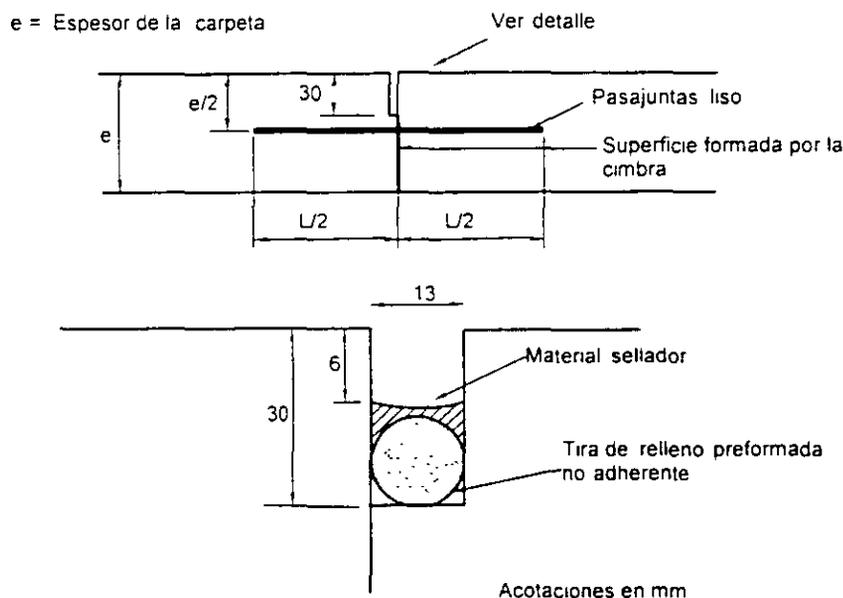


FIGURA 2 - Corte y sellado de juntas longitudinales de construcción (Tipo B) con barras de amarre



Detalle de construcción de la junta

FIGURA 3.- Corte y sellado de juntas transversales de construcción o de emergencia (Tipo C) con pasajuntas

G.13.3. A menos que el proyecto indique otra cosa o lo apruebe la Secretaría, cuando se requiera hacer la junta con cortes en dos etapas (escalonados), el segundo corte no se realizará antes de setenta y dos (72) horas después del colado.

G.13.4. En el sitio preestablecido para terminar el colado del día y coincidiendo siempre con la ubicación de una junta transversal de contracción, se formará una junta de construcción como la mostrada en la Figura 3 de esta Norma (Tipo C), hincando en el concreto fresco una frontera metálica o cimbra que garantice la perpendicularidad del plano de la junta con el plano de la superficie de la losa y se removerá el concreto fresco excedente. Esta frontera o cimbra contará con orificios que permitan la instalación de pasajuntas en todo lo

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR 1 04-009/04

ancho de la losa, con el alineamiento y espaciamiento que indique el proyecto o apruebe la Secretaría. Para garantizar la consolidación correcta del concreto en las esquinas y bordes de la junta, se utilizarán vibradores de inmersión manuales.

G.13.5. Cuando por causas de fuerza mayor sea necesario suspender el colado por más de treinta (30) minutos, se construirá una junta transversal de emergencia como la mostrada en la Figura 3 de esta Norma (Tipo C). La localización de esta junta se establecerá en función del tramo que se haya colado a partir de la última junta transversal de contracción trazada. Si el tramo colado es menor de un tercio ($\frac{1}{3}$) de la longitud de la losa, se removerá el concreto fresco para hacer coincidir la localización de la junta de emergencia con la de contracción inmediata anterior. En caso de que la emergencia ocurra en el tercio medio de la losa, se hará la junta de emergencia como se indica en el Inciso anterior, cuidando que la distancia de ésta a cualquiera de las dos juntas de contracción adyacentes no sea menor de uno coma cinco (1.5) metros. Si la emergencia ocurre en el último tercio de la longitud de la losa, la junta de emergencia se hará dentro del tercio medio de la losa y se removerá el concreto fresco excedente.

G.13.6. La dimensión de las losas en el sentido longitudinal será la establecida en el proyecto con una tolerancia de más menos un (± 1) centímetro, coincidiendo siempre el aserrado de las juntas transversales con el punto medio longitudinal de las pasajuntas. La alineación de las juntas longitudinales será la indicada en el proyecto, con una tolerancia de más menos un (± 1) centímetro.

G.14. CONSERVACIÓN DE LOS TRABAJOS

Es responsabilidad del Contratista de Obra la conservación de la carpeta de concreto hidráulico hasta que haya sido recibida por la Secretaría, cuando la carretera sea operable.

H. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O RECHAZO

Además de lo establecido anteriormente en esta Norma, para que la carpeta de concreto hidráulico, de cada tramo de un (1) kilómetro de longitud o fracción, se considere terminada y sea aceptada por la Secretaría, con base en el control de calidad que ejecute el Contratista de Obra, mismo que podrá ser verificado por la Secretaría cuando lo juzgue conveniente, se comprobará

H.1. CALIDAD DEL CONCRETO HIDRÁULICO

- H.1.1. Que los agregados pétreos, el cemento Pórtland y aditivos utilizados en el concreto hidráulico, hayan cumplido con las características establecidas como se indica en la Fracción D.1. de esta Norma
- H.1.2. Que las características del concreto hidráulico fresco hayan cumplido con las establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría
- H.1.3. Que la resistencia a la tensión (f) a los veintiocho (28) días de edad en especímenes cilíndricos del concreto hidráulico, determinada en corazones extraídos al azar mediante un procedimiento basado en tablas de números aleatorios, conforme a lo indicado en el Manual M-CAL-1-02, *Criterios Estadísticos de Muestreo*, haya cumplido con lo establecido en el proyecto o lo aprobado por la Secretaría, considerando que:
- H.1.3.1. El número de corazones por extraer se determinará aplicando la siguiente fórmula:

$$c = A/600$$

Donde:

c = Número de corazones por extraer, aproximado a la unidad superior

A = Superficie del tramo, (m²)

- H.1.3.2. Los corazones se extraerán sin dañar la parte contigua de los mismos.
- H.1.3.3. Tan pronto se concluya la extracción de los corazones, se rellenarán los huecos con el mismo tipo de concreto hidráulico utilizado en la carpeta, enrasando su superficie con la original de la carpeta.
- H.1.3.4. La resistencia a la tensión promedio de cada cinco (5) corazones consecutivos, deberá ser igual a la resistencia establecida en el proyecto o mayor.

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR-CAR 1 04 009/04

- H.1.3.5. Cuando menos cuatro (4) de los cinco (5) corazones a que se refiere el Párrafo anterior, deben tener una resistencia a la tensión igual al noventa (90) por ciento de la resistencia establecida en el proyecto o mayor
- H.1.3.6. En caso de que la resistencia a la tensión del concreto hidráulico no cumpla con lo establecido en los Párrafos H 1.3.4 y H 1 3.5. de esta Norma, el Contratista de Obra, previa aprobación de la Secretaría, podrá elegir entre demoler y remplazar la carpeta en el tramo defectuoso, por su cuenta y costo, o aceptar una sanción por incumplimiento de calidad, respecto al precio unitario fijado en el contrato, debida a la resistencia insuficiente del concreto hidráulico y de acuerdo con el criterio establecido en la Cláusula J. de esta Norma.

H.2. CALIDAD DE OTROS MATERIALES

H.2.1. Para losas de concreto hidráulico con juntas

- H.2.1.1. Que las pasajuntas y barras de amarre hayan cumplido con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría
- H.2.1.2. Que la elevación y espaciamiento de las pasajuntas no haya diferido de los indicados en el proyecto en más de cinco (5) milímetros y que la desviación angular del eje de cada pasajunta, determinada entre sus extremos, no haya sido mayor de un (1) milímetro respecto a la dirección teórica. Esta comprobación se hará de la siguiente manera
- a) En las silletas o canastas de sujeción con las pasajuntas, colocadas en el tramo de prueba a que se refiere la Fracción G.6. de esta Norma y antes del colado del concreto hidráulico, se comprobará que la posición de las pasajuntas y su alineamiento cumplan con lo establecido en este Párrafo y de ser así se procederá la colado, de lo contrario el colado no se iniciará en tanto que el Contratista de Obra corrija o reemplace las silletas o canastas para dar cumplimiento a lo aquí estipulado

NORMAS

N CTR-CAR 1 04-009/04

- b) Una vez colado y vibrado el concreto del tramo de prueba, se removerá el concreto hasta la junta transversal de contracción inmediata anterior al sitio donde se concluyó el colado y se comprobará nuevamente la posición y el alineamiento de las pasajuntas en esa junta, para verificar que no hayan sufrido desplazamientos durante el proceso de construcción y aprobar el diseño de las silletas o canastas de sujeción, de lo contrario, el Contratista de Obra modificará el diseño y construirá el número de tramos de prueba necesarios hasta que se cumpla con lo indicado en este Párrafo.
- c) Una vez aprobado el diseño de las silletas o canastas de sujeción, durante la construcción de la carpeta de concreto hidráulico se verificará que las que se utilicen tengan las características de las aprobadas y que sean colocadas correctamente antes del colado del concreto
- d) Cuando la Secretaría lo juzgue conveniente, se harán las comprobaciones que se indican en los Puntos a) y b) de este Párrafo, en cualquier tramo de construcción de la carpeta.

H.2.1.3. Que el material de curado para las losas, así como las tiras de relleno preformadas y el material sellador que se utilicen en las juntas, hayan cumplido con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría

H.2.2. Para losas de concreto hidráulico con refuerzo continuo o presforzado

Que el acero de refuerzo continuo o los tendones de acero para presfuerzo hayan cumplido con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría y que hayan sido habilitados y colocados correctamente.

H.3. ÍNDICE DE PERFIL

Que el índice de perfil de la carpeta de concreto hidráulico, en cada línea de colado de cada subtramo de doscientos (200) metros de longitud o fracción, haya sido de catorce centímetros por kilómetro (14 cm / km) como máximo, a menos que el proyecto

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR-1 04-009/04

indique otro valor. El Contratista de Obra hará esta verificación conforme a la norma ASTM E 1274, dentro las cuarenta y ocho (48) horas siguientes al colado, considerando lo que a continuación se señala. La Secretaría evaluará diariamente los resultados que se obtengan.

H.3.1. Equipo

El Contratista de Obra dispondrá y mantendrá durante el tiempo que dure la obra, de un perfilógrafo tipo California que cumpla con la norma ASTM E 1274. Antes de su utilización, el equipo se calibrará como se indica en esa norma, pudiendo la Secretaría verificar la calibración en cualquier momento y si a su juicio, el perfilógrafo presenta deficiencias o no está bien calibrado, se suspenderá inmediatamente la evaluación en tanto que el Contratista de Obra lo calibre adecuadamente, corrija las deficiencias o lo reemplace. En ningún caso se medirán para efecto de pago carpetas que no hayan sido verificadas.

H.3.2. Tramo de prueba

Para que el tramo de prueba a que se refiere la Fracción G.6. de esta Norma sea aceptado por la Secretaría, debe tener un índice de perfil de catorce centímetros por kilómetro (14 cm / km) como máximo.

H.3.3. Determinación del índice de perfil

H.3.3.1. La obtención del índice de perfil, en cada línea de colado, se hará a lo largo de la línea imaginaria ubicada a noventa más menos veinte (90 ± 20) centímetros de la orilla interior de la línea de colado por evaluar. Las mediciones serán divididas en secciones consecutivas de doscientos (200) metros, con el propósito de establecer subtramos en los que se otorgue al Contratista de Obra un estímulo por mejoramiento de calidad o se le aplique una sanción por incumplimiento de calidad, respecto al precio unitario fijado en el contrato, según la calidad obtenida en la superficie terminada y de acuerdo con el criterio establecido en la Cláusula J de esta Norma.

H.3.3.2. Cuando la longitud de un subtramo construido en un día de trabajo, no alcance los doscientos (200) metros, será agrupado con el tramo inmediato que se construya el día siguiente. En este caso, la medición del índice de perfil deberá hacerse tan pronto como sea práctico y posible, pero no después de cuarenta y ocho (48) horas de terminado el último subtramo de ese día. Si el Contratista de Obra no es el responsable del colado de un tramo subsecuente, no se medirá el índice de perfil en los cinco (5) últimos metros del colado de su tramo.

H.3.3.3. Si el índice de perfil determinado en alguna línea de colado de un subtramo de doscientos (200) metros, resulta menor de diez coma un centímetros por kilómetro (10,1 cm / km), el Contratista de Obra se hará acreedor de un estímulo por mejoramiento de calidad, calculado con base en el precio unitario de la carpeta de concreto hidráulico. En su caso, el estímulo se determinará mediante el factor que se establece en la Cláusula J de esta Norma.

H.3.4. Índice de perfil promedio diario

H.3.4.1. Cada día de trabajo se determinará el índice de perfil promedio diario, obteniendo el promedio aritmético de todos los índices de perfil determinados ese día. Si el índice de perfil promedio diario, resulta mayor de veinticuatro centímetros por kilómetro (24 cm / km), se suspenderá de inmediato la construcción de la carpeta de concreto hidráulico, hasta que el Contratista de Obra corrija la carpeta defectuosa, según se indica en el Inciso H.3.5. Para reanudar la construcción de la carpeta, el Contratista de Obra debe construir otro tramo de prueba según lo indicado en la Fracción G.6. de esta Norma, como si se tratara del inicio de los trabajos. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al Contratista de Obra.

H.3.4.2. Para determinar el índice de perfil promedio diario se puede utilizar el formato que se muestra en la Tabla 1 de esta Norma, en el que, para un mismo día de trabajo y

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR-1-04 009/04

cada línea de colado y subtramo, se anota el índice de perfil obtenido. Se calcula el promedio aritmético de todos los índices de perfil obtenidos el mismo día y se anota en el último renglón del formato. Si el tramo tiene más de dos (2) líneas de colado, al formato se le agregan las columnas que sean necesarias para completar el número de líneas de colado. Los índices de perfil que se obtengan en subtramos que hayan sido corregidos como se indica en el Inciso H.3.5 de esta Norma, serán registrados en la columna correspondiente, pues los valores originales deberán conservarse sin alterar

TABLA 1.- Formato para el cálculo del índice de perfil promedio diario

Fecha de construcción:

Tramo ^[1]		Subtramo ^[2]		<i>I_p</i> cm/km		<i>I_p</i> cm/km		
del km	al km	del km	al km	Línea de colado 1	Línea de colado 2	Fecha de obtención	Línea de colado 1	Línea de colado 2
+	+	+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					
+	+	+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					
+	+	+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					
		+	+					

$\bar{I}_p =$

- I_p* = índice de perfil original del subtramo y línea de colado correspondientes
- \bar{I}_p = índice de perfil promedio diario. Promedio aritmético de todos los *I_p* obtenidos en un mismo día (cm/km)
- I_p* = índice de perfil después de corregido el subtramo y línea de colado correspondientes
- [1] = Tramo de 1 km o fracción
- [2] = Subtramo de 200 m o fracción

NORMAS

N-CTR CAR 1 04 009/04

H.3.5. Corrección de la superficie de la carpeta de concreto hidráulico

H.3.5.1. El Contratista de Obra realizará las correcciones de la superficie de la carpeta de concreto hidráulico que se requieran para obtener el índice de perfil adecuado.

H.3.5.2. Después de obtenido el índice de perfil de cada línea de colado en un subtramo de doscientos (200) metros, todas aquellas áreas en las que el perfilograma presente una desviación igual a un (1) centímetro o mayor, en siete coma cinco (7,5) metros o menos, serán corregidas mediante fresado. Concluida la corrección, se obtendrá nuevamente el índice de perfil del subtramo para verificar el cumplimiento de lo aquí estipulado.

H.3.5.3. Una vez realizadas las correcciones individuales de todas las desviaciones a que se refiere el Párrafo anterior, cualquier subtramo de doscientos (200) metros que presente un índice de perfil mayor de veinticuatro centímetros por kilómetro (24 cm / km) en cualquiera de sus líneas de colado, será corregido mediante alguno de los procedimientos que se indican a continuación u otros que apruebe la Secretaría. En cualquier caso, concluida la corrección se determinarán nuevamente los índices de perfil de todas las líneas de colado del subtramo para verificar el cumplimiento de lo aquí estipulado.

- a) Fresado continuo de la superficie de la carpeta de concreto hidráulico, en tramos no menores de cincuenta (50) metros y a todo el ancho de la corona en carreteras de dos (2) carriles, o en todos los carriles de un mismo sentido en carreteras con carriles múltiples, para reducir el índice de perfil a veinticuatro centímetros por kilómetro (24 cm / km) o menos.
- b) Remoción de la carpeta de concreto hidráulico y su reemplazo por una nueva, que cumpla con todo lo indicado en esta Norma y tenga un índice de perfil de veinticuatro centímetros por kilómetro (24 cm / km) como máximo.

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR-CAR 1 04 009/04

H.3.5.4. Cuando el índice de perfil de alguna línea de colado de un subtramo de doscientos (200) metros esté entre catorce coma uno y veinticuatro centímetros por kilómetro (14,1 a 24 cm / km), el Contratista de Obra podrá elegir entre corregir la superficie terminada como se indica en el Párrafo H 3 5 3., o aceptar una sanción por incumplimiento de calidad, calculada con base en el precio unitario de la carpeta de concreto hidráulico, mediante el factor que se establece en la Cláusula J de esta Norma

H.3.5.5. Todos los trabajos de corrección serán por cuenta y costo del Contratista de Obra, y previamente a su ejecución, los procedimientos de corrección de la superficie de la carpeta serán sometidos a la aprobación de la Secretaría. No se permitirá efectuar trabajos de corrección con equipos de impacto que puedan dañar la estructura del pavimento, ni con resanes superficiales adheridos. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que se ocasionen por motivo de las correcciones, serán imputables al Contratista de Obra

H.3.5.6. Todos los trabajos de corrección de la superficie de la carpeta, se efectuarán antes de que se verifiquen sus líneas, pendientes y espesores, como se indica en la Fracción H 4. de esta Norma, salvo que la corrección se realice mediante un procedimiento aprobado por la Secretaría, que eleve esa superficie, en cuyo caso, la verificación de los espesores se hará antes de ejecutarlo.

H.4. LÍNEAS, PENDIENTES Y ESPESORES

Que el alineamiento, perfil, sección y espesor de la carpeta, cumplan con lo establecido en el proyecto, con las tolerancias que se indican en esta Fracción, como sigue:

H.4.1. Previamente a la construcción de la carpeta, en las estaciones cerradas a cada veinte (20) metros, se nivelará la corona terminada de la capa inmediata inferior, obteniendo los niveles en el eje y en ambos lados de éste, en puntos ubicados a una distancia igual al semiancho de la corona de la carpeta menos setenta (70) centímetros, a la mitad del espacio comprendido entre éstos y el eje, y en las orillas de la carpeta

NORMAS

N CTR CAR-1 04-009/04

- H.4.2. Una vez vibrada la carpeta, verificados sus índices de perfil y, en su caso, hechas las correcciones a que se refiere el Inciso H.3.5., se volverán a nivelar las mismas secciones que se indican en el Inciso H.4.1., determinando las elevaciones de los mismos puntos ahí indicados para obtener las pendientes transversales entre ellos, y se medirán, en cada sección, las distancias entre el eje y las orillas de la carpeta, para verificar que esas pendientes y distancias están dentro de las tolerancias que se indican en la Tabla 2 de esta Norma

TABLA 2.- Tolerancias para líneas y pendientes

Característica	Tolerancia
Ancho de la carpeta, del eje a la orilla	± 1 cm
Pendiente transversal	± 0,5%

- H.4.3. Si para corregir la superficie de la carpeta se opta por un procedimiento aprobado por la Secretaría, que eleve esa superficie, antes de su ejecución, se nivelarán las mismas secciones a que se refiere el Inciso H.4.1 de esta Norma, determinando las elevaciones de los mismos puntos ahí indicados para obtener los espesores de la carpeta antes de ser corregida
- H.4.4. Las nivelaciones se ejecutarán con nivel fijo y comprobación de vuelta, obteniendo los niveles con aproximación al milímetro. Las distancias horizontales se medirán con aproximación al centímetro
- H.4.5. A partir de las cotas obtenidas en las nivelaciones a que se refieren los Incisos H.4.1, H.4.2. y H.4.3 de esta Norma, según sea el caso, en todos los puntos nivelados se determinarán los espesores de la carpeta vibrada, los que deberán ser iguales al fijado en el proyecto o, para cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, cumplir con lo establecido en los Incisos H.4.6 y H.4.7. de esta Norma.
- H.4.6. El espesor promedio correspondiente a todas las determinaciones hechas en el tramo, deberá ser igual a noventa y ocho centésimos (0,98) del espesor de proyecto o mayor

$$\bar{e} \geq 0.98e$$

Donde

e = Espesor de proyecto, (cm)

\bar{e} = Espesor promedio correspondiente a todas las determinaciones hechas en el tramo, (cm), obtenido mediante la siguiente fórmula:

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n}$$

Donde

e_i = Espesor obtenido en cada determinación, (cm)

n = Número de determinaciones hechas en el tramo

H.4.7. La desviación estándar de todos los espesores determinados en el tramo, deberá ser igual a diez centésimos (0,10) del espesor promedio o menor

$$\sigma_e \leq 0.10\bar{e}$$

Donde

σ_e = Desviación estándar correspondiente a todas las determinaciones hechas en el tramo, (cm), calculada con la siguiente fórmula:

$$\sigma_e = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1} \right)^{1/2}$$

\bar{e} , e_i y n tienen el significado indicado en el Inciso anterior.

H.5. RESISTENCIA A LA FRICCIÓN

H.5.1. Que la superficie de rodadura de la carpeta de concreto construida, haya tenido una resistencia a la fricción en condiciones de pavimento mojado, igual a seis décimas (0,6) o mayor, medida con el equipo *Mu-Meter*, a una velocidad de setenta y cinco (75) kilómetros por hora, por lo menos sobre

NORMAS

N CTR CAR 1-04 009/04

la huella de la rodada externa de cada línea de colado. El Contratista de Obra hará esta verificación conforme a la norma ASTM E 670. La prueba se hará sobre la superficie de rodadura texturizada y en su caso, corregida de acuerdo con lo indicado en el Inciso H.3.5. de esta Norma

- H.5.2.** Cuando la resistencia a la fricción sea menor de seis décimas (0,6), el Contratista de Obra, por su cuenta y costo, corregirá la superficie terminada como se indica en los Puntos a) o b) del Párrafo H 3.5.3. En cualquier caso, concluida la corrección se determinarán nuevamente la resistencia a la fricción y los índices de perfil de todas las líneas de colado del subtramo, para verificar el cumplimiento de lo estipulado tanto en el Inciso anterior como en la Fracción H.3. de esta Norma.

I. MEDICIÓN

Cuando la construcción de carpetas de concreto hidráulico se contrate a precios unitarios por unidad de obra terminada y sea ejecutada conforme a lo indicado en esta Norma, a satisfacción de la Secretaría, se medirá según lo señalado en la Cláusula E. de la Norma N LEG 3, *Ejecución de Obras*, para determinar el avance o la cantidad de trabajo realizado para efecto de pago, tomando como unidad el metro cúbico de carpeta terminada, según su tipo y para cada banco en particular, con aproximación a la unidad. El volumen de cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, se determinará mediante la siguiente fórmula:

$$V = L \times \bar{e} \times \bar{a}$$

Donde.

- V = Volumen de la carpeta de concreto hidráulico de cada tramo de 1 km o fracción, (m³)
- L = Longitud del tramo, (m)
- \bar{e} = Espesor promedio correspondiente a todas las determinaciones hechas en el tramo, (m), obtenido como se indica en el Inciso H.4.6. de esta Norma.
- \bar{a} = Ancho promedio de la carpeta de concreto hidráulico, obtenido con base en las distancias entre el eje y las orillas de la corona, determinadas en todas las secciones del tramo como se indica en el Inciso H.4.2 de esta Norma, (m)

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N-CTR CAR 1 04 009/04

La Secretaría medirá y pagará como máximo el volumen de la carpeta de concreto hidráulico que resulte del espesor de proyecto más un (1) centímetro por el ancho de proyecto más un (1) centímetro

Para el cálculo del volumen en el tramo medido se puede usar el formato que se muestra en la Tabla 3 de esta Norma.

TABLA 3.- Formato para el cálculo de los volúmenes, los estímulos o sanciones y los importes a pagar

Tramo ⁽¹⁾		L m.	e m	a m	V m ³	PU \$	Importe \$ ⁽²⁾	FRT	FIP	E \$	
del km	al km										
+	+										
+	+										
+	+										
+	+										
+	+										
Sumas =						\$	<input type="text"/>			\$	<input type="text"/>
Importe total =						\$	<input type="text"/>				

L = Longitud del tramo correspondiente

e = Espesor promedio del tramo correspondiente (espesor de proyecto más 1 cm como máximo)

a = Ancho promedio del tramo correspondiente (ancho de proyecto más 1 cm como máximo)

V = Volumen del tramo correspondiente ($V = L \times e \times a$)

PU = Precio unitario de la carpeta

FIP = Factor promedio de estímulo o sanción según el índice de perfil del tramo correspondiente, calculado como se indica en la Fracción J 1 de esta Norma, considerando que el factor de estímulo sólo se aplicará a los tramos que no estén sujetos a sanción por resistencia insuficiente del concreto hidráulico (FRT = 0)

FRT = Factor de sanción debida a la resistencia insuficiente del concreto hidráulico en el tramo correspondiente determinado como se indica en la Fracción J 2 de esta Norma

E = Estímulo o sanción del tramo correspondiente ($E = V \times PU \times (FIP - FRT)$)

(1) = Tramo de 1 km o fracción

(2) = Importe de la carpeta (Importe = V × PU)

J. BASE DE PAGO

Cuando la construcción de carpetas de concreto hidráulico se contrate a precios unitarios por unidad de obra terminada y sea medida de acuerdo con lo indicado en la Cláusula I de esta Norma, se pagará al precio fijado en el contrato para el metro cúbico de carpeta terminada en cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, según su tipo y para cada banco en particular. Estos precios unitarios, conforme a lo indicado en la Cláusula F de la Norma N-LEG 3, *Ejecución de Obras*, incluyen lo que corresponda por.

NORMAS

N-CTR CAR-1-04 009/04

- Valor de adquisición, incluyendo mermas y desperdicios, del cemento Pórtland y los aditivos; del acero para pasajuntas, barras de amarre, refuerzo o presfuerzo, así como para las silletas o canastas de sujeción, o los dispositivos y asientos que se requieran; de las tiras de relleno preformadas y del material sellador para las juntas; del material para el curado de las losas y, en su caso, de la membrana de polietileno Limpieza de los vehículos en que se transporten estos materiales, movimientos en el lugar de destino, carga al equipo de transporte, transporte al lugar de almacenamiento, descarga y cargo por almacenamiento.
- Desmonte y despalde de los bancos; extracción del material pétreo aprovechable y del desperdicio, cualesquiera que sean sus clasificaciones, cribados y desperdicios de los cribados; trituración parcial o total, lavado o eliminación del polvo superficial adherido a los materiales; cargas, descargas y todos los acarrees de los materiales y de los desperdicios; formación de los almacenamientos y clasificación de los agregados pétreos separándolos por tamaños.
- Instalación, alimentación y desmantelamiento de las plantas.
- Permisos de explotación de bancos de agua, así como la extracción, carga y acarreo al lugar de utilización del agua.
- Dosificación y mezclado de los agregados pétreos, cemento Pórtland, agua y aditivos
- Barrido y limpieza de la superficie sobre la que se construirá la carpeta.
- Cargas en la planta del concreto hidráulico al equipo de transporte o carga de los materiales al vehículo mezclador para la elaboración del concreto hidráulico, y su transporte al lugar del colado.
- Habilitación y colocación de las pasajuntas y sus silletas o canastas de sujeción, de las barras de amarre o del acero para el refuerzo o presfuerzo, con los dispositivos y asientos que se requieran.
- Colado, vibrado, texturizado y curado del concreto.
- Aserrado y sellado de las juntas.
- Los tiempos de los vehículos empleados en los transportes de todos los materiales, durante las cargas y las descargas.
- La conservación de la carpeta de concreto hidráulico hasta que sea recibida por la Secretaría.
- Y todo lo necesario para la correcta ejecución de este concepto.

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR 1-04-009/04

Cuando procedan estímulos por mejoramiento de calidad o sanciones por incumplimiento de calidad, de acuerdo con la resistencia a la tensión del concreto y con los índices de perfil de la carpeta, que se obtengan según se señala en el Inciso H.1.3. y en la Fracción H 3., respectivamente, se pagará al Contratista de Obra una bonificación o se le hará una deducción, según corresponda, calculada para cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, medido como se indica en la Cláusula I. de esta Norma, mediante la siguiente fórmula.

$$E = V \times PU \times (\overline{FIP} - FRT)$$

Donde

- E = Estímulo a pagar como bonificación cuando resulta positivo o sanción aplicada como deducción cuando resulta negativo, para cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, (\$)
- V = Volumen de la carpeta de concreto hidráulico del tramo; (m^3)
- PU = Precio unitario de la carpeta de concreto hidráulico fijado en el contrato, ($\$/m^3$)
- \overline{FIP} = Factor promedio de estímulo o sanción según el índice de perfil del tramo, determinado como se indica en la Fracción J.1. de esta Norma, (adimensional)
- FRT = Factor de sanción debida a la resistencia insuficiente del concreto hidráulico en el tramo, determinado como se indica en la Fracción J 2 de esta Norma, (adimensional)

Para calcular el estímulo o la sanción (E) de cada tramo, se puede usar la Tabla 3, en la que se anotan el factor promedio de estímulo o sanción (\overline{FIP}) según el índice de perfil y el factor de sanción debida a la resistencia insuficiente del concreto hidráulico (FRT), de cada tramo.

El factor de estímulo según el índice de perfil sólo se aplicará a los tramos que no estén sujetos a sanción por resistencia insuficiente del concreto hidráulico (cuando $FRT = 0$)

J.1. FACTOR PROMEDIO DE ESTÍMULO O SANCIÓN SEGÚN EL ÍNDICE DE PERFIL

El factor promedio de estímulo o sanción según el índice de perfil del tramo (\overline{FIP}) es el promedio aritmético de los factores de estímulo o sanción (FIP) para cada subtramo de doscientos (200) metros en cada línea de colado, tomados de la Tabla 4. Para su cálculo se puede utilizar el formato que se muestra en la Tabla 5, en el que, para cada línea de colado y subtramo, se anota el factor

NORMAS

N CTR CAR-1-04-009/04

de estímulo o sanción (FIP_i) tomado de la Tabla 4, de acuerdo con el índice de perfil (Ip) obtenido de la Tabla 1 y se calcula el promedio aritmético de todos los factores de estímulo o sanción (FIP_i) de cada tramo, que se anota en la última columna del formato, en el cuadro correspondiente. Para subtramos que hayan sido corregidos como se indica en el Inciso H.3 5. de esta Norma, el factor de estímulo o sanción (FIP_i) correspondiente se determina con base en el índice de perfil (Ip_c) logrado después de la corrección. Si el tramo tiene más de dos (2) líneas de colado, al formato se le agregan las columnas que sean necesarias para completar el número de líneas de colado

TABLA 4.- Factores de estímulo o sanción según el índice de perfil

Índice de perfil * cm / km	Factores de estímulo o sanción (FIP_i)	
4,0 o menos	Estímulo	+ 0,05
4,1 a 5,5		+ 0,04
5,6 a 7,0		+ 0,03
7,1 a 8,5		+ 0,02
8,6 a 10,0		+ 0,01
10,1 a 14,0	0	
14,1 a 16,0	Sanción	- 0,02
16,1 a 18,0		- 0,04
18,1 a 20,0		- 0,06
20,1 a 22,0		- 0,08
22,1 a 24,0		- 0,10
Mayor de 24,0	CORREGIR	

* Para cada tramo de 200 m o fracción en cada línea de colado

J.2. FACTOR DE SANCIÓN POR RESISTENCIA INSUFICIENTE

El factor de sanción (FRT) que proceda según la resistencia a la tensión (T) del concreto hidráulico en cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, medido como se indica en la Cláusula I. de esta Norma, se determina como sigue:

J.2.1. Se calcula el promedio de las resistencias obtenidas en el tramo, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}$$

**CTR. CONSTRUCCIÓN
CAR. CARRETERAS**

N CTR CAR 1-04-009/04

Donde.

\bar{T} = Promedio de las resistencias a la tensión obtenidas en el tramo. (MPa)

T_i = Resistencias a la tensión individuales de los corazones probados. (MPa)

n = Número de corazones probados

TABLA 5.- Formato para el cálculo del factor promedio de estímulo o sanción según el índice de perfil, de cada tramo

Mes: Año:

Tramo ^[1]		Subtramo ^[2]		Línea de colado 1			Línea de colado 2			\overline{FIP}
del km	al km	del km	al km	Día ^[3]	I_p cm/km	FIP_i	Día ^[3]	I_p cm/km	FIP_i	
- +	- +	+	+							
		+	+							
		+	+							
		+	+							
		+	+							
+ -	+ -	+	+							
		+	+							
		+	+							
		+	+							
		+	+							
- +	- +	+	+							
		+	+							
		+	+							
		+	+							
		+	+							

I_p = Índice de perfil del subtramo y línea de colado correspondientes, obtenido de la Tabla 1 Para subtramos que hayan sido corregidos como se indica en el Inciso H 3 5 de esta Norma, se utiliza el índice de perfil (I_p) logrado después de la corrección

FIP = Factor de estímulo o sanción para el subtramo y línea de colado correspondientes, obtenido de la Tabla 4

\overline{FIP} = Factor promedio de estímulo o sanción Promedio aritmético de los FIP_i del tramo correspondiente

[1] = Tramo de 1 km o fracción

[2] = Subtramo de 200 m o fracción

[3] = Día en el que se construyó la carpeta

J.2.2. Se obtiene la desviación estándar como sigue:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n-1}}$$

NORMAS

N CTR CAR-1 04-009/04

Donde.

σ_i = Desviación estándar de las resistencias a la tensión obtenidas en el tramo, (MPa)

T_i , \bar{T} y n tienen el significado indicado en el Inciso anterior.

- J.2.3.** Se calcula el coeficiente de variación aplicando la siguiente fórmula

$$C_v = \frac{\sigma_i}{\bar{T}}$$

Donde:

C_v = Coeficiente de variación, (adimensional)

\bar{T} y σ_i tiene el significado indicado en los Incisos J 2.1. y J 2.2. de esta Norma, respectivamente

- J.2.4.** Se obtiene la resistencia relativa equivalente, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$T_{RE} = \frac{\left(\frac{\bar{T}}{T'} - 0.8 \right) \cdot 0.2}{C_v} + 0.8$$

Donde

T_{RE} = Resistencia relativa equivalente, (adimensional)

T' = Resistencia de proyecto, (MPa)

\bar{T} y C_v tiene el significado indicado en los Incisos J 2.1. y J.2.3. de esta Norma, respectivamente.

- J.2.5.** Se determina el factor de sanción por resistencia insuficiente (FRT) utilizando la gráfica mostrada en la Figura 4 de esta Norma, donde se localiza el valor de la resistencia relativa equivalente (T_{RE}) en la escala horizontal y se lleva una línea vertical hasta interceptar la curva correspondiente al número de especímenes probados (n); de la intersección se lleva una línea horizontal hasta interceptar la escala vertical, donde se

CTR. CONSTRUCCIÓN

CAR. CARRETERAS

N CTR CAR-1 04-009/04

lee el factor de sanción que se aplicará, aproximado a cinco centésimas (0.05) Cuando el valor de T_{RE} sea menor de setenta y cinco centésimas (0.75), no se aceptará la carpeta de concreto hidráulico y el Contratista de Obra tendrá que reponer el tramo defectuoso por su cuenta y costo, a satisfacción de la Secretaria

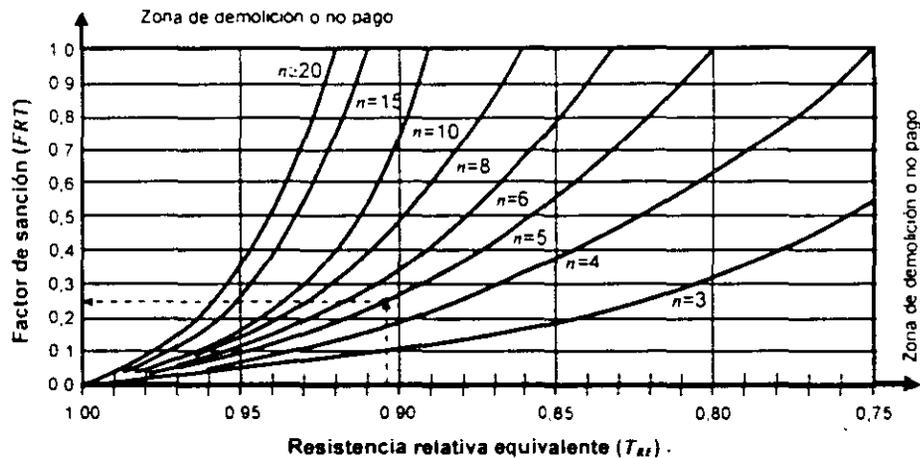


FIGURA 4 - Gráfica para determinar el factor de sanción por resistencia insuficiente (FRT)

K. ESTIMACIÓN Y PAGO

La estimación y pago de las carpetas de concreto hidráulico, se efectuará de acuerdo con lo señalado en la Cláusula G de la Norma N-LEG 3, *Ejecución de Obras*.

L. RECEPCIÓN DE LA OBRA

Una vez concluida la construcción de la carpeta de concreto hidráulico, la Secretaria la aprobará y al término de la obra, cuando la carretera sea operable, la recibirá conforme a lo señalado en la Cláusula H de la Norma N-LEG 3, *Ejecución de Obras*, aplicando en su caso, las sanciones a que se refiere la Cláusula I. de la misma Norma.

Parte II

CONSTRUCCIÓN

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La ejecución de cualquier obra de pavimentación requiere el entendimiento y cumplimiento integral de cada una de las fases constructivas que intervienen. De igual importancia resulta contar con prácticas sanas de extracción, manejo y utilización de los materiales que componen el concreto hidráulico, incluyendo los correspondientes a las capas inferiores o de transición que constituyen la estructura del pavimento.

El éxito de un proyecto de pavimentos de concreto hidráulico no solo depende de si se cumple con requerimientos de resistencia de las capas que lo constituyen y con las características superficiales exigidas en el proyecto. Para el logro de una ejecución exitosa de un pavimento rígido se requiere una valoración e interpretación correcta de las características de los materiales usados en el proyecto, y la selección de las técnicas y equipos óptimos para cada trabajo en particular. Lo mismo que cualquier obra, la ejecución del pavimento debe estar dentro de los costos y de los tiempos programados.

Dentro del primero de los dos requisitos mencionados en el párrafo anterior, se puede destacar que los materiales empleados para la producción de las mezclas, sus aditivos, etc., y los materiales asociados tales como membranas de curado y acero de refuerzo —en caso de emplearse en juntas—, deben cumplir con los requisitos de calidad concebidos en la elaboración del proyecto. Lo mismo puede decirse de la formación de las juntas, incluyendo sus dispositivos de transferencia de carga. Estos elementos son con mucho las zonas del pavimento en donde se presentan los deterioros más severos durante la vida útil del mismo. La integridad a mediano y largo plazo de los pavimentos rígidos se ve también afectada de manera importante por los materiales seleccionados para la aplicación de los productos sellantes en las juntas.

El segundo aspecto por considerar se refiere propiamente a las técnicas y secuencias constructivas más adecuadas para la ejecución del proyecto específico que se va a realizar. Aquí revisten especial importancia las características y dimensiones del mismo, pues en función de éstas se hará la planeación de la obra y la selección de los equipos correspondientes. De esta manera, en pavimentos urbanos, salvo en vías primarias de altas especificaciones, probablemente la opción constructiva más común sea el uso de concretos premezclados colocados mediante reglas vibratorias, rodillos autopropulsados o equipos equivalentes. Por otro lado, en vialidades urbanas de primer orden y aún más en carreteras, quizás resulte más atractivo emplear equipo automatizado para el tendido y terminación de las mezclas. En este último caso el volumen de la producción y colocación de concreto hidráulico necesariamente tenderá a ser más alto. Ello conlleva la necesidad de una planificación y un control de calidad más rigurosos.

Finalmente, al igual que en toda obra de ingeniería, el proceso de estudio y acopio de los materiales que intervienen en la construcción de un pavimento rígido, y su extensión al proceso mismo de fabricación y colocación de las losas, requiere un control de calidad y supervisión efectivo, acorde al tamaño y características propias del proyecto. La aplicación eficaz de programas de control y aseguramiento de la calidad garantiza que cuando menos se cumplan las expectativas o necesidades establecidas y/o implícitas en el proyecto particular.

A lo largo de esta parte se pretende dar las pautas en cada fase de la construcción del pavimento rígido, haciendo hincapié, sin embargo, en el papel rector y en la preponderancia que necesariamente tiene el proyecto de una obra. De hecho, este último es el que marca la pauta, junto con las especificaciones aplicables, en cuanto al tipo de materiales, su modo de empleo y colocación, así

como a las tolerancias de construcción que se puedan aceptar para un proyecto particular dado. Si bien al contratista le asiste el derecho de sugerir al contratante cambios al proyecto, apoyándose en las condiciones físicas reales no previstas o en posibles omisiones, la iniciativa y aprobación de cualquier cambio o ajuste deberá realizarse siempre con la consulta previa de la empresa proyectista, por ser la responsable del diseño

Dentro de un esquema general de trabajo, la empresa supervisora contratada por el dueño o responsable legal de la obra siempre debe actuar como un aliado, en el mejor sentido, de la constructora, tratando en todo momento de observar, sugerir y validar procedimientos de ejecución acordes con las características particulares de la obra y con el equipo disponible. Se busca que estas empresas tengan canales de comunicación expeditos y oportunos, que minimicen las situaciones confusas o las controvertidas. En todo momento la empresa supervisora debe tener el cuidado de documentar y dar seguimiento a todos los posibles cambios en la secuencia constructiva y en los materiales empleados, ensayos y pruebas de calidad, tanto en los ingredientes principales como en las losas ya terminadas, ello le permitirá llegar al término de la obra con los documentos finales reales de construcción y con un registro lo más completo posible que de por sí tendrá un valor presente y futuro para la obra

Lo discutido anteriormente tiene una relevancia de primer orden, pues esta práctica facilitará en gran medida a la empresa supervisora la entrega, al final de la obra, de registros de procedimientos, así como la información referente a la calidad y su evolución durante la ejecución de los trabajos, tanto respecto a los materiales individuales utilizados como al pavimento ya terminado. Esto último es muy importante de manera sistemática se debe procurar que de preferencia la empresa de supervisión realice una evaluación, al final de cada obra, sobre características tales como superficie terminada lograda en cuanto a macrotextura del pavimento (resistencia al deslizamiento), rugosidad (índice de perfil), etc., todo ello realizado a zonas y medidas cuantificables (cadenamientos y regiones típicas) y que se puedan evaluar de manera rutinaria. Esta práctica permitirá que las evaluaciones futuras sean confiables, tomando siempre como referencia una primera evaluación del tramo a su término, antes de abrirlo al tránsito público.

El objetivo principal de esta parte se refiere a una serie de prácticas comunes que se recomiendan para los aspectos antes delineados. Por las características de esta publicación, no se pretende presentar una secuencia detallada de las prácticas constructivas en todas las fases

del proyecto, sino más bien subrayar los aspectos primordiales en que se debe poner especial cuidado. En algunas cláusulas sólo se bosquejan los componentes más relevantes de cada secuencia, pues se considera que los detalles pueden consultarse en las referencias recomendadas o en la literatura especializada correspondiente al tema. Los más relevantes se consignan al final de cada capítulo.

Como comentario general, debe decirse que, si bien en la parte de *Proyecto* se tratan aspectos constructivos de los pavimentos rígidos, los cuales de hecho constituyen una plataforma o marco de referencia para proceder a la realización física de las obras, es en esta parte, *Construcción*, donde se señalan los detalles de cada uno de los pasos relativos a la ejecución de las obras. De igual manera, en la parte sobre *Proyecto*, por las características rectoras que éste tiene en cualquier obra, se marca la normatividad aplicable a cada uno de los materiales y procesos; sin embargo, por estar inmersas de manera intrínseca o colateral, aquí se volverá a hacer alusión a ellas, si bien en algunos casos de manera más restringida y coyuntural, atendiendo estrictamente a los contenidos prácticos de los procesos constructivos.

En el capítulo 2 se describen los materiales que se utilizan en la construcción de pavimentos rígidos en su contexto más amplio. Se presentan de manera general los procesos de selección y manejo de los agregados; también se discuten los tipos más comunes de cemento que se emplean en la fabricación del concreto hidráulico para pavimentos, así como los aditivos y el agua. Al final del capítulo se describen los materiales empleados para formar las juntas, así como los productos de curado.

En el capítulo 3 se detalla el equipo mecánico de alto rendimiento que normalmente se emplea en la pavimentación de carreteras con concreto hidráulico. En el capítulo 4 se describen con suficiente detalle los procedimientos constructivos. Se presentan los trabajos preliminares, y una secuencia prácticamente paso a paso del proceso, haciendo hincapié en los aspectos que se consideran críticos.

Finalmente, el capítulo 5 se refiere a los criterios de supervisión y control de calidad aplicables a la construcción de pavimentos rígidos. Se discute la importancia de verificar que las capas inferiores y la misma losa se ejecuten de acuerdo con lo dispuesto en el proyecto. Se dan las pautas sobre aquello en que la empresa supervisora debe enfocar su atención: fabricación y tendido de las mezclas, su control de calidad, y la observancia de que las labores de acabado y texturizado se adecuen a lo estipulado en planos y

especificaciones. Se describen, asimismo, los criterios de adaptación basados en los índices de perfil, como un parámetro para medir los niveles de servicio iniciales de las obras. Al final se consignan los requisitos mínimos que debe cumplir un archivo con toda la información relevante de la obra en su condición final.

Por considerarlos de ayuda y de complemento, pero también con el objeto de aligerar la lectura del texto principal de los capítulos, al final se presentan tres apéndices relacionados con algunos temas tratados en los cinco capítulos que componen esta parte. El primero o Apéndice A trata sobre equipos complementarios para la producción de agregados. En el Apéndice B se proporciona información básica sobre la composición y

tipología de los cementos, en particular los empleados en proyectos de pavimentación. Por considerarlo de interés, se presenta también una tabla, tomada de la norma NMX-PNMX-414-1998-ONNCCE, que es la propuesta de clasificación de cementos a esta fecha. En este apéndice también se incluyen descripciones de algunos de los aditivos que pueden resultar de interés para el lector. Al final se expone la secuencia, paso a paso, de una metodología de dosificación y diseño de mezclas.

Algunas de las operaciones de detalle del perfilógrafo se mencionan en el tercer y último Apéndice C. Allí se describe tanto la operación como la calibración, el manejo, la captura y el procesamiento de datos de campo en gabinete para llegar a la determinación de la rugosidad a partir del Índice de Perfil en un tramo dado.

CAPÍTULO 2

MATERIALES

En este capítulo se presenta cada uno de los constituyentes del concreto hidráulico, describiendo sus propiedades y su papel dentro del conjunto, así como el impacto que cada uno tiene en el comportamiento del concreto en sus diferentes edades.

Por ser de interés para el encargado de la construcción de pavimentos rígidos, en este capítulo se tratan las actividades más usuales en los procesos de producción de agregados. Por otro lado, en el Apéndice A se proporciona la metodología de producción y tratamiento de arenas, sobre todo.

Para contribuir a mejorar y modificar el comportamiento de los concretos en situaciones especiales, se juzga conveniente tratar el tema de los aditivos, así como proporcionar una explicación más detallada sobre estos últimos y el cemento, en el Apéndice B. En la parte final de

este capítulo, el lector encontrará una descripción de los materiales asociados a un pavimento rígido, tales como pasajuntas, materiales de sello y de curado, etcétera.

En la figura 2.1 se presentan de manera esquemática los porcentajes representativos de cada uno de los constituyentes de las mezclas. En ella se aprecia la importancia que se debe asignar al estudio y comprensión de cada uno de los componentes. En los incisos que siguen se discuten de manera más amplia los procedimientos mínimos requeridos para la explotación, el manejo, la fabricación y el almacenamiento que requieren los componentes básicos de los concretos hidráulicos en lo general, enfocando siempre la atención en las particularidades que ofrece la pavimentación con concreto hidráulico.

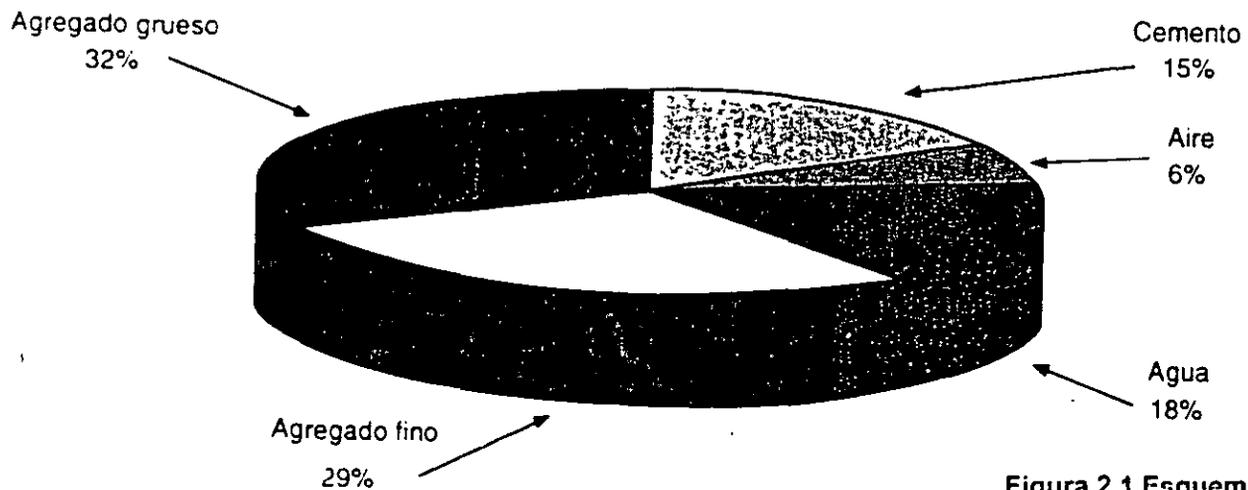


Figura 2.1 Esquema de la composición proporcional en volumen del concreto hidráulico (Ilustrativo).

2.1 SELECCIÓN Y EXPLOTACIÓN DE BANCOS

La selección de un banco de explotación es uno de los primeros retos que se deben resolver satisfactoriamente en cualquier proyecto de pavimentación. En esta etapa de una obra en proyecto no basta calificar a un material como aceptable o aun bueno, que cumpla con los requisitos de calidad establecidos en el proyecto sino que debe ubicarse en sitios accesibles, lo más cercanos que se pueda a las futuras plantas de producción o de tratamiento adicional, según sea el caso. Por otro lado, su selección viene supeditada a lo bien que se puedan extraer los materiales, esto es, que no se destruyan sus características físico-mecánicas durante los procesos de explotación, además de que, una vez extraídos, sea posible obtener de ellos formas de partículas aceptables. Una tercera consideración tiene que ver con las mínimas distancias de acarreo de los materiales a la obra, pues este aspecto es de los de mayor influencia en el costo total de producción. Todo este conjunto de consideraciones está encaminado a obtener materiales sanos, de buena calidad, y a un costo razonable.

En lo que respecta a la calidad, que es el primer condicionante que se menciona en el párrafo anterior, cabe detenerse un poco. Si bien dos bancos puedan tener características diferentes, el tratamiento que se les da y la subsiguiente calidad resultante pueden ser la gran diferencia en el momento de decidir cuál emplear para un proyecto específico. Con este criterio, no necesariamente se debe desechar el banco de calidad aparentemente inferior, pues quizás con un tratamiento adecuado en su producción resulte de mejores características físicas y geométricas en comparación con un material inicialmente sano pero con deficiencias intrínsecas en el proceso de su producción masiva para el proyecto de pavimentos.

Todo este conjunto de consideraciones debe balancearse para adoptar un criterio compensador en la etapa de la selección de los bancos, apoyándose en las necesidades y características particulares de la obra en cuestión.

Antes de proceder a la explotación de un banco o fuente de suministro en general, se deberá estudiar su capacidad o la potencialidad del banco, así como realizar una evaluación de su calidad.

Normalmente, en las etapas previas a la evaluación se puede recurrir a cartas geológicas y a un reconocimiento de los depósitos superficiales. Sin embargo, dada la gran variabilidad estratigráfica que frecuentemente se encuentra en la naturaleza, es necesario llevar a cabo estudios de detalle para caracterizar el subsuelo.

La investigación inicial de los bancos se puede hacer por fotointerpretación o con métodos directos e indirectos de reconocimiento. Dentro de estos últimos, como ya se ha mencionado, se incluyen los de prospección geofísica.

Los bancos de cualquier tipo, sean para terracerías, subbase o para la producción del concreto hidráulico, conviene seleccionarlos lo más cercanos que se pueda al sitio de la obra. La distancia debe equilibrar los costos de acarreo, de despalle y de preparación, y comúnmente se acepta que la distancia entre bancos y la obra no sea mayor de 5 km. En el caso de materiales para subbase, se busca adicionalmente que no haya demasiada variación longitudinal en su composición, para que el comportamiento del pavimento sea lo más uniforme posible. Es por ello que la separación entre bancos puede incrementarse idóneamente hasta 10 kilómetros.

Una buena práctica de evaluación es la de ejecutar estudios geofísicos (sísmicos o eléctricos). Con estas metodologías de exploración de bajo costo es posible establecer algunas características cuantitativas de depósitos potencialmente útiles. Otra de las ventajas adicionales de estas metodologías es que permiten conocer en grandes extensiones las principales características geológicas de los sedimentos probablemente explotables, así como discontinuidades importantes de los depósitos de suelo o roca, en caso de existir. Sin embargo, solo con la extracción de muestras mediante sondeos exploratorios de tipo directo es posible conocer de manera cuantitativa las propiedades geológicas y geotécnicas en lo general, pues el ensayo de las muestras en laboratorio permite medir con precisión la potencialidad de uso de las diferentes capas que componen el pavimento.

En macizos rocosos, el número de sondeos profundos debe ser mayor cuanto más heterogénea y fracturada sea la roca. Esta medida se justifica por la presencia tan alta de material arcilloso que con frecuencia rellena las aberturas entre los bloques de roca. Por otro lado, la obtención de muestras representativas de los depósitos que componen el banco o fuente de suministro en estudio hará posible.

- Definir la importancia, naturaleza y características geológicas del yacimiento. Estas características definen las condiciones de explotación y tratamiento.
- Determinar la calidad de los materiales y, por ende, su valor en el mercado.

Los bancos para la capa de subbase es común encontrarlos en márgenes de ríos, playones y frentes

rocosos, serranías elevadas de pendientes abruptas, etcétera

2.1.1 Extracción de roca a cielo abierto

Antes de iniciar los trabajos de extracción, se deberá despallar el yacimiento que se va explotar. El despalle consiste en la remoción de la capa superficial del terreno natural, que por sus características no es adecuada o aprovechable para la construcción de una obra. La actividad se debe realizar de manera que siempre el material de despalle este separado, a una distancia del orden de 10 m, con objeto de que no se presenten contaminaciones entre tierra vegetal o material de relleno y el producto que se ha de extraer, esta separación también permite la colocación y el funcionamiento de la maquinaria de extracción. En general, cuando el material es blando, el despalle se puede ejecutar mediante el empleo de equipo mecánico. Sin embargo, cuando el material superficial es rocoso y no es aprovechable aun si está intemperizado, se puede recurrir al uso de explosivos.

Las labores de limpieza se logran con equipos tales como motoescrapas, excavadoras y cargadores frontales.

Todo banco de materiales deberá contar con zonas de descarga del material de despalle, situadas a la distancia mínima del lugar de los recortes, lo suficientemente cerca para que el manejo de materiales de desperdicio no implique grandes movilizaciones del material transportado al sitio de su descarga. La remoción se puede hacer mediante motoescrapas, previa preparación del sitio utilizando cargadores frontales y motoconformadoras, también se realiza, quizá de manera más frecuente, empleando camiones de volteo cargados con palas y/o excavadoras.

Un frente de ataque en un banco incluye:

- └ Frente con uno o vanos escalones. El número de escalones es función del emplazamiento del material por extraer, la naturaleza del terreno, la altura del banco y, finalmente, del tipo y proceso de extracción que se vaya a emplear.
- └ Terraza por escalón, de geometría tal que permita la maniobra de las máquinas para voladuras, el equipo para la carga en el frente y aquel que corresponde para realizar la remoción de desperdicios.
- └ En el caso de laderas, la apertura de la cantera o frente de explotación lleva consigo la formación de un terraplén natural donde se puedan realizar las maniobras de explotación y de remoción de desperdicios. Por otro lado, cuando se trata de

terrenos planos, los frentes se realizan en profundidad, esto es, por medio de terrazas, teniendo siempre la previsión de colocar dispositivos para el achicamiento de aguas provenientes de arroyos, sumideros, drenajes, etcétera.

2.1.2 Extracción de cantos rodados

Normalmente, los depósitos de cantos rodados se encuentran parte en agua y parte en seco, debido a variaciones que se presentan en las corrientes de agua. Los depósitos de grava, no requieren despalle cuando se encuentran en corrientes rápidas. Por el contrario, cuando se localizan en aguas muy tranquilas, es probable que se formen cubiertas que sea necesario despallar antes de proceder a la extracción propiamente dicha. Tal es el caso también de las graveras, donde se tienen que hacer labores de limpieza antes de iniciar su explotación.

En presencia de agua, es común encontrar materiales inertes que es necesario remover por medio de equipos especializados para tal propósito: excavadoras equipadas con dragas, excavadora con cangilones, draga flotante de cangilones, draga de garfios, draga de cuchara escanficadora, draga sobre cable, draga de mastil móvil, draga de succión, etc. La descripción de estos equipos está fuera de los alcances de esta publicación, por lo que se sugiere su estudio en la literatura correspondiente.

2.1.3 Explotación en gravera

El despalle constituye un caso particular del correspondiente a una cantera de roca, y se utilizan los mismos equipos: motoescrapas, cargadores frontales, palas con equipo de empuje o retroexcavadoras de cangilones. Además, cuando la naturaleza de los materiales inertes que se han de remover lo permite, se pueden utilizar dragas, excavadora con cucharas escanficadoras, draga sobre cable, draga de poste móvil y la de rodete de cangilones para extracción y recolección del material.

2.1.4 Extracción con explosivos

Salvo que se trate de materiales excesivamente blandos, sueltos y sin cementante, en cuyo caso la extracción podrá ejecutarse por la vía mecánica, en la gran mayoría de los trabajos en los que se requieran materiales competentes se utilizarán explosivos como herramienta de extracción.

La finalidad de los explosivos es fragmentar las masas de roca para obtener tamaños que puedan ser manejados por las trituradoras primarias.

Con objeto de entender el comportamiento de las rocas ante explosivos, a continuación se describen algunas de ellas y se mencionan los minerales que las forman

Los principales componentes de las rocas más comunes son.

Cuarzo	Silice (SiO ₂)
Calcita	Carbonato de calcio (CaCO ₃)
Felcspato	Silicato de alúmina y de un metal alcalino [ejemplo. ortoclasa (K ₂ O), (Al ₂ O ₃), (6SiO ₂)]
Mica	Silicoaluminato de potasio
Piroxeno	Silicato de calcio, magnesio y hierro

Algunas rocas contienen además

Arcilla	Silicato hidratado de alúmina [ejemplo. kaolinita (Al ₂ O ₃), (2H ₂ O), (2SiO ₂)]
---------	---

La estructura que pueden presentar las rocas es variada, pudiéndose citar la compacta, vesicular, esponjosa, cavernosa brechiforme, cristalina, vítrea, hojeada, esquistosa etc. Por otro lado, atendiendo al tipo de fracturas que presentan en análisis microscópico, estas últimas pueden ser planas, onduladas, angulosas, rugosas conchoicales lisas, granulares, etcetera

Dentro de las propiedades físico-mecánicas más relevantes que definen a los agregados están peso volumétrico, peso específico, densidad aparente, porosidad, resistencia al desgaste, dureza, grado de abrasividad, resistencia al impacto o tenacidad y resistencias a la tensión, al intemperismo a la compresión y al corte. También se califica su homogeneidad

La manera como se fractura una roca depende de sus características mecánicas y de su composición mineralógica. Así, por ejemplo, las rocas vitrificadas son relativamente frágiles, y aún más si cuentan con formas irregulares y planos de fisuramiento, mientras que las de alto contenido de sílice son bastante duras.

Puesto que no existe un equipo universal que proporcione las granulometrías demandadas para las obras de ingeniería, es necesario realizar trituraciones secuenciales y progresivas, utilizando los equipos descritos en la figura 2.2.

Previo a la selección del equipo para un trabajo en particular, se deben tener en cuenta las características de la materia prima por triturar, y realizar un análisis integral de las cantidades de agregado que se proyectan explotar y de la potencialidad del banco. Esto último tiene que ver sobre todo con el tipo de equipo: estacionario o móvil. En la figura 2.3 se presenta un aspecto de una planta de trituración móvil típica.

2.1.5 Trituración primaria

Para el caso de plantas móviles, que son las más comúnmente aplicables a proyectos carreteros, se asigna el nombre de planta móvil de trituración primaria al proceso por medio del cual se hace una primera reducción del material en greña, proveniente del banco. Para definir el campo de aplicación de cada uno de los diferentes equipos, así como el comportamiento para un caso específico, se pueden utilizar dos parámetros de utilidad: el índice de reducción y el coeficiente de forma.

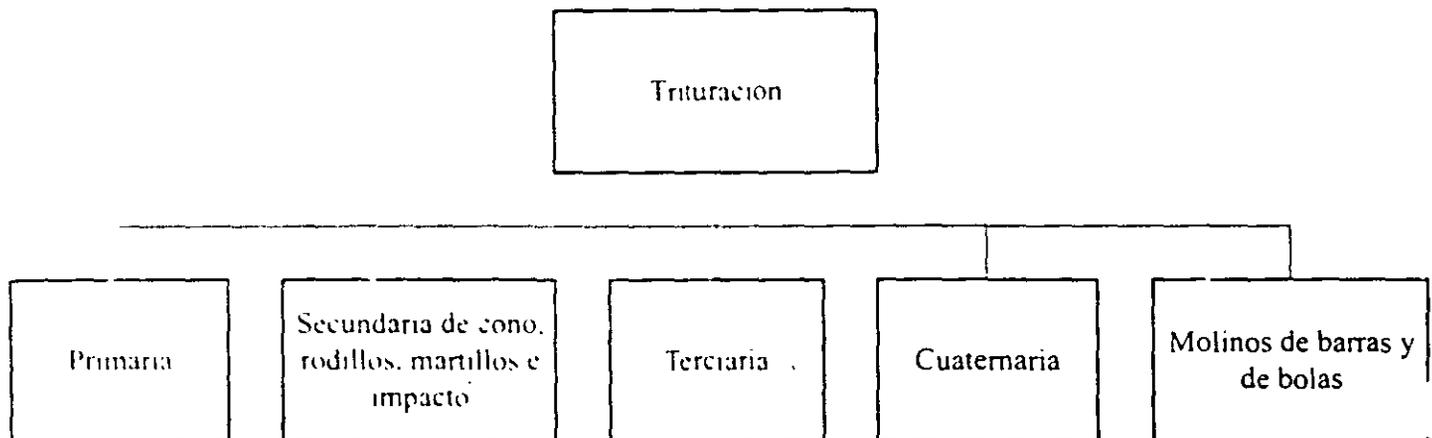
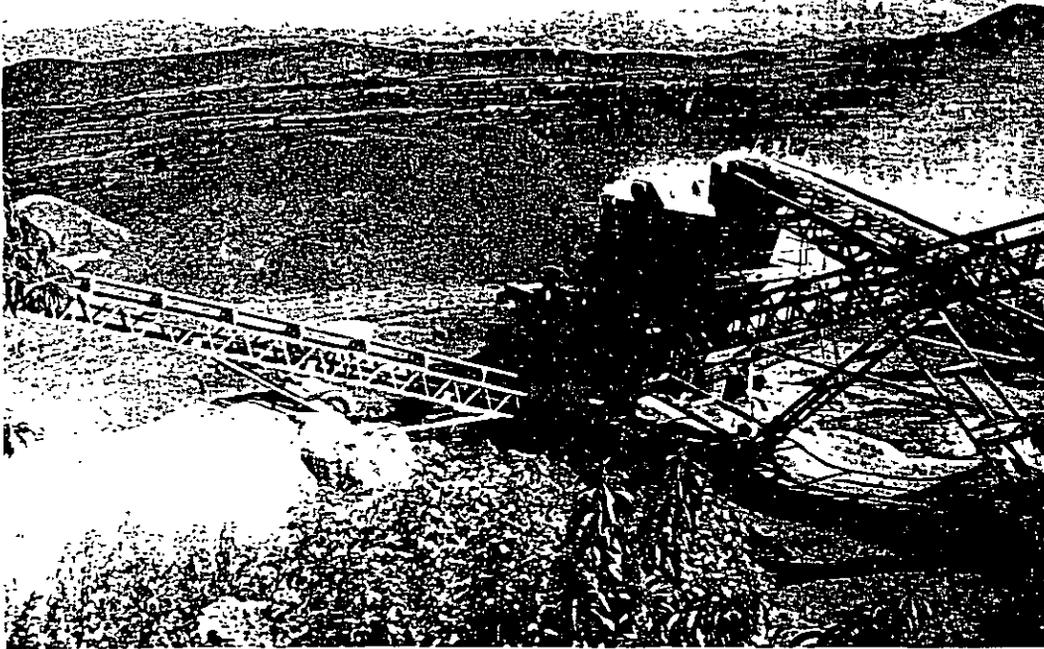


Figura 2.2 Etapas de trituración.

Figura 2.3 Planta móvil de trituración.



2.1.5.1 Índice de reducción

Este concepto se ilustra en la figura 2.4, en donde I_r es el índice de reducción de la máquina de trituración, D es el tamaño de la roca a la entrada de la máquina, y d el tamaño del producto de trituración a la salida. El valor de I_r es característico de cada tipo de trituradora, según sus mecanismos de trabajo y los de su construcción. Se expresa como relación, 30:1 por ejemplo

2.1.5.2 Coeficiente de forma

Este coeficiente proporciona una idea cuantitativa de la

regularidad del producto saliente de una trituradora, atendiendo a las características de la roca y del equipo de trituración. Sea L la dimensión mayor del fragmento, v el volumen del fragmento y V el volumen de una esfera equivalente de diámetro L (figura 2.5).

En la tabla 2.1 se presentan a manera de ejemplo algunos valores para formas comunes de fragmentos.

En general, se deben evitar las dos últimas formas enumeradas en la tabla 2.1, pues no son aptas para la construcción, tanto en obras de tierra como en la fabricación de concretos hidráulicos y asfálticos.

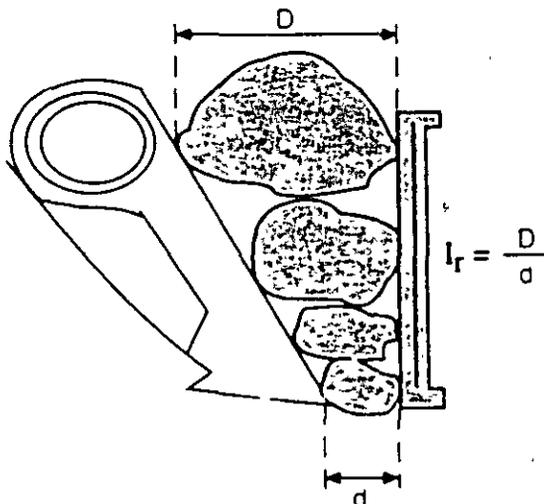
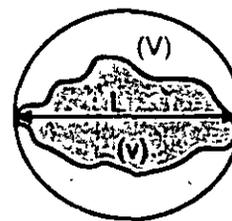


Figura 2.4 Definición del concepto de índice de reducción (I_r).



$$C_f = \frac{v}{V} = \frac{v}{\pi \frac{L^3}{6}} = \frac{6v}{\pi L^3}$$

Figura 2.5 Coeficiente de forma (C_f).

Tabla 2.1 Valores representativos del coeficiente de forma

Forma del fragmento	Valor del coeficiente de forma
Esférica	1
Cúbica	$\frac{2}{\pi \sqrt{3}} = 0.37$
Tetraedro regular	$\frac{1}{\pi \sqrt{2}} = 0.22$
Canto rodado	0.34
Grava triturada	0.22
Lajas	0.07
Agujas	0.01

A pesar de que las técnicas modernas de extracción mediante el empleo de explosivos se encuentran muy desarrolladas, lo mismo que las técnicas de perforación y los equipos de carga, es común que la acción demoledora de los explosivos no alcance a algunos fragmentos o bloques, ello hace que permanezcan fragmentos grandes sin trituración y sean necesarias perforaciones secundarias o fragmentación adicional, lo que puede poner en riesgo la economía de las producciones. Es por este tipo de consideraciones que se hacen necesarias quebradoras primarias con bocas de admisión lo suficientemente grandes para aceptar directamente los bloques mayores. Así pues, las dimensiones de la referida boca serán función de tamaño de tales bloques.

Las tolvas de recepción están formadas por planchas de acero lo suficientemente rígidas para soportar los impactos de los fragmentos. La capacidad de estas tolvas se debe calcular de manera que, teniendo en cuenta las capacidades de los medios de transporte, la alimentación al equipo de trituración primaria sea regular y continua. Las tolvas deben contar con parrillas de tamizado las cuales retienen los fragmentos de roca con tamaños mayores a las bocas de admisión de la trituradora primaria. Estas parrillas constan de barras de acero paralelas y entrecruzadas con otras barras.

Los bloques de rechazo se retiran y se realiza el "moneo" (trituración adicional o secundaria mediante inserción de explosivos desde el exterior). Esto último también se puede efectuar dentro de la tolva, si es que esta cuenta con escudos protectores adicionales.

En los casos en que los fragmentos de roca contengan inclusiones de material cohesivo, se procederá a dejarlos caer desde una cierta altura directamente sobre el emparrillado, con la finalidad de que el material fino se suelte, y posteriormente sea más fácil eliminar las partículas deleznable del material sano.

2.1.5.3 Quebradora de quijada

En la actualidad, la de togle simple con excéntrica superior es el equipo más utilizado para la trituración primaria, tanto en equipos móviles como en instalaciones fijas. Las del tipo móvil, empleadas para obras de infraestructura carretera, son las más populares, ya que su equipo mecánico es bastante sencillo, portátil, utilizándose con dimensiones que van desde 30.5 x 91.4 cm (12"x36") hasta 1.07x1.22 m (42"x48"), con pesos desde 5.3 t hasta 48 t, y producciones comprendidas entre 16 y 840 t/h, de acuerdo con el tamaño de la máquina, la abertura de salida y el origen geológico de los materiales que se van a procesar. Las quebradoras de quijada pueden alcanzar un índice de reducción promedio de 8:1.

Otras quebradoras de quijada, tales como la Blake (para materiales extremadamente duros), así como las quebradoras giratorias, son de poco uso para obras de ingeniería civil, dadas sus características de producción y su costo.

2.1.6 Trituración secundaria, terciaria y cuaternaria

La evolución de los equipos de trituración ha permitido el empleo de diferentes técnicas para reducir los tamaños, de manera ordenada y cumpliendo con las clasificaciones, a partir de una primera etapa, a saber, la trituración primaria. Para lograr la reducción de tamaño se utilizan las trituradoras de rodillos, los de impacto y las de cono.

2.1.6.1 Trituradoras de rodillos

Su uso se aconseja en materiales relativamente blandos, como son algunas calizas, carbón, yeso, fosfato, etc. Ello se debe más que nada a que, si se emplean en trituración de rocas más duras, por ejemplo las silíceas, éstas inducirán surcos en las superficies cilíndricas. Además, otras de sus limitaciones son:

- el diámetro de los rodillos debe ser mayor de 20 a 30 veces al tamaño de los fragmentos, con el fin de que pueda sujetarlos y triturarlos;
- el volumen producido es función del ancho de los rodillos; sin embargo, el desgaste es muy irregular, tendiendo a presentarse más hacia la parte central; y
- los índices de reducción son relativamente modestos, pues alcanzan valores máximos de 3:1, debido a las limitaciones que se tienen en los tamaños de alimentación.

Los coeficientes de forma que se obtienen con este tipo de equipo son relativamente bajos, y en algunas rocas incluso tiende a producir lascas.

2.1.6.2 Trituradoras de impacto o de martillo

Estas trituradoras, sean de impacto o de martillo, utilizan el mismo principio mecánico: degradar los fragmentos mediante fuertes impactos contra las placas de acero de que consta el bastidor de fragmentación, impulsadas por rotores que giran a un número considerable de revoluciones por minuto. En la figura 2.6 se presenta un esquema ilustrativo.

Con este equipo se pueden lograr coeficientes de forma muy altos, además, se obtienen índices de reducción también considerables, hasta de 30:1. Sin embargo, estas máquinas no se recomiendan para el tratamiento de materiales con más de 6 por ciento de contenido de sílice, pues estos tienden a producir demasiada abrasión y el costo de su mantenimiento puede incrementarse. Por lo tanto, se aconseja el empleo de este equipo sólo en calizas blandas, dolomitas, yesos, etcétera.

Las ventajas que ofrece son:

- Índice de reducción muy elevado (20:1 y ocasionalmente hasta 30:1)

- Producciones altas
- Obtención de buenas formas de partículas (cubicidad) a la salida
- Mecánica simple

2.1.6.3 Trituradora de cono

Si bien en el pasado se pensaba que la operación de este equipo resultaba onerosa, debido a que supone equipamiento mecánico más preciso que las de quijada o de rodillos y que su manejo es más especializado, en la práctica se ha demostrado que su costo de operación es equivalente al resto de los equipos de trituración antes descritos. Algunas de las ventajas de las trituradoras de cono son:

- Producciones considerables, con altos índices de reducción, hasta de 10:1.
- El desgaste de sus elementos dentro de la cámara de trituración es uniforme, utilizando de manera conveniente los elementos de impacto y compresión. Todo ello hace que, aun para buenos coeficientes de forma, el desgaste de las piezas interiores sea razonable.
- Protección contra fragmentos no triturables (como pueden ser dientes de cucharón de cargador, cabezas de marro u otros de origen externo), mediante un sistema de resortes situados en la periferia de su bastidor.
- Dimensiones compactas que hacen sencilla su instalación en grupos móviles de trituración.
- Costos de mantenimiento muy bajos, por la duración de sus elementos sujetos a desgaste.

En la figura 2.7 se bosqueja el diagrama de trituración y un ejemplo numérico de volumen de producción, utilizando trituradoras de cono secundaria y terciaria.

Estas trituradoras se fabrican para atender las necesidades específicas de trituración: secundarias, terciarias y cuaternarias de reducción. Así, aun cuando su cnasis exterior puede resultar similar, sus cámaras de trituración interiores se reducen o amplían atendiendo a las granulometrías deseadas. En la actualidad, son comunes las de tamaño de 121.9 cm y 167.6 cm (48" y 66"), de peso igual a 22 y 42 t, respectivamente. A ellas les corresponden rendimientos nominales de 170 t/h de material de 1½", y de 275 t/h de material para capa de base, respectivamente.

Lo comentado en párrafos anteriores para las trituraciones secundaria y terciaria se puede esquematizar en la tabla 2.2.

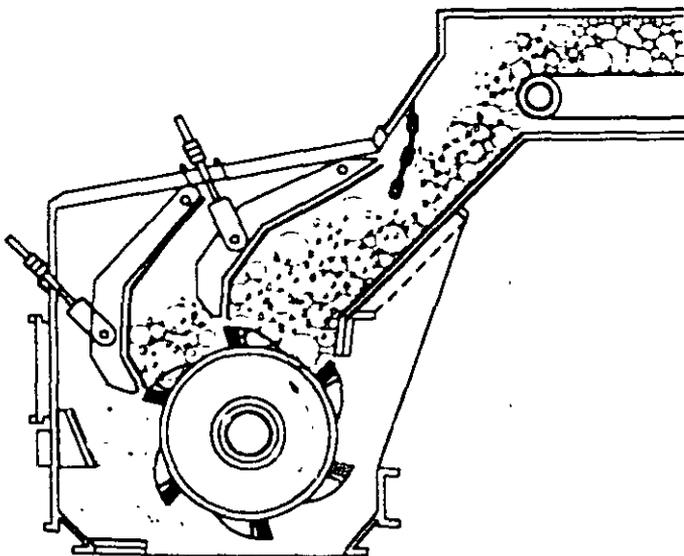


Figura 2.6 Trituradora de impacto.

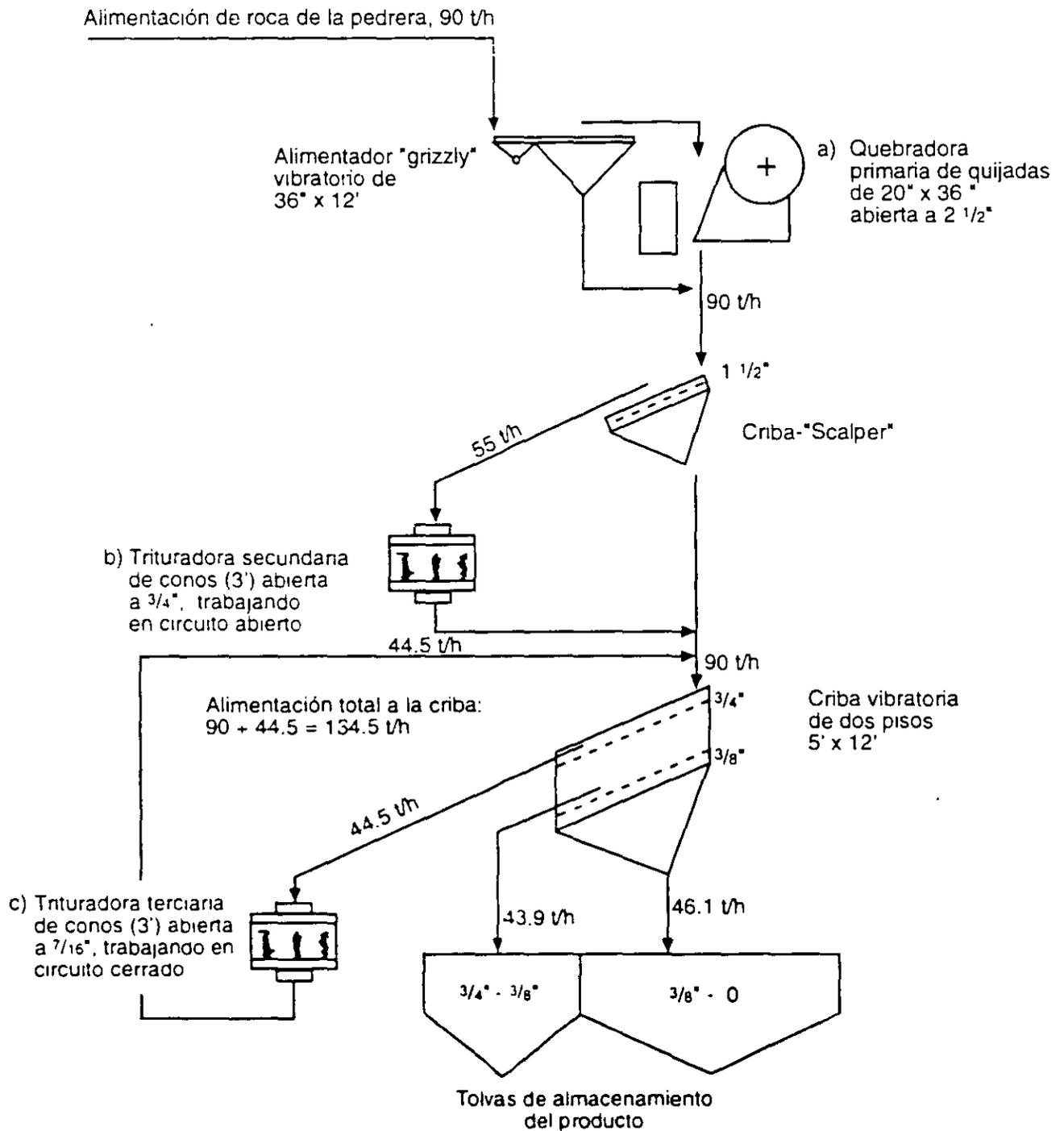


Figura 2.7 Diagrama de trituración.

Tabla 2.2 Características de trituración de los equipos

Tipo de trituradora	Índice de reducción	Coefficiente de forma del producto	Grado de abrasividad recomendado de la roca	Consumo específico de energía
Rodillos	Bajo 3:1	Bajo muchas lajas (0.01-0.07)	Poco abrasiva	Normal
Martillos e impacto	Muy alto	Muy bueno (0.37-1.0)	No abrasiva	Muy alto
Conos	Alto 10:1	Buena (0.22-0.3)	Todo tipo de rocas	Normal

En el Anexo A se presentan algunas capacidades de producción para las trituradoras de cono, así como análisis granulométricos aplicables a diferentes aberturas de salida para distintos modelos de trituradoras de quijada. También en ese anexo se presentan algunos equipos complementarios para la producción de agregados, en especial de arenas.

2.1.6.4 Cribado

Los equipos de trituración normalmente tienen incluido un proceso de separación por tamaños, pero normalmente se tiene un cribado secundario que permite garantizar un mayor control sobre la distribución de los tamaños. Por otra parte, el cribado es parte principal del proceso en los casos naturales de gravas y arenas, ya que en ellos es tal vez el único proceso de control que se lleva. El cribado consiste simplemente en permitir al material correr a través de una disposición de tamices para ir separando los fragmentos por tamaños o rangos de tamaños. Las cribas pueden ser marcos sobre los que se montan desde rejillas hasta mallas de acero, variando sus aberturas y grosores conforme disminuye el tamaño del material por cribar, también existen cribas de plástico y de acero recubierto con PVC que tienen más bajo mantenimiento y mayor durabilidad.

En el proceso de cribado es importante el ángulo en el que se montan las mallas para que el material no corra demasiado rápido ni tenga la tendencia a quedarse pegado para distintos grados de humedad del material. Es de gran importancia revisar el estado de las cribas para asegurar que conservan su retícula y que no se han formado adherencias que disminuyen su eficacia. Esto es primordial sobre todo en época de lluvias.

2.1.7 Acarreo y almacenamiento

El acarreo y manejo de los agregados debe realizarse mediante prácticas tales que se eviten al máximo las contaminaciones con sustancias deletereas de diferente índole, así como segregaciones.

Una de las formas económicas para acomodar los materiales dentro de los patios de producción es mediante la formación de pilas o montículos, en capas delgadas uniformes con camiones de volteo. La recuperación de los materiales se hace con cargadores frontales, tratando de que el cucharón siempre actúe desde la periferia inferior, avanzando y retirando material hacia la parte superior de la pila de almacenamiento; con esta práctica se pretende obtener los tamaños representativos de cada uno de los tendidos.

En ocasiones, los tendidos y acomodados en plantas de almacenamiento se pueden realizar con cucharones de quijadas. Cuando los materiales no son muy degradables, esto es, cuando son relativamente duros, entonces se pueden tender con tractores neumáticos, y se pueden recuperar con cargadores frontales. Ello se consigue empleando capas muy delgadas, minimizando así el fenómeno de segregación. Aun cuando se utilice equipo de transporte y acomodo como cargador de cangilones, cucharones de quijada o camiones, el acomodo deberá ser tal que no se formen montículos cónicos muy altos. Incluso cuando se empleen pilas cónicas, siempre es aconsejable, en el momento de recuperar el material, avanzar con la remoción de este último en movimientos continuos en la periferia, evitando atacar en línea recta en una misma pila.

En general, los materiales gruesos triturados se segregan menos que los del tipo natural, por la naturaleza redondeada de estos últimos. Igualmente, la segregación ocurre más frecuentemente en el caso de que los granos presenten mayor tamaño, esto es, en las gravas. Para minimizar este efecto, resulta aconsejable que los materiales se depositen en pilas siguiendo el criterio de tamaños, para que las diferentes fracciones se almacenen por separado. Así, al momento de dosificarlos, habrá más control durante su manejo. Otra medida contra la segregación es la utilización de mamparas o divisores. Estos últimos elementos deben ser lo suficientemente altos para evitar el entremezclado de los diferentes montículos o pilas.

De preferencia, las pilas deben estar claramente separadas con espacios suficientes entre sí. Cada montículo de agregado se debe emplear hasta que se acabe. Por otro lado, siempre resultará mejor la medición de los diferentes tamaños por separado, en lugar de la práctica que en ocasiones se emplea, esto es, la mezcla con cucharones o con cargadores frontales de dos diferentes tipos de materiales.

Cuando la altura de caída de las gravas para formar las pilas sea excesiva, se debe procurar colocar pantallas o deflectores que minimicen los impactos entre partículas. Con esta medida se pretende minimizar la rotura de granos.

El agregado que ha sido lavado para retirarle contaminaciones de polvo debe siempre dejarse drenar lo suficiente, hasta que su contenido de agua se vuelva uniforme.

En la tabla 2.3 se presentan los 13 tamices que se establecen en la norma ASTM C 33 para los agregados gruesos.

2.2 AGREGADO GRUESO (GRAVA)

La decisión de seleccionar agregados de buena calidad, acordes con las características demandadas en el concreto en estado fresco o endurecido, se establece en función de los porcentajes, en volumen, que ocupan los componentes del concreto. En términos generales, el conjunto de agregados, finos y gruesos, ocupa de 60 a 75 por ciento, mientras que en peso representa de 70 a 85 por ciento.

Los agregados gruesos están formados por gravas o por una combinación de grava y material triturado, cuyo tamaño de partículas sea predominantemente mayor de 5 mm, generalmente entre 9.5 y 38 mm. La grava se obtiene en ocasiones de depósitos naturales, conocidos como bancos de explotación o minas; este material se puede utilizar en el concreto con tratamientos mínimos. Tal es el caso de las gravas obtenidas por excavación o dragado de bancos de materiales —minas—, ríos o lagos. El agregado grueso triturado se obtiene mediante el triturado de roca de cantera, piedra bola, guijarros o boleos de gran tamaño.

El material grueso se gradúa comúnmente desde la mina o banco de extracción. Sin embargo, tal como se verá más adelante, algunas de las propiedades de las gravas de depósitos naturales pueden variar —es el caso de la absorción, la granulometría, el peso volumétrico, etc.—, lo cual obedece a variaciones en los diferentes depósitos geológicos que se puedan encontrar en una misma mina de explotación. Por ello, es práctica recomendable no limitar los muestreos solo a los sitios de extracción, sino

también hacerlo en los patios de almacenamiento de agregados, donde se localizan las plantas de mezclado.

En general, todo tipo de agregado debe cumplir ciertos requisitos básicos para su empleo: deben ser partículas duras, limpias, resistentes y libres de sustancias químicas absorbidas, así como libres de recubrimientos de materiales plásticos tales como arcilla o algunos limos, que inhiban la total adherencia con la pasta del cemento y la hidratación natural del cemento. Se tratarán de evitar partículas que sean deleznableles o susceptibles de resquebrajarse. También se deben evitar partículas con alto contenido de lutita, y partículas blandas y porosas que provengan de horsteno, pues esta última roca es particularmente débil ante agentes de intemperismo.

2.3 AGREGADO FINO (ARENA)

2.3.1 Selección y explotación de bancos

En general, la exploración de sitios que se pretendan explotar debe cumplir los siguientes objetivos:

- determinar la naturaleza del depósito, geología, historia de explotaciones previas, escurrimientos de agua superficial, etc.;
- establecer la profundidad, espesor, extensión y composición de la estratigrafía del suelo o roca de posible explotación;
- conocer las variaciones del nivel de aguas freáticas, en caso de existir; y

Tabla 2.3 Requisitos granulométricos para agregados gruesos (ASTM C 33)

Tamaño nominal (mallas con aberturas cuadradas), mm	Cantidades que pasan cada malla de laboratorio (aberturas cuadradas), porcentaje en peso												
	100 mm (4")	90 mm (3 5/8")	75 mm (3")	63 mm (2 5/8")	50 mm (2")	37.5 mm (1 5/8")	25.0 mm (1")	19.0 mm (3/4")	12.5 mm (1/2")	9.5 mm (3/8")	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)
90-37.5	100	90-100	-	25-60	-	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
63-37.5	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
50-25.0	-	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-
50-4.75	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	-	0-5	-	-
37.5-19.0	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-	-
37.5-4.75	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	0-5	-	-
25.0-12.5	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-10	0-5	-	-	-
25.0-9.5	-	-	-	-	-	100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5	-	-
25.0-4.75	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5	-
19.0-9.5	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	0-5	-	-
19.0-4.75	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	25-55	0-10	0-5	-
12.5-4.75	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5	-
9.5-2.36	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85-100	10-30	0-10	0-5

- recopilar toda la información relativa al uso previo que se les haya dado a los suelos y rocas, incluyendo sus propiedades.

La exploración y muestreo de los materiales debe incluir las siguientes etapas

- *Reconocimiento preliminar.* De preferencia, se debe contar con un estudio geológico
- *Exploración preliminar.* En esta etapa, se pueden utilizar herramientas sencillas para determinar la posible calidad de la roca o suelo, así como la posición del nivel de aguas freáticas. Con esta evaluación preliminar se estará en condiciones de decidir si vale la pena o no continuar con una investigación definitiva
- *Exploración definitiva.* Mediante perforaciones y ensayos de laboratorio, en este paso se definen las propiedades físico-mecánicas de los materiales

En la tabla 2.4 se muestran en general las principales pruebas de laboratorio que se requieren para calificar la calidad de los materiales para una carretera con pavimento de concreto hidráulico, entre ellos el propio concreto

El detalle y los procedimientos de ejecución están fuera del alcance de este trabajo. Sin embargo, los especímenes se deben ensayar de acuerdo con las normas mexicanas NMX y las ASTM aplicables

Siempre que resulte posible, cada proyecto deberá contar con varios sitios estudiados, pues se acostumbra tener

Tabla 2.4 Ensayos de laboratorio para determinar la calidad de materiales

Terracerías	Clasificación: Límites de consistencia, granulometría Calidad: Peso volumétrico máximo, en ocasiones, valor relativo de soporte (CBR), expansión
Capa subrasante	Clasificación: Límites de consistencia, granulometría Calidad: Peso volumétrico máximo, valor relativo de soporte, expansión, equivalente de arena Diseño: obtención del CBR de acuerdo con el Cuerpo de Ingenieros, EJA, pruebas Hveem, módulo de resiliencia
Base y subbase	Clasificación: Límites de consistencia, granulometría Calidad: Peso volumétrico máximo, valor relativo de soporte, expansión, equivalente de arena
Concreto	I. Propiedades físicas de los agregados: Granulometría, peso volumétrico seco, peso volumétrico saturado y superficialmente seco, absorción, tamaño máximo nominal del agregado, módulo de finura, partículas finas (pasa la malla No 200), contenido de materia orgánica, límite líquido, equivalente de arena II. Propiedades físico-químicas: Reactividad potencial, alcali-agregado, partículas ligeras, determinación de partículas de arcilla y de partículas deleznables

El peso de la muestra para ejecutar pruebas varía de 50 a 100 kg

bancos de material alternos para cualquier tipo de contingencia. Por otro lado, el tratamiento de los bancos, una vez que éstos hayan sido abandonados, debe cumplir con lo dispuesto en las normas ecológicas vigentes (Véase la cláusula 5.12, "Limitaciones por características del medio ambiente".)

2.3.2 Procesos de producción

Los suelos y rocas potencialmente explotables provienen en la gran mayoría de los casos de un proceso intenso de meteorización. Este último fue promovido por agrietamientos, las acciones tectónicas que han afectado la matriz originalmente sana de las rocas provocaron masas residuales que son la fuente de los suelos conocidos también como residuales. Estos últimos se caracterizan por ser producto de la descomposición y desintegración de las rocas directamente en el lugar. A diferencia de tales suelos, los suelos transportados se originaron por la acción de agentes erosivos tales como el agua, el viento y el hielo.

Los suelos transportados, al ser movidos de un lugar a otro y depositados, sufrieron intemperismo y modificaciones. Incluso una vez depositados, pudieron haber sido retransportados y redepositados en otro lugar, y así continuar un ciclo relativamente largo de transportes, cambiando la composición y las características físicas de los materiales originales, pues en todos esos arrastres pudieron haberse remezclado con materiales de otra naturaleza, dando lugar a sedimentos en ocasiones demasiado heterogéneos. Es necesario mencionar que algunos de estos sedimentos, bajo condiciones que lo permitieron, fueron consolidados y cementados, dando así lugar a la formación de rocas sedimentarias.

Un banco de explotación de arena, al igual que uno de cantos rodados para producir grava, puede estar bajo agua o puede existir en seco. Es frecuente que los bancos de arena se encuentren dispuestos con mucha presencia de boleos y cantos rodados. Estos últimos también pueden encontrarse, en un mismo yacimiento, parte en seco y parte en agua. Ello se debe a fluctuaciones en los niveles de agua en el caso de ríos, arroyos, etc., y también a variaciones estacionales de los niveles freáticos.

2.3.2.1 Explotación de bancos de arena

Para la ejecución de despalmes, necesarios para la explotación de arenas de banco, se utilizan los mismos equipos de despalmes, aplicables para el caso de estado seco o húmedo, que en la explotación de graveras ya

tratada en el inciso 2.1, "Selección y explotación de bancos".

Es muy difícil encontrar arenas que no requieran ningún tratamiento. Habitualmente, los bancos de arena requieren al menos dos de las siguientes acciones:

- ☐ *Eliminación de desperdicios*. En bancos limpios, consiste básicamente en la remoción de partículas mayores a las estipuladas en el proyecto.
- ☐ *Disgregación*. Aplicable a roca relativamente intemperizada no muy dura, en aglomerados poco cementados, o en suelos duros. Se utiliza equipo tractor con rastras de cuchillas o arados, rodillos pata de cabra o similares.
- ☐ *Cribado*. Aplicable a gravas y arenas, con objeto de eliminar partículas excesivamente grandes. Esta actividad en muchos casos se puede realizar con una sola criba, dejando caer el material por gravedad y recolectándolo en la parte inferior de la criba. Sin embargo, esta operación permite la segregación de las partículas grandes. Por lo anterior, para el caso de producir concreto es recomendable utilizar cribas vibratorias en dos o tres niveles. Alternativamente, se pueden utilizar cribas cilíndricas concéntricas (Apéndice A). En estas últimas, conforme giran las cribas, las partículas se van acomodando hacia las orillas según su tamaño.
- ☐ *Trituración*. Es el tratamiento que se da a los materiales para pasar de fragmentos grandes a tamaños de partículas aceptables para la conformación de las diferentes capas del pavimento. Tal como se menciona más adelante, esta operación se hace empleando diferentes equipos, atendiendo a las características buscadas y a los tamaños que se quiera lograr. Los equipos, como se mencionó anteriormente, son de varios tipos.
- ☐ *Lavado*. Acción para eliminar partículas finas —arcillas, limos, materia orgánica y polvo en general— de los agregados. Constituye un complemento idóneo para las operaciones de trituración y de cribado.

Existen algunos equipos, tales como las palas fresadoras de remoción continua, con rendimientos entre 120 y 130 m³/h. Consisten en un chasis automotor sobre orugas, que soporta un tubo reforzado con placa sobre plataforma que se orienta mediante un piñón y corona dentada. Este tubo se puede inclinar respecto al plano vertical. En su parte delantera extrema, el tubo tiene una fresadora provista de cangilones configurados en espiral. Este elemento disgrega el frente de explotación de arena, a manera de perforadora, a la vez que va

desalojando el material extraído hacia un mecanismo transportador situado en el interior del tubo.

El transportador cuenta en uno de sus extremos con una tolva, que a su vez es soportada por una pluma con dirección controlable de inclinación fija, la cual está apoyada en una torreta soportada por el chasis. Cuenta con motores eléctricos independientes que movilizan los diferentes componentes del aparato.

2.3.2.2 Arenas producto de trituración

A veces se requiere corregir las curvas granulométricas de materiales sujetos a trituración secundaria y terciaria para obtener los parámetros establecidos en los proyectos de pavimentación, particularmente en materiales gruesos que exhiban deficiencias en partículas finas (0.09 a 2 mm). Para obtener estas arenas finas, se requiere el empleo de molinos de barras, a fin de dar un cuarto tratamiento de trituración.

Estos equipos consisten normalmente en un tambor cilíndrico de placa de acero estructural, el cual tiene una protección de placas de acero al manganeso, a manera de revestimiento. Este conjunto está colocado en la dirección horizontal y es accionado por una corona dentada y un piñón. Alternativamente, también el tambor puede ser accionado por un tren de rodillos de hule, situado en la dirección horizontal. Dentro del tambor se encuentran barras también cilíndricas de acero duro, de 5 y 7.5 cm (2" y 3") de diámetro, con longitudes ligeramente inferiores a las del tambor que las contiene. Cuando este último está en rotación, hace que las barras giren sobre su eje unas respecto a otras, dando así como resultado que los materiales que pasan entre ellas sufran molida muy efectiva.

Los molinos, como se mencionó en el Apéndice A, pueden trabajar mediante vía húmeda o seca. Por otro lado, atendiendo al grado de finura deseado, existen tres tipos de carga de alimentación y descarga: entrada y salida axiales, entrada axial y salida periférica, y finalmente, con doble entrada axial y una salida periférica por la parte media.

2.3.3 Acarreo y almacenamiento

Es conveniente que los vehículos que se utilicen para el transporte tanto de grava como de arena estén libres de desperdicios que pudiesen contribuir a la contaminación de los agregados; en general, deben estar libres de partículas orgánicas tales como residuos de vegetal, paja, fragmentos de cal viva, etc., producto del acarreo de otros materiales. De ser necesario, se deben lavar

periódicamente, con objeto de asegurar que no haya en ; cajas partículas extrañas.

En los patios de almacenamiento siempre resulta conveniente colocar sobre el piso una capa, de espesor variable de acuerdo con los requerimientos específicos, de material granular grueso. Con ello se busca que esta capa sirva como plataforma de trabajo de todos los vehículos de transporte que transitarán en estas zonas. La dureza de los granos que se han de colocar en las áreas de más movimiento, como es el caso de la zona donde se mueven los cargadores frontales, será función del tipo de llantas de estos últimos. La medida tiene por objeto tomar en cuenta posibles degradaciones que puedan posteriormente contaminar los agregados situados en la parte inferior de las pilas de almacenamiento.

Cuando la arena está muy seca, es muy posible que se presente segregación al momento de formar las pilas de almacenamiento. Este problema se puede disminuir si se humedece ligeramente el material.

2.4 PROCEDIMIENTOS DE SELECCIÓN DE AGREGADOS Y GRANULOMETRÍAS

Como un resumen del proceso de producción se puede decir que

- Cuando los suministros se hacen de agregados naturales, se requieren las siguientes actividades: despilme del banco, extracción del agregado en graña, transporte a la planta de tratamiento, cribado, lavado y acopio al almacén
- Cuando el suministro es roca triturada, el proceso incluirá despilme del banco, extracción, fragmentación al tamaño adecuado previo a su trituración, transporte a la quebradora, trituración, clasificación, almacenamiento temporal y carga y transporte a los patios de producción del concreto.

La selección de los agregados se logra mediante una clasificación granulométrica. Dentro de este proceso se pueden incluir las siguientes actividades:

- *Precnbado*
- *Cnbado* Esta operación consiste en clasificar en dos o más granulometrías a través de mallas de abertura superior a 1 milímetro
- *Tamizado*. Es la clasificación de materiales por medio de telas con tejido fino o por medio de mallas de 0.15 a 1 mm
- *Cernido*. Se trata de la clasificación en seco de los materiales sobre telas muy finas de aberturas comprendidas entre 40 y 150 micras.

□ *Decantación diferencial*. Es la operación de clasificación por diferentes pesos de los elementos.

Para mantener los materiales libres de impurezas, se puede recurrir a las siguientes actividades, las cuales se pueden realizar en diferentes etapas durante la preparación:

- *Lavado*. Se realiza antes de la fragmentación o sobre productos ya fragmentados, para eliminar todas las partículas finas plásticas o todo tipo de impurezas.
- *Lavado sobre criba*. Completa la eliminación de lodos, y escurren todas las partículas finas producto de la trituración.
- *Eliminación de polvo*. Puede realizarse en cualquiera de las etapas de trituración.
- *Recnbado*. En ocasiones se requiere volver a cribar para eliminar partículas finas que todavía permanecen debido a un cribado deficiente, o las que provienen de disgregaciones por el manejo de los agregados.

Cuando la arena se deposita, ya sea a través de camiones o de bandas transportadoras, el viento puede levantar las partículas más finas. Esto se puede evitar manteniendo el material ligeramente humedecido durante el proceso de vaciado —descarga— y, si es necesario, mientras permanezca en almacenamientos, antes de su utilización en las mezclas de concreto. Sin embargo, cualquier exceso de humedad deberá ser explícitamente tomado en cuenta al momento de la dosificación para el concreto, es decir, se deberán hacer los ajustes de dosificación final correspondientes, considerando las humedades.

La granulometría del agregado fino debe cumplir con lo estipulado en la norma ASTM C 33, la cual establece límites aceptables de acuerdo con la denominación de la malla (tabla 2.5).

Tabla 2.5 Distribución granulométrica para agregados finos

Denominación de la malla	Porcentaje que pasa, en peso
$\frac{3}{8}$ (9.52 mm)	100
No 4 (4.75 mm)	95 - 100
No 8 (2.36 mm)	80 - 100
No 16 (1.18 mm)	50 - 85
No 30 (0.60 mm)	25 - 60
No 50 (0.30 mm)	10 - 30
No 100 (0.15 mm)	2 - 10

2.5 CEMENTO

Al cemento portland, por la propiedad que tiene de fraguar y endurecer en presencia de agua, debido a la reacción química que experimenta con esta última, comúnmente se le denomina cemento hidráulico.

2.5.1 Fraguado

El término "fraguado" del concreto se refiere a un proceso de rigidización de la pasta. El fraguado, en su sentido más general, es el cambio que se presenta en el concreto al pasar de su estado fluido al rígido. En la práctica, se puede incluso hablar de fraguado inicial y de fraguado final atendiendo a estados de rigidez arbitrariamente establecidos.

Se acepta que el fraguado tiene lugar por un proceso secuencial de hidratación: los primeros compuestos que reaccionan son C_3A y C_3S (aluminato tricalcico y silicato tricalcico, respectivamente). El fraguado repentino que pudiera presentarse en el primero es contrarrestado por la adición de yeso, el cual retrasa la formación de hidratos de aluminato de calcio, ello hace que primero frague el C_3S .

2.5.2 Tipología

En la norma ASTM C 150 "Especificación Estandar para Cemento Portland" se clasifican ocho tipos principales de cemento. Algunos de estos cuentan además con ciertas variantes (tabla 2.6).

Los cementos más utilizados para pavimentación son el tipo I o normal, y el tipo II, o de bajo calor de hidratación. En algunas reparaciones, por ejemplo en los tramos realizados en condiciones de apertura rápida, se puede emplear el cemento tipo III.

En el Apéndice B se presenta una tabla de los tipos de cemento producidos en México así como la nueva clasificación de cementos propuesta en la Norma Mexicana más reciente, en donde se puede apreciar que continúa la misma clasificación básica solo que ahora dicha norma propone una clasificación más orientada al desempeño de los diferentes tipos de cemento, así como a los productos cementantes especiales.

2.5.3 Logística y almacenamiento

Para cualquier tamaño de obra se requiere un manejo y almacenamiento adecuado del cemento. Se sabe que un

Tabla 2.6 Tipología de cementos de acuerdo con la ASTM C 150

Tipo	Descripción	Opciones
I	Normal	BA
IA	Normal con inductor de aire	BA
II	De resistencia moderada a los sulfatos	MH, BA
IIA	De resistencia moderada a los sulfatos, con inductor de aire	MH, BA
III	De alta resistencia a edad temprana	MS, AS, BA
IIIA	De alta resistencia a edad temprana, con inductor de aire	AS, BA
IV	De bajo calor de hidratación	BA
V	De resistencia elevada a los sulfatos	BA, EXP

BA Bajo contenido de alcalis ($\leq 0.60\%$, como Na_2O)

MH Requisitos alternativos para un moderado calor de hidratación: 70 cal/g máximo a 7 días o $C_3S + C_3A \leq 58\%$

MS Resistencia moderada a los sulfatos $C_3A \leq 8\%$

AS Resistencia alta a los sulfatos $C_3A \leq 5\%$

EXP Requisitos opcionales para lograr una alta resistencia a los sulfatos. Expansión $\leq 0.040\%$ en ensaye sobre mortero (prueba ASTM C 452 a los 14 días)

incremento de las condiciones de humedad en el cemento hace que en este último se presenten variaciones indeseables de sus propiedades, en particular un fraguado más lento y una resistencia disminuida en comparación con un concreto fabricado con un cemento que siempre haya estado seco. Así pues, en obras pequeñas se sugiere que los lugares de almacenamiento del cemento estén preferentemente bien protegidos, en recintos libres de aberturas o grietas en su techumbre por donde se infiltre el aire con diferentes humedades. Se recomienda que la humedad relativa ambiente sea baja. Además, en caso de que se utilice cemento en sacos, estos deberán apoyarse sobre tarimas y nunca sobre el terreno natural. Cuando no se dispone de cobertizos, se deben colocar cubiertas de madera situadas al menos 10 cm arriba del terreno natural, y cubrir los sacos —incluyendo los costados de los montículos— con lonas, para así evitar el contacto con el agua.

Cuando el cemento ha estado almacenado en sacos por largos periodos, la parte inferior se puede compactar, principalmente por efecto del propio peso. Para ello, se aconseja rodarlos sobre el piso para aflojar los posibles terrones. Si aún así estos persisten se deberán hacer ensayos para verificar su efectividad.

En obras grandes es común almacenar el cemento a granel, mediante silos o depósitos de acero impermeables. En estos depósitos se debe emplear ventilación seca a prr baja o vibración para que el cemento fluya correctamente; por otro lado para que nunca se rebase la capacidad del contenedor.

2.6 AGUA

contenido y la calidad del agua utilizada en un concreto hidráulico dado influye mucho en el comportamiento a corto y mediano plazo del mismo. Ello es particularmente cierto en el caso de aplicaciones en pavimentos rígidos. En lo que sigue, se discuten los requisitos mínimos de calidad que debe cumplir este importante componente, así como las maneras de evaluar su calidad.

Las impurezas contenidas en el agua no sólo afectan los tiempos de fraguado y el desarrollo de las resistencias en el concreto hidráulico, sino que tienen fuerte impacto en su durabilidad: crean manchas permanentes, promueven la corrosión en elementos de refuerzo y originan inestabilidad volumétrica. Con el fin de minimizar los efectos nocivos para el concreto, es común fijar límites tolerables de algunas sustancias tales como sulfatos, cloruros, alcalis y sólidos en el agua en general. Quizás algunas de estas impurezas puedan tener efectos marginales en cuanto a la resistencia del concreto, no así en lo que se refiere a su durabilidad. Normalmente, cuando el agua tiene menos de 2000 partes por millón (ppm), se puede emplear para la fabricación del concreto hidráulico. Cuando tal cantidad sea mayor, se deberán realizar ensayos para determinar su influencia en cuanto al tiempo de fraguado de las mezclas y las resistencias.

Las aguas que se consideran deletereas para la fabricación del concreto hidráulico contienen normalmente algunas de las siguientes sustancias:

- ┘ Azúcar
- ┘ Ácido tánico
- ┘ Materia orgánica
- ┘ Aceite
- ┘ Ácido húmico
- ┘ Sulfatos
- ┘ Ácido carbónico libre
- ┘ Sales alcalinas
- ┘ Líquidos de desperdicio, residuos de combustible

Algunas de estas sustancias son de origen natural, otras son inducidas por filtraciones de sistemas de drenaje en mal estado, en donde se presentan fugas de desechos industriales.

En casos en que existan aguas con contenido de gases, éstos pueden ser disueltos para reducirlos a niveles aceptables mediante la aireación del agua.

En la tabla 2.7 se presentan algunos criterios de aceptación de la calidad del agua.

Tabla 2.7 Requisitos de calidad del agua

Producto químico y/o material	Concentración máxima, ppm	Método de ensaye*
• Cloruro, como Cl		
- Concreto presforzado o el destinado a cubiertas para puentes	500**	ASTM D 512
- Otros concretos reforzados en ambiente húmedo, o que contengan insertos de aluminio o metales diferentes, o cimbras permanentes de metal galvanizado	1000**	ASTM D 512
• Sulfato como SO_4	3000	ASTM D 516
• Alcalis como $(Na_2O + 0.658 K_2O)$	600	ASTM D 2790
• Sólidos totales	50.000	AASHTO T 26

*Se pueden emplear otros métodos de prueba, siempre y cuando se demuestre que arrojan resultados comparables.

**Cuando en un caso dado se permita el empleo de cloruro de calcio ($CaCl_2$) como aditivo, podrá hacerse caso omiso de la restricción sobre cloruros.

Para verificar la calidad del agua para ser utilizada en concreto hidráulico, sobre todo en condiciones de largo plazo, es necesario que no se sobrepasen los límites aceptables de sulfatos, alcalis, cloruros y dióxido de carbono disueltos. Es común calificar la calidad del agua para uso en el concreto, en condiciones de corto y mediano plazo, mediante la medición de los tiempos de fraguado y de la resistencia a la compresión a los siete y veintiocho días.

Los tiempos de fraguado se pueden determinar ya sea en pasta de cemento, en la que se pueden medir de acuerdo con las normas NMX-C-58 o C-59 (ASTM C 266 o C 191), o en mezclas de concreto de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-177 (ASTM C 403). Las pruebas de resistencia a la compresión se ejecutan en morteros, elaborados y ensayados de acuerdo con la norma NMX-C-61 (ASTM C 109). También se acepta medir las resistencias en especímenes de concreto, elaborados de acuerdo con las normas NMX-C-159 y C-83 (ASTM C 192 y C 39) (tabla 2.8).

Tabla 2.8 Pruebas para calificar la calidad del agua

Concepto	Limites	Método de ensaye
Resistencia a la compresión a los siete días porcentaje mínimo respecto al espécimen de referencia (testigo)	90	NMX -C-83 ASTM C 109*
Tiempo de fraguado desviación con respecto al espécimen de referencia h min	De 1 00 antes a 1 30 despues	NMX-C-59 ASTM C 191*

* Las comparaciones deberán basarse en proporcionamientos fijos así como en igual volumen de agua de prueba comparado con el del agua potable o destilada correspondiente a la mezcla de control

2.7 ADITIVOS

En su sentido más general, se puede decir que los aditivos son sustancias químicas o minerales que se utilizan para modificar algunas de las propiedades del concreto hidráulico que un cemento convencional no puede proporcionar. El ACI¹ define un aditivo como cualquier material distinto del agua, agregados y cemento Portland que se puede añadir a la mezcla antes o después del proceso de mezclado.

La anterior definición no incluye cambios en ciertas propiedades que producen materiales tales como algunas escorias y puzolanas. Como se sabe, estos últimos materiales pueden incluirse en la fabricación del cemento y de hecho se pueden considerar modificadores de algunas de las propiedades finales en los concretos producidos. La definición anterior corresponde más bien a un material individual que puede ingresarse a la mezcla en forma medible, esto es, que se agrega convenientemente dosificado.

La decisión de utilizar aditivos no sólo responde a la intención de mejorar algunas propiedades del concreto, sino que más bien puede deberse a razones de economía, por ejemplo, para mejorar o limitar alguno de los constituyentes de las mezclas o por ser la única vía para lograr concretos con características especiales, como puede ser una elevada trabajabilidad, o concretos de alto desempeño. Son varias las circunstancias que favorecen el empleo de aditivos.

En el concreto fresco

- Controlar los tiempos de fraguado.
- Incrementar las características de fluidez.
- Reducir o controlar la rapidez de pérdida de revenimiento

- Reducir el fenómeno de segregación.
- Controlar las características de sangrado de la mezcla.
- Aumentar la trabajabilidad sin incremento de la relación agua/cemento, o bien disminuir esta última relación para lograr una trabajabilidad aceptable.

En el concreto endurecido

- Reducir o retrasar la evolución del calor de hidratación durante el endurecimiento inicial.
- Acelerar la ganancia de resistencia a edades tempranas.
- Reducir la permeabilidad.
- Incrementar la resistencia.
- Mejorar las características de durabilidad.
- Incrementar la resistencia al impacto y a la abrasión
- Mejorar la adherencia entre concretos de diferentes edades.
- Controlar la expansión por efectos de reactividad álcali-silíce.

A continuación se describen sólo algunos de los principales aditivos, por considerarse de los más utilizados en la pavimentación con concreto hidráulico.

2.7.1 Inclusor de aire

Mediante el empleo de aditivos inclusores de aire se logra introducir de forma deliberada pequeñas burbujas de aire. Estos vacíos microscópicos hacen que el concreto exhiba un mejor comportamiento en condiciones húmedas en procesos cíclicos de congelación y deshielo. Otra mejora que se introduce con la inclusión de aire es la mayor resistencia ante el descascamiento por la acción de los productos químicos descongelantes; sin embargo, desde el punto de vista de los pavimentos de concreto, la mayor ventaja que se obtiene es cuando se trabaja con el concreto en estado fresco: ofrece una mejor trabajabilidad de las mezclas y una reducción o eliminación del problema de segregación y sangrado. Estos dos problemas contribuyen mucho a operaciones lentas y posiblemente defectuosas en las superficies de losas de pavimento recién coladas.

2.7.2 Reductor de agua

Este tipo de aditivo se utiliza para reducir la cantidad de agua requerida para producir una mezcla de cierto

reventamiento y también para disminuir la relación agua/cemento o, simplemente, para aumentar el reventamiento, manteniendo las demás variables constantes. Los reductores de agua típicos y los de alto rango pueden disminuir los contenidos de agua en rangos de 5 a 10 por ciento y de 12 a 30 por ciento, respectivamente. En general, el empleo de un reductor de agua para disminuir la cantidad de agua y de cemento, manteniendo constante la relación agua/cemento, puede implicar que la resistencia sea igual o mayor. Los materiales más usuales para desarrollar estos aditivos son sales de ácidos lignosulfónicos e hidroxil-carboxílico.

Los aditivos reductores de agua pueden tener o no impacto en el tiempo de fraguado. Algunos incluso se pueden producir para graduar los tiempos de fraguado. Otros reductores, por ejemplo los compuestos de lignosulfonatos, pueden incluir aire en los concretos si se emplean en dosis elevadas.

Con base en su composición química, algunos aditivos reductores de agua pueden disminuir, aumentar o no tener efecto en el fenómeno de sangrado. Infiere en su eficacia el contenido de cemento y la presencia de otros aditivos. La influencia de los reductores es también variable, atendiendo al tipo de mezcla: si es pobre o rica en cemento, o si este último contiene pocos álcalis, aluminato tricálcico, etcétera.

2.7.3 Retardantes

En algunas aplicaciones del concreto hidráulico es necesario moderar la velocidad del fraguado o aun retrasarla, con objeto de contar con suficiente tiempo para las labores subsiguientes a su producción, a saber, el transporte de la mezcla al sitio de colocación, y su tendido, compactación y terminado.

Existen dos formas básicas para prolongar los tiempos de fraguado en el concreto: una de ellas consiste en enfriar uno o más de los componentes de este último antes del mezclado. La otra opción es mediante la adición de un componente que retarde el fraguado y controle el calor de hidratación. Esto es particularmente válido en el caso de presas u otras obras de concreto masivo.

El objetivo central de un aditivo retardante es retrasar de manera controlada el fraguado del concreto hidráulico. Sin embargo, siempre se deberá tomar en cuenta que algunas sustancias empleadas como retardantes no solamente alteran los tiempos de fraguado inicial, sino también la evolución de resistencias, sobre todo a edades tempranas (1 a 3 días). Es por esta razón que algunos

aditivos retardantes también cuentan con propiedades de reducción de agua de mezclado; por ello, a estos últimos aditivos se les denomina retardantes reductores de agua.

Se presentan situaciones típicas en que se hace necesario reducir la velocidad del fraguado:

- ☐ Reducción de los tiempos de fraguado de un concreto normal, debida a temperaturas ambientales muy altas
- ☐ Tiempos excesivos de transporte, o lapsos excesivos entre la producción y la colocación de las mezclas

Las sustancias base son derivados del azúcar y su efecto puede ser muy drástico de no realizarse correctamente su dosificación, pues la evolución de resistencias en ocasiones resulta muy lenta.

Al igual que en el caso de los reductores de agua, también en los retardantes se utilizan para su elaboración sustancias a base de ácidos lignosulfónico e hidroxil-carboxílico. Algunos aditivos pueden presentar efectos secundarios, como es el incremento de la rapidez en las pérdidas de reventamiento; otros incluyen aire en las mezclas.

2.7.4 Aditivos acelerantes

Estos aditivos se utilizan para acelerar la resistencia del concreto a edades tempranas. Para este propósito, también se pueden utilizar otras opciones:

- ☐ emplear cemento de alta resistencia a edad temprana, tipo III,
- ☐ reducir la relación agua/cemento para incrementar el calor de hidratación; y
- ☐ efectuar el curado a mayores temperaturas.

El material que se utiliza en estos aditivos es el cloruro de calcio (CaCl_2), el aditivo debe someterse a la norma ASTM D 98,² y debe ser muestreado y ensayado de acuerdo con la norma ASTM D 345.³ Los problemas asociados al empleo del cloruro de calcio pueden provocar decoloramiento de la superficie (oscurecimiento del concreto), mayor propensión a la contracción por secado, corrosión del acero de refuerzo y posibles descascamientos.

Este tipo de consideraciones, aunadas al hecho de que en pavimentos rígidos se trabaja con mezclas relativamente secas, y a que altas temperaturas se registran en muchas zonas geográficas de nuestro país, hacen necesaria la realización de ensayos de las mezclas

en el campo, con objeto de medir algunas características de los concretos elaborados con aditivos en estado fresco y endurecido

2.7.5 Otros aditivos

Existe en el mercado una gran cantidad de aditivos que se emplean en la industria de la construcción en general. Su utilización viene condicionada por

- ☐ la composición química.
- ☐ los efectos primarios y secundarios (indeseables) que provoquen en el concreto.
- ☐ la compatibilidad con la pasta del concreto. y
- ☐ las consideraciones de costo.

Sin ser exhaustiva, en el Apéndice B se describen brevemente algunos aditivos que pueden tener interés para el campo de los pavimentos rígidos

2.8 MANEJO DE MATERIALES

Los criterios de manejo de materiales que a continuación se discuten son comunes tanto para el caso de concreto mezclado en camión como para los producidos en planta central, a menos que de algunos de ellos se haga una diferenciación explícita

El concreto, al ser un producto en el que concurren distintas proporciones de materiales que previamente han sido estudiados requiere un programa exhaustivo de estos, con el fin de llevar un inventario de materiales diferentes

Siempre será deseable entregar todos los materiales a la planta de producción cuando ya hayan sido verificados en cuanto a su calidad

2.8.1 Agregados

El manejo de agregados demanda en principio una correcta coordinación para su entrega en los patios de producción. Se debe poner especial cuidado en su acomodo, formación y proceso de carga a las tolvas dosificadoras. Se debe llevar un control de granulometrías, preferentemente diario, en arenas y gravas, con objeto de detectar cualquier cambio sensible en la distribución de tamaños que a su vez tenga incidencia negativa en la producción de concretos uniformes. Otro aspecto que se debe verificar también de manera regular es la posibilidad de contaminaciones

Éstas pueden ser de partículas gruesas en arenas y viceversa. Aparte, se debe asegurar que los materiales ya formados en los patios de almacenamiento estén libres de materia orgánica. Otra práctica común recomendable es medir diariamente la variación de los contenidos de agua en los agregados. Esta práctica se debe intensificar en cuanto se presenten más variaciones en las condiciones atmosféricas.

En lo que se refiere a la formación de los materiales, se deben seguir algunas prácticas típicas como son:

- ☐ Apilar los materiales por capas.
- ☐ Completar una capa antes de continuar con la que sigue.
- ☐ No depositar material sobre los bordes del almacenamiento
- ☐ Almacenar todo el material posible en términos prácticos, para que siempre lo haya en existencia para la producción del concreto

Las cantidades óptimas de almacenaje de material están regidas por los volúmenes que se vayan a producir en cada proyecto en particular. Es por ello que, dependiendo de tales volúmenes, la empresa productora de concreto, en caso de que la empresa contratista decida no poner una planta central directamente bajo su responsabilidad, establecerá la cantidad de equipos y de recursos humanos correspondiente, así como el programa de actividades para el manejo apropiado de los materiales.

En el caso de plantas centrales de producción, al igual que en una planta premezcladora comercial, se debe coordinar la entrega de materiales de manera acorde con los volúmenes programados de concreto por producir. Así, los suministros de material garantizan que la planta de producción no se detenga, y en ocasiones habrá que utilizar más de un almacenamiento, en etapas críticas de producción.

2.8.2 Materiales cementantes

Los materiales cementantes deben almacenarse en lugares separados, en el caso de que se empleen, por ejemplo, cementos portland y cenizas volantes.

Las tolvas de entrega del cemento están normalmente a presión, por lo que es necesario que las mangueras de traspaso a los silos de almacenamiento estén en buen estado, sin que presenten fugas. Es deseable, en este sentido, que las mangueras de descarga cuenten con identificaciones bien definidas, y que las conexiones de preferencia sean diferentes, para evitar confusiones.

Además, tanto a los tanques de transporte como a los silos habrá que darles pequeños golpes con martillos de goma, con objeto de que efectivamente exista desalajo de cemento que pudiera haber quedado adherido a las paredes de los contenedores, principalmente donde sea fácil que se formen terrones, como ocurre en las esquinas.

Es recomendable que los silos, los cuales deben ser totalmente impermeables, se llenen de cantidades conocidas de cemento a granel, ello es relativamente sencillo si se contabiliza el número de cargas de contenedores de transporte necesarias para llenarlos. Además resulta práctico relacionar los volúmenes almacenados en silo con las producciones de concreto correspondientes, de manera que se pueda hacer una correlación óptima entre cemento almacenado y producción de concreto y, por ende, se pueda saber con precisión el número de silos necesario para mantener el ritmo de producción deseado.

Normalmente, la entrega de cemento se efectúa cuando no existe personal laborando en la planta. La empresa contratista debe verificar, aunque sea de manera aproximada, que los consumos de cemento sean los estipulados en el proyecto, basándose en las cantidades reales producidas, esto es, en el rendimiento del cemento. Por ello es tan importante mantener las pérdidas de este último en los niveles mínimos posibles. Por otro lado, la institución o entidad propietaria puede también, con base en los rendimientos, darse una buena idea de que los consumos de cemento sean los estipulados en el contrato.

2.8.3 Aditivos

En pavimentos rígidos se emplean más frecuentemente los tipos de aditivos: los inclusores de aire y los reductores de agua. Sin embargo, algunas aplicaciones especiales demandan características específicas del concreto hidráulico, por lo que en ocasiones se pueden emplear superfluidificantes, retardantes e incluso acelerantes de fraguado.

El almacenamiento de aditivo requiere el cuidado de varios aspectos: no se debe dejar contaminar ni sufrir daño, los depósitos de aditivo nunca se deben exponer a frío ni calor excesivo y los aditivos nunca deben congelarse. En caso de que ocurra esto último, se tienen que volver a ensayar de acuerdo con la normatividad aceptada en el proyecto, y solicitar al fabricante recomendaciones para corregir esta eventualidad.

Puesto que los aditivos tienen tendencia a sedimentarse, es conveniente revisar los contenedores con objeto de poder decidir la eventual sustitución de algunos lotes, siempre contando con la anuencia del fabricante. La etiqueta de información adherida a los contenedores de almacenamiento siempre debe estar limpia y en un lugar visible.

Los aditivos líquidos se agregan a la mezcla junto con el agua. Generalmente, los cambios en su proporcionamiento obedecen a modificaciones en las formulaciones de aditivos, o a cambios en el diseño de la mezcla, así como a la temperatura y distancias de tiro que prevalecen durante la obra.

2.8.4 Agua

Los requisitos de calidad del agua fueron ya descritos en la cláusula 2.6. Es frecuente que, en el caso de proyectos carreteros, en las plantas centrales de mezclado se utilicen pozos profundos para la extracción del agua. En el caso de pavimentos urbanos en donde empresas premezcladoras suministren la mezcla, se utilizan ya sea pozos o agua potable de las redes municipales locales. Tanto en una situación como en otra, se debe comprobar que dichos suministros sean los adecuados, conforme a las producciones programadas.

En el caso de emplear aguas tratadas, se debe verificar que las sustancias químicas contenidas en ellas estén dentro de las tolerancias estipuladas en las especificaciones. Su dosificación y forma de empleo debe ajustarse a lo establecido en la norma ASTM C 94 y NMX-C-155.

En climas extremos, es muy importante medir el agua en la fuente de explotación, con objeto de contar con la cantidad suficiente también para el lavado de los equipos y, eventualmente, el de los agregados. Otro tanto se puede decir sobre el almacenamiento, específicamente cuando se requiere enfriarla o calentarla.

El buen manejo del agua contribuirá a la uniformidad de las mezclas durante el proceso de producción. El agua entra en el proceso de producción de dos maneras: la propia de dosificación, y la empleada en todos los procesos de lavado. En cuanto al proceso de dosificación, se debe considerar lo siguiente:

- Agua de mezclado para la dosificación
- Agua de lavado en las tolvas
- Aditivos
- Humedad libre en los agregados
- Hielo

- Agua agregada por el camión de mezclado

2.9 DISPOSITIVOS DE TRANSFERENCIA DE CARGA

En el inciso 5.8 2, "La colocación del concreto", de esta parte se describe detalladamente el concepto, función y manejo de los dispositivos mecánicos conocidos como pasajuntas. También se incluyen las precauciones correspondientes a su instalación correcta.

Las pasajuntas se instalan en un ensamblaje conocido como silleta (o "canastilla"), el cual a su vez se fija a la capa de apoyo de la losa que se va a construir mediante grapas o sujetadores. Estos elementos de fijación deben ser eficientes, de forma que efectivamente eviten la movilidad de las pasajuntas en la dirección horizontal una vez que se les coloque encima el concreto hidráulico. Es preferible que el engrapado se realice obligatoriamente en el borde delantero de la canastilla, sin perjuicio de que también se realice en la parte posterior. Cualquier alambre que pueda sujetar en exceso a las pasajuntas deberá cortarse, con el objeto de que nunca exista obstrucción para el movimiento natural del concreto una vez que se endurezca.

La inserción de pasajuntas también se puede realizar mediante dispositivos automáticos que van integrados al tren de la pavimentadora de cimbra deslizante. Estos dispositivos se denominan "Insertadores de Pasajuntas" o DBI por sus siglas en inglés (*Dowel Bar Inserter*). Su utilización ha sido popular en EUA y en Europa, especialmente en Bélgica. La operación del equipo permite que se detenga en cada localización de junta para insertar las pasajuntas a la profundidad adecuada mediante vibrado. Este equipo tiene la ventaja adicional de que permite la colocación sin problemas de pasajuntas en juntas esviadas, el empleo de estas últimas representa beneficios adicionales al comportamiento del pavimento.

2.10 MATERIALES COMPLEMENTARIOS

2.10.1 Materiales para sello de juntas (silicón, tira de respaldo, etc.)

2.10.1.1 Materiales para sello

En la tabla 4.37 de la parte de *Proyecto* aparece una descripción de los principales materiales para el sellado de juntas. En ella se destacan sus propiedades principales y la normatividad aplicable.

En cada proyecto se debe especificar el tipo de sellador, así como la manera de instalarse. Siempre será necesario seguir de manera estricta las recomendaciones del fabricante.

Los materiales para el sello de juntas podrán ser los compuestos a base de silicón. Alternativamente, podrán ser de dos componentes a base de poliuretano, los cuales soporten más o menos 25 por ciento de movimiento. También se emplean derivados de asfaltos aplicados en caliente y sellos preformados aunque su efectividad no es alta en todos los casos.

De preferencia, el material sellante debe ser autonivelable, pero su curado debe tener lugar de forma rápida para evitar el flujo aun en rasantes de gran pendiente. No se debe permitir el empleo del sellador cuando dentro del envase ya presente una ligera formación de costra en la superficie, o cuando se haya asentado tanto que su redispersión dentro de los recipientes dificulte su agitado manual para formar un producto blando y uniforme. Es también importante tener todos los recipientes o envases perfectamente etiquetados. Ya sea que se trate de un solo componente, o de dos, cada componente, al momento de ser entregado a la obra debe incluir una boleta en donde se indique, entre otra información,

- Nombre del fabricante
- Número de lote
- Fecha de fabricación
- Fecha de empaque
- Fecha a partir de la cual el sellador deberá ensayarse para poder ser utilizado y/o aprobado
- Instrucciones del fabricante para su uso

El material de sello de un solo componente, como son los silicónes, normalmente viene en un solo envase y listo para ser empleado, mientras que el de dos componentes requiere un mezclado de forma mecánica antes de aplicarlo. El equipo de aplicación deberá tener preferentemente la capacidad de mezclar los dos componentes antes de su colocación dentro de la caja receptora del sello. El equipo para aplicar este último debe ser previamente autorizado por la residencia de obra, y su manejo será de acuerdo con las indicaciones del fabricante. Cuando el sellador consista en poliuretano líquido, debe cuidarse que no esté expuesto a atmósfera por más de 24 horas antes de su aplicación. En caso contrario, se debe evitar su uso.

La mayor parte del sellador aplicado en caliente puede deformarse hasta un 20 por ciento del ancho original de la caja. Los silicones y, en general, los materiales de bajo módulo elástico pueden deformarse hasta el 100 por ciento. Es importante considerar que este comportamiento se va degenerando proporcionalmente más rápido conforme envejecen los materiales aplicados en caliente.

En el caso de los selladores prefabricados, la durabilidad del material es buena o excelente. Su principal problema en la práctica ha consistido en que no siempre se logra que la caja receptora de los también denominados "selladores de compresión", pueda trabajar en un rango permanente de 20 a 50 por ciento de compresión. Para ello se deben tomar en cuenta las temperaturas esperadas y los movimientos de las losas. Mayores temperaturas de instalación exigirán más compresión del sello durante su instalación.

Siempre que sea posible, la residencia de la obra debe exigir a la empresa contratista un certificado de calidad emitido por el fabricante del sellador, en donde se demuestre que dicho material cumple con las características físico-mecánicas consideradas en el proyecto particular.

10.1.2 Tira de respaldo

Dentro de los materiales empleados para proteger la junta y evitar que escurra material sellante dentro de la grieta recién formada, es común recurrir a espuma de polietileno, de calidad comercial, cuya superficie superior sea continua impermeable, lisa, capaz de resistir y contener el sellante líquido hasta que este empieza a endurecer.

Antes de colocar el material sellante, las ranuras o cajas receptoras de sello deben estar totalmente limpias y secas. Para ello se recomienda sopietear con aire a presión los cortes realizados para recibir el material de sello. Alternativamente, si el proyecto así lo demanda la empresa contratista podrá solicitar al mismo fabricante de la tira de respaldo una imprimación ("primer") que se aplique antes de colocar el material sellante, en caso de que este último sea a base de poliuretano. Cuando este sea el caso, la imprimación deberá estar seca antes de aplicar el sellante de dos componentes. Si se detecta que la imprimación está contaminada, se deberá proceder a su remoción y reemplazo.

10.2 Varillas de sujeción

Tal como se describe con detalle en el inciso 4.3.2 de la parte correspondiente a *Proyecto*, el objetivo central de

las varillas de sujeción es mantener dos franjas, o más específicamente, carriles adyacentes, trabajando como una unidad, de forma que no se separen. Las dimensiones de las varillas corrugadas que se utilicen deberán ser confrontadas con lo indicado en el proyecto.

Estas varillas pueden colocarse antes de iniciar las labores de colado, como es el caso de los trabajos con cimbra fija, o se insertan en el concreto fresco, que es lo más frecuente. Al instalarse, se debe cuidar que queden lo más paralelas posible con la capa de apoyo, normales a la cara de la franja de concreto, y con el espaciamiento prescrito en los planos. Estas varillas deben estar situadas a la mitad del espesor de la losa como mínimo, incluso ligeramente por abajo cuando esta última sea muy delgada, pues los cortes necesarios para alojar los sellantes y para la fabricación de las juntas podrían seccionarlas por accidente. Además, deben estar libres de grasa, polvo o pintura, y, en general, de cualquier sustancia que inhiba su adherencia efectiva con el concreto.

Las varillas que se pretendan doblar deben ser de un grado tal que permitan su doblez pero sin romperse. En caso de que se utilicen cimbras fijas, las varillas previamente dobladas se pueden sujetar a la cimbra, y posteriormente enderezarse, una vez que ésta se haya removido. En el caso de pavimentadoras de cimbra deslizante, se pueden insertar manualmente o, de preferencia, con dispositivos mecánicos conforme la máquina avanza.

Cuando se incluya la ejecución de juntas longitudinales machihembradas, se deben asegurar las dimensiones del machihembre conforme a los planos. En el caso de utilizar cimbras fijas, la parte saliente de este tipo de juntas se sitúa a la mitad del espesor de la losa. Normalmente, esto se consigue adosando a las cimbras de los costados formas machihembradas metálicas. Cuando se trabaja con cimbra deslizante, se consigue el machihembre mediante la adición de una pieza ranuradora adosada a las placas de la pavimentadora. En estos casos se deberá prestar especial atención a la colocación y vibrado del concreto para lograr una junta sólida en el machihembrado.

2.10.3 Membranas de curado

Al término de las operaciones de acabado y texturizado de las losas de concreto, se procede a la aplicación de compuestos de curado. Éstos comúnmente consisten en materiales a base de parafina de pigmentación blanca, y también hay todo tipo de material de curado de tonalidad clara o transparente. Pueden utilizarse asimismo lienzos

de papel o mantas de algodón, papel kraft y paja. Dentro de las provisiones de colocación en tiempos lluviosos se emplean también mantas de plástico. Con la tonalidad de color blanco se busca que las aplicaciones de los compuestos sean visibles, de manera de poder verificar la uniformidad de colocación sobre la losa, pero sobre todo, que reflejen los rayos solares.

En climas fríos se ha demostrado que resulta muy efectivo colocar paja humedecida y hojas de polietileno blanco, pues tales elementos actúan como aislantes en el concreto. Los compuestos de curado nunca deben aplicarse cuando está lloviendo, o si el concreto todavía presenta sangrado.

Para ser aprobada, la membrana debe ensayarse de acuerdo con las normas ASTM C 309 y ASTM C 156.⁴ La primera trata sobre las características que debe cumplir la membrana, mientras que la segunda se refiere a la capacidad de retención de agua, esto es, se valora su potencial impermeable.

Cuando se almacena a granel, como es el caso de obras grandes de pavimentación, la membrana debe agitarse continuamente mediante inyección de aire. Si este es el caso, el contenido del tanque del equipo se revuelve mediante paletas.

En proyectos pequeños el producto químico normalmente se entrega en tambores de 200 litros. Mientras se aplica, es muy importante verificar los rendimientos y consumos, con el fin de asegurar que se aplican las cantidades especificadas de membrana por metro cuadrado. Véase la cláusula 4.6 sobre curado, más adelante.

2.10.4 Fibras

Algunos proyectos, sobre todo los pequeños en zonas urbanas, o los del tipo *fast track* o que utilicen sobrecarpetas ultradelgadas como elementos de refuerzo, incluyen fibras de refuerzo para incrementar la resistencia al impacto o a la tensión por flexión. Estas fibras pueden ser de polipropileno o de acero. Cada tipo de fibra tiene sus características de manejo y de proporcionamiento dentro de la mezcla.

2.11 DOSIFICACIÓN DEL CONCRETO. DISEÑO DE MEZCLAS

Generalmente, el proporcionamiento de una mezcla de concreto está en función del uso que se le vaya a dar, condiciones de exposición, geometría del elemento que se va a formar, y dos aspectos primordiales: resistencia y

durabilidad. En lo que sigue, se discuten los parámetros y factores que tienen influencia directa en el concreto ya endurecido, y en consecuencia, en el proporcionamiento que se haga para alcanzar las propiedades finales de este último.

Si bien el diseño y proporcionamiento de mezclas se hace en la etapa de laboratorio, tanto el constructor como el supervisor deben estar familiarizados con este proceso y tener algunas bases teóricas y prácticas para tomar decisiones durante la producción.

Con mucho, la relación agua/cemento, a/c , es el factor que más incide en la gran mayoría de las propiedades finales de un concreto, pues, como es sabido, estas últimas dependen de la pasta de cemento. Por otro lado, a pesar de que existen muchas propiedades, tales como la permeabilidad, la durabilidad y la resistencia al desgaste, directamente relacionadas con la relación a/c , es con la resistencia a la compresión del concreto, f_c , con la que más frecuentemente se asocia a esta relación.

Conforme se tengan mejores condiciones de temperatura y mayor humedad esté en contacto con el concreto, éste alcanzará resistencias más altas, pues es más factible que se alcancen los grados óptimos de hidratación. Ello se debe a que la resistencia de la pasta de cemento no sólo depende de la cantidad y calidad de los elementos reactivos, sino también del grado en que se desarrolló la hidratación.

Los objetivos particulares que se buscan en un concreto para pavimento son:

- su trabajabilidad, para ser colocado fácilmente;
- resistencia y durabilidad satisfactorias; y
- el logro de mezclas competitivas a costos lo más bajos posible.

Con estos propósitos, se debe buscar que todas las partículas sólidas queden recubiertas por la pasta de cemento. El contenido de éste, sin embargo, se debe minimizar para que, en su conjunto, la mezcla no resulte demasiado costosa. La relación a/c debe ser tan alta como se requiera para que la mezcla sea fácilmente trabajable, pero de manera que no reduzca de forma drástica su resistencia final. El balance total para un buen proporcionamiento tomará en cuenta invariablemente el tipo y la forma de los agregados, por ejemplo, para evitar concretos muy ásperos. Se podrá incluir aire para aumentar la trabajabilidad y la durabilidad.

En la tabla 2.9⁵ se presentan valores recomendados de resistencias a la compresión para distintas resistencias a la flexión y tipos de agregados, la cual se puede emplear como valor de arranque para los casos en que no se

diagnóstico de datos de resistencia de experiencias de
ni tampoco se cuente con mezclas de prueba.

Tabla 2.9 Resistencia aproximada a la compresión para cada valor de la resistencia a la flexión y para distintos tipos de agregado

Resistencia a la flexión, en kg/cm ²	Tipo de agregado		
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
	Resistencia a la compresión, en kg/cm ²		
30*	230	250	300
32*	246	266	320
34*	260	283	340
36*	277	300	360
38*	292	317	380
40*	307	333	400
42	323	350	420
44	338	366	440
46	353	383	460

Tipo 1: Plantas con buen nivel de producción con más del 50% de material producto de trituración.

Tipo 2: Control de calidad y de producción en planta¹ de regular a bueno, con agregados compuestos por mezclas de partículas angulosas y redondeadas.

Tipo 3: Nivel de producción de pobre a regular y agregados de partículas de origen aluvial, cantos rodados, etc.

* Rango de resistencias empleadas únicamente para diseños de pavimentos con tránsito de vehículos ligeros o para caminos de acceso residencial.

La variación que se presenta en los resultados de las pruebas de vigas ocasiona que el nivel de incertidumbre sea mayor que el que se tiene cuando se efectúan los ensayos a compresión. El nivel de variación en los ensayos de vigas es inherente a la prueba, por lo que es difícil reducirlo. Este nivel de variación ha motivado que de forma creciente, se este optando por realizar el control de calidad en términos de las pruebas de resistencia a la compresión. Este control se hace una vez que se ha logrado establecer una buena correlación entre los resultados de las pruebas de módulo de ruptura y los resultados de resistencia a la compresión. De esta manera se puede llevar un mejor control y con un nivel reducido de incertidumbre. Esto no significa que dejen de hacerse determinaciones directas del módulo de ruptura sino que éstas se hacen de manera menos frecuente, con un carácter de confirmación de los valores esperados de la correlación con las pruebas de resistencia a la compresión y no como fuente primaria de información para el control de calidad.

En pavimentos de concreto es común emplear relaciones agua/cemento en el rango de 0.40 a 0.45. Desafortunadamente, no hay relación inversa que sea lineal, pues para una misma

relación a/c se pueden encontrar variaciones en la resistencia a la compresión, entre algunas fuentes de variación se incluyen tamaño de agregados, granulometría, textura superficial, absorción, forma, rigidez y resistencia de las partículas. Por otro lado, aunque siempre es recomendable utilizar vigas para determinar los módulos de ruptura, MR , pues éstos son los que rigen el diseño de los pavimentos, es común iniciar el diseño de las mezclas, por su simplicidad y confianza, con el empleo de relaciones a/c asociadas a valores de f_c . En una segunda etapa, en el laboratorio se elaboran vigas que acompañen a los cilindros fabricados. Así al final del estudio se podrán tener correlaciones confiables de $MR-f_c$.

Puesto que en el campo prevalecen normalmente condiciones diferentes a las existentes en el laboratorio, se admite que en el primero se hagan pequeños ajustes para adecuar las mezclas a las condiciones particulares de colocación. Sin embargo, tales ajustes deben realizarse con cuidado, de manera que no incidan adversamente en el producto final. Tanto el residente como el supervisor deben tener conocimientos sobre este tema a efecto de siempre poder sugerir cambios pequeños para ajustar los diseños. Sin embargo, cuando sea muy obvio que el producto final no está cumpliendo con los requisitos del proyecto, esto debe comunicarse a los responsables de la obra de manera oportuna.

En el Apéndice B se ofrecen referencias para la dosificación por peso o por volumen absoluto, así como aspectos sobre los puntos que se deben cuidar durante el diseño de la mezcla.

Referencias

- 1 American Concrete Institute, Comité 116
- 2 ASTM D 98, "Specification for Calcium Chloride".
- 3 ASTM D 345 "Methods of Sampling and Testing Calcium Chloride for Roads and Structural Applications".
- 4 ASTM C 309, "Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete", ASTM C 156 "Test Method for Water Retention by Concrete Curing Materials".
- 5 Salazar R. Aurelio, "Guía para el diseño y construcción de pavimentos rígidos", IMCYC, 1998.

**Bibliografía**

Benitez Esparza, Pedro Luis, "Técnicas Modernas de Producción de Agregados", Apuntes de Construcción, Facultad de Ingeniería, UNAM, 1975

Colegio de Ingenieros Civiles de México, *Movimiento de tierras*, México, 1967

Costes, Jean, *Equipos de extracción y preparación minerales, canteras – graveras – minas*, Editores Técnicos Asociados, S A., Barcelona, 1970.

Varela A., Leopoldo, *Costos de construcción pesada y edificación*, Compuobras, S A. de C.V., junio de 1992

CAPÍTULO 3

MAQUINARIA

En este capítulo se hará una descripción resumida de los principales equipos empleados para la construcción de pavimentos rígidos. La secuencia en que se discuten los temas sigue un avance cronológico, esto es, se trata primero el aspecto de la producción y el manejo de los agregados para fabricar el concreto. Posteriormente se describen los equipos convencionales de alto rendimiento, necesarios para realizar las carreteras actuales, cada vez con mayores limitaciones de tiempo y programas de erogaciones más estrictos. Los equipos que aquí se describen incluyen desde la producción del concreto hasta su terminado en la posición final de las losas. En el tratamiento de estos temas se han privilegiado los aspectos que se consideran críticos y los requerimientos mínimos necesarios para la ejecución, en lugar de hacer una descripción exhaustiva de los equipos.

3.1 EQUIPOS PARA OBTENCIÓN Y PRODUCCIÓN DE AGREGADOS

Los equipos más comunes en la producción de agregados se describieron en la cláusula 2.1, "Selección y explotación de bancos" de esta parte de la publicación.

3.2 EQUIPOS PARA FABRICACIÓN DE CONCRETO

La selección óptima del equipo para la fabricación de las mezclas de concreto constituye uno de los pasos más críticos en toda la secuencia de la pavimentación con concreto. La capacidad de estos equipos deberá ser compatible con los volúmenes por colocar, así como con las características particulares del proyecto. En la selección del equipo son varios los factores que se deben tener en cuenta: disponibilidad, capacidad, experiencia en su manejo, programa de calibración, volúmenes de concreto previstos para su colocación, personal calificado para su manejo y, finalmente, el equipo complementario apropiado.

3.2.1 Equipos mezcladores

De manera resumida se puede decir que las formas de mezclar el concreto hidráulico y que se pueden aplicar en pavimentos rígidos son las siguientes:

- *Concreto mezclado en planta.* En una planta estacionaria se cargan todos los ingredientes del concreto en una mezcladora central y luego se combinan cuidadosamente antes de descargarlos en los camiones transportadores. El operador de la planta realiza todas las actividades: el pesaje, el mezclado de ingredientes y el monitoreo de la mezcla durante todo el proceso de producción.
- *Concreto premezclado.* Este tipo de concreto se elabora parcialmente en mezcladora central, con el objeto de disminuir inicialmente los vacíos existentes en el conjunto de ingredientes. La acción del premezclado hace que las oquedades que presenta el conjunto del material grueso sean llenadas por la fracción fina de los agregados (arena), por el agua y por el cemento. Al final, los materiales se entremezclan íntimamente y quedan listos para ser descargados.

El concreto premezclado se emplea en las modalidades tanto de mezclado en planta central como en camión. En el primer caso, el conjunto de materiales se pasa a otra olla para proceder a su mezclado final. En el segundo caso, el concreto premezclado se vierte en el camión mezclador para su mezclado final.

3.2.2 Fabricación de concreto premezclado

Toda planta de producción de concreto debe contar con personal capacitado y familiarizado con cada una de las fases empleadas. Es común encontrar una distribución de personal que comprende un operador del cargador de

materiales, el despachador, el operador de la planta y el conductor del camión

El operador del cargador El proceso de producción se inicia con un buen manejo y abastecimiento de los materiales a las tolvas de dosificación. Siempre se cuidará alimentar a estas últimas de manera correcta, sin errores. La actividad de carga de materiales nunca se debe soslayar, pues el operador es el encargado de manejar los agregados de manera oportuna, antes de que sufran contaminaciones o se entremezclen. El operador también debe cuidar que las cargas de agregados a las tolvas se hagan con materiales cuyo contenido de agua sea uniforme. Lo mismo puede decirse respecto a la granulometría: al cargar los materiales debe cuidar que estos representen los tamaños que por requerimientos de mezcla deben proveerse. También debe mover los agregados de manera que estos no experimenten segregación de partículas gruesas hacia los planos inferiores de las pilas de almacenamiento.

El despachador. Constituye un puente de comunicación entre el frente de trabajo y la producción del concreto, ya que apoyándose en los requerimientos del encargado de la obra, regulará los suministros.

El operador de la planta Es el encargado de reproducir los proporcionamientos previamente aprobados en el laboratorio, empleando los materiales que realmente se vayan a utilizar. Al igual que en una planta de mezclado central, el operador se encuentra en una cabina en la que se mantiene a los equipos computarizados de dosificación resguardados contra el polvo, además, su localización le permite observar con todo detalle el proceso de mezclado y descarga a los camiones de las mezclas recién producidas. Para el caso de camiones mezcladores, también puede observar como se aplica el agua.

Dentro de las actividades normales que un operador de planta tiene a su cargo se incluyen las siguientes:

- ☐ La operación del equipo de dosificación, con el fin de asegurar que las cantidades de cada uno de los componentes del concreto sean las correctas para el logro de una mezcla acorde con las especificaciones del concreto dadas.
- ☐ Los ajustes pertinentes cuando el equipo dosificador no esté trabajando apropiadamente o si cambia la humedad en los agregados.
- ☐ La dosificación manual, en caso de ser necesaria.
- ☐ La operación de las compuertas de descarga de la dosificadora, en la secuencia de ingredientes

requerida para descargar directamente en el camión.

- ☐ La verificación de que los contenidos de agua en los agregados sean los correctos o apropiados para la mezcla.
- ☐ El reconocimiento de cualquier cambio apreciable en los contenidos de agua o de contaminaciones en los agregados.

El conductor del camión Es el responsable de entregar una mezcla homogénea y con revenimiento consistente. Debe vigilar celosamente que no se adicione agua durante el trayecto al punto de colocación, ni en el momento de la entrega del concreto.

Es también responsable de las últimas secuencias del control de calidad: plasticidad, trabajabilidad, revenimiento, peso volumétrico de las mezclas, etcétera.

Puesto que es el encargado último de la calidad del concreto, el operador del camión debe estar familiarizado con las normas AASHTO, ASTM y NMX, en su caso, relativas a los muestreos y ensayos del concreto fresco. Además, los procedimientos de manejo tanto del concreto hidráulico como del vehículo darán una imagen positiva o negativa, dependiendo de las precauciones y habilidades mostradas frente al público usuario o frente al destinatario de las mezclas.

3.2.2.1 Camiones

Dentro de los requisitos para un adecuado manejo de los camiones, se puede mencionar que vengán identificados con la placa de su capacidad y tengan contador y medidor de flujo de agua. La uniformidad del concreto que se entregue en la obra depende de las condiciones del camión. En este orden de ideas, resulta conveniente que las aspas interiores de las ollas se inspeccionen regularmente, con el fin de observar su desgaste, puesto que las modificaciones en su geometría y dimensiones tienen un gran efecto en la uniformidad de las mezclas.

En todos los casos se debe evitar la formación de costras de concreto dentro de las ollas. Una forma práctica de verificar el desalojo total de mezclas en los camiones es mediante un pesaje rutinario de estos últimos.

Se requiere mantener a los camiones agitadores y no agitadores en buenas condiciones, libres de residuos. Los bloques sólidos de concreto desprendidos se pueden mezclar accidentalmente con el concreto fresco al colocar. Por lo anterior, es aconsejable que a los camiones de volteo sin tapa utilizados en los proyectos carreteros se les aplique chiflones de agua a presión,

sobre todo en las cajas metálicas, después de cada viaje a punto de colocación

En la figura 3.1 se muestra esquemáticamente el ciclo completo de fabricación del concreto. En ella se puede ver la etapa en que participa el empleo de agua en el proceso de producción y transporte de la mezcla. El lavado de un camión puede afectar el contenido de agua de la siguiente carga o dosificación por colocar. Es por ello que se deben adoptar practicas estándar en cada planta productora, con el fin de no alterar los contenidos de agua en cada fase de dosificación y posterior mezclado. El objetivo buscado en estas prácticas es obtener una producción uniforme de concreto. El proceso de lavado se puede resumir dentro de la siguiente secuencia:

- ❑ *Lavado de la mezcladora de la planta después de descargar.* Consiste en el lavado en planta. El operador lava los residuos situados en esta zona para que no se acumulen, pero evitando que esta agua escurra a la mezcladora. Se utilizan aproximadamente 20 litros de agua para limpiar la tolva trasera y las espas, en el entendido de que esta agua sí debe formar parte del agua de mezclado.
- ❑ *Lavado a la descarga del camión mezclador.* Es el lavado que se realiza después que el concreto ha sido depositado en el lugar de colocación. De común acuerdo con la empresa contratista, el productor de concreto decide donde se van a depositar los residuos. Se lava el canalón y la tolva de descarga. Nunca se deben vaciar los residuos en alcantarillas, acotamientos y cunetas.
- ❑ *Lavado de la olla*

3.2.2.2 Básculas de control de dosificación

El proceso de fabricación del concreto incluye las siguientes etapas consecutivas de trabajo: la dosificación cuidadosa de los ingredientes; su carga en el camión mezclador (o en las ollas de premezclado en el caso de plantas centrales); el mezclado en la olla de mezclado o en el camión mezclador y finalmente, su entrega.

El proceso de dosificación es la medición cuidadosa de cada uno de los ingredientes que se van a pesar. Los componentes sólidos se dosifican por peso, mientras que los líquidos, agua y aditivos se pueden dosificar tanto por volumen como por peso. Las tolerancias en la uniformidad y demás detalles de procesamiento vienen contenidos en normas tales como la AASHTO M 157 y la ASTM C 94.

En este proceso, los agregados y los materiales cementantes se toman de las pilas o contenedores de almacenaje y se depositan directamente en las tolvas de pesaje. Normalmente, las instalaciones de dosificación son capaces de pesar de manera independiente los agregados finos y los gruesos. Las tolvas de almacenaje depositan el material en las de pesaje con un mínimo de segregación. En el caso de plantas centrales, ello se logra mediante tolvas de recepción de agregados fino y grueso, las cuales depositan directamente dichos materiales en unas bandas en cuyo extremo final se encuentran las tolvas de pesaje. Estas últimas se diseñan de manera que nunca acumulen material, esto es, que descarguen el material de forma total. Las plantas cuentan con otra tolva para dosificar especialmente el cemento.

Las tolvas pesadoras están provistas de básculas que pueden ser de viga, medidor sin resortes o del tipo de

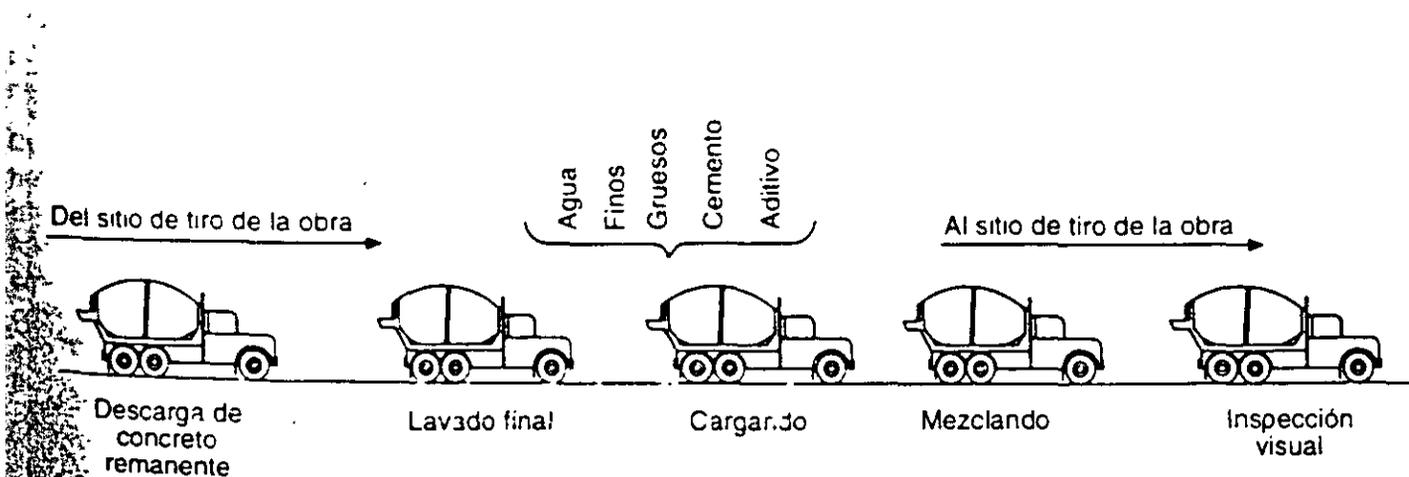


Figura 3.1 Ciclo típico para la producción del concreto.

ceida de carga. Las plantas poseen en muchos casos sensores de carga que codifican el peso electrónicamente, de manera que el peso de los materiales es transmitido a la pantalla en la caseta de control o de la computadora con que se controla la dosificación. Esta información debe ser totalmente visible al operador de la planta. Al ser un elemento clave, el sistema de básculas debe verificarse periódicamente, con objeto de eliminar errores en el peso de los ingredientes para diferentes dosificaciones.

Es común, por otra parte, que los operadores de planta registren y almacenen diferentes opciones de dosificación de ingredientes, ello permite responder de manera oportuna a las frecuentes variaciones en la humedad de agregados, así como en la distribución granulométrica y origen geológico de los mismos, entre otras variantes.

Los equipos de dosificación son normalmente automatizados. Los materiales son dosificados con controles tales que inician su dosificación e introducen los materiales en las ollas de mezclado de manera que el equipo se detiene automáticamente una vez que se ha alcanzado la cantidad o peso prescrito en el proporcionamiento. Los controles operan el equipo de manera que suministran las cantidades de material para su pesaje y en la secuencia correcta siempre con las tolerancias aplicables a cada uno de ellos.

a) Material cementante

Cuando en el concreto se requieren puzolanas y/o cenizas volantes mezcladas con el cemento portland

normal, éste se pesa primero; posteriormente se hace lo mismo con el resto de los materiales cementantes. Con ello se garantiza que las cantidades de cada uno de estos materiales sean las correctas. Las normas aplicables son las mismas citadas en el Apéndice B.

b) Aditivos

Los aditivos se dosifican mediante el bombeo de los mismos hacia unos tanques o cilindros con escalas de medición. Los aditivos líquidos se dosifican típicamente por volumen, y los instrumentos que permiten su medición deben estar a la vista del operador de la planta.

Los aditivos son vaciados dentro del agua de mezclado, y en contados casos (como adiciones en polvo) la inclusión se hace en la arena. La cantidad empleada por kilogramo de cemento se determina en laboratorio, considerando todos los ingredientes del concreto que realmente se vayan a emplear en el proyecto. Sin embargo, es frecuente que durante la ejecución de la obra se hagan ajustes a las cantidades empleadas de aditivo, debidos a causas atribuibles a cambios bruscos en las condiciones climáticas, características de mezclado y variables en los sistemas de colocación. En la figura 3.2 se muestra un aspecto de los tanques de almacenamiento de aditivos en una planta de premezclado.

c) Dosificación automatizada de agregados

Siempre que sea posible, las plantas que cuenten con un sistema de dosificación automático deben incluir medidores de humedad dentro de las tolvas de pesaje,

Figura 3.2 Depósitos de aditivo en una planta estacionaria.



para que el sistema computarizado de dosificación realice ajustes correspondientes en los proporcionamientos de agua y de aditivos, ya que el agua libre en los agregados se toma explícitamente en cuenta. Estos medidores, por otro lado, deben calibrarse con frecuencia, mediante muestreos directos, para determinar los contenidos de agua en el laboratorio. Así, las variaciones de humedad en los agregados podrán monitorearse directamente en las tolvas con cierto grado de confianza, conociendo las posibles deficiencias y limitaciones de los citados medidores.

3.2.2.3 Carga de materiales

Como una secuencia lógica al manejo de materiales descrito en los incisos 3.2.1 y 3.2.2, finalmente se realiza la carga de todos los materiales dentro del tambor de mezclado (planta central) o del camión mezclador.

Una vez realizada la dosificación de acuerdo con las ideas expuestas en el subinciso 3.2.2.2, se procede a la carga secuencial de cada uno de los componentes del concreto dentro de las ollas. Este paso es muy importante, ya que influye mucho en los resultados de uniformidad del concreto mezclado en el camión. Una forma de reducir el tiempo de carga de todos los componentes dentro del tambor es elevando la parte trasera del camión mezclador.

En un mezclado en camión (o procedimiento en seco), primeramente se introduce una porción del agregado grueso y una parte del agua de mezclado. Posteriormente se cierran las salidas de estos componentes, para luego enviar al tambor, mediante gusanos helicoidales, el material cementante en su totalidad. Al final, se agregan todos los materiales gruesos y el agua restante para limpiar y lavar todos los materiales cementantes que pudieran quedar adheridos a ductos de alimentación, paletas traseras y conductos.

Desde luego, esta secuencia puede ser modificada, y de hecho lo es, de acuerdo con las experiencias locales de las plantas premezcladoras. Sin embargo, es muy recomendable que los productores y el comprador, en este caso la empresa contratista, discutan de manera amplia la conveniencia de cada una de las secuencias alternativas, así como de las especificaciones aplicables al caso, al final, y una vez que se define el procedimiento que se va a seguir, deberá observarse una práctica consistente en la forma de mezclado.

Es muy importante que en las plantas premezcladoras se cuente con dispositivos de colección de polvo en la zona de carga. Este tema puede ser muy sensible, sobre todo

en las áreas vecinas en donde existan conjuntos residenciales o de instalaciones comerciales en lo general. A continuación se presentan los trabajos típicos para mezclado en camión y en mezcladora central.

3.2.2.4 Mezclado del concreto

a) Mezclado en planta central

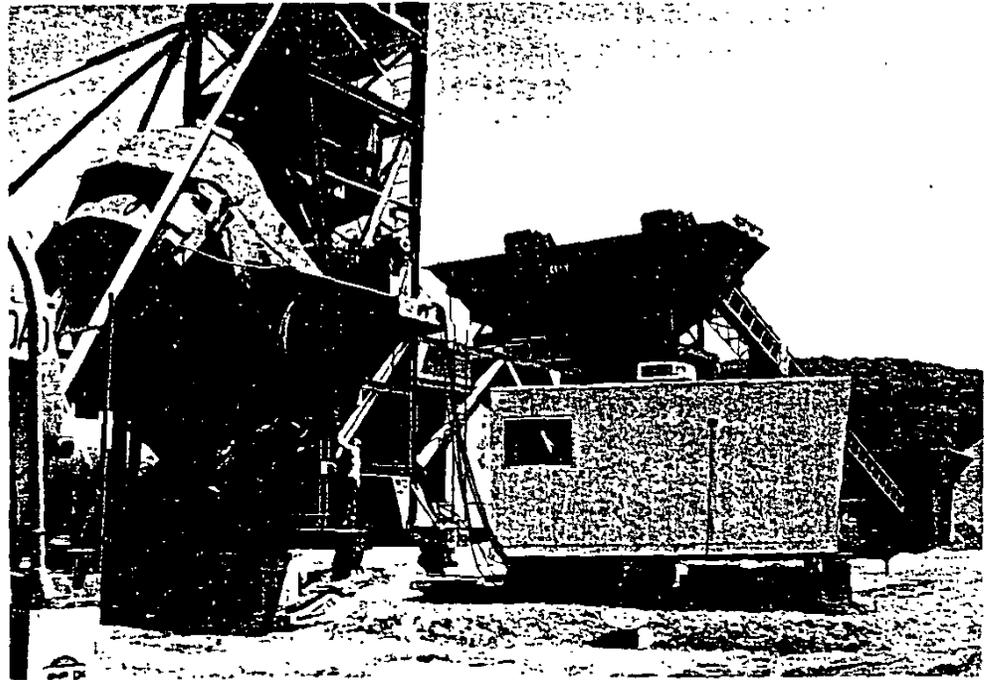
El concreto mezclado en planta central es aquél dosificado y mezclado completamente en una mezcladora fija en el lugar o en una planta de concreto premezclado. A diferencia del concreto mezclado en camión, la producción con plantas centrales se caracteriza por proporcionar el concreto totalmente mezclado, listo para ser descargado en camiones; así, el concreto, una vez descargado del tambor, está en condiciones de ser ensayado y colocado. El concreto producido puede ser transportado en camiones agitadores, camiones sin agitador (volteo) o camiones mezcladores.

Las plantas estacionarias son plantas de alta producción de concreto hidráulico, su empleo es típico en proyectos carreteros o aeroportuarios en los que se planea colocar cantidades importantes de mezcla, con altos rendimientos (superiores a 2500 m³ diarios). Ello ocurre, si se planea bien, debido a su alta productividad. Puesto que todos sus elementos vienen unidos con pernos, su montaje puede ser relativamente sencillo, y en la mayoría de los casos una brigada con experiencia lo puede hacer aproximadamente en dos días.

Existen dos grandes familias de plantas de mezclado central: las de tambor sencillo y las de mezclado horizontal, las cuales poseen dos tambores, uno para el premezclado y otro para el mezclado final de los concretos. Básicamente constan de los siguientes elementos (figura 3.3):

- Un tambor de mezclado, de tamaño variable según el modelo
- Compresor de aire, 15 hp
- Bomba de agua
- Tolva dosificadora para el cemento
- Tolva dosificadora para agregados (70 m³, en algunos modelos)
- Tanque de agua de 18,900 litros de capacidad
- Silo para el cemento (de 14.2 a 15.8 m de altura, para 51 y 68 m³ de capacidad, respectivamente, según el modelo)

Figura 3.3 Planta de mezclado central con tambor sencillo.



- Armaduras plegables para el sostenimiento del silo
- Banda transportadora de 1.2 m de ancho (en algunos modelos)
- Plataforma de mezclado, compuesta de armaduras de acero
- Medidores para el control de agregados y de cemento
- Medidores de los aditivos incluyendo su propia bomba y tubería
- Tanque de aditivos, de 908 litros
- Salidas de aire en la parte superior de los silos para el cemento
- Plataforma remolcable (para traslado de la planta) que incluye llantas removibles de uso pesado
- Caseta de control incluye el tablero de control y de generación de energía
- Planta de electricidad

Las descargas que se pueden lograr varían desde 7 m³ hasta 9 m³, dependiendo del modelo. La altura total de la instalación puede ser variable, sin embargo, en los modelos más comunes son frecuentes alturas de 15.8 m en las de tambor sencillo.

Por lo regular, tienen las características que se mencionan a continuación. El cemento se alimenta por gravedad, utilizando tolvas de uno o dos compartimentos

La tolva de agregados viene dividida en tres secciones, para un total de hasta 135 t en algunos modelos, con capacidades en el rango de 70 m³. Además, se pueden realizar hasta 35 cargas por hora con una planta tambor sencillo, y hasta 55 cargas por hora en mezcladoras horizontales. La banda que transporta los agregados desde la tolva de tres compartimentos hasta el tambor mezclador habitualmente es de 1.2 m de ancho. Por otro lado, la bomba de agua que se utiliza para el control de dosificación tiene una potencia promedio de 15 hp. Esta potencia es la misma que para el compresor de aire.

La boca de descarga del tambor, cuando éste tiene una inclinación mayor respecto a su plano horizontal, es de 2.80 m, lo cual permite una cómoda y eficiente descarga de los camiones. Igualmente, estos últimos tienen suficiente espacio para realizar sus maniobras (figura 3.4).

Cuando se requieren producciones mayores de concreto hidráulico, en situaciones en las que una planta central de tambor sencillo no pueda desarrollar los ritmos de colocación, por ejemplo en carreteras primarias o, más aún, en autopistas, se pueden emplear plantas de mezclado central horizontales. Éstas consisten en dos tambores: uno se utiliza para ejecutar el premezclado, y el tambor giratorio para el mezclado final. Con ello se consigue que la producción de mezclas, al contrarrestar el revenimiento de las mismas en uno de los tambores de mezclado, sea consistente y uniforme. El punto de

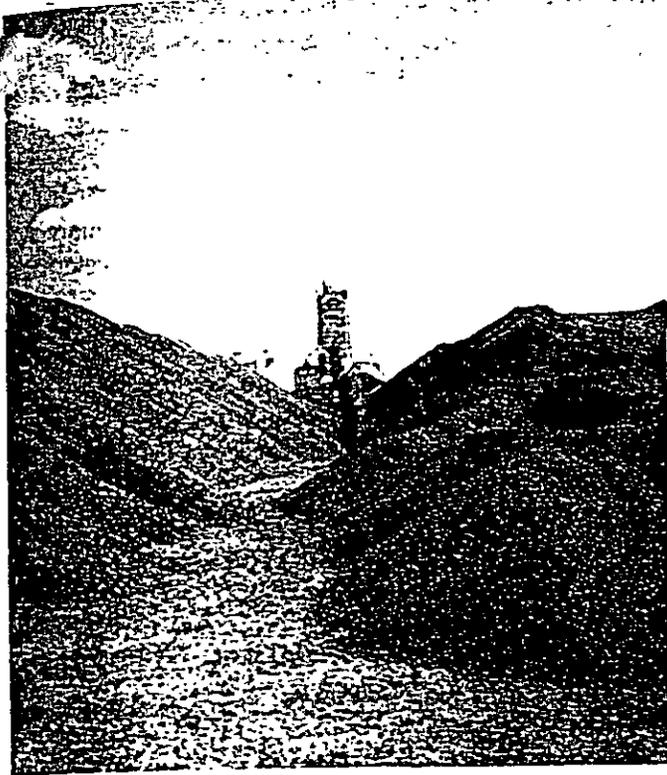


Figura 3.4 Vista general de una planta de mezclado central. En primer término se aprecia parte de los patios de almacenamiento.

descarga continúa siendo solamente uno, de manera que la entrada y descarga en los camiones sigue siendo ágil. La operación de carga ocurre en tres fases simultáneas: en el tambor extremo de descarga, en el mezclador horizontal (premezclado) y en la tolva dosificadora.

Estas mezcladoras, llamadas también de "mezclado continuo", a pesar de que cuentan con varias tolvas de dosificación, tienen la ventaja de que solo se requiere mantener calibradas una sola para cemento y otra para agregados, aunque se tengan tres tipos de agregados diferentes y dos tipos de cemento por dosificar.

La alta productividad de estos equipos se debe, entre otras razones, a que.

- El agua se mide de manera previa dentro de un recipiente, del cual posteriormente sale hacia el mezclador a través de una tubería de 15 cm de diámetro.
- La tolva dosificadora incluye deflectores que permiten un mezclado de los diferentes agregados conforme éstos se transportan en la banda hacia el tambor de premezclado horizontal.

- La descarga de mezclas es controlada para que el conjunto de agregado, cemento, y agua fluya dentro del mezclador final, de manera que es necesario menos tiempo y menor intensidad de mezclado para el logro de una mezcla uniforme. En este orden de ideas, este premezclado se realiza mientras el tambor de mezclado final (o giratorio), situado en el extremo, todavía contiene la mezcla previamente ejecutada.
- Una vez descargado el tambor de mezclado, una compuerta de paso situada entre el tambor giratorio y el horizontal permite el traslado de la mezcla ya fluida desde este último otra vez hacia el de mezclado final. Mientras tanto, las tolvas dosificadoras tienen lista otra carga para el tambor horizontal, cerrándose así el ciclo de mezclado continuo.

Uno de los aspectos más relevantes de este sistema de producción es que todo su proceso es controlado por la empresa contratista, con las obligaciones y prerrogativas que ello implica: personal calificado y experto en la explotación, el manejo, el almacenamiento y la carga de los materiales, además de contar con una brigada con entrenamiento en el manejo de la planta.

Algunos equipos de este tipo de mezcladoras cuentan con medidores del tiempo de mezclado, de forma que las mezclas puedan ser reguladas automáticamente y no se permita su descarga en el camión en tanto no se cumpla el tiempo programado.

Las especificaciones permiten tiempos de mezclado del orden de un minuto mínimo para ollas de 765 litros de capacidad, más 15 s cada 765 litros adicionales o fracción de esta cantidad. En el caso de carreteras, se permiten tiempos más cortos de mezclado. A manera de ejemplo, en nuestro país, cuando se emplean bachas de 7 a 9 m³ con tambor giratorio sencillo, el rango de tiempo de mezclado va de 1.5 a 2 minutos. Independientemente de lo que indiquen las especificaciones generales, la ya citada norma ASTM C 94 permite reducir los tiempos de mezclado, si es que en el campo se demuestra, mediante ensayos y muestreos, que el concreto descargado es uniforme y homogéneo para ciertos tiempos de mezclado del tambor.

La secuencia normal de introducción de los materiales dentro del mezclador es la siguiente: primeramente se vacía el agua hasta alrededor de 10 por ciento antes de cargar los componentes sólidos. Después se agrega el agua junto con los demás componentes, dejando otra vez aproximadamente el último 10 por ciento para añadirla una vez que todos los ingredientes estén ya dentro del tambor mezclador.

La adición de aditivo retardante debe ocurrir dentro del primer minuto posterior al momento en que se completó la adición del agua al cemento o, cuando muy tarde, dentro del primer cuarto del ciclo de mezclado, lo que ocurra primero. Cuando se utilizan dos o más aditivos, es conveniente verificar el orden e intervalos para la introducción de cada aditivo y la compatibilidad entre ellos, con el fin de que eventualmente no interfieran entre sí.

Otros de los aspectos que se deben considerar en la planeación y selección de la planta tienen que ver con las diferentes áreas que la componen, así como con el tránsito vehicular a que se verá sujeta. Por considerar que estos aspectos pueden incluirse en los trabajos previos, estos detalles se tratan también en la cláusula 4.1, "Trabajos preliminares", relativa a las actividades previas en los procesos constructivos.

b) Mezclado en el camión

La operación de "mezcla seca" o mezclado en camión consiste básicamente en cargar directamente los camiones mezcladores en la planta. De esta manera, el conductor del camión mezclador se responsabiliza de mezclar el concreto. Éste es aceptado una vez que el camión ha cumplido con el mezclado.

Tal como se menciona en el párrafo precedente, el conductor del camión es el responsable de efectuar el mezclado final del concreto, si bien el operador de la planta es el encargado de dosificar y descargar los materiales de las tolvas pesadoras a los camiones. Normalmente, el conductor del camión completa el mezclado en la planta antes de salir al lugar de colocación. De esta manera, tiene la oportunidad de revisar que los componentes y las mezclas cumplen en lo general con las características especificadas. Por otro lado, el mezclado también puede ser completado en el sitio de entrega, por ejemplo, en un lugar de espera, o definitivamente en el mismo sitio de recepción.

Los camiones vienen equipados con contador de revoluciones y los más modernos con un dispositivo que puede estimar el revenimiento con una aproximación de 1.2 cm. De todos modos, esta última propiedad debe verificarse conforme a la norma vigente.

Es común que las exigencias de proyecto para un concreto mezclado en camión incluyan la norma AASHTO M 157 o las normas ASTM C 94 y NMX-C-155, ambas aplicables para este tipo de concreto. Adicionalmente, las últimas normas mencionadas establecen que cuando un camión realiza todo el proceso de mezclado, son necesarias de 70

a 100 revoluciones de la olla o de las aspas a la velocidad de rotación designada por el fabricante como velocidad de mezclado para producir la uniformidad especificada en el concreto. Nunca se deben dar más de 100 revoluciones a la velocidad de mezclado. Las rotaciones en exceso se deben dar de acuerdo con lo que el fabricante del camión determina como velocidad de agitación. Esta última varía normalmente entre 2 y 6 RPM, mientras que la velocidad de mezclado se encuentra en el rango de 6 a 18 RPM.

Resulta buena práctica de la empresa contratista visitar, antes del inicio de los trabajos de pavimentación, las instalaciones de producción del concreto. Esto tiene como fin que tanto el fabricante como el contratista formulen y acuerden un proceso de producción y de control de calidad que asegure que los materiales resultantes cumplan con las especificaciones. De igual manera, la empresa que produce el concreto debe visitar previamente el sitio de pavimentación, para familiarizarse con los problemas de acceso, demoras, condiciones ambientales, etcétera.

Dentro de los requerimientos de obra, la empresa contratista (o cliente) debe solicitar al fabricante de concreto un producto que cumpla ciertas especificaciones aplicables tanto a cada constituyente de la mezcla como al producto terminado en el momento de la entrega. Asimismo, también deben estar de acuerdo en cuanto a esas especificaciones, así como a los controles de calidad que se vayan a adoptar. Dentro de los más relevantes se pueden citar los siguientes requerimientos:

- Cementantes que se van a emplear (cemento, cementos combinados, cenizas volantes, escoria, etc.)
- Agregados y tamaño máximo de la grava
- Agua
- Aditivos (en cm^3 por kilogramo de cementante)
- Resistencia de diseño
- Revenimiento
- Edad de resistencia de diseño
- Si es bombeable o es tiro directo
- Volumen
- Rendimiento
- Criterios de aceptación de resistencias

En las especificaciones particulares del proyecto se incluir el tiempo máximo permisible del concreto dentro de la olla antes de su descarga. Los documentos de

construcción deben igualmente prescribir el número de revoluciones de mezclado y el número total de estas, antes de la descarga. En ocasiones, algunas plantas establecen como criterio general mezclar completamente el concreto antes de salir de la planta; de esta manera, el conductor del camión tiene oportunidad de inspeccionar la mezcla antes de salir, y posteriormente asignar la velocidad de agitado al tambor durante el transporte al sitio de entrega. Cuando las mezclas se sujetan a revoluciones altas durante tiempos prolongados, existen fuertes posibilidades de que el concreto

- pierda resistencia.
- aumente su temperatura.
- pierda aire incluido de manera importante y, finalmente,
- pierda de forma rápida su revenimiento

También las normas referidas limitan el tiempo para descargar el concreto a 1.5 horas, o antes de que se completen 300 revoluciones después de haber agregado el agua a los demás ingredientes o de introducir el cemento a los agregados.

3.3 EQUIPOS RECOMENDABLES PARA EL TRANSPORTE DEL CONCRETO. MODIFICACIONES AL EQUIPO DE TRANSPORTE PARA ASEGURAR SU CALIDAD

Puesto que durante el transporte de las mezclas al lugar de su colocación estas no están exentas de irregularidades potenciales, que pueden incluso amenazar la consistencia y uniformidad de las diferentes producciones de concreto hidráulico, se deben cuidar especialmente tres aspectos: retrasos, endurecimiento y secado, y segregación.

Retrasos. Es muy importante reducir al máximo el lapso comprendido entre la producción y el tendido del concreto. Por razones obvias, los tiempos de traslado deben planearse lo más acertadamente posible, es decir, programar los recursos humanos y de equipo acordes con los volúmenes por producir de acuerdo con los programas de obra. Este tipo de previsiones tiene la finalidad de hacer óptimas la producción y la colocación de las mezclas.

Endurecimiento y secado. Como se ha referido en diferentes secciones precedentes, el concreto empieza su fraguado desde el momento en que se mezcla el cemento con el agua. La mezcla generalmente no

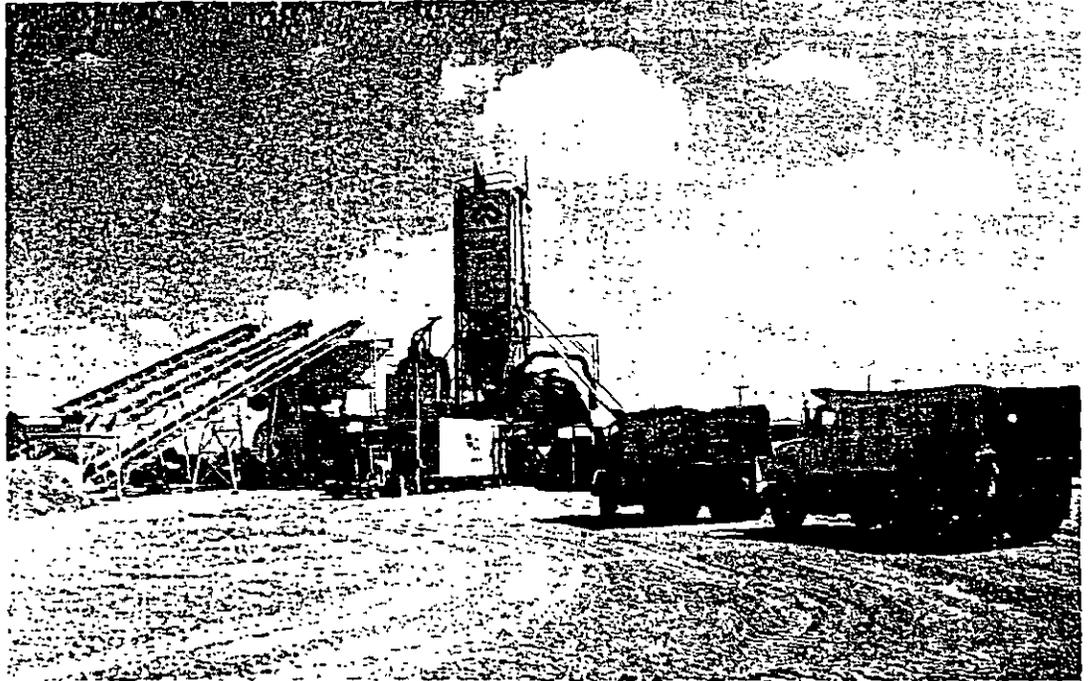
presenta problemas de colocación, vibrado y terminación durante los primeros 30 minutos que siguen al mezclado. Además, estas actividades se pueden desarrollar también sin contratiempos durante un lapso no mayor de una hora y media, siempre y cuando el concreto se transporte en camiones cuyas ollas giren a la velocidad de agitado. Se debe tener claro que los tiempos disponibles para traslados de mezclas se deben reducir de manera substancial cuando las condiciones climáticas son adversas: clima cálido, velocidad fuerte del viento, poca humedad ambiental, aditivos acelerantes, etcétera.

Segregación. Es la tendencia de las partículas gruesas a sedimentarse o incluso a separarse del mortero cemento-arena, lo cual da lugar a que una parte del concreto presente gran presencia de fracción fina mezclada con agua, mientras que en la otra predominan las partículas gruesas. Esto ocasiona que en la primera se presente una fuerte tendencia a la contracción por secado y menor resistencia a la abrasión, mientras que en la segunda parte, la más gruesa, haya grandes oquedades que dan lugar a "apanalamientos" e incluso dificultan su acomodo por compactación. Por este tipo de consideraciones, las mezclas y su respectiva transportación, asociada esta última a los tiempos de traslado, deben evitar la segregación.

3.3.1 Camiones de transporte

Los camiones que se utilizan para transportar el concreto se pueden clasificar genéricamente en agitadores y no agitadores. Los primeros permiten mayores tiempos de traslado, si además son mezcladores, no requieren una planta de mezclado central, sino sólo una planta dosificadora, ya que el mezclado puede realizarse totalmente en la olla. Tienen la desventaja de que requieren un control de calidad más riguroso que el necesario para el mezclado en una planta central. Los camiones sin agitador tienen el inconveniente de que sólo funcionan en distancias relativamente cortas, y requieren buen estado de la superficie de rodamiento del camino, otras de las desventajas de los camiones sin agitador son el mayor riesgo de segregación, y la necesidad de una altura libre para levantar la caja para la descarga de las mezclas al punto de tiro. Sin embargo, su costo es muy competitivo en comparación con los camiones mezcladores, pues es inferior al de éstos tanto en adquisición como en mantenimiento. En la figura 3.5 se muestra un aspecto de una planta central y la entrada de los camiones para ser cargados.

Figura 3.5. Vista de vehículos formados para recibir carga en una planta de mezclado central.



3.3.2 Entrega

La empresa contratista recibe una boleta de conformidad cuando el conductor hace entrega de las mezclas en el sitio de colocación. Una vez que el comprador o contratista verifica las características del concreto solicitado, entonces es cuando se produce la descarga.

Cuando el contratista no está del todo convencido de que el revenimiento sea satisfactorio, se repetirá la prueba y si resultara menor al aceptable se puede agregar una porción de agua para aumentar la trabajabilidad de la mezcla. Si esta adición de agua ocurre, a la olla deberán aplicarse 30 revoluciones a velocidad de mezclado para lograr un mezclado íntimo del agua adicional en el lote de mezclado. No deberá rebasarse el límite superior del revenimiento aceptable a fin de no alterar la relación agua/cementantes.

3.4 EQUIPOS DE PAVIMENTACION DE CONCRETO

3.4.1 Equipos de pavimentación con cimbra fija

Los equipos de pavimentación con cimbra fija se utilizan principalmente para calles, caminos locales, aeropuertos y caminos de poca longitud y geometrias variables. En esta modalidad, las cimbras cumplen el propósito de mantener el concreto, conforme pasa el equipo de extendido, en la posición correcta en cuanto a alineamiento y niveles, además de servir como superficie

de apoyo y deslizamiento de los equipos. Algunas de sus ventajas son las siguientes:

- ❑ Por su complejidad variable, se pueden conseguir equipos muy pequeños que permiten colocar el concreto de manera económica.
- ❑ Se pueden cumplir fácilmente las tolerancias, y se puede contar con espacio libre a los lados.
- ❑ Se pueden realizar cambios de ancho con facilidad.
- ❑ En intersecciones, se puede disponer de espacios abiertos.
- ❑ Se facilita el manejo del desvío del tránsito vehicular.
- ❑ En entregas pequeñas de concreto se puede mantener buena calidad.

El esquema de la figura 3.6 presenta en su parte izquierda un equipo de extendido previo, mientras que en la parte posterior —parte derecha del esquema— viene propiamente la pavimentadora, que incluye un bastidor para dar un microtexturizado. Ambos equipos circulan sobre las cimbras previamente ancladas en la capa de apoyo. Un equipo de pavimentación con cimbra fija consiste básicamente en una unidad distribuidora de concreto, un mecanismo para la inserción de pasajuntas de acero, vibradores para la consolidación del concreto y una enrasadora para eliminar irregularidades y conseguir las pendientes requeridas en la superficie (bombeo) en sección transversal del pavimento. Como equipo complementario, se requiere lo siguiente:

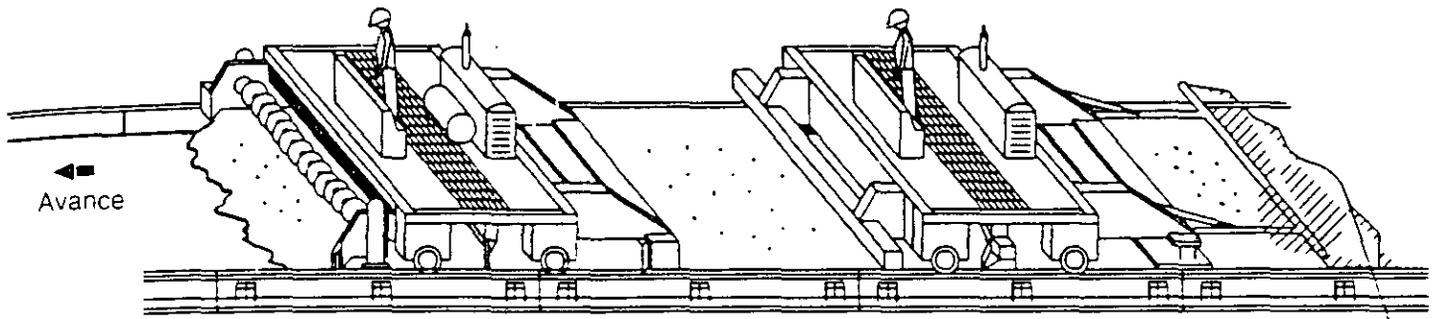


Figura 3.6 Tren de pavimentación con cimbra fija.

- ❑ Bandas, reglas y llanas para el terminado final y para proporcionar al pavimento una superficie lisa, libre de depresiones e irregularidades
- ❑ Equipo manual o mecanizado para lograr el texturizado, necesario para hacer la superficie antiderrapante
- ❑ Equipo o dispositivo manual o automatizado para la aplicación de la membrana de curado
- ❑ Equipo para hacer los cortes en losas y aplicar el material de sello de juntas

En la figura 3.7 se muestra un tren completo de pavimentación, en donde aparece también un carro de acabado para aplicar el texturizado y curado de las losas. Antes de proceder al tendido y colocación de cimbras se deben colocar las estacas y líneas de control auxiliares, necesarias para el perfilamiento correcto del futuro pavimento. Esta actividad preliminar se hace mediante topografía. Se debe asegurar que las cimbras se coloquen con precisión respecto a las líneas de control de rasante de acuerdo con el proyecto o a bancos de nivel

que se utilicen de referencia. Las cimbras deben apoyarse sobre una capa de subbase convenientemente perfilada y de compactación uniforme. El éxito o el fracaso de un proyecto de pavimentos rígidos con cimbra fija depende en gran medida del cuidado que se tenga en la disposición del cimbrado.

Por lo regular, una cimbra fija para pavimentación con concreto hidráulico consiste en una sección con elementos de acero superpuestos (figura 3.8). La cara en contacto con el concreto es del mismo peralte que el que tendrá la sección del pavimento. En su parte inferior tiene adosada una placa lo suficientemente ancha —de igual dimensión aproximada al espesor del pavimento— para darle estabilidad al paso del equipo de extendido. Este último es sostenido durante la operación por medio de un perfil a manera de nel, que forma parte de la cimbra. Ésta se fija a la capa de subbase o de apoyo mediante clavijas o clavos de suficiente tamaño para garantizar su inmovilidad. Las cimbras incluyen arriostramientos laterales para evitar su pandeo, tanto antes como durante el proceso de colocación de las mezclas.

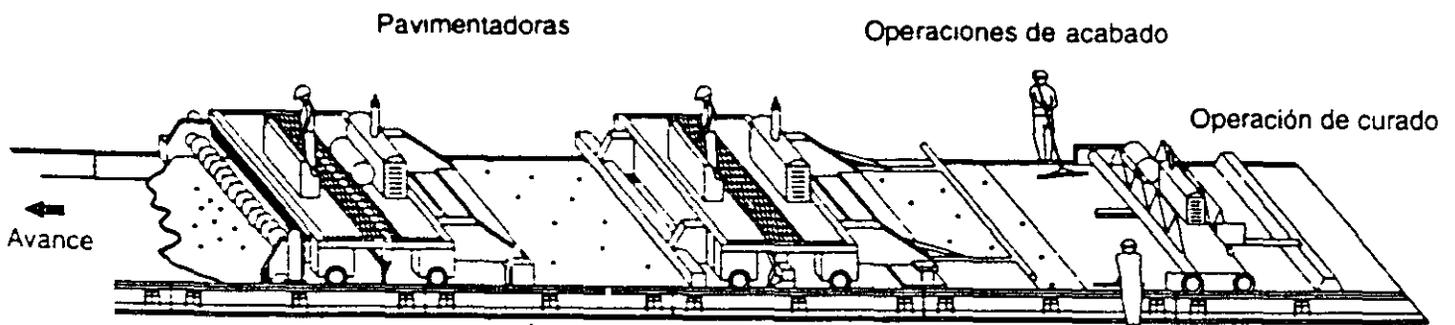


Figura 3.7 Máquinas de enrasado, acabado y curado.

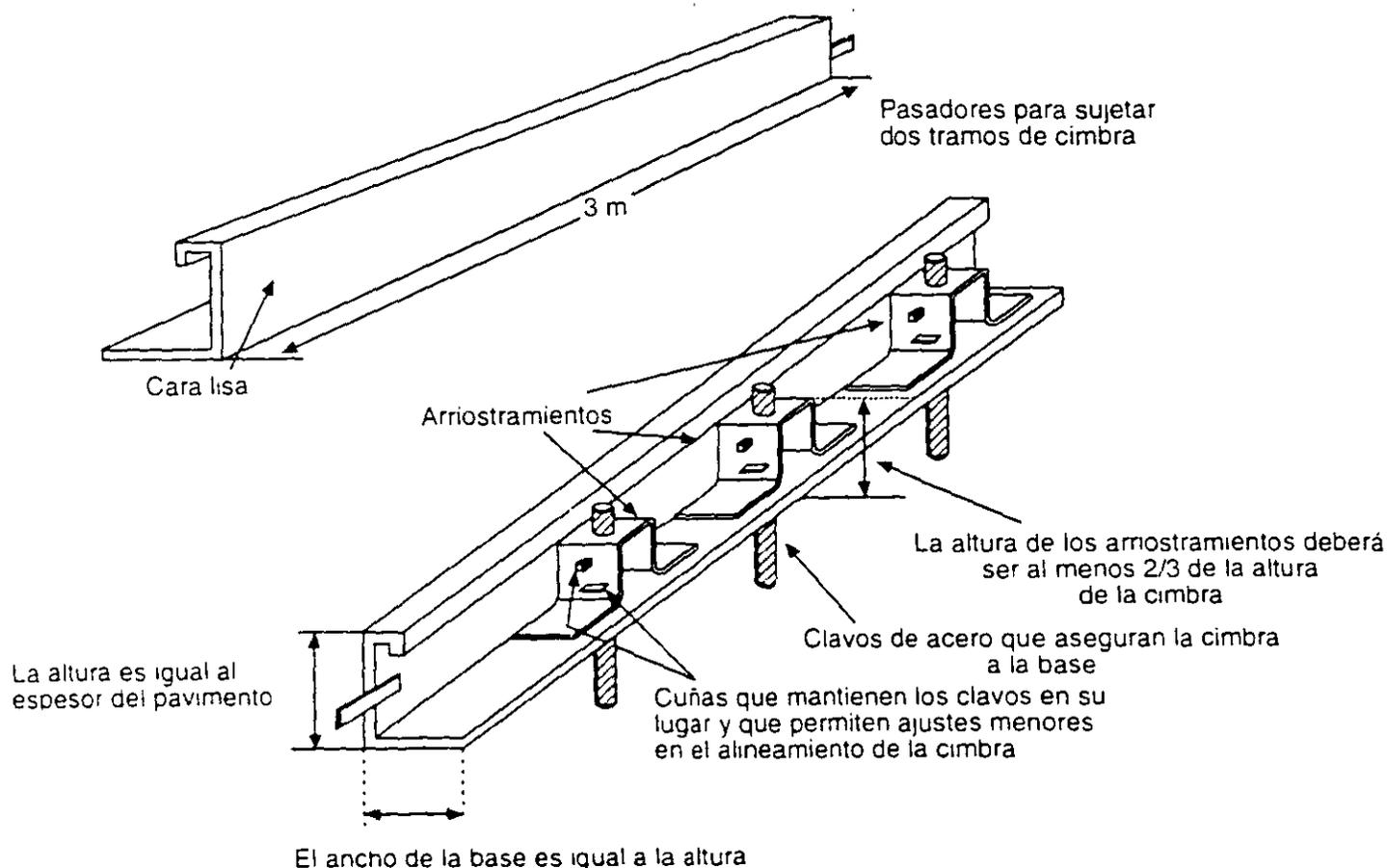


Figura 3.8 Cimbra típica de pavimentación.

Antes de su utilización, las cimbras deben ser inspeccionadas para verificar que cumplen con lo especificado en los proyectos. Es típico que los requerimientos incluyan los siguientes requisitos:

- Elementos metálicos de 5 a 6 mm de espesor por 3 m de longitud.
- Altura de las cimbras igual al espesor de proyecto del pavimento.
- Ancho de cimbra igual a su altura.
- Placas de arriostramiento que deben tener al menos $\frac{2}{3}$ del espesor o peralte de las cimbras.

En la figura 3.9 se muestra el detalle del arriostramiento. Los pasadores o cuñas de las placas de refuerzo tienen dos funciones: una es dar pequeños ajustes a la posición de las cimbras, mientras que la segunda es fijar la posición de estas últimas en la base de apoyo, o sea, fijar la posición del pasador o clavo. Al tener las cuñas sección variable, su posición afecta la distancia entre la cara recta de la cimbra y el pasador, de manera que, si se mueve más la cuña interior respecto de la exterior, la cimbra

tenderá a moverse hacia el interior de la sección por pavimentar.

Es frecuente que las especificaciones demanden que la parte superior o patín de la cimbra presente desviaciones respecto a un plano recto ideal no mayores de 3 mm en una longitud de 3 m. Asimismo, la cara de la cimbra que contendrá el concreto no debe exhibir desviaciones mayores de 6 mm respecto a un plano perfecto en 3 m. Ambas imperfecciones se podrán medir mediante el empleo de una regla recta de 3 m de largo (figura 3.10).

Las cimbras deben cumplir con los requisitos adicionales siguientes:

- Las secciones de cimbra adyacentes deben permitir un ajuste firme de sus extremos.
- De preferencia, cada sección de 3 m debe estar sujeta al piso de apoyo con tres pernos o clavos para que durante el paso del equipo de colocación, enrasado no sufra dislocaciones ni vibraciones excesivas.

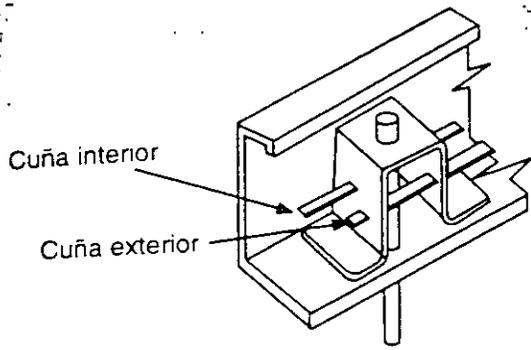


Figura 3.9 Detalle del arriostreamiento, cuñas y pasadores en cimbra fija.

□ Antes de emplearse, las cimbras deben estar limpias y lubricadas

Para el caso de retornos o curvas muy cerradas, se pueden emplear secciones de cimbra flexibles de madera o de acero, cuidando siempre los requisitos que se indicaron anteriormente

3.4.1.1 Secuencia resumida de trabajos

i) Preparación del terreno

Los trabajos se iniciaran con una preparación adecuada

del terreno natural. En este punto, conviene recordar que del terreno recién descubierto deberá removerse toda presencia de materia orgánica, materiales excesivamente blandos propensos a remodelarse, fragmentos de roca, etc., para posteriormente proceder a la escarificación y compactación del terreno natural. En caso de requerir una capa de subbase o subrasante, ésta se tenderá y compactará de acuerdo con los requisitos de calidad dispuestos en el proyecto. Si bien la colocación y los cuidados que requiere esta capa no son tan exhaustivos como en el caso de pavimentación con cimbra deslizante, se recomienda tender las capas de subrasante y de subbase con la calidad especificada en el proyecto, ya que esto contribuye a una mejor superficie de rodamiento final.

b) Línea de control

Cuando se hace uso de una afinadora mecánica, se requiere colocar las líneas de guía en dos etapas. Primero, se instalan líneas de referencia sujetadas a varillas ("pines") exteriores que están situadas entre 0.40 y 0.80 m fuera del borde del pavimento de proyecto, dependiendo de las características del equipo. El espaciamiento típico necesario es del orden de 10 m.

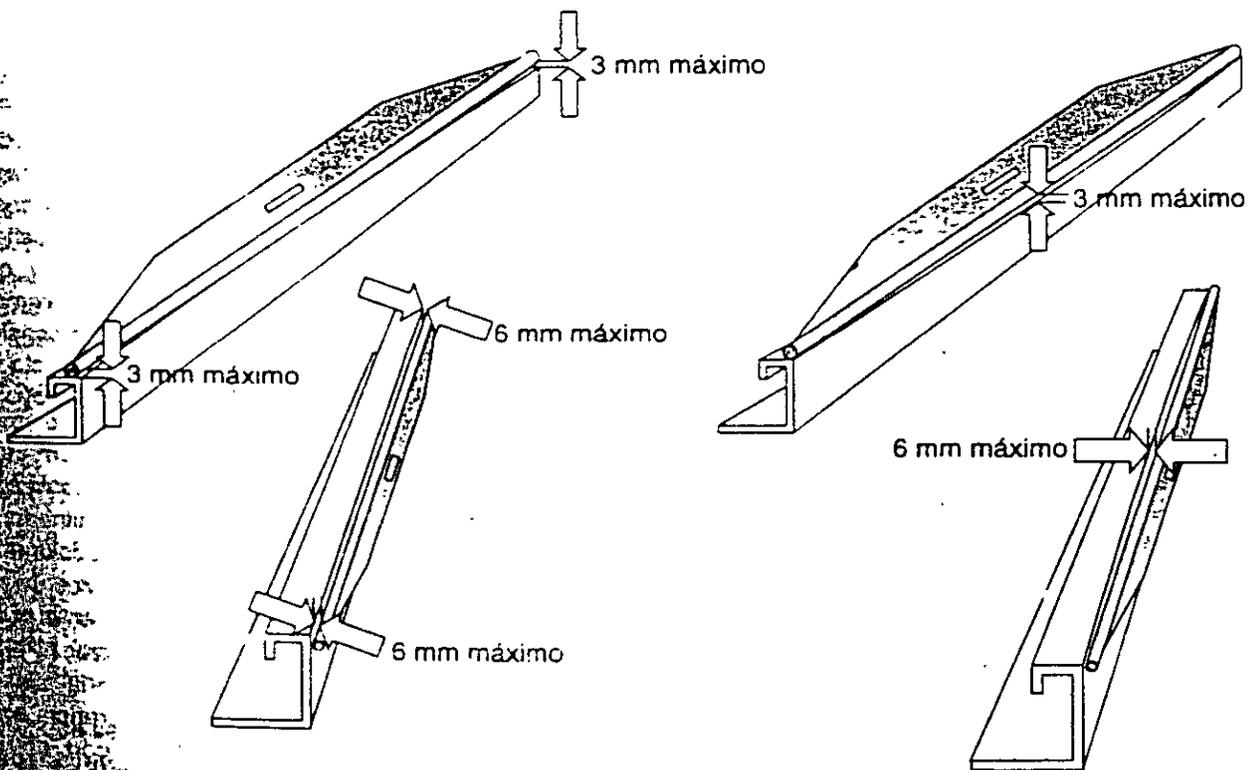


Figura 3.10 Tolerancias y longitud de pandeo.

Después se coloca la línea guía propiamente dicha para las cimbras.

Para la instalación de las líneas guía de las cimbras, es necesario fijar los pernos o pasadores, con objeto de que al menos una de las orillas del pavimento quede en la posición correcta. Para la fijación de pernos se deben utilizar las líneas de control dejadas en el exterior del área del futuro pavimento. Posteriormente, se presenta la línea guía sobre el canto superior de la cimbra, que a la postre indica el espesor proyectado del pavimento. Establecido el nivel correcto de tales líneas, éstas se instalan conforme a la posición de los pasadores previamente hincados en la orilla. Se deben colocar pasadores de cimbra frente a cada varilla o "pin" de referencia exterior. Después, con la ayuda de un nivel de mano, se puede establecer con marcas de lápiz de color en los pasadores de cimbra la posición correcta de las líneas guía, esto es, la rasante de proyecto. Luego se sujetan las líneas a los pasadores, verificando que estén bien tensadas para evitar en todo momento catenarias entre las varillas de control. Estas últimas no necesitan ser clavadas, ya que únicamente sirven de control de elevaciones. Por otro lado, bastará con controlar el alineamiento correcto de uno de los lados del pavimento, pues el correspondiente al de la otra orilla queda establecido midiendo siempre el ancho de sección.

Una vez que ya quedó fijada la línea de control para la cimbra, siempre será necesario revisar que todas las sujeciones a los pasadores estén correctas, cuidando que en el proceso de tensado no se provoque deslizamiento de las cimbras con respecto al nivel correcto ya marcado con lápiz o crayón. Esto se podrá efectuar con ayuda de un nivel de mano.

c) Colocación de las cimbras

Este paso es crítico, pues se requiere que las cimbras estén colocadas de acuerdo con la línea de control, debiendo estar niveladas y apoyadas sobre una superficie uniforme. La uniformidad y el nivel del pavimento dependen enteramente de los cuidados que se tuvieron al colocar las cimbras. En todo momento se debe garantizar que el apoyo de estas últimas sea uniforme, y preferentemente sobre el material controlado que compone la capa de subbase o subrasante, según corresponda, nunca sobre materiales inestables, como pueden ser fragmentos granulares o de desperdicio.

Antes de su instalación, todos los segmentos de cimbra deben ser revisados cuidadosamente. Los pasadores deben ser rectos y deben afianzarse efectivamente a la cimbra en la capa de apoyo, por lo que nunca deben que

tener juego en los agujeros por donde se hacen pasar en las cimbras. De la misma manera, los seguros en junta, pasadores de unión de los diferentes segmentos, deben estar desgastados ni doblados, para que no permitan movimiento entre las piezas adyacentes, pues no hay que olvidar que el subsiguiente paso del equipo pudiera provocar desplazamientos importantes entre las piezas, ocasionando con ello cambios bruscos de pendiente e irregularidades en la superficie de concreto recién colocada.

Las cuñas que actúan como seguros en los pasadores previenen el movimiento de las cimbras hacia los lados, manteniendo a éstas en su posición correcta, por lo que se deben revisar frecuentemente, ya que no es remota la posibilidad de que el paso del equipo de pavimentación que circula sobre la cimbra tienda a aflojar tanto los pernos como las propias cuñas. Tal como se menciona en párrafos precedentes, los pernos o pasadores deben empotrarse lo suficiente en la superficie de apoyo, de manera que las cimbras queden totalmente apoyadas y sujetas al piso.

La orilla superior interna de las cimbras debe coincidir con las líneas de control. Ello normalmente se consigue mediante ajustes que permiten la manipulación de cuñas interior y exterior que acompañan a cada pasador.

Cuando el nivel superior de las cimbras se localiza por encima de la línea guía, se procederá a realizar los cortes necesarios de material de la capa de base. Por el contrario, cuando se localiza por abajo, se procederá a removerla y a colocar un material de relleno convenientemente compactado para elevarla hasta el nivel de rasante requerido. Para estos propósitos se pueden utilizar camas de material granular o aun fragmentos de roca triturada, con tamaño máximo que permita el acomodo eficiente de la capa. En ocasiones, esta última solución se aplica a todo un proyecto como una medida de garantía para una base de apoyo firme para las cimbras.

Antes de proceder al colado del concreto, es necesario revisar cuidadosamente los niveles y el alineamiento. Esto normalmente se hace mediante inspección ocular, pues los errores de alineamiento y desniveles de juntas de unión serán muy obvios. Sin embargo, en el caso de detectar errores menores, se pueden utilizar niveles de mano y reglas de 3 m. Hay que verificar la alineación horizontal respecto a las varillas de referencia o ("pines"), y los anchos de sección, con el fin de asegurarse de que cumplen con lo especificado en el proyecto.

En el caso de que el proyecto especifique el empleo de juntas machihembradas, éstas se colocarán prefabricadas después que las cimbras metálicas ya hayan sido instaladas en su posición correcta. La forma y el peralte deben ser necesariamente iguales que la cara vertical de la cimbra que recibirá el concreto. Su forma y dimensiones se ajustarán a lo que indique el proyecto, y podrán ser hechas en taller.

Cuando se dejen las preparaciones para las varillas de sujeción o de amarre en juntas longitudinales, se debe tener en cuenta que tales varillas siempre deben quedar en un plano ortogonal con la línea de tendido, es decir, a la cara de las cimbras.

Para garantizar que el equipo que circule sobre la cimbra tenga una longitud de trabajo suficiente para dejar la superficie de pavimento a los niveles requeridos, resulta siempre mejor colocar una longitud de cimbra mayor a la requerida.

d) Cimbras en curvas

Al igual que en las secciones en tangente, cuando se empleen cimbras flexibles de madera o de acero, su altura deberá ser igual al espesor del pavimento por colocar. Se pueden utilizar cimbras metálicas cuando el radio de curvatura sea mayor de 30 m. En una curva que no esté muy cerrada se pueden emplear secciones de cimbra metálica de 3 m de longitud, siempre y cuando se forme un arco suave, para que el equipo de colocación manobre sin brusquedad y deje una superficie libre de irregularidades.

También en este caso, los extremos de las diferentes secciones deben permitir un ajuste correcto entre las piezas para que en las zonas de juntas no se presenten movimientos con las maniobras de los equipos. De lo contrario, se obtendrá una superficie con muy alta rugosidad.

En curvas muy cerradas, con radios de curvatura menores de 30 m, la empresa contratista puede emplear cimbras metálicas flexibles, aunque esto no siempre es posible, dada la variabilidad del tamaño de las curvas. En estos casos críticos se puede emplear cimbra de madera para seguir la configuración horizontal. Sin embargo, ello implica que en estos tramos el equipo no pueda transitar sobre la cimbra, esto se puede conciliar si la empresa contratista logra autorización para colocar y terminar estas secciones con equipo manual.

Una vez que se ha colocado la cimbra flexible, entonces se deberá revisar su posicionamiento respecto a los planos de proyecto. Cualquier ajuste podrá realizarse en

esta etapa. En ocasiones, para ejecutar las curvaturas de cimbra son necesarios algunos pasadores adicionales. Éstos podrán emplearse tanto en el exterior como en el interior de las cimbras, a condición de que sirvan para sujetar los elementos de manera provisional, y que sean retirados una vez que ya se haya colocado el concreto y antes de proceder a aplicarle su terminado final.

e) Guarniciones

En caso de que se construyan guarniciones integrales, sean con equipo manual o mecánico, el cimbrado de la guarnición se deberá unir hacia la parte superior de la cimbra para el pavimento, con las profundidades especificadas en el proyecto. Las guarniciones prefabricadas se colocan en posición con montacargas. Por otro lado, algunas pavimentadoras permiten el coiado de las guarniciones conjuntamente con el pavimento.

3.4.2 Equipos de pavimentación con cimbra deslizante

El equipo de pavimentación con cimbra deslizante consiste básicamente en un elemento de compresión o molde que está suspendido de un chasis, el que a su vez es soportado por cuatro cilindros hidráulicos, uno en cada esquina. Estos postes de apoyo se operan hidráulicamente y tienen carrera variable entre 0.9 y 1.1 m. Estos a su vez van unidos a dos sistemas de orugas. La máquina extendedora cuenta además con un conjunto de vibradores de inmersión en "L" y con un tornillo distribuidor que reparte las mezclas a lo ancho de la sección nominal o extendida de la máquina. Tiene además una charola de vibración por contacto. El equipo comúnmente dispone de sensores que hacen contacto con las cuerdas de alineamiento. Estos sensores, de hecho, son los que le dan dirección al equipo y proporcionan los alineamientos vertical y horizontal de las losas por construir. También, como se menciona con más detalle en el inciso 4.1.2, las cuerdas o líneas de alineamiento se acomodan en varillas a cada lado del camino, específicamente en las orillas, y su trazo y colocación se hace por medio de topografía.

El sistema de pavimentación con esta técnica está diseñado para recibir las mezclas, distribuirlas y extenderlas, vibrarlas, enrasarlas y terminar las losas en una sola operación.

Las pavimentadoras, dependiendo del modelo y tamaño, pueden estar montadas en dos o cuatro orugas. En este último caso, las cuatro pueden girar para seguir el

alineamiento horizontal y el vertical marcados por la línea de control. El sistema de orugas puede girar lo necesario para retraer todo el sistema telescópico y así lograr anchos más reducidos de trabajo, o aun para su transporte y autopropulsión en las maniobras de carga y descarga de la pavimentadora

Las placas que constituyen en realidad las cimbras deslizantes son ajustables en el plano vertical mediante gatos hidráulicos. Con esto se asegura un contacto firme entre el concreto fresco y la capa de apoyo, sin sufrir derrames de mezcla hacia los lados

Las potencias de equipos comerciales están en el rango de 142 a 400 hp. Algunos equipos recientes todavía son más potentes. Para dar una idea de la velocidad de trabajo, una de las máquinas más pequeñas, que trabaja a potencias de 142 hp, puede alcanzar velocidades de avance hasta de 18 m/min. Se utiliza para barreras separadoras, guarniciones, banquetas, etc. Conforme la máquina sea más grande, menor será la velocidad de colocación, por los altos volúmenes de concreto que extiende. Algunos cargadores pequeños sobre neumáticos incluso pueden ser adaptados con dispositivos de cimbra deslizante para construir guarniciones y camellones. Como ejemplo está el *Curbcat* desarrollado en Estados Unidos. Otro equipo pequeño de cimbra deslizante representativo es el *Power Curber*, el cual va montado en tres postes de apoyo y es capaz de tender franjas hasta de 3 m de ancho, opcionalmente puede extender hasta 5 m. Las placas laterales se pueden ajustar hidráulicamente para pavimentar espesores de hasta 40 cm, y sus charolas terminadoras son de 1.22 m de ancho, lo cual sugiere cualidades superficiales aceptables

de la losa ya terminada. Este equipo se emplea también para construir barreras separadoras, e incluso parapetos en puentes. Existen equipos aún más pequeños de esa familia, que pueden colocar concreto en guarniciones con curvas cuyo radio puede ser tan pequeño como 1.5 m, pueden colocar guarniciones y banquetas integrales hasta de 1.80 m de ancho, y barreras separadoras de hasta 1.20 m de alto.

Los anchos que pueden pavimentar están en los rangos de 9 a 15 m en una sola pasada, dependiendo de los modelos. Casi todos los modelos aceptan ampliaciones para incrementar sus anchos nominales. Habitualmente aceptan secciones adicionales ya prefabricadas del orden de 1.8 m de longitud.

Las pavimentadoras cuentan en su parte posterior con una charola que propiamente da el perfil de proyecto. Estas charolas están adosadas a un montaje que permite dar diferentes coronamientos en la superficie de la losa, esto es, con bombeo a una o más pendientes (figura 3.11).

De manera resumida, se puede mencionar que las máquinas pavimentadoras cuentan con:

- Tornillos distribuidores, situados frente a máquina, en su parte inferior. Su diámetro común de 40.6 cm.
- Una compuerta enrasadora, que regula la cantidad de concreto que se introduce entre la máquina y el terreno natural, y que de hecho es la que esta última utiliza para conformar la losa.

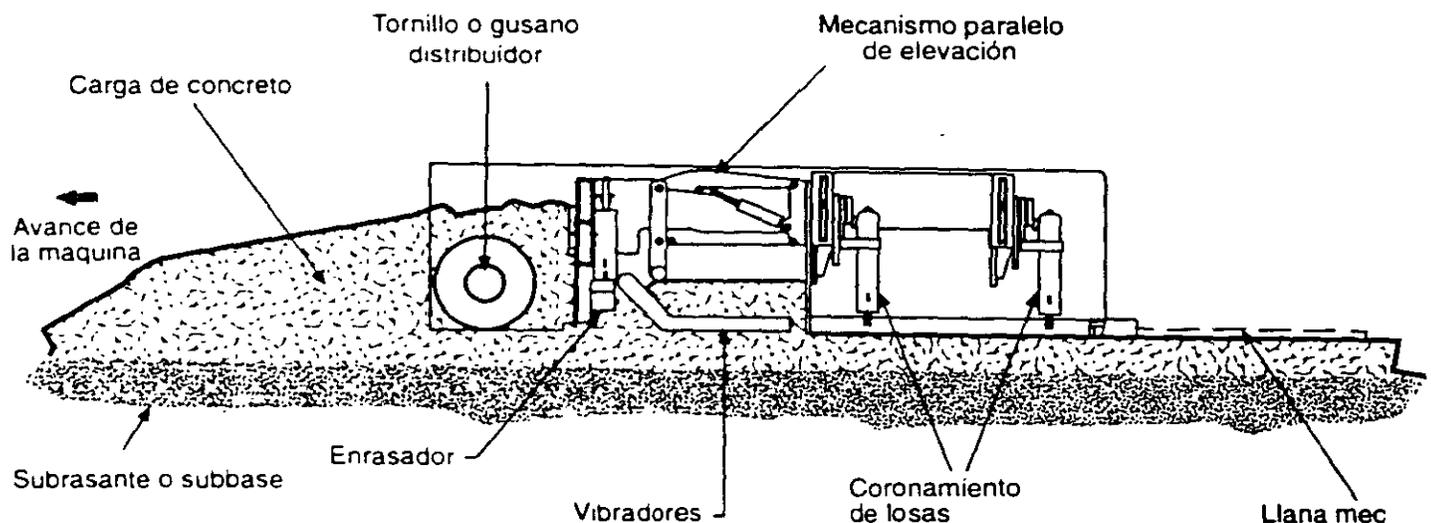


Figura 3.11 Croquis de los componentes de una pavimentadora de cimbra deslizante.

- Vibradores internos (típicamente 15, que funcionan con sistema hidráulico).
- ┘ Charola perfiladora. Está suspendida y soportada por el chasis inferior de la pavimentadora, de longitud típica comprendida entre 1.22 y 1.38 m, dependiendo del modelo.
- Charola vibroapisonadora que funciona con sistema hidráulico. Está integrada a la pavimentadora para el perfilamiento de la sección final, y se localiza en su parte posterior extrema, normalmente de 0.92 m de distancia. Estas charolas corrigen desviaciones menores de la superficie de concreto recién colocado.
- Sensores de alineamiento horizontal y control de elevaciones. Este sistema de control, conocido como "Hydra-Mation", permite controlar y regular hidráulicamente los gatos adosados a los postes que sostienen el chasis para que estos últimos controlen la dirección y elevación general de la pavimentadora
- Llana metálica terminadora. Viene complementada con tubería metálica por donde se hace circular agua, y cuenta con boquillas de aspersión para mojar ligeramente la superficie conforme actúa la llana. Esta pieza normalmente es del orden de 1.8 m de largo en algunos modelos. Su manejo es hidráulico y con controles eléctricos. La acción osciladora de la llana conforme se hace pasar a todo lo ancho de la sección del pavimento permite ocultar ligeras irregularidades superficiales tales como protuberancias, pequeñas oquedades, agregado grueso expuesto, etc. En la figura 3.12 se presentan esquemáticamente estos componentes.

3.4.3 Equipos opcionales

a) Equipos de extendido previo

Dadas las exigencias cada vez mayores de los dueños de los proyectos en lo relativo a la calidad de la superficie terminada, así como a un mejor acomodo de las mezclas, y finalmente, por cuestiones de productividad, recientemente se ha vuelto común considerar el empleo de extendedoras (*spreaders*) (figura 3.13).

Con estos equipos se busca dar un preextendido al concreto a todo lo ancho de la sección, y posteriormente pasa la pavimentadora para dar, sin mucha carga de concreto, los espesores y acabados de losa de acuerdo con el proyecto. Esta secuencia hace que las máquinas pavimentadoras nunca tengan que trabajar con sobrecargas de mezclas, minimizando así las eventuales irregularidades que se presentan cuando la máquina pavimentadora se levanta y se mueve sobre el concreto, en condiciones muy forzadas de empuje. El resultado final de estas anomalías es que la superficie presenta fuertes protuberancias inaceptables. Otra de las ventajas de este equipo es que puede aceptar dispositivos para recibir la carga de concreto en un recipiente de uso rudo, a partir del cual, y a través de bandas transportadoras de 0.92 m de ancho, se envía y deposita el concreto al piso y frente a los tornillos de distribución. Con este equipo complementario, se elimina el tránsito de camiones transportadores sobre la capa de subbase. Esto es especialmente ventajoso para el caso en que se coloquen siletas con pasajuntas, pues estos armazones no sufren deformaciones por las sucesivas cargas de mezcla.

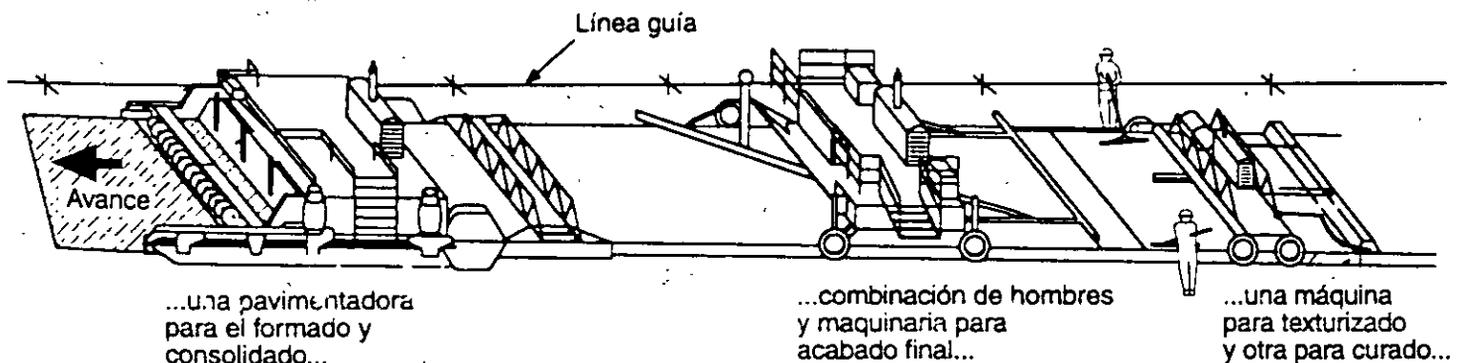
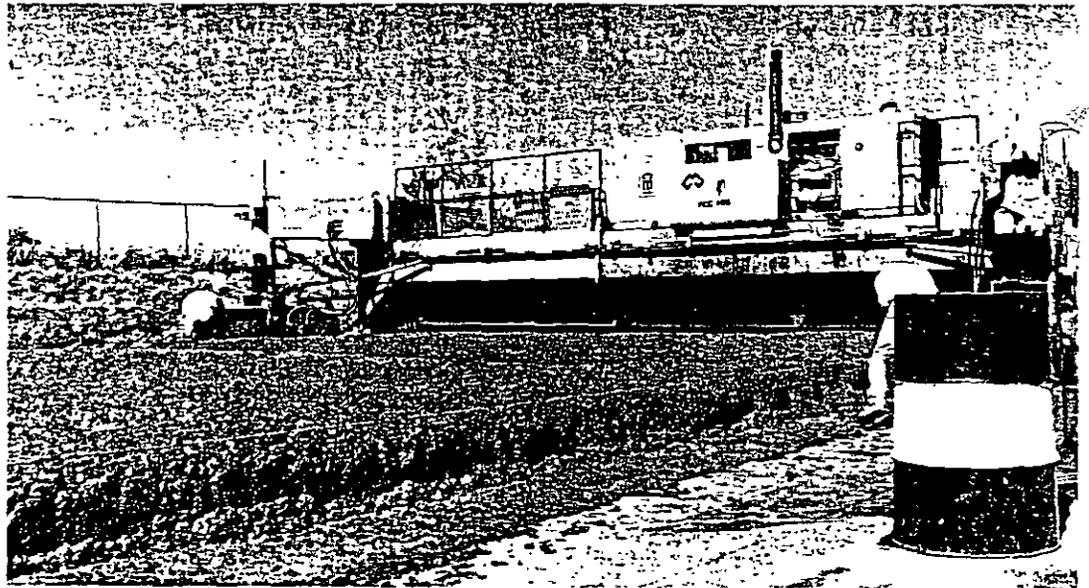


Figura 3.12 Tren de pavimentación con cimbra deslizante.

Figura 3.13 Equipo de extendido previo. El concreto queda listo para el paso de la pavimentadora.



Los anchos de trabajo, al igual que en las pavimentadoras, son variables, dependiendo de cada modelo. Además, mediante dispositivos extensores los anchos nominales de cada equipo pueden ampliarse.

Cuentan con un tornillo distribuidor cuyo diámetro (típico) está en el rango de 40.2 a 62 cm. El chasis puede estar montado en dos o cuatro orugas. Al igual que en las pavimentadoras, la regulación automatizada de elevaciones de sus cuatro postes de apoyo se hace con sistema hidráulico y sensores; estos últimos también controlan la dirección del equipo en el plano horizontal.

Los equipos de extendido previo de mayor tamaño cuentan con dos tornillos distribuidores y con dos tolvas con sus correspondientes bandas transportadoras una a cada lado. Además, tienen controles automáticos para su control horizontal, y también mecanismos que además le permiten ser autonivelables respecto a la rasante de proyecto. Este conjunto de propiedades lo hacen conveniente para su empleo en la ejecución de dos carriles al mismo tiempo.

b) Afinadoras y estabilizadoras

Estos equipos se utilizan cuando se requiere prácticamente eliminar irregularidades en la capa de apoyo y recortar espesores excedentes respecto a lo marcado en el proyecto, hasta tolerancias menores de 3 mm.

Son equipos autopropulsados que utilizan normalmente cuatro llantas extremas, y cuentan además con un rotor con control automatizado de profundidad de corte. Los equipos modernos manejan control direccional individual por llanta, lo cual hace que el equipo en su conjunto tenga mayor tracción en condiciones adversas.

Dentro de los usos que estos equipos presentan, se pueden considerar los siguientes:

- Estabilización de suelos para el empleo de materiales *in situ* –el tratamiento podría ser a base de cemento portland, cal, lechadas de cal, emulsiones asfálticas, cenizas volantes, etcétera.
- Recuperación de carpetas asfálticas deterioradas –dependiendo de las características del rotor y corte.
- Recorte de materiales en general.

Las profundidades máximas de corte del rotor son variables entre 40 y 50 cm, dependiendo de si se trata de recuperar carpetas asfálticas o solo la estabilización de suelos, respectivamente. Además, la herramienta de corte tiene anchos típicos de 2.44 metros.

Existen otras afinadoras que son capaces de recortar en dos carriles en una sola pasada. Este tipo de equipos utiliza dos tornillos y dos elementos de corte o cuchillas. De manera opcional, a algunos de estos equipos se les puede adicionar un cajón de dosificación para el extendido de mezcla de dos o más materiales, como es el caso de mezclas de suelo-cemento.

c) Dispositivos de inserción de varillas de sujeción

Si, por requerimientos de la obra, las varillas de sujeción en juntas longitudinales tienen que doblarse, como es el caso al construir carriles adyacentes, se insertan y se espera a que el concreto que las aloja ya esté endurecido, y después se doblan hacia la dirección paralela al cimbrado o eje del camino. Posteriormente, cuando termina la porción de carril, se procede al desdoblado de



Figura 3.14 Detalle de una varilla de sujeción.

las varillas a su posición correcta, esto es, totalmente perpendicular al borde de la losa. En algunos casos, conviene primeramente preparar un dobléz en el extremo libre de la varilla antes de su inserción, este dobléz se hace en ángulo recto en unos 10 cm de longitud para formar un apoyo que descansa sobre la capa de subbase.

Cuando se enderece la varilla, se deberá poner especial atención para que el extremo libre no tenga forma de "S"; la desviación de la varilla respecto a una línea recta no debe superar los 3 centímetros (figura 3.14).

La gran mayoría de los equipos modernos de pavimentación con cimbra deslizante cuenta con inserción automatizada de varillas de sujeción. Algunos modelos europeos utilizaban en sus inicios una rueda solidana con el bastidor que aloja la placa de inserción mecánica de pasajuntas. Esta última se describe en el

inciso siguiente. La rueda acciona un generador de impulsos y regula las funciones del insertador de varillas de sujeción. Sólo en estos modelos, este dispositivo va montado sobre el bastidor o placa insertadora de las pasajuntas que se describe en el inciso siguiente. Lo interesante de este equipo es que sólo se requiere que la placa de inserción se detenga, para insertar las varillas, sin detener el avance general de la pavimentadora.

Otra característica de los equipos modernos es que cuentan con una charola en la que se depositan temporalmente las varillas, antes de su utilización (figura 3.15).

d) Dispositivos de inserción de pasajuntas (DBI)

Los primeros esfuerzos por conseguir una máquina capaz de insertar pasajuntas y varillas de sujeción en una sola etapa y sin detener la máquina en cada zona de juntas, fueron hechos por GOMACO y la empresa suiza Walo¹. Respondieron a la necesidad de eliminar, por un lado, las irregularidades que dejaba en cada paro necesario el equipo para alojar pasajuntas o varillas de sujeción en forma mecánica en concretos de bajo revenimiento y, por otro, los problemas de planicidad en las zonas de juntas debidos a los taponamientos del concreto, ya que al ser éste relativamente seco, se podían presentar protuberancias inaceptables. Esta técnica, cuando se aplica bien, contribuye a eliminar los costos asociados de mano de obra y materiales para montar las pasajuntas en las canastillas. DBI corresponde a las siglas de *Dowel Bar Inserter*.

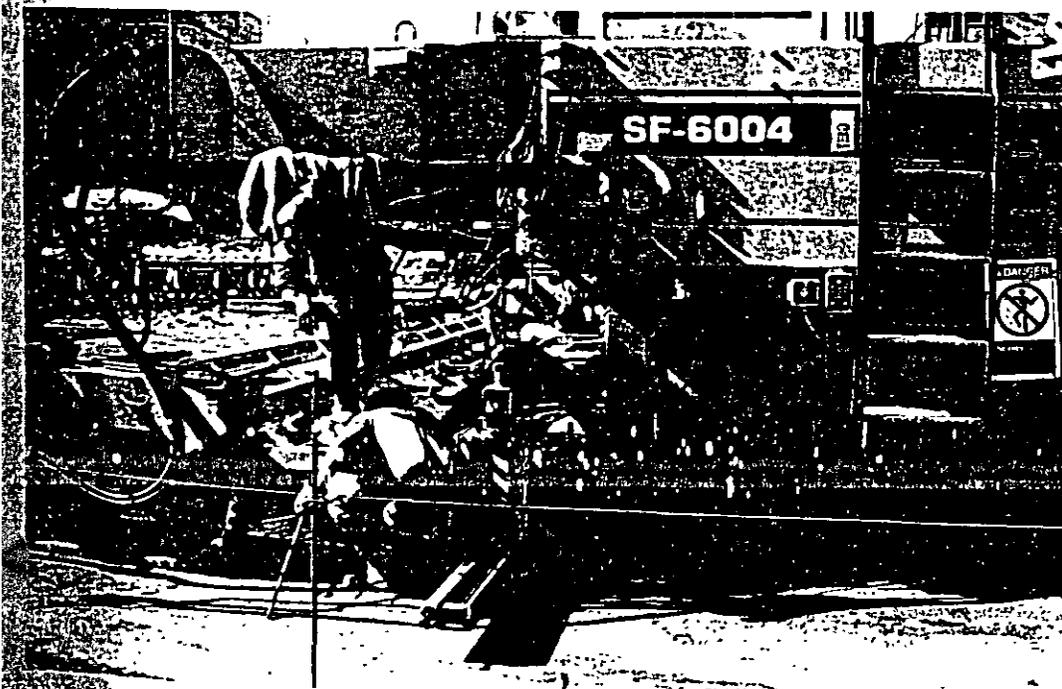


Figura 3.15 Detalle de la inserción automática de varillas de sujeción, empleando gato hidráulico y percusión.

La inserción de pasajuntas de manera automatizada en las zonas de juntas se logra, ya sea a través de la incorporación de un montaje que se sitúa en la parte posterior de la pavimentadora, mediante la extensión de los brazos traseros de esta última o bien inmediatamente detrás de los moldes o cimbras delanteras. La placa de inserción propiamente dicha (o bastidor que cubre todo el ancho de sección) va flotando libremente sobre el concreto una vez que éste ha sido enrasado; conforme avanza el equipo, y cuando es necesario mantener la placa en la posición correcta, ésta es accionada por dos gatos hidráulicos, al liberar la presión los citados gatos, la placa insertadora queda quieta por la acción del rozamiento y es cuando tiene lugar la inserción de pasajuntas. Esto último ocurre sin que la pavimentadora se detenga. Cuando el bastidor o placa de inserción está en su posición correcta, las pasajuntas se empujan por el fondo del bastidor mediante unas horquillas verticales, cada pasajunta con un par de estas últimas. Cada par de horquillas, mientras sumerge a la pasajunta, se somete a vibración, con objeto de acomodar y consolidar el concreto alrededor del acero, y buscando cerrar la huella dejada por esta operación (figura 3.16).

Una vez que las pasajuntas están ahogadas dentro de la mezcla en su posición de acuerdo con el proyecto, las horquillas se retraen, y el bastidor que las soporta se eleva por encima de la superficie por la acción de los gatos hidráulicos. Toda esta operación puede ejecutarse ahora de manera automatizada con equipos modernos, los cuales incluyen computadoras para programar las posiciones alternadas del bastidor de inserción, esto es, el control de elevaciones durante el proceso de avance e inserción de pasajuntas. Además, estos equipos pueden funcionar mediante operación manual del operador, en caso de ser necesario.

La velocidad del ciclo de inserción automática es claramente función de la velocidad de avance de la pavimentadora.

Algunos armazones que distribuyen pasajuntas de forma automática pueden contener hasta 180 piezas. Estos depósitos de suministro de pasajuntas se pueden cargar directamente en el sitio o, alternativamente, ya precargados montarse sobre ménsulas de asiento exteriores al chasis de la pavimentadora, a un lado del cabezal receptor que distribuye las pasajuntas. En este momento se alimenta al distribuidor de estas últimas, a velocidad constante sobre las ranuras de sostenimiento. Estas ranuras de asiento temporal tienen el espaciamiento considerado en el proyecto. En algunos modelos, cada ranura puede alojar hasta tres pasajuntas

en suspensión en una localización individual de éstas, conforme se van insertando, van siendo reemplazadas por el alimentador continuo en la ranura de asiento correspondiente.

La caída de las pasajuntas a la superficie de concreto se regula por medio de controladores hidráulicos, y puede ser programada por computadora, de manera que la inserción abarque todo el conjunto de pasajuntas necesarios para una junta transversal totalmente normal al eje del camino, o su posicionamiento y posterior inserción puede ser de manera individual, como en el caso de juntas transversales esviadas.

Las huellas dejadas por la inserción de pasajuntas quedan borradas por el paso de una regla de enrase final o de coronamiento, correctora, y que opera con movimiento oscilante y aplicando vibraciones. Esta regla se sitúa en la parte posterior del bastidor de inserción. Este proceso también corrige cualquier exceso de mezcla desplazada por la inserción de las pasajuntas.

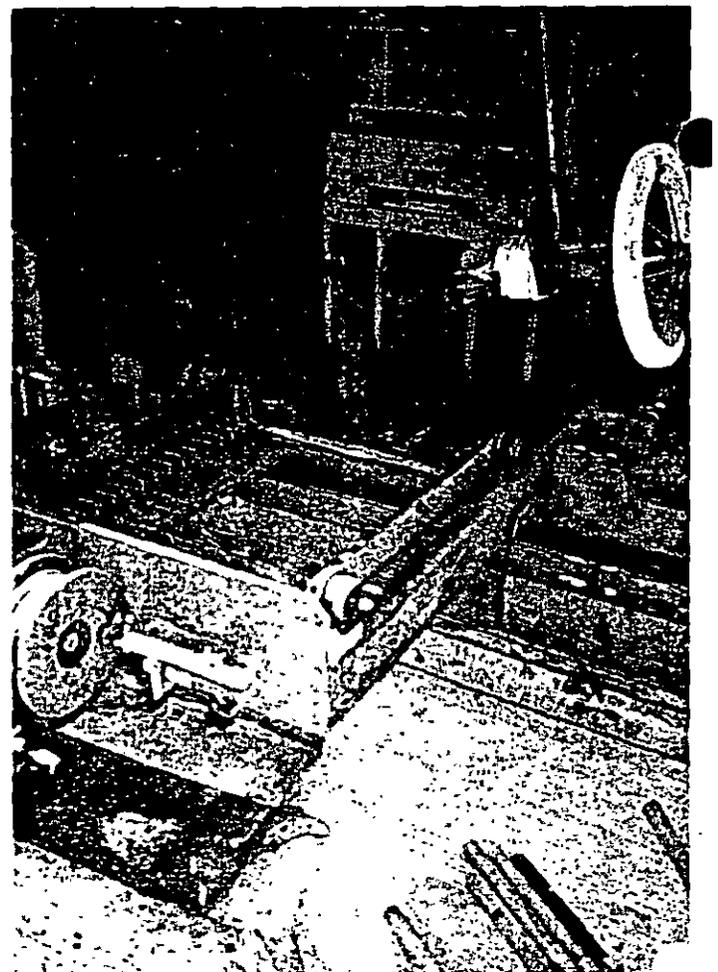


Figura 3.16 Detalle de las horquillas de inserción de un Dispositivo de Inserción de Pasajuntas (DBI).

Las pavimentadoras cuentan también con un depósito de arena que va alimentando las placas de inserción con la ayuda de un riel que distribuye las pasajuntas a lo ancho de la sección del pavimento.

La distancia entre pasajuntas, es decir la distancia de inserción, se puede regular. El dispositivo permite insertar las pasajuntas a la profundidad de proyecto aun en pavimentos que tengan bombeo superficial a dos aguas.

La llana mecánica situada en la parte posterior, la cual, como ya se mencionó, oscila en la dirección longitudinal y se desliza transversalmente al eje de trazo, rellena con mezcla y oculta las irregularidades producto del acomodo final dejado por las placas apisonadoras y por la inserción de pasajuntas.

e) Inserción con rotomartillos

Existen además equipos de barrenación con rotomartillos colocados en batería, capaces de hacer hasta cinco barrenos al mismo tiempo. Estos equipos se utilizan para preparar perforaciones que alojan pasajuntas en juntas frías, o en trabajos de reparación de pavimentos para restablecer la transferencia de cargas. Uno de estos equipos se presenta en la figura 3.17

3.5 EQUIPOS DE TEXTURIZADO

Una vez tendida y conformada la losa de concreto, se espera un tiempo suficiente, hasta que desaparezca el exceso del agua de sangrado después del afinado con llana de la superficie para posteriormente dar una pasada

con tela de yute o arpillera y así efectuar un primer microtexturizado que elimine la superficie necesariamente lisa que deja la llana metálica oscilatoria adosada a la parte posterior de la pavimentadora.

Las herramientas y los equipos necesarios para el texturizado dependen del tipo de éste. Existen varias formas de aplicar la textura a una vialidad, y en el proyecto se debe establecer con claridad el tipo, profundidades y tolerancias permitidas. Los tipos más comunes de texturizado son los siguientes²

- Texturizado con pasto artificial
- Texturizado transversal con peine
- Texturizado longitudinal con peine
- Texturizado transversal con escobillado
- Texturizado longitudinal con escobillado
- Texturizado transversal con aplicación longitudinal de arpillera

Prácticamente cualquier tren de pavimentación con concreto hidráulico incluye un carro texturizador. Estos equipos son relativamente ligeros, y a la vez relativamente potentes, pues cuentan habitualmente con un motor de 56 hp, y consisten en un chasis compuesto de secciones en canal y placas metálicas. Los anchos nominales que manejan van de 3.65 a 7.92 m, sin embargo, con secciones de ampliación pueden emplearse en anchos hasta del orden de 15 m. La consola central de mando se encuentra localizada en su parte superior para lograr una mejor visibilidad en los trabajos

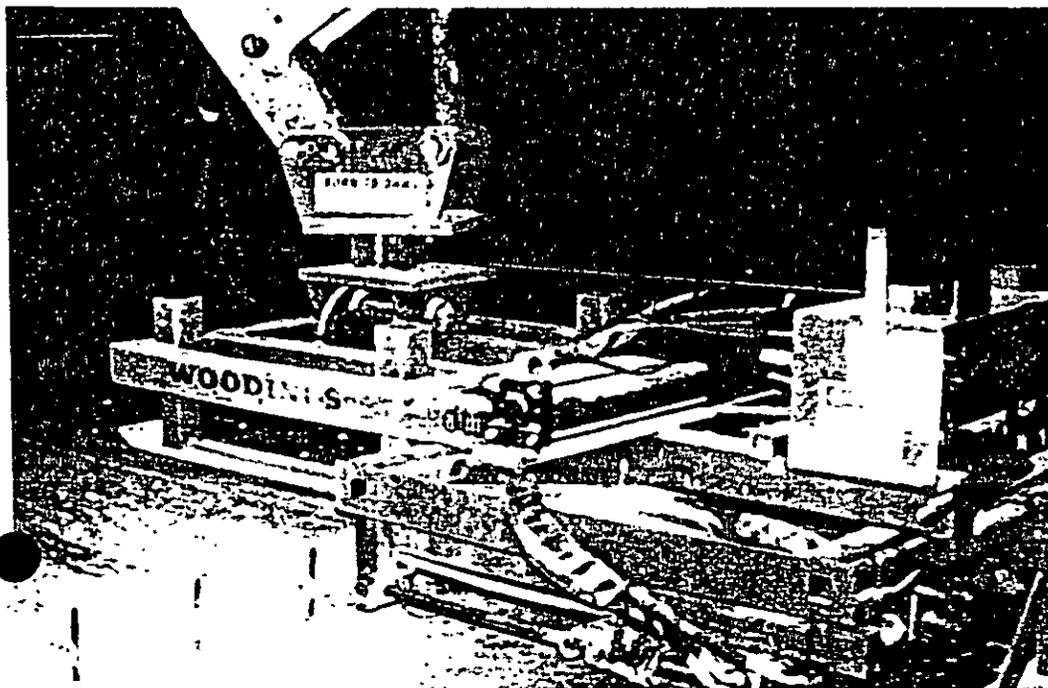


Figura 3.17 Rotomartillos en batería para perforaciones que alojen pasajuntas.

de terminacion. Sus movimientos direccionales pueden ser manejados manual o automáticamente, dependiendo del modelo. Las patas de soporte del chasis permiten, por otro lado, hacer ajustes a los anchos de sección y retraer toda la unidad para su transporte. Estos soportes también permiten elevar toda la unidad de manera manual sobre la superficie del pavimento, hasta unos 60 cm. Cada una de las llantas tiene su propio motor direccional. Normalmente, el motor principal funciona con diesel y es el que suministra la energía a un conjunto de tres bombas: la correspondiente al sistema hidráulico de los motores para las llantas, otra bomba para el manejo direccional del carro y una tercera auxiliar para el manejo de aceites necesarios para el enfriamiento de algunas de las partes del equipo y control de bombas.

Los equipos de texturizado cuentan con un sistema de autocontrol, por lo cual vienen dotados de cuatro sensores para regular su dirección de esta manera, el sistema hidráulico se maneja mediante señales electrónicas. La dirección en reversa igualmente puede ser automatizada, si así lo requiere el operador. La operación manual es igualmente posible, y se utiliza sobre todo para que el operador pueda realizar movimientos de ajuste dentro de la obra, así como para la instalación propia del equipo.

En su parte frontal el carro soporta un brazo metálico sobre el cual se suspende un bastidor que sostiene las telas de yute o arpillera que se hace arrastrar sobre la superficie de la losa, una vez que esta última está ligeramente aireada. El paso de la tela humedecida elimina la apariencia brillante de la superficie y proporciona un microtexturizado preliminar. El bastidor que sostiene la tela es manejado con un sistema hidráulico. Opcionalmente, algunos equipos incluyen una unidad sensora para el control del cabezal de texturizado. Entonces, la elevación de este último se controla electrónicamente.

Las unidades de texturizado cuentan en su parte inferior con un cabezal de texturizado, el cual se hace pasar transversalmente al eje de avance de pavimentación a través de un rollo. Este último se puede seccionar en diferentes longitudes para lograr diferentes anchos. El cabezal de texturizado cuenta con cerdas metálicas flexibles (figura 3.18), que son las que, propiamente, mediante su paso por la superficie de la losa, generan el macrotexturizado que se busca en el pavimento.

3.5.1 Texturizado con pasto artificial

En esta metodología, un lienzo de 60 cm de ancho se sujeta a un bastidor que transita en dirección transversal

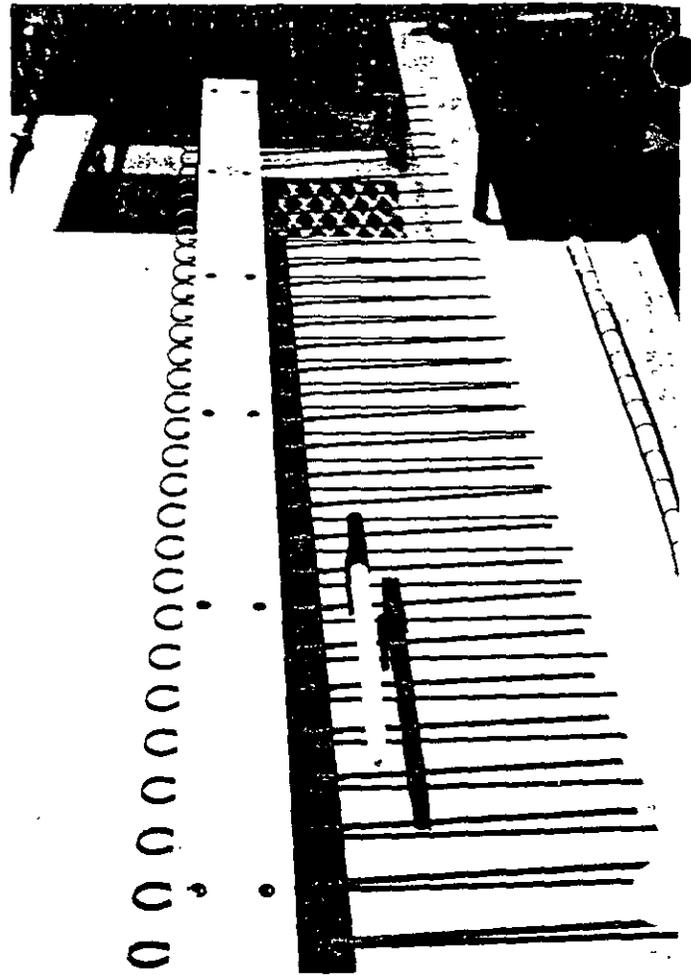


Figura 3.18 Peine de macrotexturizado (escobillón).

al camino, dando pasadas a la superficie de concreto fresco recién terminada. A la carpeta o lienzo sintético puede además agregársele peso para que se produzca una textura más uniforme y profunda.

3.5.2 Texturizado transversal con peine

En esta modalidad, la textura se logra aplicando una pasada con arpillera o lienzo de pasto artificial sobre la superficie, seguida de otra pasada con un "peine" mecánico que cuenta con cerdas metálicas flexibles, que guardan entre sí un espaciado variable entre 1.27 y 2.5 cm (figura 3.18). Mientras más cercanas estén las cerdas, más posibilidades de desprendimientos superficiales habrá; de otra manera, si los centros de las cerdas están más espaciados, se promueve más el ruido por el contacto entre la superficie de rodamiento y las llantas. El ancho de las cerdas debe ser de 3.2 mm, y el concreto debe estar lo suficientemente plástico para permitir una penetración de cerdas de al menos 3.2 mm.

pero no superior a 64 mm. De preferencia, se deben evitar traslapes de las diferentes pasadas, ya que ello puede ocasionar debilitamiento de los cordones de mortero dejados por el estrado

3.5.3 Texturizado longitudinal con peine

Se utilizan los mismos cuidados y equipo que en el caso anterior, pero los dispositivos de arrastre de arpillera o pasto artificial sintético, al igual que el cabezal que contiene las cerdas, se invierten para dar las pasadas en la dirección paralela al eje de trazo.

3.5.4 Texturizado transversal con escobillado

Este acabado se logra aplicando transversalmente un dispositivo mecánico de escobillado. El escobillon consiste en un conjunto de hileras de cerdas metálicas rígidas, capaz de producir un estrado en el concreto todavía plástico con profundidades comprendidas entre 1.6 y 3.2 mm. El estrado debe ser uniforme, cuidando que se logre similitud de dimensiones entre la profundidad de las estrias y su ancho

3.5.5 Texturizado longitudinal con escobillado

Se utiliza el mismo equipo que en la textura anterior, solo que el escobillon se opera en la dirección del eje de trazo

3.5.6 Texturizado transversal con peine y aplicación longitudinal con arpillera

Consiste en aplicar primero una o más pasadas longitudinales con un lienzo de pasto sintético y, posteriormente, una pasada en la dirección transversal con cerdas metálicas de las dimensiones prescritas en párrafos anteriores. Esta alternativa se recomienda para vialidades sujetas a variaciones fuertes de frenado y aceleraciones, así como para el caso de autopistas. La diferencia con el texturizado simple transversal, el segundo tipo descrito de la lista, es que la pasada longitudinal en esta última modalidad no es tan pronunciada o enérgica.

agua libre, es el momento de aplicar la membrana de curado:

Los carros texturizadores descritos en el inciso anterior incluyen dispositivos que aplican los compuestos químicos para el curado. Normalmente, el dispositivo se localiza en la parte posterior del chasis de texturizado. El dispositivo para la aplicación del curado consiste básicamente en una tubería situada en la parte posterior inferior del chasis referido. Su rociado cubre el ancho de la losa, incluyendo las caras laterales de esta última, sus boquillas pueden regular la salida del compuesto de curado. Cada boquilla trabaja individualmente y permite su limpieza. El sistema de operación de la bomba es hidráulico. El sistema de bombeo permite la carga de los compuestos químicos en el depósito del carro texturizador desde barriles de almacenamiento situados a nivel del terreno.

Las tuberías o barras de aspersión vienen en longitudes comprendidas entre 4.25 y 7.92 m, sin embargo, cuentan con extensiones para alcanzar anchos de operación hasta de 15 metros. En la figura 3.19 se muestra una barra de aspersión.

Algunos equipos incluyen, de manera opcional, tubos metálicos de acabado, con longitudes que van desde 12.2 m para terminado en tramos en tangente, o bien pueden colocarse por pares de tubos, de 6.1 m de largo cada uno, para pavimentos con bombeo superficial. La elevación y rotación de los tubos la controla el operador con un sistema hidráulico. El empleo de estos tubos de terminado requiere tuberías para la aspersión ligera de agua a fin de que los tubos de acabado recorran más fácilmente la superficie de las losas.

3.7 EQUIPOS COMPLEMENTARIOS

3.7.1 Máquinas cortadoras

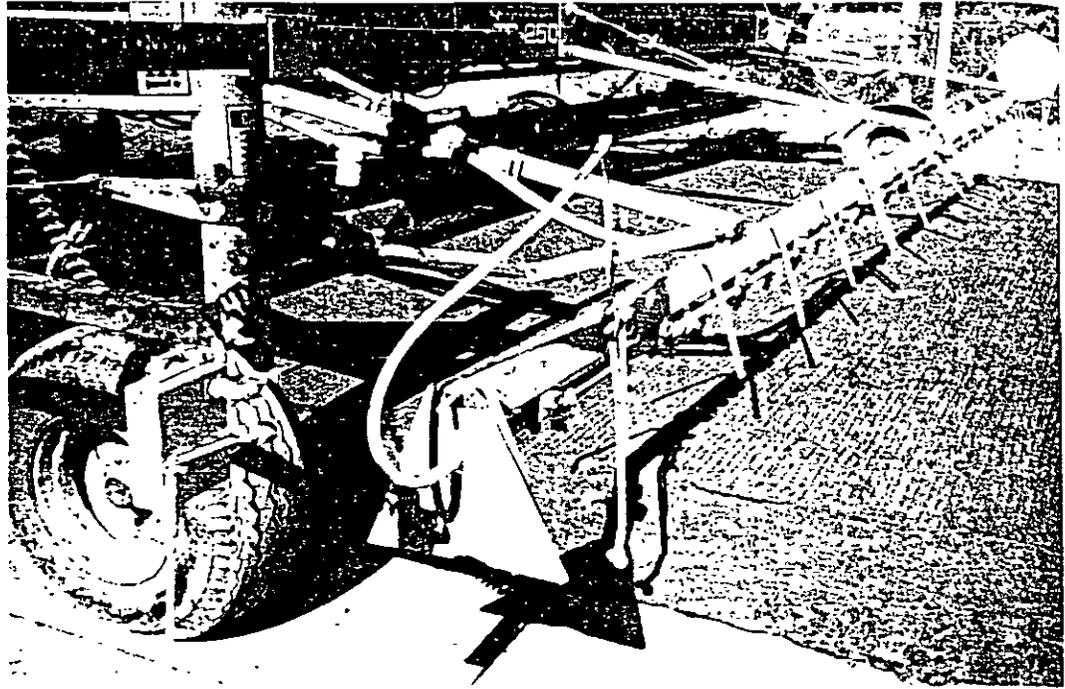
Cualquier superficie de concreto tenderá a fracturarse de manera aleatoria por efectos de contracción por secado y de temperatura, si es que no se dota a la superficie expuesta de juntas planeadas o de control. Por esta razón, los pavimentos de concreto se deben cortar tanto en dirección transversal como longitudinal. El corte transversal se debe realizar en cuanto el concreto resista el peso del equipo de corte, pero sin sufrir desportillamientos en los cortes.

Los cortes para la fabricación de juntas se hacen a las distancias marcadas en los planos de construcción con máquinas diseñadas para este propósito.

6 EQUIPOS PARA EL CURADO DEL CONCRETO

Inmediatamente después que la superficie de concreto empieza a perder el brillo que provenía de la presencia de

Figura 3.19 Barra de aspersión de membrana de curado.



En general, posterior al corte se debe ensanchar el mismo. Para esta operación se puede realizar una segunda o tercera pasada, hasta una profundidad tal que se pueda lograr la relación especificada de ancho a espesor del sellador, es decir, para que se tenga un factor de forma correcto. Este factor de forma será determinado atendiendo al tipo de material de selló y a las características del concreto empleado.

Alternativamente —dependiendo del tipo y naturaleza de los agregados presentes en el concreto— podrían realizarse estos cortes con discos de carburo de tungsteno los cuales, al ser más gruesos, permiten minimizar el número de pasadas superficiales para formar la ranura en donde se coloca el material de selló, o bien, el corte se podrá realizar de una sola pasada si se forma una batería compuesta por un disco pequeño adosado a cada lado de un disco grande central. Con este arreglo se da una sola pasada donde el disco grande corta un tercio o una cuarta parte del espesor total de la losa y los discos pequeños realizan el ranurado que ensancha la junta para recibir el selló.

La selección del disco de corte es función del tipo de agregado, la potencia de la cortadora y la edad del pavimento. Los fabricantes de discos proporcionan normalmente algunas guías generales que contribuyen a una selección más apropiada de los discos. Existen dos tipos principales de corte, en condición húmeda (discos de diamante) y corte en seco (abrasivos).

a) Máquinas cortadoras por tipo de corte

Corte húmedo. Se utilizan discos con dientes de diamante. Del tipo industrial, como elemento de abrasión principal (figura 3.20). Para proteger los segmentos metálicos del disco se utiliza agua como lubricador y como elemento de enfriamiento. Si no se empleara agua, dichos segmentos se sobrecalentarían y podrían incluso fundirse, con la consecuente pérdida de diamante. El agua también ayuda a eliminar el polvo producto del corte. Este tipo de corte es quizás el más común.

Corte en seco. Para estos cortes se emplean discos abrasivos, compuestos principalmente de carburo de tungsteno, y no se requiere agua para su enfriamiento. Estos discos se utilizan por lo general en agregados blancos tales como las calizas.

Se recomienda el empleo de este tipo de discos para proyectos de bajo volumen, pues en pavimentos de gran extensión pueden resultar costosos, sobre todo cuando se emplean en concretos de agregados muy duros. Por otro lado, se debe vigilar la geometría de los cortes resultantes, pues durante el trabajo, las dimensiones de los discos abrasivos pueden variar debido a su desgaste. Así, resulta conveniente durante el proceso de corte vigilar el desgaste del diámetro de los discos y la profundidad lograda de corte.

Corte en concreto tierno (*green cut*). También se ha incorporado al mercado un nuevo tipo de cortadoras de al-

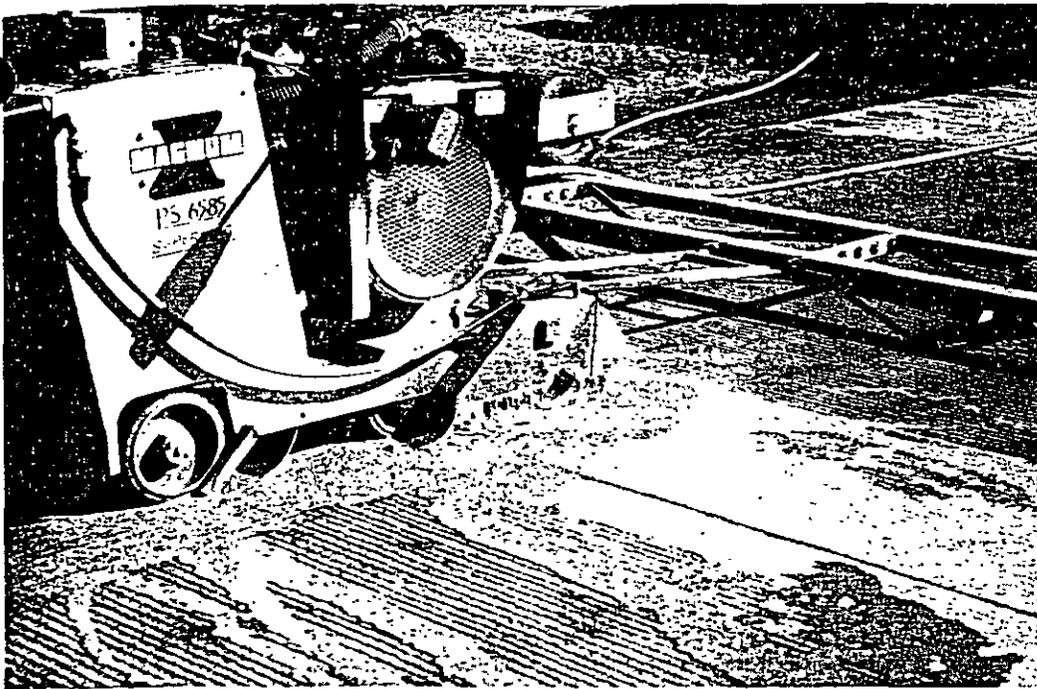


Figura 3.20 Operación de una cortadora con disco de dientes diamantados (corte húmedo).

velocidad que permite cortar el concreto mientras esta en su edad temprana, cuando el empleo de las otras cortadoras provocaría el desprendimiento del agregado y el desportillamiento del concreto. La ventaja principal que ofrecen estas cortadoras es la de proporcionar un tiempo mas amplio para las operaciones de corte, a fin de que cuando el concreto inicie su movimiento de contracción, ya estén listas todas las juntas y no se presenten grietas de contracción en el pavimento. Estas cortadoras no tienen todavía una gran participación en las operaciones habituales pero dependiendo de sus costos de adquisición y de operación, podrían ir reemplazando a las cortadoras actuales.

b) Maquinas cortadoras por capacidad productiva

Estos equipos se clasifican de acuerdo con la potencia de su motor, y también de acuerdo a su capacidad productiva en pequeñas, medianas, grandes y de alta producción. Las cortadoras pueden ser autopropulsadas, y propulsadas con operador o de empuje. En general, se debe conciliar la potencia, el tipo de cortadora y el disco con las características y necesidades de producción del concreto en una obra determinada. Así, la decisión en cuanto al tipo y capacidad del equipo vendrá dictada por estas tres condicionantes.

La gran mayoría de las cortadoras utiliza un giro de disco en la dirección de las manecillas del reloj, resultando así

un corte hacia abajo, movimiento que facilita el avance, particularmente en los equipos que no son autopropulsables; ello promueve además menos desprendimientos del concreto. También existen equipos cuyo giro de disco es contrario a las manecillas del reloj, esto es, con la dirección de corte hacia arriba.

Cortadoras pequeñas. Estas cortadoras varían en potencia —entre 6 y 13 kW—, y su uso normalmente se circunscribe a proyectos de corte en seco. Pueden ser autopropulsables y también de empuje. Las cortadoras ligeras que se emplean en corte temprano se clasifican dentro de este tipo (figura 3.21).

Cortadoras medianas. Tienen un rango de potencia de 15 a 28 kW. Estas cortadoras tienen la gran ventaja de ser muy maniobrables, pues son autopropulsadas y se utilizan normalmente en cortes húmedos.

Cortadoras grandes. Estas cortadoras operan en un rango de potencia de 50 a 55 kW. También son autopropulsadas y se utilizan en operaciones de corte en condiciones húmedas. Por ser de menor movilidad, su empleo es más común en la ejecución de juntas longitudinales.

Cortadoras de alta producción. Estas cortadoras incluyen las autopropulsadas con operador, las de expansión y las de centro de línea. Las primeras varían en potencia de 50 a 55 kW, y normalmente se

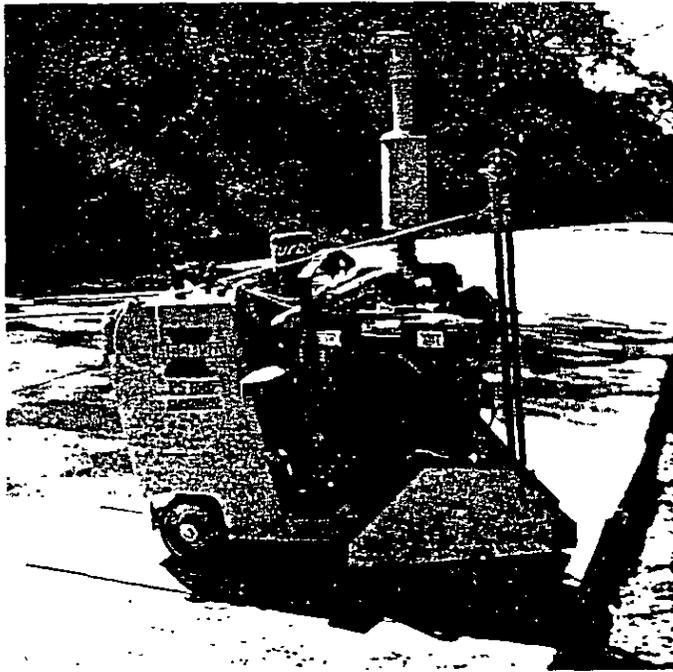


Figura 3.21 Ejemplo de una cortadora en seco (concreto a edad temprana).

recomienda su uso para cortes húmedos. El segundo tipo trabaja en potencias comprendidas entre 50 y 150 kW, y pueden alojar varios discos en operaciones de corte bajo condiciones húmedas. Finalmente, las de centro de línea trabajan con potencias en el rango de 50 a 60 kW.

Algunas de estas últimas cortadoras utilizan guías que se colocan en los bordes de la losa que forma el pavimento. La única limitante para su empleo es que se debe poner especial cuidado en los cambios de sección geométrica de pavimentos, como es el caso de intersecciones guardaguanado, incorporaciones, etcétera.

3.7.2 Curado

Una vez realizado el corte de la junta se requiere cuidar que el concreto siga su proceso normal de curado sin perder humedad por algún punto. Para ello es necesario que se aplique una membrana de curado en la junta recién terminada si resultase significativo el tiempo que transcurre entre su corte y el sellado. El equipo empleado para el curado es mucho más pequeño y manejable que el usado en la colocación de la membrana a todo el ancho de la losa.

Para las juntas se pueden emplear recipientes que se cuelgan a la espalda y a los que se les inyecta presión con la bomba manual del mismo tanque para aplicar la membrana. Para obtener mayores ritmos de avance se pueden emplear recipientes más grandes montados en

remolques manuales o enganchados a vehículos que tengan bombas para dispersar el producto de una manera continua durante la jornada de trabajo.

3.7.3 Limpieza de juntas

Dentro de las actividades importantes e imprescindibles para una aplicación correcta del material sellante, así como para un buen comportamiento del mismo, se encuentran las de limpieza de las juntas. Estas labores deben incluir una remoción total de partículas extrañas de las paredes de la caja receptora del sello, fundamentalmente las zonas que van a estar en contacto con los materiales por colocar. La adhesión y posterior desempeño del material de sello dependerán de cuán bien se hayan ejecutado estas labores.

De manera resumida, se puede decir que la secuencia de limpieza incluye los siguientes pasos:

- Lavado con agua, sopleteado y secado con aire a presión
- Limpieza por abrasión
- Limpieza con aire

3.7.3.1 Lavado con agua, sopleteado y secado con aire a presión

Después que se hayan realizado los cortes para las juntas, incluyendo los de ensanche —caso de cortes en húmedo— y antes de aplicar el sellador, se debe proceder a lavar con chiflones de agua todos los residuos producto del corte que pudiesen estar presentes en la ranura. Esta operación ayuda a eliminar aun el polvo producido por los discos abrasivos —caso de corte en seco— que pudiese haber quedado adherido a las paredes de corte. Posteriormente se debe aplicar aire a presión, con ayuda de pistolas y compresores para tal propósito. Esta actividad se requiere para retirar totalmente el exceso de humedad. Si es necesario, se debe esperar un tiempo adicional para que la superficie de las paredes se seque. Esta operación se debe hacer avanzando en una sola dirección, con objeto de no contaminar con residuos las partes ya sopleteadas.

3.7.3.2 Limpieza con abrasión

Frecuentemente, el lavado con agua a presión no retira lo suficiente algunos residuos fuertemente adheridos a las paredes de corte. También, en ocasiones, con aplicación del chiflón de aire no se garantiza la total remoción de humedad de las paredes de corte, con la

consecuente falta de adherencia del sellador a estas últimas

Como una consecuencia de lo anterior, en algunos proyectos se exige que, una vez que las superficies están razonablemente secas, se les proporcione una limpieza más integral por medio de chiflones abrasivos. Esto consiste en aplicar chorro de arena a presión. Esta acción, aparte de limpiar convenientemente, induce una textura rugosa en las paredes, haciéndolas más receptivas al sellador. Para esta actividad se recomienda aplicar una sola pasada a lo largo de cada una de las caras, con la boquilla de inyección de arena colocada en un ángulo de 45° y a una distancia de 2.5 cm. Es importante aplicar el chorro de arena a presión solo en la zona de las paredes que estará en contacto con el material sellante. Para una aplicación sistemática del chorro de arena, se aconseja el empleo de una guía de plástico o metálica para regular la separación y el ángulo de la boquilla.

3.7.3.3 Limpieza con aire

Antes de la colocación del sello se debe verificar que las ranuras estén libres de partículas o residuos de los trabajos de limpieza por abrasión, o los transportados por el tránsito de la empresa contratista o por el viento. Para ello, se debe aplicar un sopleteado enérgico con aire. La presión de este último nunca debe ser mayor de 0.60 MPa. Además, la empresa contratista debe cuidar en todo momento que el compresor de aire esté equipado con un obturador de aceite y humedad.

Toda humedad presente en las paredes de la caja de sellado —o ranura, según sea el caso— debe removerse antes de aplicar el sellador.

3.7.4 Sellado de juntas

Una vez limpia la junta y preparada para recibir el sellador se emplea el equipo y dispositivos para su sellado, los cuales son:

Para el caso de aplicación en frío o en caliente

- La rueda colocadora de la tira de respaldo
- El equipo aplicador del sello
- El utensilio para dar el formado final al sellador en caso de ser necesario

Para el caso de la aplicación de una tira de sello preformada

- La rueda colocadora de la tira de sello preformada

La rueda colocadora de la tira de respaldo consiste en una rueda que tiene una ceja central que permite que entre en la caja de la ranura para que al hacerla rodar sobre ella, inserte y coloque la tira de respaldo en su posición final.

Para el caso de la tira de sello preformada el dispositivo es muy similar pero debe tener suficiente peso para que facilite la colocación a presión del sello de la junta. Previo a la inserción del sellador, se habrá aplicado un adhesivo a las paredes de la junta para lograr mayor hermeticidad y mantener la tira del sello en su lugar.

El equipo para la aplicación del sello líquido consiste primordialmente en un aplicador, que es un tubo de diámetro adecuado a la viscosidad del sellador y la que remata en una boquilla, la que tendrá preferentemente el ancho de la junta y facilitará la colocación de la cantidad precisa de material de sello sin rebosar la junta y sin que quede escasa. El resto del equipo puede estar montado en un pequeño carro o bien en una unidad de transporte, dependiendo del tamaño del trabajo a realizar, el cual transportará los recipientes del sellador y la bomba despachadora para el caso de sellador de un componente en frío, o bien tendrá además un mezclador si fuera un sellador de dos componentes; para el caso de sello en caliente tendrá adicionalmente un calentador con dispositivos de control y seguridad para calentar y mantener el sellador a la temperatura de aplicación (figura 3.22).

Finalmente, existen ocasiones en que las pequeñas irregularidades que se presentan a lo largo de la junta evitan que el sello esté correctamente remetido en toda su longitud, o también en ocasiones la boquilla de aplicación no proporciona el terminado deseado o rebosa la junta. En estos casos se requiere de un utensilio que tenga la forma adecuada para que al pasarlo a lo largo de la junta, retire el sellador en exceso o conforme el sellador colocado a fin de que se respete en todos los puntos el remetido en el sello.

3.7.5 Rebajado (desbastado)

Las deficiencias de construcción en obras nuevas, normalmente asociadas a características variables de las mezclas colocadas o a un proceso inapropiado de colocación de las mismas, se traducen en irregularidades superficiales que disminuyen el confort y pueden poner en riesgo la seguridad de los usuarios. Estas anomalías tienden a aumentar la rugosidad longitudinal de la obra recién terminada y, por ende, reducen los índices de servicio iniciales. Por tales razones, se debe proceder al mejoramiento de la planicidad superficial mediante un



Figura 3.22 Aplicación del sello en una junta limpia y seca.

desbastado superficial ligero, o fresado. Esta actividad se hace necesaria en ocasiones en pavimentos nuevos. También se realiza cuando, durante la vida útil del pavimento, se presentan condiciones inadmisibles de rugosidad en su superficie que tienen que ver básicamente con protuberancias y depresiones excesivas

Para el desbastado superficial, se utilizan equipos que incluyen un rodillo formado por un conjunto de discos diamantados, los cuales están diseñados para cortar las protuberancias que presenta la superficie de concreto (figura 3.23). Cuando se dan pasadas sucesivas y traslapadas con este equipo, se logra una superficie conformada por zonas con el perfil de proyecto, acompañada de zonas con ligeras depresiones y puntos altos que en promedio arrojan una superficie regular. Siempre se debe cuidar que la rasante de proyecto no se altere. Esto se consigue normalmente, pues las profundidades medias que se deben remover son del orden de 5 milímetros.

De hecho, se pueden conseguir equipos ligeros para fresado en zonas locales del pavimento, o en franjas

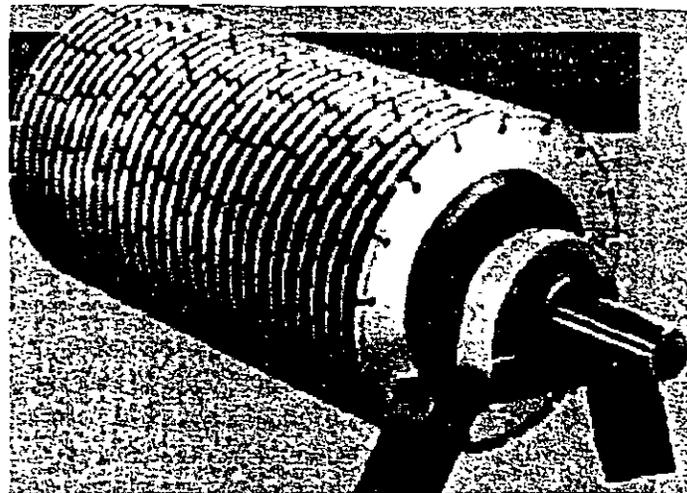


Figura 3.23 Detalle del rotor que aloja a los discos diamantados.

pequeñas de zonas previamente reparadas, o de transición entre diferentes colados, y también equipos de fresado continuo, los cuales son mayores y de mejor rendimiento (figura 3.24).

3.7.5.1 Operación del equipo

Dentro de lo más relevante que debe interesar en un equipo de fresado se pueden citar su peso, su potencia, la disposición y características generales del cabezal de desbaste. La operación del equipo debe entonces sujetarse, tanto como sea posible, al conocimiento del efecto que cada uno de los tres aspectos antes mencionados representa para el logro de una superficie regular.

En el caso de pavimentos existentes, cuando se trate de mejorar el índice de perfil, o de restituir la macrotextura que ya se haya perdido, es recomendable que las empresas contratistas estudien el problema antes de iniciar los trabajos de desbaste. Aun antes de las licitaciones, se deben realizar recorridos con objeto de identificar la naturaleza de las irregularidades, la existencia o no de agregado expuesto, la dureza y tamaño máximo de agregado, etc. Todos estos aspectos tienen incidencia en los tipos de discos y en su arreglo dentro del cabezal o tambor de fresado. En general, cuanto mayor sea el tamaño y la abrasividad de los agregados, menores serán los rendimientos del cabezal de desbaste.

Es importante identificar los volúmenes de reparación, la profundidad de deterioros y las rasantes reales que se busca conseguir como objetivo. A continuación presenta un listado de información que necesariamente se debe conocer para proponer un programa efectivo de rebajado:

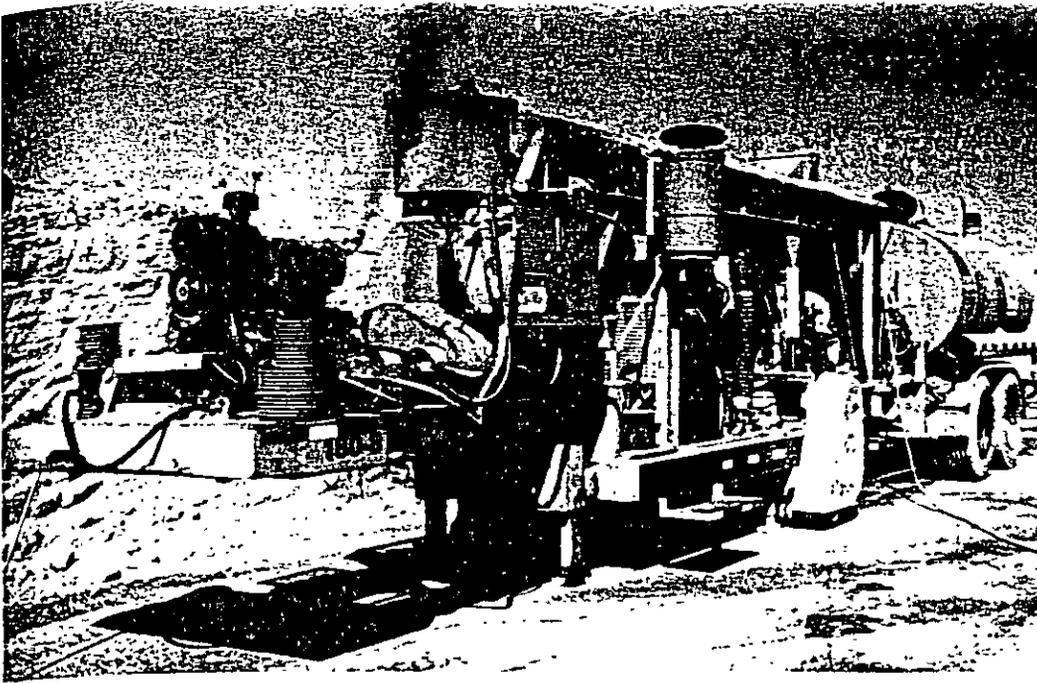


Figura 3.24 Equipo para el rebajado del pavimento.

- Edad del pavimento
- Tipo de pavimento (concreto simple, continuamente reforzado, reforzado con fibras, etc.)
- Separación de las juntas transversales
- Índices de fracturamiento (frecuencia en m^2/km de losas fracturadas, escalonamientos, etc.)
- Fuentes de agregados, y dureza de éstos
- Abrasividad de los agregados fino y grueso
- Tamaño máximo de partículas, y grado de su exposición en la superficie
- Profundidad de remoción
- Índice de perfil existente en el pavimento
- Cantidades de reparación y su localización dentro de la superficie del pavimento

Tal como se sugiere en párrafos anteriores, para la preparación del cabezal de fresado se requiere conocer algunos de los condicionantes mencionados anteriormente. El citado cabezal consiste en un conjunto de discos con dientes diamantados en un árbol que comúnmente tiene una longitud de 1.0 a 1.25 m. Normalmente, se requieren de 18 a 20 discos por cada 10 cm de cabezal. De preferencia, nunca se deben instalar los discos con sus dientes siguiendo un modelo uniforme. Por otro lado, una alineación deficiente de los discos —resultante de una instalación uniforme— puede ocasionar un desbastado no uniforme, porque origina que el tambor o cabezal vibre en exceso.

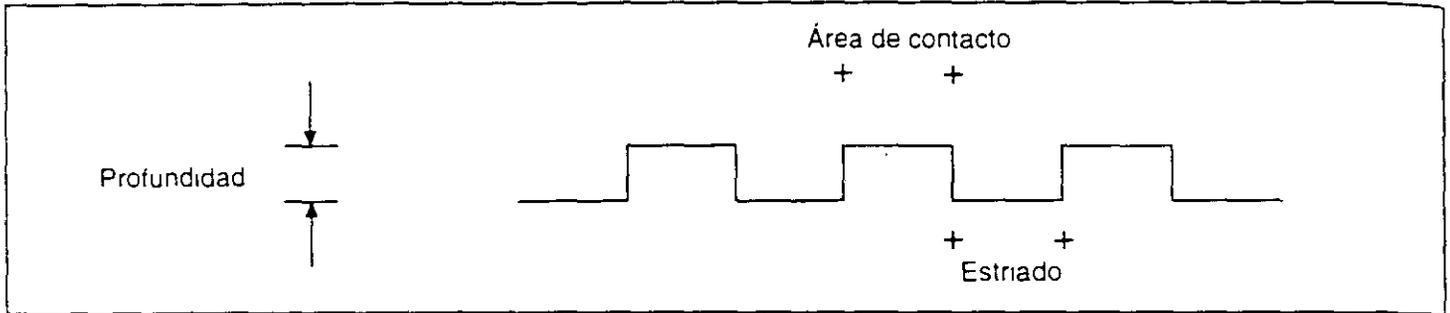
Una de las consideraciones adicionales que se deben tener en cuenta al establecer el espaciamiento entre discos son las características superficiales relativas a la fricción y textura que se buscan. Como criterio general, cuando las partículas gruesas sean más blandas y de fácil desgaste, se recomiendan espaciados mayores de discos para prolongar así su vida antiderrapante (tabla 3.1).

3.7.5.2 Selección de discos

La uniformidad, el rendimiento y la calidad general del texturizado dependerá en buena medida de la calidad individual de los discos que componen el cabezal de texturizado. La matriz de acero que aloja los diamantes debe ser de una dureza tal que efectivamente presione los diamantes sobre el concreto hidráulico cuando el cabezal de fresado esté operando. Además, se deben escoger discos con la concentración apropiada de diamantes. La forma correcta de trabajar del conjunto es que el desgaste de la matriz de metal y de diamante sea parejo, de manera que a medida que la primera se vaya desgastando, vaya soltando los fragmentos de diamante ya gastados, y permita exponer fragmentos nuevos de diamante. Cuando los fragmentos de diamante se desprendan anticipadamente, ello será indicativo de que la matriz metálica no es lo suficientemente dura. Inversamente, cuando la matriz de metal sea demasiado dura para cortes en un concreto con agregado también muy duro, los diamantes se desgastarán más rápidamente que la matriz en que están alojados. Si éste es el caso, los discos perderán efectividad, y la velocidad de corte y los rendimientos serán deficientes.

Tabla 3.1 Separación de discos y profundidad de corte de acuerdo con el tipo de agregado

	Rango	Agregado duro	Agregado blando
Estriado	2.25-3.75 mm	2.50-3.75 mm	2.50-3.75 mm
Ancho de contacto	1.5-3.25 mm	2.00 mm	2.50 mm
Profundidad	1.50 mm	1.50 mm	1.50 mm
Estriados/m	164-197	174-197	164-177



Es importante verificar con el proveedor o el fabricante de los discos diamantados la concentración de diamantes y el grado de dureza de la matriz metálica en que se alojen.

Lo anterior, en virtud de que para desbastar concretos con agregados muy abrasivos se requerirá una matriz metálica de dureza alta (adherencia alta) y, en el caso contrario la dureza de la matriz deberá ser menor. Por otra parte, si se adopta el criterio de adquirir discos diamantados con baja concentración de diamante, ello podrá representar costos de adquisición bajos, pero rendimiento también bajo, lo que puede resultar en costos de desbastado más elevados.

3.7.5.3 Consideraciones adicionales al proceso de rebajado

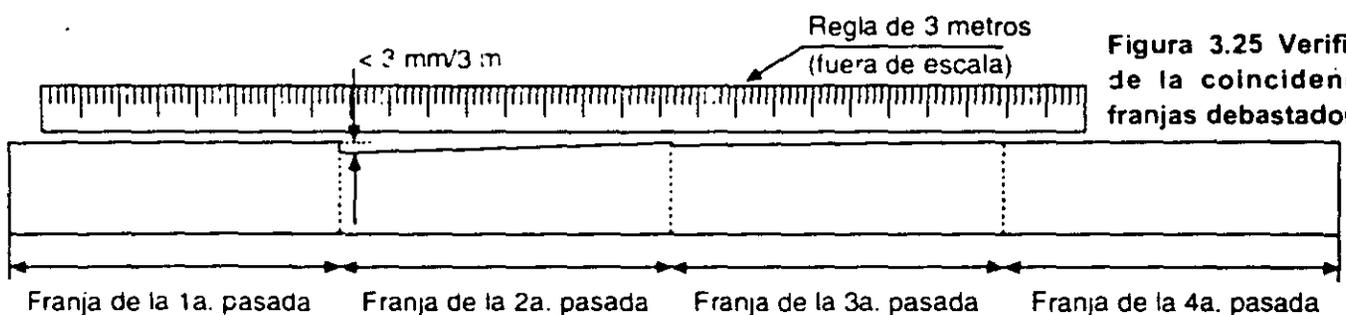
La máquina incluye en su parte frontal una llana sensora que controla la elevación del cabezal de corte, de manera que este último elimina así las protuberancias de acuerdo con el nivel establecido.

Otro aspecto que se debe considerar es el peso de la propia máquina desbastadora. Este peso contribuye a mantener la presión sobre el cabezal de fresado, tratando de evitar la tendencia de este último a subir y bajar en las

protuberancias, obligando a que no sólo se marquen en algunos sitios las pasadas, sino más bien cortando.

El operador del equipo debe fijar la velocidad de avance, la presión sobre el cabezal y la profundidad de corte adecuados, para que el corte de protuberancias sea realmente efectivo. Durante la operación de fresado, tanto el operador como la empresa supervisora deben comprobar que en la franja de corte la profundidad es variable, ello será indicativo de que el cabezal de corte avanza eliminando las sobre elevaciones o protuberancias excesivas. En términos generales se puede mencionar que cuanto más uniforme sea la profundidad de corte, menos eficiente será el desempeño del equipo. En estas circunstancias, el cabezal no es mantenido con la suficiente presión hacia abajo. Para ello se recomiendan realizar ajustes en el lastrado y en la velocidad de la máquina. Siempre resultará mejor mantener presiones constantes hacia abajo sobre el cabezal de corte, con el objeto de minimizar diferencias en las profundidades desbastadas en pasadas adyacentes.

El desnivel de pasadas adyacentes no debe ser superior a los 3 mm medidos tomando como referencia una regla de 3 m (figura 3.25). Igualmente, para el logro de una macrotextura y desbastado uniforme se requiere que el


Figura 3.25 Verificación de la coincidencia de franjas desbastadoras.

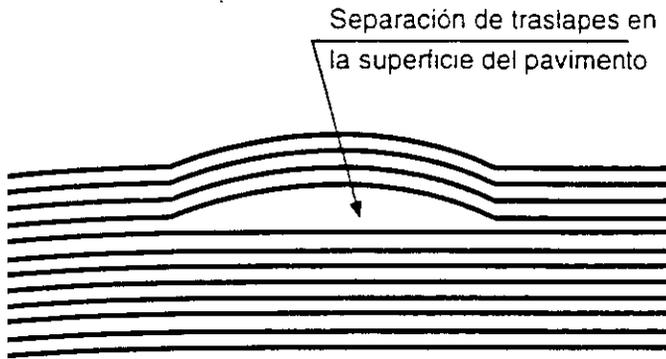


Figura 3.26 Ejemplo de pasadas con desviaciones.

operador mantenga la dirección constante para una pasada particular, es decir, se deben evitar desviaciones en las pasadas, puesto que dichas desviaciones pueden provocar la aparición de zonas "libres" de rebajado entre pasadas contiguas o de traslape. Los traslapes máximos entre franjas adyacentes nunca deben ser mayores de cinco centímetros (figura 3.26)

Tanto antes como después del fresado, se debe hacer pasar un perfilógrafo —por ejemplo, el tipo California—. Estas mediciones tienen como fin evaluar las condiciones existentes antes del desbaste, y medir el resultado de este último. Con estas mediciones comparativas se puede establecer si el fresado cumplió el objetivo de reducir el índice de perfil demandado en el proyecto original para el pavimento nuevo o, en caso de rehabilitación, si se logró reducir el índice de perfil ya muy alto en un pavimento existente. Se debe buscar como mínimo una mejora del índice de perfil igual o mayor a 65 por ciento del índice que tenía el pavimento antes del

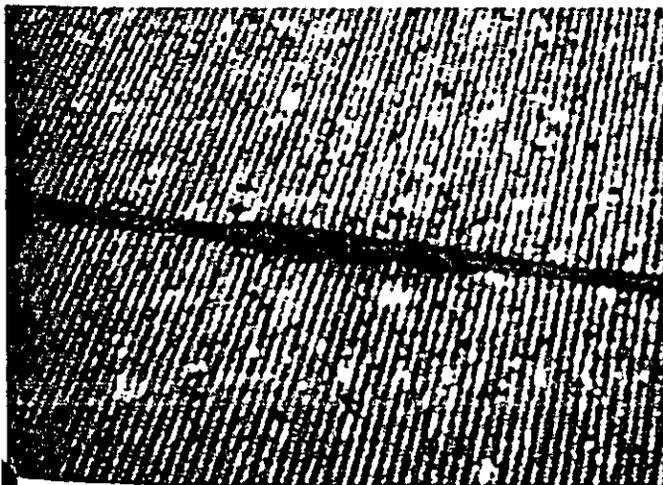


Figura 3.27 Aspecto de una superficie recién desbastada.

desbaste. En la figura 3.27 se presenta un aspecto de una superficie recién desbastada, en donde se muestra la necesidad de volver a aplicar material de sello en las juntas

3.7.5.4 Recolección de lechada

El equipo de fresado utiliza agua para enfriar el cabezal de corte. Antes del inicio de los trabajos, el operador debe verificar el buen funcionamiento de las bombas de suministro. En todo momento se debe garantizar este último, y evitar así el riesgo de que los discos se sobrecalienten y pierdan efectividad o, aún más, que sufran desperfectos.

Los equipos de fresado cuentan además con un dispositivo de succión que les permite retirar toda el agua mezclada con los residuos del desbaste y la lechada. Si después que la máquina ha pasado, sobre la huella de fresado se perciben lodos o agua muy sucia o espesa, ello es normalmente indicativo de que el sistema de succión de lechada pudiera estar tapado. En estas condiciones, lo procedente es revisar las mangueras de vacío.

Referencias

1. "III Jornadas Sobre Pavimentos de Hormigón", Consejería Política Territorial (Comunidad de Madrid), Dirección General de Carreteras MOPU, Ayuntamiento de Madrid, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, 27 - 29 de octubre de 1987
2. "Texturing Concrete Pavements", *ACI Materials Journal*, ACI 325.6R.88, Committee Report, Title No. 85-M25.

Bibliografía

- "Construcción de Pavimentos de Concreto Hidráulico", Manual del Participante AASHTO/FHWA/INDUSTRIA, preparado por American Concrete Pavement Association y ERES Consultants, Inc., Publicación No. FHWA HI-96-027, National Highway Institute, marzo de 1996.
- Catálogo de Equipo, CMI Corporation, P.O. Box 1985, Oklahoma City, OK 73101, USA.
- "Soil Cement Construction Handbook", Portland Cement Association, EB003.095.

CAPÍTULO 4

PROCESOS CONSTRUCTIVOS

La planeación de una obra de pavimentación es un paso esencial, tanto desde el punto de vista técnico como económico, sobre todo en obras de tamaño mediano a grande. En este sentido, destaca la importancia de los siguientes rubros:

- estudio y discusión de las especificaciones y planos de proyecto.
- └ estudio de los materiales por emplear.
- └ selección de equipos de construcción.
- └ determinación del número de camiones y su tipo para el transporte de mezclas, y
- └ selección del sitio para ubicar dentro del proyecto general la planta de mezclado

Este capítulo se centrará en los procesos constructivos propiamente dichos. Se tratarán los trabajos preliminares de preparación del sitio, los trabajos preparatorios y la calibración de los equipos que se van a emplear, y se hará una explicación detallada de las secuencias constructivas principales tales como la producción, el tendido, el texturizado y el curado del concreto. En la parte final se describirán los trabajos de preparación de juntas.

4.1 TRABAJOS PRELIMINARES

Los trabajos preliminares para la construcción de la carretera comprenden, por una parte, la habilitación de las áreas que permitirán el procesamiento, acopio, manejo y transformación de los materiales e insumos requeridos durante la construcción, el establecimiento de laboratorios de control, la preparación de mezclas de concreto y la verificación en campo de la calidad obtenida. Por otra parte, incorpora las actividades especiales de reparación del tramo que, por el tiempo que requieren, se deben realizar con antelación a fin de no retrasar innecesariamente el avance de la obra una vez iniciada.

Por último, estarán también incluidos bajo este rubro los preparativos para el control de las rasantes de proyecto y todos los demás controles topográficos que permitan referenciar o verificar el logro y los avances con respecto a las especificaciones del proyecto; asimismo, se deberá ejecutar un tramo de prueba a fin de poner a punto personal y equipos antes de iniciar la construcción del cuerpo de la carretera.

Los equipos de extracción y procesamiento de agregados deberán estar en buen estado y sus características tendrán que ser compatibles con los volúmenes que se van a producir. El equipo de producción, tendido y terminación del concreto hidráulico, aparte de estar en buen estado, necesariamente deberá ser calibrado antes y durante su uso.

Dentro de los aspectos más importantes de toda la secuencia constructiva está la selección de la planta estacionaria (o planta central) de producción, así como su ubicación.

4.1.1 Preparación de las áreas de almacenamiento de materiales y de producción del concreto

Cualquier obra de pavimentación tendrá, independientemente de su tamaño, un centro de acopio de materiales para la producción de las mezclas: agregados, cemento, agua, aditivos y equipos de transporte para el sitio de colocación. Tanto el tamaño del área para el centro de acopio como el número de vehículos será desde luego función de la magnitud de la obra.

Para el caso de una obra de pavimentación, atendiendo a su tamaño, recursos humanos y equipamiento disponibles, es de primera importancia contar con los espacios y con una programación de actividades compatibles. A menos que una obra sea

excepcionalmente pequeña, siempre se tratará de contar con una producción consistente y uniforme, pues lo que se busca producir en una planta, es una mezcla fresca, la cual demanda, para una adecuada colocación, una trabajabilidad satisfactoria. Otro aspecto que interesa es que, para un concreto de buena calidad tanto en estado fresco como seco, su producción sea lo más continua posible, de esta manera se logrará un tendido uniforme y se tendrá como resultado una superficie libre de irregularidades, con buena textura. Para el logro de todos estos atributos se recomienda atenerse a los siguientes lineamientos:

- El área de almacenamiento de materiales deberá ser lo suficientemente grande para permitir el almacenamiento de grandes volúmenes de materia prima y garantizar así una producción lo más continua posible.
- La distribución o arreglo de los diferentes componentes del área de producción (acopio de materiales, almacenamiento de aditivos y de cemento y planta de producción) deberá ser tal que permita un flujo óptimo del equipo de transporte de mezclas, así como el complementario de la propia planta.
- Los equipos de producción deben estar en buenas condiciones de operación.
- Los operadores de la planta de producción deben ser competentes.
- Los procedimientos de acopio y almacenamiento de agregados y su manejo, incluyendo el correspondiente al del cemento a granel, deben ser ejecutados preferentemente por personal experimentado.

4.1.2 Características del tránsito en la planta

Como ya quedó establecido en el inciso 3.2.1, "Equipos mezcladores", la selección del sitio para montar la planta de mezclado, sobre todo las de tipo estacionario, requiere de una serie de consideraciones, tanto de carácter logístico como económico. Uno de los aspectos más relevantes que se debe tener en cuenta es la planeación de las áreas de trabajo dentro de la planta, especialmente en lo relativo a los movimientos que requiere el tránsito vehicular.

Se deben prever posibles restricciones en las rutas de camiones que entregan suministros a la planta y verificar si realmente existen accesos y salidas no conflictivos para los camiones que transportan las mezclas a los lugares de colocación. Es deseable que los camiones y

pipas de suministro de materiales a la planta tengan accesos diferentes a los que transportan el concreto. Adicionalmente, los diferentes tipos de camiones deben contar con un ciclo programado para sus operaciones; de esta manera se tendrá una mayor seguridad y productividad en el área de trabajo.

Para dar una idea del número de camiones que operan en una planta de mezclado central en un día de producción normal, con objeto de planear áreas de trabajo, accesos y posibles desviaciones de tránsito comercial, a continuación se presenta un ejemplo.

Supóngase que en un proyecto se requieren producir y colocar de acuerdo con un programa dado 2500 m³ diarios de concreto hidráulico con el proporcionamiento mostrado en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Ejemplo de cantidades de material por día

Material	Material en 1 m ³	Material en el día
Cemento	315 kg	787.5 t
Agregado fino	800 kg	2000 t
Agregado grueso	1200 kg	3000 t
Agua	120 litros	300,000 litros

Supóngase además que se utilizarán camiones para cemento a granel de 40 t de capacidad de trabajo, y de 88 t para el suministro de agregados, y camiones de volteo de 7 m³ para el transporte de mezclas.

El número de camiones es de $\frac{5000}{88} \approx 56$ para ambos agregados.

No. de viajes para mezclas = $\frac{2500}{7 \text{ m}^3} \approx 358$ viajes para transporte del concreto por turno de 10 horas, es decir, 36 viajes/hora/camión. Considerando lo apretado del ciclo de carga, tal vez se deberán considerar dos plantas trabajando simultáneamente.

Si el tiempo de traslado medio en una dirección es de 15 minutos, entonces el número de viajes necesarios para ciclos de ida y vuelta completos será de:

$\frac{36 \text{ viajes}}{4} \times 2 = 18$ viajes por hora, como mínimo, para el traslado de mezclas.

Por otro lado, si se considera que en la planta se tienen tres silos para el cemento a granel ("marranas") de 1200 t de capacidad de trabajo, y se pretende mantenerlas llenas, esto es, mantenerlas en condiciones de trabajo, el número de viajes que tendrá que hacer el

camión-tolva de cemento de 40 t de capacidad normal de trabajo se calcula como sigue

Cemento existente antes de iniciar operaciones, es decir, pensando en que se tiene una situación normal de trabajo

	40 t en silo
	640 t en 16 viajes de camiones de cemento (40 t cada uno)
	120 t en silo

Suma 800 t antes de iniciar el trabajo de cada día

Por lo tanto, se requieren aproximadamente 20 viajes de camiones con cemento a granel, de 40 t cada uno para mantener los volúmenes estimados. De esta manera, hacen falta los siguientes movimientos vehiculares en un turno de 10 horas para mantener la producción de 2500 m³ de concreto hidráulico

	56 viajes de agregados (88 t cada uno)
	358 viajes de traslado de mezclas
	20 viajes de camiones de cemento (40 t cada uno)

Lo anterior da una idea del alto volumen de tránsito que se puede tener en una planta de mezclado central. Por otro lado, habrá que considerar el cargador frontal que estará alimentando las tolvas, las cuales a su vez descargan los agregados en las bandas transportadoras.

4.1.3 Área de lavado de camiones

Es importante asignar un área donde se laven los camiones y el tambor mezclador, con objeto de no obstruir el tránsito normal de todos los vehículos que estarán operando. Los requisitos para la disposición final de los desechos de lavado pueden diferir de una localidad a otra, por lo que con antelación se deberá definir el área de lavado correspondiente.

El lavado de las cajas de los camiones se efectúa con la finalidad de remover cualquier residuo que se pudiera solidificar y que contamine u obstruya la descarga del concreto fresco. Se admite aplicar conforme sea necesario una película de aceite para lubricar las cajas, cuyas superficies inferiores deberán estar lisas y en buen estado.

4.1.4 Otros trabajos

Antes de comenzar la instalación de la planta, se deben estudiar cuidadosamente las fuentes de suministro de agua,

medir los gastos de agua disponibles por día y compararlos con los requerimientos diarios de agua de mezclado y de lavado.

Es igualmente importante definir la fuente de explotación para establecer posibles áreas de almacenamiento ya sea en la misma planta o en algún lugar muy cercano, de donde sea posible bombearla con facilidad y oportunidad. También, atendiendo al tipo de fuente —red municipal, pozo profundo, arroyo, etc.— habrá exigencias diferentes en cuanto a tuberías y sus correspondientes conexiones.

Dados los altos consumos de energía eléctrica que se requieren en estas plantas, es común el empleo de plantas generadoras para alimentarias de corriente eléctrica.

Se requieren equipos de comunicación entre el personal de la planta y el de pavimentación. Este es un aspecto de primer orden, pues son muy comunes los cambios y ajustes en la producción y calidad de las mezclas. Para ello, la planta deberá contar con un servicio local de radiotransmisores semifijos y portátiles.

Durante la obra es necesario mantener en buenas condiciones los caminos alternos de desvío de tránsito, al igual que tener un buen manejo de este último cuando se este construyendo. El manejo de desechos producto de cortes y desperdicios de todo tipo de materiales se hará de tal manera que no altere el régimen ecológico de los sitios de construcción, cumpliendo con la normatividad discutida en la cláusula 5.12 de esta publicación.

4.1.5 Preparación de la superficie por pavimentar

El éxito en la construcción de cualquier estructura vial, así como el comportamiento y la rentabilidad de la misma, dependen en gran medida de la calidad y regularidad con que se construyan las terracerías de un pavimento. La superficie de rodamiento se ve influida de manera sustantiva por el tipo de materiales empleados, la calidad constructiva y las especificaciones aplicables a cada una de las capas que constituyen el pavimento.

En el capítulo 2 de la parte correspondiente a *Proyecto* se presenta una descripción detallada de cada una de las capas que conforman el pavimento: terreno natural, capa subrasante, capa de subbase y terraplenes necesarios para dar el nivel de rasante de proyecto.

Normalmente, la decisión de colocar o no la capa de subbase dependerá de las características de la obra, esto es, de la importancia de la vialidad, de las condiciones del terreno natural y del tipo de tránsito vehicular.

4.1.5.1 Terreno natural

Independientemente de que las características de las capas de apoyo, así como los lineamientos de su misma ejecución deberán estar establecidos en un proyecto de terracerías y drenaje, el responsable de la construcción debe realizar, de preferencia, algunas actividades de verificación preliminar. Antes de iniciar los trabajos de pavimentación, hay que inspeccionar la superficie de apoyo o terreno natural por donde se localiza el eje de trazo para cotejar lo establecido en los estudios previos, la especificación de proyecto y, en su caso, definir la posible problemática de los puntos de corte y de relleno. Además de aportar información para estimar las necesidades de equipo y de recursos humanos, esta inspección servirá también para establecer prioridades en los tratamientos de corte y de compactación, según corresponda. En el caso de colocar suelos mejorados para llegar al nivel de rasante, los materiales por mezclar deben integrarse al suelo natural de apoyo, previa preparación de este último, de manera que ya mezclados posean la humedad óptima y los grados de compactación determinados en el laboratorio. La compactación de éstos

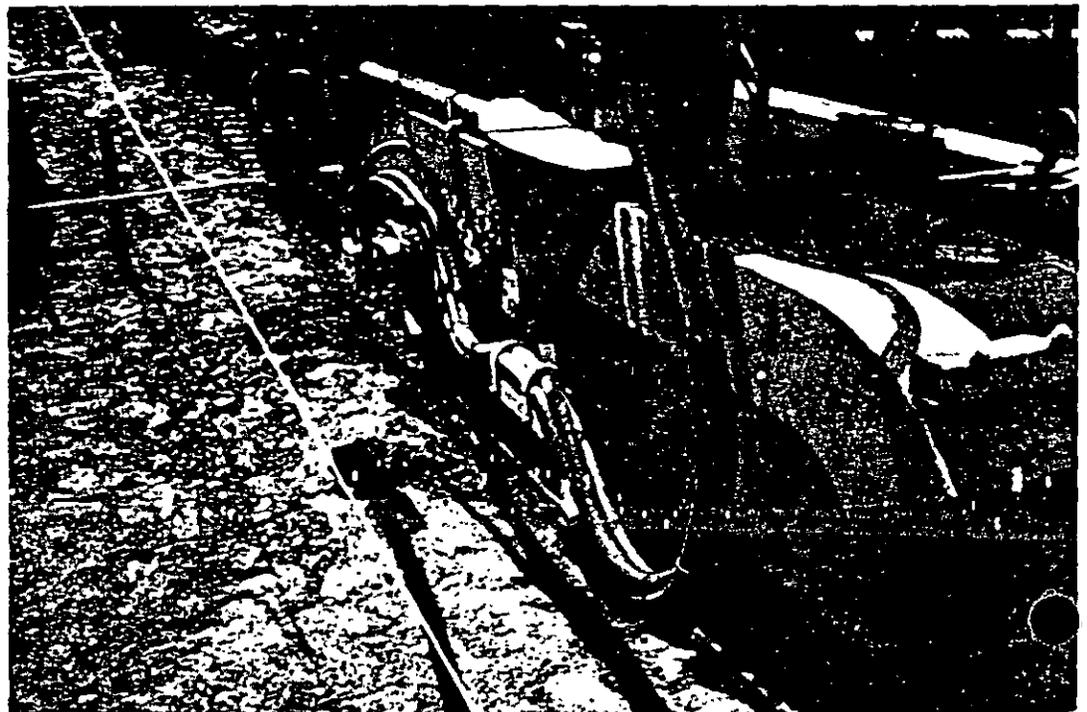
se hará basándose en variantes de compactación, de acuerdo con la naturaleza de los suelos encontrados.

En situaciones en las que se requiera hacer cortes, o aun para el caso de rellenos, donde se requiera efectuar un perfilamiento más riguroso de la rasante de proyecto, se puede optar por utilizar una afinadora de rasante con control automático. Este equipo permite realizar cortes de gran precisión de suelos en estado natural o ya compactados, son además de alta productividad. El alineamiento vertical y horizontal es mantenido con sensores electrónicos que van tocando, conforme avanza el equipo, hilos tensados que se sujetan a estacas situadas a ambas orillas del camino. Estas afinadoras requieren cuatro brazos que sostienen a los sensores: dos a cada lado del camino y por lo menos dos brazos para el control del alineamiento horizontal (figura 4.1).

4.1.6 Colocación de líneas de control

Para el control del alineamiento horizontal de las pavimentadoras, así como para el control de pendientes, los equipos automatizados que utilizan sensores

Figura 4.1 Sensores para controlar el alineamiento horizontal y vertical.



requieren la colocación de hilo tensado que indique el **z**o final del camino. Este hilo tensado se sujeta en estacas, las cuales son comúnmente de tubos metálicos ligeros empotrados en las orillas del camino, inmediatamente atrás del sitio por donde circulará la oruga o las llantas del equipo de pavimentación.

En el caso de un pavimento con una sola pendiente, esto es, cuando no se cuenta con bombeo superficial a dos aguas, las rasantes de diseño son proyecciones imaginarias de una línea que representa la parte superior de las orillas de la losa de concreto. Estas líneas se representan en la práctica mediante hilos o cuerdas de control que se sujetan a las varillas ("pines"). La inclinación de esta línea imaginaria en el centro respecto al eje del camino hace que un borde extremo del pavimento quede por abajo del punto de rotación, mientras que el otro extremo queda elevado en la misma proporción. Las líneas de control sirven para establecer y fijar las elevaciones para el perfilado o terminado automático de las capas de subrasante y de subbase, así como para el tendido de la carpeta de rodamiento.

Mediante control topográfico se establecen las líneas virtuales de rasante de las losas o cualquier otra capa y se proyectan hacia las varillas ("pines"), de manera que por un simple cálculo de diferencias respecto al extremo superior de las varillas es posible establecer niveles para cada una de las capas en el sembrado subsiguiente de varillas.

La instalación de las líneas de control es una de las etapas cruciales del inicio de la secuencia de pavimentación. Su instalación requiere equipo de topografía, pues una vez que se instale el hilo este deberá tensarse, y de esta manera servirá para guiar al equipo de extendido del concreto. Conforme el proyecto avanza, el personal de la empresa contratista deberá asegurarse de que el estacado y la línea estén en su posición correcta.

La línea guía para los sensores de las máquinas puede ser de nylon tejido, cuerda de poliestireno, alambre o cualquier otro material similar. La estaca o varilla debe tener suficiente longitud para permitir un empotramiento suficiente dentro del terreno natural, pero de longitud libre lo suficientemente grande para que pueda percibirse a simple vista y permita realizar ajustes en las posiciones de la cuerda, esto es, para las rasantes de cada una de las capas que se van a colocar.

La línea se sujeta a un brazo con que viene provista cada varilla, y normalmente este brazo permite ajustes menores. Los soportes se colocan con separaciones

típicas de 8 m en zonas de tangente, mientras que en curvas muy cerradas se debe reducir tal distancia hasta unos 4 m, con el fin de lograr mayor precisión.

Es necesario tensar las líneas para mantenerlas al nivel correcto en el varillaje de sostén. Existen tensadores manuales que se pueden utilizar a intervalos no mayores de 250 m. Para hacer esta operación correctamente, primero se deben separar las líneas del varillaje antes de aplicarles la fuerza de tensión; luego se reinstalan en las ranuras del brazo de apoyo, cuidando retirar cualquier irregularidad, tal como filamentos o rebaba dentro de los orificios o ranuras, que pudiesen romperlas. Se vuelve a insistir sobre la importancia de mantener visibles las cuerdas o líneas de control. Para ello se puede incluso adicionárseles listones de colores.

Puntos de referencia

A pesar de que, en teoría, los pavimentos en general y los del tipo rígido en particular, no son estructuras sujetas a asentamientos importantes, resulta conveniente fijar algunos bancos de referencia topográfica que permitan un control de las desviaciones verticales. Dentro de los bancos de referencia se pueden emplear los siguientes:

- *Bancos de nivel.* Los bancos de nivel permanentes se utilizan para referenciar las rasantes de los caminos al nivel del mar. Resultan también de utilidad para controlar los cambios de pendiente y las irregularidades en la sección transversal en zonas de transición de pavimentos existentes, en su continuación con tramos nuevos o de rehabilitación.
- *Bancos de nivel transitorios.* Este tipo de bancos se emplea en combinación con el banco de nivel permanente, a manera de enlace, para el control de los niveles de la obra. Se ubican en puntos situados fuera del área de influencia de los trabajos, para que éstos no alteren los resultados de las mediciones. Es recomendable, asimismo, repintar o remarcar estos puntos con objeto de que no se pierdan.
- *Estacas de control.* Mediante el uso de los bancos de referencia se establecen los puntos de control empleando estacas, las cuales posteriormente servirán para el sembrado de las estacas metálicas en ambos lados de la vialidad por construir.

Para mayor claridad, en las estacas se puede colocar una bandera de marcación. Normalmente ésta debe contener la siguiente información: cadenamiento del centro de la línea, información sobre la curva (en su caso), distancia a la orilla de la losa y su elevación, con una aproximación de 3 mm y si se trata de corte o relleno. Es común que esta información de la rasante está referenciada al borde

superior de la losa. En zonas de tangente, donde ambas orillas tengan la misma elevación, la información prácticamente será la misma

En todo momento se deberá tener presente que el perfilado tendrá que ser perfectamente conciliado con las características de pavimentación, así, la cuadrilla que establece el perfilamiento debe tener conocimiento de si el personal va a pavimentar un tramo dado a ancho completo o sólo una parte del mismo

4.1.7 Mezclas y tramos de prueba

La magnitud de las obras de pavimentación de cualquier tipo es tal que requiere del estudio, ensaye y manejo de varios materiales, los cuales se utilizan en forma masiva y por ello mismo implican su empleo de manera sistematizada. En este sentido, una vez establecidas las especificaciones y después de una revisión exhaustiva de los planos de construcción, será necesario corroborar los criterios de selección de los materiales que se van a utilizar. Se entiende que en el proyecto ya se especifica la calidad y extensión de los bancos. En esta etapa adquiere especial atención el estudio de los bancos de materiales probables. Cuando estos últimos sean estudiados y se verifique su cumplimiento con los requisitos de calidad demandados en el proyecto, se estará en condiciones de iniciar la campaña de obtención y procesamiento de muestras representativas para dar comienzo al estudio de mezclas.

La etapa de estudio de mezclas es crítica para el proyecto, pues en ella se valoran distintas dosificaciones para cada tipo de agregados previamente analizados en los bancos de explotación aprobados. El estudio de mezclas debe comenzar con suficiente antelación con respecto al inicio físico de la producción de concreto en obra, con ello se busca obtener dosificaciones de mezcla aceptables para el proyecto con sus variaciones en propiedades más relevantes como pueden ser

- a) Estudio de cementos (pruebas físicas y análisis químico)
- b) Estudio integral de agregados (propiedades físicas y químicas)
- c) Estudio de agua, considerando todas las posibles fuentes de suministro.
- d) Tiempos de fraguado en mezclas de concreto.
- e) Resistencia a la compresión simple, f_c
- f) Resistencia a la tensión por flexión
- g) Evaluación de los diferentes aditivos por emplear, de acuerdo con normas vigentes

De esta lista, en las primeras etapas se deben evaluar con prioridad inmediata los incisos (a) a (f). Prácticamente se puede obtener un catálogo de diseño de mezclas, con varias combinaciones, para cada banco aprobado o propuesto por la empresa contratista. Este tipo de información será muy útil para la toma oportuna de decisiones durante el proceso de fabricación del concreto en la planta de mezclado continuo ya en el sitio, pues en dicho proceso se manejan altos volúmenes de material y, en ocasiones, las fuentes de suministro de las materias primas no necesariamente tienen la misma procedencia u origen, lo cual podría representar problemas para la uniformidad en la producción del concreto.

Durante las primeras producciones de mezcla en el proceso de pavimentación es frecuente encontrar discrepancias en algunas propiedades o, incluso, contradicciones entre algunas características, por ejemplo baja plasticidad de mezclas para altos contenidos de reductor de agua. Este tipo de problema se podría atribuir a presencia importante de arena triturada o a un mezclado deficiente.

Tramos de prueba

Es una práctica en los concursos y contratos el que se solicite al contratista que tienda tramos de prueba antes de iniciar formalmente las operaciones de pavimentación en el cuerpo principal. Para este efecto se aprovecha para pavimentar algún ramal de un entronque de menor importancia o un segmento de camino de acceso que se encuentre cerca del sitio de arranque. El propósito de esta práctica es por una parte probar que los equipos cumplan y estén en condiciones de operar en el rango de operación especificado, por otra parte iniciar la logística de la operación y, finalmente, permitir a las brigadas familiarizarse con la operación de los equipos y con la coordinación entre cada uno de los actores de la obra. En este tramo de prueba se evalúan cada uno de estos aspectos y se verifica la calidad final lograda en el pavimento, efectuando los ajustes necesarios antes de autorizar el arranque formal de la pavimentación.

4.2 CALIBRACIÓN DE EQUIPOS

Los equipos actuales para el mezclado, sean plantas estacionarias de concreto premezclado, camiones mezcladores, o plantas centrales, cuentan con básculas que miden con mucha precisión los materiales que van a ser introducidos en los tambores de mezclado. El equipo está diseñado para permitir ajustes antes del proceso de



mezclado y durante éste. Antes de iniciar los trabajos, se deben realizar ajustes y calibración cuidadosos.

4.2.1 Plantas de mezclado y equipo de transporte

Las plantas semiautomáticas y automáticas normalmente vienen provistas de trampas que permiten

- que el mecanismo de carga se abra sólo cuando el indicador de pesos de la báscula marque cero y cuando la compuerta de descarga de la tolva de pesaje esté cerrada, y
- que la compuerta de descarga se abra únicamente cuando esta el total de la carga prescrita en la tolva y cerrado el mecanismo de carga. El operador de la dosificadora nunca debe interferir con la secuencia de trabajo de las compuertas.

Las tolvas de pesaje se construyen de manera tal que su inspección sea sencilla y de fácil acceso, las tuercas que pudiesen aflojarse durante la operación, normalmente cuentan con dispositivos adicionales de sujeción. Por otro lado, el mecanismo de pesaje y los tableros indicadores deben ser muy visibles tanto al operador como al supervisor.

Las básculas para el pesaje de los componentes del concreto pueden ser de balancín o de tablero, siempre que no tengan resortes, aunque también son aceptables otros métodos de pesaje como pueden ser el eléctrico, el hidráulico y mediante celdas de carga. El indicador de la báscula debe tener una sensibilidad del 10 por ciento de la capacidad nominal de la báscula. La gran mayoría de las plantas se equipan con sensores de carga que registran el peso de manera electrónica.

Los aditivos líquidos se bombean de tambos o depósitos a dosificadores cilíndricos previamente calibrados para su medición. Al igual que el agua, se miden por volumen. Los instrumentos de medición normalmente se sitúan, siempre visibles, frente a la caseta del operador de la planta.

Antes de iniciar la carga de mezclado en la dosificadora, se requiere que el contratista proporcione unas diez taras o pesos de kg-masa exacta de 25 kg —pesos de prueba— para la calibración de las básculas. Estas se retiran y se ajusta la lectura de la báscula a cero. Posteriormente se colocan los pesos conocidos dentro de las tolvas de pesaje, uniformemente distribuidos, y se observa y anota la lectura en el medidor de pesos cuando todos los pesos estándares se han colocado, después, se retiran estos últimos en su totalidad y se añade cemento o grava hasta que el indicador de pesos marque la misma

lectura que cuando se había colocado la totalidad de los pesos. Se vuelven a colocar los pesos estándares y se repite la secuencia hasta que el peso total alcanzado (cemento o grava más los pesos de 25 kg) sea mayor al peso total proyectado de cada carga de materiales dentro del tambor de mezclado.

Otra manera sencilla de calibrar es aplicando cargas conocidas, a manera de pesas y compararlas con lo registrado en el indicador o carátula de la báscula; en caso de discrepancias, se hacen los pequeños ajustes en la báscula hasta que estén de acuerdo las lecturas con las pesas, dentro de las tolerancias aplicables, las cuales son normalmente las divisiones menores de la escala.

Se debe verificar la sensibilidad de la unidad de pesaje durante su calibración mediante la adición de pesos conocidos del orden de 0.2 por ciento del peso total a las tolvas de pesaje, en incrementos secuenciales, y tomando las lecturas del indicador. Los movimientos de este último deben reflejar la carga aplicada.

Durante la operación del equipo se debe verificar que, al descargar los materiales después de cada carga de ingredientes, el indicador —pantalla— de peso regresa a la lectura cero. Si ello no ocurre, será indicativo de que parte del material se queda en las tolvas de pesaje y, en consecuencia, las cargas no son las correctas. Se requiere verificar periódicamente, por lo menos en el caso de básculas automáticas con retenes o trampas en su posición cerrada, que se presente efectivamente la interrupción de suministros de manera efectiva.

Al igual que el control de pesos, el mecanismo de control de corte de carga se puede calibrar durante la operación normal de medición de pesos; para ello, se lleva el marcador que detiene la báscula hasta su posición normal en varios incrementos, durante un número de cargas sucesivas, y luego se comparan las lecturas en la carátula del indicador en cada detención con las posiciones del indicador que ya se habían fijado con anterioridad.

Las básculas siempre deben estar niveladas, y sus componentes activos libres de aceite y polvo. Todo el armazón que sostiene los silos debe estar convenientemente cerrado para evitar que las fuertes rachas de viento puedan afectar las lecturas del indicador de pesos. Además, las tolvas para el cemento deben contar con respiraderos para permitir el escape de aire. En general, todas las tolvas y compuertas para el pesaje deben ser herméticas y exentas de filtraciones.

En el caso de que la planta sea de mezclado, se deberá además calibrar o verificar la eficiencia en el mezclado.

Para ello, se debe verificar el estado de limpieza del recipiente de mezclado, su estanqueidad, el estado de las aspas y ya en funcionamiento verificar la potencia y velocidad para el mezclado de los materiales. Al igual que en las tolvas de dosificación y descarga se revisara la operación de las compuertas de descarga y su grado de mantenimiento. Finalmente, en equipos automáticos se verificará que se cumplan los tiempos dados en cada operación del programa y se cotejarán los códigos de designación de mezclas con el producto final. En los casos en que no se cumpla alguno de estos puntos, se requerirá la intervención del personal del taller de mantenimiento y de personal electromecánico y de sistemas para corregir cada punto.

Equipos de transporte

La parte subsecuente en la revisión de calibraciones para el suministro de concreto en el tramo es el equipo de transporte, que podrá ser equipo revolver, equipo agitador o equipo no agitador.

Dentro del equipo revolver, si se está haciendo el mezclado del concreto en camión, se deberá realizar la misma verificación del equipo de mezclado de la planta, además, se verificará la correcta operación del contador de vueltas y del medidor dinámico de revenimiento cuando el equipo cuente con éstos.

Para el equipo agitador la revisión se limita al buen estado del equipo, su estanqueidad, que esté libre de adherencias y que tenga potencia suficiente para girar con el concreto a la velocidad de agitación.

En el caso del equipo de transporte no agitador, se deberá vigilar la capacidad del recipiente, que esté libre de adherencias así como el libre accionamiento y descarga de las compuertas.

4.2.2 Máquina de extendido previo

Estas máquinas consisten en una banda de descarga y transporte de mezclas, gusano distribuidor y placa de enrase. Los equipos modernos incluyen sensores para el control direccional y de alineamiento.

Se deben preparar los sensores para las condiciones locales de la obra. De igual manera, hay que revisar que no se tengan fugas de aceite. Además, antes de dar inicio a los trabajos, se debe asegurar que la placa enrasadora (o de niveles) trabaje correctamente, de acuerdo con los mandos del equipo. En caso de contar con bandas de colocación, se tiene que verificar el buen estado de estas

últimas, y también que en las cajas receptoras o de descarga no se presenten acumulaciones de residuos.

4.2.3 Pavimentadora

De preferencia, el equipo debe cuadrarse, tal como en el caso de máquinas montadas sobre cuatro orugas. El marco de pavimentación tiene que fijarse paralelamente respecto a la línea de control. Si no ocurre así, a pesar de que las orugas circulen de manera totalmente paralela al eje de trazo, el equipo trabajará ligeramente esviado. La mejor manera de cuadrar el equipo es usar la escuadra de un triángulo rectángulo "3-4-5".

Una vez cuadrado el equipo respecto a la línea guía, posteriormente se deben nivelar las placas de cimbrado. Se tiene que asegurar además que las orillas y el centro estén alineados correctamente. El bombeo superficial propuesto debe ajustarse tanto en las placas enrasadoras como en las propias cimbras deslizantes y placas vibroapisonadoras.

Las placas de cimbrado deben situarse paralelas a la línea guía, lo que equivale a ajustar el ángulo de avance o de ataque de la máquina, este aspecto es de vital importancia para lograr un pavimento uniforme. También es importante la selección correcta de placas de salida, situadas en los costados inferiores de la máquina.

4.2.4 Vibradores

Son vibradores tubulares de inmersión en "L", y normalmente accionados por la rotación de un árbol de levas. Los vibradores con que cuentan las máquinas pavimentadoras generalmente funcionan y se comportan igual en ambas direcciones, esto es, en el plano vertical y en el horizontal. La energía que transmiten los vibradores es función directa de su peso y de la velocidad de vibración. Su peso es fijo, al igual que su amplitud (distancia del movimiento hacia delante y hacia atrás). En estas circunstancias, la única variable que se controla es la velocidad con la cual actúan, es decir, el número de vibraciones por minuto, VPM. Éstas se controlan con el volumen de fluido hidráulico dentro del motor hidráulico. En tales condiciones, tanto la energía como su influencia varían de acuerdo con el número de VPM.

La energía que se transmite por el vibrador es en forma circular, alrededor del eje de rotación. La zona influencia cambia con:

- la velocidad de avance de la pavimentadora;



- la distancia del motor al eje del vibrador; y
- el cuidado y limpieza que se tenga con el montaje en el cabezal que los sostiene. Este último se localiza frente a la placa de enrase final.

En la tabla 4.2 se da una idea de los niveles de vibración de los diferentes tipos

Tabla 4.2 Frecuencias de vibración

Tipo	Impulsos por minuto
Vibradores de inmersión	5000 - 10.000
Vibradores de contacto	3500 mínimo

La efectividad, o más específicamente, la energía de vibrado también depende del diseño y del espesor de la mezcla en la cual actúan los vibradores. Normalmente se trabaja en rangos comprendidos entre 7000 y 9000 VPM. El número de vibraciones se puede medir mediante tacómetros de vibración, y siempre se debe hacer cuando está sujeto a carga.

dependiendo de la respuesta del concreto al ser consolidado por los vibradores, habrá necesidad de ajustar o no la energía de estos. Así, antes de iniciar los tramos definitivos, se deben realizar los ajustes particulares en cada uno de los vibradores hasta lograr su eficiencia adecuada, de preferencia en el tramo de prueba (véase el inciso 4.1.3, "Mezclas y tramos de prueba"). La posición vertical y horizontal de cada uno se puede ajustar de forma mecánica. La separación horizontal entre vibradores se puede establecer adoptando como criterio que sus áreas de influencia se traslapen en un rango de entre 5 y 7.5 cm. Una separación menor tiende a elevar mayor cantidad de mortero hacia la superficie, facilitando así la labor de texturizado superficial de la losa. La frecuencia y posición de los vibradores se debe ajustar para producir la máxima consolidación, pero sin llegar a segregar el concreto.

Los niveles requeridos de energía para una velocidad de pavimentadora y diseño de mezcla dados, y un espesor de losa específico, podrán de hecho requerir que algunos vibradores trabajen con energías mayores y otros, a menores energías.

La acción del vibrado no es la solución para otros problemas de pavimentación asociados, y si puede hacerlos más evidentes. Siempre se debe asegurar que su operación no deje huella en la superficie de la losa. Si se

aplica demasiada vibración, se promoverá segregación en la mezcla y se reducirá el contenido de aire.

Las pavimentadoras cuentan con charolas vibratoras para proporcionar un vibrado por contacto. Estas charolas vienen en la parte posterior inferior del equipo de pavimentación. Siempre deben trabajar a sección completa, esto es, toda su área debe estar en contacto con la superficie.

Todos los vibradores deben desactivarse cuando se detenga el tren de pavimentación.

4.2.5 Sensores

Una vez que ya se ubicó y preparó la máquina pavimentadora, es necesario revisar y reposicionar los sensores. Éstos pueden ser eléctricos, hidráulicos o de láser. Las varillas de los sensores deben colocarse lo más horizontal posible y deben siempre ejercer contacto sobre la línea guía. Para ello, durante el proceso de pavimentación será necesario realizar verificaciones rutinarias, algunos equipos utilizan contrabalanceo para este propósito. Esta verificación se hace antes y durante la operación del equipo.

Cuando se fijan los sensores, es común colocarlos a distancias medias de 25 cm con respecto a las líneas guía. Además, es recomendable situarlos a distancias no uniformes respecto a las estacas que sostienen a las líneas-guía, con la finalidad de que si existen "columpios" continuados o repetitivos, las varillas de los sensores que van tocando las citadas líneas no registren tal anomalía simultáneamente, y den como resultado depresiones en el perfil del pavimento. Se trata de compensar el efecto negativo de una tensión deficiente de las líneas de control.

4.3 LOGÍSTICA GENERAL DE LA OBRA

Tal como se menciona en otras partes de esta obra, la selección del sitio de almacenamiento de materiales obedece a limitantes técnicas y ventajas económicas, pues siempre se busca disminuir cuanto sea posible la distancia entre la planta de producción y los puntos de colocación de las mezclas. En algunas situaciones, cuando el tramo por construir es inusualmente largo, se establecen diferentes localizaciones de la planta, tratando de que, en cada una, las distancias de traslados hacia ambos lados no superen los 20 minutos de recorrido.

Como se señala en la cláusula 4.1, "Trabajos preliminares", el número de camiones para los diferentes suministros y

para el transporte de mezclas puede ser importante, por lo que los accesos a la planta tendrán que ser necesariamente fáciles y deberán ser mantenidos en buen estado durante la obra

Antes del inicio formal de la producción del concreto, se debe contar en los patios de almacenamiento con suficiente cantidad de arena y de grava. Igualmente, los tanques de almacenamiento y los silos de cemento deberán estar a su máxima capacidad. Es recomendable que siempre exista durante un día normal de trabajo material suficiente para cinco días, a fin de evitar retrasos por contingencias

Los depósitos del agua en la planta deberán estar llenos, aun cuando se bombee agua de pozos o de otra fuente de suministro, asegurando así que habrá agua para las condiciones óptimas de producción

Como ya se mencionó en otras partes de esta publicación, es importante que los equipos de pesaje, dosificación, bandas, etc., estén a punto y calibrados directamente en obra. También se deberá cuidar que haya la cantidad suficiente de termómetros para registrar temperaturas en materiales y concreto.

Los ciclos de carga y descarga de la olla u ollas revolventoras de la planta pueden ser programados; sin embargo, en ocasiones no se puede tener un control perfecto del orden de entrada de los camiones que van a ser cargados, por lo que la carga de la mezcla se debe ajustar o efectuarla de manera manual el operador de la planta, conforme las diferentes unidades se formen para ser cargadas

Tanto dentro de la misma planta, como en puntos convenientemente seleccionados, se deberán dejar áreas específicamente designadas para alojar mezclas desechadas o rechazadas. También se deben dejar áreas específicas para disponer del agua de lavado en planta

Lo mismo en la planta que en los sitios de colocación del concreto, deberá haber personal de control de calidad para comunicar anomalías en materiales y procedimientos detectadas a simple vista o como resultado de los ensayos de laboratorio

Todo el personal de control de calidad y de seguridad de la empresa contratista deberá contar de preferencia con equipo de comunicación portátil. Por otro lado, la dirección de la obra debe mantener un contacto estrecho con la estación meteorológica más próxima o montar una en el sitio

4.4 TENDIDO Y ACABADO

4.4.1 Cimbra fija

4.4.1.1 Pasajuntas y malla de refuerzo

Cuando el pavimento incluya pasajuntas, es necesario que las silletas que las sostienen sean ancladas antes de cualquier actividad de colado. El proceso de fijación debe tomar en cuenta que las pasajuntas tienen que quedar totalmente paralelas al eje de trazo, y luego se deben dejar unas marcas sobre la cimbra metálica para referenciar los futuros cortes para la formación de juntas.

Cuando se coloca malla de refuerzo, es común colar la losa en dos etapas, para ello, se emplean dos extendedoras. Con la primera, se extiende aproximadamente 2/3 del espesor total, para luego colocar la malla de refuerzo. Al final se completa la sección de proyecto.

Como es común en los trabajos de pavimentación con concreto hidráulico, las juntas frías se deben ejecutar al inicio y al final del día. También se deben ejecutar cuando se presenten interrupciones en la entrega de mezclas o por paros de considerable duración del equipo de pavimentación.

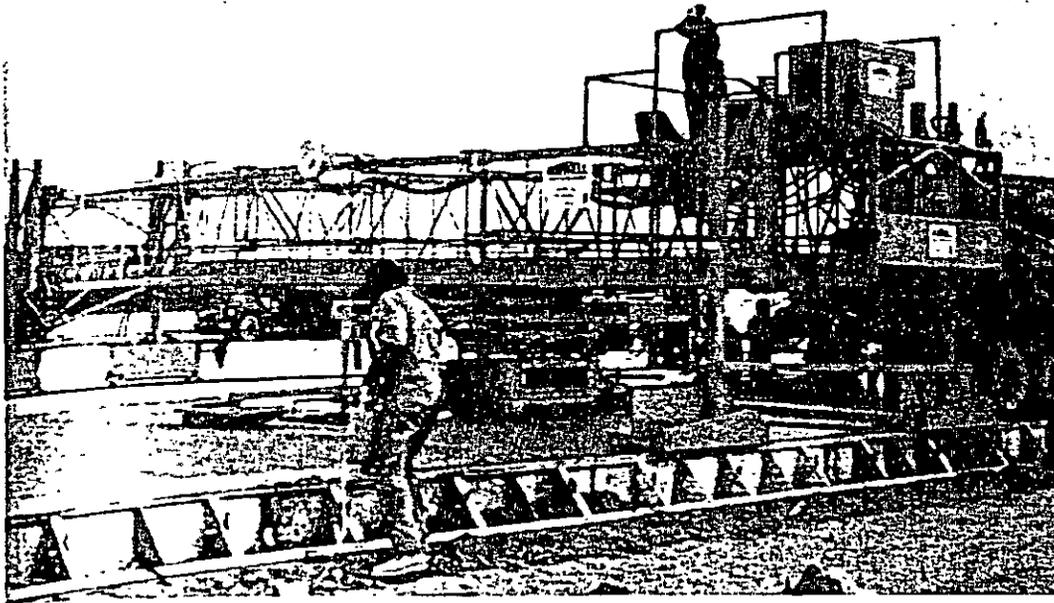
4.4.1.2 Entrega y colado del concreto

Antes de proceder a los trabajos propiamente de colocación, se requiere contar con accesos perfectamente definidos, garantizando que no se afecten las capas de apoyo de la losa, ni se provoquen movimientos en las cimbras. Estos accesos tienen que ser conocidos por el personal de todas las instancias y niveles, de manera que la entrega sea ágil y eficiente.

Como en cualquier técnica constructiva, es necesario que todas las operaciones de colocación se hagan de manera uniforme, colado, vibrado, enrasado y terminado. Siempre se buscará aplicar una práctica uniforme para estas actividades. Con objeto de evitar segregaciones y problemas con el equipo de extendido, en todo momento se evitará colocar demasiada mezcla al frente. Con ello se eliminan derrames a los lados de las cimbras.

El equipo para el extendido se desliza sobre la cimbra, e incluye un conjunto de vibradores internos que van actuando en la dirección del tendido. Todo este trabajo preliminar antecede a la máquina terminadora, tal como se aprecia en la figura 4.2. El equipo de terminado usualmente con dos reglas para el enrasado de superficie. También incluye dos placas apisonadoras que permiten el acomodo final de las mezclas.

Figura 4.2 Pavimentadora sobre cimbra fija.



Existen también equipos más automatizados que se deslizan haciendo en una sola pasada el vibrado, enrasado, aplanado y texturizado del concreto. Ello se logra con dos tornillos helicoidales que distribuyan el concreto y con rodillos dobles nivelables hidráulicamente para el acomodo y aplanado de la superficie recién perfilada. Los anchos que manejan pueden alcanzar 22 m aproximadamente. Para mayores detalles se puede consultar literatura especializada. Estos equipos automatizados cuentan con dispositivos de ajuste del coronamiento o bombeo superficial.

Al igual que en la técnica de cimbra deslizante se admiten e incluso se aconsejan los ajustes en el equipo y en su operación general. Siempre resultará en un avance más uniforme de la máquina. También se tienen que evitar labores excesivas de terminado, aplicación excesiva de agua, así como el uso de cepillos para el manejo de la pasta superficial. Las pequeñas oquedades que queden detrás de la terminadora se pueden resanar con herramientas manuales.

Un equipo de terminado mecánico normal cuenta con regletas que consolidan y enrasan el concreto. En obras grandes se pueden utilizar incluso hasta dos equipos de terminación en serie, mientras que en obras pequeñas sólo se emplea la terminadora y los vibradores internos están montados en un chasis ubicado cerca de las cimbras principales colocadas a los lados.

Para el texturizado, siempre se recomienda mantener húmeda la tela de yute para el acabado inicial. El momento adecuado para aplicar el escobillón de

macrotexturizado es cuando la superficie del concreto recién terminada ya ha perdido el brillo excesivo por presencia de agua o lechada.

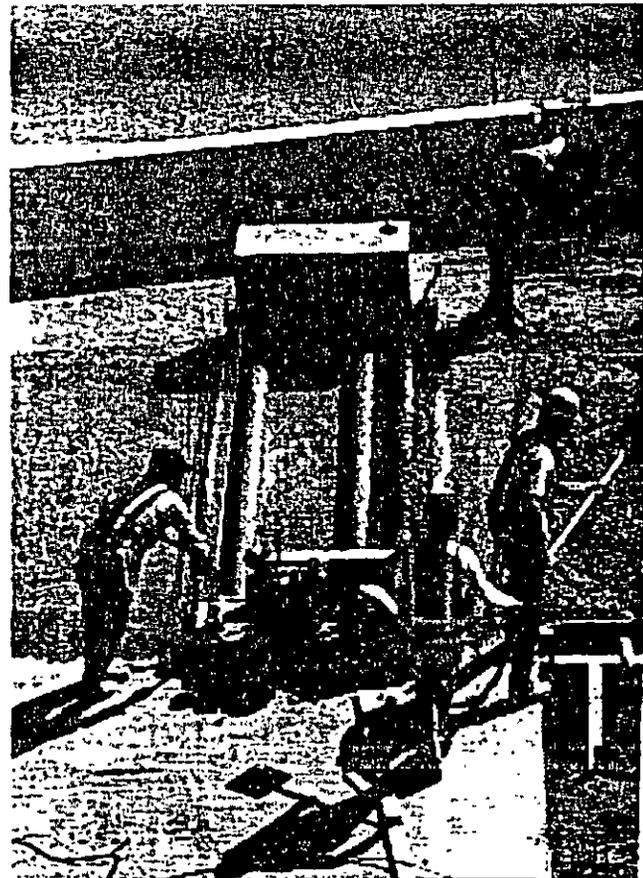


Figura 4.3 Rodillos vibratorios.

4.4 1.3 Colocación manual

En algunos casos, por ejemplo, en trabajos de calles o vialidades cortas de sección transversal pequeña, o en intersecciones de difícil acceso para equipos automatizados, se pueden emplear reglas, rodillos vibratorios triples, reglas vibratorias manuales o autopropulsadas, etc (figuras 4.3 y 4.4).

En la figura 4.5 se ilustra la colocación con equipo manual, es decir, con simples reglas de enrase. En este tipo de actividad se debe poner especial atención a todo el desarrollo de los trabajos. A continuación se enumeran algunas precauciones

- ❑ Es mejor distribuir el concreto a todo lo ancho del área por colocar, en espesores aproximadamente uniformes. Luego hay que moverlo con palas, nunca con rastrillos o con los mismos vibradores de inmersión, ya que se puede provocar segregación.
- ❑ Se debe asegurar que la actividad del vibrado se realice de manera apropiada

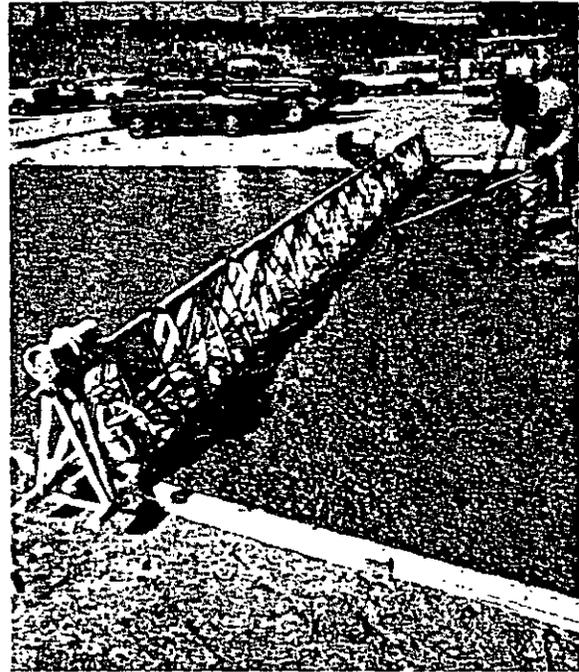


Figura 4.4 Regla vibratoria.

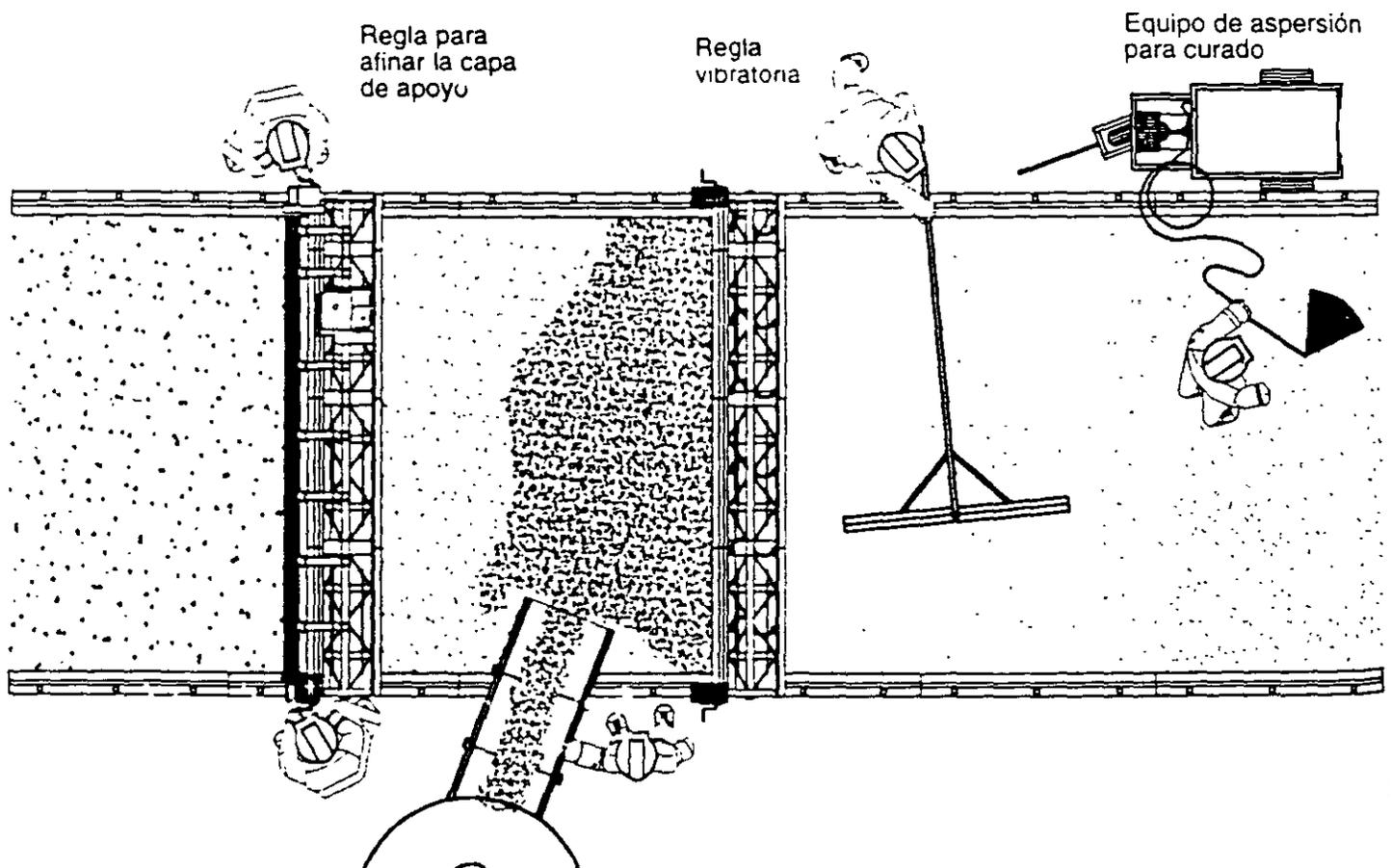


Figura 4.5 Ilustración de la colocación de concreto con herramienta manual.



- ❑ Conforme se hace lo anterior, debe verificarse que la regla vibradora avance sobre la cimbra. En caso de requerir más enrasado en forma manual detrás del equipo, hay que realizarlo vigorosamente.
- ❑ Continuar el enrasado con al menos dos trabajadores que utilicen tablonos o de preferencia llanas grandes, cuidando que se vayan alcanzando los niveles y pendientes estipulados en el proyecto.
- ❑ El enrasado debe continuar hasta que se obtenga una superficie plana, libre de excesos de lechada. Para lograr lo anterior se sugiere hacer traslapes entre las diferentes pasadas.
- ❑ En los lugares poco accesibles se deben utilizar llanas manuales pequeñas, de magnesio, haciendo otra vez la consolidación con un vibrador de inmersión, cuidando siempre las distancias de aplicación de este último.

Se debe poner cuidado especial en la consolidación del concreto en las zonas de pasajuntas. En estos lugares específicos es muy importante garantizar que la masa de mezcla este efectivamente en contacto con el acero tanto de las siletas como de las pasajuntas, en todo momento se deben evitar las oquedades.

4.4.1.4 Cunetas y guarniciones

Hay que poner especial cuidado al terminar la superficie del pavimento en la vecindad de la línea de las cunetas, para desalojar los escurrimientos de agua de manera efectiva. Ello es particularmente crítico en los puntos altos o bajos de las curvas verticales.

Se busca siempre que las caras de la guarnición en contacto con el pavimento sean totalmente verticales, y que su parte superior quede perfectamente definida.

4.4.1.5 Remoción de las cimbras

En ocasiones, antes de retirar las cimbras se pueden ejecutar los cortes para juntas transversales. Ello puede obedecer a indicaciones del proyecto o a preferencias de la empresa contratista. Sin embargo, se debe limitar el tránsito de camiones de la construcción, pues podrían generar fracturamientos en los bordes de las juntas.

Cuando la remoción de elementos de cimbrado se hace de manera apropiada, el descimbrado puede tener lugar entre las seis y las ocho horas posteriores al colado. Primeramente se deben extraer los pasadores, con equipo mecánico o hidráulico, y después se retiran las cimbras de manera manual, con la aplicación previa de ligeros golpes, esta actividad se debe realizar sin

apalancar entre la cara del concreto y la cimbra en contacto con éste.

Una vez removidas las cimbras, es necesario revisar los cantos de las losas y verificar la distribución de los agregados en éstas para darse una idea de la efectividad del proceso de vibrado y acomodo del concreto.

Si existen zonas de apanamiento o picadas, serán indicativas de que se presentan segregaciones, y es el momento de modificar las prácticas de acomodo y vibración en las secciones de pavimento por construir. Inmediatamente después de remover las cimbras, se procede a curar las caras de orilla o cantos.

Una vez removidas las cimbras deben limpiarse, pues de no hacerlo se dificultará su uso posterior, es necesario también que estén limpias para poder revisar su geometría con reglas. Una vez limpias, ya se puede proceder a su almacenamiento para las labores del día siguiente.

4.4.2 Cimbra deslizante

El concepto de cimbra deslizante aplicado como técnica de pavimentación se debe entender como el proceso de acomodar, consolidar, dar forma geométrica y terminar una masa de concreto hidráulico en estado fresco, mientras desliza de manera continua una cimbra en los costados de una masa plástica de concreto. Para esto se requiere una máquina autopropulsada capaz de contener, accionar y controlar las herramientas que internamente posee para distribuir, enrasar, vibrar y terminar la masa de referencia.

Dentro de los trabajos preparatorios de pavimentación con equipo automatizado, como es el caso con cimbra deslizante, destaca la preparación de la capa subrasante o subbase. Ésta debe prepararse en compactación y geometría de acuerdo con las tolerancias marcadas en el proyecto y a los lineamientos contenidos en la cláusula 2.1 de la parte de *Proyecto*.

La capa subrasante o subbase debe no sólo quedar conformada de acuerdo con las especificaciones como una capa que forma parte del sistema de pavimento, sino que es al mismo tiempo una plataforma de trabajo para la colocación de la capa de subbase. De ser necesario, se puede incluso estabilizar con materiales tales como grava triturada, cal hidratada, cenizas volantes, cemento portland, etc. Antes de colocar las capas superiores del pavimento, la capa subrasante o subbase debe ser recompactada a los contenidos de agua óptimos previamente determinados en el laboratorio en el caso de

que haya sufrido un corte de afinado. Este tipo de medidas correctivas vendrán siempre incluidas en el proyecto

4 4.2.1 Preparaciones previas a la subrasante o subbase

Es común que, por retrasos en el desarrollo de los trabajos, la caja en donde se preparó la subrasante quede abierta durante mucho tiempo. Igualmente, en ocasiones no se logran las tolerancias para las rasantes de proyecto y se detienen los trabajos. En tales circunstancias, conviene hacer ajustes mínimos sobre la subrasante o subbase existente con deficiencias mínimas de alineamiento, en lugar de ejecutar cortes y rellenos de grandes dimensiones. Dichos ajustes se pueden lograr recortando o rellenando, según proceda, el perfil existente en el mayor número de secciones que sean necesarias para igualar la subrasante. Como consecuencia de estos ajustes en los perfiles, se debe considerar la construcción de transiciones acordes con los nuevos perfiles y que cumplan las tolerancias geométricas

Es obligación para la empresa contratista mantener una comunicación estrecha con su personal de topografía, pues se deben establecer las elevaciones y los espaciamientos ya definidos por los puntos de referencia para dar la rasante de proyecto. De hecho, este tipo de controles sirve para fijar la línea guía, esta última es a su vez la pieza clave para realizar el control de elevaciones y de alineamiento horizontal para la capa de subbase y para la losa de concreto

4 4.2.2 Sobreanchos

Por este concepto se debe entender el área de carril inmediatamente fuera del borde del pavimento. Sobre esta zona es donde circulan las orugas o llantas de las pavimentadoras, por esta razón es esencial que esta zona, en su misma parte de la capa de subbase, sea convenientemente conformada y afinada.

Por lo anterior, dentro de los alcances geométricos originales establecidos en el proyecto, normalmente se dejan estipulaciones para que la capa de subbase o la capa de subrasante, en el caso de que el pavimento cuente nada más con esta última, se amplíen entre 0.80 y 1 m más allá del ancho previsto de la losa. En este orden de ideas, la pendiente del ensanche debe ser enteramente igual a la de la subbase o de la subrasante, para garantizar que los espesores de losa sean constantes en zona de tangente, aunque no necesariamente en zona de curvas. Por otro lado, el paso de los diferentes equipos montados en orugas o en llantas, como pueden ser los de extendido previo, pavimentadora, y el de texturizado, puede inducir

desgaste en la superficie de la zona de ensanche; por esta razón, se debe construir de manera que resulte duradera y conservarla libre de residuos de concreto.

En caso de que la losa se construya directamente sobre el terreno natural o la subrasante, se debe poner especial atención en la detección de zonas o puntos blandos, pues ello puede poner en riesgo la estabilidad al paso de los equipos y, consecuentemente, se puede traducir en saltos bruscos de la losa ya terminada. La empresa contratista debe verificar que la compactación de la superficie de rodamiento bajo las orugas o llantas de los equipos sea uniforme

Cualquier tubería subterránea que se localice en estas zonas debe ser colocada con las debidas preparaciones, con objeto de prevenir su posible rompimiento cuando pasen los equipos de compactación. Al final, se ejecuta la colocación y terminación del concreto.

4 4.2.3 Acero de refuerzo

Si bien esta publicación se refiere al concreto simple con y sin pasajuntas, ocasionalmente algunos proyectos incluyen mallas electrosoldadas como elementos de refuerzo para efectos de temperatura en el concreto. Cuando se colocan estas mallas de refuerzo, el ancho normal de las mismas debe ser del orden de 10 por ciento menor que el ancho nominal del carril, y la longitud de estos elementos de refuerzo vendrá regida por la separación entre juntas transversales, su movimiento y los traslapes aceptados de malla indicados en el proyecto. Desde luego, es muy importante el manejo adecuado de los lotes de malla. En general, conviene manejar la malla en hojas, y no en rollo, pues con éstos se dificulta su desdoblamiento y la colocación correcta dentro de la masa de concreto.

Al igual que cuando se utiliza cimbra fija, en el caso de cimbra deslizante se puede colocar el acero de refuerzo de manera correcta colando la masa de concreto en dos etapas: primero se extiende del orden de dos tercios del espesor total de proyecto con una máquina esparcidora, vibrando convenientemente el espesor extendido. Después se coloca el refuerzo sobre el concreto enrasado y compactado, y al final, ya con la pavimentadora, se vacía el concreto faltante hasta completar el espesor de proyecto. Esta capa se debe enrasar, vibrar, aplanar y terminar de manera convencional.

La segunda alternativa de colocación del refuerzo es vaciando la totalidad del espesor de concreto, y a continuación extender el refuerzo, en las dimensiones prescritas en el proyecto, para que un equipo insertador lo lleve a su

posición correcta dentro de la losa. Para ello se modifica incluso su posición original, de manera que el pequeño arrastre que de él haga la máquina en su operación sea tomado en cuenta. Es importante que este acero de refuerzo nunca invada el área de influencia de las pasajuntas

4.4.2.4 Proceso de colocación del concreto

Lo que se espera al final de un proceso de colocación con cimbra deslizante es básicamente una masa de concreto que, luego de haber sido distribuida, vibrada y comprimida, mantenga cierta forma, impuesta por el enrase y cimbrado o por los moldes de la pavimentadora. Parte del molde lo constituye la misma capa de apoyo de la losa. En el inciso 3.4.2. "Equipos de pavimentación con cimbra deslizante", se presenta una descripción de estos equipos

La presión necesaria contra la masa de concreto, que obliga a éste a ser "extruido" por la parte posterior del equipo, con la forma correcta, se logra por el propio peso de la máquina sobre el cimbrado y de los dispositivos de ajuste, así como contra las cimbras laterales que confinan a las mezclas plásticas. A esta presión contribuyen también los vibradores, que consolidan y presionan a las mezclas hacia la cimbra lateral de la máquina y hacia los escantillones de enrase y terminado. La acción de vibrado modifica la disposición de las partículas gruesas, hace más fluida la mezcla, y fuerza el deslizamiento relativo entre las partículas y los diferentes elementos de cimbra

Para que la losa se forme de acuerdo con los requerimientos del proyecto en cuanto a geometría, superficie y dimensiones, se necesita asegurar que se cumplan los siguientes requisitos básicos

- ☐ conformación uniforme de masa
- ☐ contenido uniforme de agua.
- ☐ vibración y presión constante, y
- ☐ avance uniforme del equipo

La zona adyacente a los vibradores y a la cabeza estática es donde se aplica energía de consolidación a las mezclas, donde efectivamente las partículas están sujetas a una fuerte excitación, las burbujas de aire explotan, o son forzadas a subir a la superficie para perderse al final, y se presenta una reducción de volumen importante en la mezcla. Es justamente este mecanismo lo que hace posible el empleo de cimbra deslizante

El concreto debe estar en cantidad suficiente y abastecerse de manera continua para que el proceso tenga éxito, de otra forma, la mezcla podría no llenar todo

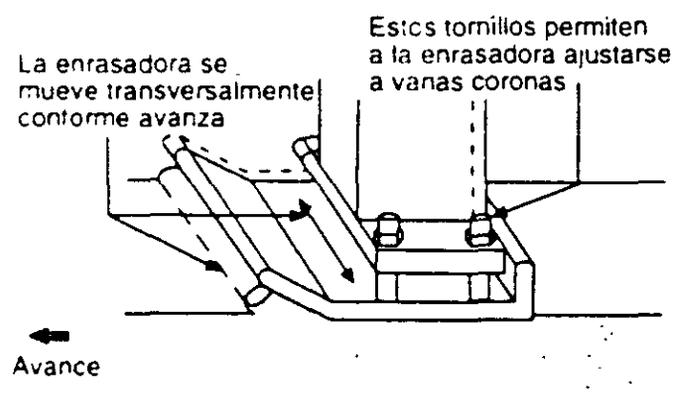
el volumen dentro de la máquina, hasta las cimbras deslizantes, vibradores, barra apisonadora y charolas de perfilamiento. Así pues, para ejercer presión y vibrado correctos, el equipo debe estar totalmente "lleno" de concreto plástico, para que el material extruido tenga la forma, consistencia y apariencia correctas (figura 4.6).

Por lo anteriormente explicado, se subraya la importancia de mantener una producción de mezcla uniforme, pues según sea su consistencia, granulometría y contenido de agua, será su comportamiento ante la vibración y compresión que ejerza sobre ella la máquina. Una variación de las propiedades del concreto demandará un ajuste respectivo en el manejo de la máquina y de sus patrones de vibración.

4.4.2.5 Inicio de los trabajos

Antes de iniciar los trabajos de colocación propiamente dichos, habrá que asegurar que ya se hayan cumplido los siguientes requisitos previos:

- ☐ Funcionamiento del tren de pavimentación,
- ☐ Suficiente tramo de subbase o subrasante (capa de apoyo) para tender el concreto durante la jornada.
- ☐ Resultados de control de calidad de materiales de banco y almacén y de mezclas
- ☐ Todo el equipo auxiliar para la colocación del concreto, como son llanas manuales, "volteadores" y vibradores manuales.



Conforme avanza, un rollo pequeño de concreto se forma frente a la enrasadora, lo que constituye una garantía de que no se formarán oquedades

Figura 4.6 Esquema de la enrasadora durante la operación de una pavimentadora de cimbra deslizante.

- ☐ Comunicación por radio con el personal de la planta. (recomendable).
- ☐ Pipas para el humedecimiento de la capa de apoyo
- ☐ Verificación de la línea de control
- ☐ Ubicación de la junta fría en su lugar correcto (caso de reinicio)
- ☐ Pronóstico del tiempo.
- ☐ Elementos como iluminación, protección contra lluvia, control de tránsito, cimbra para junta fría etc.

Al margen de que para una obra nueva se deba realizar un tramo de prueba para afinar los equipos de pavimentación y los de producción (inciso 4.1.3, "Mezclas y tramos de prueba"), normalmente en un día convencional se deben muestrear al menos dos "bachas" para comprobar la calidad de la producción. En dichas revolturas se deben medir revenimientos, temperatura, pesos volumétricos y contenidos de aire. A partir de los resultados que se obtengan de estas primeras producciones de mezcla, se revisará la necesidad de realizar los ajustes pertinentes. La carga de mezclas ajustadas en los camiones dentro de la planta y su posterior depósito en el tramo constituyen el inicio formal de la pavimentación. Se debe considerar la frecuencia y número de camiones a la salida de la planta, en los muestreos subsiguientes.

En el inicio del tendido también se incluye la ejecución de las juntas frías o de fin de día. Para ello desde el día anterior se deben dejar las preparaciones, que consisten en cimbras de madera con orificios espaciados a la distancia marcada en el proyecto para el paso de las piezas de acero. En forma rutinaria y conforme se vaya extendiendo el concreto, se deben ir revisando los siguientes aspectos.

- ☐ El comportamiento de la mezcla en términos de trabajabilidad.
- ☐ El mantenimiento consistente de la relación agua/cemento
- ☐ El control del revenimiento para que este entre 2 y 5 cm (a menos que el proyecto indique otra tolerancia)
- ☐ La comparación de los revenimientos en planta y en el lugar de colocación, lo cual permite obtener una correlación confiable y determinar la influencia del transporte de las mezclas en este parámetro
- ☐ La coordinación adecuada de la entrega del concreto, de esta manera se pueden hacer ajustes

entre el avance del tren de pavimentación y los camiones que salen de la planta de producción

- ☐ La medición de los espesores
- ☐ La inspección de la condición superficial del pavimento.
- ☐ El ajuste del avance del tren de pavimentación, acorde con los suministros de concreto
- ☐ La medición de rendimientos.

El cálculo de rendimientos es muy útil, es decir, los avances expresados en metros lineales, en metros cuadrados y en metros cúbicos. Esta práctica permite a la empresa contratista cuantificar con precisión los avances de acuerdo con los programas, y también ayuda a controlar el consumo de materiales de manera óptima.

Una de las formas de medir el espesor del concreto fresco es mediante la instalación, previa al colado, de placas metálicas o de aluminio encima de la subbase no estabilizada (cuando es estabilizada, este paso no es necesario) y luego proceder a insertar una varilla y medir el espesor del concreto. Esto, más las mediciones en los bordes, permite calcular los espesores reales colocados respecto a los producidos. De esta manera, se puede llevar un control más o menos estricto de los rendimientos reales, más los desperdicios.

4.4.2.6 Transporte y entrega

De hecho, existen varias formas de transportar las mezclas al sitio de la colocación. Esta parte de la secuencia constructiva se puede realizar con camión revolador, con camiones de descarga lateral o con descarga por la parte inferior, o con camiones de volteo. Con mucho estos últimos son los de uso más corriente. Sin embargo, cada vez están adquiriendo mayor popularidad los de descarga lateral, por su mayor rendimiento. Por otro lado, todos los vehículos, independientemente de su tipo, requieren ser limpiados de forma rutinaria. Además, dentro de los patios de producción deben contar con área específica para su control y lavado.

La entrega del concreto debe ser continua y lo más coordinadamente posible con la velocidad de la pavimentadora, para que esta última tienda la mezcla correctamente, con su acomodo, vibrado y densificación adecuadas. Así pues, siempre será recomendable ejecutar una fabricación de mezclas correcta, coordinar su carga, entrega, y tendido correctamente sincronizados, así como, buscar que la máquina siempre tenga material suficiente al frente y en su interior, que se originen las fuerzas de equilibrio necesarias a fin de lograr una superficie tersa y uniforme. Cuando no se

consigue uniformidad y consistencia en todos estos procedimientos, es inevitable que todo ello se refleje en el momento de realizar las mediciones con el perfilógrafo

El número de camiones de transporte será función de los volúmenes de concreto requeridos por colocar. También influyen las condiciones del tráfico vehicular, así como las condiciones del tramo de camino por recorrer. Es responsabilidad del residente encargado de la obra mantener el número de vehículos necesarios para asegurar que la pavimentadora tenga siempre suficiente carga de concreto frente a ella, por esto mismo, se requiere una comunicación muy estrecha entre el personal del punto de colocación y el de planta de producción, tal como se ha reiterado en otras partes de esta obra.

Para poder garantizar un trabajo continuo se requiere establecer el ciclo de trabajo de los camiones; esto se puede estimar correctamente a partir del tiempo de descarga. A su vez este último es función directa de la velocidad de pavimentación, en metros, multiplicada por el material requerido por cada metro de longitud.

Ejemplo Sea una pavimentadora trabajando a una velocidad promedio v de 2 m/min.

Merma, P , = 3%

Sección del pavimento,

$A = 7.2$ m de ancho x 25 cm de espesor

Rendimiento = $v \cdot P \cdot A$

$= 2 \text{ m/min} \times 7.2 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 1.03 = 3.70 \text{ m}^3/\text{min}$

Así, la cantidad que debe ser movilizada es de 3.70 m³/minuto. De esta manera, para camiones de

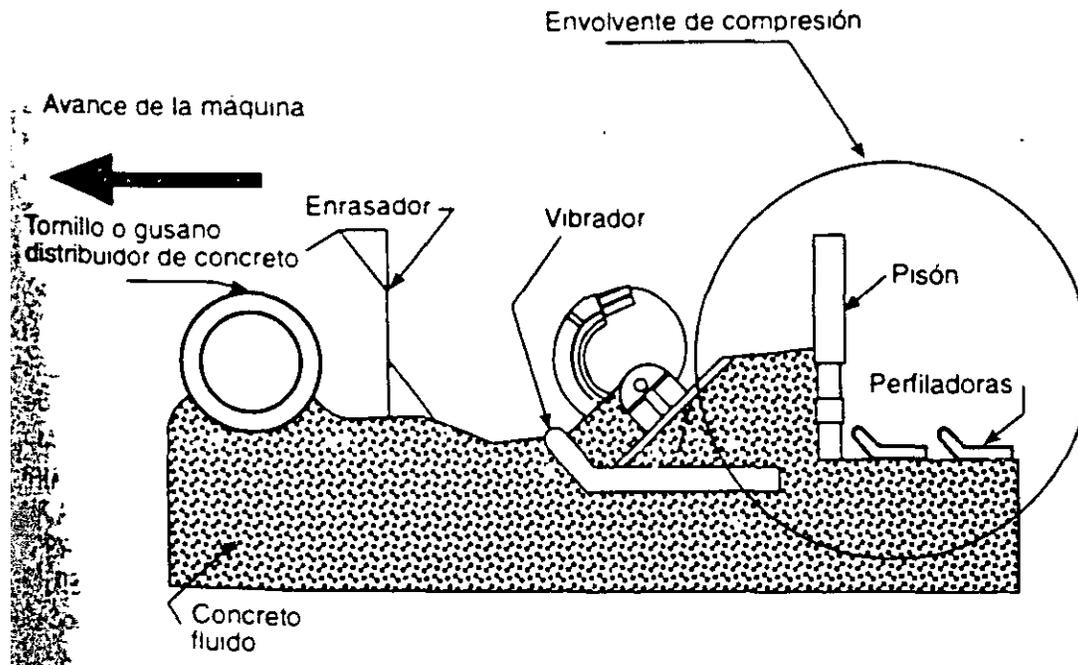
volteo de 6 m³ de capacidad efectiva se requeriría tener una frecuencia de 6 m³ / (3.70 m³ / min) = 1.6 minutos. Es decir, se debería que tener un camión de volteo de tal volumen cada 1.6 minutos, para garantizar un flujo continuo de concreto frente a la pavimentadora. Cualquier incremento en esos tiempos representa un retraso en todo el ciclo de pavimentación e incluso en paros de equipo.

4.4.2.7 Operación durante el tendido

La velocidad de pavimentación que típicamente se utiliza está en el rango de 1 a 2.5 m/min. En última instancia, lo que se hace es regular tal velocidad de conformidad con las entregas de mezclas en el sitio. Así pues, la velocidad de la máquina se incrementa o disminuye tratando de conciliarla con los volúmenes de entrega.

La carga de concreto frente a la pavimentadora también debe ser un aspecto que preocupe al operador de la pavimentadora, y al residente que esté controlando las descargas sucesivas de los camiones frente al gusano o tornillo sin fin del equipo. Se debe exigir que siempre se tenga carga suficiente frente a la pavimentadora. De esta manera, se garantiza que todos los espacios dentro de la máquina estén llenos de mezcla y, consecuentemente, se reduce el riesgo de que la sección de losa resultante presente oquedades, principalmente hacia sus orillas. En la figura 4.7 se presenta el esquema de la parte anterior de la máquina, en donde se muestra que frente a la barra perfiladora siempre debe haber suficiente mezcla ya consolidada. Toda esa sección está bajo fuerte compresión proporcionada por el peso del equipo, sin que necesariamente éste tienda a levantarse. Los operadores

Figura 4.7 Esquema general de la compresión ejercida por la máquina pavimentadora.



con experiencia, en ocasiones propician tener cierto material en exceso, justamente para compensar en algo la eventual deficiencia en las entregas.

Cuando haya presencia de agua en la superficie, nunca se deben realizar labores de terminado de la losa. Ello promueve levantamiento de lechada en exceso y, en consecuencia, la aparición de fisuramientos prematuros.

La terminación final se logra por la acción de la llana (figura 3.11) aproximadamente paralela al eje de trazo, situada al final de la pavimentadora, la cual es autopropulsada con anchos hasta de 30 cm y longitudes de 4 a 5 m. Esta llana, mientras desliza sobre la superficie recién terminada, experimenta movimientos oscilatorios que contribuyen a ocultar ligeras imperfecciones en la superficie, tales como protuberancias excesivas, oquedades, pequeños desgarramientos, etc. Es conveniente recordar que esta labor se ve facilitada por el hecho de que la gran mayoría de las pavimentadoras cuenta con una barra aspersora de rocío de agua en la parte posterior inferior de la pavimentadora y el agua se aplica directamente a un pedazo de tela de yute que se conserva humedecida, pero que nunca debe estar lodosa.

Aunque no es muy común, se aconseja pasar una regla de 3 m de largo para verificar la planicidad sobre la superficie recién terminada. Todas las anomalías pueden ser corregidas con herramienta manual, como pueden ser regletas de 3 m y llanas de magnesio de mango largo. En estas operaciones nunca se debe adicionar agua, a menos que por condiciones extremas de calor y sequedad en el ambiente se dé un rociado somero a la superficie que realmente amerite la aplicación de agua para un terminado y curado adecuado de la superficie de la losa.

Las orillas "caídas" por problemas de revenimiento de las mezclas se deben corregir de inmediato con la adición de concreto y posterior aplanado con llana de madera. Las orillas se deben confinar previamente con cimbra de madera.

4.4.2.8 Pasajuntas

La transferencia de cargas de una sección de losa a otra depende de la buena ejecución de los dos mecanismos fundamentales: trabazón de agregados —caso de pavimento sin pasajuntas—, y colocación de pasajuntas. Estas últimas consisten en vanillas de acero lisas, su descripción y función se encuentran en el inciso 4.3.1 de la parte de *Proyecto*.

La colocación se puede hacer mediante un sistema automatizado, como ya quedó descrito en el inciso 3.4.3

(d), "Dispositivos de inserción de pasajuntas (DBI)". Cuando no se dispone de este equipo, se utiliza el procedimiento convencional, el cual consiste en colar el concreto cubriendo a un armazón o silleta en donde previamente se dispusieron las pasajuntas con las separaciones estipuladas en el proyecto.

La colocación y posterior fijación de las silletas de sostenimiento de pasajuntas constituye un elemento clave para la efectividad y el desempeño futuro de las pasajuntas y, en general, del pavimento. De aquí se desprende la obligación de la empresa contratista de no escatimar cuidados para el trazo y colocación de las silletas. Éstas deben colocarse exactamente en las localizaciones que indican los planos y quedar marcadas sobre los costados de la losa.

Se debe llevar en paralelo un control topográfico para ubicar los sitios con pasajuntas y su posterior verificación para el corte.

Las pasajuntas deben generalmente orientarse paralelas al eje de trazo. Se tiene que garantizar en todo momento su alineamiento totalmente horizontal, sin desviaciones hacia arriba o hacia abajo, y en este mismo plano deben ser lo más ortogonales respecto a las caras verticales de las juntas. En todo caso, se deberá contar con tolerancias aplicables dentro de los alcances del proyecto. Normalmente se aceptan desviaciones del orden de 6 mm por cada 30 cm de longitud de pasajunta, en ambas direcciones.

Para garantizar que las pasajuntas se puedan mover dentro de la masa de concreto endurecido, se debe tener la precaución de engrasar el acero, también se puede utilizar aceite para concreto o emulsiones asfálticas. La pasajunta engrasada no debe significar que ésta quede floja dentro del concreto, sino ahogada firmemente en él; en algunos estados de EUA aún se admite que la lubricación proporcione una resistencia máxima a la tensión de 90 kg por pasajunta². El objetivo final es que esta última realmente pueda transferir la carga entre las losas.

La película de lubricante que rodea a la pasajunta no debe ser gruesa, pues se corre el riesgo de contaminar el concreto y promover la formación de oquedades. Los efectos deseables se alcanzan para espesores de lubricantes menores de 0.125 mm. Por otro lado, las pasajuntas deben estar libres de rebabas en sus extremos, así como de irregularidades que inhiban el libre juego dentro de la masa de concreto ya endurecida. Las pasajuntas deben cumplir con lo dispuesto en la norma ASTM A 615.

El procedimiento constructivo debe garantizar que se consiga buena consolidación alrededor de la zona de juntas. Mientras mejor se acomode el concreto en esta zona, se tendrán mayores probabilidades de un buen comportamiento.

En ambientes salinos, o donde el agua pudiese tener efectos potencialmente nocivos sobre el acero, es importante recubrir las pasajuntas para su protección contra la corrosión. Para este propósito, se recomienda aplicar la norma AASHTO M 254 para la autorización del material de recubrimiento. El espesor de este último debe estar comprendido entre 0.125 y 0.38 milímetros.

4.5 TEXTURIZADO

En la gran mayoría de las aplicaciones en carreteras y vialidades urbanas de importancia se utilizan equipos mecanizados provistos de un peine texturizador tal como se describe en la cláusula 3.5. "Equipos de texturizado".

Las labores de texturizado deben iniciarse tan pronto como se evapore el exceso de agua de la losa recién terminada, y mientras el concreto este lo suficientemente plástico para que las cerdas metálicas penetren dentro del rango de 3.2 a 6.4 mm. Antes del ranurado se daran pasadas longitudinales de una membrana de yute (o pasto artificial) para eliminar la superficie excesivamente lisa dejada por la pavimentadora. Esto se consigue con el bastidor adosado al carro texturizador. No es conveniente efectuar el ranurado de la superficie cuando el concreto esta demasiado fresco, pues en tales circunstancias se forman desgarramientos de la superficie, que dificultan la formación de ranuras con su geometría correcta. Tampoco resulta aconsejable esperar mucho tiempo —típicamente más de media hora— antes de aplicar el macrotexturizado, pues en este caso extremo las cerdas no penetran en la mezcla endurecida.

El cabezal que aloja las cerdas metálicas —peine— debe estar paralelo a la superficie de la losa, para que el ranurado sea uniforme en profundidad y se forme una superficie antiderrapante igual en todo el ancho del pavimento, de otra manera, la presión ejercida por las cerdas no será uniforme.

En algunos proyectos se acepta que no se aplique ranurado en la vecindad de las juntas programadas, de manera tal que los futuros bordes no queden debilitados. Por otro lado, dejar un ancho del orden de 10 a 15 cm sin aplicar el peine con cerdas metálicas simplifica las labores de corte y sellado de juntas.

4.6 CURADO

Como es ampliamente conocido, el propósito del curado es lograr que el concreto retenga la suficiente humedad para que la hidratación del cemento ocurra de manera correcta y ayudar al control de la temperatura durante la etapa temprana en que tal hidratación tiene lugar. La aplicación de la membrana de curado debe hacerse tan pronto como se pueda, tratando de no dañar la superficie de la losa durante su aplicación. Se debe poner especial cuidado en no aplicarla cuando todavía exista en la superficie agua de sangrado. El espesor de la película debe ser lo más uniforme posible. Para ello, resulta conveniente que estén abiertas y trabajando correctamente todas las boquillas de salida del tubo de distribución del equipo (véase la cláusula 3.6. "Equipos para el curado del concreto"). Ante condiciones de secado rápido, como puede ser el caso de pavimentación en climas muy calientes y ambientes de poca humedad, antes de colocar la membrana de curado se debe aplicar agua en rocío una vez tendido y terminado el concreto con la máquina pavimentadora. Es necesario que todas las superficies expuestas sean curadas, incluyendo las caras laterales y los cortes de las juntas.

Los materiales comúnmente empleados para curar las losas son los siguientes:

- Membrana líquida, de pigmentación blanca;
- papel o plásticos impermeables, como son los rollos de polietileno; y
- lienzos de algodón o de yute humedecidos.

Normalmente, los primeros son los más utilizados, sobre todo en carreteras.

La eficiencia y la duración del tiempo de curado, así como las propiedades finales del concreto, son función directa de la temperatura de este último al momento de curar. En situaciones de climas extremos, se tienen que tomar medidas adicionales para proporcionar un curado adecuado.

El pigmento blanco ayuda a visualizar partes de la superficie con deficiencias de aplicación de la membrana de curado y también contribuye a reflejar los rayos solares, por lo que disminuye el efecto nocivo de éstos. El carro de curado debe incluir sobre la barra de aspersión un deflector de viento para que efectivamente se evite la pérdida del material de membrana durante su aplicación.

Los aspersores se colocan a una altura tal que permita lograr una cobertura uniforme. Es común aplicar 0.30 l/m². Cuando se aplica en cantidades insuficientes, es fácil

darse cuenta, pues a simple vista se detecta el color gris del concreto, indicativo de que la capa no fue lo suficientemente gruesa. En ocasiones, resulta difícil colocar y aun supervisar que se esté aplicando en las cantidades óptimas. Una manera aproximada de garantizar que se está aplicando la cantidad correcta de compuesto sobre la superficie es distribuir los tambos que contienen la membrana líquida a ciertas separaciones entre sí a lo largo del camino que se va a construir; sus distancias representarán los rendimientos teóricos, tomando en cuenta la geometría de la sección de losa y los volúmenes estimados por aplicar, con base en los proporcionamientos por área sugeridos. De esta manera, los tambos nuevos serán alcanzados por el equipo de curado cuando, en teoría, los tambos inmediatamente anteriores ya estén prácticamente vacíos.

El rociado de material de curado se permite en zonas en donde el cimbrado convencional cambie, o cuando se retiren las cimbras colocadas para secciones de pavimento especiales.

En caso de que se utilicen lienzos de fibras de algodón o de yute como elementos de curado, habrá que asegurarse de que continuamente se mantengan húmedos, pues de otra manera pierden efectividad y, lo que es peor, si se dejan secar incluso pueden quitarle, por absorción, la humedad superficial al concreto.

Caso de cimbras fijas

El curado en este tipo de pavimentos con cimbra fija es enteramente igual que en el caso de los pavimentos construidos con cimbra deslizante. Quizás la única diferencia es que, en este último, la membrana de curado se aplica de manera integral en una sola pasada, mientras que en el caso de cimbras fijas, las orillas se curan una vez que los elementos metálicos ya se han removido.

4.7 CORTE Y SELLADO DE JUNTAS

Los trabajos de campo consisten básicamente en la ejecución de los cortes tanto transversales como longitudinales, y en su ensanchamiento para alojar el material de sello.

Una junta tiene como objeto principal el control de agrietamientos. Así, para su formación se inducen estos últimos mediante un corte en el concreto de reciente colocación. Una junta realizada mediante corte ofrece un plano de debilidad y permite que una losa se agriete en los lugares planeados. La razón de que se programen las

juntas es justamente que las grietas se presenten en los lugares escogidos por el proyectista, haciendo todas estas discontinuidades más estéticas y de mejor mantenimiento, en comparación con las grietas sin control.

Existen dos cortes típicos:

- *Corte inicial.* Este corte crea un plano de debilidad para controlar el inevitable agrietamiento por contracción de las losas. Estos cortes se deben ejecutar en ambas direcciones. El corte transversal se realiza tan pronto la losa de concreto hidráulico pueda soportar la máquina cortadora, y no exhiba desprendimientos al accionar el disco cortador. El corte se hace a una profundidad parcial del espesor de la losa (de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ del espesor), pero debe cubrir todo el ancho de sección en la misma etapa de corte.
- *Corte de ensanche.* Es un corte complementario que se hace para formar el depósito que recibirá al sello, según ya se refirió en el inciso 3.7.1, "Máquinas cortadoras". El factor de forma a que se alude en dicho inciso es específico para cada tipo de sellador, tipo de concreto y separación de las juntas.

Normalmente, los cortes se realizan en todas las juntas, tanto transversales como longitudinales. Con el fin de optimizar aspectos constructivos y de costo, es admisible omitir una junta longitudinal entre acotamiento y cara adyacente cuando el ancho combinado entre ambos no sea mayor de 5 metros.

Antes de la colocación del concreto se deben marcar las ubicaciones de las juntas transversales, pues es crucial que los cortes se ejecuten lo más próximos posibles al establecido en el proyecto. Esto es más crítico cuando se emplean pasajuntas como mecanismos transmisores de carga. Esta labor es obligatoria para la empresa contratista, la cual deberá situar las silleteras (o "canastillas") en la posición correcta. Los puntos de control deben marcarse lo más alejados posibles de la orilla, ya que las labores de tendido pueden mover la localización correcta de los referidos puntos.

Para las cimbras fijas no se recomienda colocar marcas, pues éstas pueden ser fácilmente removidas; en su lugar son preferibles algunos pasadores o pernos de tipo semipermanente. Otra opción, común en nuestro país, es marcar con pintura en aerosol las posiciones correctas de los cortes, empleando cuerdas que atraviesan el ancho total del pavimento.

En el caso de equipos extendedores que tienen inserción automática de pasajuntas, estas máquinas cuentan con un dispositivo que deja marcas sobre la posición en donde se efectuará el corte. Aun en estas

circunstancias, conviene colocar en las orillas de la losa un clavo ahogado en el concreto, con objeto de eliminar posibilidades de error.

Con el fin de minimizar desmoronamientos en el concreto en zonas de juntas cuando se emplean texturizados profundos, se deja de ranurar una franja de un ancho de al menos 10 cm en la posición donde se realizará el corte. De esta manera, las ranuras de texturizado no contribuyen a desprendimientos.

El corte en las juntas transversales planeadas se debe realizar de manera uniforme, a la profundidad indicada en el proyecto, hasta alcanzar la orilla. De preferencia, todos los cortes deben realizarse dentro de las primeras 24 horas después de colocado el concreto. Sin embargo, esta recomendación es más importante cuando no se cuenta con equipo de corte suficiente, en cuyo caso nunca se deben dejar cuatro cortes programados consecutivos sin realizar. Tampoco se debe dejar de cortar dentro del tiempo recomendado la junta transversal situada inmediatamente después de una junta de construcción o en una junta fría en general.

En algunos casos, los cortes se pueden realizar después de las 24 horas —pero en lapsos nunca superiores a las 48 horas—, siempre que en ensayos se demuestre que el concreto lo permita sin exhibir agrietamiento por secado o contracción. En los tiempos de corte también influyen, aparte de las características del concreto, en especial el coeficiente de expansión térmica y la naturaleza de las bases de apoyo de las losas. A mayor resistencia a la fricción en la interfaz, menor tiempo disponible para ejecutar el corte.

La tabla 4.3 proporciona una idea de los coeficientes de fricción de la capa de subbase, atendiendo a la naturaleza de los materiales que la forman. De hecho, con estos valores, en conjunción con otros parámetros, se pueden estimar los movimientos de las losas.

Para estimar el tiempo necesario para iniciar el corte, se pueden hacer pruebas con una herramienta punzocortante, como puede ser un clavo grande, un cuchillo o un picahielo. Se procede a rayar la superficie: si la línea marcada es tenue, es indicativo de que el concreto ya pudo haberse endurecido lo suficiente. En caso de que afecte el texturizado superficial, ello significaría que es todavía temprano para iniciar el corte.

Otro factor que interesa para seleccionar el momento de iniciar los cortes es la temperatura. Conforme mayor sea la temperatura en el concreto —horas más calurosas del día— mayor será su tendencia a la condición de expansión, de manera que se debe tratar de iniciar el

Tabla 4.3 Valores recomendados del factor de fricción⁴

Tipo de material bajo la losa	Factor de fricción
Tratamiento superficial	2.2
Estabilización con cal	1.8
Estabilización con asfalto	1.8
Estabilización con cemento portland	1.8
Grava de río	1.5
Roca triturada	1.5
Areniscas	1.2
Terreno natural	0.9

corte antes de que su temperatura baje al mínimo, pues ya en esta última condición las losas se contraen.

Puesto que los volúmenes de producción del concreto pueden ser variables, es crucial que las cuadrillas de corte y de colocación de las mezclas tengan una buena comunicación, con objeto de prever los cambios de las cantidades y de localizaciones de trabajo de tendido, de esta manera, se puede programar la distribución y disponibilidad de los equipos de corte.

El tiempo de corte se ve afectado, en resumen, por el tipo de concreto, los aditivos, la variación de temperatura y las condiciones climáticas. Por ello es conveniente, en ocasiones, ejecutar cortes alternados, es decir, realizar los cortes cada tercera o cuarta junta de contracción planeada.

En cualquier caso, los cortes deben completarse antes de que se inicie la ejecución de carriles adyacentes al del concreto recién colocado; también deberán hacerse antes de permitir cualquier tránsito vehicular de la empresa contratista. Siempre se debe tener presente, en resumen, que un corte hecho demasiado tarde puede ocasionar agrietamientos no controlados, mientras que si se realiza muy temprano se pueden producir desportillamientos y desmoronamientos inaceptables en la junta.

Inmediatamente después de ejecutado el corte se debe proceder a su limpieza, con objeto de eliminar residuos que pudiesen quedar adheridos a las paredes del corte, ya que tales partículas pueden inhibir el movimiento horizontal natural que se va a presentar en las losas por efecto de los cambios de temperatura.

Tal como se discute en el capítulo 4 de la parte de *Proyecto*, las grietas de contracción aleatorias se presentan cuando se retrasa demasiado la ejecución de los cortes. Cuando una de estas grietas se presenta a una distancia de menos

de 1.50 m respecto a la posición de una junta programada, ya no es necesario realizar el corte de esta última. En estas circunstancias, conviene ranurar superficialmente la grieta y dar el mismo tratamiento subsiguiente como si se tratase de una junta transversal planeada.

Todas las partes afectadas por la operación de corte deberán ser curadas con la misma membrana de curado que se colocó en la superficie después del colado del concreto. Esta medida es para evitar evaporación de agua por las paredes y superficies afectadas o expuestas por los cortes.

Es conveniente tener máquinas cortadoras de repuesto, con objeto de contar siempre con este equipo, aun en los casos en que alguno sufra averías. Conforme se vaya extendiendo el concreto, es aconsejable disponer siempre de máquinas cortadoras en el sitio, listas para realizar los cortes en los tiempos oportunos.

4.7.1 Colocación de la tirilla de respaldo

Posterior a la limpieza de la caja del sello y antes de la aplicación del mismo se realiza la colocación de la tirilla de respaldo. El omitir esta operación tiene como consecuencia un sobreconsumo de sellador, la generación de esfuerzos mayores en el sellador y su falla temprana, debido a que el material sellante queda adhiriendo al fondo de la caja y con un factor de forma distinto al deseado.

Las características y materiales aceptados para la tirilla de respaldo ya se comentaron en el subinciso 4.3.1.5 de la parte de *Proyecto*. Para tender la tirilla de respaldo se emplea la rueda colocadora de la tirilla, la cual deberá estar ajustada para dejar la tirilla a la profundidad necesaria para que se logre el factor de forma al rellenar con sellador el espacio comprendido entre el lomo de la tirilla y la superficie remetida del material sellante en la junta. También deberá vigilarse que la tirilla de respaldo entre justa en la junta y evite que el sellador penetre hacia su interior. No está demás recalcar que esta es una operación sencilla pero no por ello deja de ser importante.

4.7.2 Sellador aplicado en frío

Una vez que la caja receptora del sello esté limpia, seca y tenga ya en su lugar a la tirilla de respaldo, seca, se procede a verter el sellador de manera uniforme, tratando de llenar la caja desde el fondo hacia arriba, procurando siempre que no queden burbujas de aire atrapadas. En la operación de sellado se busca que la boquilla de

inyección sea del tamaño correcto, de acuerdo con el ancho de la caja receptora, tratando de que la boquilla forme el cordón sellante desde la parte superior de la tira de respaldo. Siempre será más recomendable mover la boquilla hacia el operador. Empujarla traería como resultado la posibilidad de que se formaran bolsas de aire.

En el caso de selladores aplicados en frío, y que no sean del tipo autonivelable, es necesario darles forma mediante pasadas sucesivas con una herramienta de un ancho ligeramente inferior al ancho de la caja, tratando de forzar a que el sello penetre y haga contacto íntimo con la tira de respaldo y con la parte superior de las paredes de la junta. Esta operación se debe hacer antes de 10 minutos, pues si se deja secar, se producen costras que ya no permiten la formación del menisco y por tanto no se obtiene el factor de forma de proyecto.

Antes de abrir el camino al tránsito, es necesario realizar la prueba de curado del sello. Ésta se debe efectuar preferentemente entre 14 y 21 días después de aplicado el sellador. Se realiza removiendo una longitud del orden de 5 cm de sello, para posteriormente estirarlo aproximadamente 50 por ciento de su longitud y mantenerlo así por un lapso de 10 segundos. Si la recuperación es rápida y uniforme se dice que el curado del material es satisfactorio. Si, por el contrario, la recuperación de la muestra es lenta y presenta rizos, entonces se dice que el curado fue irregular. Este último caso es indicativo de que la parte superior del cordón de sello se retrajo (o curó) más rápidamente que su parte inferior. Inmediatamente después de la prueba se debe restituir el tramo removido para la misma. Es importante utilizar el mismo tipo de sellante para dicha restitución, para así facilitar la adherencia del sellador existente con el de reparación.

4.7.3 Sellador aplicado en caliente

La condición de limpieza y sequedad en la caja de sello es un requisito más crítico en caso de emplearse sellos aplicados en caliente. Aplicar éstos cuando todavía existe humedad en las paredes podría provocar vapor, el que a su vez promovería la aparición de vacíos que inhiben la completa adherencia del sellador con el concreto.

Este secado debe vigilarse después de lavar la junta con agua. Hay que aplicar el sellador cuando se alcance su temperatura de colocación. Para ello, es importante relacionar la temperatura de calentamiento con correspondiente al día y hora de la aplicación en el campo. En general, antes de proceder a su colocación se

deben tener claras las indicaciones del fabricante para su correcta instalación.

4.7.4 Sellador preformado

Para el caso de la tira de sello preformada, esta se coloca a presión. Previo a la inserción del sellador, se habrá aplicado un adhesivo a las paredes de la junta para dar mayor sello y adherencia y mantener la tira de sello en su lugar. Una vez colocado se puede atravesar el sello con un ganchillo y tirar de él midiendo la deformación y fuerza requerida para arrancarlo de la caja, este valor se comparará con el valor esperado en el cálculo del sello y con sus propiedades de extensibilidad y deformación.

Referencias

- 1 CMI Corporation. "Concrete Pavers" Bid-well. A Division of CMI Corporation, Box 97, Canton, SD 57013. EUA.
- 2 "Diseño y construcción de pavimentos de concreto", Seminario Interno. CEMEX. B. Frank McCullough, 1995.
- 3 "Hot-Weather Concreting and Cold-Weather Concreting", Portland Cement Association. Publicaciones ISO 14T e ISI54T, respectivamente. También "Elaboración, colocación y protección del

concreto en climas caluroso y frío", ACI 305 y ACI 306, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.

4. "An evaluation of terminal anchorage installation on rigid pavements", McCullough, B.F., Research Report No. 39-4F, Texas Highway Department, septiembre de 1966.

Bibliografía

- "Construcción de Pavimentos de Concreto Hidráulico", Manual del Participante, AASHTO/FHWA/INDUSTRIA, preparado por American Concrete Pavement Association y ERES Consultants, Inc., Publicación No. FHWA HI-96-027, National Highway Institute, marzo de 1996.
- "Asphalt Paving Manual", The Asphalt Institute.
- "Planeación, Diseño y Construcción de Pavimentos de Concreto con Juntas", Seminario Interno, febrero de 1994. McCullough, B. Frank; Fowler, David W.; and Zollinger, Dan G, IMCYC, 1994.
- "Joint Design for Concrete Highway and Street Pavements", Portland Cement Association, ISO5903P, 1980.
- "Design, Construction, and Maintenance of PCC Pavement Joints", National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice No. 19, Transportation Research Board, 1973.



Proceso Constructivo

- Preliminares
- Cimbra deslizante
- Cimbra fija
- Pavimento estampado

3. PROCESO CONSTRUCTIVO

Las nuevas tecnologías de construcción de pavimentos rígidos se han desarrollado para cubrir diferentes necesidades y mejorar sustancialmente el comportamiento y confort de los caminos. Estas tecnologías las podemos clasificar de la siguiente manera:

- Pavimentación con Cimbra Deslizante
- Pavimentación con Cimbra Fija

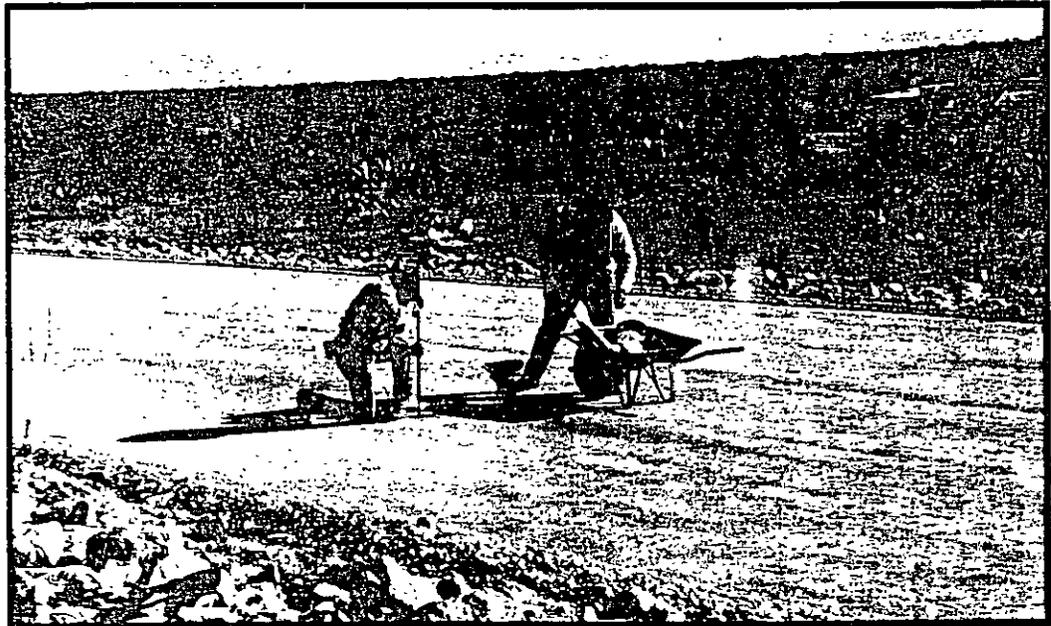
Ambos esquemas de pavimentación se pueden utilizar indistintamente, sin embargo, es más común que las Autopistas, Carreteras y Avenidas Urbanas Importantes, utilicen primordialmente la cimbra deslizante y que en pavimentos urbanos en calles se utilice con mayor frecuencia la pavimentación con cimbra fija.

3.1 PRELIMINARES.

En la construcción de pavimentos de concreto se requieren de algunas actividades previas, necesarias para el desarrollo del proyecto. Estas actividades se realizan para un pavimento nuevo tanto como para una sobrecarpeta de concreto. A continuación se describen de manera breve algunas de las actividades previas a la colocación del pavimento de concreto.

a) Terracerías.

Para el caso de pavimentos nuevos, es normal que se requiera de la formación de cuerpos de terracerías como la construcción de un terraplén y capa subrasante. Estos elementos deberán ajustarse a las Normas de Construcción vigentes de la Entidad Especificadora.



b) Base Estabilizada con cemento.

Sobre la capa subrasante, debidamente terminada, y según indiquen los planos del proyecto se deberá construir una capa de base estabilizada, del espesor indicado en planos, compactada al 100% de su PVSM. La construcción de la base estabilizada se ejecutará con las características y materiales indicados en las Especificaciones para Bases. La proporción de cemento portland a utilizar deberá determinarse mediante pruebas de laboratorio, con el fin de obtener una resistencia a la compresión axial simple de 21 kg/cm² como mínimo, a los 7 días. El porcentaje de cemento portland será como mínimo 4% en peso del PVSM del material pétreo.



c) Base de Relleno Fluido.

De acuerdo con lo especificado en planos, en los sitios donde corresponda se colocará una base de relleno fluido de resistencia, tiempo de apertura, revenimiento y espesor especificados en planos. La colocación de la base se hace directamente del camión revolvente sobre la subrasante, ayudando a su colocación con herramientas manuales; no deberá ser vibrado para evitar que salga el aire incluido que tiene la mezcla, no requiere ser compactado con medios mecánicos ya que es auto compactable al 100%, así mismo no requiere de curado. Dependiendo del revenimiento especificado se requerirán cimbras para darle la forma especificada. En Rellenos Fluidos convencionales la apertura al tráfico se deberá dar hasta después de 24 horas de haberlo colocado.

d) Riego de impregnación.

Sobre la base estabilizada debidamente terminada, superficialmente seca y barrida, se aplicará en todo el ancho de la corona y en los taludes del material, que forme dicha capa, un riego de imprimación con emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento o super estable a razón de 1.0 lts/m² aproximadamente. El producto asfáltico deberá cumplir con las Normas de Calidad establecidas por la Entidad Especificadora.

e) Bacheo de caja.

Para la ejecución del trabajo se requieren taladros neumáticos, picos, escarificador de motoconformadora, u otro equipo apropiado para remover las capas de la estructura existente, cargador, vehículos de transporte de materiales, elementos adecuados para la compactación del fondo de la excavación y herramientas menores.

La excavación deberá tener bordes verticales bien definidos, sus caras longitudinales y transversales deberán ser paralelas y perpendiculares al eje de la vía, respectivamente; su fondo deberá ser plano, uniforme y firme. El fondo de la excavación deberá ser compactado en un espesor no menor de 15 cm. de acuerdo con los niveles de compactación que se indican a continuación. Si la superficie expuesta corresponde a una subrasante o una sub-base granular, ningún ensayo podrá dar lugar a un porcentaje de compactación inferior al noventa y cinco por ciento (95%) con respecto a la densidad máxima del ensayo proctor modificado. Cuando se trate de una capa de base granular, la exigencia se incrementará al cien por ciento (100%).

Deberán retirarse todos los materiales inadecuados, los cuales deberán ser cargados en camiones cubriéndolos con lonas u otros protectores, debidamente asegurados a la carrocería y transportados a los sitios de disposición, indicados en los documentos del proyecto, o definidos por el Especificador.

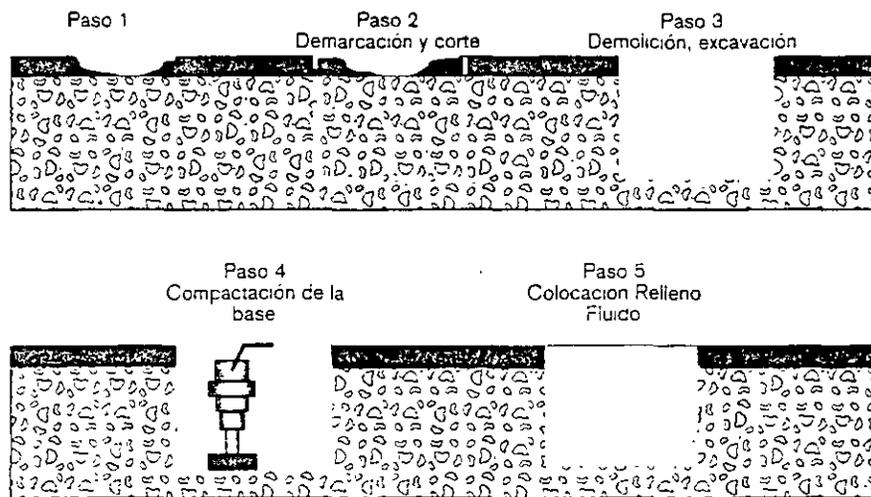


Los materiales deberán disponerse de manera que cumplan todas las reglamentaciones legales vigentes al respecto, en especial las referentes a la protección del medio ambiente.

Una vez terminada la compactación de la capa del fondo se deberá reponer el material desalojado con Relleno Fluido auto-compactable, con una resistencia a la compresión no menor a los 30 kg/cm². El relleno fluido deberá colocarse con las recomendaciones descritas anteriormente, en el tema de Bases de Relleno Fluido y se deberá rellenar con este material hasta el nivel original del pavimento existente. El relleno fluido se podrá colocar en una sola capa.

El bacheo se debe realizar en los sitios en donde existen huecos que comprometan la integridad de la base. Con el siguiente procedimiento :

- Identificación de la falla
- Demarcación de la caja, alrededor del bache
- Demolicion y retiro de la carpeta asfáltica, excavacion y retiro del material de base, hasta encontrar material sano.
- Compactación de la base remanente
- Colocacion de Relleno Fluido hasta el nivel superior de la carpeta asfáltica.



f) **Fresado de pavimento asfáltico.**

Este trabajo consiste en la obtención de un nuevo perfil longitudinal y transversal de un pavimento asfáltico existente, mediante su fresado en frío, de acuerdo con los lineamientos y dimensiones indicados en los documentos del proyecto y las instrucciones de el Especificador, para lograr la colocación de un espesor de pavimento constante que es más fácil de cuantificar.

El equipo para la ejecución de los trabajos deberá ser una máquina fresadora cuyo estado, potencia y capacidad productiva, garanticen el correcto cumplimiento del plan de trabajo. Si durante el transcurso de los trabajos el Supervisor observa deficiencias o mal funcionamiento de la máquina, ordenará su inmediata reparación o reemplazo.

Inmediatamente antes de las operaciones de fresado, la superficie de pavimento deberá encontrarse limpia y con operaciones de barrido y/o soplado que se requieran para lograr tal condición.

El fresado se efectuará sobre el área que determine el Especificador, a temperatura ambiente y sin adición de solventes u otros productos ablandadores que puedan afectar la granulometría de los agregados o las propiedades del asfalto existente. El espesor del mismo será el indicado en las especificaciones del proyecto.

El material extraído deberá ser transportado y acopiado en los lugares que indiquen los documentos del proyecto. Durante la manipulación del material fresado, deberá evitarse su contaminación con suelos u otros materiales extraños.

En caso de requerirse el fresado en proximidades de guarniciones y en otros sitios inaccesibles al equipo de fresado, el pavimento deberá removerse empleando otros métodos que den lugar a una superficie apropiada.

3.2 CIMBRA DESLIZANTE

En pavimentos de concreto se considera el uso de la cimbra deslizante como la herramienta necesaria para la formación de una figura geométrica consolidada mediante el deslizamiento continuo de una cimbra alrededor de la masa plástica del concreto, la pavimentadora de cimbra deslizante es la maquinaria autopropulsada en la cual va montada la cimbra. El efecto que la pavimentadora hace sobre el concreto se conoce como extrusión, el ejemplo más simple de extrusión es el realizado sobre la cascita de dientes al salir del tubo bajo presión, es claro que el material toma la forma de la boquilla la cual haría las veces de la cimbra que se desliza.

La pavimentación en concreto con cimbra deslizante debe estar precedida de una planeación minuciosa de la actividad diaria, es muy importante tomar en consideración todos los aspectos que intervienen al momento de planear para lograr proyectos exitosos. Por lo general este tipo de pavimentaciones manejan grandes volúmenes de concreto y producciones diarias que pueden variar entre los 1,500 m³ a los 2,800 m³. Esta productividad, apoyada con una buena planeación, ha hecho posible optimizar los recursos y eficientar el proceso constructivo.

Antes de iniciar el proceso de elaboración de concreto se deberán estudiar las características de los bancos de materiales disponibles en la zona para su elaboración. Además, deberá de seleccionarse el sitio apropiado para la ubicación de la planta de mezclado central, buscando minimizar las distancias de acarreo tanto de los agregados como del propio concreto elaborado.

Dependiendo de la naturaleza y magnitud del proyecto, su ubicación y las condiciones del lugar, el concreto podrá ser elaborado en: Plantas de mezclado central y plantas cosificadoras.

a) Plantas de mezclado central.

Su uso en proyectos de gran magnitud es indispensable, ya que pueden producir en un periodo muy corto, de alrededor de 1.5 minutos, una cantidad de concreto entre los 7 m³ y 9 m³ de manera automatizada.

Estas plantas son generalmente plantas móviles y son diseñadas para lograr un rápido montaje y desmontaje, son de fácil transporte y elaboradas con materiales de altas especificaciones para soportar la carga diaria de trabajo, además su operación es relativamente sencilla y práctica, son de fácil mantenimiento y limpieza, con accesibilidad de sus componentes para mantener una rutina diaria y continua de limpieza.

Los concretos para proyectos carreteros son producidos con las características que se requieren para ser colocados en la vía, siendo solo afectados por el clima y la edad, y son transportados en camiones de volteo o tipo "Flow Ec".

Dentro de las variedades de plantas de mezclado central, encontramos plantas simples con un sistema de dosificación y una cila de mezclado o las que tienen la inclusión de un tambor premezclador anterior a la mezcladora, este recibe la dosis de materia prima mientras la cila está descargando el concreto homogeneizado. Son también conocidas como de producción continua en una sola línea, esto implica una mayor capacidad de producción.

Existen plantas de mezclado central "doble mezcladora" que cuentan con dos líneas de carga, con el fin de incrementar la producción, porque permiten hacer más eficiente el sistema de dosificación,

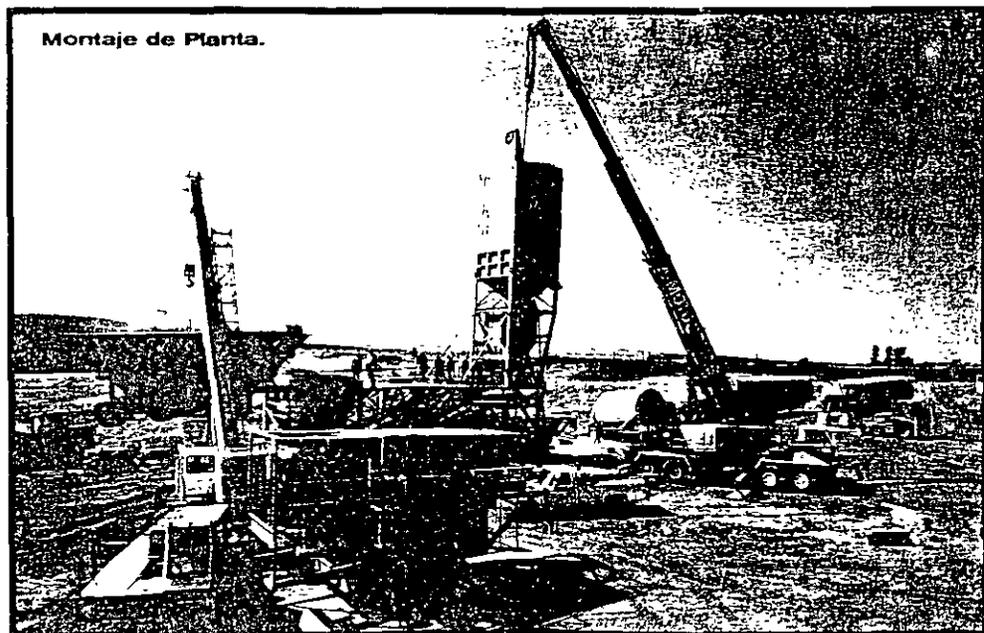
pues mientras una mezcladora homogeniza el concreto, la segunda esta siendo dosificada. Un poco mas para incrementar la producción, es contar con dos sistemas de dosificación, uno para cada mezcladora, este es el caso de las plantas de doble línea de carga.



Los pasos principales para la habilitación y producción en una planta de mezclado central son::

- Selección del sitio
- Cimentación de la planta.
- Movilización e instalación de la planta.

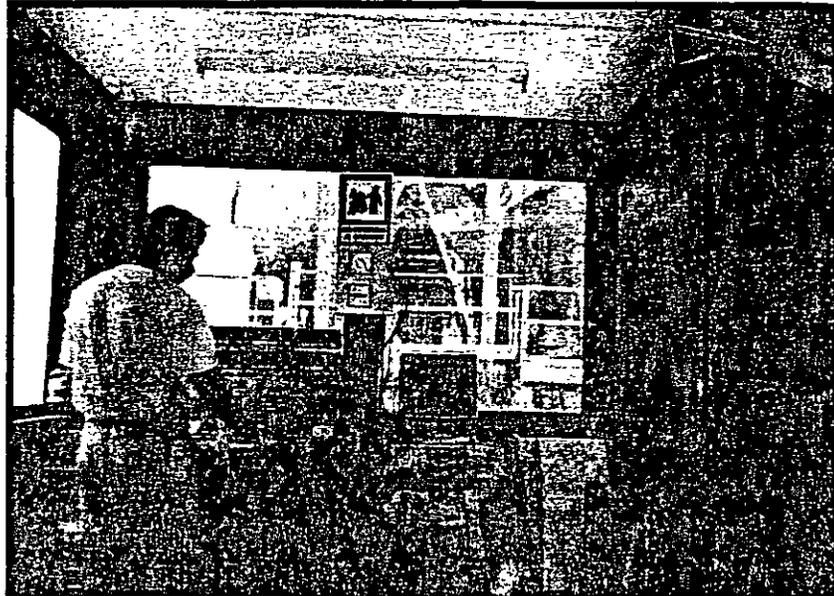
Las plantas móviles son transportadas en partes, manteniendo en cada transporte una sección completa de la planta, de tal forma que la instalación se hara manteniendo un orden y secuencia. Normalmente para su instalación se debe contar con una o dos gruas de tamaño suficiente para garantizar el montaje seguro de los equipos (80 – 100 ton) y con el apoyo de personal capacitado y supervisado para hacer un trabajo seguro y estable.



Calibración y ajustes.

Antes de iniciar la producción de concreto se deben calibrar los elementos de medida de la planta y mantener este control periódicamente. Los elementos que se calibran son.

- Básculas (caratulas y celdas mecánicas o de carga).
- Medidores de agua.
- Dosificadores de aditivos.
- Ajuste de las tolerancias de las dosis.
- Ajuste de las señales y la información entregada por las computadoras.
- Ajuste de los controles automáticos.



Caseta de Control de la Planta.

Para la alimentación de agregados a la planta se debe contar con el número de cargadores frontales que garanticen una operación sin interrupciones. Por lo que se requerirán al menos uno o dos cargadores alimentando dos o más tipos de agregados.



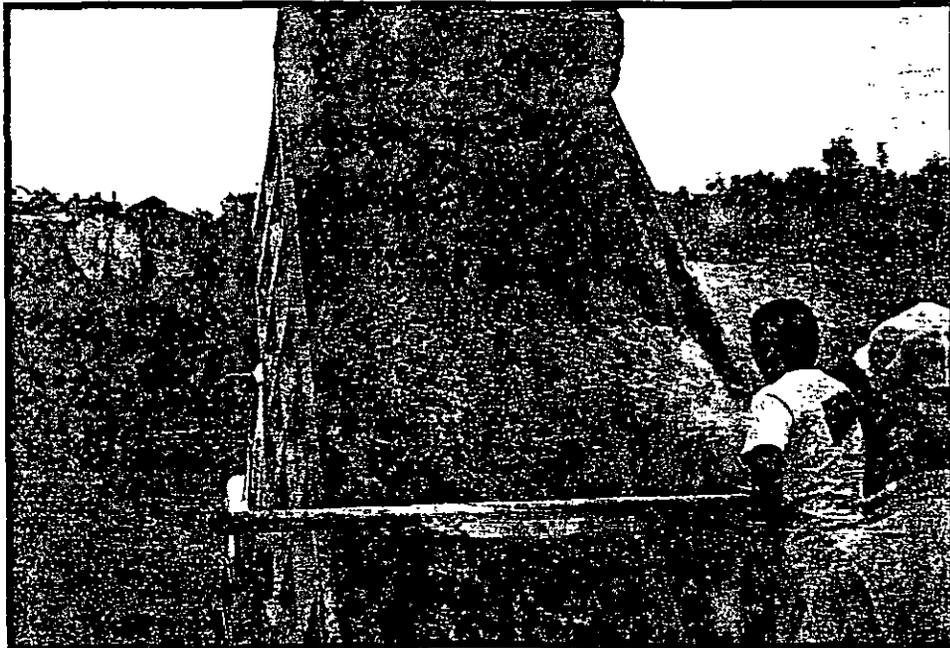
Alimentación de Agregados.

Estas plantas cuentan por lo general con silos horizontales móviles de 150 toneladas de capacidad para almacenamiento de cemento a granel. La ubicación de los silos con respecto a la planta debe ser siempre lateral y buscando reducir al máximo el trabajo necesario para su alimentación, la descarga de las pipas, ya sea a los silos horizontales o al silo de la planta, se hace mientras la planta esta en operación; puede haber varias pipas descargando al mismo tiempo mientras otras están esperando turno.



Silos horizontales de almacén de cemento.

El agua es necesaria no solo para la mezcla de concreto sino para el lavado de los camiones y la limpieza de la planta. La limpieza de los camiones es importante para evitar que el concreto se contamine y retirar restos de concreto que se hayan quedado adheridos en la anterior descarga. Para esto se requieren, aproximadamente, de 500 a 600 metros cúbicos de agua potable por día. Es fundamental tener almacenado por lo menos el 20% del consumo diario.

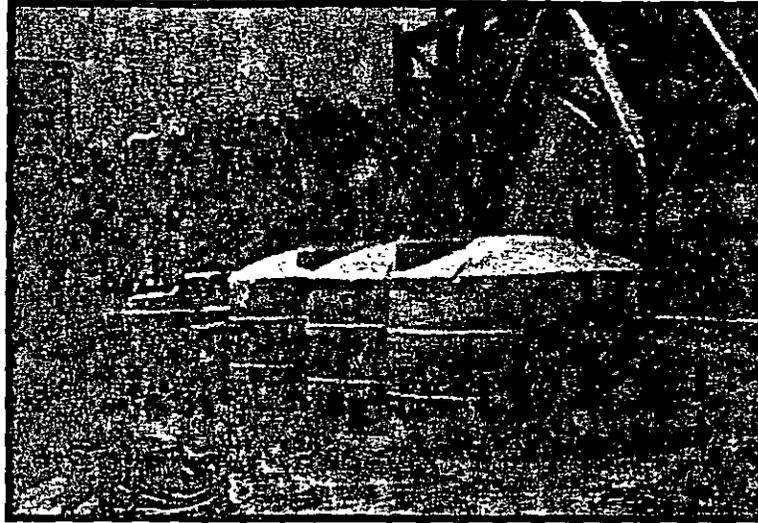


Limpieza de la caja de un camión de volteo.

En la producción de concretos para pavimentos se utilizan diversos tipos de aditivos con el fin de lograr las condiciones de mezcla requeridas por el tipo de transporte y la forma de colocación con la pavimentadora. Es usual contar con depositos móviles de aditivos fáciles de instalar y con capacidad de almacenamiento, lo suficientemente grande, para garantizar el suministro de producto.

Otros elementos que forman parte de la planta son:

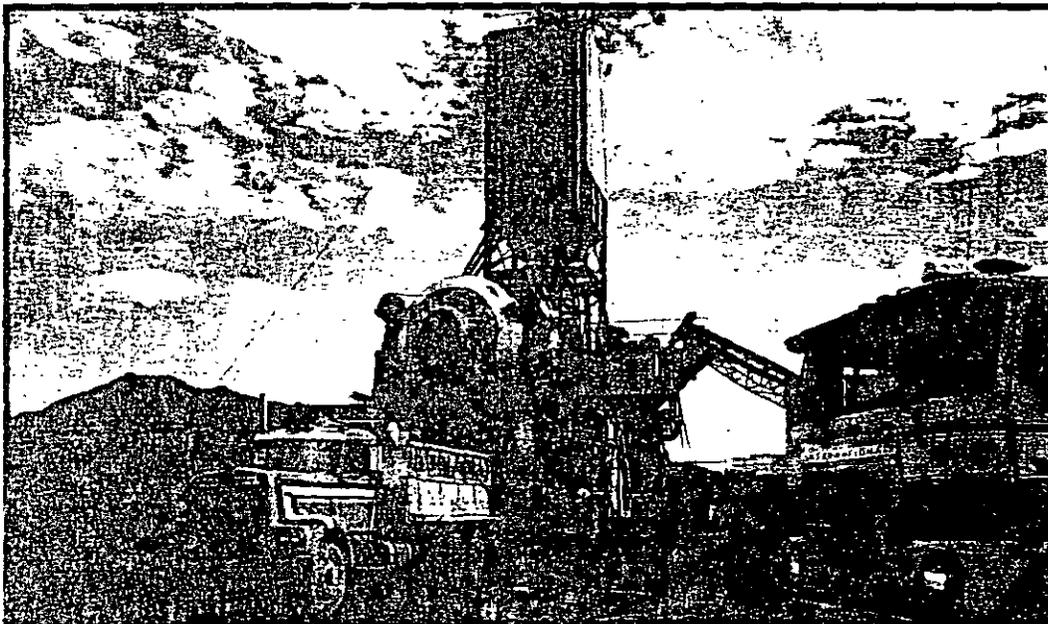
- Caseta de operacion y generador de energia.
- Area de maniobras en el acceso, espera, carga y salida de los camiones.
- Almacén de insumos, almacen de refacciones y taller.
- Bascula (opcional).
- Laboratorio de planta.



Tanques para depósito de aditivos.

- Area para ubicacion de desperdicios.

El tráfico dentro de la planta y el que circula en dirección al frente de pavimentación, debe ser cuidadosamente analizado, para lograr completar adecuadamente el ciclo de suministro de concreto, buscando minimizar los tiempos de recorrido y garantizando la seguridad en planta. Es fundamental desarrollar los patrones de flujo de tránsito interno para todos los vehículos, en ellos se debe separar el tráfico de entrega de materiales y el de acarreo de concreto, además se deben incluir áreas de espera, zonas de lavado de camiones y estacionamientos.



Camión en espera de ser cargado.

Se deben instalar y construir todos los drenajes que permitan el correcto manejo de las aguas de lavado, limpieza, desperdicios de producción y de servicio humano así como las de lluvia.

b) Plantas dosificadoras con camión revolvedor.

Se recomienda su uso en proyectos de mediana y pequeña magnitud, donde los equipos de colocación no requieran de un gran volumen de concreto, pero que aseguren la calidad en la consistencia y trabajabilidad de la mezcla.

El rendimiento que se puede lograr con estas plantas es de aproximadamente 40 a 50 m³ por hora.

En este caso los materiales que conforman el concreto son dosificados por el operador de la planta directamente en un camión revolvedor que será el encargado de hacer el mezclado adecuado de los elementos para la elaboración del concreto. A este tipo de concreto también se le conoce como Concreto Premezclado y permite producir concretos para pavimentos de alta calidad, que garantizan un rendimiento constante y de buena calidad.

También hay estas plantas del tipo móvil, que se pueden transportar y montar fácilmente para cumplir las necesidades de un proyecto en particular.



Camión Revolvedor descargando Concreto en Pavimentadora.

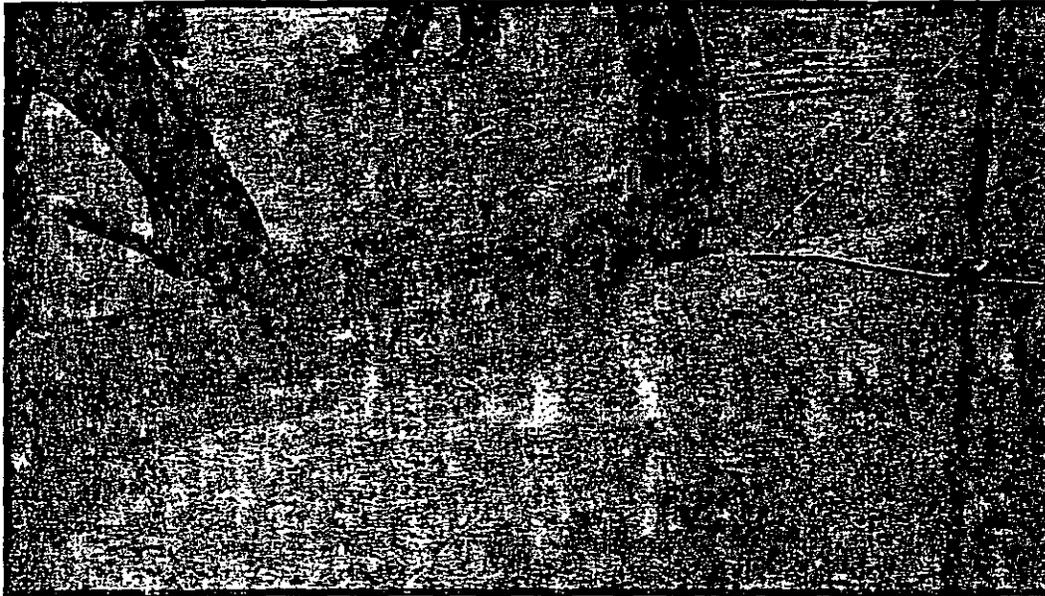
c) Proceso de Pavimentación.

c)1 Tendido de línea guía

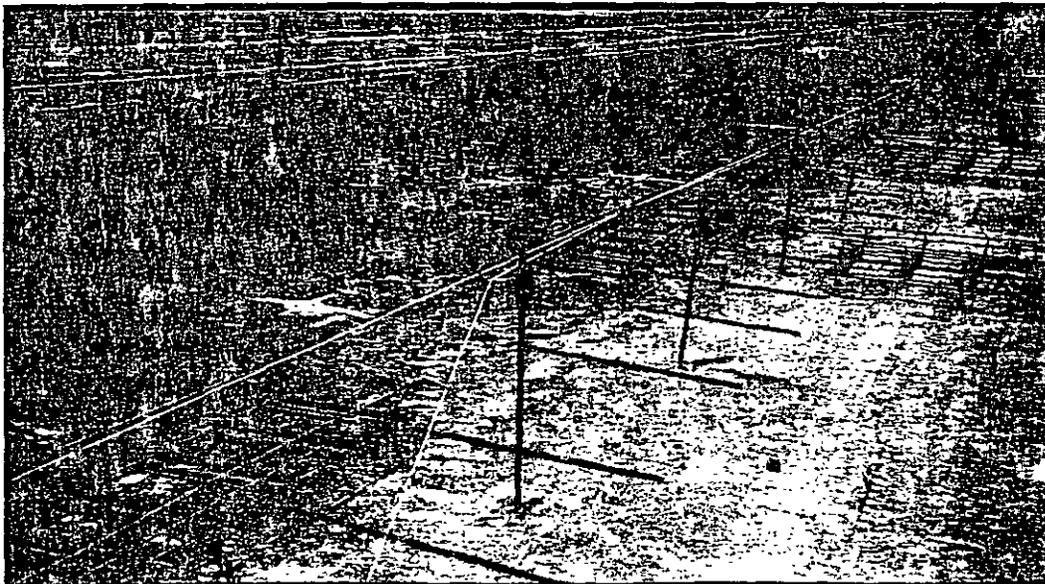
Con la información del cadenamiento y cotas de los puntos que sirven para la localización de las barras de soporte de la línea, se procede a colocar cada barra o "pin" en su sitio correspondiente. Estos puntos físicos están marcados con elementos como clavos metálicos en trozos de madera y pintados para su fácil reconocimiento, a una distancia de 150 cm del borde de la losa. La barra o "pin" debe quedar a una distancia aproximada de 25 cm del punto proyectado y debe estar clavada lo suficiente dentro de la base para garantizar la estabilidad de la línea ante el paso de la pavimentadora, la texturizadora y el personal de obra. Esta barra o "pin" debe ser metálica y rígida para soportar los golpes de martillo y el uso prolongado en la obra. La línea que une todos los "pines" se conoce como línea de "pines", la distancia entre estos en un trazo plano debe ser entre 8 y 10 metros, en curvas horizontales o verticales se deben colocar más próximos, con una

separación máxima de 5.0 m.

La separación de los "pines" no debe ser igual que la de los sensores de altura de la máquina, esto para reducir la sincronización de los movimientos en altura de la pavimentadora. Con el fin de tener mayor precisión en el perfil y en los espesores, es importante tener líneas guías a ambos lados de la pavimentadora.



Después de localizadas todas las barras o "pines" se procede a colocar los brazos que soportan la línea guía, estos brazos son metálicos, con la forma adecuada para no interrumpir el tránsito libre de los sensores de la pavimentadora y la texturizadora sobre la línea guía, también debe contar con el mecanismo para ajuste de altura sobre la barra y de prolongación, para ajustar la distancia de la línea respecto de la barra y permitir localizarla sobre el punto correcto. Los brazos tienen la posibilidad de asegurar la línea guía para que ésta no se suelte al paso de los sensores o por el movimiento del personal cercano.

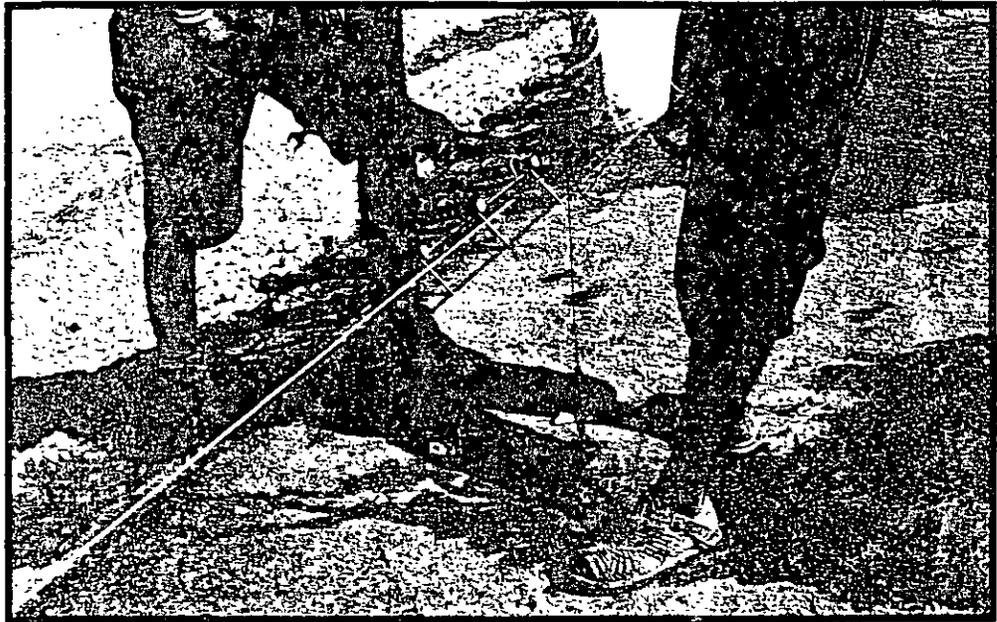


Tensionamiento de línea guía.



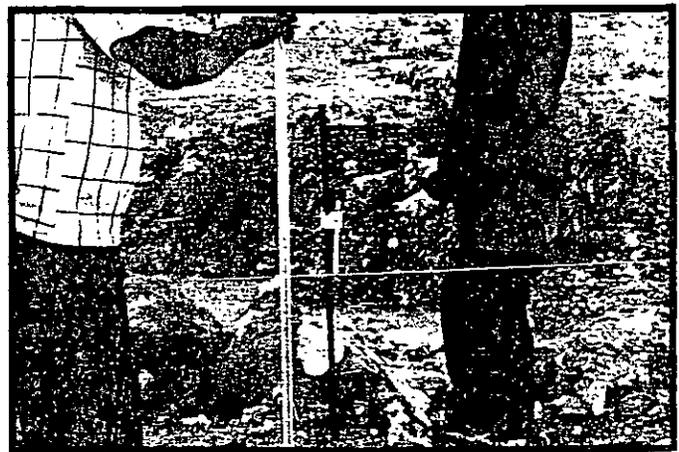
Los hilos o cuerdas de la línea pueden ser de alambre, cable, nylon tejido, cuerda de poliestireno o cualquier otro material similar, por un lado deben ser suficientemente fuertes como para resistir la tensión a que se someten y deben ser livianos para que no muevan el alineamiento. La razón de la tensión es reducir las catenarias entre apoyos, el tensionamiento se realiza manualmente o con la ayuda de un carrete metálico que se monta sobre barras o "pines" y debe hacerse antes de insertar o montar el hilo en los soportes, a fin de garantizar una tensión uniforme. Es importante usar elementos de seguridad ante posibles rompimientos de la cuerda o hilo, ya que normalmente los brazos metálicos traen rebabas, que es conveniente limar en los puntos de inserción del cable. Si una cuerda se rompe, es señal de que debe ser cambiada, no añadida.

Es importante aclarar que la varilla del sensor de dirección de la máquina, corre contra el interior de la línea guía y la varilla del sensor de altura o elevación corre por abajo, esto para que no haya elementos que desvían ninguna de las varillas, excepto la misma línea, por otro lado las varillas no deben flexionarla en forma notoria. La longitud de la cuerda que se tensiona no debe ser mayor a 200 metros para reducir errores, el traslape de las cuerdas se debe hacer en una longitud de por lo menos 20 metros.



Plomada en la línea guía.

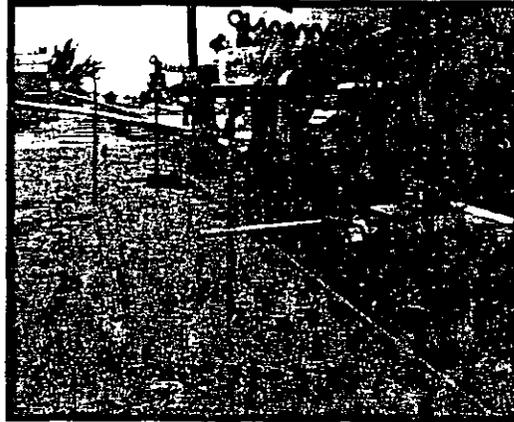
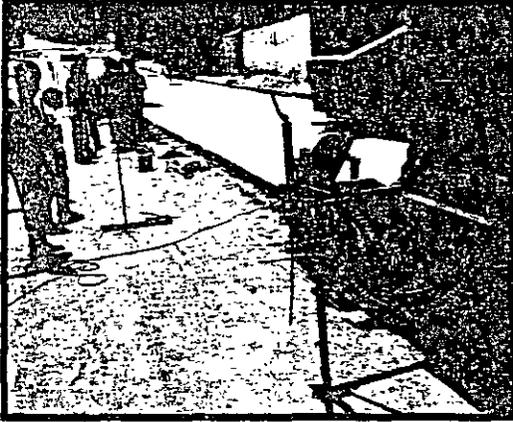
Una vez tensionada la cuerda o hilo e insertada en el brazo soporte se procede a plomar su punto de contacto con el brazo en el punto físico dado por topografía, esta actividad se inicia soltando las tuercas de ajuste del brazo al "pin" y mediante una plomada de mampostero o un nivel de burbuja se determina el punto al cual debe quedar, para fijar las tuercas.



Ajuste de altura.

El ajuste en altura se puede realizar simultáneamente y con los datos entregados por la comisión topográfica, soltando la tuerca de ajuste en altura, con ayuda del nivel de burbuja y un flexómetro se determina la altura de cada punto

Una vez que se tiene instalada la línea guía debe ser verificada visualmente, cualquier duda debe ser verificada y todo error corregido con topografía.



Sensores en los equipos.

c)2 Preparación de equipos.

Todos los equipos que participan en el tirado o extendido del concreto deben ser probados en vacío, antes de iniciar la recepción del concreto.

En el caso de la pavimentadora, deben activarse sus sistemas hidráulicos, tanto motrices como de transporte, compactación y vibrado del concreto, detectando fugas y conductos en mal estado, enfatizando en la respuesta a las indicaciones de los sensores, tanto en altura como en dirección.

Es muy importante prevenir la acción de fragmentos de concreto que no hayan sido eliminados en la limpieza diaria y que obstaculicen el desplazamiento de algunas de las partes de la pavimentadora, se recomienda que la pavimentadora cuente con un sistema neumático que permita el uso de pistolas rompedoras de concreto, para facilitar la limpieza y suministro de agua a presión. de igual forma, debe revisarse la calidad de elementos de acabado del concreto, para verificar el tipo de acabado que pueden ofrecer tanto en textura como en uniformidad. Es muy importante conocer que el perfil de la vía obtenido por la pavimentadora, será el definitivo para el proyecto.



Limpieza de los equipos.

Los vibradores deben estar correctamente localizados, respetando el área frente a cada uno o zona de influencia, entregado por el fabricante y ajustado de acuerdo a la cabeza hidrostática proyectada en la colocación y el tipo de concreto, a colocar, esto último solo influye de acuerdo a la experiencia del operario o el constructor con mezclas similares.

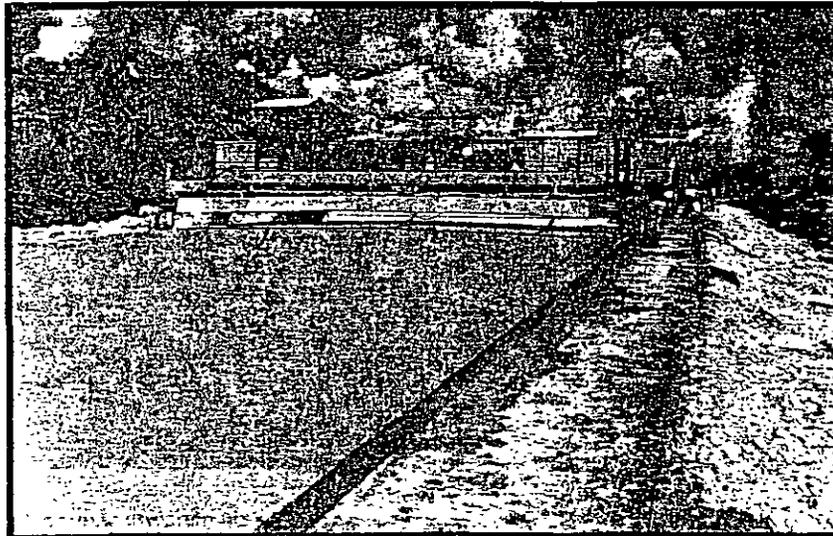
La apariencia de un vibrador en mal estado es diferente a la de sus vecinos, la alta temperatura alcanzada por el aceite, en el interior de un vibrador defectuoso, provoca cambios en el aspecto externo. De igual forma se deben identificar fugas de aceite en sus mangueras o uniones. Un vibrador en mal estado definitivamente debe cambiarse, no se debe pavimentar con vibradores defectuosos.

Otros vibradores, presentes en la pavimentadora son los vibradores de piso. Están localizados sobre las placas metálicas (float-pan) que se instalan a la salida del concreto de la placa de extrusado o profile-pan, estos vibradores y las placas que conforman el float-pan deben revisarse tanto en su estado y limpieza, para garantizar un buen acabado del pavimento.

El float pan debe tener la posibilidad de dar el bombeo de la vía, su sistema de soporte para que quede "flotando", y el ajuste hidráulico para las pendientes debe ser igualmente revisado.

El dispositivo para formar la corona o bombeo de la carretera se debe probar en todo su conjunto, aunque no todos los proyectos lo requieran, tanto la formación del bombeo a la entrada (en el strike off) como en la placa de extrusado y en las indicaciones que el operador de la máquina recibe de la localización de estos elementos. En la sección de la placa o molde de extrusado (profile-pan), el ajuste se hace liberando cada tuerca de fijación de las planchas y alineándolas de acuerdo a la pendiente o pendientes transversales requeridas para una sección, esta alineación se puede hacer mediante un ajuste hidráulico que poseen algunas máquinas o manualmente si no se cuenta con él, alineando con la ayuda de un hilo o lámina metálica recta, finalmente se asegura todo el sistema.

Se debe notar que en caso de coronas o bombeos de la losa, otros elementos deben ser ajustados para dar la forma, entre ellos los vibradores y el tornillo repartidor, que no tiene ajuste pero se recortan la longitud de los pasos centrales.

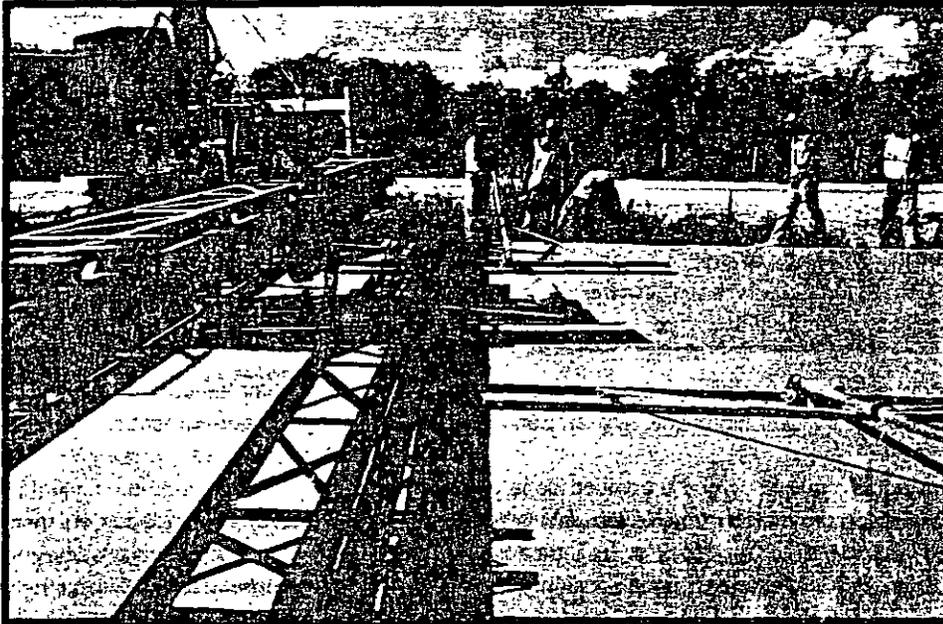


Pavimento con bombeo al centro.

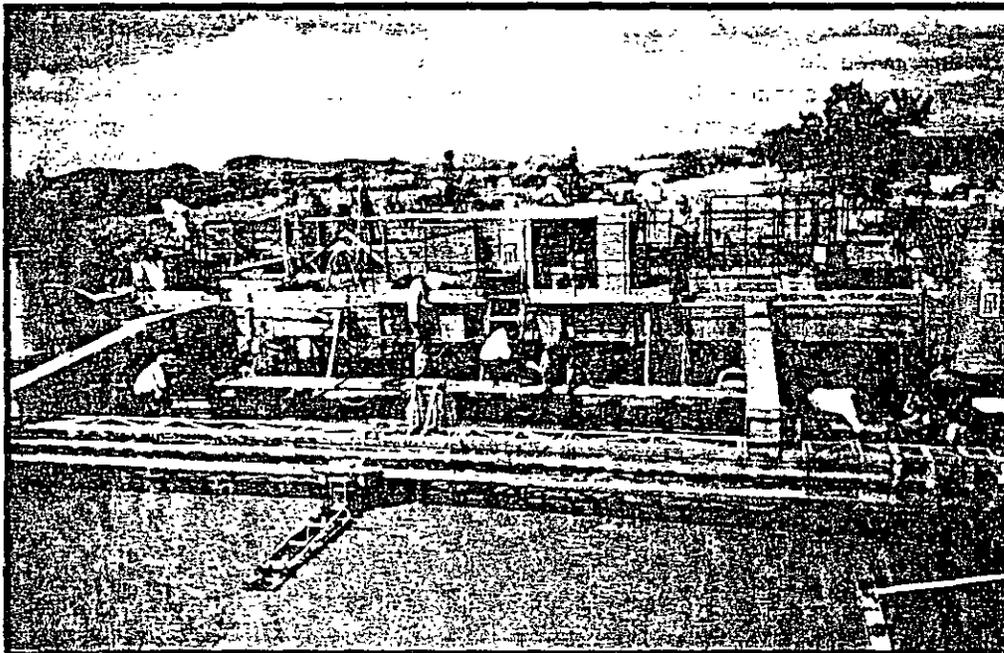
El mecanismo hidráulico de ajuste es fundamental para dar la forma correcta en tramos de transición de recto, con doble pendiente, a curvo con una sola y en este sentido debe haber un apoyo continuo de la comisión topográfica del proyecto.

Posteriormente se encuentra el final finisher o llana metálica de la pavimentadora, su revisión se hace

por la calidad del movimiento en zigzag y el estado de la superficie. Este es un elemento que da un buen acabado siempre que se encuentre en perfecto estado, y el concreto sea muy homogéneo. La decisión de utilizar esta llana ó de dejarle todo el trabajo a las llanas manuales se debe tomar en los primeros metros de pavimento.



Llana oscilatoria final.



En cuanto a los sensores, hay que tener en cuenta que existen muchos tipos de sensores y aunque los mas usados en pavimentos son los hidraulicos, existen tambien eléctricos, láser y sónicos. Cada tipo de sensor debe ser usado e instalado de acuerdo a las recomendaciones del fabricante y por personal de experiencia. Normalmente las pavimentadoras usan cuatro sensores de altura, aunque algunas solo usan dos, con cuatro se puede tener un mayor control del espesor de la losa, sin embargo con dos sensores y un excelente trabajo de topografía y perfilado de la rasante, se pueden lograr muy buenos resultados.

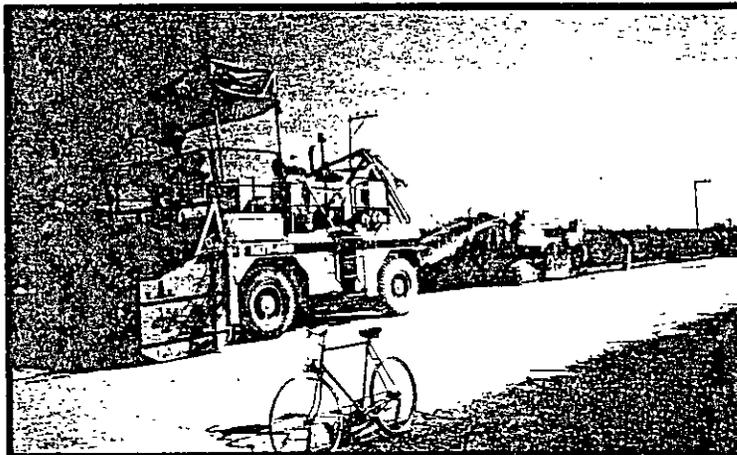
Los sensores de altura estan localizados adelante y atras de la maquina y haciendo contacto en cada extremo con la linea guia. En este caso es importante notar que algunas pavimentadoras traen los sensores traseros unos metros atrás de profile pan o molde de extrusion y en caso de curvas verticales cerradas, se corre riesgo de una variación fuerte del espesor de la losa.

Las varillas de los sensores de altura deben fijarse tan cerca de la horizontal como sea posible y a la misma distancia del equipo a la linea guia, normalmente entre 20 y 25 cm. La presión de la varilla a la linea guia se podrá ajustar cuando sea necesario durante la pavimentación, el sensor tiene o debe tener una contrabalanza a fin de ajustar la presión y, con esta, y el ajuste del tornillo amortiguador se controla la "sensibilidad" del sensor, con el fin de reducir los movimientos bruscos y continuos.

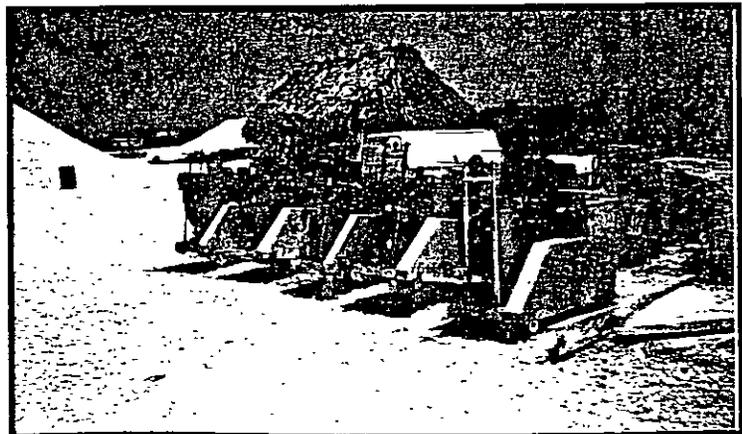
La separación de los pines de la linea guia no debe corresponder a la separación entre sensores, con esto se lograra que los dos sensores no esten al mismo tiempo en valles o en picos de las catenarias, formadas en la linea guia, y mejorar así el perfil de la vía.

En cuanto a la texturizadora se debe probar la respuesta de los sensores a las variaciones de la linea guia, el estado de los elementos de texturizado (tanto yute como peine de cerdas metálicas o plasticas según sea el proyecto) y el estado de los orificios de las espreas o aspersores de membrana de curado, tambien el estado del deposito de membrana y de los tubos conductores.

Otros equipos que deben ser probados son las cortadoras de discos para el concreto y los reflectores de emergencia. En algunos proyectos se cuenta con equipos esparcidores o colocadores del concreto, para facilitar la labor de la pavimentadora y lograr un mayor rendimiento.



Equipo Colocador de Concreto MTP-400.



Cortadoras de Concreto.

c)3 Inicio de los trabajos.

Antes de iniciar la jornada de pavimentación deben revisarse todas las medidas de seguridad y tomar todas las precauciones para el personal de la obra.

Para iniciar se deberan revisar los siguientes puntos

- Revisión de todo el equipo involucrado en la pavimentación.
- Que se cuente con una distancia aceptable de tramo a pavimentar.
- Disponibilidad de materiales, tanto en volumen como en calidad.
- Reservas en almacén y en obra.
- Equipos de ensayo en buen estado y con personal disponible
- Herramientas necesarias para la colocación del concreto:
 - flotadores manuales.
 - aspersores.
 - vibradores manuales.
- Comunicación por radio entre el frente de trabajo y planta.
- Equipo y agua suficiente para humedecer la rasante.
- Colocación de la línea guía.
- Verificar la junta fría y la correcta colocación de las pasajuntas.
- Revisar el pronóstico del tiempo

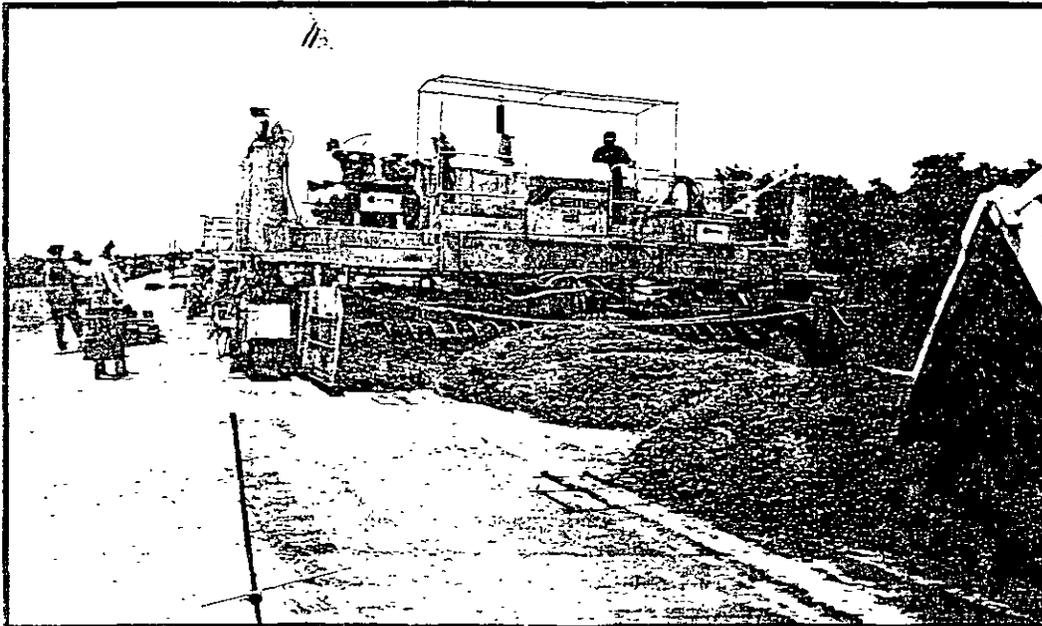
Es importante tener la base, o rasante, saturada para recibir el concreto, las bases con falta de agua pueden absorber agua del concreto y reducir la hidratación del cemento ocasionando bajas resistencias

c)4 Pavimentación con cimbra deslizante.

Las pavimentadoras modernas cuentan con un mecanismo para manejo del concreto, este se puede dividir en recepción y acomodamiento, vibrado y compactación, y perfilado o extrusado.

La distribución del concreto al frente de la pavimentadora es el primer contacto entre el concreto y esta, y se logra mediante un tornillo sinfín o gusano que, controlado por el operador, permite transportar el concreto en el frente de la máquina para repartirlo y dosificarlo hacia los lados de la máquina este trabajo es complementado posteriormente por el "tamper bar".

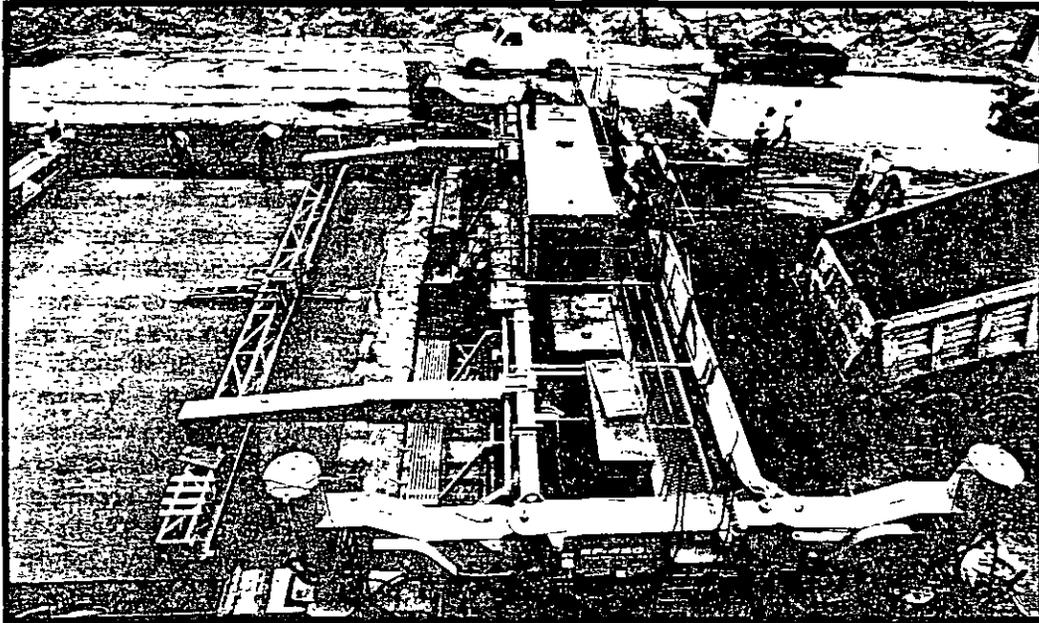
Algunas pavimentadoras cuentan con un receptáculo entre el gusano y el panel o plancha de cimbrado donde están los vibradores, que se denomina caja de vibradores o de lechada. Esta caja está cerrada frontalmente por el strike-off y, eventualmente, la viga estructural o chasis de la máquina. En las máquinas que cuentan con caja de lechada esta, inmediatamente después del tornillo



Proceso de Pavimentación.

repartidor, una lamina metalica horizontal o strike-off que sube o baja de acuerdo a las indicaciones del operador para ampliar o reducir la cabeza estatica del concreto dentro de la maquina, y que se antepone a la viga frontal estructural. El strike-off debe ser ajustado a las condiciones de pendiente transversal de la via, bombeo o corona.

En las pavimentadoras de cimbra deslizante encontramos dos tipos de vibradores, los primeros, o internos, se localizan en la caja de vibradores o de lechada, los segundos, o vibradores de piso, se usan para mejorar el acabado.



Pavimentadora de cimbra deslizante.

En las pavimentadoras que no cuentan con caja de lechada están los vibradores inmediatamente despues del tornillo repartidor y antes del molde o placa extrusora.

En las zonas adyacentes a los vibradores excéntricos internos, o zona de influencia de los vibradores se produce la energización, esto es, la movilización de las partículas del concreto, las burbujas de agua y aire suben a la superficie explotan y el volumen de la mezcla se reduce, facilitando su entrada al canal de extrusado.

Los vibradores tienen dos funciones: consolidar el concreto y hacerlo fluido para que pase por el molde o caja extrusora. Fisicamente, el efecto deseado es lograr la frecuencia de resonancia de las partículas dentro de la mezcla, o sea que se exciten y se junten logrando eliminación de vacíos. Esta frecuencia es diferente para cada tamaño de partícula y diferente para cada gradación en particular y del diseño de la mezcla.

Un vibrador es un embolo que gira en el interior de un tubo o cubierta, el embolo está apoyado en el extremo del que se produce el giro, quedando el otro extremo o cabeza libre, el giro libre de la cabeza (envuelto en aceite) produce la vibración. La energía transmitida por el vibrador (fuerza centrífuga) es directamente proporcional al peso de la cabeza y a la velocidad de rotación, la velocidad es la única variable que se puede controlar y se hace variando la velocidad de giro del motor del vibrador, esta velocidad se mide en VPM y se controla desde el puesto de mando de la pavimentadora. En general la energía requerida varía entre 7000 y 9000 VPM.

Con la variación de la energía transmitida por el vibrador varía la zona de influencia. Otras variables que afectan esta zona son:

- La velocidad de la pavimentadora
- La calidad del montaje aislado del vibrador

- Las distancias entre la cabeza y el punto de aseguramiento al tubo soporte
La separación de los vibradores debe hacerse de tal forma que haya un pequeño traslape de las zonas de influencia, la posición de los vibradores en el tubo soporte debe estar de acuerdo a las recomendaciones de los fabricantes y de la experiencia con el tipo de mezcla a usar.

La distancia de traslape entre las zonas de influencia es normalmente de 50 a 75 mm, no traslapar implica segregación de la mezcla. Debe tenerse especial cuidado con el vibrado en el borde de la losa.

Cualquier falla en un vibrador se manifestara inmediatamente en el aspecto de la losa de concreto, en este caso debe apoyarse en vibradores manuales y ampliando la zona de influencia de los adyacentes.

El vibrado no es la solución para todos los problemas de la mezcla, incluso pueden ser causa de problemas en la mezcla, excesiva vibración causara segregación y reducción del contenido de aire, poca vibración causara un mal acabado y un volumen alto de vacíos reduciendo su resistencia.

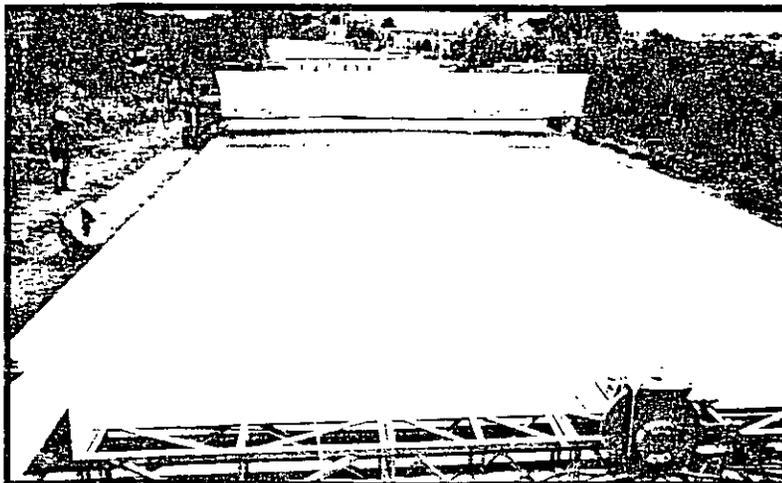
En este mismo receptáculo se encuentra el tamper-bar, barra o cuchilla compactadora, característico solo de algunas pavimentadoras, que se usa para profundizar fragmentos de grava que hayan quedado expuestos superficialmente, aunque para algunos fabricantes su función es mantener el movimiento dentro de la caja de vibradores para mantener un flujo continuo y que no se pegue a las paredes.

Finalmente encontramos la placa extrusora del concreto (Profile pan), en la cual el concreto toma la forma de la losa, en esta sección es importante el perfecto alineamiento de las planchas que la conforman y el perfecto estado, libre de abolladuras o deformaciones que incidan en el perfil, por insignificantes que parezcan.

La cimbra deslizante de la máquina se encuentra en los lados, es la que confina los elementos superiores al concreto. Se puede dividir en dos secciones, una que confina el concreto para lograr que el gusano lo pueda exparcir y otra que va desde el strike-off hasta la salida posterior del concreto. La primera normalmente va siendo arrastrada sobre la base o puede ser de altura variable según la variación del perfil del suelo; La segunda puede ser completamente levantada para facilitar su limpieza y ser ajustada mediante pernos para mejorar la acción de los vibradores laterales y permitir un hombro de losa con un mejor terminado.

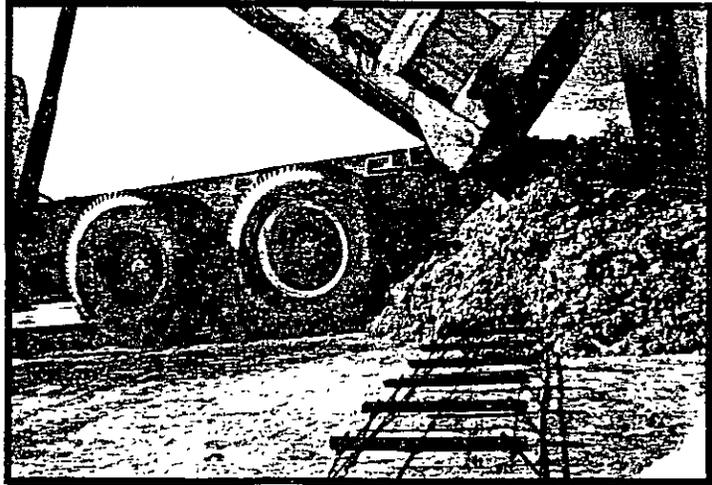
El resultado de un buen trabajo, con el equipo de cimbra deslizante, es una forma geométrica y superficie uniformes tanto en las dimensión horizontal como en la vertical, para esto es fundamental un suministro continuo y homogéneo del concreto y lograr movimientos uniformes de la máquina.

Pavimento terminado después del paso de la máquina.



Las pasajuntas pueden ser colocados con su montaje en canastas metálicas que garanticen su correcta disposición en la losa de concreto y que permitan un libre movimiento de las losas de concreto o pueden insertarse mediante elementos mecánicos que aseguren su correcta posición.

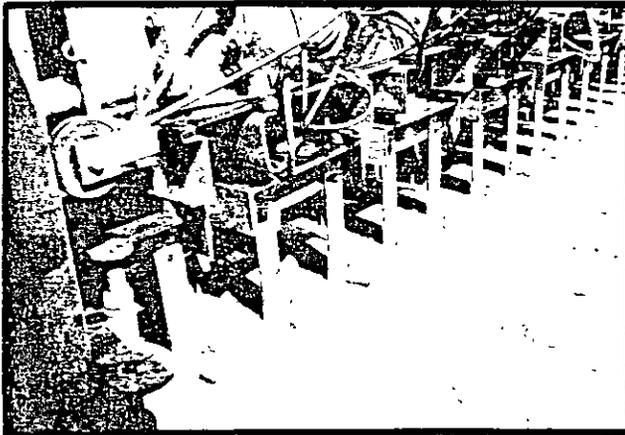
Los pasajuntas deben haber sido bañadas con grasa, diesel o pintura para evitar que se adhieran al concreto. La canasta se debe colocar en el lugar indicado por la comisión de tendido de la línea guía y debe ser fijada a la base mediante pernos de fijación, bien sea con ayuda de pistola de impacto o mediante golpes de martillo, también se pueden usar ganchos metálicos o laminas y clavos.



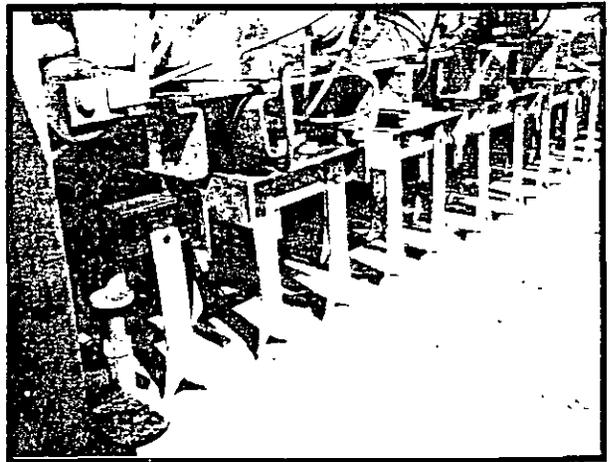
Pasajuntas colocadas manualmente.

Es importante garantizar la correcta fijación de la canasta y evitar su movimiento ante la presión de la máquina, si la canasta se mueve al momento de colocar el concreto la losa no tendrá la libertad para moverse longitudinalmente, lo que puede ocasionar fisuramientos y fracturas de los bordes de la misma.

Los insertadores automáticos de barras hacen el trabajo completo de localización de barras después del vibrado y antes de que se le de el acabado a la losa, reduciendo costos al eliminar el esqueleto de la canasta y evitando el riesgo de su movimiento por la presión de la pavimentadora.



Colocación Automática de Pasajuntas, dispositivo DBI.

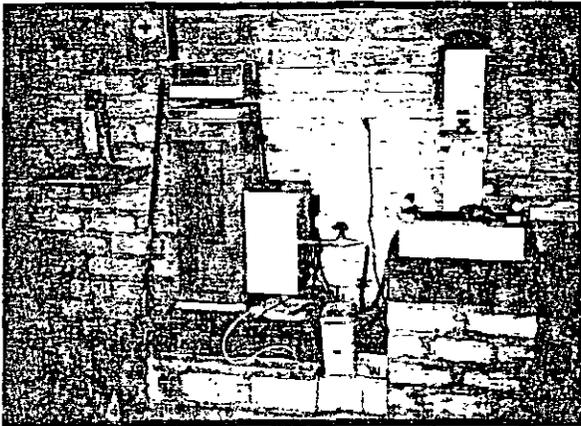


Es importante la labor de dirección del jefe de pavimentación y su continua comunicación con el operador de la pavimentadora, para lograr una buena repartición del concreto y un movimiento mínimo de las canastas pasajuntas. En esta tarea juega un papel muy importante la labor de los coordinadores de descarga y de colocación de canastas, y sus indicaciones deben ser conocidas por todos los conductores y personal que se localice en este sector y supervisadas por el operador de la pavimentadora y el jefe de pavimentación.

La seguridad se impondrá en todo momento, es prudente considerar alarmas de retroceso, procedimiento de descarga (orden de entrada, salida y señales para avance y parado) y control del tráfico para la entrada y salida de camiones de vías transitadas al sector de carga entre otros.

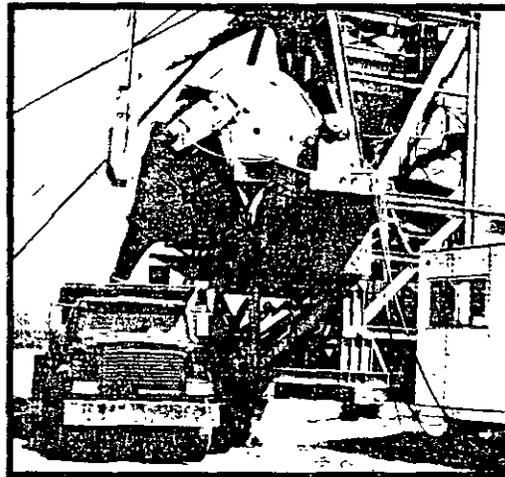
Cuando se tiene tirada y posicionada la línea guía en una longitud importante al frente de la pavimentadora, esta se puede soltar de los brazos en un tramo de 50 metros y tenerla en el piso sin distensionarla, asegurada por dos elementos pesados (grupo de barras de amarre), para facilitar la entrada y salida de los camiones al tramo.

Las operaciones de pavimentación del día se deben iniciar con la producción de dos o tres cachadas, que por el tipo de equipos usados en estos proyectos corresponden a dos o tres camiones. El concreto de estos camiones debe ser revisado por el laboratorio con las pruebas de revenimiento, contenido de aire y peso volumétrico para ser enviados a la obra, en este momento se inicia la labor de pavimentación propiamente dicha, es decir, se continúa produciendo concreto y enviándolo al frente de pavimentación.

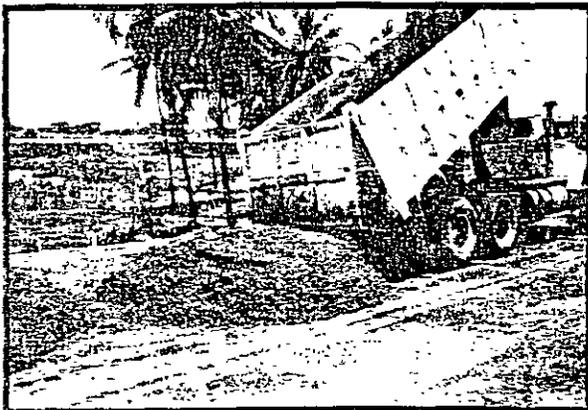


Equipos de Laboratorio.

El concreto una vez que llega al frente de pavimentación debe ser revisado, primeramente con el jefe de pavimentación para determinar rápidamente si se puede descargar y, de ser así, una vez descargado, deberán ser revisado por el laboratorio, de esta forma se determina la pérdida de trabajabilidad que ha sufrido el concreto durante el viaje y se procede a ajustar la producción de la planta.



Bachada colocada en camión.



Descarga al frente de la pavimentadora.

La uniformidad es el factor mas importante para obtener un buen trabajo, si no se cumple la uniformidad en todas las fases, se dificultara obtener un buen perfil.

La distancia de la planta de produccion al sitio de colocación es un factor que determina una entrega oportuna de concreto a la pavimentadora. El tiempo de viaje se determina, también, por las condiciones el tráfico y del estado de la via. Esto debe tenerse en cuenta para ajustar el numero de unidades de transporte.

Es practica común que el concreto se envíe ligeramente alto en revenimiento en los primeros viajes para después irlo reduciendo. Este concreto, que se conoce como concreto de carga de la pavimentadora, se puede enviar con 8 cm para ajustar en 6 o 5 cm, con el fin de sobreponerse a perdidas de trabajabilidad mayores a las esperadas y es válido si se tiene en cuenta que es concreto que sera prácticamente colocado a mano pues la maquina no habrá podido llenar sus cimbras completamente y es necesario llevar concreto en un cargador para completar el faltante.

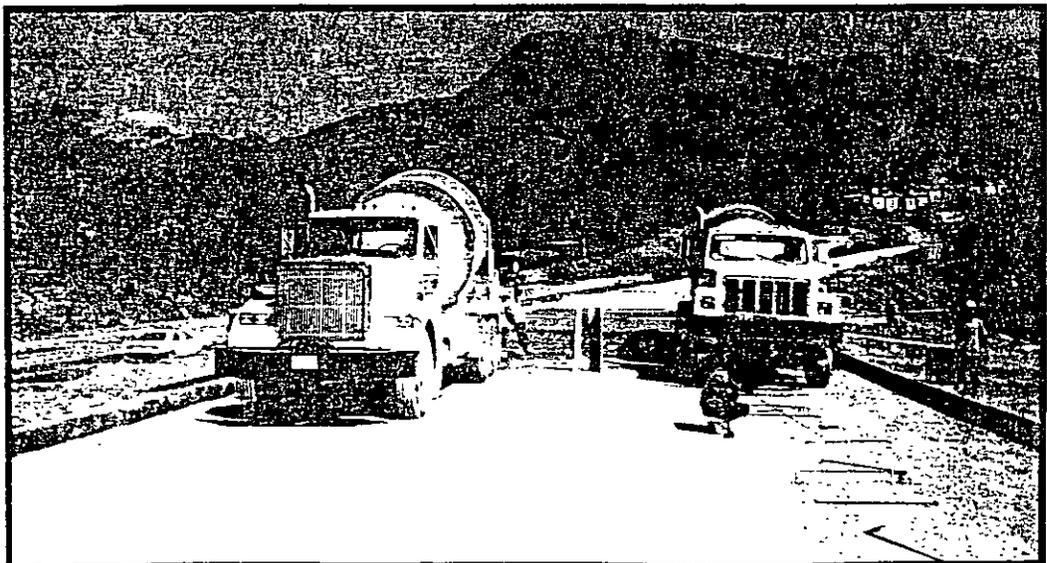
Como los dos o tres primeros viajes, normalmente no son suficientes para llenar las cimbras y cajas de la pavimentadora, ni para lograr una carga hidrostática dentro de la máquina, es conveniente contar con una cargador o retroexcavadora, para introducir y repartir el concreto frente al gusano de la pavimentadora.

Los puntos a cuidar en esta etapa son:

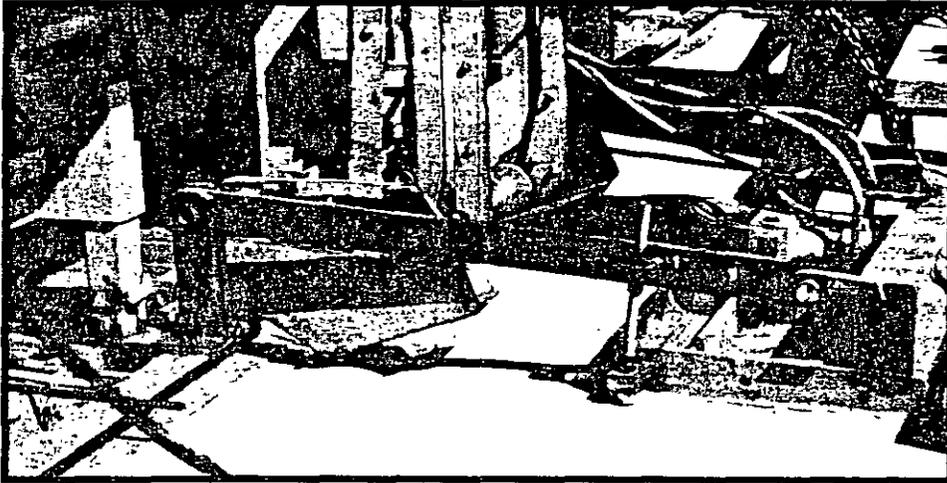
- Controlar la trabajabilidad de la mezcla
- Mantener la relacion Agua / Cemento de diseño
- Ajustar los volúmenes suministrados en cada viaje
- Verificar el espesor colocado
- Evaluar la calidad de la superficie dejada por la pavimentadora
- Ajustar la velocidad de avance del tren con respecto al suministro de concreto (recordar que los equipos de pavimentacion en lo posible no deben parar)
- Iniciar la rutina de calculo de rendimiento

Las barras de amarre prácticamente se instalan en todas las juntas longitudinales, la altura de colocacion es a la mitad del espesor de la losa, incluso en las juntas machimbradas. En construcción con cimbra deslizable, estas barras pueden ser colocadas mediante extensiones o silletas, antes de la colocacion del concreto o bien insertadas en el concreto en estado plástico, con un insertador automatico.

Barras de amarre colocadas sobre la base.



Los insertadores automáticos de barras de amarre vienen acondicionados en la parte posterior de la pavimentadora, requieren de una placa flotante que borre la huella de la inserción, cuando el insertador está en el centro de la losa y el pavimento tiene bombeo, esta placa flotante debe tener la forma para no dañar el ángulo del bombeo.



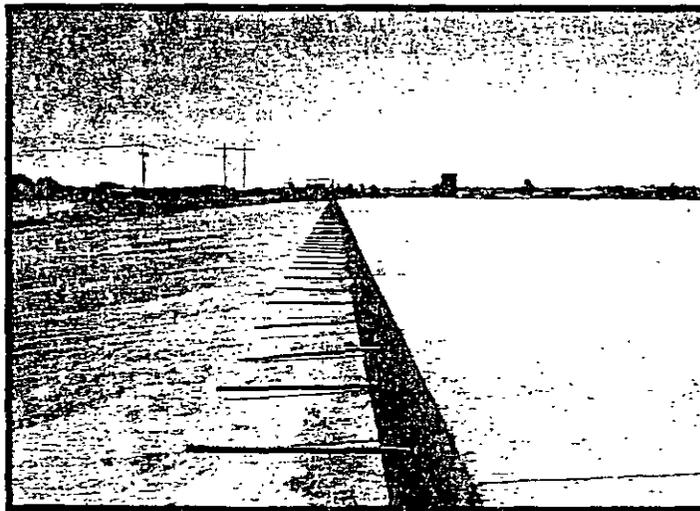
Insertador automático de barras de amarre.

Las barras de amarre que se utilizan para las juntas longitudinales de carriles adicionales o sobrecanchos, normalmente se instalan con insertadores laterales automáticos o manuales, se acostumbra colocar las barras dobladas para ser enderezadas una vez que el concreto esté endurecido.

También se pueden colocar estas barras manualmente a la salida de la pavimentadora, obviamente previniendo al personal de posibles accidentes con las barras laterales, es probable que al proponer esta práctica el calculista solicite una longitud mayor de anclaje de la barra

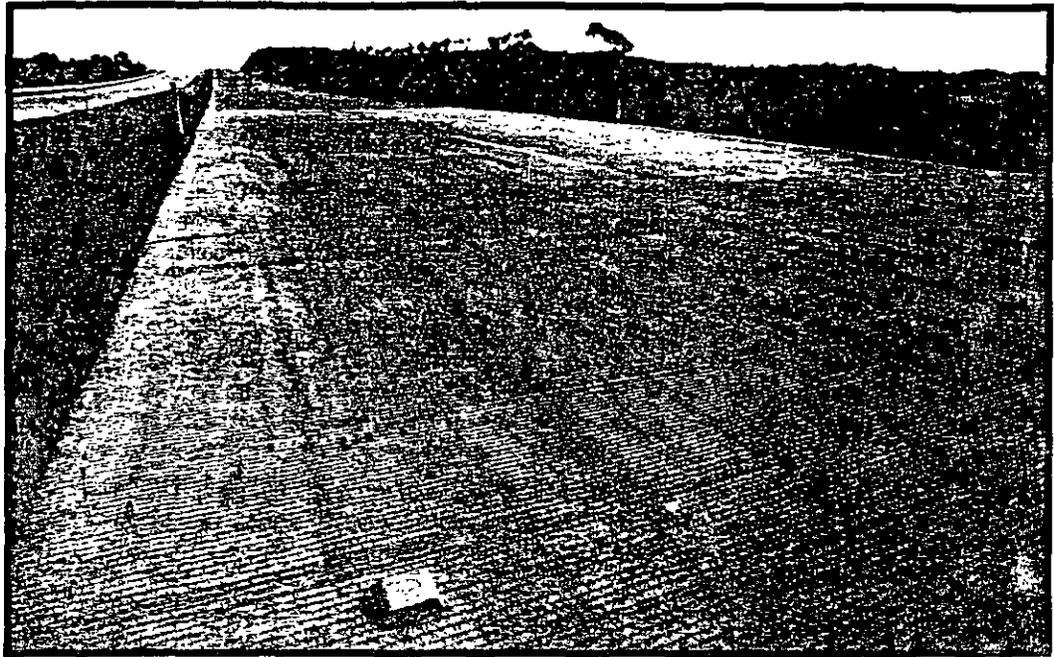
c)5 Acabado superficial del pavimento

Es el proceso para obtener la textura de la superficie del concreto acorde a las especificaciones del proyecto, homogénea, segura y durable, mediante técnicas sencillas y de rápida ejecución usando las herramientas adecuadas. Primero se realiza el afine, para conseguir una superficie adecuada para y obtener un buen texturizado, resistente a la fricción del tráfico y sin afectar la geometría dejada por el extrusado. No se debe hacer el terminado mientras se observe la presencia de agua en la superficie.



Barras colocadas para amarrar colado posterior.

Para lograr un buen acabado existen en el mercado multitud de herramientas - montadas en la pavimentadora, en montaje independiente y guiadas con la línea guía de la pavimentadora o



Acabado final de un pavimento terminado.

manuales, el éxito en el intento de obtener un buen acabado radica en buena parte, en el criterio de elección del equipo más adecuado, las variables más comunes son el tipo de concreto, el clima reinante y la velocidad y condición del concreto dejada por la máquina.

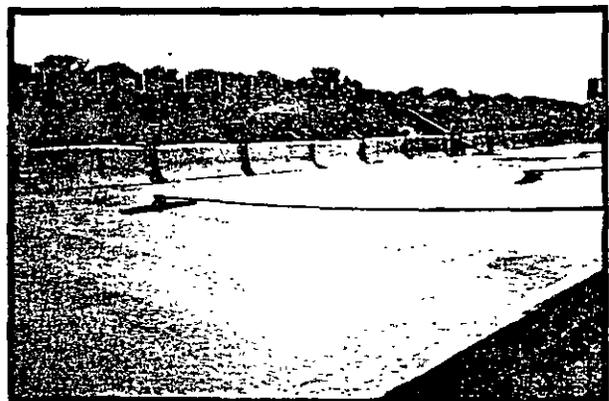
En cuanto a herramientas manuales se cuenta con una gran variedad y su uso depende de las condiciones del proyecto.

En pavimentaciones con cimbra deslizante es necesario usar llanas de gran dimensión, para cubrir un gran espacio y mantener el ritmo y la velocidad de la pavimentadora; normalmente son llanas a las que se les monta un largo mango para cubrir todo el ancho de la carretera desde uno solo de los lados. En la unión entre mango y llana se instala un pivote que permite ajustar el ángulo de ataque y evitar que penetre la losa. Sin embargo es muy importante aclarar que su diseño incluye un peso adecuado para obtener un acabado acorde con su uso, por esto se recomienda no incluir mangos de materiales distintos de su diseño. Ocasionalmente es necesario adicionar algún elemento metálico a la llana para incrementar su peso y obtener un mayor efecto; también se recuerda que obtener un buen acabado en el borde contrario al usado por el operario o finishero es difícil, si el ancho de la losa es importante, por esto se recomienda un finishero a cada lado como mínimo.

Las llanas metálicas más comúnmente usadas son las tipo perfil acanalado y tratadas con tungsteno o material similar. Se conocen como llanas canal o "aviones" si su dimensión es importante.

El trabajo del finishero termina cuando obtiene una superficie pareja y sin marcas de la placa extrusora ni de las llanas.

El proceso experimentado superficialmente por el concreto, una vez que sale de la pavimentadora, es la liberación del agua de sangrado y, posteriormente



Llanas metálicas de acabado final.

seca esta superficie, adquiere un tono mate que indica el momento del texturizado. Los concretos para pavimentos sangran poco o nada y una buena labor de vibrado deja una superficie con suficiente mortero como para que no haya ninguna dificultad en obtener un buen acabado, el exceso de vibrado creara superficies con exceso de mortero, lo que a su vez ocasiona baja resistencia a la fricción.

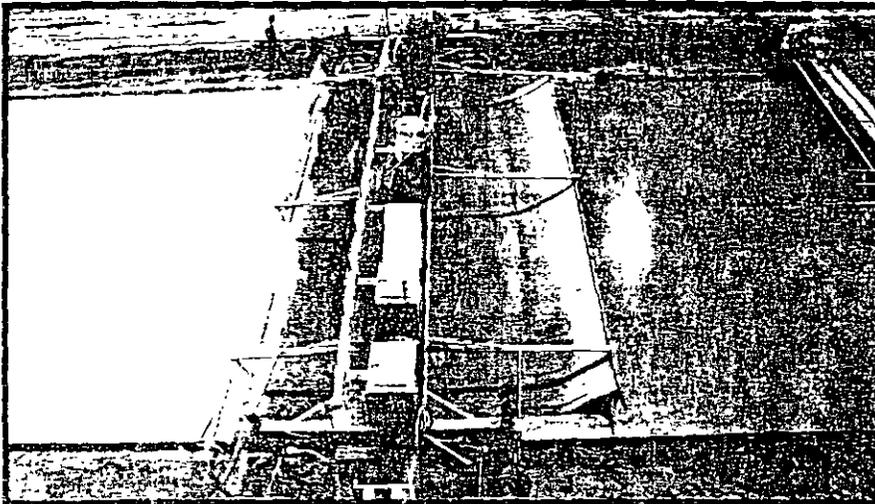
Normalmente la primera pasada de la llana abre poros y permite salida de pequeñas cantidades de agua y aire presente cerca a la superficie, la segunda pasada o el uso de otra herramienta busca cerrar los poros abiertos y sacar a la superficie granos de arena, esta otra herramienta puede ser una llana fina tipo fresno.

Un buen diseño de concreto debe tener en cuenta la producción de suficiente mortero superficial que de un buen acabado.

c)6 Microtexturizado longitudinal.

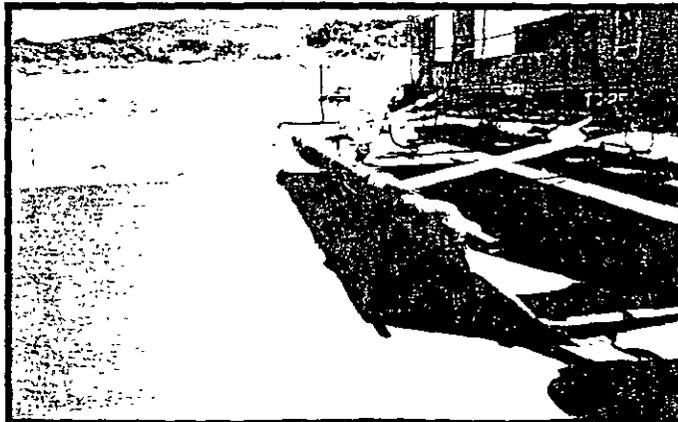
Buena parte de la seguridad que una carretera nos pueda ofrecer esta dada por la correcta ejecución de esta etapa, la distancia de frenado de los vehículos tiene relación directa con el grado de adherencia o fricción que hay entre las superficies de contacto neumático - concreto.

El microtexturizado se realiza corriendo una tela de yute húmeda a lo largo del tramo de concreto una vez que se ha logrado un buen afinado y que la superficie está seca para que permita la presencia de granos de arena después del paso de la tela. Las texturizadoras vienen equipadas con soportes y ganchos para colgar la tela, el soporte puede bajar para que entre en contacto con la superficie y subir cuando se realiza otra actividad.



Texturizadora - Curadora

Las variables a controlar son la humedad de la tela, el tiempo de aplicación y la velocidad de aplicación. El exceso de humedad se percibe con la presencia de burbujas de agua detrás del paso de la manta, por el contrario, no la falta de humedad causa levantamiento de concreto. El agua se puede aplicar cuando con la ayuda de una bomba manual. Algunas texturizadoras vienen acondicionadas con irrigadores que mantienen húmeda la tela.



Alternativa con pasto sintético.

El tiempo de aplicación debe ser al cambio de tono del concreto de brillante a mate, la velocidad debe ser suficiente para no levantar el concreto. Otros aspectos que deben tenerse en cuenta es la limpieza de la tela y procurar que el tejido sea continuo y no coser tramos de yute para dar la longitud, una tela con fragmentos de concreto adheridos marcará excesivamente en el concreto y lo mismo ocurre con las costuras de la tela.

Alternativamente se puede utilizar pasto sintético o cuero para realizar esta actividad en sustitución de la tela de yute.

c)7 Macrotexturizado transversal.

El macrotexturizado o texturizado transversal que normalmente se realiza con peine metálico, permite la rápida evacuación de agua de la superficie del pavimento, permitiendo el contacto entre los neumáticos de los vehículos a alta velocidad y el pavimento y evitando el peligroso acuaplaneo. El proceso constructivo se logra mediante el uso de una texturizadora. Los sensores de la texturizadora usan como referencia para su movimiento las líneas guía de la pavimentadora, lo que le permite obtener un correcto manejo de los traslapes y separaciones de las líneas, sobre todo en las curvas horizontales.

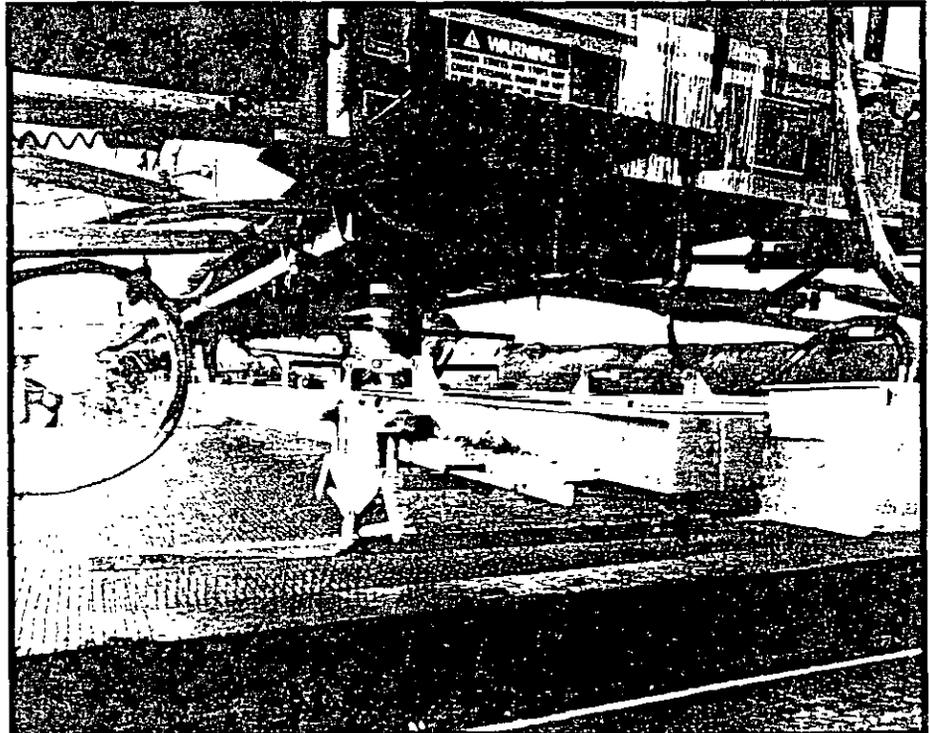
Las variables a tener en cuenta son el tiempo de aplicación, la profundidad del texturizado y la separación de las cerdas.

El tiempo de aplicación depende de la experiencia del operador de la texturizadora bajo el control del jefe de pavimentación, sin embargo una idea es que el macrotexturizado avanza unos cien metros y al regreso a su punto inicial la superficie estará lista para recibir el peine, debe evitarse su aplicación tardía ya que obligaría a una mayor presión o profundidad, lo que terminaría sacando agregado del concreto y dejando un acabado irregular.

La profundidad de texturizado debe estar entre los 3 y los 6 mm., que es suficiente como para que se marque el peine, pero de tal forma que el agregado grueso no se levante o se mueva y no se marque en exceso.

Es importante utilizar peines de texturizado en buen estado, con todos sus dientes, limpios y bien alineados, para no producir un efecto irregular.

Texturizado Transversal.

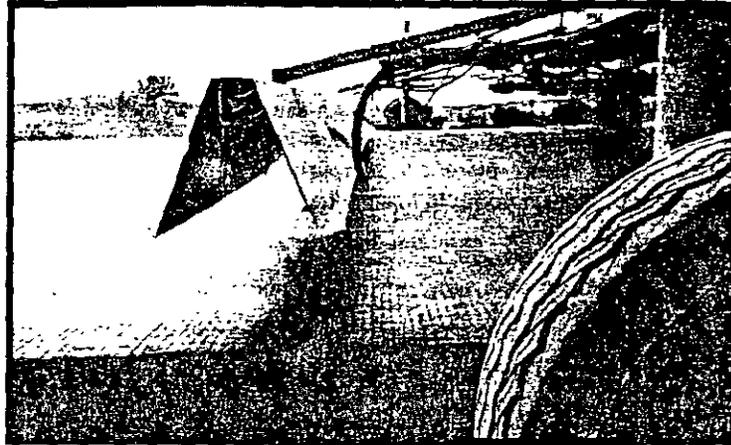


c)8 Curado del concreto.

Esta operación se efectuará aplicando en la superficie una membrana de curado a razón de un litro por metro cuadrado (1 lt/m²), para obtener un espesor uniforme de aproximadamente un milímetro (1 mm), que deje una membrana impermeable y consistente, de color claro, que impida la evaporación del agua que contiene la mezcla del concreto fresco.

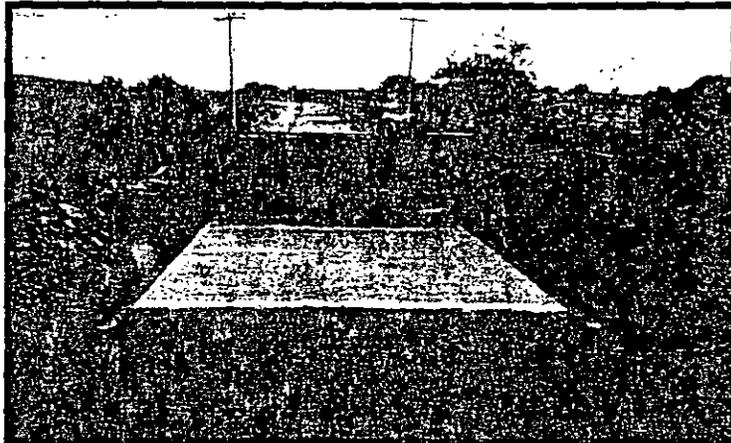
La aplicación de la membrana de curado se hace mediante la irrigación de compuestos curadores sobre la losa de concreto fresco, con ayuda de la texturizadora - curadora.

Este trabajo se hace en la texturizadora, donde hay un depósito de membrana de curado y conductos que llevan el líquido hasta los aspersores o espreas. Los depósitos de las texturizadoras algunas veces cuentan con agitadores de aire o agitadores de paletas, si el equipo no tiene estos accesorios debe agitarse manual y continuamente, esto para evitar taponamientos de los conductos y las espreas.



Aplicación de membrana.

Los compuestos curadores mas adecuados tienen un pigmento de color blanco, esto les da la ventaja de no concentrar el calor en el concreto y permiten distinguir las zonas ya tratadas y la uniformidad de su aplicación.



Aplicación de membrana.

El compuesto curador se aplica inmediatamente después de efectuarse el texturizado transversal, aunque en ocasiones y con el fin de proteger el concreto de la acción del sol y vientos fuertes rasantes, se puede hacer en dos etapas aplicando la primera antes del microtexturizado y la segunda después de el texturizado transversal. Hay que realizar la aplicación de la membrana también sobre los bordes verticales de la losa.

El espesor de la membrana podrá reducirse si, de acuerdo con las características del producto que se use, se puede garantizar su integridad, cubrimiento de la losa y duración, de acuerdo con las especificaciones del fabricante de la membrana de curado.

Durante el tiempo de endurecimiento del concreto, deberá protegerse la superficie de las losas contra acciones accidentales de origen climático, de herramientas o del paso del equipo o seres vivos.

c)9 Modulación de las losas.

La modulación de las losas es proveer la geometría de tableros diseñada por el Especificador, para inducir el agrietamiento de manera controlada. El mayor cuidado se debe tener en garantizar que la junta quede en el mismo sitio donde fueron colocadas las pasajuntas y donde fue indicado inicialmente.

La señal para la localización de las canastillas y de la junta debe quedar suficientemente separada de la losa y del sector de tránsito de la máquina, para que no sea borrada en el trabajo de pavimentación para revisar que la modulación se haga con base a las marcas de los dos extremos de la losa y que la señal se haga siempre de la misma forma, a fin de evitar confusiones

La modulación se debe hacer con polvo mineral de un color que permita ser observada fácilmente por el operario del equipo de corte en la noche y a la luz del mismo equipo.

Las pavimentadoras equipadas con insertador automático de pasajuntas (DBI) tienen un dispositivo que marca la ubicación de la pasajuntas con pintura.

c)10 Juntas frías.

Es necesario realizar una planeación adecuada de juntas frías, para mantener la uniformidad en el pavimento y evitar desperdicios o faltantes de concreto.

La junta fría se debe construir en todo el ancho de colado, se deben utilizar canastas de barras pasajuntas para garantizar la transferencia de cargas entre las losas. La alineación de las pasajuntas y su correcta instalación dependen en gran medida de la cimbra utilizada para formar la junta. Siempre que sea posible se deberá de tratar de hacer coincidir la junta fría con una junta de contracción.



Junta fría del fin del día.

c)11 Corte de juntas en el concreto.

El corte de las losas de concreto es una generalidad de todos los pavimentos de concreto, en pavimentos construidos con cimbra deslizante se debe hacer énfasis en el estado, el tipo y el número de equipos necesarios para garantizar un trabajo continuo de buena calidad y, principalmente, que permita que se alcance a cortar toda el área pavimentada en una jornada.

La clasificación de las cortadoras se hace normalmente por la potencia de su motor en kW y es conveniente que sean autopropulsadas. En proyectos carreteros las cortadoras deben ser con potencias del orden de los 50 a 60 kW, autopropulsadas y diseñadas para hacer corte en húmedo, o sea que el disco de corte es enfriado continuamente por agua.

La profundidad del corte es de un tercio del espesor de la losa.

Este corte deberá realizarse cuando el concreto presente las condiciones de endurecimiento propicias para su ejecución y antes de que se produzcan agrietamientos no controlados. Es importante iniciar el corte en el momento adecuado, ya que de empezar a cortar antes de tiempo podemos generar despostillamientos de las losas. en el caso de realizar el corte en forma tardía se estaría permitiendo que el concreto definiera los patrones de agrietamiento y de nada servirían los cortes por realizar. Este tiempo depende de las condiciones de humedad y clima en la zona, así como de la mezcla de concreto; por lo general, el de corte debe iniciar a las 4 ó 6 horas de haber colocado el concreto y deberá terminar antes de 12 horas después del colado.



Corte de Juntas.

Deberán realizarse primero los cortes transversales y posteriormente los longitudinales. Para realizar los cortes longitudinales es común utilizar una guía ajustable a los bordes de la losa y de esta forma garantizar un correcto seguimiento del alineamiento de la vía.

El tipo de disco de corte debe ser escogido dependiendo del tipo de agregado para determinar que composición de material abrasivo cortador es el más indicado.

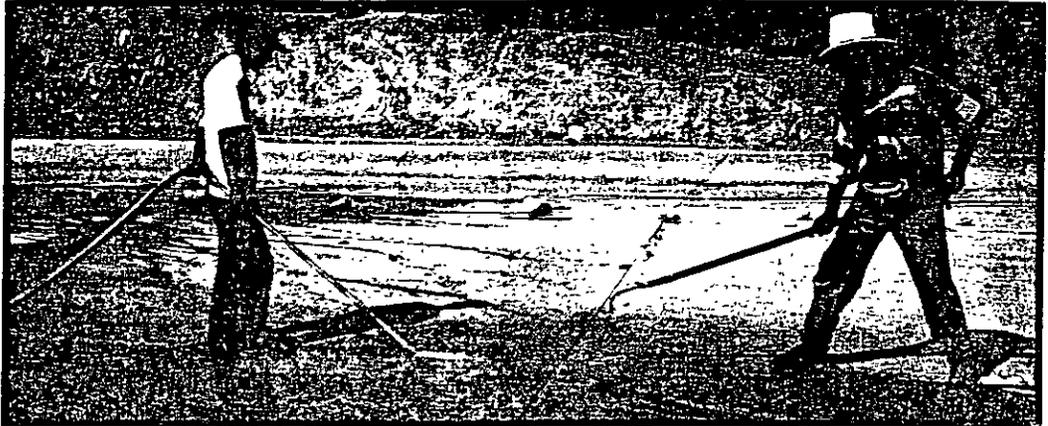
c)12 Ensanche de Juntas

El ensanche de la junta o segundo corte se realiza para obtener suficiente espacio donde alojar el material que se usará en el sello y de esta forma ofrecer un factor de forma apropiado (en profundidad y ancho), para el correcto desempeño del sellador.

El factor de forma especificado para cada proyecto debe ser incluido en las especificaciones constructivas. El corte de ensanche se hace con cortadoras de corte húmedo y la forma se obtiene ya sea con un disco de 6 mm de espesor o apilando dos discos de 3 mm de espesor y cortando a una profundidad menor.

c) 13 Limpieza y sello de juntas.

La limpieza de juntas es necesaria para evitar que dentro de ellas se alojen materiales incompresibles y para permitir una perfecta adherencia entre el sellador y el concreto.



Limpieza de junta con agua y rasqueteo.

Las actividades generales de esta etapa son:

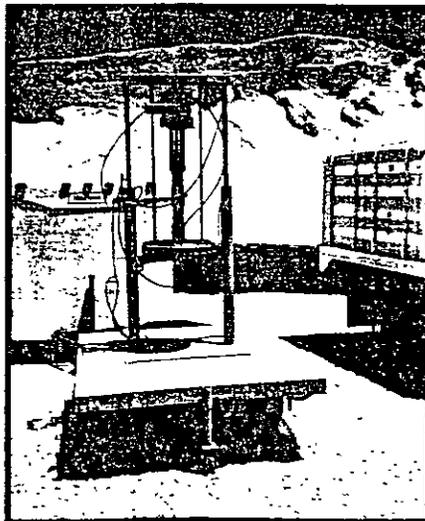
- Lavado de la junta con agua a presión.
- Limpieza de la junta o rasqueteo.
- Secado con aire a presión.
- Inserción de la Cintilla de Respaldo o Backer-Rod.
- Aplicación del material de sello

Los equipos requeridos para estas actividades son.

- Tanque de agua con bomba para suministrar agua a presión
- Compresor para limpieza y aplicación del material de sello.
- Herramientas para limpieza y para insertar el cordón o baker-rod
- Bomba de silicón para la aplicación del material de sello



Secado con aire a presión.



Bomba de Silicón.

La bomba de silicón es un equipo de piston que se introduce dentro del deposito de material de sello.

c) 14 Personal especializado necesario.

- Jefe de Pavimentación. – Es el responsable de la colocación del concreto y de todas las etapas siguientes en la obra.

Responde por todas las actividades ejecutadas en el tramo, incluidas las previas al inicio de la pavimentación, como revisión de los datos topográficos, hasta la apertura al tráfico. Su principal función es coordinar las actividades del equipo de trabajo en el tramo y mantener la comunicación con la planta y con otros involucrados en el proyecto.

El jefe de pavimentación coordina al grupo de personas capacitadas para las diferentes actividades que trabajan en equipo.

- Jefe de Línea. - Responde por la interpretación y evaluación de los datos topográficos entregados por el constructor de la base así como por el tendido de la línea guía para la pavimentadora y texturizadora. Su importancia radica en la coordinación con el personal de topografía del proyecto para hacer los ajustes del trazado requeridos y de esta forma reducir las variaciones en los espesores de la losa.

- Operador de Pavimentadora.- Interactúa continuamente con el operador de planta de concreto, con el coordinador de descarga de camiones y colocación de canastas y con los tornilleros, quienes están encargados de vigilar el tránsito normal de los sensores por la línea guía y de la cimbra lateral, su función es de vital importancia, no solo para obtener un buen acabado sino para producir un pavimento de concreto durable y respetar la geometría del proyecto.

- Jefe de Finishers o Jefe de Terminado. - Responde por la obtención de un buen acabado superficial de la losa antes de iniciar su texturizado, interactúa con el jefe de pavimentación para que a su vez le dé instrucciones al operador de la pavimentadora, en caso que se presenten problemas en el acabado dejado por la máquina, por problemas en los insertadores de pasajuntas o barras de amarre (en caso de que se utilicen), o por problemas en el acabado del hombro o borde de la losa. El jefe de finishers debe coordinar al personal de herramientas de acabado.

- Operador de Texturizadora – Curadora.- Se encarga del microtexturizado longitudinal con tela de yute, del texturizado transversal y de la aplicación de la membrana de curado. Lo más importante de su trabajo es conocer el momento en el cual debe iniciar su labor, la texturizadora debe ser guiada por el mismo tendido de la línea guía que uso la pavimentadora.

Jefe de Corte y Sello.- El trabajo de corte está a cargo del jefe de corte, el cual se hace acompañar de un grupo de operarios y equipos de corte, que deben tener un continuo suministro de agua. Este grupo también le reporta al jefe de pavimentación. Sobre esto hay que tener en cuenta que contamos con variables como la dureza de los agregados, la calidad de los discos, la potencia de los equipos y el suficiente suministro de agua. En las responsabilidades del jefe de corte está el ensanche de la junta, la limpieza y aplicación del sello.

3.3 CIMBRA FIJA.

En proyectos de tamaños menores, como los proyectos denominados urbanos, en donde la producción del concreto se realiza en las plantas dosificadoras que se tienen instaladas en las ciudades, el procedimiento de construcción de pavimentos que comúnmente se utiliza es el de cimbra fija, apoyados con rodillos y reglas vibratorias para su ejecución. El procedimiento constructivo con estos equipos es prácticamente el mismo y, en general, es muy parecido al de cimbra deslizante, con algunas variantes propiciadas por las diferencias en equipos y por el menor tamaño de las obras.

a) Elaboración de Concreto Hidráulico.

Se recomienda que el concreto sea Premezclado Profesionalmente, de resistencia a la flexión $S'c$ ó Módulo de Ruptura igual a la especificada en el proyecto.

El Revenimiento apropiado para colocación del concreto con cimbra fija es:

- En superficies planas con pendientes ligeras. 10 ± 2 cm
- En superficies con pendientes mayores al 8% 8 ± 1 cm

Es importante garantizar la calidad del concreto y que el suministro sea constante y continuo para mantener la homogeneidad del pavimento, se recomienda que entre el tendido de una olla mezcladora y otra no transcurran mas 25 minutos. aunque, de preferencia, este tiempo debiera ser menor.

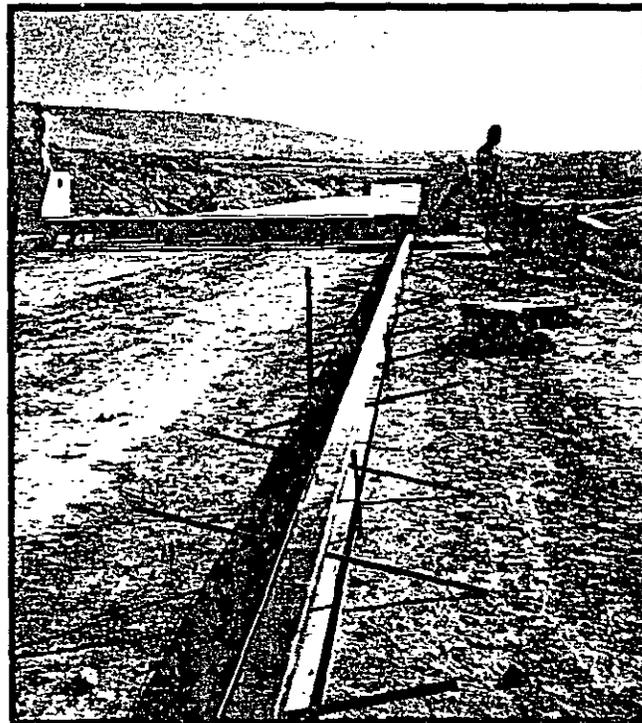
b) Cimbrado del pavimento.

El cimbrado consiste en colocar Montenes metálicos calibre 10 cuyo peralte corresponda con el espesor del pavimento. Estos deberán ser reforzados con soleras @ 30 cm. para darle rigidez. La colocación de la cimbra deberá ir siguiendo el alineamiento y niveles que nos indique la brigada de topografía; se sujetan con troqueles de varilla #3 a #5 cuya longitud mínima es igual al doble del espesor del pavimento y se colocan @ 1.0 m aproximadamente. Es conveniente revisar los niveles de la cimbra con topografo después de colocada la misma. para garantizar un buen perfil longitudinal del pavimento. Se debiera de contar con una cantidad suficiente de tramos de cimbra para alcanzar avances significativos de colado continuo durante varias jornadas de trabajo.

La cimbra debiera realizarse en franjas previamente establecidas para mantener las condiciones de igualdad superficial entre losa y losa.



Colado con Cimbra Fija.



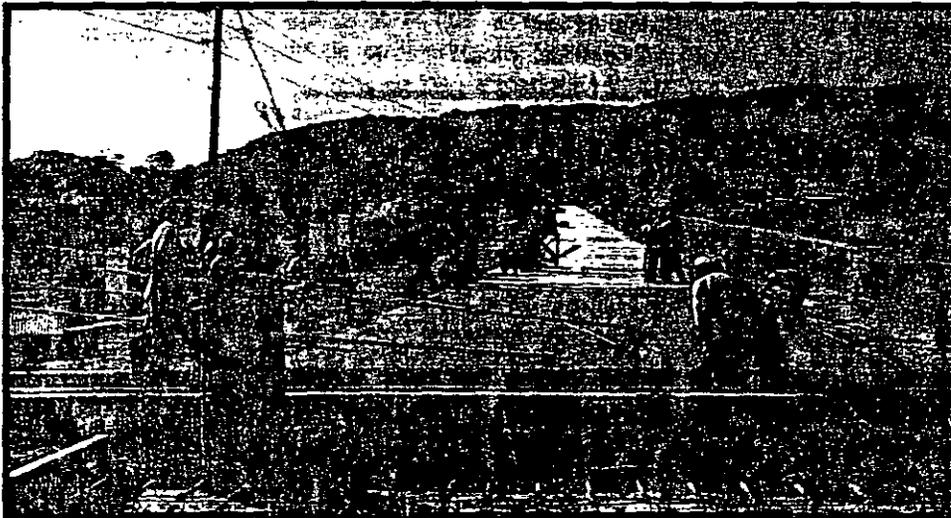
Cimbra metálica.

c) Colado del pavimento.

El concreto se que se mezcla en oílas revolvedoras se vacía sobre la sub-base y se esparce a todo lo ancho del pavimento a paleo manual. Debera limpiarse y humedecerse previamente la superficie que recibe al concreto para evitar que se absorba el agua de la mezcla. Se deberán colar franjas longitudinales correspondientes a un día de pavimentación.

Barras de Amarre.- En las juntas que muestre el proyecto y/o en los sitios que indique el Supervisor, se colocarán barras de amarre, para evitar el corrimiento o desplazamiento de las franjas de losas. Las barras serán corrugadas, de acero estructural con un límite de fluencia (F_y) de cuatro mil doscientos (4200) kilogramos por centímetro cuadrado, debiendo quedar ahogadas en las losas a la mitad del espesor y en la posición indicada en el proyecto. Todas las barras corrugadas deberán protegerse contra la corrosión si es que los estudios climatológicos y químicos del lugar demuestran que puede presentarse este fenómeno. Las barras de amarre se colocan en las juntas longitudinales, independientemente de si son juntas frías o de corte: el diámetro, longitud y separación serán los mostrados en el proyecto.

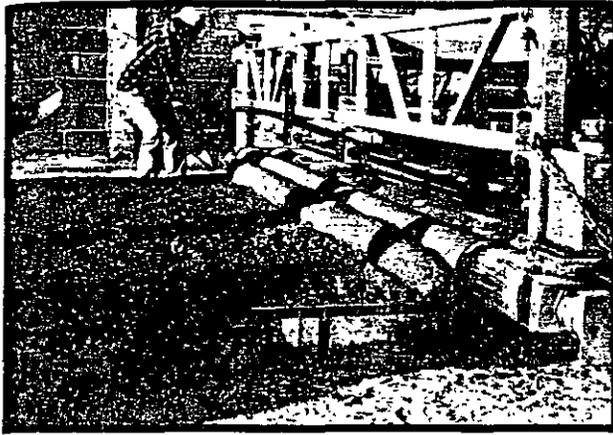
Pasajuntas.- En el caso de que el proyecto considere la colocación de barras pasajuntas en las juntas de contracción transversales, estas se colocaran perfectamente alineadas al sentido longitudinal del pavimento y a la mitad del espesor. La función de estas barras es la de garantizar una efectiva transferencia de fuerzas cortantes en losas adyacentes, permitiendo el libre movimiento de las franjas de losas en el sentido longitudinal. Las barras serán lisas, de acero estructural con un límite de fluencia (F_y) de cuatro mil doscientos (4200) kilogramos por centímetro cuadrado, debiendo estar engrasadas en toda su longitud para evitar que se adhieran al concreto. Las barras pasajuntas se colocan en las juntas transversales de contracción cuando así están especificadas en el diseño, sin embargo deberán colocarse en todas las juntas transversales de construcción para garantizar la transferencia de cargas entre colados de días distintos.



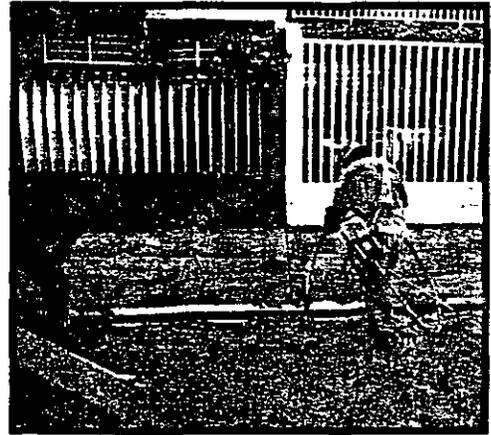
Colado y colocación de pavimento.

d) Vibrado y perfilado.

Una vez colocado el concreto se deberá acomodar en las orillas cercanas a la cimbra utilizando un vibrador manual, posteriormente se pasa la regla o el rodillo vibratorio que le dan el vibrado final a la masa del concreto, si en el proyecto se especificaron barras de amarre estas deberán colocarse en los lugares especificados en proyecto inmediatamente antes de que pase la regla ó el rodillo, en los con ayuda de un escantillon para colocarlas exactamente a la mitad del espesor. Después de pasado el rodillo debera utilizarse una flotadora de aluminio o magnesio en sentido transversal para dar el perfilado definitivo al pavimento.



Vibrado con rodillos.

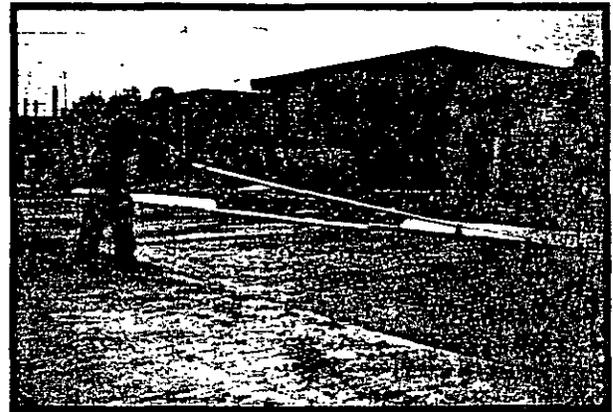


Vibrador de inmersión en bordes.

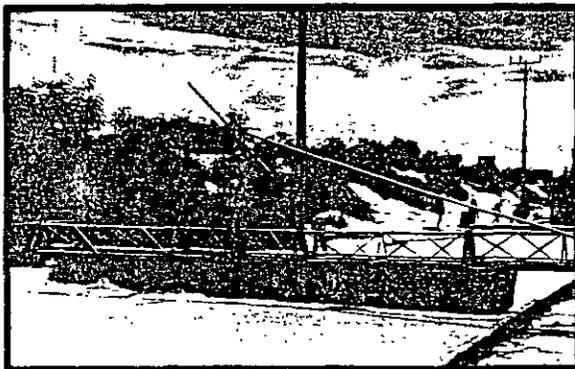
e) Microtexturizado longitudinal.

El acabado superficial longitudinal del concreto recién colado podrá realizarse después de la aplicación de las flotadoras mecánicas, mediante el arrastre de tela de yute húmeda o pasto sintético en sentido longitudinal del pavimento.

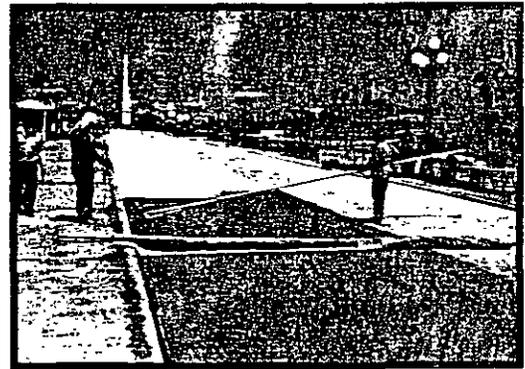
Este proceso se puede realizar, para este tipo de pavimentos, de manera muy sencilla y en forma prácticamente manual, se fija perfectamente la tela de yute a un tubo o solera que mida un poco más que el ancho de pavimentación, se humedece y se arrastra en sentido longitudinal con el apoyo de 2 personas, uno a cada lado del pavimento.



Perfilado y flotado de superficie.



Microtexturizado con puente.



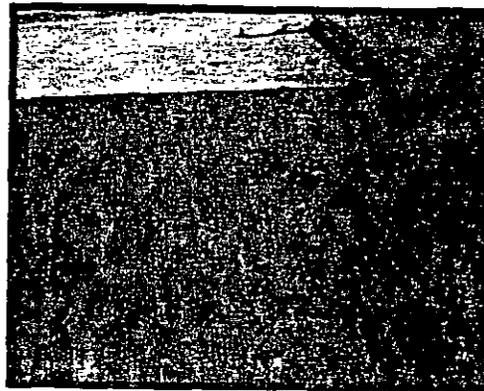
Microtexturizado manual.

f) Macrotexturizado transversal.

Posteriormente se realiza el texturizado transversal mediante una rastra de alambre en forma de peine, con una separación entre dientes de acuerdo con la especificación del proyecto, con una profundidad entre los 3.0 mm y los 6.0 mm a todo lo ancho de la superficie pavimentada. Esta operación se realizará cuando el concreto este tan plástico como para permitir el texturizado pero lo suficientemente seco para evitar que el concreto fluya hacia los surcos, que pudieran cerrarse perdiendo su funcionalidad.

Durante el tiempo de endurecimiento del concreto, debera protegerse la superficie de las losas contra fenómenos climáticos, de herramientas y/o del paso de equipo o seres vivos.

Texturizado manual.

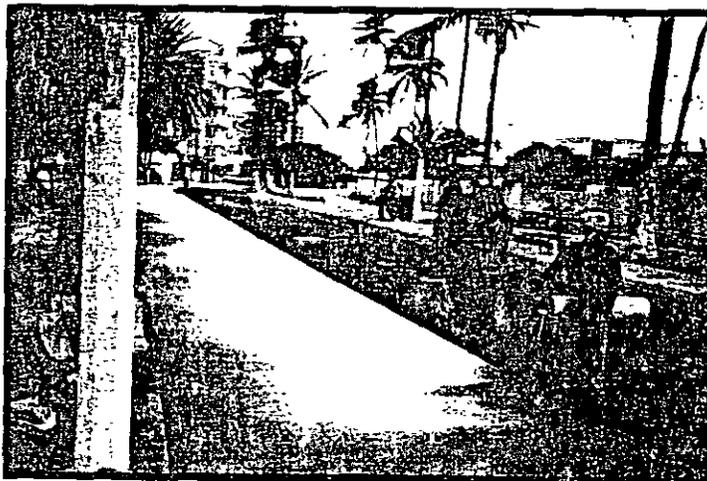


Pavimento texturizado.

g) Aplicación de membrana de curado.

El curado debera hacerse inmediatamente después del texturizado transversal, cuando el concreto empiece a perder su brillo superficial. Esta condicion se efectua aplicando en la superficie una membrana de curado en la cantidad adecuada, obteniendo asi, un espesor uniforme, que deje una membrana impermeable y consistente y que evite la evaporación del agua que contiene la mezcla de concreto fresco. Su aplicación debera hacerse preferentemente con aspersores manuales de irrigadores a presión.

El espesor de la membrana se fijará de acuerdo con las características del producto que se utilice y debera garantizar su integridad, cubrimiento de la losa y cumplimiento de las especificaciones del fabricante de la membrana de curado. Las membranas de curado que se aplican adecuadamente cubren perfectamente toda la superficie del concreto dejando una película de color blanco que minimiza el aumento en la temperatura de la superficie del concreto



Aplicación de membrana de curado.

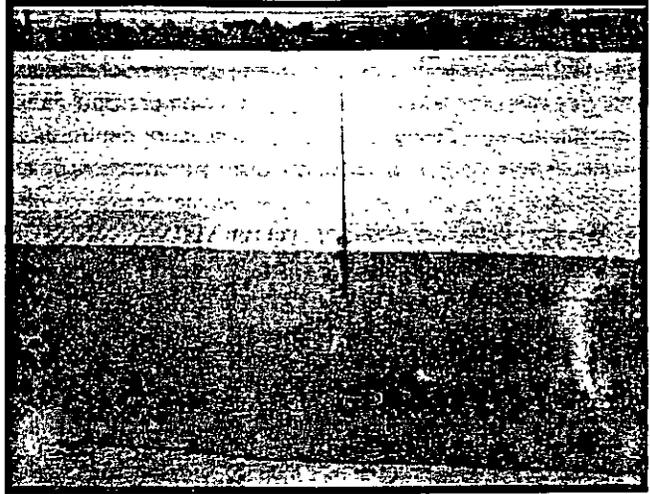
El proceso de curado es importantísimo para la obtención de resistencias, ya que todo concreto, si no se cura adecuadamente puede dejar de ganar hasta el 50% de la resistencia especificada

h) Formación de juntas.

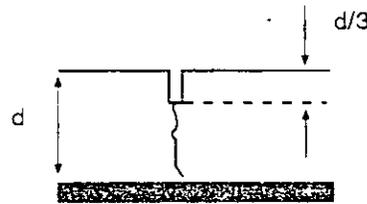
El concreto se contrae durante su etapa de fraguado y por estar apoyado sobre toda una superficie fija, se generan esfuerzos de tension que a su vez producen agrietamientos. La función de realizar juntas de contracción cortadas con disco es para indicarle al concreto la ruta que deben de seguir sus agrietamientos por contracción y evitar que se propaguen en cualquier dirección

Las juntas de contracción se realizan con equipo de corte con discos de diamante cuando el concreto tiene un cierto grado de endurecimiento y las contracciones son inferiores a aquellas que causan el agrietamiento (4 a 6 hrs. aproximadamente).

Después del curado de las losas se procederá al corte de las juntas transversales y longitudinales con discos con punta de diamante. Este corte deberá realizarse cuando el concreto presente ciertas características de endurecimiento; las juntas de contracción se realizan con equipo de corte con discos de diamante cuando el concreto tiene un cierto grado de endurecimiento y las contracciones son inferiores a aquellas que causan el agrietamiento (4 a 6 hrs. aproximadamente). Las cortadoras utilizadas en este tipo de proyectos deberán ser autopropulsadas y con una potencia que esté entre los 20 HP y los 40 HP. Las juntas deberán ajustarse a las dimensiones y características descritas en el proyecto.

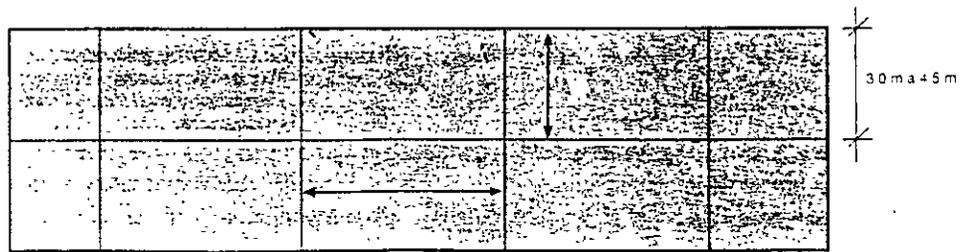


Los cortes deben realizarse a una profundidad de un tercio del espesor. No debe cortarse toda la profundidad de la losa ó todo su espesor. Cortar la parte superior le permite que en la parte inferior se genere una grieta que le permite transmitir fuerzas cortantes por la trabazón que existe en los agregados del concreto, entre una losa y otra.



La relación de Largo / Ancho de las losas debe estar entre los límites de 0.71 a 1.4, relaciones mayores originan que se generen grietas en la mitad de las losas.

Deberá realizarse un primer corte para garantizar la inducción adecuada de las grietas de



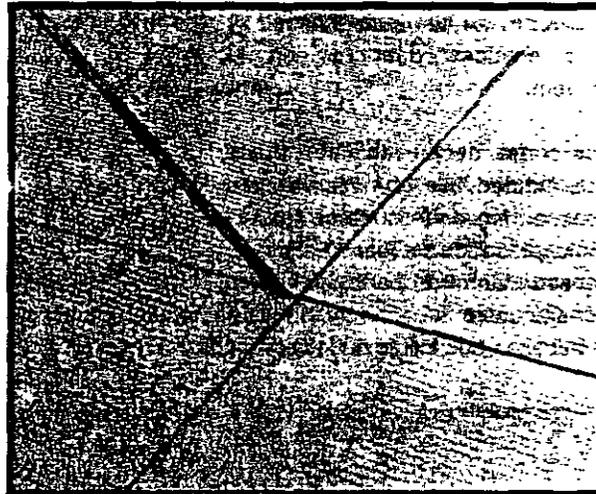
$$x/y = 0.71 \text{ a } 1.4$$

contracción, con un ancho de 3 mm (1/8 de pulgada) utilizando un solo disco de corte y cortando a una profundidad de un tercio del espesor. Posteriormente se deberá hacer el ensanche de las juntas a 6 mm (1/4 de pulgada) utilizando para esto dos discos de corte empalmados y la profundidad de este corte sera menor de un tercio del espesor y estará regida por el factor de forma que se le vaya a dar al sellador de las juntas.

i) Limpieza y sello de juntas.

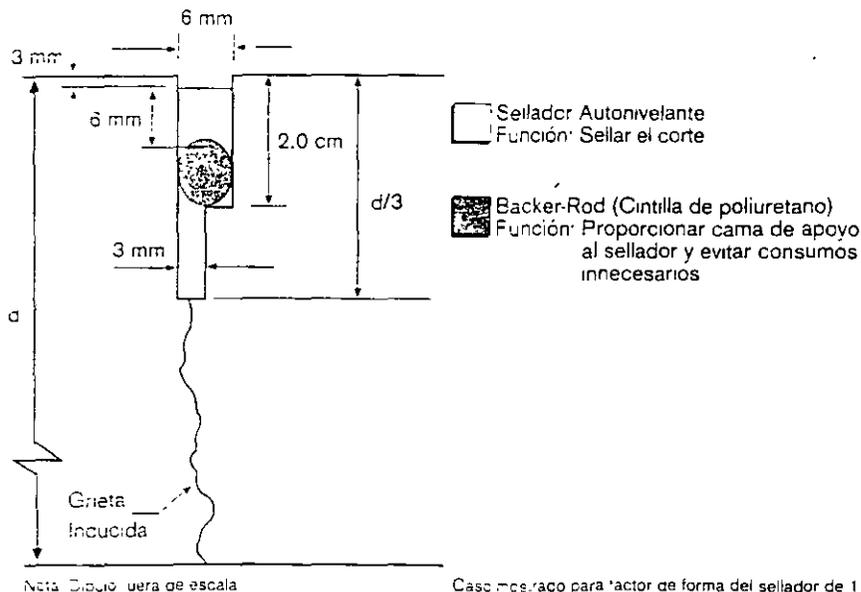
La limpieza de juntas se hará con agua a presión y apoyados con una rastra para dejar perfectamente limpia de material la totalidad de la junta, posteriormente se realizara el secado de la junta con aire a presión, una vez seca y perfectamente libre de polvo en sus paredes, se procederá a colocar una cintilla de respaldo (Backer Rod) cuya función principal es la de minimizar la utilización del sellador. e inmediatamente despues se coloca el sellador dentro de la junta respetando las indicaciones del fabricante en cuanto a su factor de forma y modo de aplicación.

Es importante que el sellador sea un material autonivelante, de un solo componente, elástico, resistente a los efectos de combustibles y aceites automotrices, con propiedades adherentes al concreto y que permita las dilataciones y contracciones que se presenten en las losas sin agrietarse, y que solidifique a temperatura ambiente. Es necesario que la superficie del sellador se aloje por debajo de la superficie de rodamiento entre 3 mm y 6 mm con el fin de evitar que entre en contacto con los neumaticos de los vehiculos y se pueda deteriorar.



Sello de Junta.

La función del sellador es la de evitar que partículas incompresibles (piedras) penetren en la junta y puedan generar despostilladuras en los bordes de las losas debido al movimiento de las mismas. Otra función es la de impedir que el agua de la superficie pueda penetrar a la estructura de soporte y evitar problemas de expulsión de finos, pérdida de soporte y reducción de resistencia del material de sub-base.



3.4 PAVIMENTOS DE CONCRETO ESTAMPADO.

a) Preliminares.

El Especificador deberá garantizar la calidad de los materiales químicos necesarios para el pavimento estampado.

Las actividades preliminares a la colocación del pavimento estampado, como el diseño y especificaciones de construcción de la estructura soporte, espesores, niveles, calidades y tipo de concreto hidráulico, espaciamiento y tipo de juntas, etc., deberá seguirse de acuerdo a las especificaciones generales mencionadas en este manual y deberán responder a las pruebas de control de calidad, aceptación y supervisión, realizadas por la entidad responsable según los alcances establecidos.

Una vez garantizado lo anterior se podrá proceder a la iniciación de las actividades propias del pavimento estampado. Será conveniente realizar muestras de las figuras, colores y desmoldante elegidos según la especificación, los cuales se deberán autorizar por el Supervisor para poder proceder con la ejecución.

b) Instalación del pavimento estampado.

b)1 Aplicación de Colorante - Endurecedor.

Asegúrese de que las áreas adyacentes se encuentren protegidas, luego emplee el siguiente procedimiento:

- Vacíe el concreto con el espesor indicado en el proyecto estructural, vibre y garantice su perfecta colocación
- Utilice las herramientas de terminado adecuadas (llanas de fierro, magnesio y aluminio) y despegue todos bordes que se pegan a la formaleta con una ribeteadora o volteador.
- Proceda a la apertura de las latas de colorante endurecedor, las cuales tienen un peso aproximado de 60 lbs.
- Una vez que el agua ha desaparecido de la superficie es el tiempo preciso para espolvorear el color - endurecedor, la distribución deberá ser de manera uniforme, rápida y eficiente. requiere dos aplicaciones, la primera deslizando la llana en un sentido para iniciar la integración del color en la superficie y la segunda en sentido perpendicular a la anterior para lograr una completa integración.
- El primer 80% se efectúa después de que el concreto está alisado y uniformizado con la llana, después disperse el otro 20 % para cubrir las partes donde la primera aplicación no cubrió lo suficiente. Pase la llana nuevamente, esta vez cuidando que pase una sola vez por cada parte de la superficie y deslicela suavemente, en caso contrario se corre el riesgo de perder el color, debiendo emplear más color lo cual va en contra de los rendimientos y trabajo, si hay alguna dificultad en correr la llana para homogeneizar el enlucido con el color, ponga un peso en la llana, esto puede ayudarlo a correrla. Nunca utilice agua para integrar el color.

Cuando el concreto está muy blando por exceso de agua, requiere más colorante - endurecedor, pues absorbe el color hacia abajo desapareciéndolo de la superficie. Una vez que el color está en la superficie de la losa, intégrelo lo antes posible. Espere hasta que la losa esté en estado plástico y lista para flotar antes de estampar.

El rendimiento usual de 60 lbs. de colorante - endurecedor es para 9.0 m² de superficie, puede disminuir con algunos colores claros, y otros factores como el viento u otras condiciones, por lo que se recomienda establecer un monitoreo al consumo.

b)2 Desmoldante de color (Release).

El desmoldante es un material especialmente formulado, para dar un efecto de contraste con el color -endurecedor y también evita que los moldes o la piel de textura del estampado se adhieran a la superficie del concreto.

- No aplique el desmoldante hasta que el agua de la superficie haya desaparecido.
- Siempre aplique el desmoldante justo y necesario para evitar que los moldes se peguen al concreto, se usa aproximadamente una caja de 20 lbs. por cada 90 m² de superficie.
- El desmoldante debe distribuirse manualmente con un movimiento de remolino.

Cuando se aplica en forma apropiada, el desmoldante deja una película uniforme; no use excesivo material que deje cúmulos en la superficie. Como es muy volátil, es recomendable aplicarlo a la vez, dos filas o líneas de moldes adelante.

b)3 Equipo y Procedimiento.

Es de vital importancia tener el equipo de trabajo que aplica en el concreto, tanto como conocer el proceso y herramientas para el estampado, dado que estas actividades están muy relacionadas entre sí.

- a) Después que se ha tomado la decisión de dónde comenzar a aplicar el concreto, se debe de decidir donde comenzar a estampar. Es conveniente que se comience a estampar por el mismo lado por donde se comenzó a aplicar el concreto.
- b) Coloque el lado abierto de los moldes con la figura de textura hacia la superficie, luego coloque todos los moldes para el estampado en fila a lo ancho de la losa con los lados abiertos coincidiendo con los cerrados.
- c) Siempre revise que los límites de la losa estén a escuadra y, en el peor de los casos, fije su propia escuadra.
- d) Estampe el primer molde, teniendo precaución de obtener un buen estampado y textura en los bordes y en los perímetros.
- e) Verifique la profundidad del estampado y textura adquirida en la superficie. El desmoldante (Release) muchas veces resalta u oculta visualmente una impresión, para asegurarse de que esta quede bien hecha, cuando retire el molde sopie el desmoldante inicial para observar la calidad de la textura. También puede ocurrir que al retirar el molde se observen áreas húmedas, o donde aparece el color - endurecedor. Ante eso es necesario colocar más desmoldante y volver a colocar el molde.
- f) Coloque cada molde en forma consecutiva. Tome el último molde y colóquelo justo junto del primero. Recuerde que el primer molde es cuadrado, por lo tanto es vital que el último molde sea puesto junto a este para lograr una perfecta alineación. Asegúrese que el lado cerrado del primer molde mire y este alineado con el lado abierto del molde siguiente. Siempre debe coincidir negro de un lado y blanco del otro. Asegúrese también que la altura de los moldes adyacentes sea la misma, de esta manera profundidad de impresión es pareja.
- g) Posteriormente tome el último molde y colóquelo alineado junto al siguiente. Regrese al sitio de donde lo sacó y con la herramienta "S" borre o aplane todos los residuos dejados por las marcas entre los moldes. Asegúrese también que las líneas de textura sean continuas en todos los bordes. En el caso de que la textura o las líneas se pierdan, presione con la "piel de textura" y con la herramienta "S" haga las líneas.
- h) Continúe el proceso hasta que haya finalizado de estampar la losa.

b)4 Corte de juntas de control

Haga las juntas de control por tipo y espaciamiento, según especificaciones, el tratamiento de juntas en una estructura de pavimento de concreto hidráulico estampado deberá ser idéntico al de una de pavimento de concreto hidráulico convencional.

Considere que en algunos casos, en el proceso de colado, podrá y deberá colocar elementos de refuerzo especificados, de juntas de control (pasa juntas y/o barras de amarre).

En juntas frías, es recomendable que éstas coincidan con el molde, para incrementar la calidad del trabajo.

b)5 Limpieza y sellado de superficie.

Después de 24 horas o al día siguiente de colado el elemento estampado, puede retirar el desmoldante y lavar la superficie.

- a) Lave el exceso de desmoldante y retire el plástico empleado para proteger las estructuras adyacentes.
- b) Lave toda la superficie con una solución de agua y ácido muriático en proporción 1:10 (diez partes de agua por una de ácido). Escobille bien la superficie, cuidando no retirar el desmoldante de las boquillas, pues se busca una apariencia natural, y luego enjuague cuidadosamente con abundante agua.
- c) Cuide no dejar ningún área oscura que pueda desmerecer el aspecto final del trabajo.
- d) Pula y afile las líneas de concreto excedente producto del movimiento de moldes. Este trabajo podrá realizarse con un esmeril convencional.
- e) Previa a la aplicación del sellador, con la finalidad de eliminar el polvo que pudiera haber en el piso, es recomendable soplar la superficie con compresor. La manera más eficiente de aplicar el sellador, es hacerlo con rodillo. Asegúrese de que no queden marcas del rodillo, y selle la mayor superficie posible de una sola vez para evitar diferencias visibles en tono.
- f) Una vez que la superficie esté seca por lo menos 48 Hrs., debe aplicarse el sellador transparente (clear seal).

b)6 Sellado de juntas de control.

Por tratarse de un pavimento de concreto hidráulico, las juntas de expansión y contracción deberán ser selladas con un producto propio para ese fin, para evitar posible debilitación de la estructura de soporte.

Existen productos base silicón los cuales tienen pigmentos similares a los elegidos en el pavimento de concreto. Es recomendable la utilización de éstos en el sello de juntas para conservar la apariencia natural del pavimento estampado.

El sellador deberá ser apoyado sobre una tirilla de respaldo, la cual tendrá como fin evitar el consumo excesivo de sellador y evitar que éste trabaje inadecuadamente.

Estabilización de suelos

XVI-1 INTRODUCCION

Es frecuente que el ingeniero encuentre no adecuados en algún sentido los suelos que ha de utilizar para un determinado fin, en un lugar específico. Este hecho abre obviamente tres posibilidades de decisión (Ref. 1):

— Aceptar el material tal como lo encuentre, pero tomando en cuenta realísimamente su calidad en el diseño efectuado.

— Eliminar el material insatisfactorio o prescindir de usarlo, substituyéndolo por otro de características adecuadas.

— Modificar las propiedades del material existente, para hacerlo capaz de cumplir mejores requerimientos.

La última alternativa da lugar a las técnicas de estabilización de suelos. En rigor son muchos los procedimientos que pueden seguirse para lograr esa mejoría de las propiedades de los suelos, con vistas a hacerlos apropiados para algún uso específico, lo que constituye la estabilización. La siguiente lista de tipos de procedimiento no agota seguramente el tema, aunque reúna los más comunes:

— Estabilización por medios mecánicos, de los que la compactación es el más conocido, pero entre los que las mezclas de suelos se utilizan también muy frecuentemente.

— Estabilización por drenaje, ya suficientemente discutida en este libro.

— Estabilización por medios eléctricos, de los que la electrólisis (Ref. 2) y la utilización de pilotes electrometálicos son probablemente los mejor conocidos.

— Estabilización por empleo de calor y calcinación, también ya mencionada en el Capítulo VI de este libro.

— Estabilización por medios químicos, generalmente lograda por la adición de agentes estabilizantes específicos, como el cemento, la cal, el asfalto u otros.

La gran variabilidad de los suelos y sus composiciones hacen que cada método resulte sólo aplica-

ble a un número limitado de tipos de ellos; en muchas ocasiones, esa variabilidad se manifiesta a lo largo de algunos metros, en tanto que en otras a lo largo de algunos kilómetros, pero en cualquier caso suele ser frecuente que para aplicar un método económicamente hayan de involucrarse varios tipos de suelos, a veces con variaciones de alguna significación, habiendo de renunciar correspondientemente al empleo del procedimiento "óptimo" en cada clase.

Desde un principio tiene que reconocerse que la estabilización no es una herramienta ventajosa en todos los casos y, desde luego, no es siempre igualmente ventajosa en las situaciones en que pueda resultar conveniente; por consiguiente, habrá que guardar siempre muy claramente en mente el conjunto de propiedades que se desee mejorar y la relación entre lo que se logrará al mejorarlas y el esfuerzo y dinero que en ello haya de invertirse. Sólo balanceando cuidadosamente estos factores podrá llegarse a un correcto empleo de la estabilización de suelos.

Las propiedades de los suelos que más frecuentemente se estudian en problemas de estabilización son:

- Estabilidad volumétrica
- Resistencia
- Permeabilidad
- Compresibilidad
- Durabilidad

Frecuentemente será posible utilizar tratamientos que mejoren simultáneamente varias de esas propiedades, pero también debe estarse preparado a encontrar evoluciones contradictorias en la lista, de manera que el mejoramiento de una propiedad signifique el deterioro de otra u otras. No debe verse a la estabilización sólo como una medida correctiva; algunos de los mejores usos de estas técnicas representan más bien medidas preventivas contra condiciones adversas susceptibles de ulterior desarrollo. A continuación se insiste un poco sobre

las propiedades de los suelos más susceptibles de ser mejoradas por estabilización.

1) *Estabilidad volumétrica*

La expresión se refiere por lo general a los problemas relacionados con los suelos expansivos por cambio de humedad, relacionado con variaciones estacionales o con la actividad del ingeniero. La estabilización suele ofrecer una alternativa de tratamiento para estos suelos, diferente del uso de cargas, capas permeables, introducción de agua, etc., que forman la gama de líneas de acción más usual y que han sido comentadas en otras partes de este libro. Se trata de transformar la masa de arcilla expansiva bien sea en una masa rígida o en una granulada, con sus partículas unidas por lazos suficientemente fuertes como para resistir las presiones internas de expansión. Esto se logra por tratamientos químicos o térmicos, del tipo de los que serán someramente descritos en páginas posteriores de este mismo Capítulo; la experiencia, muy orientada por factores económicos, ha demostrado que los tratamientos químicos son útiles sobre todo para arcillas ubicadas cerca de la superficie del terreno, en tanto que los tratamientos térmicos se han aplicado más bien a arcillas más profundas.

En muchos de los casos de tratamientos de capas superficiales de arcilla expansiva, la economía impone estabilizar solamente la parte superior del manto, en un cierto espesor y ello será suficiente

siempre que se balancee correctamente la presión de expansión que producirá el espesor no tratado

2) *Resistencia*

Existen varios métodos de estabilización que se han revelado útiles para mejorar la resistencia de muchos suelos. Empero antes de profundizar más en este aspecto será preciso decir que todos ellos parecen perder mucho de su poder en el momento en que se tienen importantes contenidos de materia orgánica, circunstancia desafortunada, dado que, como es bien sabido muchos de los más graves problemas de falta de resistencia ocurren precisamente en suelos orgánicos. La Tabla XVI-1 (Ref. 1) da una idea muy precisa de la influencia del contenido de materia orgánica en los efectos de la estabilización en suelos análogos en otros conceptos.

La compactación es de hecho una forma de estabilización mecánica a la que se recurre para incrementar la resistencia de los suelos, como uno de sus objetivos más comunes. Ya se vió en el Capítulo IV de esta obra y en otras partes de la misma, sin embargo, que el empleo de mayores intensidades de compactación no siempre conduce a valores más altos de la resistencia, muy especialmente si se considera la necesidad de mantener dicho parámetro en valores razonables durante tiempos largos. Algu-

Tabla XVI-1

Efecto de la materia orgánica en los resultados de la estabilización (Ref. 1).

Tipo de suelo	Prof.	Contenido de materia orgánica.	Resistencia a la compresión simple a los 7 días (Especímenes compactados al 95% AASHO estandar).		
			kg/cm ²		
—	m	%	Sin estabilizar	Con 10% de cemento	Con 10% de cal
Tierra vegetal	0.45	2.65	3.80	15.50	1.90
Tierra vegetal	1.60	0.22	3.80	36.00	47.00
Arcilla orgánica	0.10	13.70	1.05	1.83	2.25
Arcilla orgánica	0.60	2.50	6.30	20.00	1.83
Arcilla orgánica	0.10	11.70	3.15	7.00	5.60
Arcilla orgánica	0.45	2.00	5.00	20.00	16.20
Arcilla orgánica	0.10	10.30	3.90	4.20	4.90
Arcilla orgánica	0.80	2.40	5.00	41.00	26.80
Tierra superficial	0.10	3.10	3.90	30.00	11.20
Tierra superficial	0.45	1.10	5.00	42.00	22.50

nas de las formas de estabilización más usadas para llevar resistencia son las siguientes:

- Compactación
- Vibroflotación
- Precarga
- Drenaje
- Estabilización mecánica con mezclas de otros suelos.
- Estabilización química con cemento, cal o aditivos líquidos.

Excepto las dos últimas, todas han sido tratadas de una u otra forma en este libro. La estabilización con empleo de calor se ha utilizado también, aunque mucho más raramente.

3) *Permeabilidad*

No suele ser muy difícil modificar substancialmente la permeabilidad de formaciones de suelo por métodos tales como la compactación, la inyección, etc. En materiales arcillosos, el uso de defloculantes (por ejemplo, polifosfatos) puede reducir la permeabilidad también significativamente; el uso de floculantes (muchas veces hidróxido de cal o yeso) aumenta correspondientemente el valor de la permeabilidad. En la actualidad se va disponiendo de algunas sustancias que introducidas en el suelo en forma de emulsión pueden reducir mucho su permeabilidad, si bien el uso de estas sustancias ha de ser cuidadosamente analizado, pues no es raro que ejerzan efectos desfavorables en la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.

En términos generales, y eliminando la estabilización mecánica, los métodos de estabilización para influir en la permeabilidad de los suelos suelen estar bastante desligados de los métodos con los que se busca variar la estabilidad volumétrica o la resistencia.

4) *Compresibilidad*

La compactación es una forma rutinaria de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad de los suelos; al respecto se ha incluido alguna información en el Capítulo IV de este libro. Sin embargo, la compactación no es la única forma de estabilización que influye en la compresibilidad y, de hecho, puede decirse que todos los métodos de estabilización mencionados en páginas anteriores de este Capítulo tienen influencia en dicho concepto.

5) *Durabilidad*

Suelen involucrarse en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico; de esta manera, los problemas de durabilidad en las

vías terrestres suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento. En rigor, estos problemas pueden afectar tanto a los suelos naturales como a los estabilizados, si bien en estos últimos los peores comportamientos suelen ser consecuencia de diseños inadecuados, tales como una mala elección del agente estabilizador o un serio error en su uso, tal como podría ser el caso cuando se ignora la bien conocida susceptibilidad de los suelos arcillosos estabilizados con cemento a la presencia de sulfatos (Refs. 1 y 3).

En la práctica actual se echan de menos criterios de campo o de laboratorio que permitan establecer con seguridad cuál va a ser la durabilidad de un suelo estabilizado y éste es un motivo que contribuye poderosamente a que el concepto durabilidad sea hoy de los más difíciles de analizar, por lo menos cuantativamente.

Ya de la somera información dada hasta el momento destaca la multiplicidad de objetivos que puede tener la estabilización de suelos; ha de insistirse en que con cierta frecuencia esos objetivos podrán ser contradictorios, en el sentido de que la técnica de estabilización que mejore uno podría perjudicar a otro. También destaca el elevado número de métodos de estabilización que la actual tecnología ha ido desarrollando. Si a este panorama se une la escasez de investigación que se deja sentir en este campo y las muchas incertidumbres que se plantean en él, en cuanto al comportamiento a corto y, sobre todo, a largo plazo en los materiales estabilizados, no será difícil comprender que existan muchas dudas en torno a estos tópicos. Esto se traduce en preferencias por uno u otro método no siempre bien fundadas; no es difícil ver que en la técnica de un país algunos métodos han llegado a ser rutina de construcción, en tanto otros no se usan nunca, mientras que en otro país, quizá igualmente tecnificado, se confía mucho en alguno de estos últimos métodos y se rechaza alguno de los primeros.

A despecho de lo anterior, algunos métodos de estabilización van imponiéndose en forma general. Dejando a un lado los de estabilización mecánica, que se han impuesto en todas partes, los métodos de estabilización química con cemento, cal y asfalto aparecen cada día más y más en las técnicas constructivas de las vías terrestres en todo el mundo, especialmente en asuntos ligados con la tecnología de los pavimentos.

Huelga decir que algunos de los métodos de estabilización que se han mencionado anteriormente tienen también extenso uso en las vías terrestres, como sucede con el drenaje, la precarga, etc. o en otros campos, tal como es el caso de los métodos de estabilización eléctrica en la técnica de cimentaciones.

XVI-2 ALGUNAS IDEAS EN TORNO A IDENTIFICACION DE SUELOS CON FINES DE ESTABILIZACION.

Como es sabido, el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Capítulo II) tiene un uso casi universal en el momento presente, para el manejo de estos materiales en la tecnología de la vías terrestres. Sin embargo, es un hecho que ignora o, por lo menos, no destaca suficientemente algunas características de los suelos que tienen una importancia especial en los problemas de estabilización, sobre todo química. Algunos de estos factores no suficientemente tomados en cuenta por el sistema

son la composición mineralógica, la permeabilidad, la influencia de condiciones locales, tales como clima o vegetación y la historia geológica previa, especialmente en lo que se refiere a suelos finos. Es por eso que al afrontar problemas de estabilización de suelos suele ser necesario complementar la clasificación que proporciona el Sistema Unificado con alguna información adicional referente a estos aspectos. De hecho, algunos autores han extremado estas tendencias, al grado de que han desarrollado sistemas específicos y completos de clasificación de suelos con vistas a su estabilización. Las Refs. 1, 4 y 5 mencionan algunos esfuerzos en este sentido. Independientemente de que se logre una mejor ubi-

Tabla XVI-2 (Ref. 1)

Información cualitativa sobre composición mineralógica a partir de la observación del perfil de suelos	<i>Componentes mineralógicos posiblemente dominantes</i>
<i>Perfil observado</i>	
Arcillas jaspeadas, con coloraciones rojo, naranja o blanco.	Caolinitas
Arcillas jaspeadas, con coloraciones amarillas, naranja o gris.	Montmorilonitas
Arcillas negras o gris oscuro.	Montmorilonitas
Arcillas café y café-rojizas.	Ilitas o con algo de montmorilonita.
Arcillas blancas o gris claro.	Caolinitas y bauxitas
Suelos micáceos	Micas
Cristales pequeños, fácilmente disgregables.	Yesos
Nódulos suaves, disseminados y solubles en ácido.	Carbonatos.
Nódulos duros, café-rojizo	Minerales de hierro, lateritas
Agrietamiento intenso, ancho, profundo y espaciado (5 ó 6 cm o menos)	Ilitas ricas en calcio o montmorilonitas.
Igual que el anterior, pero con las grietas espaciadas 30 cm. ó más.	Ilitas.
Suelos disgregables, de textura abierta y con apreciable contenido de arcilla.	Generalmente carbonatos y caolín. Nunca Montmorilonita y rara vez Iilita.
Suelos disgregables, de textura abierta, negros y con apreciable contenido de arcilla.	Suelos orgánicos. Turbas
Suelos disgregables, de textura abierta, con bajo contenido de arcilla.	Carbonatos. Arenas y limos.
Suelos de apariencia rugosa cuando presentan superficies expuestas al intemperismo.	Montmorilonita. Salinidad.
Horizontes delgados de suelos blancuzcos, a menos de 60 cm. de la superficie.	Sobre los horizontes blancuzcos limos finos. Abajo, arcillas inestables. Probablemente pueden existir aguas suspendidas en los horizontes blancuzcos.

cación de los problemas de estabilización con un sistema de clasificación especialmente concebido para ellos, el introducirlo establece un cierto elemento de confusión y ataca la esencia misma de las ventajas de utilizar un sistema de clasificación de suelos como marco común de referencia. Los autores de este libro confiesan no ser partidarios del uso de un sistema de clasificación para cada tema, por completo que fuere y por útil que resulte para ese tema; prefieren un sistema de uso general, aún a sabiendas de que podrá resultar escaso en su utilización en algunos campos concretos. En este último caso, piensan que lo más conveniente es complementar el sistema de clasificación de uso general con la información pertinente.

En las páginas siguientes se presentan algunas ideas que pueden permitir reconocer algo de la composición de los suelos que el ingeniero de vías terrestres encuentra en sus obras y que pueden servirle para complementar la información obtenida de una clasificación dentro del Sistema Unificado. La Tabla XVI-2 (Ref. 1) proporciona algunas inferencias que puedan hacerse del análisis del perfil que se obtenga.

La Tabla XVI-3, también extraída de la Ref. 1 proporciona algunas indicaciones en cuanto a posibilidades de estabilización de diferentes materiales comunes.

Finalmente, la Tabla XVI-4 (Ref. 1) proporciona indicaciones en torno a la respuesta típica de algunos minerales importantes a los diferentes métodos de estabilización.

La saturación o no saturación de los suelos tiene importantes implicaciones en su estabilización. Los suelos finos saturados pueden manejarse convenientemente con cal, pero pueden ser muy inapropiados para tratamientos asfálticos o con emulsiones, pues los primeros pueden no penetrar o tener

serios problemas de adherencia, en tanto que las emulsiones tienen rompimientos no controlados; las resistencias adquiridas por estabilización con cemento suelen ser bastante menores que en los mismos suelos más secos. En los suelos finos no saturados puede haber respuestas muy favorables al uso de cal o cemento, pero la incorporación homogénea del agua llega a ser tan importante como la del mismo estabilizante.

XVI-3 ESTABILIZACION MECANICA.

En este párrafo se tratará exclusivamente el caso de estabilización de suelos por mezcla con otros, dejando a un lado, por haber sido analizada con anterioridad la más común y rutinaria forma de tratamiento mecánico, que es la compactación.

La estabilización por mezcla se hace remontar usualmente a la segunda década del presente siglo (Ref. 6), ocurriendo en los E.U.A los primeros trabajos en los que se usó con plena conciencia de sus objetivos. Los nombres de algunos ilustres pioneros de la Mecánica de Suelos, como Terzaghi, Casagrande y Hogentogler no son ajenos a los desarrollos más pioneros de estas técnicas.

Cuando se diseñan mezclas de suelos, para lograr con ellas unas determinadas propiedades deseables, la granulometría suele ser el requisito más relevante en la fracción gruesa, en tanto que la plasticidad lo es, naturalmente, en la fina.

El tamaño máximo de las partículas de la mezcla tiene importancia, puesto que tamaños demasiado grandes son difíciles de trabajar y producen superficies muy rugosas; una proporción demasiado grande de tamaños gruesos conduce a mezclas muy segregables. La presencia de contenidos importantes de materiales finos, menores que la malla 40, hace difícil lograr buenas características de resistencia y de deformabilidad, además de que puede

Tabla XVI-3 (Ref. 1)

Problemas típicos y posibilidades de estabilización de algunos suelos comunes

Tipo de suelo

Suelos arenosos

Suelos limosos con algo de arcilla.

Suelos limosos con muy poca o ninguna arcilla.

Suelos arcillosos agrietados.

Suelos arcillosos no agrietados y de textura abierta.

Arcillas suaves.

Problemas y medios de estabilización usuales

Cuando la granulometría es uniforme puede convenir la estabilización con mezcla de otros suelos. Las arenas limpias pueden mejorar sus características con cemento o asfalto.

En general, el único tratamiento económico al que son susceptibles es la compactación.

No existen tratamientos económicos. Debe evitarse su uso en superficies expuestas, por los polvos que producen cuando se secan.

Responden a la estabilización con cal.

Responden muy bien a la compactación.

Susceptibles a la estabilización con cal.

Tabla XVI-4 (Ref. 1)

Respuesta de algunos minerales típicos a los diferentes métodos de estabilización.

<i>Mineral o componente del suelo típico</i>	<i>Estabilización recomendable</i>	<i>Finalidad</i>
Materia orgánica	Estabilización mecánica	Los demás métodos no son efectivos.
Arenas	Mezcla con materiales finos no plásticos.	Para estabilidad mecánica.
	Cemento	Para incrementar resistencia
	Asfalto	Para adquirir cohesión.
Limos	No responden a los métodos de estabilización en uso.	_____
Alófanos	Cal o mezclas de cal y yeso	Para incrementar la resistencia.
Caolín	Arena	Para estabilidad mecánica
	Cemento.	Para incrementar resistencia a corto plazo.
	Cal	Para mejorar trabajabilidad y adquirir resistencia a largo plazo.
Ilita	Cemento	Para incrementar resistencia a corto plazo.
	Cal.	Para mejorar trabajabilidad y adquirir resistencia a largo plazo.
Montmorilonita	Cal.	Para mejorar trabajabilidad y adquirir resistencia a corto plazo.
Clorita	Cemento	Aún no hay experiencia concluyente sobre los efectos de esta estabilización.

conducir a superficies demasiado lisas y fangosas, cuando están húmedas y pulverulentas, cuando están secas.

La Ref. 7 contiene un estudio de laboratorio realizado para cuantificar el efecto de la incorporación de finos (material menor que la malla No. 200) a los triturados pétreos que suelen disponerse como materiales de base de pavimento; sobre esta incorporación se hicieron algunos comentarios de carácter puramente cualitativo en el Capítulo IX de este mismo libro. En el caso de la investigación que se comenta, a una matriz constituida por un basalto triturado en planta a tamaño máximo de 3.8 cm (1 1/2"), se le añadieron porcentajes variables, comprendidos entre 5 y 20% de un material fino relativamente inerte (*CL-ML*), de una caolinita y de una bentonita comercial. En el trabajo se estudiaron los efectos de estos finos en el comportamiento de las mezclas obtenidas en cuanto a resistencia triaxial, relación esfuerzo-deformación y valor relativo soporte.

La Fig. XVI-1 muestra el efecto de los finos en

la resistencia máxima obtenida en diferentes especímenes, formados por compactación dinámica (energía correspondiente al método de compactación preconizado por el Departamento de Carreteras del Estado de Texas, E.U.A.) (Ref. 8) y posteriormente dejados en situaciones de absorber agua. Se presentan las resistencias máximas medidas en la cámara triaxial de Texas, mencionada en el Capítulo IX y correspondientes a una deformación unitaria de la muestra de 2.5 %. Las curvas corresponden a mezclas con *CL-ML* y con bentonita.

Se ve de inmediato el efecto de la plasticidad de los finos, aunque resulta notable la menor influencia de los finos menos plásticos.

La Fig. XVI-2 (Ref. 7) se refiere al comportamiento esfuerzo-deformación de las mezclas de los mismos materiales, cuyos especímenes se dejaron en contacto con agua para que la absorbieran libremente. Las curvas que se presentan se obtuvieron con una presión de confinamiento en la cámara triaxial de 0.7 kg/cm².

- o $\sigma_3 = 0$
- x $\sigma_3 = 0.35 \text{ Kg/cm}^2$
- o $\sigma_3 = 0.70 \text{ Kg/cm}^2$
- Δ $\sigma_3 = 1.05 \text{ Kg/cm}^2$
- \square $\sigma_3 = 1.41 \text{ Kg/cm}^2$

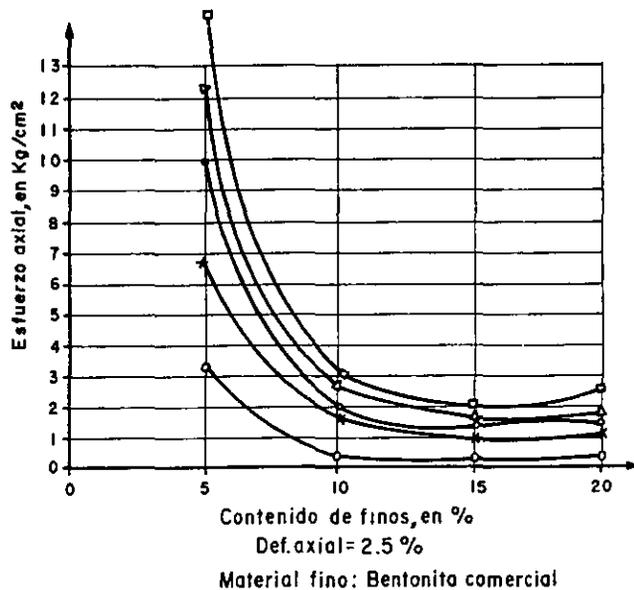
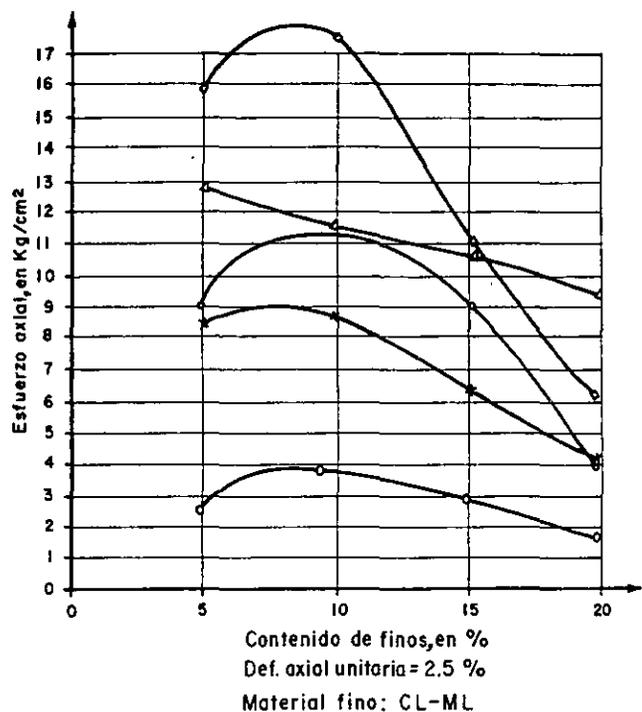


Figura XVI-1. Efecto de la inclusión de finos en la resistencia en una matriz de material triturado. (Ref. 7)

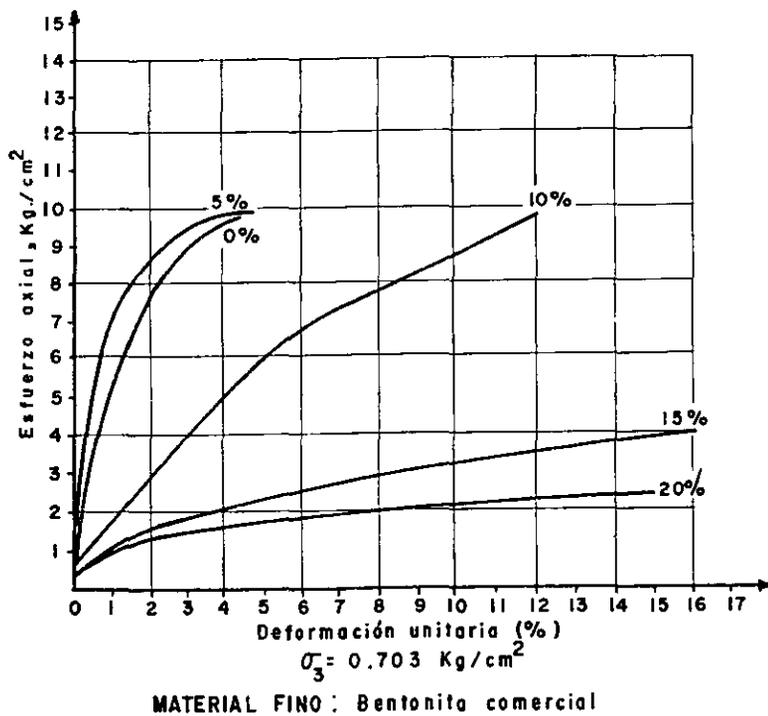
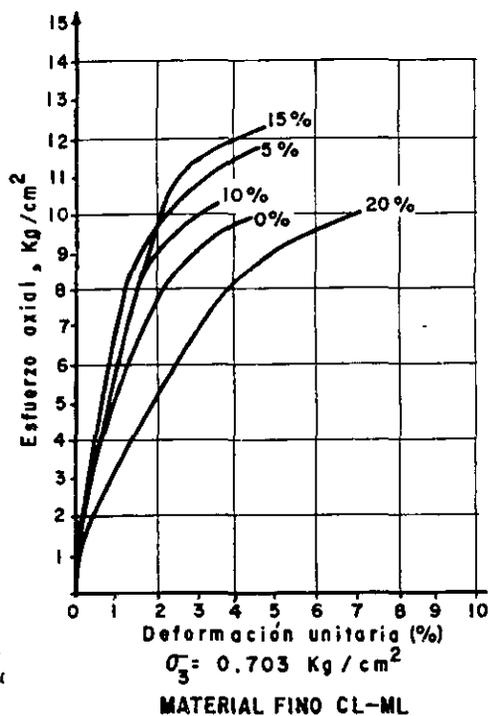


Figura XVI-2. Efecto de la inclusión de finos en la relación esfuerzo-deformación de una matriz de material triturado. (Ref. 7)

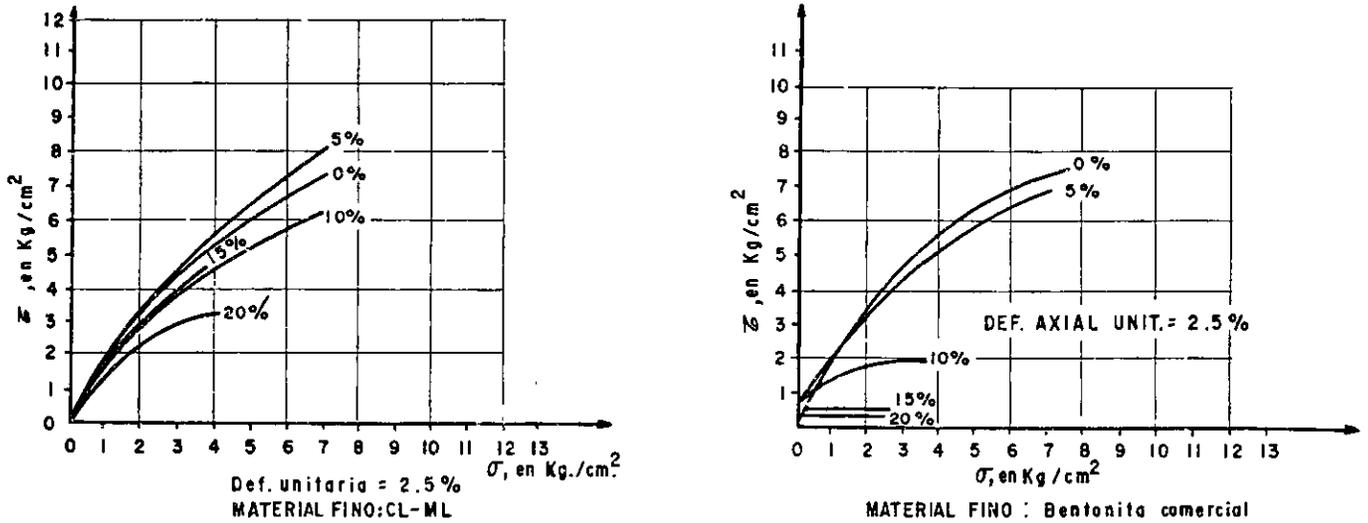


Figura XVI-3. Envolventes de resistencia de diferentes mezclas de una matriz de material triturado, con diferentes porcentajes. (Ref. 7)

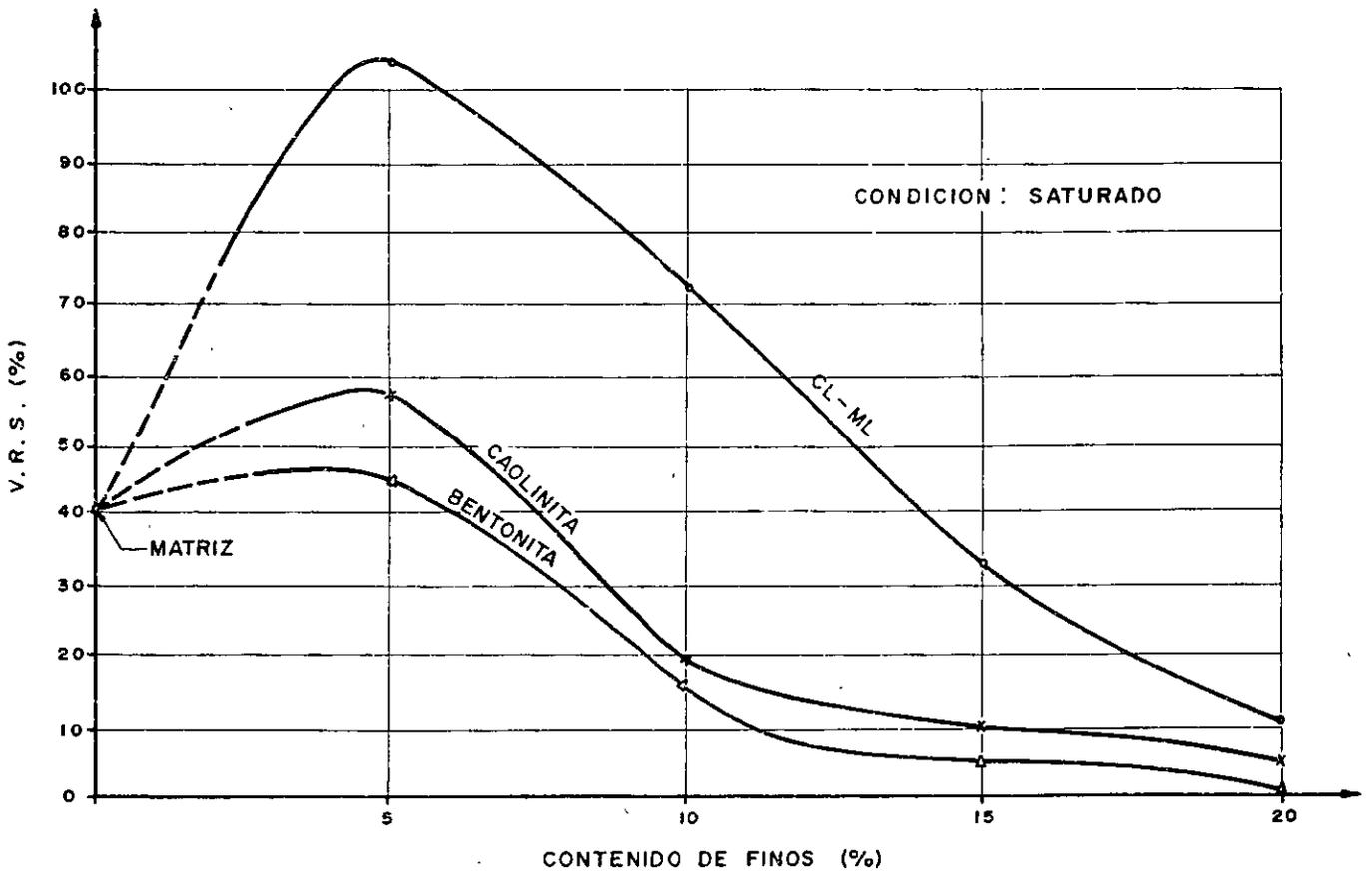


Figura XVI-4. Efecto del porcentaje de finos en el V. R. S. de las mezclas. (Ref. 7)

La influencia de la actividad de los finos en la deformabilidad de la mezcla es sobresaliente; los finos más inertes ejercen un efecto relativamente moderado en el comportamiento esfuerzo-deformación de las mezclas, pero esta situación cambia drásticamente cuando se incorpora bentonita.

La Fig. XVI-3 (ref. 7) reproduce las envolventes de resistencia a las que puede llegarse en las mezclas con diferente porcentaje de finos CL-ML y otra vez con la bentonita comercial. Ambas des-

pues de haber sido puestos los especímenes en condiciones de libre absorción.

Finalmente, la Fig. XVI-4 (Ref. 7) da la variación del V.R.S. de las diferentes mezclas, con el contenido de finos que se use en las mismas. En este caso los especímenes se formaron con la energía de compactación correspondiente a la prueba AASHO estándar y posteriormente se saturaron.

Los resultados de un trabajo como el contenido en la Ref. 7 corroboran la sensación de muchos espe-

cialistas que se declaran francamente en contra del empleo de cantidades imprudentes de finos en mezclas de suelos, con fines de estabilización. Tal parece que difícilmente puede pensarse en obtener un buen comportamiento de una mezcla en la que haya más de un 8 o un 10% de finos menores que la malla No. 200 y este límite puede ser aceptable sólo si los finos son realmente inertes, lo que resulta muy difícil de garantizar para un caso particular dado en la tecnología de las vías terrestres, en vista de los procedimientos de control de la actividad del material extraído en banco que es posible usar; si los finos van siendo más activos, la información anterior hace ver que porcentajes del orden del 10% en la mezcla resultarían francamente imprudentes. La misma Ref. 7, al poner en guardia al constructor contra el empleo de finos en las mezclas que se preparen para base de pavimento hace ver lo variable que pueden ser en la práctica cualquier porcentaje inicial que se acepte, confiando en que no cambiará, señalando los efectos de contaminación por ascenso de partículas muy pequeñas desde capas inferiores del pavimento y los fenómenos de disgregación y rotura de granos, por la acción abrasiva del tránsito, como las causas principales de que tal porcentaje inicial aumente con el tiempo.

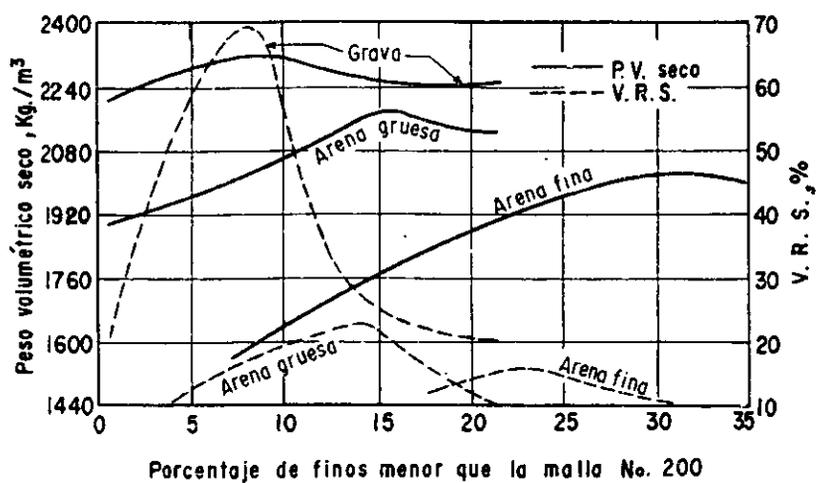
La Fig. XVI-5 (Ref. 9) refiere información en relación al contenido óptimo de finos que deben tener diferentes suelos gruesos para lograr el máximo peso volumétrico seco (en el caso, referido a la prueba AASHO estándar) y el mayor V.R.S. Puede verse como el contenido óptimo de finos tiende a aumentar cuanto más fino sea el suelo grueso, llegándose a porcentajes del orden del 25% como óptimos para que se alcance el mayor V.R.S.

comportamiento mecánico del suelo en una capa de pavimento o en una terracería. La ya mencionada Ref. 7 hace ver que los contenidos de finos que producen en la Fig. XVI-5 el mayor peso volumétrico o el mayor V.R.S. conducen a mezclas de comportamiento muy poco confiable o absolutamente inadecuado, dependiendo de la actividad de los finos. La misma Ref. 7, en la que se incluye un estudio del V.R.S. de las mezclas estudiadas, hace ver que esta prueba produce los mismos resultados prácticamente en mezclas en que el fino incorporado es un caolín, de actividad relativamente escasa o una bentonita, de actividad muy intensa, cuyos efectos en el comportamiento del suelo en cuanto a resistencia y deformabilidad son radicalmente distintos. Tal parece que el resultado de la prueba del V.R.S. es en gran medida independiente de la naturaleza de los finos incorporados, de manera que la prueba resulta insensible hasta más allá de lo conveniente en este punto fundamental.

Los resultados de la Fig. XVI-5 reflejan únicamente una condición física de las mezclas de suelos; que se compactan mejor o se penetran más difícilmente si hay finos que llenen los huecos entre las partículas gruesas, pero sin exceder, significativamente ese valor, pero de ningún modo reflejan un comportamiento general en cuanto a resistencia o deformabilidad, en condiciones variadas de esfuerzos, bajo el efecto del agua o a largo plazo.

De las discusiones anteriores se deduce que el aspecto más delicado de la estabilización con mezclas de otros suelos es el criterio mismo que se adopte para medir las propiedades del nuevo suelo. Si, como no es infrecuente, se adopta el criterio de lograr un mayor peso volumétrico, se corre el ries-

Figura XVI-5. Valores óptimos del contenido de finos desde el punto de vista del peso volumétrico seco y el V.R.S. (Ref. 9)



La información contenida en la figura es familiar a los ingenieros constructores de vías terrestres y a los que manejan laboratorios de control de obra. Sin embargo, el concepto "óptimo", que se maneja en esta y en otras figuras similares debe discutirse cuidadosamente. Decir óptimo para lograr el mayor peso volumétrico o el mayor V.R.S. de ningún modo quiere decir óptimo para lograr el mejor

go de tolerar la inclusión de cantidades de finos excesivamente elevadas (Fig. XVI-5). Si se estabiliza para lograr un mayor V.R.S., se caerá fácilmente en el mismo error, además de que la prueba de medición (el V.R.S.) no discrimina suficientemente la calidad de los finos incorporados, en el sentido de que finos relativamente poco y muy perjudiciales conducen a similares valores del V.R.S. El control

de los finos mezclados midiendo adicionalmente y por separado la plasticidad de los mismos no parece ser suficiente en la práctica, quizá por los muy rápidos cambios en plasticidad que se producen en los bancos o en los préstamos laterales, que muy difícilmente pueden ser detectados a tiempo por un control de calidad normal. El criterio para juzgar las virtudes de una mezcla de suelos debe ser ver la incidencia de la manipulación en las propiedades fundamentales del suelo, que usualmente serán la resistencia triaxial y la relación esfuerzo-deformación o, quizá en algunos casos, la permeabilidad u otras.

En lo que se refiere a la preparación de mezclas de dos suelos, para producir un tercero que tenga una granulometría que le garantice ciertas propiedades deseables, previamente establecidas por un estudio de laboratorio o por unas especificaciones, existen en la práctica diversos métodos, variantes de una misma idea central. En términos generales el problema puede enunciarse así:

Se tiene un suelo dividido en varias fracciones, conocido el porcentaje que constituye cada fracción y se desea variar uno o más de esos porcentajes, por la adición de alguna proporción de otro suelo, de granulometría conocida.

En general, si A, B, C, \dots son los porcentajes que pasan una cierta malla de un conjunto de suelos 1, 2, 3, \dots y que se van a combinar para formar un suelo único y si a, b, c, \dots son los porcentajes en que los susodichos suelos 1, 2, 3, \dots van a entrar en la combinación, el porcentaje de la mezcla que pasará por una cierta malla estará dado por la ecuación:

$$P = aA + bB + cC + \dots \quad (16-1)$$

Supóngase que se tiene una mezcla de sólo dos suelos; entonces la ecuación 16-1 queda:

$$p = aA + bB \quad (16-2)$$

Evidentemente: $a + b = 100\%$, de donde:

$$a = 1 - b$$

Sustituyendo en la ec. 16-2 se tiene:

$$p = (1 - b) A + bB = A - Ab + bB$$

$$p - A = b(B - A)$$

De donde se obtiene:

$$b = \frac{p - A}{B - A} \quad (16-3)$$

Trabajando similarmente, puede llegarse a:

$$a = \frac{p - B}{A - B} \quad (16-4)$$

Las expresiones (16-3) y (16-4) dan los porcentajes en que los suelos 1 y 2 deben combinarse, para que la mezcla tenga el porcentaje p pasando la malla que se haya elegido como base del cálculo. Obviamente p debe ser seleccionado por el proyectista, con base en sus necesidades prácticas.

Para ilustrar el mecanismo anterior se plantea un ejemplo extraído de la Ref. 4. La Tabla XVI-5 proporciona los datos de los suelos 1 y 2, con cuya mezcla se desea fabricar un material que cumpla las especificaciones que se señalan en la propia Tabla.

Tabla XVI-5 (Ref. 4)

Datos del problema

Malla \ Suelos	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200
1	100	90	59	16	3.2	1.1	0	0	0
2	100	100	100	96	82	51	36	21	9.2
Mezcla	100	80-100	70-90	50-70	35-50	18-29	13-23	8-16	4-10

La interpretación de la ecuación anterior se considera obvia.

Los problemas de mezclas son de varios aspectos; a veces habrá que obtener toda la curva granulométrica de la mezcla y, otras bastará con garantizar algún o algunos porcentajes apropiados, de algunos tamaños específicos; un ejemplo del último caso sería la modificación de la fracción fina de suelo para mejorar su plasticidad o su permeabilidad.

La Fig. XVI-6 muestra las granulometrias de los materiales 1 y 2.

En rigor el problema que se plantea no está determinado, como hace ver la Ref. 5, por lo que la práctica suele requerir de un cierto manejo de tanteos, por lo menos en el laboratorio, para llegar a soluciones suficientemente aproximadas. Estos tanteos pueden orientarse y facilitarse mucho, estimando desde el principio las fracciones en que los suelos 1 y 2 pueden intervenir con mayor facilidad;

Tabla XVI-6 (Ref. 4)
Primer Tanteo

Malla Suelo	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200
0.5 Suelo 1	50.00	45.0	29.5	8.0	1.6	0.6	0	0	0
0.5 Suelo 2	50.00	50.0	50.0	48.0	41.0	25.5	18.0	10.5	4.6
Mezcla	100.0	95.0	79.5	56.0	42.6	26.1	18.0	10.5	4.6
Especificación deseada	100.0	80-100	70-90	50-70	35-50	18-29	13-23	8-16	4-10

por ejemplo, en la Fig. XVI-6 puede notarse que el agregado 1 debe ser usado sobre todo para proporcionar los tamaños gruesos de la mezcla, en tanto que el agregado 2 podrá proporcionar los finos.

Para ilustrar el cálculo se tomará el caso de fijar el porcentaje de la mezcla que debe pasar la malla No. 8. Se intentará que dicho porcentaje sea el promedio aritmético de los límites señalados; entonces:

$$p = \frac{35 + 50}{2} = 42.5 \%$$

De donde, aplicando la ecuación 16 - 3 se llega a:

$$b = \frac{p - A}{B - A} = \frac{42.5 - 3.2}{82 - 3.2} = \frac{39.3}{78.8} = 50\%$$

De manera que se utiliza el 50% de cada suelo componente para formar la mezcla, se estará atendiendo al requerimiento de dicha mezcla en lo referente a la malla No. 8, pero sin poder garantizar lo mismo para todas las demás mallas; sin embargo, tal criterio puede utilizarse como primer tanteo. Si así se hiciera, se obtendría la Tabla XVI-6 (Ref. 4)

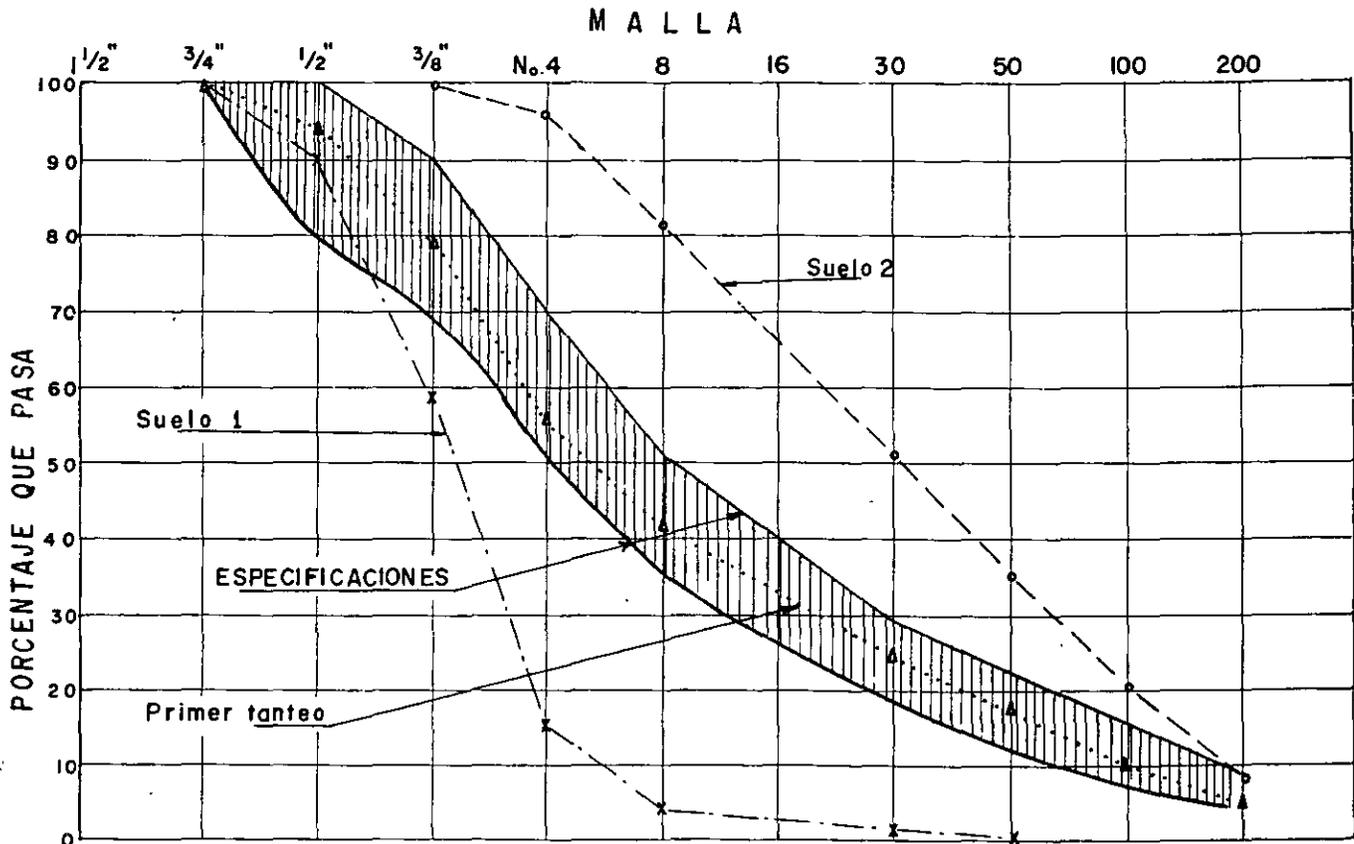


Figura XVI-6. Granulometrias de los suelos 1 y 2 de la mezcla resultante. (Ref. 4)

Se observa que la mezcla obtenida quedó dentro de las especificaciones deseadas, si bien bastante justa en lo que respecta al material que pasa la malla No. 200. Si éste hubiera quedado excedido, por ejemplo, un modo de corregirlo sería efectuar un segundo tanteo aumentando un poco el porcentaje del material 1, que no tiene finos, disminuyendo correspondientemente el del material 2, que es el que contribuye a esa fracción en la mezcla.

Para la realización del método gráfico se comienza por dibujar un cuadrado (Fig. XVI-7), en cuyos lados se colocan escalas de porcentajes granulométricos en la disposición mostrada.

En la escala vertical de la derecha se dibujan puntos según la granulometría que muestra el material 1, señalando en cada porcentaje la malla correspondiente en que tal porcentaje ocurre; igual se hace con el material 2 en la escala vertical de la izquierda. Si se unen tales puntos por líneas rectas,

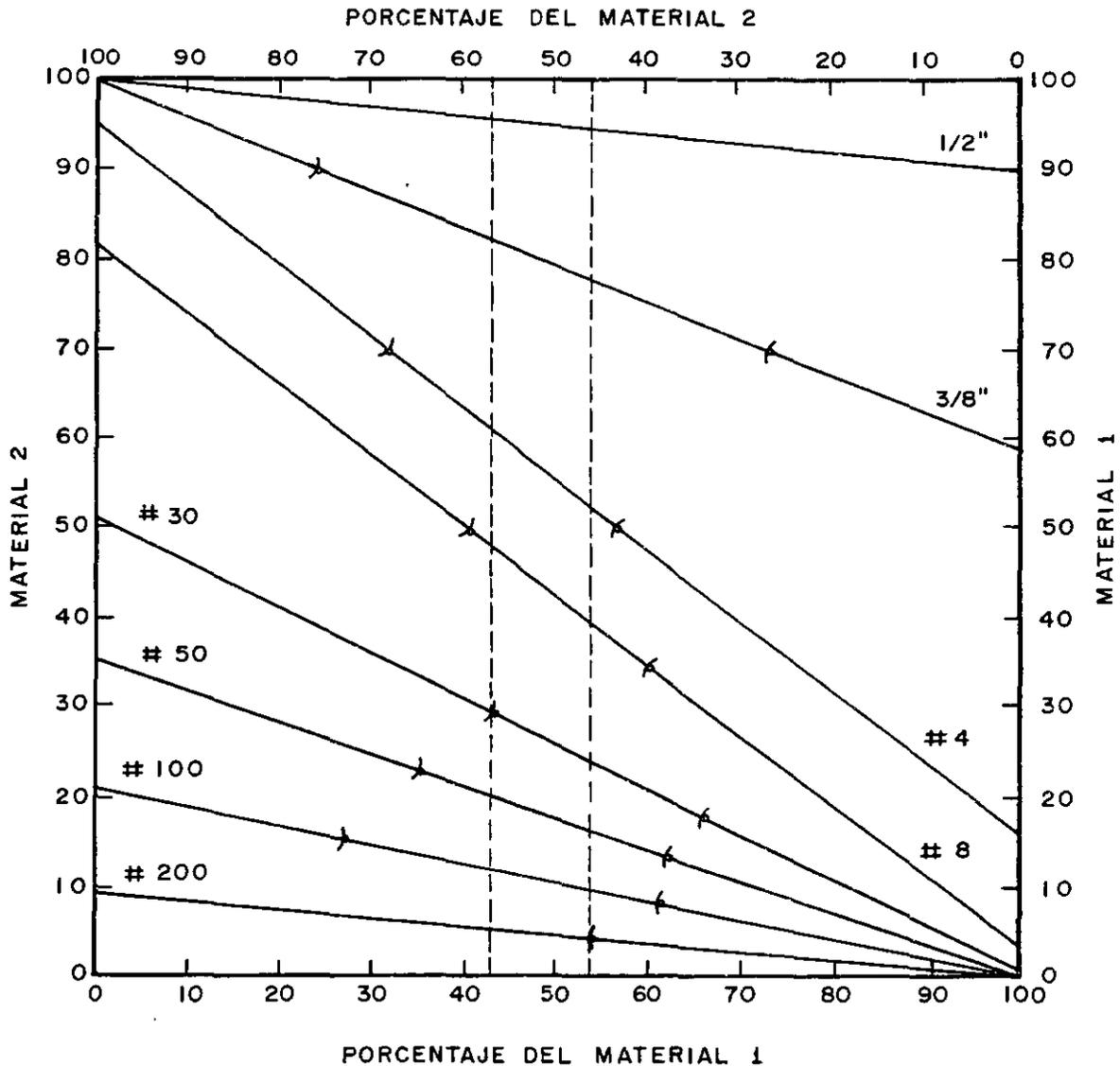


Figura XVI-7. Método gráfico para diseño de mezclas de dos materiales. (Ref. 4)

La granulometría resultante para la mezcla en la Tabla XVI-6 se muestra también en la Fig. XVI-6.

El método anterior puede ser también interpretado por una solución gráfica, que resulta especialmente útil para aquellos casos en que no sea muy fácil visualizar cuál de los suelos componentes debe contribuir más a la formación de diferentes fracciones de la mezcla; esto sucede sobre todo cuando se cruzan las curvas granulométricas de los materiales componentes.

como se hace en la figura, se tendrá una recta para cada malla. Sobre esas líneas rectas y con base en las escalas verticales de porcentajes que pasan se colocan, en cada una, los límites de la especificación a que se desea se sujete la mezcla (Ver tabla XVI-5, para interpretar los límites señalados en Fig. XVI-7).

La figura está construida de tal manera que un punto cualquiera de los señalados en una de las líneas inclinadas, que representa un cierto porcen-

taje de la mezcla, en el tamaño correspondiente a la línea, permite leer en las escalas horizontales superior e inferior los respectivos porcentajes en que deberán entrar en la mezcla los materiales 1 y 2 para producir un porcentaje como el señalado, en el tamaño correspondiente.

Así, si se trazan las dos líneas verticales de puntos, por los puntos más próximos entre sí de todos los que corresponden a límites de especificación de la mezcla, se habrá limitado una zona tal que si los porcentajes en que se mezclan los suelos 1 y 2 quedan dentro de ella, se producirá una mezcla que automáticamente resulta dentro de todas las especificaciones señaladas.

Existen métodos extensión del anterior, que permiten manejar más de dos componentes; ya no se incluyen en este lugar porque nada añaden al panorama conceptual. Las Refs. 4, 5 y 6 ejemplifican algunos de esos procedimientos.

El mezclado en sí puede ser causa de problemas, sobre todo cuando los componentes son finos. La utilización de maquinaria especial puede simplificar mucho el trabajo. Los suelos más finos suelen requerir pulverización antes de las operaciones de mezclado, lo que puede hacerse con arados de discos, rastras, etc.

Una utilización de las mezclas de suelos de uso no demasiado común, pero de tremenda potencialidad, es aquella que tiende a modificar la composición mineralógica y la naturaleza de los iones intercambiables de los minerales. La compresibilidad de la montmorilonita es diez veces mayor que la de la caolinita y aún dentro de la primera, el límite líquido de una montmorilonita sódica puede ser cinco veces mayor que el de una montmorilonita férrica (Ref. 10). Las proporciones de finos de una u otra naturaleza pueden ser modificadas, lográndose cambios muy importantes en alguna propiedad específica. Ejemplos típicos de esta técnica son la adición de arenas finas a suelos que tienen un porcentaje apreciable de partículas susceptibles al rebote elástico o la adición de porcentajes de bentonita para reducir la permeabilidad de los suelos. La Ref. 10 menciona un caso en que la permeabilidad de una arena limosa se hizo bajar de 10^{-4} a 10^{-9} cm/seg al añadir al suelo original un 10% de bentonita

XVI-4 ESTABILIZACION DE SUELOS CON CEMENTO

La estabilización de suelos con cemento es una de las más utilizadas en el momento presente. Las prácticas relativas a ella arrancan de 1917, cuando Amies patentó un primer procedimiento de mejoramiento de suelos a base de mezclarles proporciones variables de cemento tipo Portland (Ref. 11); desde entonces, la utilización del suelo-cemento, que es el nombre que se ha popularizado para la mezcla de que se habla, se ha extendido por el mundo entero y crece cada día, sobre todo, pero no únicamente,

en casos conectados con las vías terrestres y, muy particularmente, con el proyecto y construcción de pavimentos.

Los fenómenos químicos que ocurren entre suelo y cemento, cuando ambos se mezclan con el apropiado contenido de agua, aún no son comprendidos del todo, pero básicamente parece que consisten en reacciones de cemento con los componentes silíceos de los suelos, que producen conglomerantes que ligan a las gravas, arenas y limos; este es el efecto básico en los suelos gruesos. Además, el hidrato de calcio que se forma como consecuencia del contacto del cemento con el agua, libera iones de calcio, muy ávidos de agua, que la toman de la que existe entre las laminillas de arcilla; el resultado de este proceso es la disminución de la porosidad y la plasticidad del suelo arcilloso, así como el aumento en su resistencia y su durabilidad.

La reacción favorable suelo-cemento se ve muy impedida o nulificada cuando el primero contiene materia orgánica, pues los ácidos orgánicos poseen gran avidez por los iones de calcio que libera la reacción original del cemento y los captan, dificultando la acción aglutinante del propio cemento en los suelos gruesos o la estabilización de las partículas laminares en las arcillas. Por esta razón, las especificaciones de casi todos los países exigen que el contenido de materia orgánica en un suelo no sobrepase 1-2%, en peso, si ha de ser considerado apropiado para ser estabilizado con cemento.

También es nociva la presencia en el suelo de sulfatos de calcio, de magnesio u otras sustancias ávidas de agua, pues privan a los aglomerantes de la humedad necesaria para su función.

El efecto del cemento en los suelos arcillosos resulta más complicado y peor comprendido que en los suelos más gruesos, por lo que pudiera resultar conveniente detallarlo algo más. Parece ser que en primer lugar se produce un efecto primario en el que la hidratación del cemento produce silicatos y aluminatos hidratados de calcio, hidróxido de calcio e iones Ca, que elevan la concentración de electrolitos del agua intersticial, aumentado su pH. Viene a continuación un proceso secundario en dos fases. En la primera, se produce un intercambio iónico entre los iones calcio y otros absorbidos por los minerales de arcilla, todo lo cual tiende a flocular a la propia arcilla. En la segunda fase, tienen lugar reacciones químicas puzolánicas entre la cal y los elementos que componen los cristales de arcilla. Los elementos silíceos, y aluminicos reaccionan con los compuestos cálcicos para formar elementos cementantes; el resultado final de esta reacción es la transformación de una estructura arcillosa originalmente floculada y vaporosa, en un agregado resistente. En esta misma segunda fase, el hidróxido de calcio que se va consumiendo puede reponerse por la cal que se libera durante el proceso primario de hidratación del cemento.

En las superficies expuestas al aire, el calcio se

carbonata, con el correspondiente efecto de cementación adicional entre las partículas de arcilla.

Las arcillas montmoriloníticas son, a la larga, las más reactivas ante el cemento, seguidas de las ilitas y de las caolinitas. Sin embargo, el aumento de resistencia del material ante la estabilización no demuestra seguir leyes tan sencillas y, de hecho, parece acercarse más bien a ser inversamente proporcional a la reactividad de la arcilla.

El grado de pulverización de las arcillas se refleja en la reactividad, que aumenta con aquel; en montmorilonitas e ilitas, la incorporación previa al cemento de pequeños porcentajes de cal favorece la pulverización de la arcilla y facilita la incorporación posterior del cemento.

Prácticamente todos los tipos de cemento son útiles para estabilización de suelos y normalmente se emplean los de fraguado y resistencia normales. Para contrarrestar los efectos de la materia orgánica son recomendables cementos de alta resistencia y cuando la mezcla con el suelo se produce y extiende a baja temperatura, pudieran convenir los de fraguado rápido o bien los que contienen, como aditivo, el cloruro de calcio (Ref. 5).

Las partículas de cemento generalmente tienen tamaños comprendidos entre 0.5 y 100 micras, con un promedio de alrededor de 20 micras. La hidratación de las partículas más grandes probablemente no llega a producirse nunca y las partículas de 10 micras pueden ya tardar meses en hidratarse, por lo que, desde este punto de vista, convendrá la utilización de cementos finos, que en añadidura producen resistencias más altas; naturalmente, los cementos finos son más caros, por lo que la elección viene a quedar sujeta a fin de cuentas a un balance económico. En muchas técnicas se reemplazan las partículas más gruesas de los cementos ordinarios por un relleno inerte, con lo que se reducen los consumos de agua y se evitan las altas temperaturas de hidratación y el agrietamiento. Sin embargo, a despecho de estos refinamientos, que se van utilizando más y más, la inmensa mayoría de las estabilizaciones con cemento se hacen con los tipos de Portland ordinarios.

Cualquier suelo que no tenga cantidades excesivas de materia orgánica puede ser tratado con cemento para mejorar su comportamiento mecánico (resistencia, etc.); las únicas limitaciones estriban en lo difícil que pueda resultar un adecuado mezclado del cemento, lo que llega a ser muy difícil en arcillas suaves y húmedas o las que puedan surgir en suelos muy gruesos limpios, que no suelen requerir estabilización por tener propiedades suficientemente buenas y en las que el uso de cemento no conduce a mejoramientos substanciales de esas propiedades, pero puede, en cambio, introducir graves problemas de agrietamiento en los suelos tratados.

Suele decirse que el suelo tratado con cemento no debe tener partículas de más de 8 cm. o de un tercio

del espesor de la capa tratada. También es usual especificar que el suelo no tenga más de un 50% pasar la malla No. 200, que su límite líquido no sea mayor de 50% y que su índice de plasticidad no exceda de un 18% (Ref. 1).

Algunas arcillas muy plásticas, que se salen de los límites anteriores, han sido exitosamente tratadas con cemento después de un tratamiento previo con 2 ó 3% del mismo cemento o de cal hidratada, con el que se logra dar al suelo mayor trabajabilidad y abatir su plasticidad. El tiempo de curado para este tratamiento previo no suele exceder de 2 ó 3 días.

En algunas ocasiones se han usado pequeños porcentajes, del orden del 0.5 ó el 1% de cemento para añadirlo a materiales triturados con el propósito de darle la trabajabilidad y facilidad de compactación que, como ya se comentó, echan de menos en estos suelos muchos constructores y que a veces trata de lograrse con mezclas de suelos de partículas finas, con resultados inciertos o francamente inconvenientes, como ya también fue discutido. En el caso de materiales triturados que contengan finos plásticos menores que la malla No. 200, también ha dado buen resultado, como tratamiento alternativo a otros posibles, como el lavado, la mezcla con porcentajes del orden de 2 ó 3 % de cemento.

No hay ningún requisito específico para el agua que se utilice en la estabilización, excepto los ya señalados, que eliminan las aguas con alto contenido de materia orgánica, de sulfatos o cantidades excesivas de otras sales. La cantidad de agua que se añade está regida por las necesidades de la compactación, antes que por las de la estabilización.

El proporcionamiento de las mezclas de suelo-cemento viene a ser a fin de cuentas la cuestión fundamental, pues el cemento es el elemento más costoso y fijar su proporción determina la factibilidad técnica de la estabilización, aparte de que las propiedades que se logren para la mezcla dependen también esencialmente de la cantidad de cemento que se emplee.

En los primeros años del uso del suelo-cemento, el proporcionamiento de las mezclas se hacía con base en una prueba de durabilidad (Ref. 1). Se preparaban especímenes con diferentes cantidades de cemento, a los que se dejaba curar durante siete días, para sujetarlos después a doce ciclos de congelamiento y deshielo o de humedecimiento y secado. La pérdida de peso de dichos especímenes, después de cepillado su material suelto, se tomaba como una medida de la durabilidad que era de esperar. También se medía en esas pruebas el incremento de volumen de los especímenes por expansión. Se seleccionaba la proporción de cemento que producía una pérdida de peso y un cambio volumétrico que fuesen considerados satisfactorios al caso, con base en la experiencia precedente y en el criterio del proyectista. Sin embargo, ya en aquellos días, la técnica inglesa empezó a hacer uso de un requerimiento de resistencia de la mezcla, lo que se

antoja un criterio más racional y menos expuesto a un juicio puramente subjetivo. En Inglaterra se probaban los especímenes en compresión simple y se les exigía una resistencia mínima de 17.5 kg/cm^2 (250 lb/plg.^2), especificándose la temperatura de curado de 25° C ; la prueba de resistencia se hacía después de mantener constante el contenido de agua de las muestras en el período de curado de siete días.

La resistencia de 17.5 kg/cm^2 se alcanza en los suelos gruesos, como las gravas, con contenidos de cemento sumamente bajos y con los contenidos usuales no es raro llegar a resistencias del orden de 100 kg/cm^2 , que dan a la mezcla la consistencia de un concreto pobre, con resistencia sobrada, pero también con mucha susceptibilidad al agrietamiento, con la consecuencia de que las grandes grietas que se forman se reflejan en las capas que se colocan sobre la tratada. Como consecuencia de estos fenómenos, se ha ido imponiendo en épocas más recientes la idea de considerar a una capa de suelo tratado con cemento como algo que debe ser flexible, constituido por fragmentos de suelo-cemento entrelazados y trabados unos con otros. Para lograr este fin suelen proponerse en la actualidad resistencias a la compresión simple de las mezclas de suelo-cemento que no excedan de unos 55 kg/cm^2 (800 lb/plg.^2); resistencias más altas producen en la capa un comportamiento rígido. Inclusive suele proponerse hoy que las capas estabilizadas con cemento sean abiertas al tránsito rápidamente, precisamente para producir la fragmentación que garantice un comportamiento flexible (Ref. 1).

En cualquier caso, lo usual actualmente es proporcionar las mezclas con base en un criterio de resistencia, generalmente realizando una prueba de compresión simple, aún cuando se complementa esa información con las pruebas de durabilidad mencionadas más arriba. También se han hecho intentos actualmente para introducir pruebas más so-

fisticadas para juzgar la resistencia, tales como la prueba triaxial de Texas, ya descrita.

Los intentos para ligar el proporcionamiento de mezclas con pruebas V. R. S. no han llevado a resultados concluyentes, porque es usual que cualquier suelo-cemento y sobre todo los formados con suelos gruesos alcancen sistemáticamente valores tan altos de V.R.S., que su interpretación se hace poco clara.

En conclusión puede decirse que no existe en la actualidad un criterio específico y confiable para diseñar las mezclas en lo referente al contenido de cemento y que los criterios de que se auxilian los proyectistas quedan fuertemente sujetos a su propia experiencia e interpretación; para muchos, la inspección visual de los especímenes, combinada con criterios de tipo económico, sigue siendo un elemento importante de su juicio final. Faltan en gran medida estudios sobre el comportamiento de suelo-cemento bajo cargas repetidas, sobre efectos de deformación acumulativa, etc.

En cualquier caso, los ensayos tienden a determinar actualmente tres aspectos fundamentales en la mezcla de suelo-cemento (Ref. 12):

- La cantidad de cemento necesaria para dar al suelo las características deseadas.
- La cantidad de agua que se deberá agregar.
- El peso volumétrico a que deberá compactarse la mezcla, según los requerimientos de la capa en que vaya a usarse.

En el laboratorio suele tenerse el problema de dar las primeras dosificaciones para la preparación de los especímenes de las diferentes pruebas. La Tabla XVI-7 (Ref. 12) proporciona una guía para la elección de esos primeros porcentajes.

Tabla XVI-7 (Ref. 12)

Porcentaje de cemento a probar inicialmente en los diferentes tipos de suelos

Suelo	Porcentaje de cemento, en peso, usualmente requerido por la capa terminada.	Porcentaje de cemento, en peso, a usar inicialmente en pruebas de compactación.	Porcentaje de cemento, en peso, a usar inicialmente en pruebas de durabilidad.
GW, GP, GM y SW	3 - 8	5 - 6	3 - 7
SC, GC, SP, SM	5 - 9	7	5 - 9
ML	7 - 11	9	7 - 11
CL, OL, MH	7 - 12	10	8 - 12
CH	8 - 13	10	8 - 12
OH, P _t	9 - 15	12	10 - 14
	10 - 16	13	11 - 15

La Tabla XVI-8 (Ref. 12) permite una estimación un poco más aproximada para el caso de suelos de naturaleza básicamente friccionante. Funciona conociendo los porcentajes granulométricos que se mencionan, así como los pesos volumétricos a que

se haya llegado en las mezclas tras compactarlas con una prueba de impacto, frecuentemente del tipo *AASHTO*. La Tabla permite afinar entonces los contenidos de cemento con vistas a pruebas de durabilidad o de resistencia.

Tabla XVI-8 (Ref. 12)

Porcentaje de cemento para especímenes en pruebas de durabilidad.

Suelos de naturaleza friccionante

Material retenido en la malla No. 4	Material menor que 0.5 mm.	Porcentaje tentativo de cemento para los pesos volumétricos que se anotan, en peso.					
		1680 ^a 1750 Kg/m ³	1750 ^a 1830 Kg/m ³	1830 ^a 1910 Kg/m ³	1910 ^a 1990 Kg/m ³	1990 ^a 2070 Kg/m ³	2070 ^o más Kg/m ³
%	%	%	%	%	%	%	%
0-14	0-19	10	9	8	7	6	5
	20-39	9	8	7	7	5	5
	40-50	11	10	9	8	6	5
15-29	0-19	10	9	8	6	5	5
	20-39	9	8	7	6	6	5
	40-50	12	10	9	8	7	6
30-45	0-19	10	8	7	6	5	5
	20-39	11	9	8	7	6	5
	40-50	12	11	10	9	8	6

La Tabla XVI-9 (Ref. 12) es enteramente equivalente a la XVI-8, pero se refiere a suelos de naturaleza arcillosa, plástica. Aparece en dicha tabla el concepto índice de grupo del suelo (*IG*), que se establece con la fórmula:

$$IG = 0.2a. + 0.005 ac + 0.01bd \quad (16-5)$$

Donde:

a se refiere al porcentaje de material que pasa la malla No. 200. Deberá tomarse *a* = 0, si dicho porcentaje es menor que 35% y *a* = 40 si es mayor que 75%. Para porcentajes comprendidos entre 35 y 75%, *a* es un número entero correspondientemente elegido entre 1 y 40 (*a* = 1 para 35% y *a* = 40 para 75%).

b se refiere también al porcentaje de material que pasa la malla No. 200. Deberá tomarse *b* = 0, si dicho porcentaje es menor que 15% y *b* = 40 si es mayor que 55%. Para porcentajes comprendidos entre 15 y 55%, *b* es un número entero correspondientemente elegido entre 1 y 40 (*b* = 1 para 15% y *b* = 40 para 55%).

c se refiere al límite líquido de la fracción del suelo menor que la malla No. 40. Si *LL* < 40% deberá tomarse *c* = 0. Si *LL* > 60%, deberá tomarse *c* = 60. Para porcentajes comprendidos entre dichos límites *c* será un número entero correspondientemente comprendido entre 0 y 60.

d se refiere al índice de plasticidad del suelo. Si *IP* < 10%, deberá tomarse *d* = 0. Si *IP* > 30%, deberá tomarse *d* = 30. Para porcentajes comprendidos entre dichos límites *d* será un número entero correspondientemente comprendido entre 0 y 30.

Tabla XVI-9 (Ref. 12)

Porcentajes de cemento para especímenes en pruebas de durabilidad.
Suelos de naturaleza plástica.

Indice de grupo del suelo	Material entre 0.05 mm y 0.005 mm.	Porcentajes totales de cemento para los pesos volumétricos que se anotan, en peso.						
		1140 ^a 1510 Kg/m ³	1510 ^a 1590 Kg/m ³	1590 ^a 1670 Kg/m ³	1670 ^a 1750 Kg/m ³	1750 ^a 1830 Kg/m ³	1830 ^a 1910 Kg/m ³	1910 ^a Más Kg/m ³
—	%	%	%	%	%	%	%	%
0-3	0-19	12	11	10	8	8	7	7
	19-39	12	11	10	9	8	8	7
	39-59	13	12	11	9	9	8	8
	60 ó más	—	—	—	—	—	—	—
4-7	0-19	13	12	11	9	8	7	7
	19-39	13	12	11	10	9	8	8
	39-59	14	13	12	10	10	9	8
	60 ó más	15	14	12	11	10	9	9
8-11	0-19	14	13	11	10	9	8	8
	19-39	15	14	11	10	9	9	9
	39-59	16	14	12	11	10	10	9
	60 ó más	17	15	13	11	10	10	10
12-15	0-19	15	14	13	12	11	9	9
	19-39	16	15	13	12	11	10	10
	39-59	17	16	14	12	12	11	10
	60 ó más	18	16	14	13	12	11	11
16-20	0-19	17	16	14	13	12	11	10
	19-39	18	17	15	14	13	11	11
	39-59	19	18	15	14	14	12	12
	60 ó más	20	19	16	15	14	13	12

Es evidente que las Tablas XVI-7, XVI-8 y XVI-9 tienen su origen en la experiencia de laboratorio y deben verse simplemente como guía de tanteos para la realización de proporcionamientos. De ninguna manera podrán interpretarse como resultado de los proporcionamientos, es decir, como substitutivo de un trabajo de laboratorio que deberá hacerse ineludiblemente en cada caso particular.

La misma Ref. 12, la 13 y la 14 contienen detalladamente señalados todos los procedimientos de prueba para la ejecución, tanto de las pruebas de compactación, como de durabilidad, con ciclos de humedecimiento y secado. Dichos detalles, sobre los que no hay todavía un consenso universal, se

estiman innecesarios dentro del cuerpo de esta obra.

La Tabla XVI-10 (Ref. 1) es un resumen de las propiedades que se piden usualmente en la tecnología de las vías terrestres a las mezclas de suelo-cemento. Como tantas otras de la misma naturaleza, la Tabla XVI-10 no puede verse como una recomendación final y garantizada a la que deba atenerse el proyectista, sino simplemente como una norma tentativa de experiencia para orientar sus estudios de laboratorio o el ejercicio de su capacidad de elección, que deberán ser invariablemente empleados en cada caso.

Tabla XVI-10 (Ref. 1)

Propiedades comunmente exigidas a las mezclas de suelo-cemento

<i>Tipo de capa</i>	<i>Resistencia a la compresión simple</i> (1)	<i>V.R.S.</i> (2)	<i>Expansión</i>	<i>Pérdida de peso en prueba de humedecimiento y secado</i> (3)
—	kg/cm ²	%	%	%
Sub-bases. Material de relleno para trincheras	3.5-10.5	20-80	2	7
Sub-bases o bases para tránsito muy ligero (4)	7-14	50-150	2	10
Bases para tráfico intenso	14-56	200-600	2	14
Protecciones de terraplenes contra erosión y acción de agua.	> 56	600	2	14

- (1) Tras siete días de curado a humedad constante. La resistencia de especímenes análogos sumergidos en agua no debe ser más de un 20% menor.
- (2) Tras un período de inmersión en agua de cuatro días.
- (3) La prueba de durabilidad sólo tiene sentido si el agua puede penetrar en la mezcla.
- (4) La resistencia en este caso puede ser menor en zonas bien drenadas.

En los párrafos siguientes se mencionarán algunas propiedades mecánicas de las mezclas de suelo-cemento y se analizarán someramente sus variaciones con algunas características de interés práctico; también se hará mención a algún método de diseño de espesores de capas de suelo-cemento para pavimentos.

A) La resistencia a la compresión simple

La Fig. XVI-8 (Ref. 1) muestra la variación de la resistencia a la compresión simple de las mezclas de suelo-cemento con el contenido de cemento, utilizando diferentes suelos como matriz.

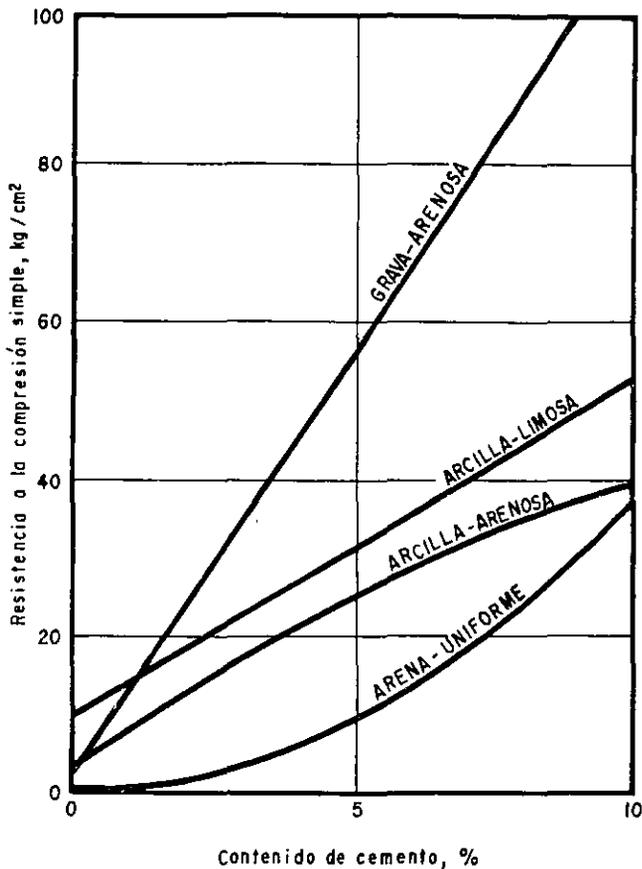


Figura XVI-8. Variación de la resistencia a la compresión simple, de especímenes estabilizados con cemento en diversos suelos típicos. (Ref. 1)

En general la resistencia aumenta casi linealmente con el contenido de cemento, pero la pendiente de las gráficas sí varía mucho de suelo a suelo.

La Fig. XVI-9 (Ref. 14) muestra el efecto en la resistencia a la compresión simple del contenido de material que pasa la malla No. 4. En términos generales los materiales bien graduados, con todos los contenidos entre la malla No. 4 y los finos requieren menos cemento que los suelos uniformes, aún si éstos son gruesos y, desde luego, si son finos.

La figura se refiere a tres especímenes de distribuciones granulométricas muy similares, predominantemente gruesos (tamaño máximo 1 plg. y siempre con menos de 25% pasando la malla No. 40). Se trata de materiales naturales, no triturados, de composición mineralógica similar. Se observa que como se señaló arriba, el material B, que es el mejor graduado, sin predominio de finos ni de gruesos, exhibe la mayor resistencia.

La Fig. XVI-10 (Ref. 14) muestra el efecto en la resistencia a la compresión simple de la fracción más fina del suelo, expresada como una relación entre el porcentaje que pasa la malla No. 200 y el que pasa la malla No. 30. Los especímenes probados son todos arenas o suelos arenosos, cuyas características se muestran en la Tabla XVI-11 (Ref. 14). Un mismo suelo natural fue probado en varios especímenes con fracciones finas variables. Se presentan resultados de cinco suelos naturales diferentes.

Tabla XVI-11 (Ref 14)
Características de los materiales mencionados en la Fig. XVI-10

Material	Descripción	Porcentaje que pasa la malla No. 200	Peso volumétrico después de compactado (kg/m ³)
1	Suelo arenoso	3	1860
		8	1930
		12	1980
		19	2080
2	Suelo arenoso	9	1850
		13.5	1900
		23	1950
		33	2000
3	Suelo arenoso	7	1680
		15	1730
		27	1980
		35	2060

Tabla XVI-11 (cont.)

Material	Descripción	Porcentaje que pasa la malla No. 200	Peso volumétrico después de compactado (kg/m ³)
4	suelo arenoso	9	1800
		14	1850
		24	1910
		34	1940
5	Grava arenosa	1	1815
		6	1930
		11	1990
		16	2080
6*	Arena	2	1850
		7	1960
		12.5	2030
		19	2090

*No incluido en la figura XVI-10.

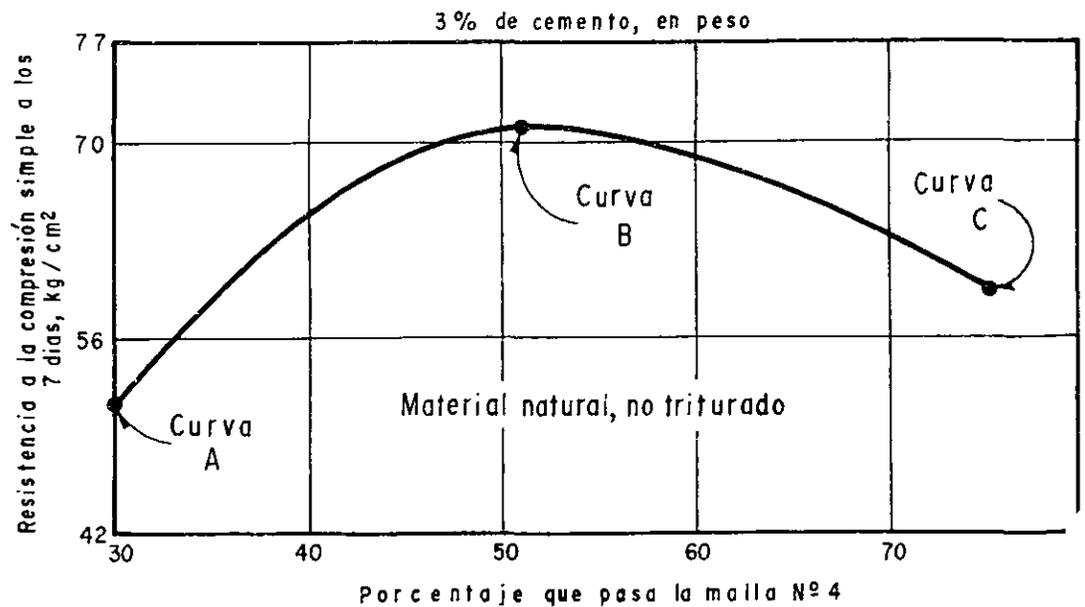
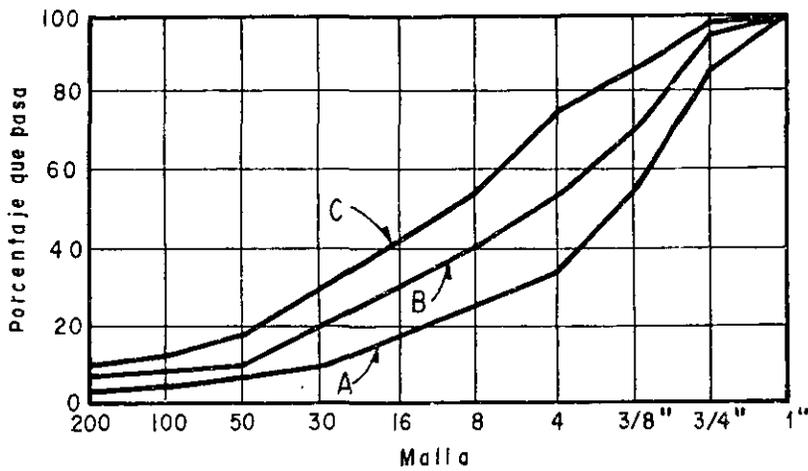


Figura XVI-9. Efecto en la resistencia a la compresión simple del contenido del material que pasa la malla No. 4. (Ref. 14)

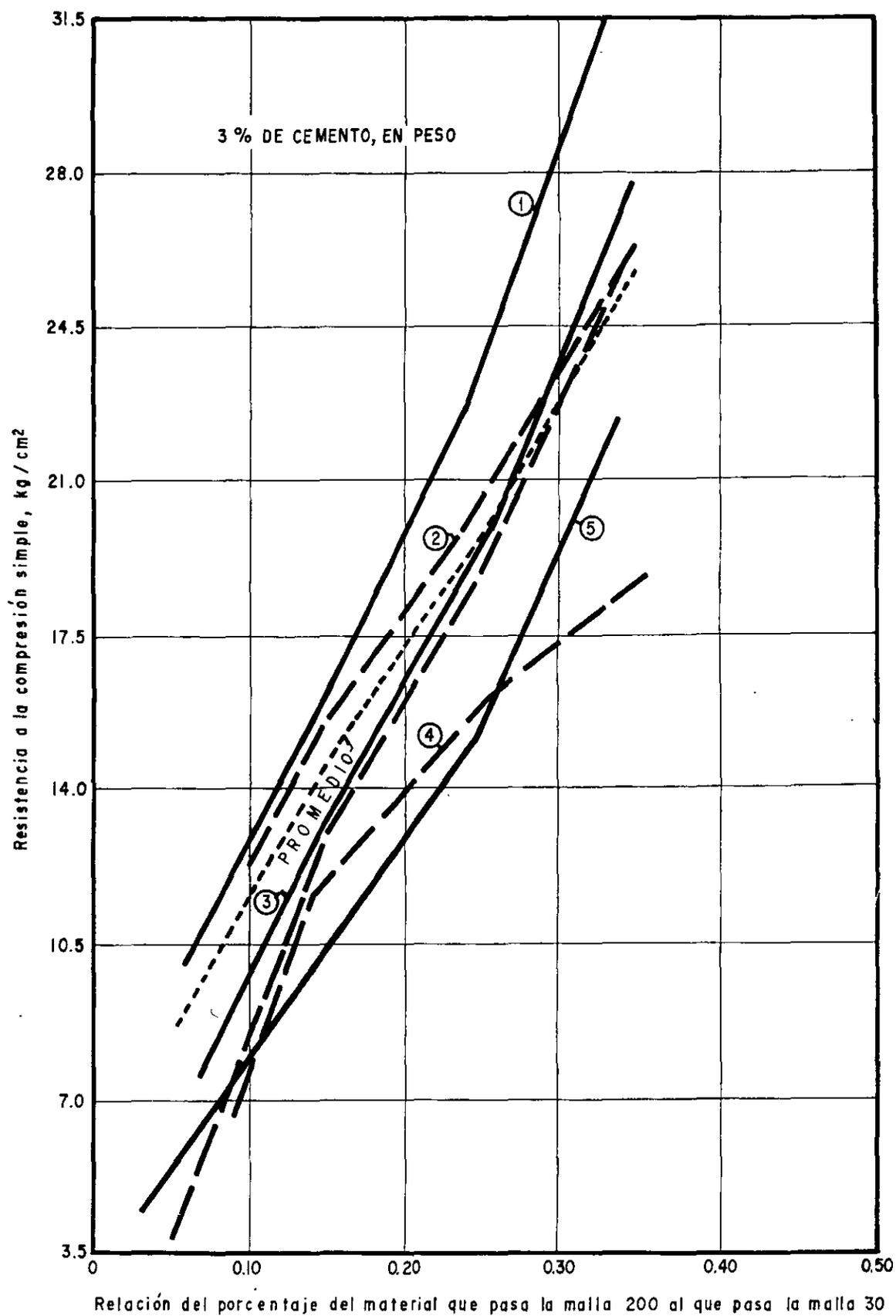


Figura XVI-10. Efecto en la resistencia a la compresión simple de la fracción fina de los suelos friccionantes. (Ref. 14)

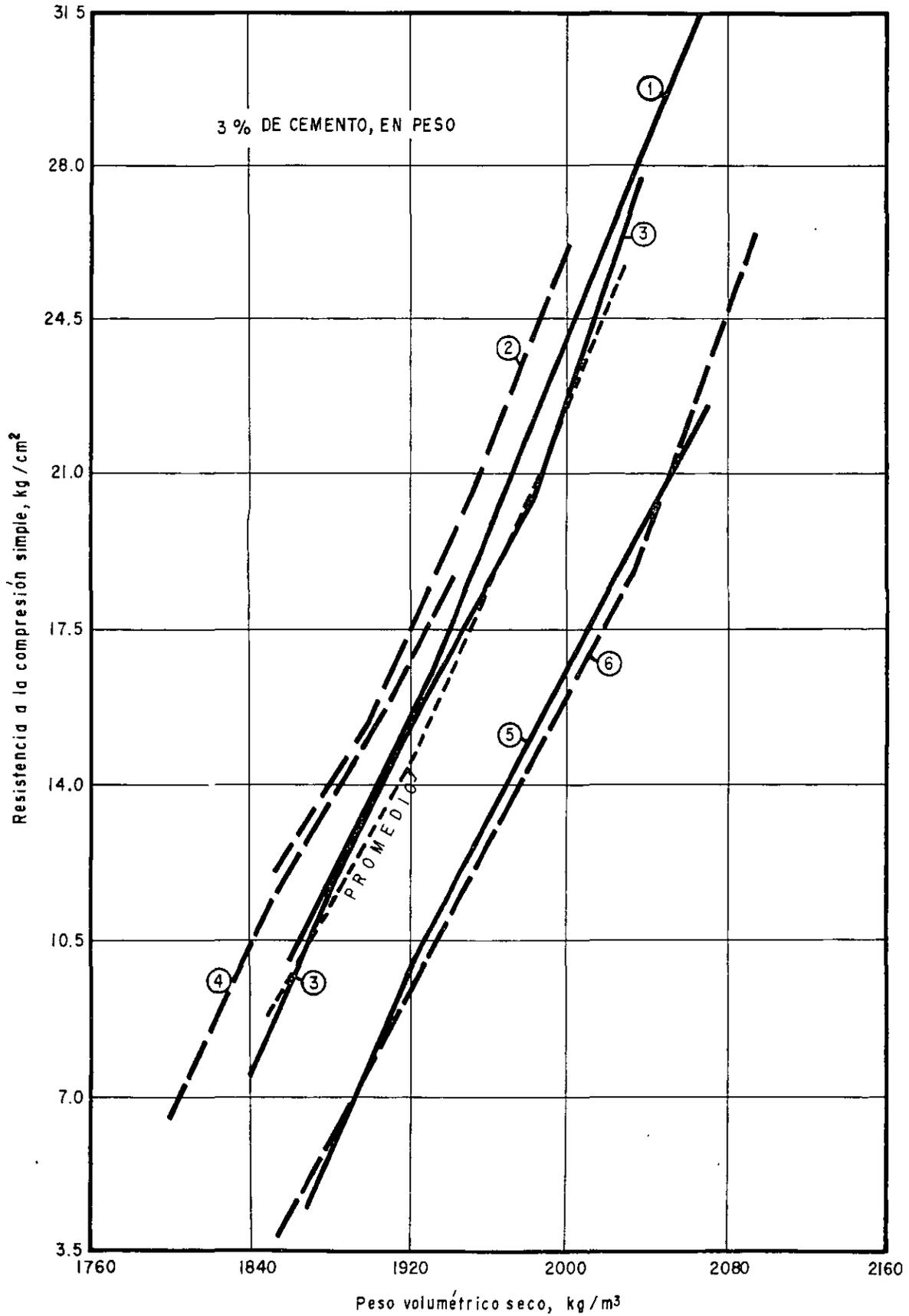
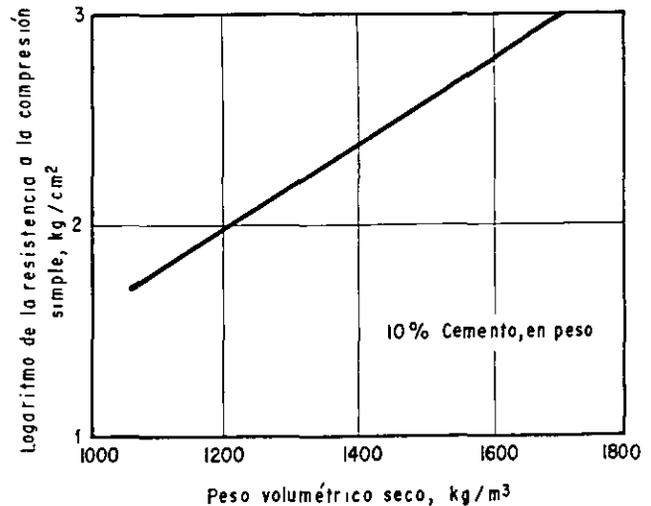


Figura XVI-11. Efecto de la compactación en la resistencia a la compresión simple de suelos arenosos. (Ref. 14)

Figura XVI-12. Efecto del peso volumétrico alcanzado con la compactación, en la resistencia a la compresión simple de una arcilla estabilizada con cemento (Ref. 1)



Todos los especímenes se prepararon con 3% de cemento. Puede verse que para obtener resistencias mínimas de 15 kg/cm^2 con tal contenido de cemento, es preciso que la relación entre el porcentaje que pasa la malla No. 200 y el que pasa la malla No. 30 no sea menor que 0.15. También se observó en la investigación que tal resistencia mínima exigía un peso volumétrico no menor de 1900 kg/m^3 en todos los suelos arenosos probados. En cualquier caso, la Fig. XVI-10 hace ver que el contenido de finos es favorable al desarrollo de la resistencia de las mezclas de suelo-cemento, con tal de que el componente suelo sea de naturaleza arenosa; sin embargo, difícilmente puede modificarse el porcentaje de finos de los suelos naturales con que se trabaja y ello por razones de costo.

En la Fig. XVI-11 (Ref. 14) se muestra el efecto del peso volumétrico alcanzado con la compactación en la resistencia a la compresión simple obtenida. Se trata de los mismos suelos naturales cuyas propiedades se enlistaron en la Tabla XVI-11.

Nótese que las arenas más limpias y las gravas arenosas no alcanzan resistencias espectaculares en relación a los otros suelos probados. Ello seguramente es debido a la proporción de cemento usada, relativamente baja. Con mayores porcentajes de cemento, como ya se dijo, los suelos friccionantes limpios se convierten en verdaderos concretos simples.

La Fig. XVI-12 (Ref. 1) recoge información análoga, pero para el caso de una arcilla estabilizada con 10% de cemento.

La Fig. XVI-13 (Ref. 14) muestra el efecto de añadir a materiales limpios bien graduados diversos porcentajes de pequeñas bolas de arcilla activa y dura. Puede verse que en este caso y como era de esperarse, la resistencia del material baja notablemente con tal añadido.

La Fig. XVI-14 (Ref. 14), muestra el efecto del retraso en compactar a las mezclas después de formadas; este efecto consiste evidentemente en una reducción de la resistencia. Tomando en cuenta

estos resultados y las realidades impuestas por la práctica, es muy común que las especificaciones de casi todos los países prohíban que transcurran más de dos horas entre el momento en que la mezcla es tendida en la obra y el fin de su compactación. La Ref. 1 hace ver que la proporción de pérdida de resistencia es bastante mayor que la señalada en la figura cuando los contenidos de cemento son mayores.

La Fig. XVI-15 (Ref. 14) expresa la influencia del tiempo de curado de las mezclas en la resistencia obtenida. Puede notarse cómo ésta aumenta cuando crece el tiempo de curado a que se somete la mezcla después de ser compactada, si bien la ganancia no es ni mucho menos constante con el tiempo.

La Fig. XVI-16 (Ref. 14) proporciona la misma información, pero referida a distintos tipos de suelos. Nótese que, una vez más, la arena limpia revela no ser un material muy apropiado para su estabilización con contenidos convenientemente bajos de cemento. En la Fig. XVI-14 una arena alcanza alta resistencia con 10% de cemento, pero tanto la Fig. XVI-14 como la XVI-15 hacen ver que materiales análogos con contenidos de cemento de hasta 5% llegan a resistencias mucho menores. Naturalmente esto se debe a la alta proporción de vacíos típica de los suelos gruesos, que requieren mucho cemento para ser suficientemente rellenados de modo que los granos se cemenen. Por esta razón, pueden tenerse ahorros drásticos en el contenido de cemento en arenas y gravas si se les añade un material fino e inerte que rellene los huecos parcialmente.

La Fig. XVI-17 (Ref. 14) muestra el efecto de la temperatura de curado, combinado con el del tiempo de curado, en la resistencia a la compresión simple de los especímenes de suelo-cemento; coincidiendo con la experiencia tradicional en el campo del concreto, la resistencia resulta mayor en una capa de suelo-cemento, cuanto mayor sea la temperatura con que se cura dicha capa. Frecuentemente esto se traduce en el hecho de que se obtienen más fácilmente mejores resistencias cuando las capas de

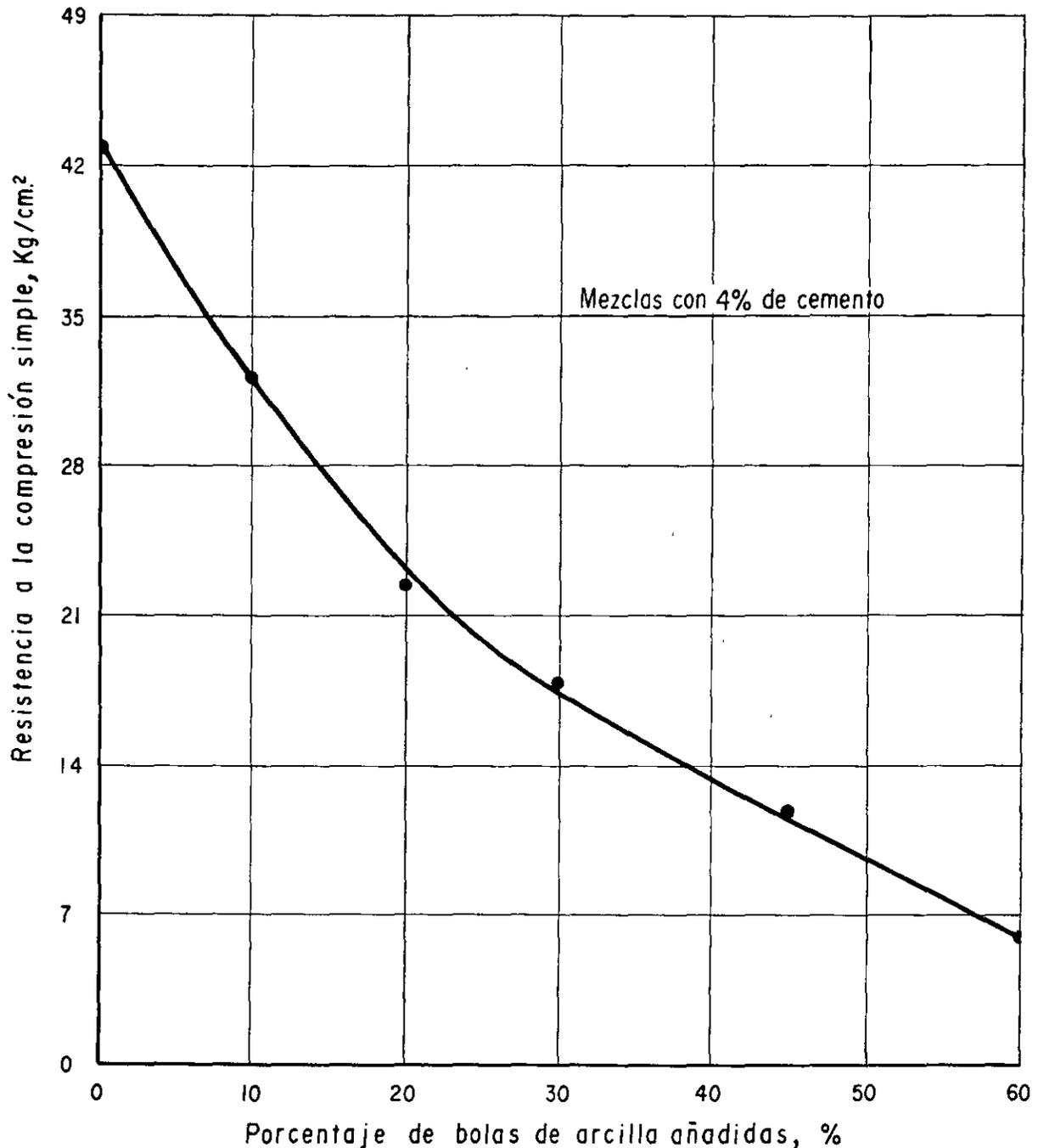


Figura XVI-13. Efecto en la resistencia de materiales friccionantes bien graduados, de añadir pequeñas bolas de arcilla endurecidas. (Ref. 14)

suelo-cemento se curan en épocas de calor.

La importante Ref. 14, que recoge mucha de la experiencia californiana clásica sobre el tema ahora tratado, proporciona también la información contenida en la Fig. XVI-18 (Ref. 14). En ella se estudió el efecto de añadir a las mezclas de suelo-cemento que se indican, diferentes porcentajes de los aditivos que se señalan. Puede verse que el efecto de estos es muy poco marcado en los materiales limosos y que puede ser un poco más pronunciado en la mezcla de grava y arena. Sin embargo, parece que puede concluirse que los aditivos proba-

dos no produjeron ninguna mejoría substancial en las resistencias obtenidas.

En algunas épocas se pensó que sería conveniente añadir ciertas cantidades de emulsión asfáltica a las mezclas de suelo-cemento. De hecho, esto es lo que hasta cierto punto se hace cuando en una reconstrucción se aprovecha una antigua carpeta escarificada y mezclada con una antigua base y se vuelve a tender, añadiendo al conjunto algún porcentaje de cemento, lo que actualmente constituye una técnica popular para aprovechar tales capas antiguas, cuando han de ser renovadas. La Fig.

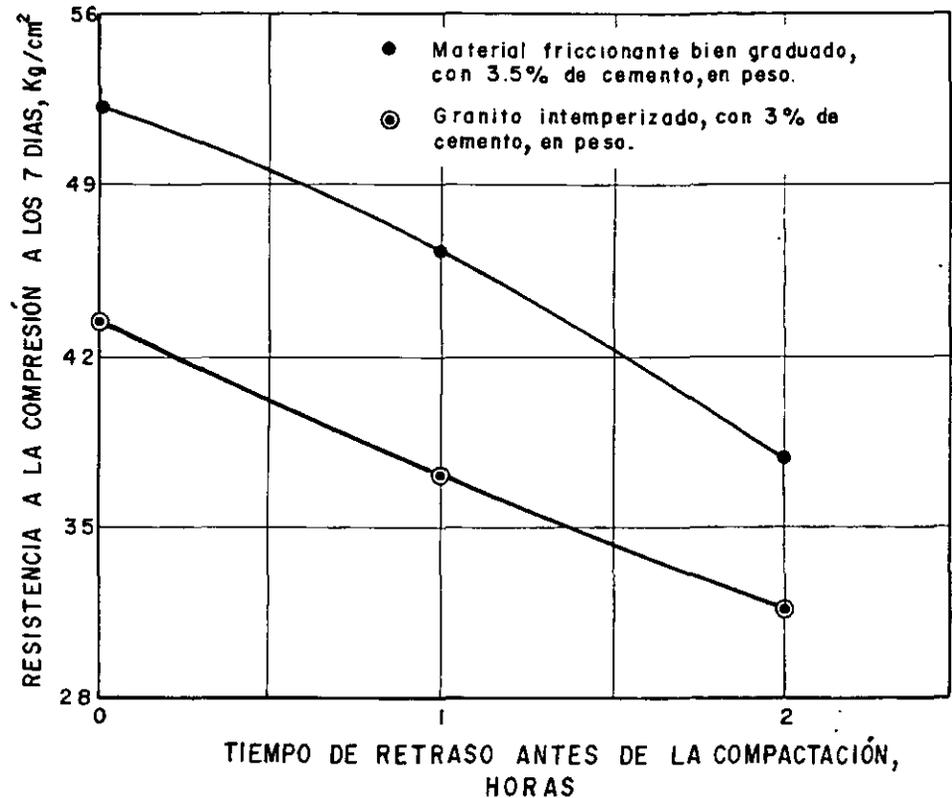


Figura XVI-14. Efecto de la dilatación de la compactación en la resistencia. (Ref. 14)

XVI-19 (Ref. 14) muestra un estudio bastante completo de estos aspectos, pues en él se combinaron tanto el efecto de la inclusión del asfalto, como el de tiempo de curado, la temperatura de éste, etc. Desde luego se nota que la inclusión del asfalto no modifica esencialmente la resistencia de las mezclas, aunque se puede aumentar el costo de la capa; tal parece que el añadir asfalto no debe considerarse una buena práctica rutinaria. Por el contrario, en el caso de reconstrucción de que se habló, si parece conveniente el añadir cemento a las mezclas de antiguas carpetas y bases, a las que inclusive muchas veces se les añade material nuevo para completar espesor, pues gracias a él se puede lograr una homogeneidad de resistencia mucho mayor.

La Fig. XVI-20 (Ref. 1) muestra la reducción de resistencia a la compresión simple que se tiene cuando se satura la mezcla de suelo cemento. Los resultados se refieren a una arcilla poco plástica, en un caso compactada y probada con su humedad óptima y en otro caso sumergida en agua después de ser compactada y antes de probar.

Finalmente, la Ref. 15 establece el efecto que sobre la resistencia a la compresión simple tiene el tiempo de almacenamiento en cuarto húmedo para siete tipos de suelo diferentes. Los especímenes se protegieron del agua libre hasta el día de la prueba, pero se sumergieron en agua una hora antes de la misma. La Fig. XVI-21 (Ref. 15) ilustra los resultados obtenidos.

B) Otras propiedades

Otros estudios realizados en especímenes de suelo-cemento indican un comportamiento esfuerzo-deformación no lineal para cargas arriba de un 60% de la carga de falla y relativamente lineal para valores inferiores. La Fig. XVI-22 (Ref. 1) muestra un típico comportamiento bajo carga repetida, que indica una considerable deformación no recuperada entre un ciclo de carga y el siguiente.

Otra característica de las arcillas estabilizadas con cemento es su tendencia a sufrir deformación acumulativa bajo carga constante (creep), una muestra del cual aparece en la Fig. XVI-23 (Ref. 1); desafortunadamente la Ref. 1, de donde procede la Fig. XVI-23, no especifica el nivel de carga bajo el que se hizo el experimento reportado.

Durante algún tiempo se pensó que el creep de las arcillas estabilizadas con cemento, bajo esfuerzos de tensión constantes constituía una de las razones fundamentales de la deformación y el agrietamiento de las capas. En épocas más recientes, sin embargo, se hizo ver que la contracción a contenido de agua constante de las arcillas tratadas puede ser una más importante causa de agrietamiento y deformación.

La Ref. 20 describe una investigación con fines a obtener información en torno a la resistencia a la tensión de los suelos tratados con cemento; en ella llega a proponerse una expresión para predecir

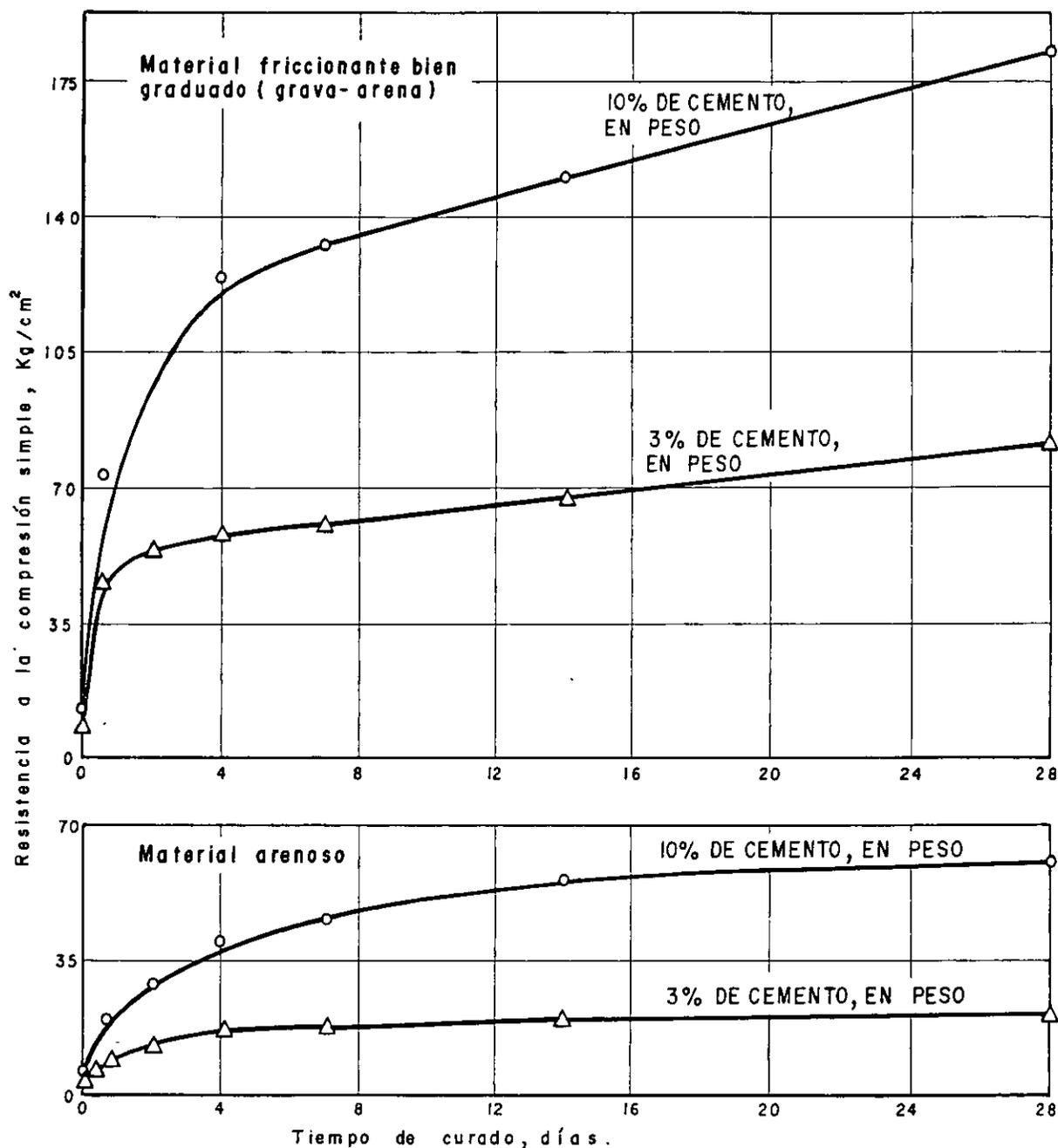


Figura XVI-15. Influencia del tiempo de curado de las mezclas en la resistencia a la compresión simple. (Ref. 14)

dicha resistencia, en función del contenido de cemento del suelo y del tiempo de curado, para las condiciones de los suelos empleados y para el tipo específico de resistencia manejada. Obviamente, el tiempo de curado y el contenido de cemento son factores que hacen crecer la resistencia a la tensión, al igual que la resistencia a la compresión simple.

En la misma Ref. 20 se proporciona una correlación entre las resistencias a tensión y a compresión simple, válida, claro está, sólo para las particulares condiciones de prueba adoptadas. Dicha correlación aparece en la Fig. XVI-24.

La resistencia a la tensión se midió en una prueba de tensión uniaxial sobre especímenes cilíndricos; la resistencia a la compresión, con los métodos tradicionales.

Otros esfuerzos encaminados a estudiar la resistencia de los suelos estabilizados a la tensión figuran en las Refs. 21, 22, 23, 24, y 25.

También han sido objeto de interés reciente propiedades de los suelos tratados con cemento bajo cargas dinámicas (Ref. 26).

La Tabla XVI-12 (Ref. 26) proporciona la va-

riación de propiedades estáticas y dinámicas para arenas y arcillas tratadas con diferentes porcentajes de cemento en peso, referidas las propiedades está-

ticas a un módulo de elasticidad y las dinámicas a un módulo dinámico de resistencia al esfuerzo cortante.

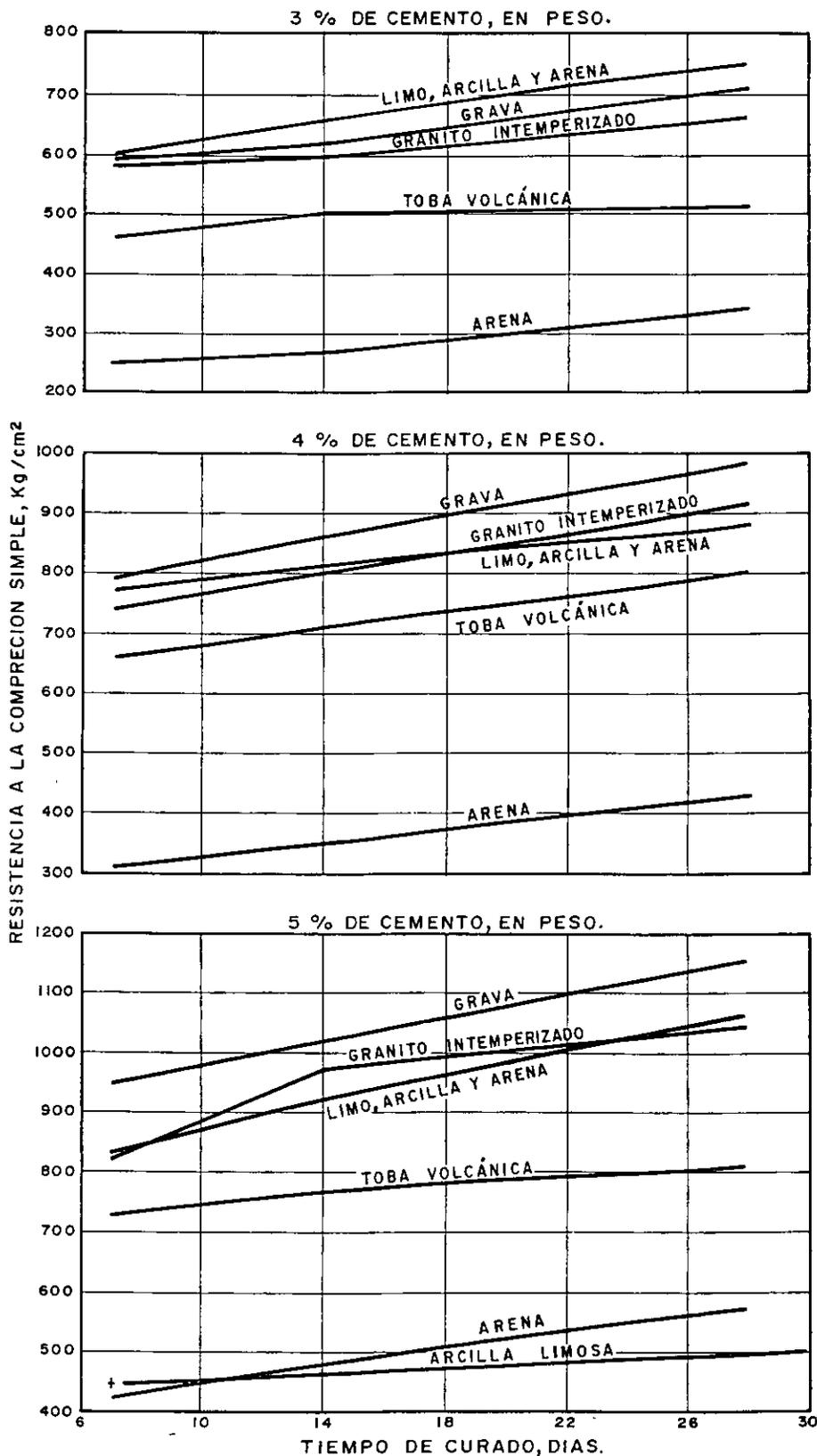


Figura XVI-16. Influencia del tiempo de curado en la resistencia a la compresión simple de varios materiales. (Ref. 14)

Tabla XVI-12 (Ref. 26)

Efecto del contenido de cemento en las propiedades estáticas y dinámicas de las mezclas

<i>Suelo</i>	<i>Contenido de cemento</i>	<i>Módulo de Elasticidad</i>	<i>Módulo dinámico de resistencia al esfuerzo cortante.</i>
—	%	kg/cm ²	kg/cm ²
Arena	0	45	950
	2	144	1930
	4	165	2700
	6	480	4750
Arcilla	0	55	1260
	2	56	1300
	4	150	1830
	6	600	4900

Particular interés se ha dado en los estudios de suelo-cemento en pavimentos a los fenómenos de fatiga, causada por efectos de carga repetida. El número de repeticiones de carga que llega a causar la falla se ha relacionado con el radio de curvatura de la parte de la capa tratada que se flexiona bajo una llanta cargada o bajo una placa de carga, en una prueba de este estilo (Refs. 27 y 28). En estos estudios se ha visto que el efecto del módulo de reacción de la subrasante (K) es pequeño y que el contenido de cemento tiene en los resultados de las pruebas con carga repetida una influencia menor de lo que en principio fuera de pensar; el nivel de la carga repetida, en relación con la carga de falla, sí es importante y también lo es la naturaleza del suelo que forma la mezcla, que para estas investigaciones suele dividirse en dos grupos:

— Suelos granulares, con menos de 35% como fracción más fina que la malla No. 200 (en general, suelos SC , SP , SM , GC).

— Suelos finos, con más de 35% menor que la malla No. 200 (en general suelos ML , CL , OL , MH , CH , OH y P_t).

Como resultado de estos trabajos suele llegarse en la literatura a ecuaciones que limitan el radio de curvatura de la parte de la capa flexionada por la carga a un cierto valor, tras aplicar un número fijo de repeticiones de carga. A modo de ejemplo se mencionan las ecuaciones siguientes (Ref. 27):

$$R = \frac{0.3h^{3/2}}{h - 1.2} R_c N^{0.025} \quad (\text{material granular}) \quad (16-6)$$

$$R = \frac{0.3h^{3/2}}{h - 1.2} R_c N^{0.050} \quad (\text{material fino}) \quad (16-7)$$

Donde:

R = radio de curvatura permisible para un número N de repeticiones de carga, en cm.

R_c = radio de curvatura crítico, que provoca la falla de la capa tratada con las N repeticiones de carga y que depende del nivel de carga empleado, de las características de la mezcla, etc., según se comentó, en cm.

h = espesor de la capa tratada, en cm.

N = número de repeticiones de la carga, sea ésta una llanta cargada o una placa que represente en el estudio a la condición de tránsito.

C. Los métodos constructivos

Las operaciones constructivas de una capa de suelo-cemento constan de las siguientes etapas:

- Escarificación, pulverización y pre-humedecimiento del suelo, si fuera necesario
- Dosificación y aspersión del cemento

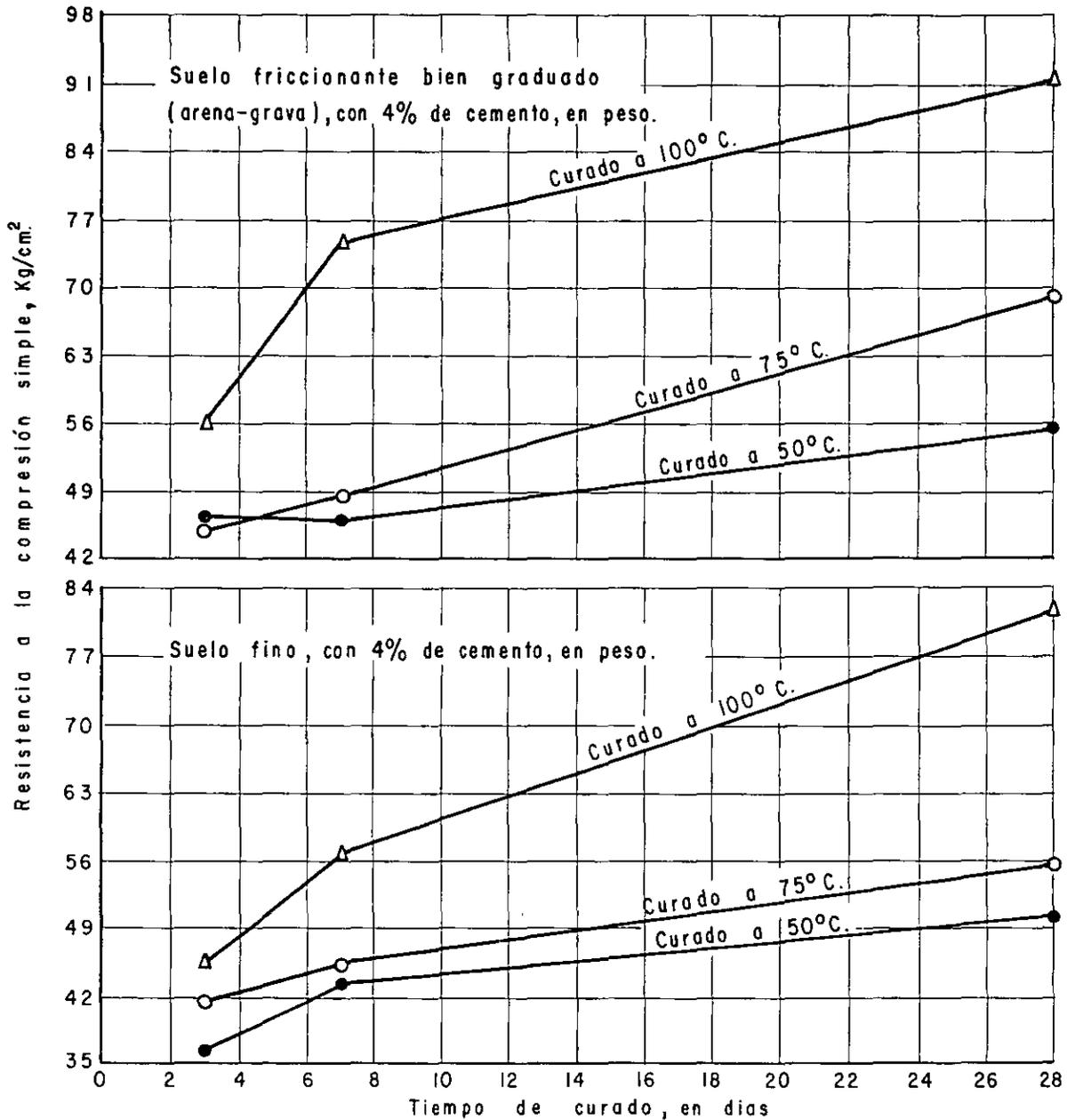


Figura XVI-17. Influencia de la temperatura y el tiempo de curado en la resistencia a la compresión simple. (Ref. 14)

- Aplicación del agua
- Mezclado de los materiales
- Compactación
- Acabado
- Curado

Los materiales gruesos de naturaleza friccionante suelen requerir escarificación, pero los suelos plásticos usualmente sí la necesitan. Es usual no aceptar grumos mayores de tres centímetros ya en el momento de la mezcla con el cemento y se especifica generalmente también que el 80% de los gru-

mos de la misma deben pasar la malla No. 4 (Ref. 12). También es común fijar en cinco centímetros el tamaño máximo de las partículas individuales del suelo. El pre-humedecimiento puede ayudar en las operaciones de escarificación y pulverización, reduciendo muchas veces los tiempos de maniobra.

En los suelos arenosos el mezclado con el cemento puede hacerse casi en cualquier condición, pero en los arcillosos suele requerirse una humedad menor que la óptima. La dosificación de la mezcla puede hacerse por medios mecánicos, manejando el cemento en sacos o con el uso de una planta central. La aspersión mecánica se realiza con una aspersora de cemento unida a un camión; existen mezcladoras autopropulsadas. El cemento puede dosifi-

carse como un porcentaje del volumen o del peso del suelo. La Ref. 12 contiene útiles diagramas para facilitar cálculos de campo en las operaciones de dosificación.

Cuando no se cuenta con aspersora de cemento, éste puede manejarse directamente con sacos, procurando lograr un tendido uniforme y rastreando posteriormente.

La planta dosificadora constituye, sin duda, el mejor sistema para el mezclado del cemento con el suelo y con el agua. Cuando se usa, es común que esta última se añada en un 2% adicional al conteni-

do óptimo para compensar pérdidas de manejo. La incorporación del agua no es tan simple cuando no se usa planta, de la misma manera que resulta inseguro en este caso cualquier método para mezclar los tres componentes fundamentales. Naturalmente que existen máquinas mezcladoras para el caso, que recogen al suelo cubierto de cemento de camellones y lo van removiendo sucesivas veces, a la vez que se incorpora el agua, generalmente manejada con camiones tanque; son comunes tres pasadas de la mezcladora con incorporación de agua en la segunda.

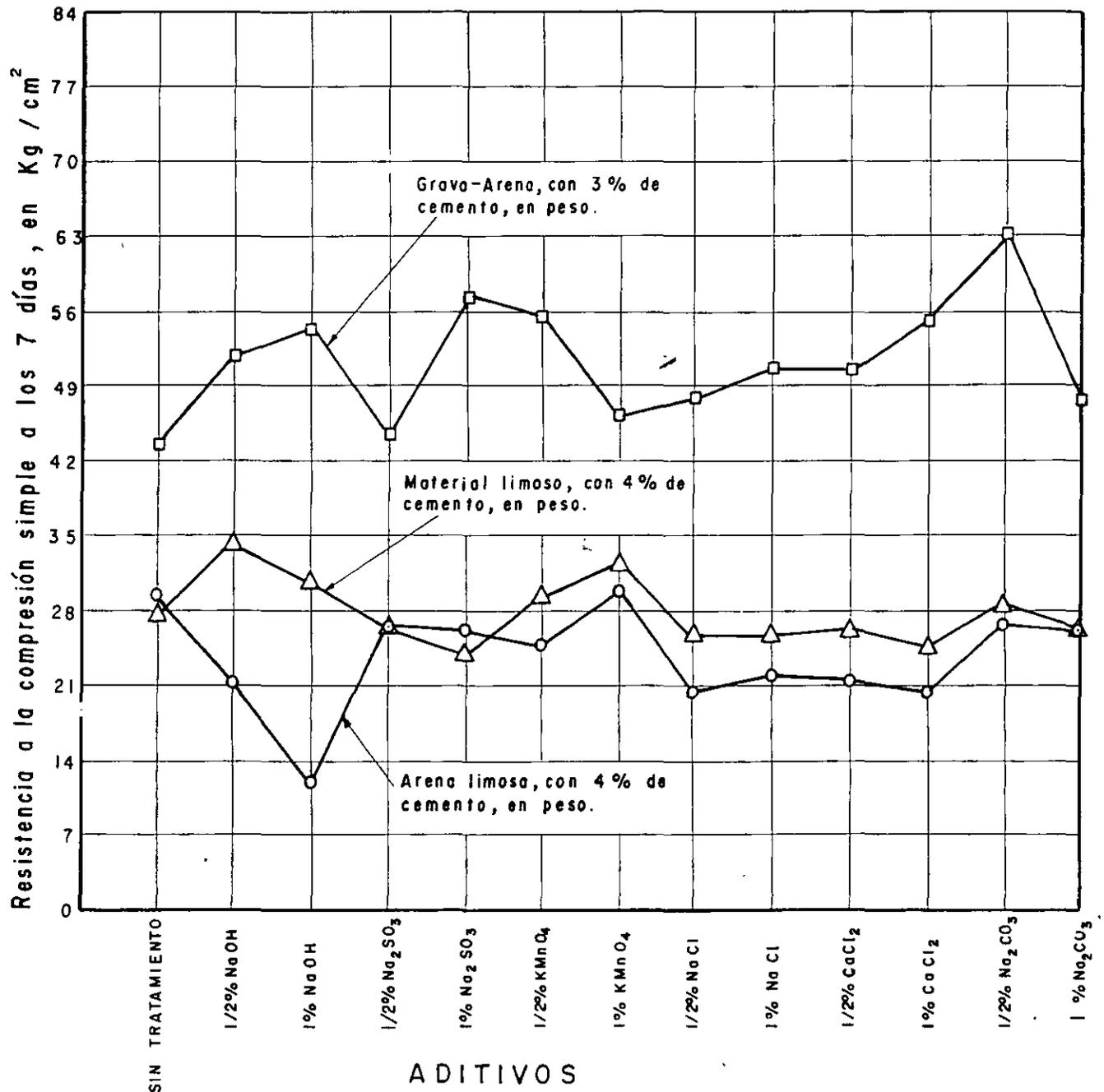


Figura XVI-18. Influencia en la resistencia a la compresión simple, del uso de varios aditivos químicos. (Ref. 14)

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE, Kg/cm².

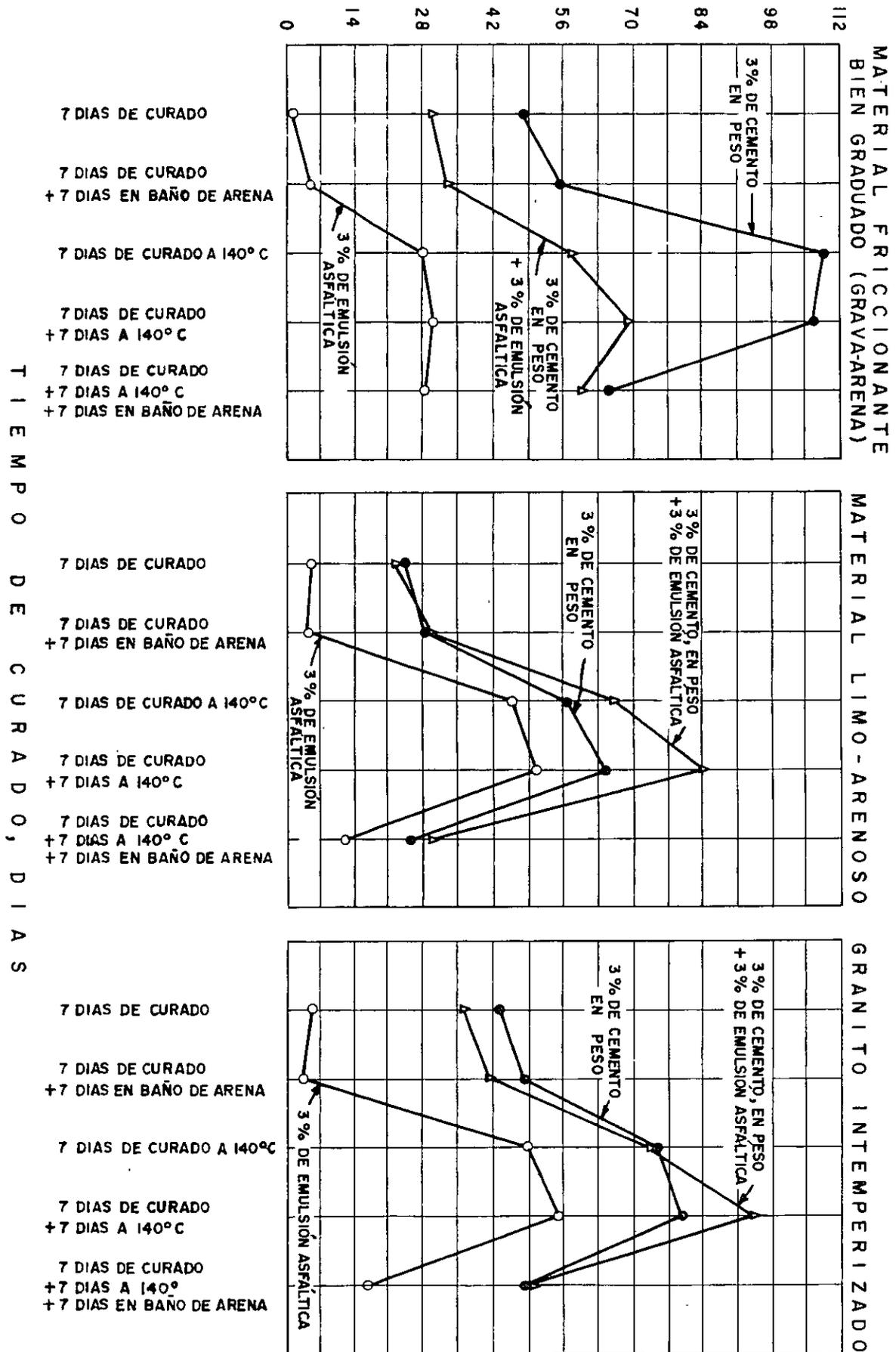


Figura XVI-19. Efecto de la compresión simple, en especímenes de mezclas de suelo-cemento, al añadir emulsiones asfálticas en diferentes porcentajes. (Ref. 4)

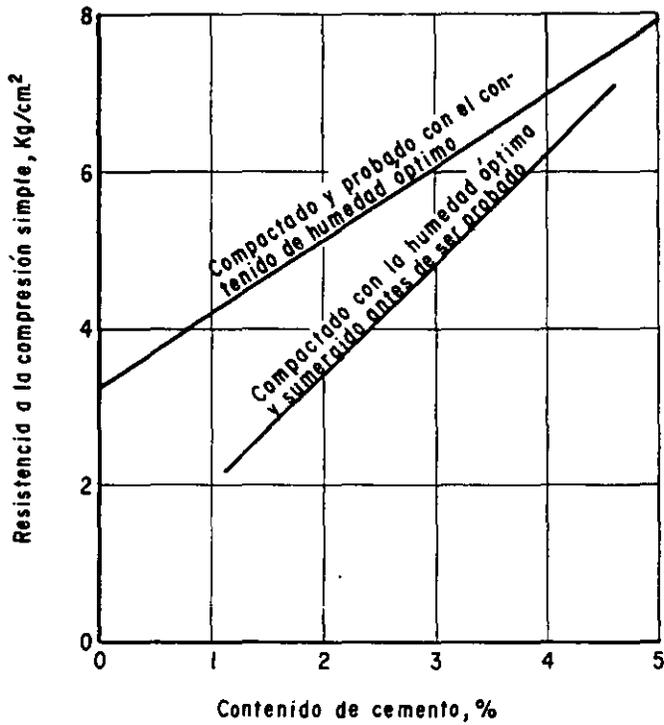


Figura XVI - 20. Efecto de la reducción en la resistencia a la compresión simple, al ser saturado el espécimen de suelo-cemento, antes de ser probado. (Ref. 1)

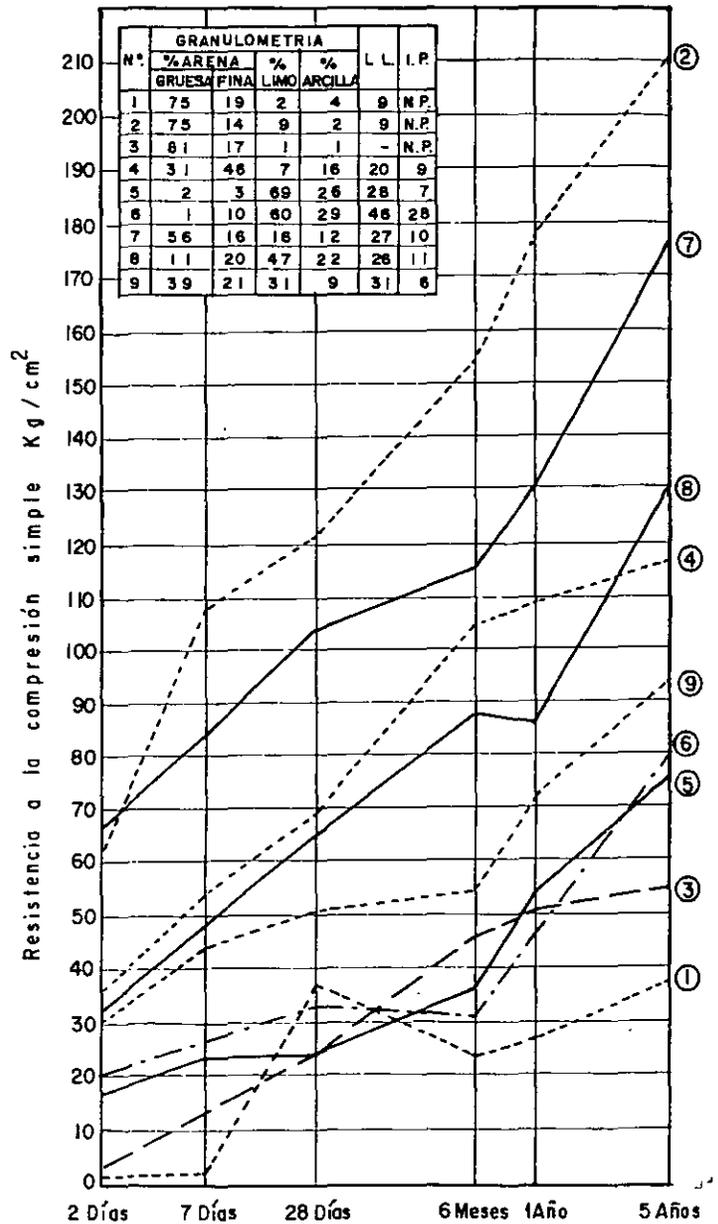


Figura XVI - 21. Efecto del tiempo de almacenamiento de especímenes de suelo-cemento en cuarto húmedo en su resistencia a la compresión simple. (Ref. 15)

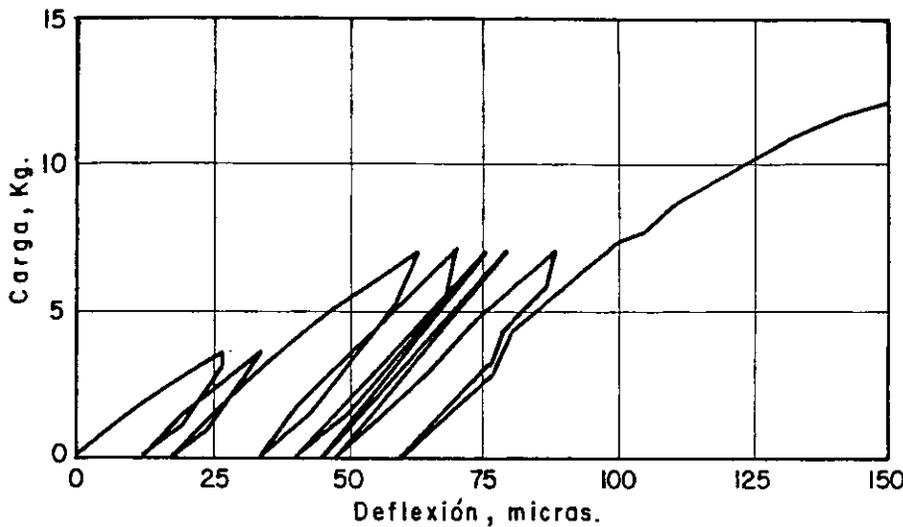


Figura XVI-22. Efecto de la carga repetida en un espécimen de arcilla estabilizada con 10% de cemento. (Ref. 7)

Las máquinas mezcladoras múltiples facilitan el mezclado y lo hacen más preciso; levantan al material, lo pulverizan y lo mezclan con unos primeros rotores, se añade el agua en el paso de un segundo grupo de ellos y los rotores posteriores remueven todos los ingredientes y tienden el material para su compactación inicial.

En resumen puede decirse que existe un sinnúmero de métodos para tender y mezclar al suelo-cemento, que van desde el manejo en camellones y tendido con motoconformadora, hasta el empleo de diferentes mezcladoras, de varios pasos o de uno solo o hasta el empleo de plantas mezcladoras.

Cuanto más íntima sea la mezcla suelo-cemento-agua se tendrá un mejor resultado y una mayor resistencia. Lo bien que se logre este efecto no es una función lineal de la energía de mezclado (Ref. 16), sino que depende naturalmente del procedimiento empleado en el campo. El hecho reconocido de que las resistencias de campo rara vez igualan a las de laboratorio, para los mismos proporcionamientos, se atribuye en general a deficiencias de mezclado en la obra. La homogeneidad del mezclado es también una condición esencial. El tiempo de mezclado es un factor importante en el logro de ambos requerimientos, mezclado íntimo y homogeneidad; la resistencia crece mucho con el tiempo de mezclado, pero este crecimiento no es lineal y, para un método dado, los beneficios del tiempo transcurrido decrecen a medida que dicho tiempo transcurre. El empleo de tiempo excesivo puede favorecer la segregación de partículas de suelo, lo que va contra la homogeneidad de la mezcla; además, habida cuenta de que la hidratación del cemento está teniendo lugar, una maniobra de mezclado excesivamente larga puede estar rompiendo los nexos recién creados entre el cemento y las partículas de suelo.

En la Ref. 1, se define una Eficiencia de Mezclado como la relación entre la resistencia del material mezclado en el campo y compactado en el laboratorio y la resistencia del mismo cuando se mezcla y

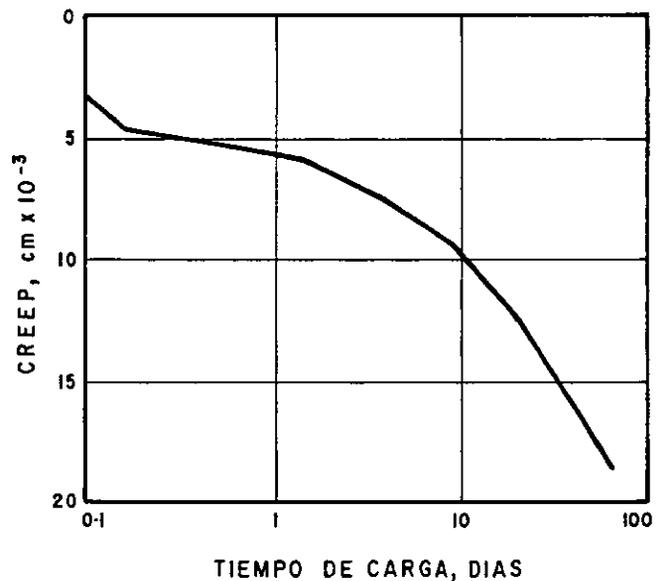


Figura XVI-23. Efecto de deformación acumulativa bajo carga constante, en especímenes de arcilla estabilizada con 10% de cemento. (Ref. 1)

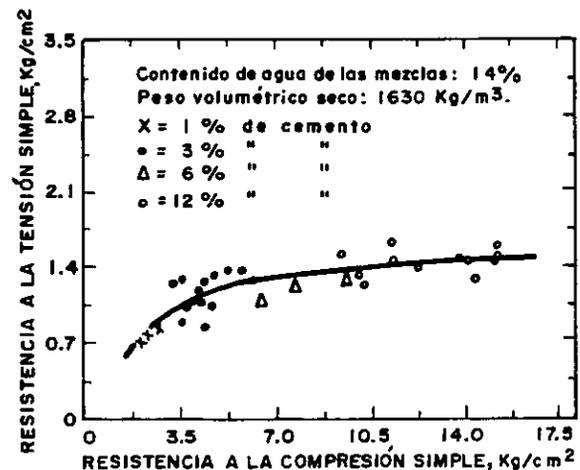


Figura XVI-24. Relación entre la resistencia a la compresión simple y la resistencia a la tensión simple de especímenes de limo tratados con cemento. (Ref. 20)

compacta en el laboratorio. Es raro lograr en la obra una eficiencia superior a un 80% y valores del 60% son normales.

La compactación del suelo-cemento es gobernada por los mismos principios que la de los suelos, tal como fueron expuestos en el Capítulo IV de este libro. Los equipos de pata de cabra suelen ser los más usados para la compactación inicial, en tanto que los rodillos vibratorios se utilizan cada día más para suelos muy granulares. Como es normal en las técnicas de compactación en general, los rodillos neumáticos tienen cada día más aceptación en casi todos los tipos de suelos, si bien se han utilizado más en los relativamente granulares sin contenido excesivo de finos. Los rodillos lisos se utilizan sobre todo como terminadores.

Una capa tendida y compactada de suelo-cemento requiere que su contenido de agua no se pierda durante un cierto tiempo, para que el cemento se hidrate adecuadamente. Para tal fin es común cubrirla con algún material que impida la pérdida de humedad. Los materiales asfálticos, los plásticos, el papel impermeable o aún la paja o telas humedecidas son materiales de uso común para tales fines. Si el uso de estos materiales se retrasa, la superficie de la capa debe mantenerse húmeda mediante riegos ligeros y continuos.

Un problema que preocupa mucho a los constructores de capas de suelo-cemento es la verificación del grado de mezclado y la homogeneidad de la mezcla obtenida, en el sentido de definir si se han cumplido o no los proporcionamientos de proyecto. El problema es evidentemente de control de calidad.

La Ref. 17 menciona un procedimiento elaborado para medir un Índice de Uniformidad de la mezcla, función de la distribución al azar del cemento y de la homogeneidad conseguida. El método requiere el control de la resistencia de un gran número de muestras objeto de un muestreo estadístico y aunque el procedimiento resulta más seguro que un simple control por análisis de una muestra

extraída por cada determinada unidad de área, criterio muy inseguro, pero de uso extendido, resulta tan complicado en la práctica que debe considerarse poco útil para trabajos de rutina.

La Ref. 16 sugiere un método que consiste en mezclar con el cemento una cierta cantidad de material radioactivo, cuya huella puede después seguirse en la capa tendida con un contador apropiado. Obviamente la precisión depende de lo homogéneamente que logre incorporarse el material radioactivo al cemento.

La eficiencia de mezclado, tal como ha sido definida más arriba se ha utilizado también como una medida del resultado obtenido en el campo.

La Ref. 18 describe con mucho detalle una prueba que se ha empleado con éxito en diversas partes del mundo, incluyendo a México, para establecer de un modo muy preciso y relativamente sencillo el contenido de cemento de muestras obtenidas de la capa tratada. Esta prueba a la que se ha denominado de Titulación tuvo su origen en la práctica californiana (Ref. 19).

El espécimen de prueba es una mezcla de un fragmento del suelo-cemento de la capa probada, debidamente pulverizado, disuelto en agua; tras un período de reposo, la fracción gruesa del suelo se deposita y puede disponerse de una suspensión de suelo fino y cemento en agua. La prueba en sí se ejecuta en dos modalidades, la ácido-álcali establecida para los casos en que no hay reacción entre las partículas de suelo y el ácido clorhídrico y la de neutralización constante, a utilizarse en aquellos casos en que haya reacción (suelos calcáreos u otros).

En la prueba ácido-álcali se añade a la suspensión de suelo-cemento y agua una cantidad de ácido clorhídrico y otra de fenoltaleína. A la combinación así lograda se le añaden, por goteo, cantidades de hidróxido de sodio, contando el volumen necesario para que el conjunto adquiera una coloración roja característica. Este volumen mide directamente la cantidad de cemento presente en la mues-

Tabla XVI-13

Contenidos típicos de cemento para varios tipos de suelos en la tecnología de pavimentos (Ref. 1)

<i>Tipo de suelo</i>	<i>Porcentaje de cemento, en peso</i>
Material triturado de roca	0.5 - 2*
Gravas areno-arcillosas bien graduadas	2 - 4
Arenas bien graduadas	2 - 4
Arenas uniformes	4 - 6**
Arcilla arenosa	4 - 6
Arcilla limosa	6 - 8
Arcilla	8 - 12
Arcilla muy activa	12 - 15***
Suelos orgánicos	10 - 15****

- * El cemento se usa sobre todo para dar trabajabilidad, reducir la sensibilidad del suelo al contenido de agua de compactación y para evitar deformaciones de capa tendida bajo el tránsito del equipo de construcción.
- ** La compactación puede volverse muy difícil y hay riesgo de segregación del cemento.
- *** El mezclado puede ser muy difícil y un pre-tratamiento con cal, suele representar una gran ayuda.
- **** Puede ayudar significativamente un pre-tratamiento con cal o con 2% de cloruro de calcio.

tra, utilizando una curva de calibración previa en la que se han medido los volúmenes de hidróxido de sodio necesarios para producir la reacción en una serie de especímenes cuidadosamente formados en el laboratorio, mezclando la matriz de suelo que se utilice y distintos porcentajes de cemento.

En la prueba de neutralización constante, la suspensión de suelo-cemento y agua se combina únicamente con fenolftaleína, añadiéndose posteriormente ácido clorhídrico por goteo y es la cantidad necesaria de este último para producir la coloración roja, la que revela la cantidad de cemento, haciendo uso de una curva de calibración análoga a la antes descrita.

Las Refs. 18 y 19 contienen, además de todos los detalles de la prueba, un método establecido de laboratorio para discriminar cuál es la variedad de prueba que debe utilizarse en un caso particular dado.

Al utilizar la prueba de titulación puede controlarse con mucha facilidad el contenido de cemento de un gran número de especímenes de la capa tendida; si se efectúa un muestreo representativo sí podrá garantizarse la calidad del producto final obtenido.

La Tabla XVI-13 (Ref. 1) proporciona los porcentajes típicos de cemento, en peso, que suelen requerir distintos tipos de suelos cuando se emplean en capas tratadas de pavimento.

D) Diseño de espesores

En la actualidad, los métodos de diseño de espesores de capas de suelo-cemento atienden sobre todo al efecto de fatiga, que ya ha sido mencionado. Para tal fin, requieren conocer la distribución de tránsito, en cargas por eje sencillo o doble y de peso diferente, susceptible de presentarse durante el período de diseño.

El efecto de fatiga que produce individualmente cada uno de los ejes que han de transitar por la capa, se maneja a fin de cuentas a través del denominado factor de fatiga, un valor único que expresa el efecto total del tránsito durante el período de diseño, en lo referente a tal concepto. La Tabla XVI-14 (Refs. 27 y 28) muestra los llamados Coeficientes de Fatiga Básica, que representan las equivalencias de los efectos que diferentes cargas por eje producen en relación a los que causa un eje sencillo de 8.2 Ton. (18000 Lb.) o un eje tandem de 13.6 Ton. (3000 Lb.).

Tabla XVI-14 (Refs. 27 y 28)

Coeficientes de Fatiga Básica para diseño de espesores de suelo-cemento en pavimentos.

<i>Carga por eje</i>	<i>Suelo-cemento con matriz granular</i>	<i>Suelo-cemento con matriz fina</i>
<i>Ton.</i>	_____	_____
<i>Eje sencillo</i>		
13.6	12500000	3530
12.7	1270000	1130
11.8	113000	337
10.9	8650	93
10.0	544	23.3
9.1	27	5.2
8.2	1	1.0
7.3	.12	0.16
6.4	.012	0.02
5.4	.001	0.002

Tabla XVI-14 (cont.)

<i>Carga por eje</i>	<i>Suelo-cemento con matriz granular</i>	<i>Suelo-cemento con matriz fina</i>
<i>Ton</i>	_____	_____
<i>Eje tandem</i>		
22.7	12500000	3530
21.8	3210000	1790
20.9	792000	890
20.0	186000	431
19.1	41400	203
18.2	8650	93
17.3	1690	41.1
16.3	305	17.5
15.4	50.4	7.1
14.5	7.5	2.7
13.6	1.0	1.0
12.7	0.12	0.34
11.8	0.012	0.11
10.9	0.0010	0.03
10.0	—	0.008
9.1	—	0.002

Los coeficientes de Fatiga Básica de la Tabla se multiplican por el número de ejes de cada clase (en miles) que haya, según la distribución de tránsito de que se disponga y el valor total de la suma de estos productos proporciona el valor de fatiga de diseño.

Con dicho valor de fatiga de diseño puede entrarse ahora a las gráficas de la Fig. XVI-25 (Refs. 27 y 28), en las que puede obtenerse el espesor de la capa tratada con cemento, para casos de suelo granular y suelo fino, en función del módulo de reacción de la subrasante (Capítulo IX).

XVI-5 ESTABILIZACION DE SUELOS CON CAL.

La estabilización de suelos con cal parece ser la más antigua forma de mejoramiento de suelos por este estilo de métodos. Hay evidencias de que la Vía Apia, acceso a la antigua Roma, se construyó utilizando estas técnicas (Ref. 11). En términos generales, las técnicas de estabilización con cal hidratada son bastante similares a las de la estabilización con cemento, pero hay dos aspectos de diferencia que conviene destacar desde un principio (Ref. 1). En primer lugar la cal tiene un espectro de aplicación que se extiende mucho más hacia los materiales más arcillosos que el cemento y, en con-

trapartida, se extiende algo menos hacia el lado de los materiales granulares de naturaleza friccionante. En segundo lugar, está el uso cada día más extendido que se hace de la estabilización con cal como un pre-tratamiento, lo que da una fisonomía especial a muchos de los usos de cal, pues en estos casos no necesariamente han de satisfacerse todos los requerimientos de una estabilización definitiva.

La forma más usual de la cal empleada en las estabilizaciones es la hidratada, óxidos o hidróxidos de calcio. Los carbonatos de calcio no tienen virtudes estabilizantes dignas de mención. La cal viva se utiliza con frecuencia en pre-tratamientos con suelos húmedos. El efecto básico de la cal es la constitución de silicatos de calcio que se forman por acción química de la cal sobre los minerales de arcilla, para formar compuestos cementadores.

La cal se prepara generalmente calentando carbonatos de calcio, muchas veces bajo la forma de calizas naturales, hasta que pierden su bióxido de carbono y devienen en óxidos de calcio; el material resultante es cal viva, muy inestable y ávida de agua, lo que hace difícil su manejo y almacenamiento, por lo que suele hidratarse de inmediato.

Para formar la cal estabilizante no es preciso partir de calizas puras, sino que pueden tolerarse algunas impurezas. La Tabla XVI-15 (Ref. 1) expresa los requisitos que suelen pedirse a la materia prima para formar cal estabilizante.

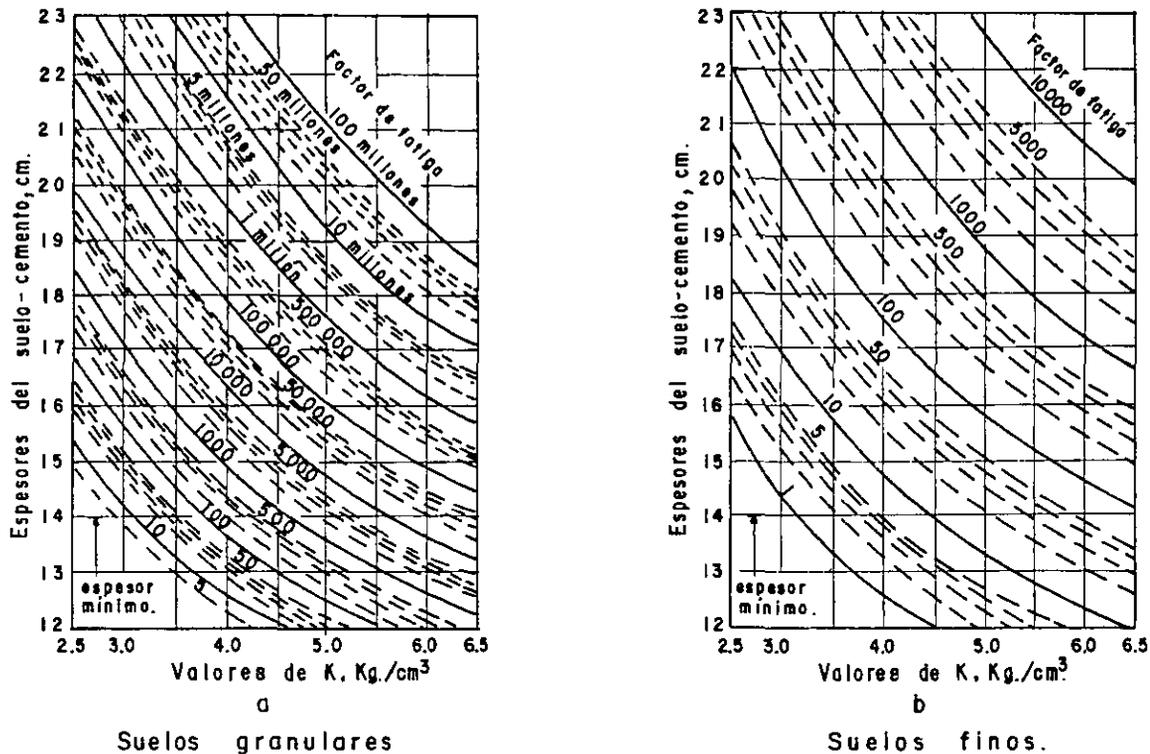


Figura XVI-25. Gráficas para diseño de espesores de capas de suelo-cemento. (Refs. 27 y 28)

Tabla XVI-15

Requerimientos de las calizas y carbonatos de calcio naturales para formar cal estabilizante (Ref. 1).

Propiedad	Cal Viva CaO	Cal hidratada $Ca(OH)_2$
Oxidos de calcio magnesio	No menos de 92%	No menos de 95%
Bióxido de carbono En el horno	No más de 3%	No más de 5%
Fuera del horno	No más de 10%	No más de 7%
Finura	—	No más de 12% retenido en la malla No. 180

Hay dos tipos de reacciones químicas entre la cal y el suelo. La primera es inmediata e incluye una fuerte captación de iones de calcio por las partículas de suelo, lo que deprime su "doble capa" (Capítulo I), a causa del incremento en la concentración de cationes en el agua; a la vez ocurre otro efecto que tiende a expandir la doble capa por el alto pH de la cal. La segunda reacción tiene lugar a lo largo de lapsos considerables y es la reacción propiamente cementante; aunque no es completamente bien conocida, se atribuye a una interrelación entre los iones calcio de la cal y los componentes aluminicos y silicosos de los suelos; de hecho, esta última reacción puede reforzarse añadiendo al suelo cenizas

ricas en sílice.* La reacción cementante tiene lugar a través de la formación de silicatos de calcio y es muy dependiente del tipo de suelo que en ella intervenga; en esto, la estabilización con cal difiere mucho de la estabilización con cemento.

En la Ref. 29 se presenta una información muy interesante en relación al efecto que tiene sobre la resistencia del suelo-cal obtenido, la inclusión de diversas cantidades de varios silicatos de sodio. Las pruebas se hicieron con base en un material limoso y los resultados se muestran en la Tabla XVI-16 (Ref. 29).

*La formación de silicatos cálcicos se atribuye sobre todo a las caolinitas y la de aluminatos cálcicos a las montmorilonitas.

Tabla XVI-16 (Ref. 29)

Efecto de la inclusión de silicatos de sodio, como aditivo, en la resistencia de suelos estabilizados con cal, después de siete días de curado y un día de inmersión. Suelos limosos

<i>Cal</i>	<i>Tipo de Silicato</i>	<i>Cantidad de Silicato</i>	<i>Resistencia a la compresión simple de la mezcla</i>
%	—————	%	kg/cm ²
2	Na ₃ HSiO ₄ ·5H ₂ O	0	8.9
2	Na ₃ HSiO ₄ ·5H ₂ O	2	8.4
2	Na ₃ HSiO ₄ ·5H ₂ O	4	7.0
4	Na ₃ HSiO ₄ ·5H ₂ O	0	9.0
4	Na ₃ HSiO ₄ ·5H ₂ O	2	14.4
4	Na ₃ HSiO ₄ ·5H ₂ O	4	16.2
6	Na ₃ HSiO ₄ ·5H ₂ O	0	7.4
6	Na ₃ HSiO ₄ ·5H ₂ O	2	16.9
6	Na ₃ HSiO ₄ ·5H ₂ O	4	20.0
6	Na ₃ HSiO ₄ ·5H ₂ O	5.3	16.7
6	Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O	8	16.1
6	Na ₂ SiO ₃	3.4	15.7
6	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	6.0	16.8
6	Na ₄ SiO ₄	3.8	11.7

Puede observarse que para muy bajos contenidos de cal, la influencia del aditivo no es notable, pero con contenidos más altos de cal hidratada, sí pueden obtenerse ventajas significativas del uso de pequeñas cantidades de un aditivo que, por otra parte es muy fácil de manejar e incorporar.

La cal tiene poco efecto en suelos muy orgánicos o en suelos sin arcilla. Tiene su máximo efecto en las gravas-arcillosas, en las que puede producir mezclas inclusive más resistentes que las que se obtendrían con cemento. Ha obtenido su utilización más frecuente en arcillas plásticas, a las que hace, adicionalmente, más trabajables y fáciles de compactar, razón por la que se usa frecuentemente como pre-tratamiento, anterior a una estabilización con cemento, además de los muchos casos en que se usa como estabilizante definitivo. El efecto de la cal en las arcillas es más rápido en las montmoriloníticas

que en las caoliníticas y en las primeras la cal logra resultados mucho más espectaculares en el aumento de resistencia y, sobre todo, en la disminución de la plasticidad. En las arcillas, la cal tiene también un importante efecto en la consecución de estabilidad volumétrica ante el agua.

En la estabilización con cal debe evitarse el uso de aguas ácidas. El agua de mar se ha usado para compactar suelo-cal con frecuencia, pero debe evitarse allí donde se vaya a colocar un riego de sello asfáltico sobre la capa tratada, pues la cristalización de las sales desprenderá el sello. La cantidad de agua que se emplee está regida por los procedimientos de compactación, pero si se usa cal viva pudieran requerirse cantidades adicionales de agua en suelos con menos de 50% de contenido natural de dicho elemento (Ref. 1).

En los siguientes párrafos se pasará una breve

revista a las propiedades más significativas del suelo-cal y a los factores que en ellas influyen.

A - Plasticidad

La cal disminuye mucho el índice de plasticidad de los suelos muy plásticos (montmorilonitas, bentonitas, etc.), tiene poca influencia en el índice plástico de los suelos de plasticidad media y puede aumentar el índice de plasticidad de los suelos finos menos plásticos.

B - Resistencia

La Fig. XVI-26 (Ref. 1) muestra la variación de la resistencia a la compresión simple de varios suelos con el contenido de cal. Puede verse cómo la resistencia aumenta en términos generales hasta contenidos de cal del orden de 8%, en peso; más allá de ese límite es frecuente que la resistencia permanezca relativamente insensible al aumento de la proporción de cal, excepto en el caso de los materiales más arcillosos en los que la resistencia puede seguir aumentando para contenidos de cal de 10% o aún mayores (Ref. 11).

En esto la cal difiere del cemento, con el que la resistencia sigue aumentando para contenidos muy altos del estabilizante (arriba del 20%).

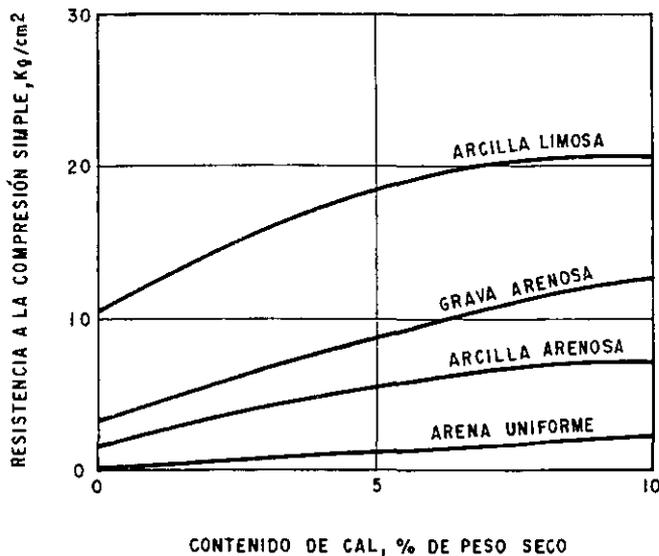


Figura XVI-26. Efecto del contenido de cal en la resistencia a la compresión simple de varios tipos de suelos estabilizados durante siete días con cal hidratada curada. (Ref. 1)

La Fig. XVI-27 (Ref. 1) muestra el efecto que sobre la resistencia a la compresión simple tiene la edad del suelo-cal en diferentes suelos. La resistencia aumenta con el tiempo en forma similar a como sucede con el cemento.

La Fig. XVI-28 (Ref. 11) establece la influencia del tiempo de curado en la resistencia a la com-

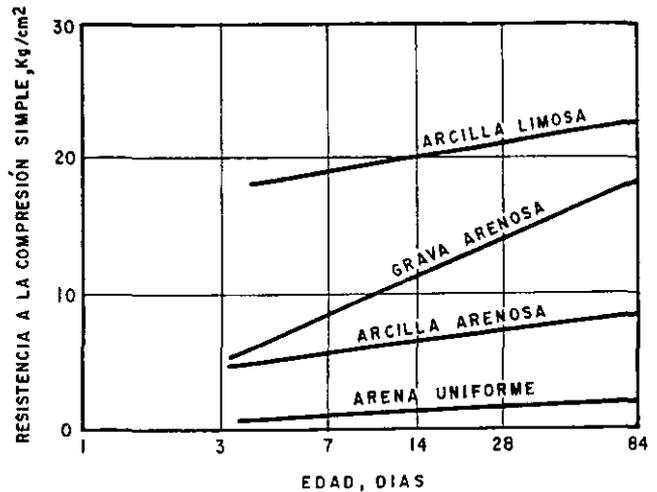


Figura XVI-27. Efecto de la edad de una mezcla de 5% de cal, en peso, con diversos tipos de suelos. (Ref. 1)

presión simple de especímenes de suelo-cal. En todos los casos se estabilizó un limo con 10%, en peso, de cal hidratada y las diferentes curvas que se presentan se refieren a la inclusión de diversos aditivos, en añadidura de la cal. La curva de control no contiene ninguno de estos aditivos. Los aditivos se usaron en proporciones comprendidas entre 1 y 2% de suelo seco.

La Fig. XVI-29 (Ref. 1) muestra el cambio en la resistencia de mezclas de suelo-cemento y suelo-cal en las primeras horas después de efectuada la estabilización; en este caso, la resistencia se refiere a pruebas de veleta hechas en el laboratorio. Aparece en la figura, como patrón, la resistencia del suelo no estabilizado, que fue una arcilla franca. Puede observarse como el efecto de la cal es un poco más consistente desde los primeros instantes, pero como el cemento produce un efecto mayor, una vez que comienza su hidratación.

El efecto de la materia orgánica en la resistencia puede ponerse de manifiesto en la Fig. XVI-30 (Ref. 30). En la figura se observa la variación de la resistencia a la compresión simple de una arcilla limosa con contenidos variables de materia orgánica. Los especímenes se prepararon con 12% de cal hidratada, en peso y con el contenido óptimo de agua y en un caso se curaron 7 días y en el otro 28

La Fig. XVI-31 (Ref. 30) ofrece otro estudio de interés sobre el efecto de la materia orgánica. En la parte a de la figura se muestran envolventes de resistencia en prueba rápida para especímenes de una arcilla muy plástica, totalmente exenta de materia orgánica y con contenidos variables de cal hidratada, mostrándose como curva patrón la correspondiente a la matriz de suelo solo. El tiempo de curado fue de 28 días en todos los casos. La parte b de la figura muestra envolventes análogas para una arcilla limosa, mucho menos activa, pero con 20% de materia orgánica. Los especímenes también se curaron durante 28 días y fueron compactados con la

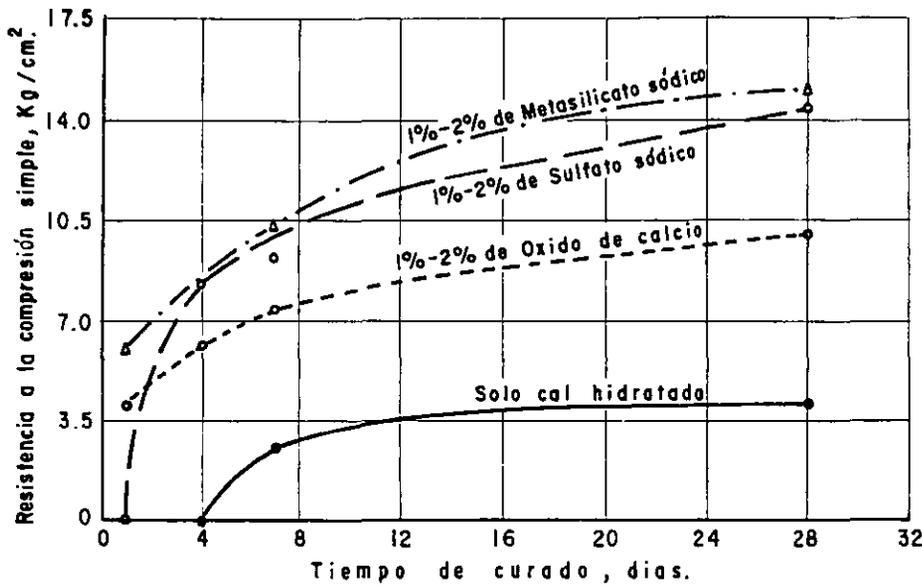
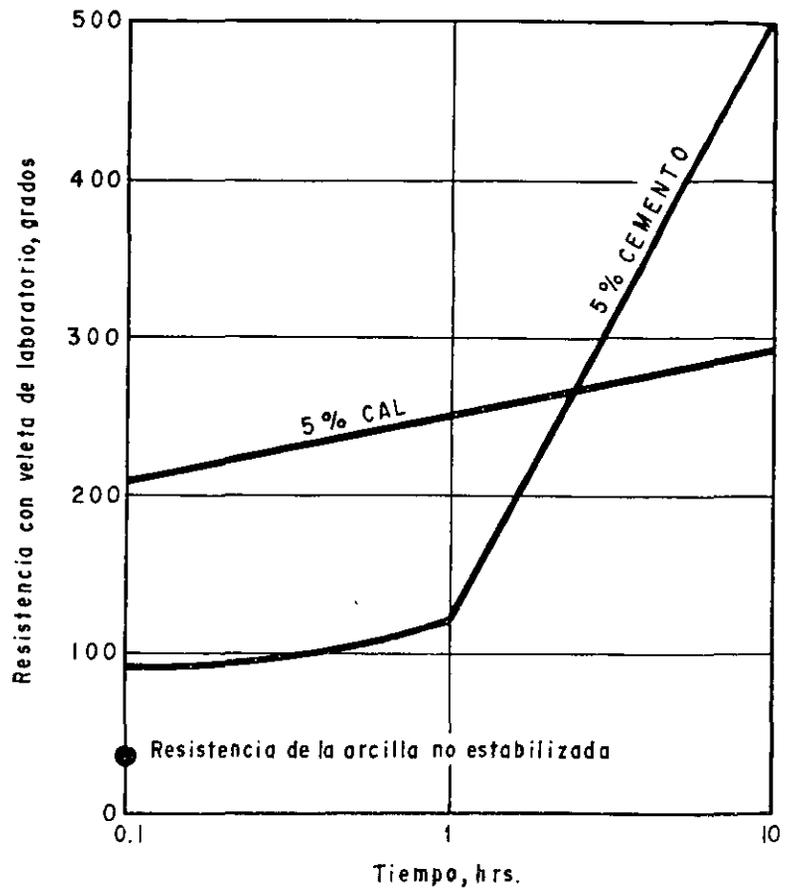


Figura XVI-28. Efecto del tiempo de curado de los especímenes en la resistencia a la compresión simple obtenida. Limo estabilizado con 10% de cal hidratada y las proporciones de aditivo que se citan. (Ref. 11)

Figura XVI-29. Cambio en la resistencia de una arcilla estabilizada durante las primeras horas después de la estabilización. (Ref. 1)



humedad óptima correspondiente a la misma prueba de impactos que se empleó para formar a los de la parte a. En términos generales puede verse cómo la materia orgánica hace que un suelo más resistente en principio exhiba resistencias menores que la arcilla de alta compresibilidad. Puede verse también cómo, en condiciones comparables, la adición de cal hace aumentar la cohesión aparente del material por efecto de cimentación. Si bien la parte a de la figura presenta al respecto una importante excepción, según la cual el material CH con 4% de

cal mostró una cohesión aparente mayor que el mismo material con 12% de cal; este hecho no es fácil de explicar al interpretar a la Fig. XVI-31.

C) Otras propiedades

La Fig. XVI-32 (Ref. 1) muestra el efecto que sobre el peso específico seco obtenido tiene el

tiempo que se deje transcurrir entre la elaboración de mezclas estabilizadas y el momento de la compactación. Se comparan una mezcla de arcilla activa y 10% de cemento, con otra de la misma arcilla y 10% de cal. Puede verse que el efecto del tiempo transcurrido tiene mucha menor importancia para la cal, a causa de las diferencias que ya se han comentado entre las primeras reacciones químicas de ambos estabilizantes. De la información de la figura puede deducirse, como regla de campo, que así como las mezclas con cemento han de compactarse inmediatamente después de formadas, las mezclas con cal pueden manejarse de forma menos expedita, lo que conduce a un proceso constructivo más cómodo y flexible; sin embargo, se ha observado que a medida que el tiempo pasa, las mezclas con cal requieren más agua para su compactación, por lo que dejar transcurrir tiempo en exceso pudiera introducir un costo extra de incorporación de agua adicional.

La Tabla XVI-17 (Ref. 1) muestra la influencia de la cal en la posibilidad de la pulverización y manejo de suelos. Se presenta información relativa a una arcilla con *L.L.* = 73% y *L.P.* = 27%. Después

de tratada con 5% de cal, la arcilla exhibió el mismo límite líquido, pero su límite plástico ascendió a 40%. La Tabla reporta los porcentajes de grumos de diferentes tamaños que se tuvieron en un caso y otro.

D) Procedimientos constructivos

La metodología de construcción del suelo-cal es en principio similar a la del suelo-cemento, al igual que lo son las pruebas de laboratorio que se utilizan actualmente para dar una idea de la calidad de los suelos obtenidos. Un buen criterio para preparar mezclas para estudio en el laboratorio es dar al suelo 1% de cal por cada 10% de fracción fina que contenga.

La Tabla XVI-18 (Ref. 1) da los contenidos de cal que son usuales para diferentes tipos de suelos. De nuevo, debe manejarse esta información simplemente como norma de criterio, sin permitir que excluya en ningún caso las determinaciones de laboratorio correspondientes.

Tabla XVI-17 (Ref. 1)

Efecto de la cal en la trabajabilidad de una arcilla

Malla	Porcentaje de grumos de suelo que pasan la malla	
	Arcilla sin tratar	Arcilla tratada con 5% de cal
2"	80	83
1"	40	50
1/2 "	17	28
1/4 "	7	19
1/8 "	4	15

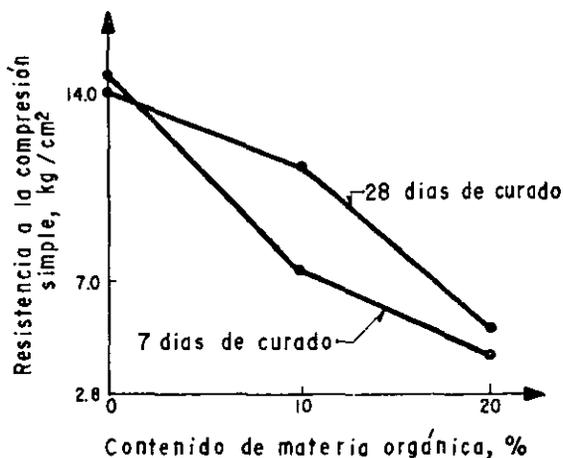


Figura XVI-30. Efecto del contenido de la materia orgánica en la resistencia a la compresión simple de una arcilla limosa estabilizada con 12% de cal hidratada. (Ref. 30)

Los pasos constructivos para la estabilización de capas de pavimento con cal son los siguientes:

- Escarificación del material de apoyo.
- Pulverización del suelo.
- Regado de la cal (en sacos o a máquina)
- Mezclado (a mano, con equipo o con máquinas mezcladoras).
- Incorporación del agua, si es necesaria para dar a la mezcla su humedad óptima de compactación.
- Compactación.
- Conformación.
- Curado mínimo de 5 días.
- Colocación de una superficie protectora.

E) Diseño de espesores

El criterio más usual en la tecnología de pavimentos es dar a una capa de suelo-cal el mismo

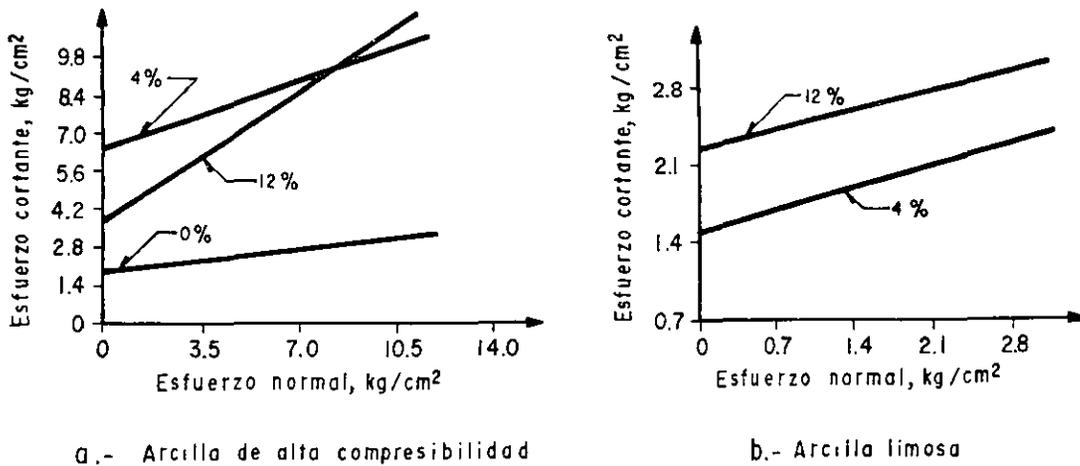


Figura XVI-31. Envolventes de resistencia rápida en una arcilla de alta compresibilidad, sin materia orgánica, estabilizadas ambas con cal. (Ref. 30)

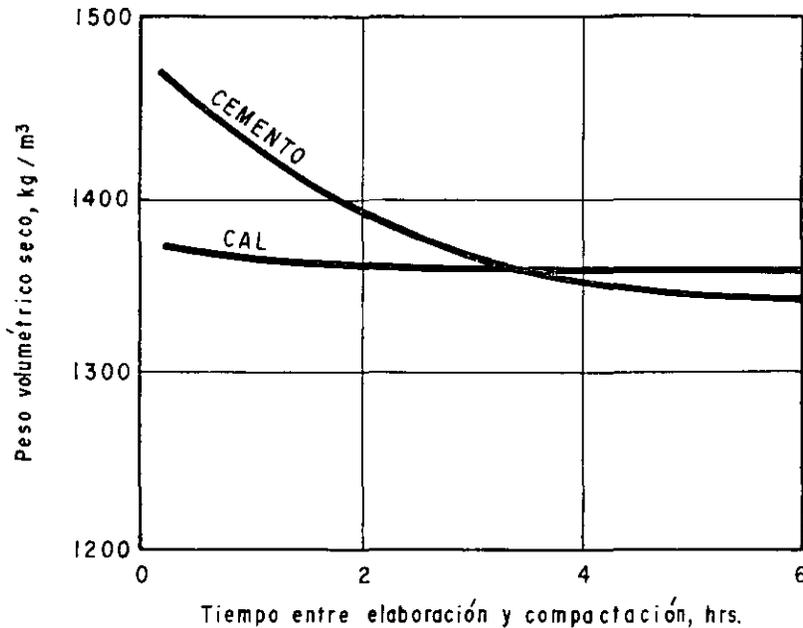


Figura XVI-32. Efecto del tiempo transcurrido entre la elaboración de mezclas de una arcilla activa con 10% de cal y de cemento (en peso) y su compactación, sobre el peso específico obtenido. (Ref. 1)

espesor que habría de darse a la misma, si sólo estuviera formada por la matriz de suelo. Cuando se usan métodos de diseño con base en *V.R.S.*, podrán formarse especímenes con diferentes contenidos de cal y diferentes contenidos de agua, obteniendo el *V.R.S.* de cada uno, hasta llegar al de diseño. Convendrá regular este criterio con la resistencia de suelo-cal y con otras propiedades que puedan considerarse de interés.

XVI-6. ESTABILIZACION CON ASFALTO

El mejoramiento de las propiedades de los suelos con el añadido de asfalto y productos asfálticos es una técnica socorrida y frecuentemente muy efectiva. Son tres los tipos de producto que se han usado para este fin (Ref. 11);

- Productos bituminosos, que son sistemas anhidros de hidrocarburos totalmente solubles en bisulfuro de carbono.

- Productos asfálticos, procedentes de la destilación y refinamiento del petróleo o asfaltos naturales, más raramente.
- Productos residuo de la destilación destructiva de materiales orgánicos, tales como el carbón, ciertos aceites, lignitos, turbas y madera (alquitranes).

La frontera entre estos productos no es clara y el análisis detallado de sus respectivas composiciones trasciende en mucho el interés de este libro y, probablemente, el de la gran mayoría de los ingenieros interesados.

Los productos asfálticos y bituminosos en general, son normalmente demasiado viscosos para que se puedan incorporar directamente a los suelos; por ello han de usarse calentados, emulsificados en agua (emulsiones) o rebajados con un solvente, generalmente volátil, como la gasolina.

Tabla XVI-18 (Ref. 1)
 Contenidos usuales de cal hidratada en diferentes
 suelos
 (porcentajes en peso de suelo seco)

Tipo de suelo	Pre-tratamientos	Estabilizaciones definitivas
—————	%	%
Roca triturada*	2-4	No recomendada
Gravas arcillosas bien graduadas	1-3	3
Arenas**	No recomendada	No recomendada
Arcilla arenosa	No recomendada	5
Arcilla limosa	1-3	2-4
Arcilla plástica	1-3	3-8
Arcilla muy plástica	1-3	3-8
Suelos orgánicos	No recomendada	No recomendada

* Sólo recomendable si tiene finos plásticos
 ** Conviene la cal con vistas a estabilización con asfalto, pues mejora la adherencia. En los loes conviene usar cal viva.

Las emulsiones y los asfaltos rebajados son los productos más usados en estabilizaciones de suelos, pero se usan también alquitranes calentados o rebajados. Los rebajados más usuales son los de fraguado lento y medio, pero en las arenas se han usado también los de fraguado rápido con éxito.

La Tabla XVI-19 (Ref. 1) proporciona las características más usuales en algunos tipos de productos bituminosos usados en estabilizaciones.

Tabla XVI-19 (Ref. 1)

Requerimientos comunes para materiales asfálticos
 Cementos asfálticos para formar rebajados

Propiedad	Residuos		
	Penetración 65 Mín. Máx.	Penetración 90 Mín. Máx.	Penetración 200 Mín. Máx.
Densidad relativa	0.99 —	0.98 —	0.97 —
Punto de ignición, °C.	225 —	220 —	205 —
Punto de reblandecimiento, °C	46 58	42 53	33 44
Penetración a 25°C	60 70	85 100	180 210
Temperatura para uso, en °C	— —	160 182	155 182

Asfaltos naturales fluxados

Propiedad	Penetración 65		Penetración 90		Penetración 200	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Densidad relativa	1.18	1.26	1.16	1.24	1.11	1.20
Punto de ignición, °C.	175	—	175	—	175	—
Punto de reblandecimiento, °C.	42	55	40	51	33	46
Penetración a 25°C.	60	70	80	100	175	225
Solubilidad en Tetracloruro de carbono.	68	—	70	—	74	—
Contenido de ceniza, en %.	—	25	—	23	—	21
Temperatura para uso, en °C.	Mismos requerimientos que para los cementos asfálticos					

Alquitrán de carbón

Propiedad	Muy pesado		Pesado		Ligero	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Densidad relativa	1.07	—	1.05	—	1.04	—

(cont.)

<i>Propiedad</i>	<i>Muy pesado</i>		<i>Pesado</i>		<i>Ligero</i>	
	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>
Viscosidad, en Stokes a 50°C	5	8	1	2	0.25	0.50
Salubilidad en bisulfuro de carbono, % (se expresa la fracción insoluble)	5	10	4	9	3	8
Contenido de agua, %	—	0.5	—	2	—	5
Temperatura para uso, °C.	71	85	54	68	35	45

Alquitrán de petróleo

<i>Propiedad</i>	<i>Para impregnación</i>		<i>Para liga</i>		<i>Para presellado</i>	
	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>
Densidad relativa	1.09	—	1.05	—	1.05	—
Viscosidad, en Stokes a 50°C	31	50	1	2	0.10	0.25
Solubilidad en bisulfuro de carbono, % (se expresa la fracción insoluble)	—	8	—	5	—	5
Contenido de agua, %	—	0.5	—	2	—	5
Temperatura para uso, °C.	88	93	57	71	18	35

Los aceites fluxantes más usados son el Diesel con viscosidad comprendida entre 0.03 y 0.07 Stokes a 50°C. Los solventes para rebajados son usualmente la gasolina, la kerosena y una mezcla de kerosena y diesel, para dar lugar respectivamente a los rebajados de fraguado rápido, medio y lento.

La Tabla XVI-20 (Ref. 1) señala algunos requerimientos frecuentemente exigidos a los asfaltos rebajados.

Tabla XVI-20 (Ref. 1)

Propiedades más frecuentemente exigidas a los asfaltos rebajados para ser usados en estabilizaciones. Rebajados de fraguado medio

<i>Propiedad</i>	<i>Grado 0</i>		<i>Grado 1</i>		<i>Grado 2</i>	
	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>
Viscosidad, en Stokes a 50°C	0.36	0.71	1.10	2.20	3.60	7.10

<i>Propiedad</i>	<i>Grado 0</i>		<i>Grado 1</i>		<i>Grado 2</i>	
	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>
Punto de ignición, °C	38	—	38	—	49	—
Penetración en el residuo, a 25°C	100	250	100	250	100	250
Partes de kerosena, en volumen, por cien partes de cemento de penetración 90	78	78	51	51	37	37

Rebajados de fraguado lento

<i>Propiedad</i>	<i>Ligeros</i>		<i>Medio</i>		<i>Pesados</i>	
	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>
Viscosidad, en Stokes a 50°C	0.36	0.71	0.70	1.40	1.10	2.20
Proporción de cemento con penetración 90	100	—	100	—	100	—
Proporción de aceite Diesel	60	—	45	—	30	—
Proporción de kerosena	50	—	38	—	25	—

Los asfaltos emulsificados se usan con rompimiento medio y lento. Las emulsiones son suspensiones muy finas de partículas de asfalto en agua y el asfalto se liga con el suelo cuando la suspensión se coagula (rompimiento). El momento en que tal coagulación ocurra determina la efectividad de la liga asfalto-suelo; si el rompimiento ocurre muy pronto se tendrá una penetración escasa e inadecuada y esta es la razón por la que se evitan las emulsiones de rompimiento rápido. Las emulsiones aniónicas deben tener por lo menos 55% de contenido de asfalto; el emulsificante y los agentes estabilizantes deben dejar cuando mucho un residuo de 0.2%, en peso, de toda la emulsión que sea retenida en la malla No. 100, tras una dilución en un volumen igual de agua destilada y un período de reposo de 10 min. La viscosidad de estas suspensiones debe estar comprendida entre 4 y 25 grados Engler. La temperatura para uso en el campo debe ser 49° C como máximo.

Las emulsiones catiónicas tienen especificaciones menos familiares y en torno a ellas hay una experiencia mucho menor. Suele exigirse un contenido de asfalto mínimo de 58% y una viscosidad comprendida entre 3 y 24 grados Engler.

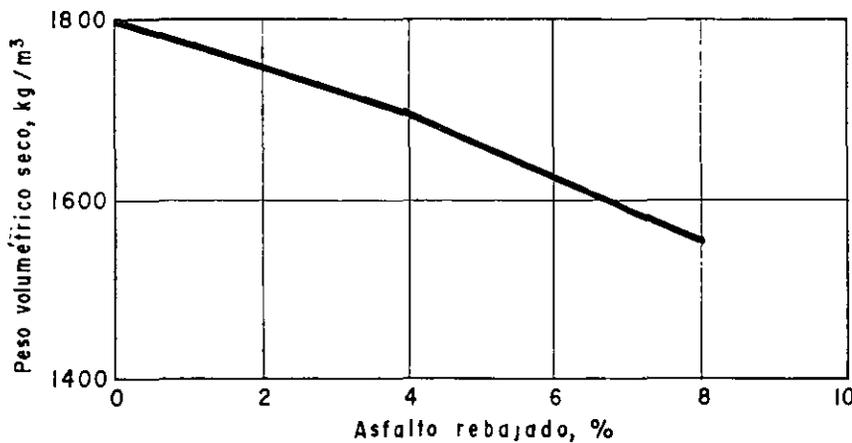
Prácticamente todos los tipos de suelo responden a la estabilización con asfalto, incluyendo las arcillas más compresibles y activas, pero los mejores resultados se obtienen sin duda con arenas y con gravas arenosas, materiales a los que el asfalto da cohesión e impermeabilidad. La granulometría de los suelos no es esencial, pero generalmente se piden algunos requerimientos, del estilo del conjunto de los que siguen:

- El tamaño máximo de la partícula debe ser menor que un tercio del espesor compactado de la capa.
- Más del 50% del material debe ser menor que la malla No. 4. Muchas veces este requerimiento se refiere a la malla de 3/16".
- 35% del material debe ser más fino que la malla No. 40.

- El retenido en la malla No. 200 debe estar comprendido entre 10 y 50%.
- El límite líquido de la fracción fina debe ser menor que 40%.

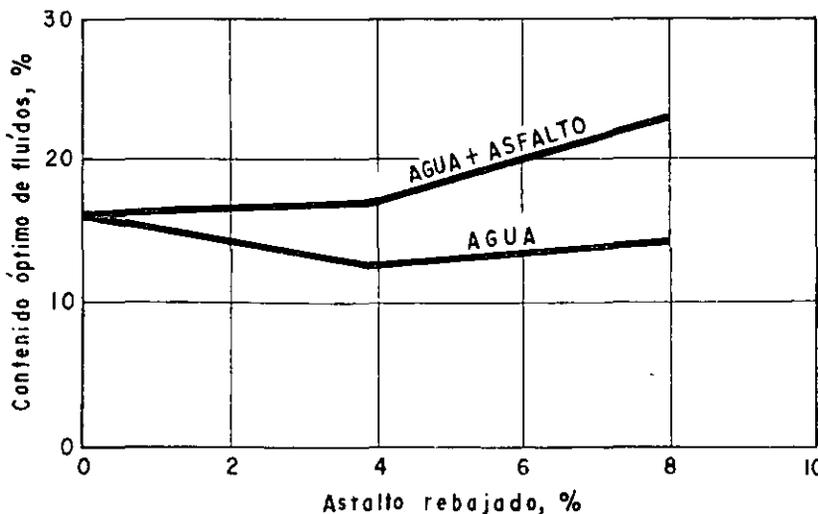
El índice de plasticidad de la fracción fina debe ser menor que 18%.

En arenas muy limpias puede haber problemas de adherencia entre el asfalto y los materiales silíceos, lo que conduce al desprendimiento del material estabilizante y a la desaparición de sus buenos efectos. Los suelos húmedos pueden presentar el inconveniente de que al añadirseles más líquido durante el proceso de estabilización, lleguen a una consistencia que haga muy difícil compactarlos. En el caso de arenas muy limpias, con no más de 3% de material pasando la malla No. 200 y, en añadidura,



a

Figura XVI-33. Variación del peso volumétrico seco y del contenido óptimo de agua, en especímenes estabilizados con asfaltos rebajados. (Ref.1)



b

húmeda, una pre-estabilización con 1 ó 2% de cal puede dar muy buen resultado para mejorar la adherencia entre el asfalto y las partículas de arena.

Cualquier tipo de agua dulce es aceptable, tanto para la estabilización propiamente dicha, como para la compactación posterior.

La concentración de sales y la materia orgánica son contraindicadas, pues perjudican mucho la adherencia entre el suelo y el asfalto.

Los efectos estabilizantes del asfalto ocurren a través de dos mecanismos. El primero es una liga establecida entre las partículas de suelo a través del asfalto, lo que da una "cohesión" al conjunto; el segundo es la protección del suelo contra la acción del agua. El primer mecanismo es importante sobre todo en suelos granulares, en tanto que el segundo resulta útil más bien en los cohesivos.

A continuación se establecen algunos puntos de interés sobre algunas propiedades importantes de los suelos estabilizados con asfalto y de los factores que influyen en su variación.

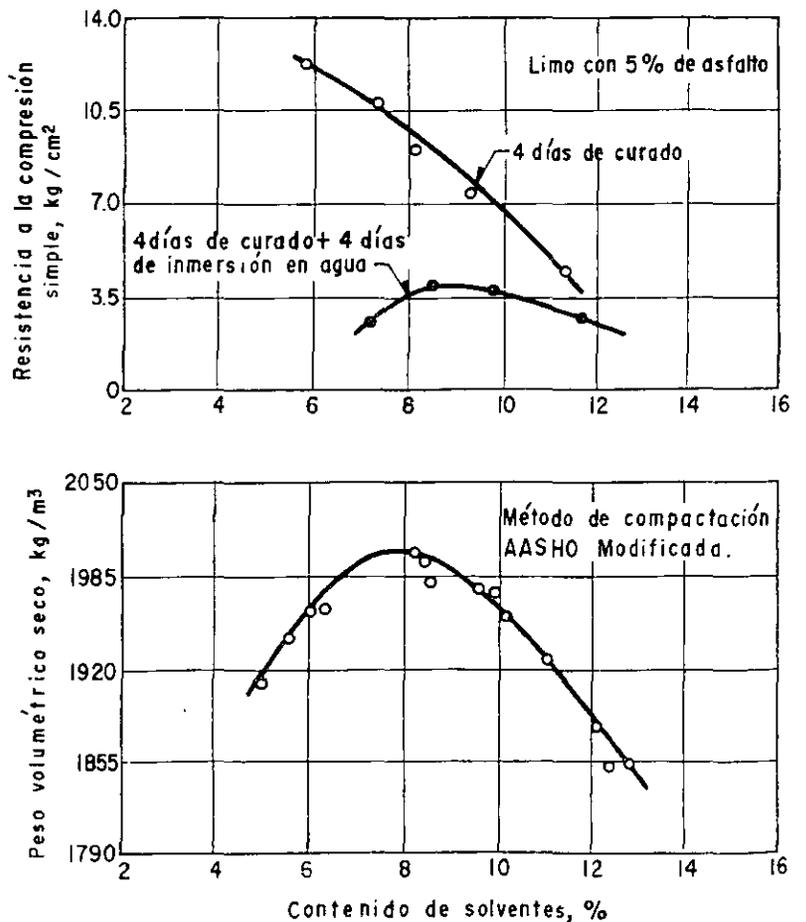
A) Peso volumétrico seco

La Fig. XVI-33 (Ref. 1) muestra la variación del peso específico seco de las mezclas con el porcentaje de asfalto que se utilice. La información se refiere a estabilizaciones con asfalto rebajados. Puede verse en la parte *a* de la figura cómo en términos

generales el asfalto hace disminuir el peso volumétrico seco máximo a que puede llegarse; esta disminución seguramente no es muy importante, pues la estabilización produce un mejoramiento en las propiedades mecánicas que la compensa con creces. La parte *b* de la figura hace ver que la adición del asfalto y los líquidos que lo acompañan hace disminuir la necesidad de agua para compactación, lo que pudiera ser una ventaja en lugares secos.

La adición del asfalto en forma de asfaltos rebajados lleva consigo una proporción de solventes volátiles que es importante en el comportamiento de la mezcla obtenida; cuanto mayor sea el contenido de asfalto, menor será la pérdida de resistencia por saturación, respecto al suelo no tratado y, por otra parte, cuando los solventes pasan de cierta proporción la resistencia de la mezcla, así como su peso volumétrico seco disminuyen. Existen contenidos óptimos de solventes para cada uno de ambos conceptos, los que, por cierto, no coinciden, que no deben ser sobrepasados, so pena de abatir la resistencia más de lo deseable. Adicionalmente debe tenerse en cuenta que en emulsiones o asfaltos rebajados, el agua y los solventes se añaden a la fracción líquida, como ya se dijo y pueden aumentar inconvenientemente la humedad de la mezcla con vistas a la compactación. La Fig. XVI-34 (Ref. 11) resume la información de arriba glosada.

Figura XVI - 34. Efecto en el peso volumétrico seco y en la resistencia a la compresión simple, del contenido de solventes en especímenes estabilizados con asfalto. (Ref. 11)



La Fig. XVI-35 (Ref. 1) muestra curvas típicas de compactación en laboratorio (pruebas AASHTO modificadas) para varios tipos de suelos finos estabilizados con los porcentajes que se señalan de as-

faltos rebajados de fraguado medio; el contenido de agua con que se efectuó la mezcla se refiere al total de la fase líquida.

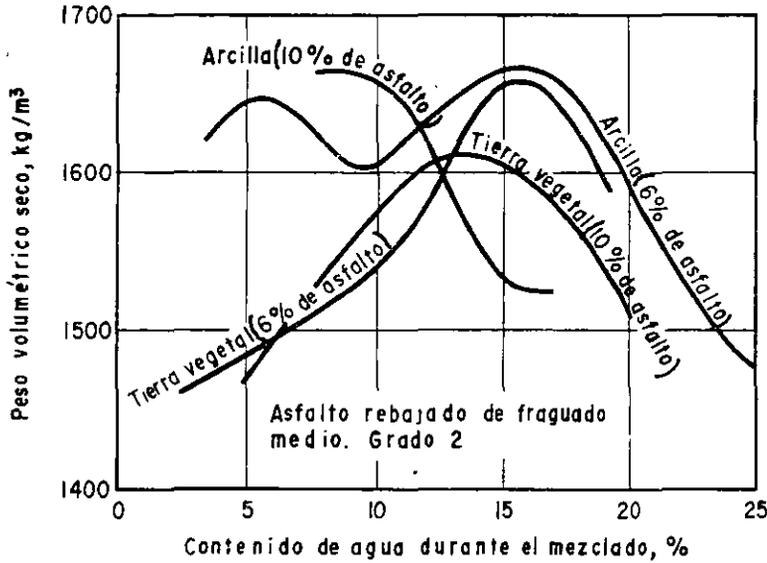


Figura XVI - 35. Efecto de estabilización asfáltica de especímenes de varios suelos, en su compactación. (Ref. 1)

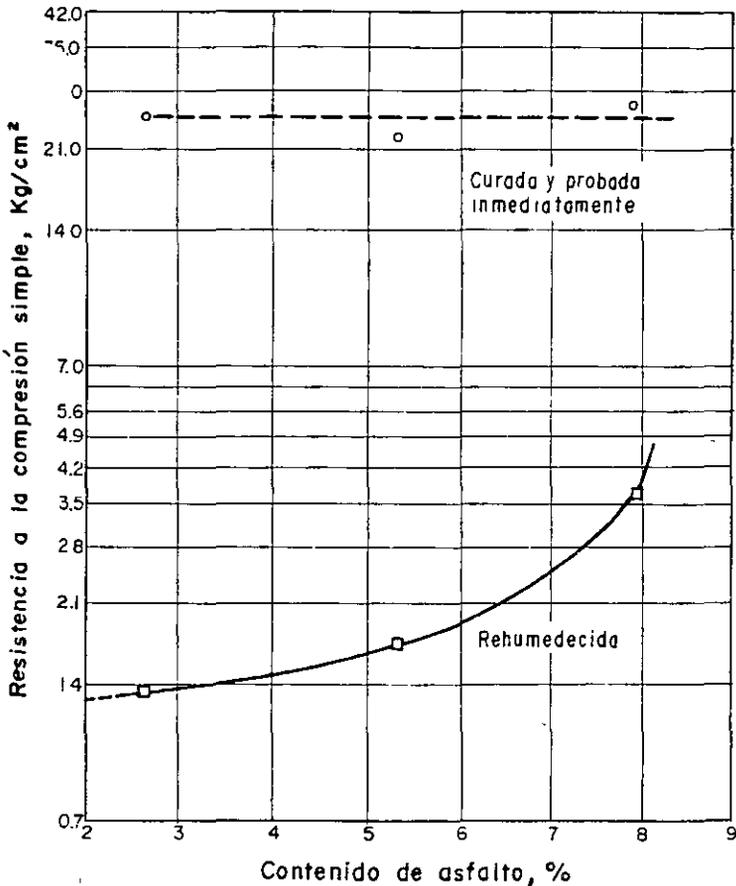


Figura XVI-36. Efecto del contenido de asfalto en la resistencia a la compresión simple de especímenes de limo arcilloso, estabilizados con emulsión. (Ref. 11)

B) Resistencia

La figura XVI-34 (Ref. 11) incluyó alguna información básica sobre la influencia del contenido de solventes en los asfaltos rebajados sobre la resistencia a la compresión simple de las mezclas obtenidas. Respecto al contenido de asfalto propiamente dicho, puede decirse que, en términos generales, cuanto mayor sea es mejor el comportamiento de la mezcla obtenida, dentro de los límites prácticos; sin embargo, este mejoramiento no se refiere necesariamente a las mismas propiedades. En suelos finos, el aumento del contenido de asfalto no influye en la resistencia a la compresión simple, lo que pone de manifiesto la Fig. XVI-36 (Ref. 11), en la que la resistencia de un limo arcilloso, medida inmediatamente después de curada la mezcla, permanece prácticamente constante para contenidos de asfalto muy variables. Se trata de una mezcla preparada con emulsión asfáltica. Por el contrario, en suelos de naturaleza más bien friccionante la resistencia sí aumenta cuando el contenido de asfalto crece, pero si este último se hace aumentar demasiado, la resistencia vuelve a decrecer. Por otra parte, en los suelos finos, el contenido de asfalto sí tiene mucho que ver con el comportamiento de la mezcla ante el agua, según demuestra la misma Fig. XVI-36, en la que puede verse que la resistencia a que llega la mezcla del mismo limo-arcilloso y asfalto cuando es re-humedecida, sí crece con el contenido de asfalto y con un crecimiento ilimitado, por lo menos para los contenidos prácticos de dicho material. Lo anterior no quiere decir que convenga aumentar el contenido del asfalto indiscri-

minadamente en los suelos finos, pues si éste va más allá de un cierto valor, los solventes que acompañan a los asfaltos rebajados o el agua de las emulsiones, hacen crecer en demasía la fase líquida de la mezcla, como ya se discutió y en tal caso ésta se vuelve demasiado plástica y poco resistente. En los suelos friccionantes, el asfalto poco añade a la estabilidad ante el agua, ya poco modificable de por sí.

La Fig. XVI-37 (Refs. 11 y 31) muestra el efecto del tiempo de mezclado del suelo-asfalto en la resistencia a la compresión simple de la mezcla. Se presentan resistencias iniciales de las mezclas inmediatamente detrás del curado y resistencias tras re-humedecimiento. El suelo usado fue un limo arcilloso, que se mezcló con 5% de asfalto rebajado. También se presentan datos de esta mezcla y de otra a la que se le añadió 2% de pentóxido de fósforo, cuyo efecto en la resistencia es notable en todos los casos.

El período de curado de las mezclas tiene importancia en sus resistencias. Cuanto mayor sea ese período y más caliente la temperatura del curado es mayor la pérdida de solventes, cuando se usan rebajados. En términos generales, también se cumple que cuanto mayor sea el período de re-humedecimiento a que se somete la mezcla de suelo-asfalto es mayor la cantidad de agua captada. La resistencia de un suelo-asfalto es toscamente inversamente proporcional al contenido de solventes en el momento de la prueba, de manera que cuantos más solventes se pierdan, mayor es la resistencia. La Fig. XVI-38 (Refs. 11 y 31) recoge información a este respecto, proveniente de pruebas sobre un gran número de mezclas, preparadas de muy diversas maneras y con muy diversos suelos; puede ser considerada una correlación de tipo general y bastante confiable.

C) Valor relativo de soporte

En el proporcionamiento de mezclas para la formación de capas de pavimento estabilizadas con asfalto es común, como se verá, extender la utilización del método de diseño con base en el *V.R.S.*, de manera que la variación de esta propiedad tiene importancia práctica. Es normal que, en forma similar a como sucede con la resistencia a la compresión simple en suelos finos, el *V.R.S.* de la mezcla aumente con el contenido de asfalto hasta un límite, a partir del cual disminuye de nuevo. También es cierto, como ya se dijo repetidas veces, que se buscan contenidos de asfalto relativamente altos en muchos casos, para lograr mezclas que resistan convenientemente la acción repetida del agua. Es usual tender a un contenido de asfalto que permita alcanzar niveles razonables en ambos resultados; es decir, una resistencia adecuada y una estabilidad suficiente ante la acción del agua. Esto último trata de controlarse en el laboratorio realizando las pruebas de *V. R.S.* sobre especímenes previamente sujetos a un período de inmersión.

La Fig. XVI-39 (Ref. 1) proporciona la varia-

ción del *V.R.S.* con el contenido de asfalto en una mezcla probada tras el período normal de curado y en otra probada tras un período adicional de inmersión en agua. Se trata de una arena-grava calcárea, estabilizada con un asfalto rebajado de fraguado medio; la referencia citada no menciona el período de inmersión a que se sujetaron los especímenes.

Parece ser que existe una definida relación entre el *V.R.S.* de los suelos estabilizados con asfalto y la temperatura. La Ref. 1 menciona experiencias sudafricanas que son concluyentes al respecto. Con base en ellas, en la propia Ref. 1 se presenta un intento de correlación general para arenas entre los conceptos *V.R.S.* y temperatura del suelo-asfalto. Una vez más, ha de llamarse la atención sobre el empleo indiscriminado de estas correlaciones locales, cuya validez literal fuera del ambiente y de los materiales (en este caso arenas) con que fueron producidas es siempre muy cuestionable. Sin embargo, ofrecen un valor como norma de criterio y con tal intención la Fig. XVI-40 (Ref. 1) presenta en este lugar la correlación a que se hizo mención.

De acuerdo con las investigaciones sudafricanas citadas, la resistencia a la compresión simple o la obtenida en pruebas de compresión triaxial de las mismas arenas-asfalto, también se ven influenciadas por la temperatura y en el mismo sentido; es decir, cuando la temperatura aumenta, la resistencia disminuye, lo cual se puede considerar lógico, si se toma en cuenta el reblandecimiento del asfalto con el calor.

D) Estabilidad ante el agua

Como ya se reiteró, esta es la característica que preponderantemente se busca al estabilizar con asfaltos a los suelos finos, de naturaleza cohesiva. La Fig. XVI-36 (Ref. 11) ya hizo ver cómo la estabilidad ante el agua de los suelos finos mezclados con asfalto aumenta mucho con el contenido de éste. Se considera conveniente, sin embargo, añadir en este lugar la información que proporciona la Ref. 32.

En ella se glosan las experiencias de la estabilización de una arcilla arenosa con asfaltos rebajados. Como corresponde a un suelo predominantemente cohesivo, la resistencia a la compresión simple resultó un tanto independiente del contenido de asfalto, aunque el contenido de arena de las muestras hace que se produzca una cierta respuesta a este factor; de hecho la resistencia a la compresión simple aumentó un 40% para el contenido óptimo de asfalto, en comparación a la de la arcilla arenosa natural original. Por otra parte se puso de manifiesto el fenómeno ya comentado, según el cual cuando aumenta el contenido de asfalto aumenta la estabilidad de la mezcla ante el agua, hasta el grado en que los solventes que acompañan al asfalto rebajado hacen crecer en demasía la fase líquida de la mezcla y la tornan excesivamente plástica y poco resistente; evidentemente este grado representa un

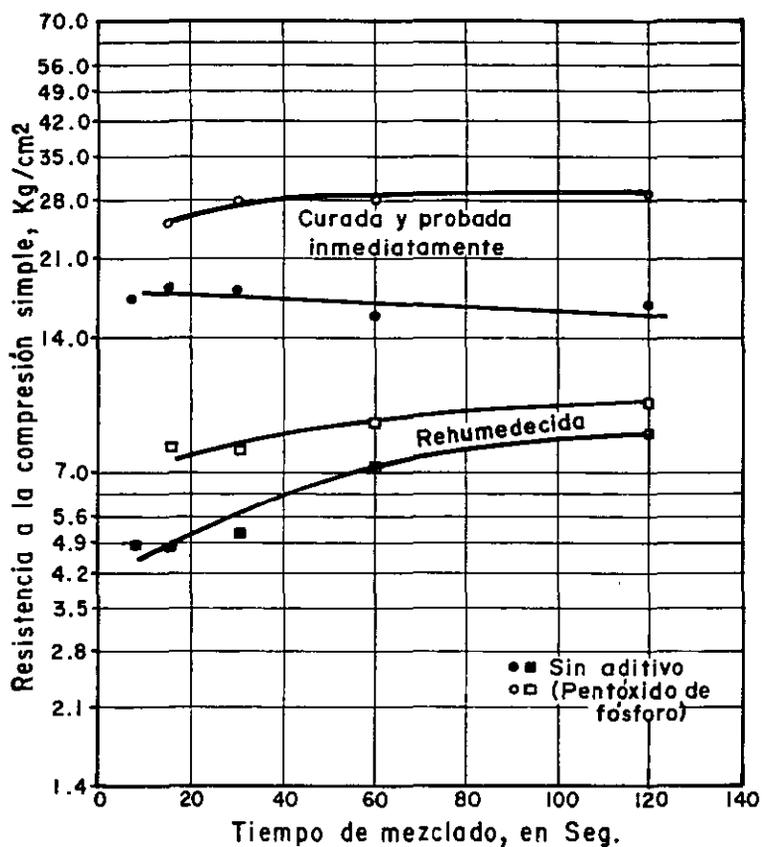
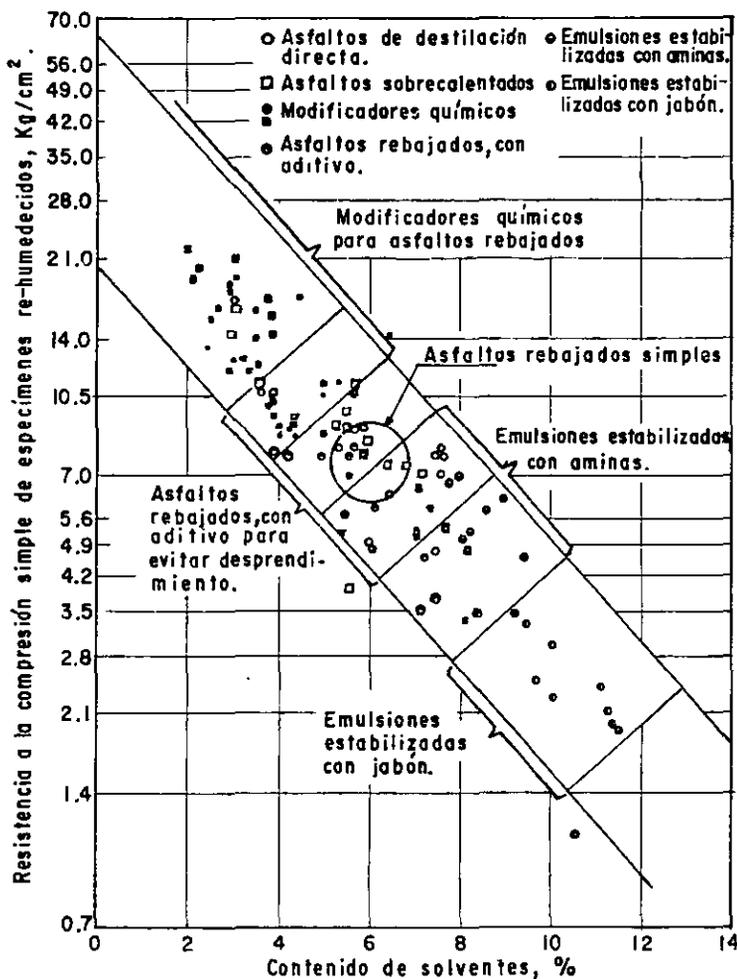


Figura XVI-37. Efecto del tiempo de mezclado en la resistencia a la compresión simple de especímenes de limo arcilloso estabilizados con 5% de asfalto rebajado, con y sin aditivo. (Refs. 11 y 31)

Figura XVI-38. Efecto del contenido de solventes en la resistencia a la compresión simple tras un periodo de rehumedecimiento, de especímenes de diversos suelos estabilizados con productos asfálticos. (Ref. 11 y 31)



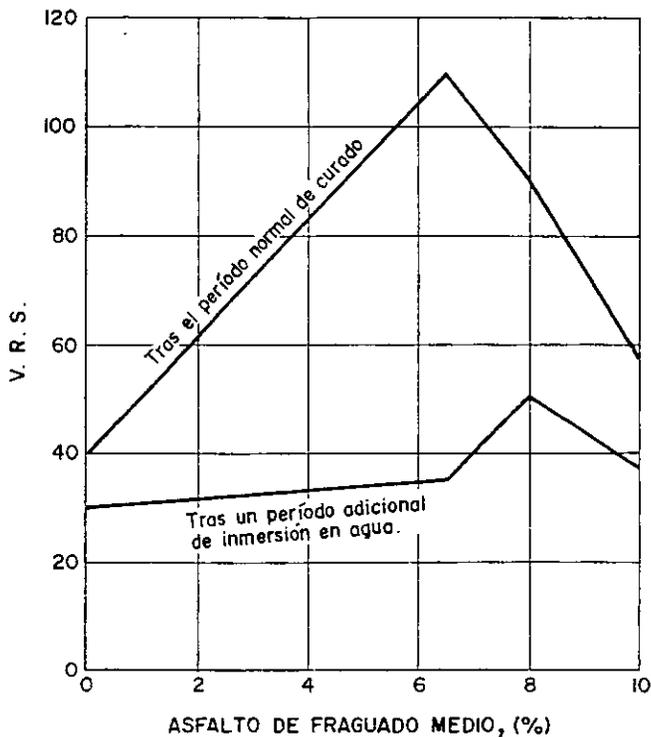


Figura XVI - 39. Variación del V.R.S. con el contenido de asfalto, en especímenes de arena-grava, probados tras el período normal de curado y otro después de su inmersión en agua. (Ref. 1)

límite adelante del cual no conviene ir, pues lo que se gana en estabilidad resulta descompensado por lo que se pierde en resistencia. En el caso de la investigación que se comenta se vió que contenidos de asfalto arriba de un 8 ó 10% resultaban francamente indeseables por estos motivos. Pero en lo que se refiere a la estabilidad ante el agua únicamente, medida ésta por la absorción de las muestras en períodos de inmersión, si se observa que

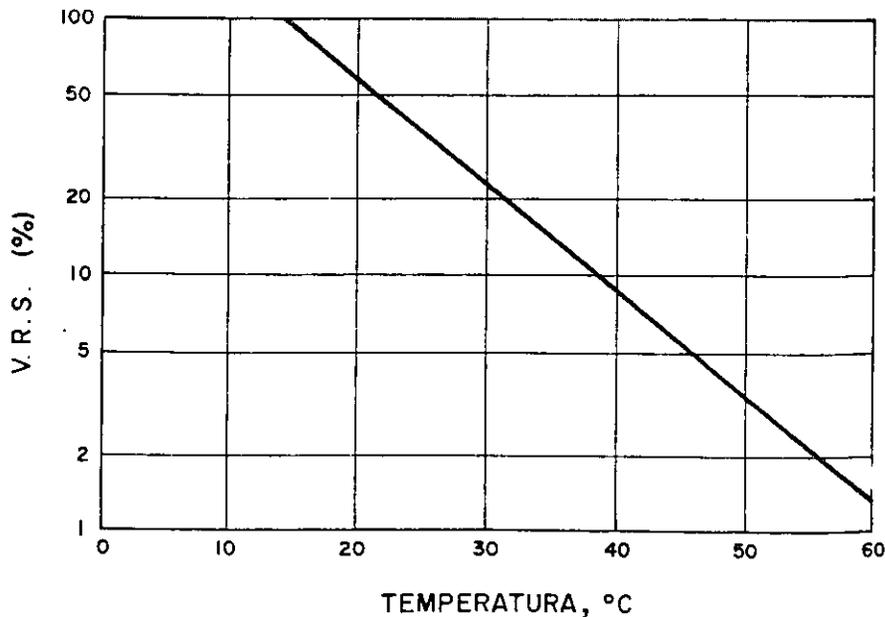
contenidos muy altos de asfalto siguen proporcionando buena estabilidad. La Fig. XVI-41 (Ref. 32) muestra la absorción de agua de dos especímenes, con períodos de inmersión de 1 y 28 días, en relación con el contenido de asfalto que se dio a la arcilla arenosa, suelo con el que se hizo la investigación; el asfalto utilizado fue un rebajado de fraguado medio.

El proceso de mezclado que conduce al suelo-asfalto final parece tener considerable influencia en el comportamiento de mezclas de suelos finos y en lo que se refiere a su estabilidad frente al agua. La Fig. XVI-42 (Ref. 32) indica cómo varía la absorción de agua de especímenes de arcilla arenosa, estabilizados con 3% de aceite pesado cuando varía el tiempo de fabricación y mezclado y también cuando se hace variar el tiempo de inmersión en agua en el laboratorio. Puede verse que cuando el tiempo de mezclado se prolonga disminuye mucho la estabilidad de la mezcla ante el agua; esto se atribuye a efectos de rotura de granos y a la correspondiente difusión del asfalto en mayores áreas de partículas de suelo, en películas correspondientemente más delgadas y, por ende, más susceptibles a ser penetradas por el agua.

E) Métodos constructivos

De lo atrás discutido puede deducirse que las mezclas de suelo-asfalto se fabrican con objetivos que pueden ser diferentes. Puede pretenderse buscar la resistencia máxima, en suelos no cohesivos, la que deberá lograrse empleando el contenido óptimo de asfalto. Puede tenerse como objetivo dar al suelo estabilidad ante el agua, lo que es frecuente en suelos francamente cohesivos o en suelos de naturaleza friccionante, pero con fracción fina importante, en cuyo caso los contenidos de asfalto podrán ser más altos, pero cuidando que no excedan al límite que compromete la resistencia de la mezcla. El caso de la estabilización de arenas con asfalto es

Figura XVI - 40. Influencia de la temperatura en la prueba del V. R.S. en especímenes de arena estabilizados con asfalto. (Ref. 1)



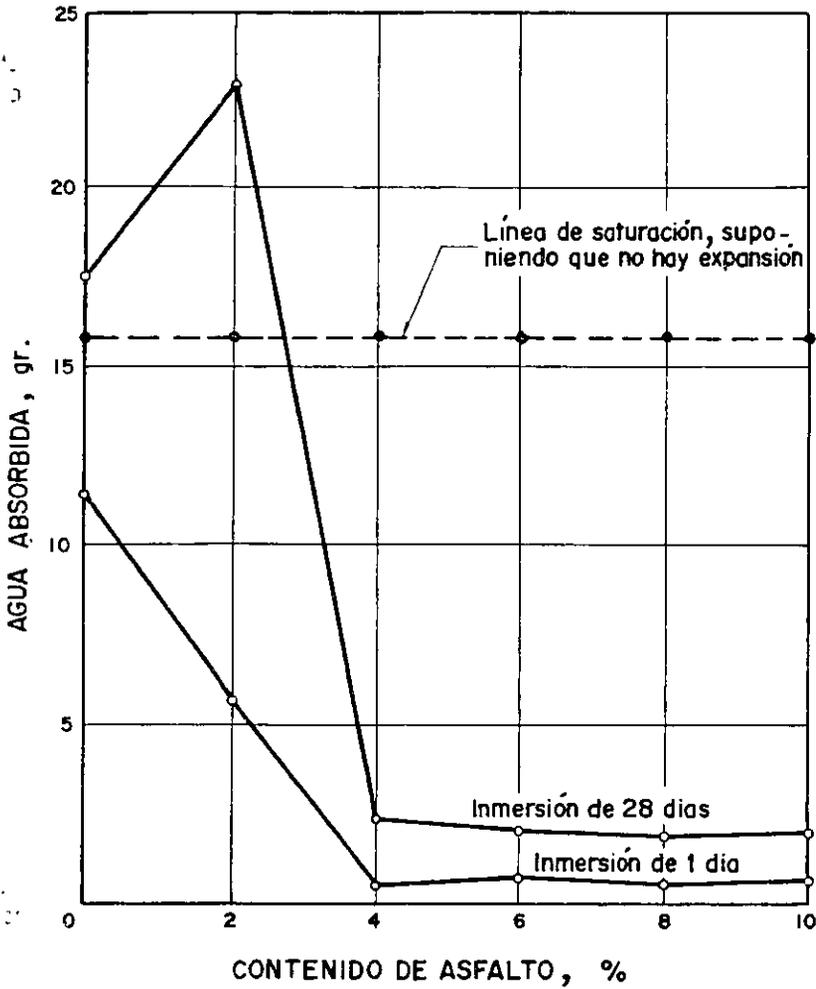


Figura XVI-41. Variación de la absorción de agua con el contenido de asfalto. Especímenes de arcilla arenosa estabilizada con asfalto rebajado. (Ref. 32)

tan frecuente en la técnica actual de muchos países, que muchos autores lo consideran especial. El tipo de pruebas de laboratorio a realizar en cada uno de los casos se desprende de las páginas anteriores; el proyectista tiene mucha libertad para actuar de acuerdo con su sentido común, puesto que no existe ninguna metodología pre-establecida para el diseño de las mezclas. La Ref. 33 contiene un buen resumen de los métodos empleados por algunas ins-

tituciones importantes de las que se dedican a la resolución de esta clase de problemas.

La selección del tipo y monto del asfalto debe de hacerse con pruebas de laboratorio que determinen y comparen características de resistencia y estabilidad. Es muy frecuente en la tecnología de las vías terrestres el realizar pruebas para conocer la evolución de los valores del V.R.S., en especímenes curados y sujetos a períodos de inmersión en agua.

Figura XVI-42. Variación de la absorción de agua con el tiempo de mezclado. Especímenes de arcilla arenosa con 3% de un aceite pesado. (Ref. 32)

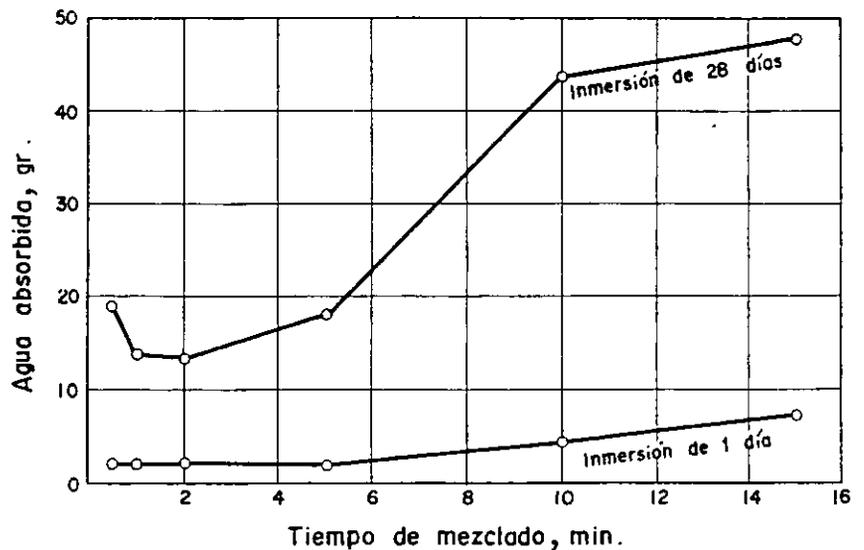
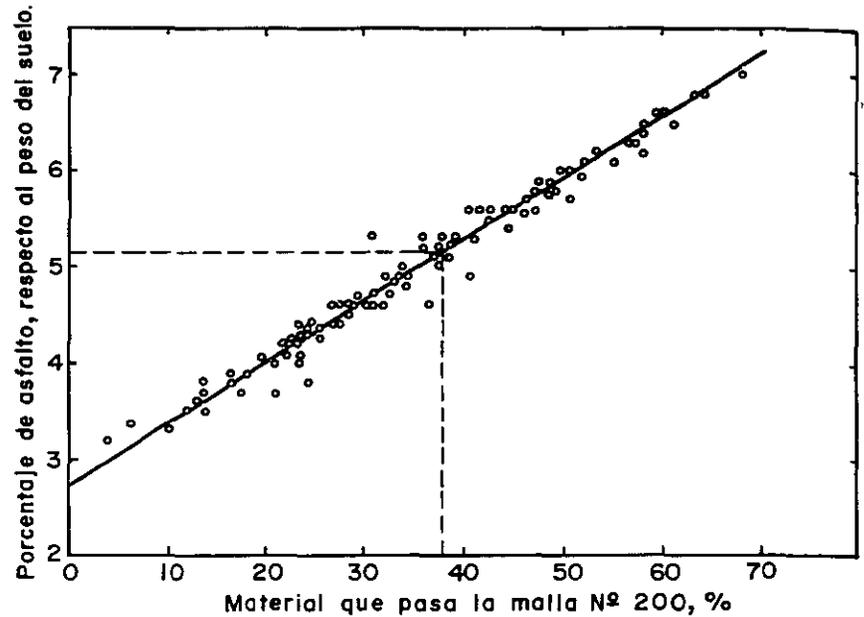


Figura XVI-43. Abaco para establecer el porcentaje de asfalto en problemas prácticos. (Refs. 11 y 34)



En estos casos es frecuente exigir por lo menos valores de 80% para el V.R.S. de capas de pavimento.

La Fig. XVI-43 (Refs. 11 y 34) puede ser útil para determinar los porcentajes de asfalto convenientes para la estabilización en los diferentes casos; esos porcentajes están referidos a la fracción de suelo que es menor que la malla No. 200.

La secuencia constructiva de una capa de suelo-asfalto comprende los siguientes pasos:

- Pulverización del suelo
- Adición del agua necesaria para un mezclado apropiado.
- Adición del producto asfáltico y mezcla con el suelo
- Aereación, para llegar a un contenido de solventes volátiles apropiado para la compactación.
- Compactación
- Acabado
- Aereación y curado

De las secuencias anteriores, el mezclado y la etapa de reducción de solventes volátiles suelen ser las más delicadas. En suelos arcillosos, sobre todo, puede convenir durante el mezclado un contenido alto de solventes y, además, el contenido de estas sustancias para favorecer una buena compactación es normalmente más alto que el que garantiza una buena estabilidad. Por todo ello, el suelo-asfalto requiere normalmente un período de aereación des-

pués de compactado; esto es tanto más cierto cuanto más cohesivo es el suelo.

Cuando se utilizan emulsiones, por otra parte muy apropiadas para la estabilización de suelos finos, la fracción líquida que las acompaña debe ser conveniente eliminada, lo que exige la colocación en capas suficientemente delgadas.

F) Diseño de espesores

Es muy común diseñar el espesor de capas de suelo-asfalto con el método del V.R.S. Cuando ello se hace, también es usual asignar a la capa de suelo-asfalto el mismo espesor que resultaría en el diseño, si no se estabilizase el suelo, lo cual es muy conservador. También es muy frecuente y quizá más racional establecer alguna equivalencia empírica entre el espesor de la capa estabilizada y una capa de grava equivalente, en la forma que ha sido frecuentemente planteada en el Capítulo IX de este libro.

XVI-7. OTROS METODOS DE ESTABILIZACION

De otros métodos de estabilización de suelos diferentes a los ya mencionados y que no hayan sido específicamente tratados en otras partes de este libro, los hay de naturaleza química y física. En lo que sigue se tratarán someramente algunos de ellos, en la inteligencia de que su utilización es mucho menos frecuente que la del cemento, la cal y el asfalto o que la estabilización mecánica, lograda a base de mezclas de suelos.

1. Estabilizantes Químicos

Los estabilizantes químicos pueden ser todavía de naturaleza inorgánica y orgánica. Los primeros

suelen estar afectados por menos problemas de patentes y otras restricciones comerciales y todavía pueden subdividirse en estabilizantes de tipo ácido, de tipo neutral y de tipo alcalino. El primero y el tercero de estos grupos actúan atacando químicamente los componentes del suelo, especialmente los minerales de arcilla, produciéndose en la reacción nuevos compuestos de naturaleza cementante. Los estabilizantes neutros principalmente alteran las propiedades físicas del suelo, como el peso volumétrico.

En lo que sigue se pasará una breve revista a alguno de los estabilizantes de tipo químico. Este resumen está inspirado en las Refs. 1, 11 y 32.

A) Acido fosfórico y fosfatos

La estabilización con estos productos está en gran parte en la fase experimental y es probable que nunca pase de ella, puesto que lo hasta ahora investigado indica que estos productos han de entrar en porcentajes similares a los que se requieren de cemento o de cal y su precio es varias veces más grande.

Parece ser que la ventaja más importante de estos estabilizantes está en los buenos resultados que se obtienen con cloritas, ante las que el cemento y la cal rinden resultados más erráticos (Ref. 35). También se ha dicho que el ácido fosfórico tiene una considerable y benéfica acción en el peso volumétrico seco de mezcla a que se llega. Las ventajas anteriores parecen señalar a estos estabilizantes una particular ventaja en los suelos jóvenes de origen volcánico.

Los estabilizantes fosfóricos limitan su acción a suelos ácidos y no son efectivos en los alcalinos, en los limos, ni en las arenas. Esto se debe a que el ácido fosfórico debe atacar a las retículas arcillosas para captar el aluminio y precipitar un fosfato hidratado de aluminio. Otra dificultad de estos estabilizantes está en su manipulación, que es difícil aunque en general no son sustancias tóxicas.

B) Cloruro de Sodio

Frecuentemente se ha usado el cloruro de sodio como un estabilizante de acción no muy durable o como ayuda en la superficie de deslizamiento contra el polvo.

El cloruro de sodio es efectivo en todos los suelos, aunque mucho menos en los que contienen materia orgánica. Su efecto estriba en producir reacciones coloidales y en alterar las características del agua contenida en el suelo. Normalmente actúa como floculante y desde este punto de vista suele ayudar en la compactación.

Un uso muy particular, pero prometedor de la sal común es la disminución de permeabilidad que produce en muchas arcillas, lo que la hace útil para tratar a las expansivas. La sal también beneficia la resistencia del suelo (Ref. 36), así como el comportamiento de los suelos ante la congelación.

La principal desventaja de estos tratamientos es que la sal es muy soluble y, por lo tanto, fácilmente lavada; por esto se le adjudicó al principio la calificación de no durable.

C) Sulfatos de Calcio (Yeso) y Cloruro de Calcio

El efecto de estas sustancias, sus ventajas y desventajas son muy similares a las del cloruro de sodio, pero es común que su efecto en la compactación sea mucho menos marcado, así como su efecto sobre la permeabilidad, a la que a veces hacen aumentar, con lo que se aumenta mucho la posibilidad de remoción por lavado. El yeso se ha usado con frecuencia como aditivo en mezclas de suelo-cemento para acelerar su fraguado, pero aún esta utilización debe ser contemplada con reserva por los problemas de florescencia.

D) Hidróxido de sodio (sosa cáustica)

Aun no se conocen bien los efectos de la sosa cáustica como estabilizante; sin embargo, la Ref. 1 menciona experiencias muy favorables obtenidas en la India con pequeñas cantidades de estabilizante en suelos lateríticos. Algunas investigaciones recientes en laboratorio corroboran ese sentimiento favorable. Aunque el costo de la sosa es elevado, puede usarse en porcentajes muy pequeños.

La principal desventaja de la sosa está en su causticidad, que puede ser un peligro para los operadores y en el hecho de que se carbonata en el aire muy rápidamente y pierde su poder.

Las principales ventajas están en la facilidad con que se aplica y en el efecto que parece tener para ayudar a la compactación de los suelos. Sus efectos más ventajosos se tienen con arcillas caoliníticas de tipo laterítico y con arcillas caoliníticas ricas en aluminio. La Fig. XVI-44 (Ref. 1) muestra la evo-

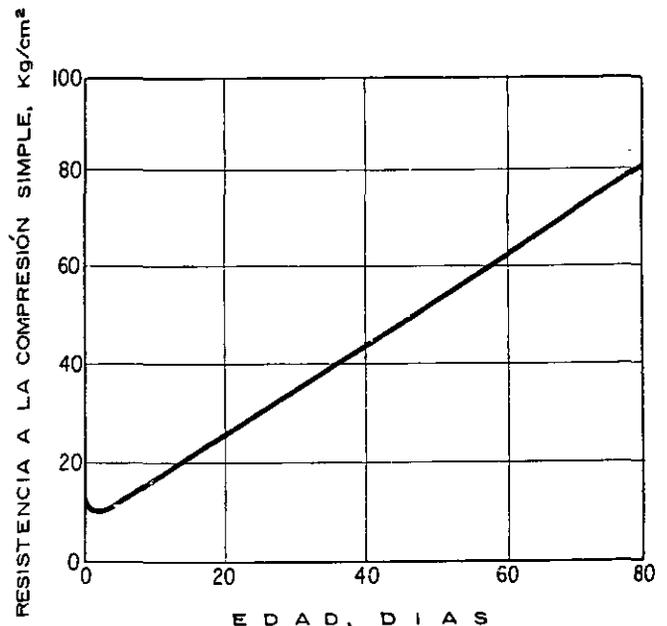


Figura XVI-44. Evolución de la resistencia de un caolín estabilizado con 10% de sosa cáustica. (Ref. 1)

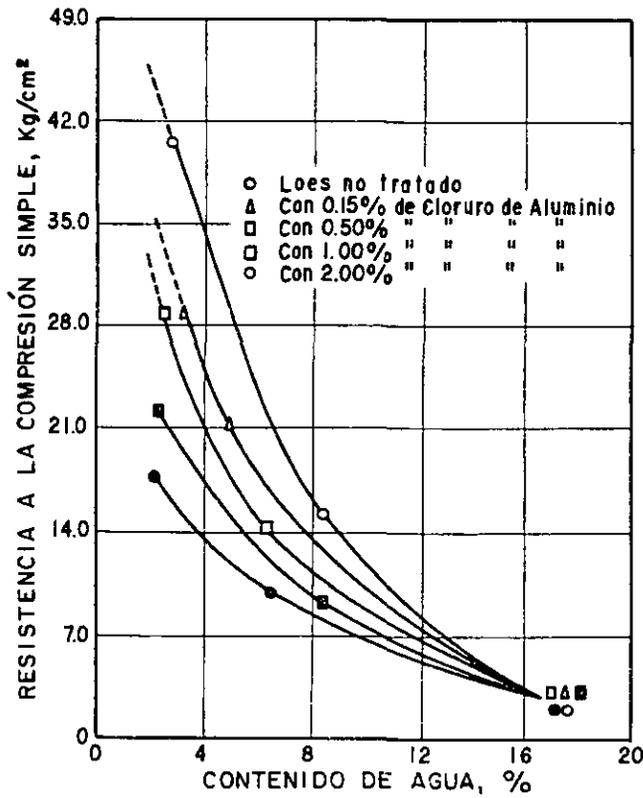


Figura XVI-45. Efecto de la estabilización con sales de aluminio en la estabilidad de un loes ante el agua. (Ref. 11)

lución de la resistencia a la compresión simple de un caolín estabilizado con 10% de hidróxido de sodio.

El efecto del hidróxido de sodio es poco importante o nulo en las montmorilonitas.

E) Sales de aluminio.

La Ref. 11 menciona una investigación estabilizando loes con sales de aluminio, que parece indicar que estas sustancias tienen una muy útil influencia en la estabilidad de los suelos ante el agua, aunque no la muestran en la resistencia de las mezclas. La Fig. XVI-45 (Ref. 11) hace ver ambas características; para contenidos de agua bajos, de hecho parece que el estabilizante tiene efecto negativo en la resistencia, pero cuando la humedad del suelo aumenta, las muestras con mayor porcentaje de estabilizador pierden proporcionalmente mucha menos resistencia que las no estabilizadas o las que usan porcentajes menores de estabilizante.

F) Resinas y Polímeros

Son cadenas muy largas de moléculas formadas por unión de componentes orgánicos, a los que se denomina monómeros. Los polímeros naturales tienen la forma de resinas. La incorporación de polímeros a los suelos se hace de dos maneras; o se

añaden los monómeros junto con un sistema catalizador que produce la polimerización posterior o el polímero se añade ya formado, sólido, en solución o en emulsión.

El vinsol es la resina que más frecuentemente se ha utilizado como estabilizante, sobre todo en Europa. Los resultados que con ella se han obtenido son variables, pero alentadores; su acción se circunscribe a la de estabilizante de la mezcla ante la acción del agua (Ref. 32). Esta es en general la reacción de todas las resinas y polímeros, pero Winterkorn ha descrito algunos productos que parecen tener alguna acción en la resistencia (Ref. 37).

Los contenidos de resinas y polímeros fluctúan normalmente entre 1 y 2% y únicamente pueden usarse con suelos ácidos. Otra desventaja importante del producto es su degradación bacteriana, que limita su vida.

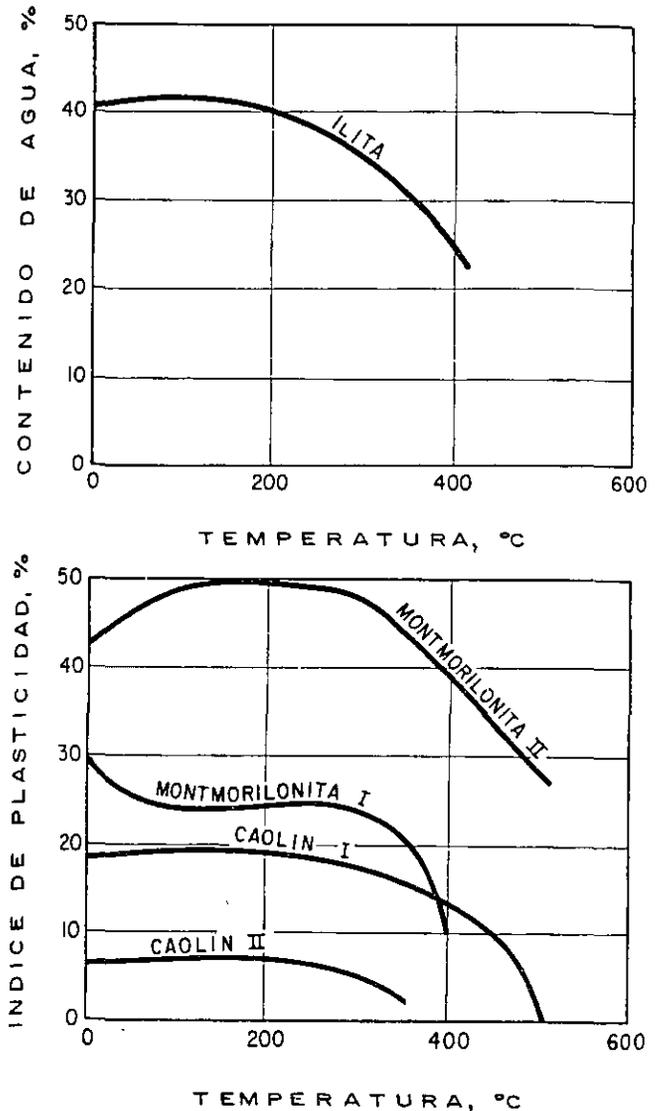


Figura XVI-46. Valoración del contenido de agua y del índice de plasticidad después de la rehidratación, en función de la temperatura para los suelos que se citan. (Refs. 1 y 42)

Se ha hecho muy poco trabajo de investigación respecto a la posibilidad de incorporar las resinas o los polímeros en tiras, armando el suelo. Los polímeros pueden ser catiónicos, aniónicos y no iónicos. Los catiónicos poseen cargas positivas que crean nexos eléctricos muy fuertes con las negativas de las partículas de arcilla o de las arenas finas silíceas; por este mecanismo puede aumentar la resistencia del suelo. Desgraciadamente este efecto aumenta mucho la resistencia de la mezcla a ser compactada. También son productos difíciles de mezclar por la pequeña proporción en que intervienen y de costo alto.

Los polímeros aniónicos tienen la misma carga eléctrica que los minerales de arcilla, por lo que su incorporación más bien tiende a disminuir la resistencia de los suelos tratados; correspondientemente favorecen la compactación. La efectividad de estos productos es muy variable, según el tipo de suelo y su utilización probablemente se justifica pocas veces, habida cuenta de que la sal común, mucho más barata, puede ser tan o más efectiva.

Los polímeros no iónicos generan nexos de hidrógeno importantes entre las partículas de arcilla, asociando sus grupos OH con el oxígeno de aquéllas...

2. Estabilizantes físicos

Muchas de las técnicas de estabilización más frecuentes de tipo físico o mecánico han sido descritas en otras páginas de este libro. La compactación, la vibroflotación, la inyección de lechada de cemento figuran entre ellas. Otras como la electrólisis (Refs. 38, 39 y 40), por otra parte tan bien conocida en México, ya han sido mencionadas sin mucho detalle, dada su escasa aplicación en la tecnología de las vías terrestres, por lo menos hasta el presente.

Se desea resaltar en este lugar las técnicas de estabilización térmica, sea por calentamiento o por enfriamiento.

A) Estabilización térmica por calentamiento

Se funda en la observación de cómo el calor convierte cualquier arcilla en un ladrillo resistente. A temperatura suficiente el proceso se vuelve irreversible y la resistencia adquirida no se pierde ni por inmersión; este efecto se logra con temperaturas del orden de 900°C, lo que representa una magnitud demasiado elevada para estabilizaciones en gran escala. En la práctica y para estos problemas resulta suficiente llegar a la temperatura en la que la rehidratación de la arcilla se torne imposible y esto ocurre con valores comprendidos entre los 200 y 400°C (Refs. 41, 42, 43 y 44). Ya adelante de 100°C, el efecto en la resistencia puede ser muy importante, pero no es irreversible.

La Fig. XVI-46 (Refs. 1 y 42) ilustra los cam-

bios en contenido de agua y en plasticidad después de la rehidratación, en función de la temperatura. La variación del índice de plasticidad se expresa para dos montmorilonitas y dos caolines.

El calor se aplica al suelo por llama directa provocada en su superficie o por circulación de gas calentado. El primer método se utilizó por vez primera en Rumania (Ref. 45) y suele aplicarse practicando en el suelo dos agujeros inclinados e intercomunicados en un punto en el que se provoca la combustión; el primer agujero acepta al combustible y el segundo permite salir a los gases de la combustión. El segundo método ha sido desarrollado por la técnica rusa (Ref. 1) y consiste en practicar un solo agujero en el suelo, al fondo del cual se establece la cámara de combustión, cuya temperatura se controla con sobrepresión (respecto a la atmosférica); el calentamiento del suelo se efectúa por el paso del aire caliente comprimido a través de sus poros. El método ruso es más efectivo pero más complicado.

En cualquiera de los dos métodos, la influencia de un punto de calentamiento no se extiende mucho más allá de un par de metros en torno a él.

El calentamiento es particularmente útil para reducir el potencial de expansión de los suelos arcillosos.

B) Estabilización térmica por enfriamiento

El enfriamiento puede producir una disminución en la resistencia de los suelos finos al aumentar la repulsión entre las partículas y causa el movimiento del agua interparticular por efecto del gradiente térmico, lo que produce cambios en el comportamiento del suelo no fáciles de controlar. Por estas razones, todos los métodos de estabilización por enfriamiento llegan a la congelación, que queda exenta obviamente de los defectos señalados, pues en ella el agua de los poros se congela y el suelo se transforma en un conjunto rígido, de considerable resistencia.

En los suelos arenosos, el agua se congela con temperaturas del orden de 0°C, pero en los arcillosos pueden requerirse temperaturas bastante menores.

Las técnicas de congelación se han utilizado sobre todo en conexión con la construcción de cimentaciones profundas en arcilla, para edificios muy grandes. En estos terrenos hay alguna experiencia mexicana reciente muy exitosa. En la Unión Soviética, las técnicas de congelación son de uso mucho más extendido y se han empleado en puentes, túneles, minas y en la construcción de ferrocarriles metropolitanos. (Ref. 46).

La congelación se logra haciendo circular sustancias refrigerantes por redes de tubería colocadas en el subsuelo.

XVI-8 ALGUNAS IDEAS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE CAPAS ESTABILIZADAS EN PAVIMENTOS

Existe poca literatura en conexión con el comportamiento de capas estabilizadas con cemento, cal o asfalto en pavimentos construidos bajo diferentes climas y niveles de tránsito y menos aún, que abarquen períodos suficientes de tiempo para poder llegar a conclusiones de valor general.

El suelo-cemento ha sido seguramente el más estudiado en este sentido, quizá por pensarse que este estabilizante es el que puede producir una mezcla cuyas propiedades difieran más de las del producto original (Ref. 1). Ya se mencionó la discrepancia que todavía existe hoy entre los partidarios de permitir el endurecimiento completo de las mezclas antes de exponerlas a la acción del tránsito y los que se inclinan por fomentar la fragmentación de las capas, antes de que alcancen su completa resistencia, para favorecer un encaje más completo y un comportamiento más orientado hacia el de los pavimentos flexibles; la técnica japonesa se inclina mucho modernamente por esta segunda idea.

En términos generales, se recurre al uso del cemento cuando se desea una capa resistente, de resistencia uniforme, capaz de proporcionar un buen apoyo homogéneo, tal como podría ser el caso de la sub-base de un pavimento rígido o de la base o la sub-base de un pavimento flexible sujeto a la acción de un tránsito pesado muy importante. Otras veces se busca colocar en la sección estructural de la carretera o la aeropista una capa potente, capaz de desarrollar esfuerzos de tensión, que proteja a una sub-rasante o a una terracería débiles de la acción de cargas de tránsito grandes.

No ha sido muy explorado el efecto que una capa delgada de suelo-cemento puede tener como impermeabilizante que defiende de la acción del agua infiltrada desde la superficie a capas de suelo susceptible más profundas.

La literatura sobre capas de suelo estabilizado con cal es menos específica en la valuación de los comportamientos relativos. En épocas recientes se ha despertado un gran interés por diferenciar los resultados de la estabilización con cal en los diferentes tipos de suelos, especialmente en las distintas clases de arcillas (Ref. 47). Por lo demás los efectos que se buscan y que se reportan como logrados en muchos casos son los ya mencionados de mejorar la plasticidad, las características de compactación y la estabilidad volumétrica de los suelos finos; como logro más secundario, el aumento en la resistencia, si bien este último puede ser muy importante en suelos granulares relativamente gruesos.

Las estabilizaciones bituminosas tampoco se reportan con la deseada frecuencia. Sus objetivos son siempre los dos anteriormente mencionados: lograr resistencia o estabilidad de la mezcla ante el agua.

ANEXO XVI-A

XVI-A.1 ESTABILIZACION DE SUELOS. MEZCLA DE 3 SUELOS

Se desea mezclar 3 agregados α , β y γ , cuyas granulometrías se muestran esquemáticamente en la Fig. XVI-A.1.1. Deberá obtenerse una granulometría, con la mezcla de los 3 agregados, tal que quede lo más posible dentro de las especificaciones mostradas en la misma figura.

Solución

Las granulometrías de los agregados y las especificaciones son las mostradas en la tabla 1

Se analizará el problema empleando las soluciones gráficas mediante métodos de diagrama triangular y de diagramas rectangulares.

Como se puede ver en la Fig. XVI-A.1.1. para el presente problema no se considera práctica la solución analítica, debido al traslape que se presenta en las granulometrías dadas.

Se aplicará en primer término el caso del diagrama triangular.

El método, no explicado al detalle en el texto, consiste básicamente en lo siguiente:

Se dibuja un triángulo equilátero, cuyos lados se dividen en escalas de 0 a 100, como se muestra en la Fig. XVI-A.1.2. En una de las escalas se colocan porcentajes de suelos menores que la malla No. 200; en la otra, porcentajes que pasan la malla No. 4 y son retenidos en la No. 200 y en la tercera escala se coloca el porcentaje que se retiene en la malla No. 4.

Es cómodo respetar las inclinaciones de los números, ya que en ese sentido se harán las lecturas sobre las escalas.

Con las granulometrías de los agregados se determinan sus porcentajes representativos correspondientes a las escalas anteriormente señaladas, haciendo lo mismo con las especificaciones, de tal manera que se obtenga una tabla como la mostrada en la Fig. XVI-A. 1.2. Cada uno de los suelos queda representado en el diagrama triangular por un punto único y recíprocamente, cada punto del diagrama representa un suelo posible.

Utilizando dos de las coordenadas se ubica la posición de los suelos dentro del diagrama triangular, sirviendo la tercera coordenada de comprobación.

Se traza la zona de las especificaciones dentro del diagrama triangular; para ello basta fijar los dos rangos (retenido en No. 4 y pasa No. 200) en forma paralela a las escalas respectivas.

Cualquier punto dentro del triángulo formado por los tres suelos, representaría a una mezcla granulométrica de los mismos; en consecuencia, es necesario que para que cualquier mezcla de los tres

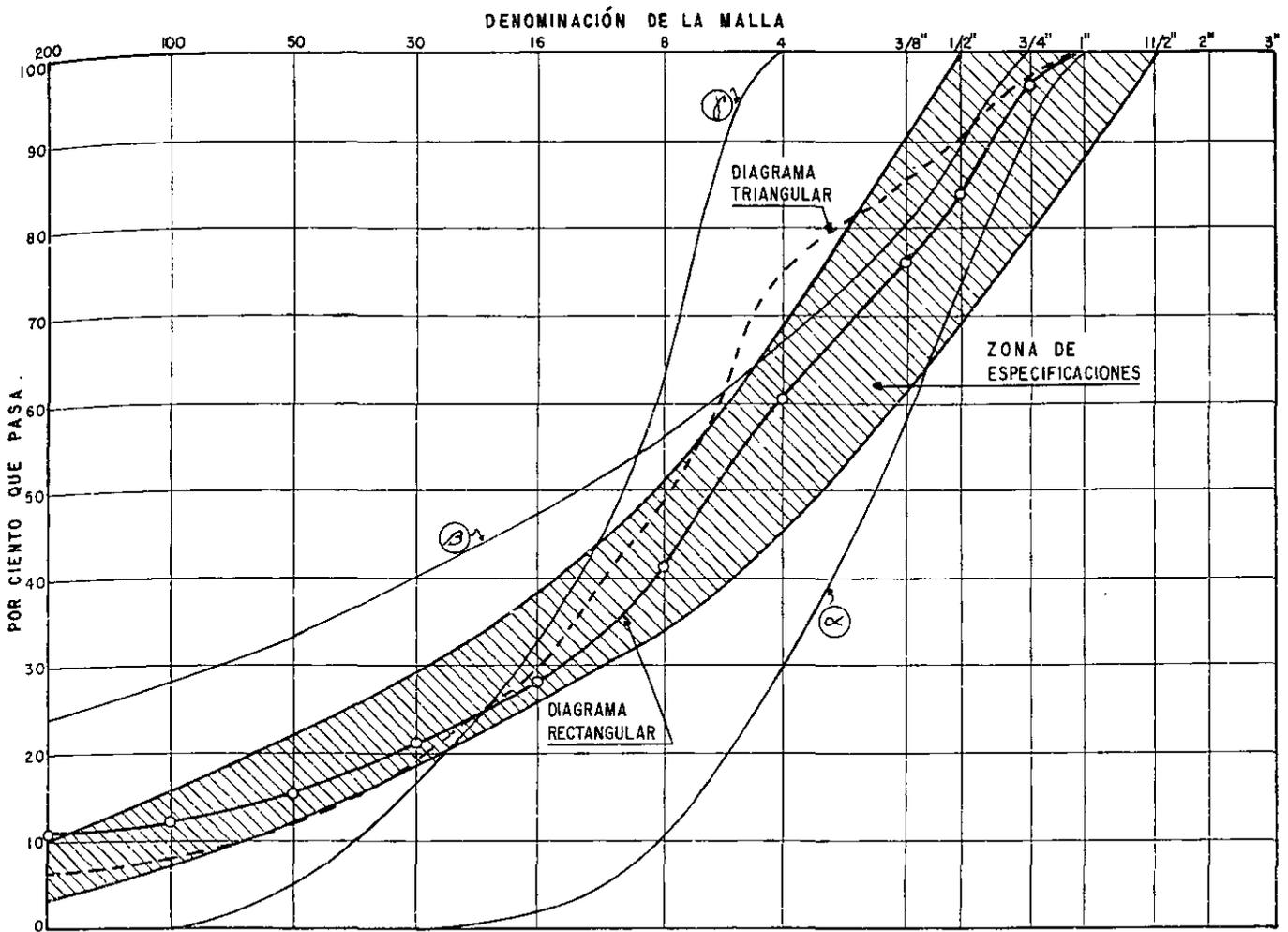


Figura XVI - A - 1.1. Curvas granulométricas.

TAMAÑO AGREGADO	Retenido en la 4	Pasa la 4 Retiene 200	Pasa 200
α	70.0	30.0	0.0
β	32.5	43.5	24.0
δ	0.0	100.0	0.0
Especif.	55/31	—	4/10

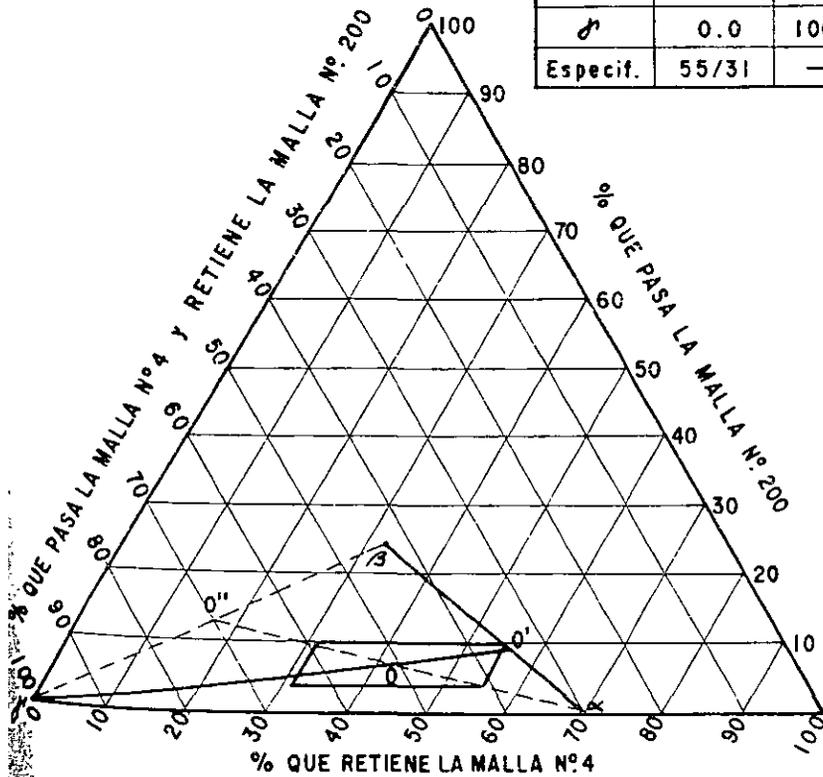


Figura XVI - A - 1.2.
Diagrama triangular.

Tabla 1

Tamaño Agregado	Porcentaje que pasa											
	1½"	1"	¾"	½"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200
Especif.	100	88-100	80-100	70-100	61-90	45-69	34-50	26-38	18-29	12-22	7-16	4-10
α	100.0	100.0	91.5	71.0	58.0	30.0	10.0	2.0	—	—	—	—
β	100.0	100.0	100.0	89.0	80.0	67.5	57.0	47.5	40.0	33.5	28.5	24.0
γ	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	62.0	33.0	18.0	4.5	—	—

agregados quede dentro de las especificaciones, se tenga un cierto traslape entre dicho triángulo y la mencionada zona de especificaciones.

En esta forma cualquier punto contenido dentro de la zona de traslape, representará una mezcla granulométrica aceptable, siendo la óptima la que se localice en el centro de gravedad de dicho traslape (punto 0).

Las proporciones de los tres suelos pueden ahora obtenerse, por ejemplo, como sigue:

Unase al punto del suelo γ con el centro de gravedad O, hasta O', sobre la línea que une los puntos de los suelos α y β . La relación de los segmentos OO', entre $\gamma O'$ da la proporción en que el suelo γ debe entrar en la mezcla de los tres, para que ésta tenga las características granulométricas correspondientes al punto 0. Análogamente la proporción entre los segmentos $\beta O'$ y $\beta \alpha$ daría la proporción en que el suelo α debe entrar en la mezcla; de hecho la anterior relación entre los segmentos ($\beta O' / \beta \alpha$) debe estar multiplicada por el complemento a uno de la proporción en que γ haya entrado en la mezcla, pues naturalmente, si γ entró, por ejemplo, en un 40%, ya sólo quedará un 60% para repartir entre α y β . Finalmente, el complemento a uno de la suma de las proporciones en que hayan entrado los suelos α y γ dará la proporción en que deba entrar el suelo β . Nótese que esta última también podría calcularse multiplicando la relación de los segmentos $O' \alpha / \alpha \beta$, por el complemento a uno de la proporción en que haya entrado γ .

En el caso de la Fig. XVI-A.1.2. las longitudes de los segmentos medidos fueron:

$$\text{Porcentaje de } \gamma = \frac{OO'}{O'\gamma} = \frac{14}{14 + 46} = \frac{14}{60} = 0.234$$

$$\text{Porcentaje de } (\alpha + \beta) = 1.000 - 0.234 = 0.766$$

$$\text{Porcentaje de } \beta = 0.766 \frac{12}{12 + 21} = 0.766 \frac{12}{33}$$

$$\text{Porcentaje de } \beta = 0.278$$

$$\text{Porcentaje de } \alpha = 0.766 \frac{21}{33} = 0.488$$

Los porcentajes de los agregados son:

$$A = 23.4\%$$

$$B = 27.8\%$$

$$C = \frac{48.8}{100.0}\%$$

De acuerdo con los porcentajes anteriormente determinados, se puede calcular la granulometría resultante como se indica en la tabla 2.

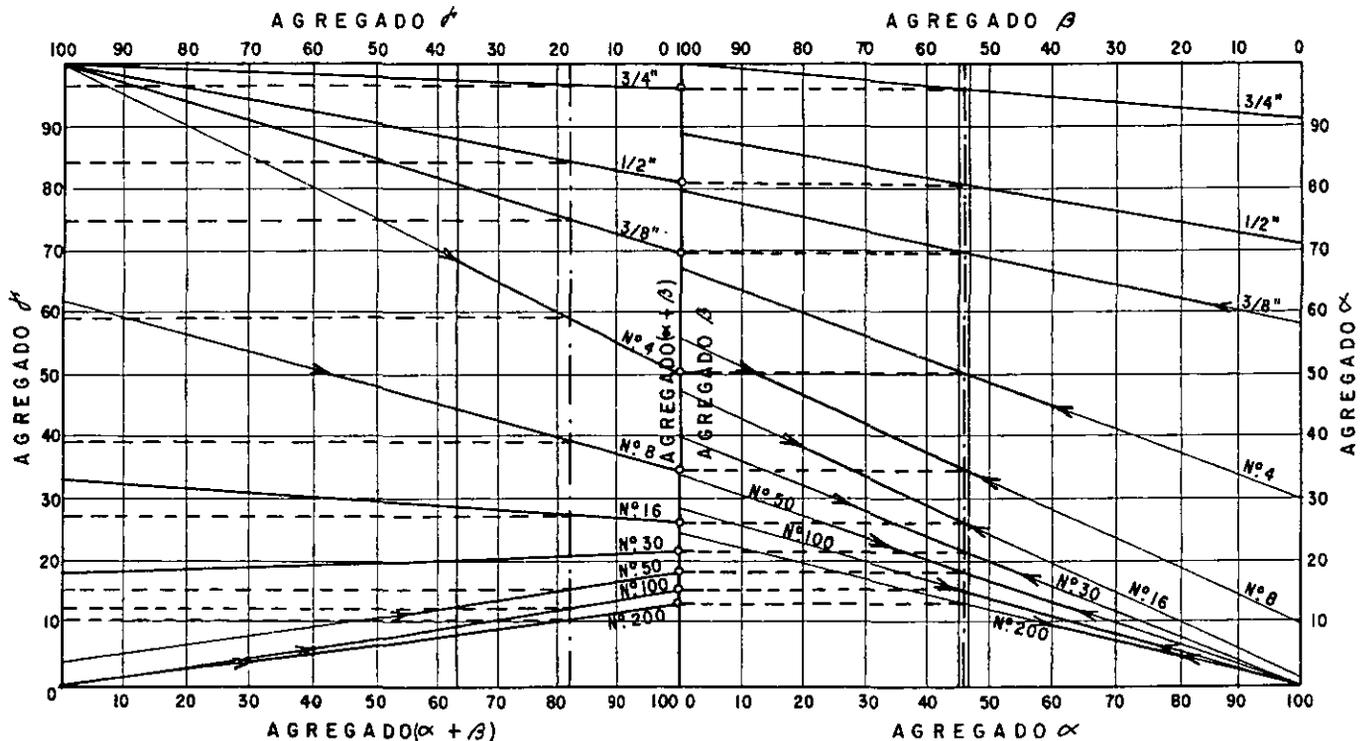


Figura XVI - A - 1.3. Diagrama rectangular.

Tabla 2

<i>Tamaño</i>	<i>Porcentaje que pasa</i>												
	<i>Agregado</i>	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200
0.234 α	23.4	23.4	21.4	16.6	13.6	7.0	2.3	0.5	—	—	—	—	—
0.278 β	27.8	27.8	27.8	24.8	22.2	18.8	15.9	13.2	11.1	9.3	7.9	6.7	6.7
0.488 γ	48.8	48.8	48.8	48.8	48.8	48.8	30.2	16.1	8.8	2.2	—	—	—
Total	100.00	100.0	98.0	90.2	84.6	74.6	48.4	29.8	19.9	11.5	7.9	6.7	6.7
Especif.	100	88/100	80/100	70/100	61/90	45/69	34/50	26/38	18/29	12/22	7/16	4/10	4/10

En la Fig. XVI-A.1.2, se han empleado líneas continuas para resolver el problema. Se procuró trazar la línea interceptora a lo largo de la diagonal mayor.

La curva granulométrica obtenida para la mezcla de los tres suelos se representa con trazo discontinuo en la Fig. XVI-A.1.1; se puede observar para este caso que en el porcentaje correspondiente a la malla No. 4 la curva ligeramente sale fuera de especificación.

Se aplicará ahora el método del diagrama rectangular, descrito en el texto para el caso de dos suelos.

Para ello se dibujarán las gráficas incluídas en la Fig. XVI-A.1.3.

En primer lugar se efectúa la mezcla del agregado α con el β , y posteriormente la granulometría obtenida se mezcla con el agregado γ .

Para mezclar los materiales α y β se siguen las reglas señaladas en el cuerpo del Capítulo para el caso de dos agregados. Puede observarse que, en este caso, la zona en que se cumplen todas las condiciones del problema resulta sumamente estrecha. La línea media de esa zona se consideró la mezcla óptima, cuyos valores se proyectan con línea punteada al diagrama de la parte izquierda de la Fig. XVI-A.1.3, de manera que la mezcla de los suelos α y β se trata como un nuevo suelo que ha de ser mezclado con el γ . Obsérvese que en este método se mezclan dos agregados cada vez, repitiendo la operación el número de veces que sea necesario.

De la figura se obtienen los siguientes resultados:

- Agregado $\gamma = 18\%$
- Agregado $\alpha + \beta = 82\%$
- Agregado $\beta = 0.55 \times 82 = 45\%$
- Agregado $\alpha = 0.45 \times 82 = 37\%$

Los coeficientes 0.55 y 0.45 se han obtenido de la gráfica de la derecha de la Fig. XVI-A.1.3, y representan las respectivas participaciones de los agregados β y α en la mezcla $\alpha + \beta$.

Los porcentajes para constituir la mezcla total resultan entonces:

- A = 37%
- B = 45%
- C = 18%

De acuerdo con los porcentajes obtenidos la granulometría resultante podría calcularse como se indica en la tabla 3.

Nótese que la granulometría total es la misma a que se hubiera llegado simplemente obteniendo las proyecciones de las intersecciones de la línea centroidal con las líneas correspondientes a cada agregado, sobre la ordenada de la extrema izquierda de la gráfica de la Fig. XVI-A.1.3.

Esta granulometría, ya graficada en la Fig. XVI-A.1.1., presenta diferencias notables respecto a la obtenida con el diagrama triangular. Podría repetirse el procedimiento invirtiendo el orden en la manipulación de los agregados; es decir, obteniendo primero la mezcla del agregado δ con el α y posteriormente mezclando el agregado β .

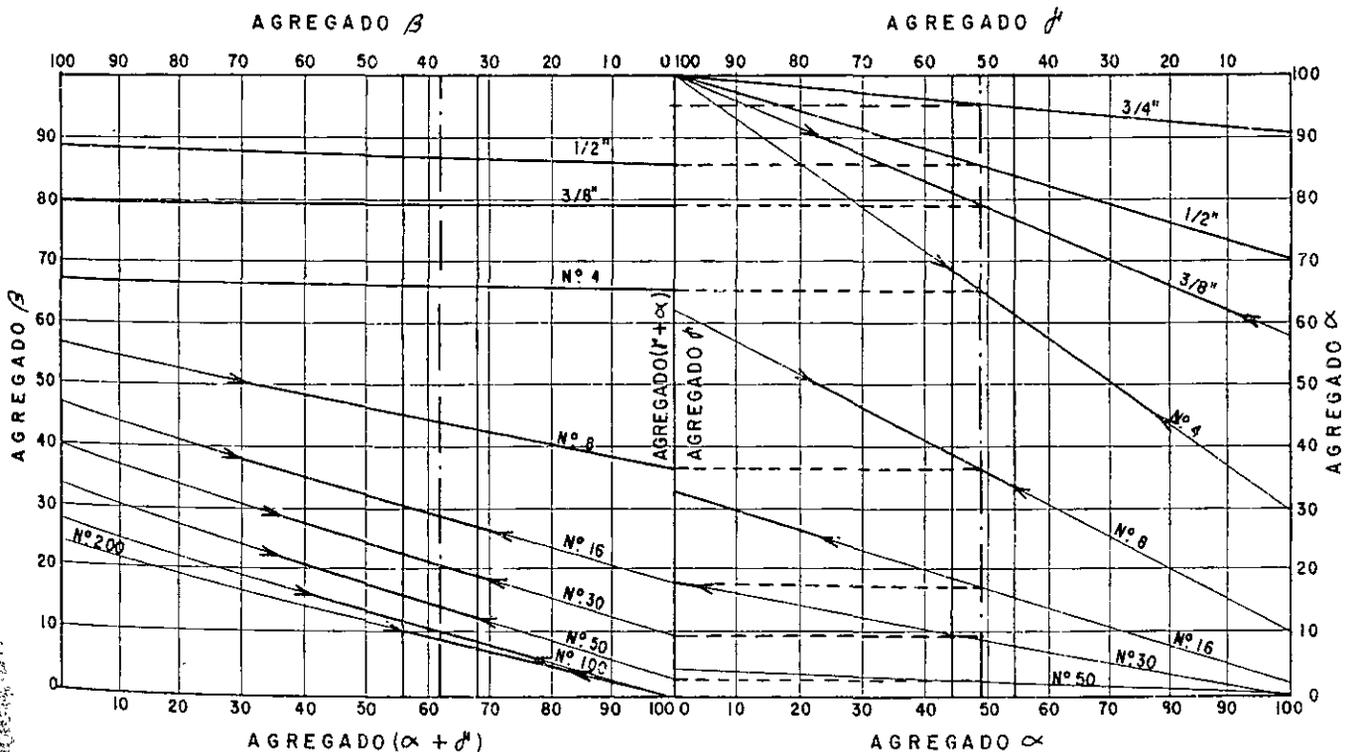


Figura XVI-A-1.4. Otra alternativa con el método del diagrama rectangular.

Tabla 3

<i>Tamaño</i>	<i>Porcentaje que pasa</i>												
	<i>Agregado</i>	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200
0.370 α	37.0	37.0	33.8	26.2	21.4	11.1	3.7	0.7	—	—	—	—	—
0.450 β	45.0	45.0	45.0	40.0	36.0	30.3	26.6	21.4	18.0	15.0	12.8	10.8	—
0.180 δ	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	10.2	5.9	3.2	0.8	—	—	—
Total	100.0	100.0	96.8	84.2	75.4	59.4	40.5	28.0	21.2	15.8	12.8	10.8	—
Especif.	100	88/100	80/100	70/100	61/90	45/69	34/50	26/38	18/29	12/22	7/16	4/10	—

En tal caso se obtiene lo indicado en la Fig. XVI-A.1.4.

En este caso los respectivos porcentajes resultan:

Agregado $\beta = 38\%$
 Agregado $\alpha + \gamma = 62\%$
 Agregado $\alpha = 0.62 \times 49 = 30.4\%$
 Agregado $\gamma = 0.62 \times 51 = 31.6\%$

Quedando:

A = 30.4 %
 B = 38 %
 C = 31.6%

Observando los porcentajes obtenidos en este segundo tanteo y comparándolos con los obtenidos en el primer tanteo, se concluye que el orden en que se manipule a los agregados tiene una gran influencia en la granulometría resultante.

Debe hacerse notar, sin embargo, que las líneas centroidales se escogieron un tanto a criterio, ya que éstas no suelen quedar muy bien definidas.

Como conclusión puede decirse que la granulometría obtenida puede ser relativamente variable, ya que si se analiza la Fig. XVI-A.1.1 se nota que caben varias respuestas. Las resistencias que se obtengan en especímenes elaborados con los diferentes proporcionamientos obtenidos, así como los costos relativos de dichos proporcionamientos, serán en última instancia, los factores que inclinarán a decidir cuál granulometría es la más adecuada.

A.2. ESTABILIZACION DE SUELOS. ADICION DE CAL

Se desea estimar los espesores necesarios para la estructura del pavimento flexible de un camino, mediante la aplicación del método de Hveem.

Dicha estimación se hará considerando índices de tránsito de 7, 9 y 11.

El material del lugar es una arcilla de alta compresibilidad, cuyas características geotécnicas son las siguientes:

LL	62.7%
LP	21.6%
IP	41.1%
s_p	2.60

De acuerdo con un análisis mineralógico efectuado a la arcilla se encontró que el mineral arcilloso predominante es montmorilonita.

Por razones de costo se desea emplear a este material como subrasante, ya sea compactado con humedad adecuada o bien con la adición de algún agente estabilizante.

Solución

Debido a que la arcilla contiene predominan-

temente montmorilonita se eligió como agente estabilizante a la cal.

Para diferentes contenidos de cal se obtuvo la siguiente variación en la clasificación del suelo:

Arcilla sola	LL = 62.7% IP = 41.1%
Arcilla con 2% de cal	LL = 51%; IP = 31.1%
Arcilla con 4% de cal	LL = 44%; IP = 23%
Arcilla con 6% de cal	LL = 43%; IP = 19%

Con base en lo anterior se escogió, para efectuar las pruebas del método de Hveem en la arcilla estabilizada, al porcentaje correspondiente a 4%.

Los resultados obtenidos en las pruebas de Hveem son los reportados en la tabla 1.

De acuerdo con el método de diseño de Hveem, es necesario determinar el espesor correspondiente al valor del estabilómetro para cada humedad de compactación. Asimismo es necesario determinar el espesor necesario que equilibre a la presión de expansión que se desarrolle al saturar a los especímenes compactados con diferentes humedades. Con este último propósito se supondrá que el material que se coloque sobre la capa subrasante tendrá un peso volumétrico de $2000 \text{ kg/m}^3 = 0.002 \text{ kg/cm}^3$

A continuación se presentan los cálculos efectuados para la arcilla sin cal. Para determinar los espesores por R se utilizó la gráfica de la Fig. IX-30. (Tabla 2)

El espesor por expansión se obtiene dividiendo la presión de expansión (tabla 1) entre el peso volumétrico del material suprayacente, que fue supuesto de 2000 kg/m^3 .

Los cálculos correspondientes a la arcilla estabilizada con cal aparecen en la tabla 3

En la Fig. XVI-A.2.1. se presentan graficados los espesores anteriormente obtenidos. Según se indica en el método de Hveem, el espesor definitivo del pavimento será el correspondiente a la intersección de la curva que une los puntos de los espesores determinados para las diferentes humedades de compactación con una línea trazada a partir del origen de las coordenadas y formando 45° con la horizontal.

De acuerdo con dicha figura se tiene que los espesores requeridos resultan:

Para la arcilla sin cal	Para la arcilla con 4% de cal
$IT = 11 \quad t = 88 \text{ cms}$	$IT = 11 \quad t = 28 \text{ cms}$
$IT = 9 \quad t = 80 \text{ cms}$	$IT = 9 \quad t = 24 \text{ cms}$
$IT = 7 \quad t = 72 \text{ cms}$	$IT = 7 \quad t = 20 \text{ cms}$

Adicionalmente en el método de diseño se recomienda tomar en cuenta a la presión bajo la cual los especímenes exudan agua. Debido a que la arcilla en cuestión es altamente impermeable no se tomó en cuenta este aspecto.

Tabla 1

	<i>Arcilla sin cal</i>							<i>Arcilla con 4% de cal</i>						
Humedad de compactación, en %	21	22	23	24	25	26	27	21	22	23	24	25	26	27
Valor de estabilómetro "R"	60	55	45	38	32	27	24	87	77	67	55	45	35	28
Presión de expansión, en kg/cm ²	0.87	0.45	0.29	0.23	0.20	0.19	0.18	0.17	0.06	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00
Valor de cohesiómetro, grs/plg ²	—	0.96	0.85	0.75	0.67	0.62	0.57	0.56	0.34	0.16	0	0	0	0
Peso volumétrico, en kg/m ³	1710	1680	1648	1616	1580	—	—	1626	1590	1552	1512	1480	—	—

Tabla 2

<i>Indice de tránsito</i>	<i>w %</i>	<i>R</i>	<i>Espesor por "R" cm</i>	<i>Presión de expansión kg/cm²</i>	<i>Espesor por expansión cm.</i>
7	21	60	27.4	0.87	435
	22	55	30.5	0.45	225
	23	45	38.2	0.29	145
	24	38	42.0	0.23	115
	25	32	45.7	0.20	200
	26	27	49.5	0.19	95
	27	24	51.7	0.18	90
9	21	60	35.0	0.87	435
	22	55	39.6	0.45	225
	23	45	48.8	0.29	145
	24	38	55.0	0.23	115
	25	32	59.0	0.20	100
	26	27	64.0	0.19	95
	27	24	67.0	0.18	90
11	21	60	42.7	0.87	435
	22	55	48.8	0.45	225
	23	45	59.5	0.29	145
	24	38	67.1	0.23	115
	25	32	73.2	0.20	100
	26	27	78.0	0.19	95
	27	24	82.0	0.18	90

Tabla 3

<i>Indice de tránsito</i>	<i>w %</i>	<i>R</i>	<i>Espesor por "R" cm</i>	<i>Presión de Expansión kg/cm²</i>	<i>Espesor de presión de expansión, cm</i>
7	21	87	9.2	0.17	85
	22	77	15.2	0.06	30
	23	67	22.8	0.03	15
	24	55	30.5	0.02	10
	25	45	37.5	0.01	5
	26	35	44.3	0.00	0
	27	28	49.0	0.00	0
9	21	87	11.6	0.17	85
	22	77	20.4	0.06	30
	23	67	29.0	0.03	15
	24	55	39.7	0.02	10
	25	45	49.0	0.01	5
	26	35	57.0	0.00	0
	27	28	63.5	0.00	0
11	21	87	14.7	0.17	85
	22	77	15.2	0.06	30
	23	67	36.0	0.03	15
	24	55	49.0	0.02	10
	25	45	59.7	0.01	5
	26	35	70.5	0.00	0
	27	28	80.5	0.00	0

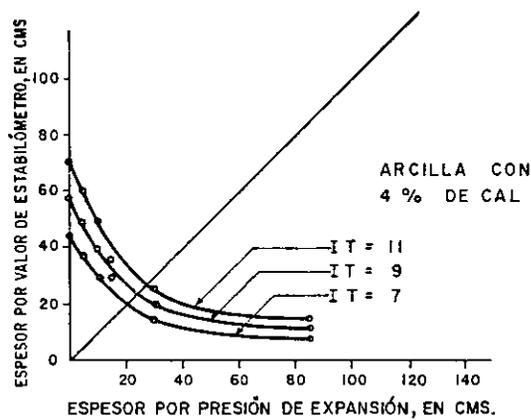
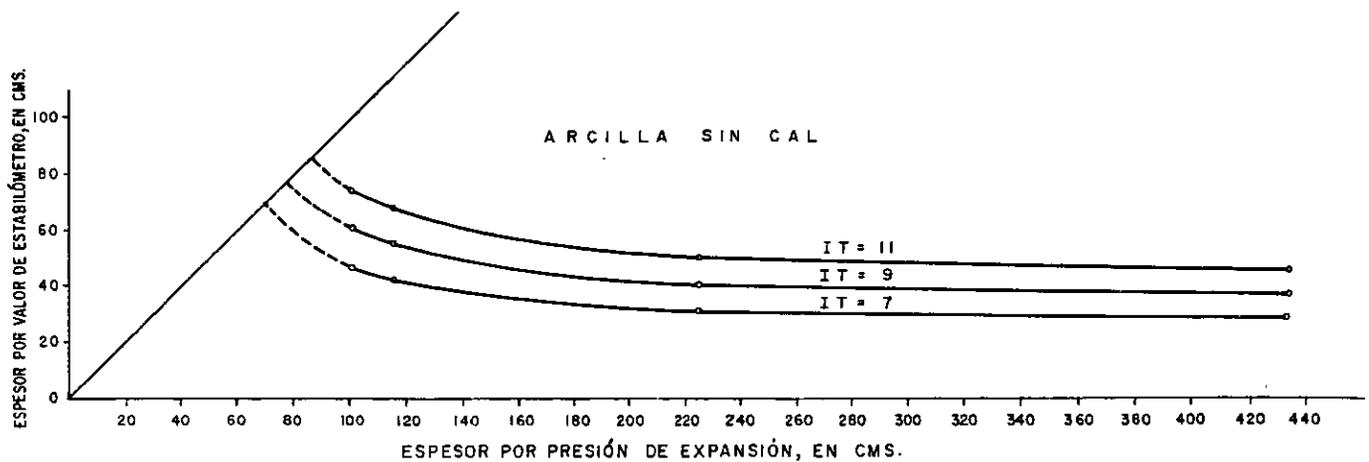


Figura XVI - A - 2.1. Espesores de grava equivalente obtenidos para el pavimento con y sin cal, para diferentes índices de tránsito.

De acuerdo con los espesores obtenidos, se tiene que el espesor necesario de grava equivalente que debe colocarse sobre la arcilla estudiada, resulta substancialmente menor al adicionar cal a la arcilla.

Nota.—Los dos problemas que forman este anexo son cortesía del M. en I. Carlos Fernández Loaiza.

REFERENCIAS

1. Ingles, O.G. y Metcalf, J.B. *Soil Stabilization: Principles and Practice*. Butterworths. Sydney, 1972.
2. Juárez Badillo, E. Rico, A. *Mecánica de Suelos*. Tomo III. Flujo de agua en suelos. Apéndice II. Editorial Limusa. México, D.F., 1974.
3. Smith, K.W.G. *Some problems of salts in semi-arid soils for stabilization with cement*. Memorias del I Congreso Australiano sobre construcción de carreteras. Vol. I. Camberra, 1962.
4. Fernández Loaiza, C. *Mejoramiento y estabilización de suelos*. Ponencia presentada al Seminario de Terracerías. Publicación interna de la Secretaría de Obras Públicas de México. México, D. F., 1975.
5. Torrente, M. y Sagiús, L. *Estabilización de Suelos. Suelo Cemento*. Editores Técnicos Asociados, S.A.—Barcelona, 1968.
6. Zalazar, L.M. *Estabilización de Suelos*. Notas para la eventual publicación de un libro, a disposición de los autores de éste por comunicación personal.—Buenos Aires, 1974.
7. Rico, A. y Orozco, J. *El efecto de la incorporación de finos en el comportamiento de materiales para base*. V Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones. Buenos Aires, 1975.
8. Texas Highway Department. *Materials and Test Division*. Método de prueba. Tex - 114 - E (Revisado en abril de 1970). Austin, Tex., 1970.
9. Yoder, E. J. *Principles of Pavement Design*. Capítulo 11. John Wiley and Sons, Inc. 1967.
10. Lambe T.W. y Whitman, R.V. *Mecánica de Suelos*. Editorial Limusa (Traducción: J.A. Jiménez Salas y J. M. Rodríguez). México, D.F., 1972.
11. Lambe. T.W. *Soil Stabilization. Capítulo 4 del libro Foundation Engineering*, Editado por G.A. Leonards. The Mc Graw-Hill Book Co., Inc. 1962.
12. Avitia, R. *Suelo-Cemento*. Publicación del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. IMCYC. México, D.F., 1971.
13. Norling L. T. *Standard Laboratory Tests for Soil - Ce-*

**LIBRO: CMT. CARACTERÍSTICAS DE
LOS MATERIALES**

PARTE: 4. MATERIALES PARA PAVIMENTOS

TÍTULO: 02. Materiales para Subbases y Bases

CAPÍTULO: 003. Materiales para Bases Tratadas

A. CONTENIDO

Esta Norma contiene los requisitos de calidad que cumplirán los materiales que se utilicen en la construcción de bases de pavimentos asfálticos y de pavimentos de concreto hidráulico, tratadas químicamente para modificar su comportamiento mecánico e hidráulico.

B. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Son materiales granulares que no cumplen con alguno de los requisitos de calidad establecidos en la Norma N·CMT-4·02·002, *Materiales para Bases Hidráulicas* o que, por razones estructurales, requieren la incorporación de un producto que modifica alguna de sus características físicas, generalmente haciéndolos más rígidos y resistentes, mejorando su comportamiento mecánico e hidráulico, para ser colocados sobre la subbase o la subrasante y formar una capa de apoyo para una carpeta asfáltica o para una carpeta de concreto hidráulico

Estos materiales, según el producto que se utilice en su tratamiento, se clasifican como

- B.1. Materiales modificados con cal** Cuando se les incorpora de dos (2) a tres (3) por ciento en masa, de cal, para modificar su plasticidad o reducir el efecto de la materia orgánica en los suelos.
- B.2. Materiales modificados con cemento** Cuando se les incorpora de tres (3) a cuatro (4) por ciento en masa, de cemento Portland, para modificar su plasticidad o incrementar su resistencia

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N CMT 4 02 003/04

- B.3. Materiales estabilizados con cemento. Cuando se les incorpora de ocho (8) a diez (10) por ciento en masa, de cemento Pórtland, para obtener una resistencia a la compresión simple a los veintiocho (28) días de edad, no menor de dos coma cinco (2.5) megapascales (25 kg/cm^2) e incrementar su rigidez, reduciendo así el efecto de la fatiga sobre la carpeta o mejorando el apoyo de las losas de concreto hidráulico.
- B.4. Materiales estabilizados con asfalto. Cuando se les incorpora, mediante una emulsión o un asfalto rebajado, de tres (3) a cuatro (4) por ciento en masa, de cemento asfáltico, para mejorar su comportamiento y el efecto de la plasticidad.
- B.5. Base de mezcla asfáltica (*Base negra*). Cuando a los materiales se les incorpora, en caliente o en frío, de cuatro (4) a cinco (5) por ciento en masa, de cemento asfáltico, para formar una capa de concreto asfáltico magro.
- B.6. Base de concreto hidráulico magro o de baja resistencia. Cuando a los materiales se les incorpora el cemento Pórtland necesario para obtener una resistencia a la compresión simple a los veintiocho (28) días de edad, de catorce coma siete (14.7) megapascales (150 kg/cm^2) a diecinueve coma seis (19.6) megapascales (200 kg/cm^2) y transformar un pavimento flexible en un pavimento rígido, como es el caso de concretos compactados con rodillo o de la recuperación en frío de pavimentos asfálticos y su base hidráulica.

C. REFERENCIAS

Esta Norma se complementa con los siguientes

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
Capas Estabilizadas	N-CTR-CAR-1-04-003
Recuperación en Frío de Pavimentos Asfálticos	N-CSV-CAR-4-02-001
Construcción de Subbases o Bases Estabilizadas	N-CSV-CAR-4-02-005
Construcción de Subbases y Bases de Concreto Compactado con Rodillo	N-CSV-CAR-4-02-006
Calidad del Cemento Pórtland	N-CMT-2-02-001
Materiales para Bases Hidráulicas	N-CMT-4-02-002
Cal para Estabilización de Suelos	N-CMT-4-03-001
Calidad de Materiales Asfálticos	N-CMT-4-05-001

NORMAS

N-CMT 4-02 003/04

Resistencia a la Compresión Simple de Cilindros de Concreto	M MMP-2-02-058
Muestreo de Materiales para Revestimiento, Subbase y Base	M MMP-4-01-001
Granulometría.....	M MMP-4-01-003
Contenido de Agua	M MMP-4-01-004
Límites de Consistencia	M MMP-4-01-006
Equivalente de Arena	M MMP-4-01-008
Desgaste Los Ángeles	M MMP-4-01-009
Compactación AASHTO	M MMP-4-01-010
Contenido de Materia Orgánica	M MMP-4-01-012
Determinación del Contenido de Asfalto para Estabilizar Suelos Finos No Plásticos	M MMP-4-01-014
Determinación del Contenido de Asfalto para Estabilizar Suelos Finos Plásticos	M MMP-4-01-015
Partículas Alargadas y Lajeadas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas	M MMP-4-04-005
Desprendimiento por Fricción de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas	M MMP-4-04-009
Cubrimiento con Asfalto Mediante el Método Inglés de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas	M MMP-4-04-010
Viscosidad Saybolt-Furol en Materiales Asfálticos	M MMP-4-05-004
Método Marshall para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa	M MMP-4-05-034
Contenido de Cemento Asfáltico en Mezclas	M MMP-4-05-038
Contenido de Agua en Mezclas Asfálticas	M MMP-4-05-039
Contenido de Disolventes en Mezclas Asfálticas	M MMP-4-05-040
Pérdida de Estabilidad por Inmersión en Agua de Mezclas Asfálticas	M MMP-4-05-042

D. REQUISITOS DE CALIDAD PARA MATERIALES MODIFICADOS CON CAL, MODIFICADOS CON CEMENTO O ESTABILIZADOS CON CEMENTO, PROVENIENTES DE UN BANCO

Los materiales modificados con cal, modificados o estabilizados con cemento, cumplirán con los requisitos de calidad que se indican a continuación

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N CMT 4 02 003/04

- D.1. La cal o el cemento Pórtland que se utilicen para la modificación o estabilización, cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en las Normas N-CMT-4-03-001, *Cal para Estabilización de Suelos* o N-CMT-2-02-001, *Calidad del Cemento Pórtland*.
- D.2. Salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa, cuando se utilice cemento Pórtland en la modificación o estabilización, éste será ordinario (Tipo CPO).
- D.3. El material por modificar con cal o con cemento Pórtland, o por estabilizar con cemento Pórtland, cumplirá con los requisitos de granulometría que correspondan, entre los indicados en la Norma N CMT-4 02 002, *Materiales para Bases Hidráulicas*, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa y no tendrá un contenido de materia orgánica tal que, al ser probado conforme al procedimiento descrito en el Manual M-MMP-4-01-012, *Contenido de Materia Orgánica*, produzca un líquido más oscuro que la solución normalizada N°3. En caso contrario se tratará con cal para reducir la actividad de la materia orgánica y cumplir con el valor antes anotado.
- D.4. El material una vez modificado con cal o con cemento Pórtland, cumplirá con el límite líquido, el índice plástico, el equivalente de arena, el Valor Soporte de California (CBR) y el Desgaste Los Angeles, que correspondan entre los indicados en la Norma N CMT 4 02 002, *Materiales para Bases Hidráulicas*.
- D.5. La resistencia a la compresión simple del material una vez estabilizado con cemento Pórtland, a los veintiocho (28) días de edad, determinada en especímenes cilíndricos con una relación altura/diámetro no menor de uno (1), compactados dinámicamente al cien (100) por ciento respecto de la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, conforme a lo indicado en el Manual M-MMP-4-01-010, *Compactación AASHTO* o al grado de compactación que indique el proyecto o señale la Secretaría y probados mediante el procedimiento descrito en el Manual M-MMP-2-02-058, *Resistencia a la Compresión Simple de Cilindros de Concreto*, será la establecida en el proyecto o la que indique la Secretaría, pero nunca inferior que dos coma cinco (2.5) megapascales (25 kg/cm²).

- D.6. Salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa, los materiales una vez modificados o estabilizados, con cal o con cemento Pórtland, se compactarán al cien (100) por ciento respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, conforme a lo indicado en el Manual M MMP-4 01-010, *Compactación AASHTO*.

E. REQUISITOS DE CALIDAD PARA MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO, PROVENIENTES DE UN BANCO

Los materiales estabilizados con asfalto, cumplirán con los requisitos de calidad que se indican a continuación:

- E.1. El producto asfáltico que se utilice en la estabilización cumplirá con los requisitos de calidad establecidos en la Norma N CMT-4-05-001, *Calidad de Materiales Asfálticos*, según su tipo.
- E.2. El material por estabilizar con asfalto cumplirá con los requisitos de granulometría que correspondan, entre los indicados en la Norma N CMT-4-02-002, *Materiales para Bases Hidráulicas*, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa. Tendrá un desprendimiento por fricción menor de veinticinco (25) por ciento y un cubrimiento con asfalto mayor de noventa (90) por ciento, determinados conforme a lo indicado en los Manuales M MMP-4-04-009, *Desprendimiento por Fricción de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas* y M-MMP-4-04-010, *Cubrimiento con Asfalto Mediante el Método Inglés de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, respectivamente y no tendrá un contenido de materia orgánica tal que, al ser probado conforme al procedimiento descrito en el Manual M MMP-4 01-012, *Contenido de Materia Orgánica*, produzca un líquido más oscuro que la solución normalizada N°3, en caso contrario se tratará con cal para reducir la actividad de la materia orgánica y cumplir con el valor antes anotado.
- E.3. Para estabilizar los materiales no plásticos, como las arenas, se mezclarán con la cantidad de producto asfáltico necesaria para obtener una estabilidad mínima de cero coma sesenta y cuatro (0.64) kilonewton, determinada mediante el procedimiento indicado en el Manual M MMP-4-01-014, *Determinación del Contenido de Asfalto para Estabilizar Suelos Finos No Plásticos*.
- E.4. Para estabilizar los materiales plásticos que tengan valores de límite líquido y equivalente de arena fuera de los límites indicados

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT 4 02 003/04

en la Norma N CMT 4-02-002, *Materiales para Bases Hidráulicas*, se mezclarán con la cantidad de producto asfáltico necesaria para cumplir con los requisitos de calidad indicados en la Tabla 1 de esta Norma, determinados mediante el procedimiento indicado en el Manual M MMP-4 01 015, *Determinación del Contenido de Asfalto para Estabilizar Suelos Finos Plásticos*.

TABLA 1.- Requisitos de calidad de los materiales plásticos estabilizados con productos asfálticos

Característica*	Valor
Estabilidad, kg. mínimo	180
Expansión, %, máximo	2
Absorción, %, máximo	5

* Determinada mediante el procedimiento indicado en el Manual M MMP-4 01 015, *Determinación del Contenido de Asfalto para Estabilizar Suelos Finos Plásticos*

E.5. Salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa, los materiales una vez estabilizados con producto asfáltico, se compactarán al cien (100) por ciento respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, conforme a lo indicado en el Manual M MMP-4-01-010, *Compactación AASHTO*

F. REQUISITOS DE CALIDAD DE MATERIALES PARA BASE DE MEZCLA ASFÁLTICA (BASE NEGRA) PROVENIENTES DE UN BANCO

Los materiales que se empleen en la construcción de bases de mezcla asfáltica (bases negras), cumplirán con los requisitos de calidad que se indican a continuación

- F.1. El producto asfáltico que se utilice cumplirá con los requisitos de calidad establecidos en la Norma N CMT 4 05 001, *Calidad de Materiales Asfálticos*, según su tipo
- F.2. El material pétreo cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la Tabla 2 y se muestran en la Figura 1, con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 3 de esta Norma, en función de la intensidad del tránsito en términos del número de ejes equivalentes acumulados, de ocho coma dos (8,2) toneladas, esperado durante la vida útil del pavimento (ΣL)

TABLA 2.- Requisitos de granulometría del material pétreo para bases de mezcla asfáltica (bases negras)

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$ (1)	$\Sigma L > 10^6$ (1)
37.5	1½"	100	100
25	1"	90 - 100	90 - 100
19	¾"	76 - 100	76 - 100
9.5	¾"	42 - 100	42 - 100
4.75	N°4	24 - 100	24 - 70
2	N°10	10 - 90	10 - 27
0.85	N°20	5 - 65	5 - 14
0.425	N°40	4 - 47	4 - 10
0.25	N°60	2 - 35	2 - 8
0.15	N°100	1 - 25	1 - 7
0.075	N°200	0 - 15	0 - 6

[1] ΣL = Numero de ejes equivalentes acumulados, de 8.2 t, esperado durante la vida útil del pavimento

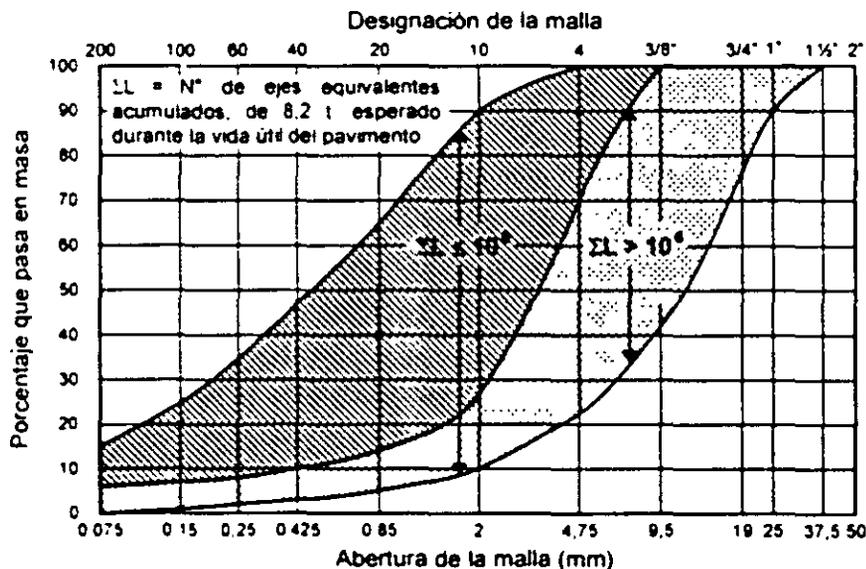


FIGURA 1 - Zonas granulométricas recomendables del material pétreo para bases de mezcla asfáltica (bases negras)

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N° CMT-4-02-003/04

TABLA 3.- Requisitos de calidad del material pétreo para bases de mezcla asfáltica (bases negras)

Característica	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10^6$ ⁽¹⁾	$\Sigma L > 10^6$ ⁽¹⁾
Limite líquido ^[2] , máximo	30	25
Índice plástico ^[2] , máximo	6	6
Contenido de agua ^[2] , máximo	1	1
Equivalente de arena ^[2] , mínimo	40	50
Partículas alargadas y lajeadas ^[2] , máximo	50	40
Desgaste Los Angeles ^[2] , máximo	30	30
Perdida de estabilidad por inmersión en agua, máximo ^[2]	25	25

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8.2 t, esperado durante la vida útil del pavimento

[2] Determinado mediante el procedimientos de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Clausula C de esta Norma

- F.3. La curva granulométrica del material pétreo, determinada mediante el procedimiento contenido en el Manual M MMP 4-01 003, *Granulometría*, tendrá una forma semejante a las de las curvas que se muestran en la Figura 1 de esta Norma, sin cambios bruscos de pendiente.
- F.4. El tamaño máximo permisible del material pétreo no será mayor de treinta y siete coma cinco (37.5) milímetros ($1\frac{1}{2}$ ") ni de dos tercios ($\frac{2}{3}$) del espesor de la capa de base asfáltica compacta.
- F.5. Cuando la base de mezcla asfáltica se diseñe mediante el procedimiento descrito en el Manual M MMP-4-05 034, *Método Marshall para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa*, de acuerdo con la intensidad del tránsito en términos del número de ejes equivalentes acumulados, de ocho coma dos (8.2) toneladas, esperado durante la vida útil del pavimento (ΣL), cumplirá con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 4 y con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) indicado en la Tabla 5 de esta Norma
- F.6. Cuando en la elaboración de la base de mezcla asfáltica se utilice cemento asfáltico, el mezclado en caliente se hará a la temperatura más baja posible que permita obtener una mezcla y cubrimiento del material pétreo uniformes, pero lo suficientemente alta para disponer del tiempo requiendo para su transporte, tendido

NORMAS

N-CMT 4 02 003/04

y compactación. En general, la temperatura de mezclado será la que, en la gráfica de Viscosidad-Temperatura, previamente obtenida para el cemento asfáltico que se utilice, corresponda a una viscosidad Saybolt-Furol de ochenta y cinco (85) más menos diez (± 10) segundos, determinada mediante el procedimiento descrito en el Manual M-MMP-4 05-004, *Viscosidad Saybolt-Furol en Materiales Asfálticos*. Los materiales pétreos se calentarán a la temperatura de mezclado más diez (10) grados Celsius.

TABLA 4.- Requisitos de calidad para bases de mezcla asfáltica diseñadas mediante el método Marshall

Características	Valor	
	$\Sigma L \leq 10^6$ [1]	$\Sigma L > 10^6$ [1]
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad, N (lb), mínimo	4 410 (990)	6 860 (1 540)
Flujo, mm (10^{-2} in)	2 - 4.5 (8 - 18)	2 - 4 (8 - 16)
Vacios en la mezcla asfáltica (VMC), %	3 - 8	3 - 8

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados de 8.2 t. esperado durante la vida útil del pavimento

TABLA 5.- Vacíos en el agregado mineral (VAM) para bases de mezcla asfáltica diseñadas mediante el método Marshall

Tamaño máximo del material pétreo utilizado en la mezcla		Vacíos en el agregado mineral (VAM) %, mínimo
mm	Designación	
4.75	N°4	18
6.3	½"	17
9.5	¾"	16
12.5	½"	15
19	¾"	14
25	1"	13
37.5	1½"	12

F.7. Cuando en la elaboración de la base de mezcla asfáltica se utilice emulsión asfáltica, ésta será de rompimiento medio o lento y cuando se utilice asfalto rebajado, éste será de fraguado rápido. La temperatura de las emulsiones asfálticas al momento del

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-003/04

mezclado, será de cinco (5) a cuarenta (40) grados Celsius; en el caso de asfaltos rebajados, será de sesenta (60) a ochenta (80) grados Celsius. Para obtener un buen cubrimiento de los materiales pétreos, es conveniente realizar el mezclado en planta.

- F.8. No se aplicarán los materiales asfálticos cuando la temperatura ambiente sea menor de cinco (5) grados Celsius, cuando esté lloviendo o haya amenaza de lluvia o cuando la velocidad del viento impida que la aplicación con petrolizadora sea uniforme.
- F.9. Los contenidos de cemento asfáltico, de agua y de disolventes en las bases asfálticas ya compactadas, determinados de acuerdo con los procedimientos descritos en los Manuales M MMP 4 05 038, *Contenido de Cemento Asfáltico en Mezclas*, M MMP 4 05 039, *Contenido de Agua en Mezclas Asfálticas* y M MMP 4-05 040, *Contenido de Disolventes en Mezclas Asfálticas*, respectivamente, quedarán dentro de los límites fijados en la Tabla 6 de esta Norma

TABLA 6.- Contenidos de cemento asfáltico, agua y disolventes en la base de mezcla asfáltica (base negra)

Material asfáltico empleado en la elaboración de la base de mezcla asfáltica	Tolerancia en el contenido de cemento asfáltico (CA) ⁽¹⁾ %	Contenido de agua libre permitido ⁽²⁾ %	Relación de disolventes a cemento asfáltico en masa valor K
Cemento asfáltico	CA : 0,05	1	0
Emulsión asfáltica sin disolventes	CA : 0,1	—	0
Emulsión asfáltica con disolventes	CA : 0,1	—	0,05 a 0,08
Asfaltos rebajados	CA : 0,1	1	0,05 a 0,08

[1] CA corresponde al contenido de cemento asfáltico determinado en el diseño de la mezcla, en por ciento respecto a la masa del material pétreo

[2] Respecto a la masa de la mezcla asfáltica

- F.10. Las temperaturas mínimas convenientes para el tendido y compactación de la base de mezcla asfáltica, serán determinadas mediante la curva *Viscosidad-Temperatura* del material asfáltico que se utilice, pero no será menor a la que corresponda a una viscosidad Saybolt-Furol de ciento cuarenta (140) más menos

NORMAS

N-CMT-4-02-003/04

quince (± 15) segundos, determinada mediante el procedimiento descrito en el Manual M-MMP-4-05-004, *Viscosidad Saybolt-Furoi en Materiales Asfálticos*

F.11. El espesor máximo de la base de mezcla asfáltica que se tienda será aquel que el equipo sea capaz de compactar, de tal forma que la diferencia entre los grados de compactación de los tres (3) centímetros superiores y de los tres (3) centímetros inferiores, sea menor de uno (1) por ciento o igual. Si es necesario, la base de mezcla asfáltica se construirá en dos o más capas.

F.12. Salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa, las bases de mezcla asfálticas se compactarán como mínimo al noventa y cinco (95) por ciento de su masa volumétrica máxima obtenida mediante el procedimiento descrito en el Manual M-MMP-4-05-034, *Método Marshall para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa*.

G. REQUISITOS DE CALIDAD DE MATERIALES PARA BASE DE CONCRETO HIDRÁULICO MAGRO O DE BAJA RESISTENCIA, PROVENIENTES DE UN BANCO

Los materiales que se empleen en la construcción de bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, cumplirán con los requisitos de calidad que se indican a continuación:

G.1. Salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa, el cemento Portland que se utilice será ordinario (Tipo CPO) y cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en la Norma N-CMT-2-02-001, *Calidad del Cemento Portland*.

G.2. El material pétreo cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la Tabla 7 y se muestran en la Figura 2, y con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 8 de esta Norma

G.3. La fracción del material pétreo que se retenga en la malla con abertura de cuatro coma setenta y cinco (4,75) milímetros (N°4) tendrá al menos cincuenta (50) por ciento en masa de partículas trituradas, que presenten dos caras fracturadas o más.

TABLA 7.- Requisitos de granulometría del material pétreo para bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia

Malla		Porcentaje que pasa
Abertura mm	Designación	
25	1"	100
19	¾"	87 - 100
9.5	½"	55 - 89
4.75	N°4	35 - 69
2	N°10	22 - 54
0.85	N°20	15 - 40
0.425	N°40	10 - 30
0.25	N°60	8 - 23
0.15	N°100	5 - 18
0.075	N°200	3 - 10

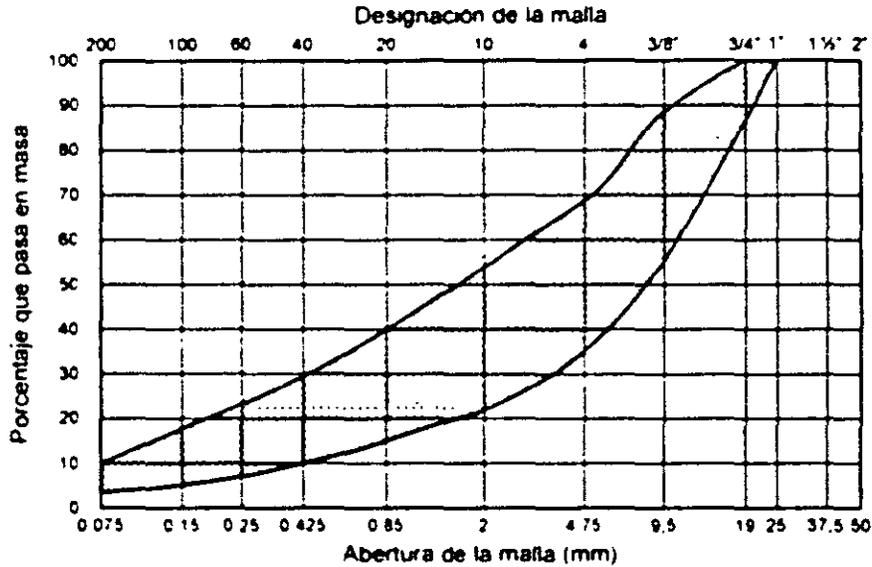


FIGURA 2 - Zona granulométrica recomendable del material pétreo para bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia

NORMAS

N CMT-4 02 003/04

TABLA 8.- Requisitos de calidad del material pétreo para bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia

Característica	Valor %
Índice plástico ⁽¹⁾ , máximo	NP
Equivalente de arena ⁽¹⁾ , mínimo	50
Desgaste Los Ángeles ⁽¹⁾ , máximo	30

[2] Determinado mediante el procedimientos de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula C de esta Norma

- G.4.** Los materiales pétreos nuevos, que no procedan de la recuperación en frío de pavimentos asfálticos, no tendrán un contenido de materia orgánica tal que, al ser probado conforme al procedimiento descrito en el Manual M-MMP-4-01-012, *Contenido de Materia Orgánica*, produzca un líquido más oscuro que la solución normalizada N°3.
- G.5.** Los materiales pétreos se suministrarán fraccionados al menos en dos tamaños, separados por la malla con abertura de cuatro coma setenta y cinco (4.75) milímetros (N°4), si la dosificación del cemento se hace en planta estacionaria. Si el cemento se agrega en el camino, se suministrará en un solo tamaño.
- G.6.** Los materiales pétreos combinados y el cemento Portland, se mezclarán en la proporción necesaria para producir un concreto hidráulico homogéneo, con la resistencia a la compresión simple establecida en el proyecto o aprobada por la Secretaría, de forma que en su estado fresco tenga un revenimiento de cero (0) centímetros. Será responsabilidad del Contratista de Obra determinar el proporcionamiento adecuado en el laboratorio para alcanzar la resistencia de proyecto.
- G.7.** La curva granulométrica de los materiales pétreos mezclados con el cemento Portland en la proporción a que se refiere la Fracción anterior, determinada mediante el procedimiento contenido en el Manual M-MMP-4-01-003, *Granulometría*, tendrá una forma continua, ubicada dentro de los límites que se establecen en la Tabla 9 y se muestran en la Figura 3 de esta Norma.

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N CMT 4-02 003/04

TABLA 9.- Requisitos de granulometría del material pétreo para bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, habiendo agregado el cemento Pórtland

Malla		Porcentaje que pasa
Abertura mm	Designación	
25	1"	100
19	¾"	88 - 100
9.5	¾"	59 - 90
4.75	N°4	41 - 72
2	N°10	29 - 58
0.85	N°20	23 - 45
0.425	N°40	18 - 36
0.25	N°60	16 - 30
0.15	N°100	14 - 25
0.075	N°200	12 - 18

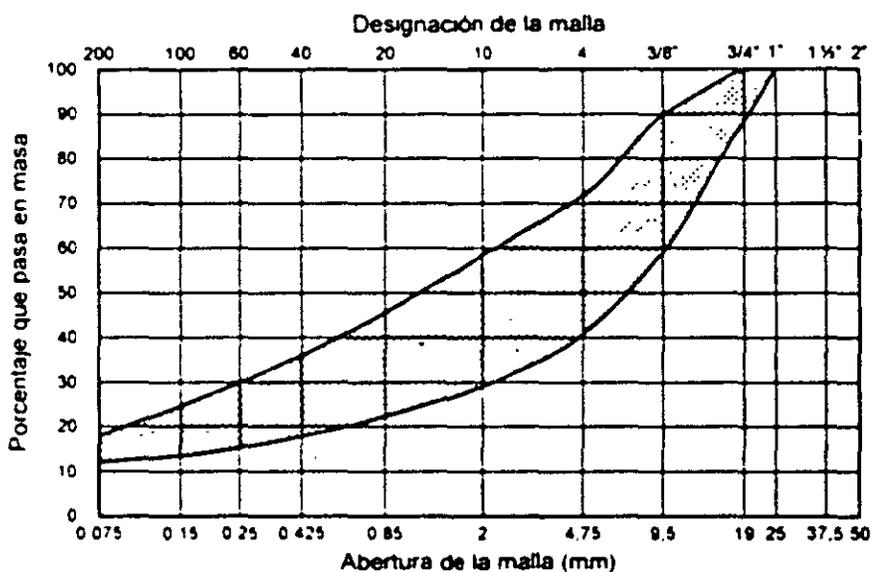


FIGURA 3 - Zona granulométrica recomendable del material pétreo para bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, habiendo agregado el cemento Pórtland

NORMAS

N CMT-4-02-003/04

- G.8. Salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa, la base de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, una vez agregado el cemento Pórtland, se compactará al cien (100) por ciento respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, conforme a lo indicado en el Manual M-MMP-4 01 010, *Compactación AASHTO*, con el contenido de agua óptimo. La compactación de una sección transversal cualquiera se terminará totalmente en menos de tres (3) horas, desde el instante en que se haya iniciado la incorporación y mezclado del agua para el concreto hidráulico magro o de baja resistencia destinado a esa sección, excepto cuando el proyecto indique o la Secretaría apruebe la utilización de un aditivo retardador de fraguado, en cuyo caso dicha sección se compactará totalmente dentro del plazo de trabajabilidad de la mezcla.
- G.9. En todo momento se mantendrá húmeda la superficie de la base de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, mediante riegos de agua finamente pulverizada, hasta la colocación de la membrana de curado, si el camino está fuera de operación. En caso contrario se continuará con los riegos durante tres (3) días.
- G.10. Una vez compactada y curada la base, su resistencia a la compresión simple a los veintiocho (28) días de edad, determinada mediante el procedimiento descrito en el Manual M-MMP-2-02-058, *Resistencia a la Compresión Simple de Cilindros de Concreto*, será la establecida en el proyecto o la que indique la Secretaría.

H. REQUISITOS DE CALIDAD DE MATERIALES PROVENIENTES DE LA RECUPERACIÓN DE PAVIMENTOS EXISTENTES

En general, los materiales obtenidos de la recuperación in-situ de pavimentos existentes, para ser utilizados en una nueva base, estabilizada o no, se corregirán mediante la adición de otros materiales provenientes de banco, de tal manera que cumplan con los requisitos establecidos en esta Norma según el uso a que se destinen. En los casos en que esto no sea posible o económicamente inconveniente, tal situación deberá ser tomada en cuenta en el diseño del pavimento.

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N CMT-4-02-003/04

I. TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO

Con el propósito de evitar la alteración de las características de los materiales antes de su utilización en la obra, debe tenerse cuidado en su transporte y almacenamiento, atendiendo los siguientes aspectos:

- I.1. Los materiales nuevos por modificar o estabilizar, o el material pétreo nuevo que se emplee en la construcción de bases de mezcla asfáltica o de concreto de baja resistencia, se almacenará en un sitio específicamente destinado para tal uso, considerando lo siguiente
 - I.1.1. Cuando en el almacén no se cuente con un firme, previamente a su utilización:
 - Se removerá la materia vegetal y se limpiará la superficie;
 - se conformará, nivelará y compactará la superficie hasta dejar una sección transversal uniforme que permita el drenaje; y
 - se colocará, compactará y mantendrá sobre el terreno, una capa de quince (15) centímetros de espesor como mínimo, utilizando el mismo material por almacenar, para evitar la contaminación del material que se almacene encima
 - I.1.2. Durante el almacenamiento se evitará la circulación de vehículos sobre los montículos de materiales, pero en caso de que esto sea estrictamente necesario, se colocará un camino de tablas para evitar la contaminación y degradación del material
 - I.1.3. Para evitar que se mezclen los diferentes materiales de distintos montículos, estos estarán lo suficientemente alejados uno del otro o separados entre sí por barreras colocadas con tal propósito
 - I.1.4. Cuando el material no vaya a usarse por un periodo prolongado, es conveniente cubrirlo con lonas para protegerlo de contaminantes y del clima

NORMAS

N-CMT 4-02-003/04

- I.2. Para la base de mezcla asfáltica elaborada, con cemento asfáltico, una vez concluido el mezclado en caliente se considerará lo siguiente:
 - I.2.1. La mezcla asfáltica caliente puede ser almacenada por corto tiempo en tolvas metálicas sin orificios, con superficie interior lisa y limpia, pero teniendo en cuenta que la temperatura de la mezcla se reducirá rápidamente. No se permitirá el almacenamiento en pilas o montones, aun cuando estos se cubran con lonas.
 - I.2.1.1. Si se utilizan silos térmicamente aislados, la mezcla asfáltica puede almacenarse hasta por veinticuatro (24) horas sin pérdida de temperatura o sangrado importante.
 - I.2.1.2. De requerirse largos periodos de almacenamiento, se utilizarán silos que incluyan sistemas de calentamiento que permitan mantener la temperatura de la mezcla, pero cuidando que no se presente sangrado u oxidación de ésta.
 - I.2.2. La mezcla asfáltica en caliente se transportará en vehículos con caja metálica con superficie interior lisa, sin orificios y que esté siempre limpia y libre de residuos de mezcla asfáltica, para evitar que la mezcla que se transporte se adhiera a la caja.
 - I.2.3. Antes de cargar el vehículo de transporte, se limpiará su caja y se cubrirá la superficie interior con un lubricante para evitar que se le adhiera la mezcla, utilizando una solución de agua y cal, agua jabonosa o algún producto comercial apropiado. En ningún caso se deben usar productos derivados del petróleo como el diesel, debido a problemas ambientales y posibles daños a la mezcla. Una vez hecho lo anterior, se levantará la caja para drenar el exceso de lubricante.
 - I.2.4. El vehículo de transporte se llenará con varias descargas sucesivas de la mezcla para minimizar la segregación de los materiales pétreos, colocándolas desde los extremos de la caja hacia su centro.
 - I.2.5. Una vez cargado el vehículo de transporte, se cubrirá la mezcla asfáltica con una lona que la preserve del polvo o de otro material contaminante y reduzca la pérdida de calor durante el trayecto.

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT 4 02 003/04

- 1.2.6. El tiempo máximo de transporte dependerá de la pérdida de calor de la mezcla, la que se tenderá y compactará a las temperaturas mínimas determinadas como se indica en la Fracción F 10. de esta Norma.
- 1.2.7. La temperatura de fabricación de la mezcla no deberá incrementarse para lograr que al final de su transporte tenga la temperatura adecuada para el tendido y compactación.
- 1.2.8. El transporte de la mezcla se hará siempre sobre superficies pavimentadas.
- 1.2.9. La longitud del transporte será de sesenta (60) kilómetros como máximo, la que se reducirá un diez (10) por ciento por cada grado de pendiente ascendente, medida como el desnivel de la planta de mezclado y el punto de tiro, dividido entre la longitud de transporte.

J. CRITERIOS PARA ACEPTACIÓN O RECHAZO

La aceptación de los materiales por parte de la Secretaría, se hará considerando lo siguiente

- J.1. El responsable del estudio geotécnico del banco, determinará a nivel de estudio, que el material cumple con las características y los requisitos de calidad indicados en esta Norma, según el tipo de material requerido en el proyecto, probando muestras obtenidas como se establece en el Manual M MMP 4 01-001, *Muestreo de Materiales para Revestimiento Subbase y Base*, mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C de esta Norma, e indicará en cada caso, el tratamiento a que deba sujetarse el material
- J.2. En caso de que el Contratista de Obra seleccione el banco, será el responsable de demostrar que el material cumple con las características y los requisitos de calidad señalados en esta Norma, con base en lo indicado en la Fracción anterior y de realizar, cuando proceda, el estudio para su tratamiento y obtener la aprobación por parte del Residente. El Contratista de Obra entregará a la Secretaría un certificado de calidad que garantice el cumplimiento de todos los requisitos establecidos en esta Norma, expedido por su laboratorio o por un laboratorio externo, aprobados por la Secretaría

NORMAS

N-CMT-4-02 003/04

- J.3.** Durante el proceso de producción, con el propósito de controlar la calidad del material al ejecutar la obra, el Contratista de Obra, por cada trescientos (300) metros cúbicos o fracción de material que suministre o recupere en el camino, realizará las pruebas necesarias que aseguren que:
- J.3.1.** El material pétreo de un mismo tipo, para ser modificado con cal o con cemento Portland, estabilizado con cemento Portland o con asfalto, o utilizado en la construcción de bases de mezcla asfáltica o de bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, cuando no proceda de la recuperación en fnó de pavimentos asfálticos, cumpla con la granulometría y, en su caso, con el contenido de materia orgánica indicados en esta Norma.
 - J.3.2.** El material pétreo de un mismo tipo, una vez modificado con cal o con cemento Portland, cumpla con el límite líquido, el índice plástico y el equivalente de arena indicados en esta Norma.
 - J.3.3.** El material pétreo de un mismo tipo, una vez modificado con cal o con cemento Portland, cumpla con el límite líquido, el índice plástico y el equivalente de arena indicados en esta Norma.
 - J.3.4.** El material pétreo de un mismo tipo, una vez estabilizado con cemento Portland, cumpla con la resistencia a la compresión simple indicada en esta Norma, en el proyecto o señalada por la Secretaría.
 - J.3.5.** El material pétreo de un mismo tipo, una vez estabilizado con asfalto, cumpla con la estabilidad indicada en esta Norma.
 - J.3.6.** El material pétreo de un mismo tipo, que se emplee en la construcción de bases de mezcla asfáltica (bases negras) o de concreto magro o de baja resistencia, cumpla con la granulometría y el equivalente de arena indicados en esta Norma.
 - J.3.7.** La mezcla asfáltica producida para bases (bases negras), con material pétreo de un mismo tipo, cumpla con el contenido de asfalto indicado en esta Norma.

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02 003/04

- J.3.8. El material pétreo de un mismo tipo, que se emplee en la construcción de bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, una vez mezclado con el cemento Pórtland, cumpla con la granulometría indicada en esta Norma.
- J.3.9. El concreto hidráulico magro o de baja resistencia, producido con material pétreo de un mismo tipo, cumpla con el revenimiento señalado en esta Norma.
- J.4. Una vez tendidas y compactadas las capas de base tratada, el Contratista de Obra realizará las pruebas necesarias que aseguren el cumplimiento del grado de compactación y, en su caso, de la estabilidad o la resistencia a la compresión simple, establecidos en esta Norma, en el proyecto o señalado por la Secretaría, de acuerdo con lo indicado en las Cláusulas H. de las Normas N-CTR-CAR-1 04 003, *Capas Estabilizadas*, N-CSV-CAR-4-02-001, *Recuperación en Frío de Pavimentos Asfálticos*, N-CSV-CAR-4-02-005, *Construcción de Subbases o Bases Estabilizadas* y N-CSV-CAR-4-02-006, *Construcción de Subbases y Bases de Concreto Compactado con Rodillo*, según sea el caso.
- J.5. Además de lo señalado en las Fracciones J.3 y J.4., el Contratista de Obra, por cada tres mil (3 000) metros cúbicos o fracción de material estabilizado con asfalto, de mezcla asfáltica para bases (bases negras) y de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, que se hayan producido con un mismo tipo de material pétreo, realizará las pruebas necesarias que aseguren que cumplen con todos los valores establecidos en esta Norma.
- J.6. Las pruebas a que se refieren las Fracciones J.3 y J.5., se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M MMP 4 01-001, *Muestreo de Materiales para Revestimiento, Subbase y Base*, y mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma. Si el material procede de la recuperación in-situ de pavimentos existentes, se muestreará después de corregido mediante la adición de otro material y mezclado, o inmediatamente después de recuperado si así lo establece el proyecto, para verificar el cumplimiento de las características establecidas en el proyecto.