

CAPITULO II. “CLASIFICACION Y DISEÑOS DE PAVIMENTOS”.

Con fines fundamentales prácticos, los pavimentos se dividen en rígidos y flexibles. Sin embargo la rigidez o flexibilidad que un pavimento exhibe no es fácil de definir tan adecuadamente como para permitir una diferenciación entre uno y otro tipo de pavimento y hasta cierto punto materia de juicio, el precisar que tan rígido puede ser un pavimento flexible o que tan flexible puede llegar a ser un pavimento rígido.

Los pavimentos se diferencian y definen en términos de los materiales de que están constituidos y de cómo se estructuran esos materiales y no por la forma en cómo distribuyen los esfuerzos y las deformaciones producidas por los vehículos a las capas inferiores, lo que constituirá un criterio de clasificación más acertado.

II.1 TIPOS DE PAVIMENTOS.

PAVIMENTOS FLEXIBLES.

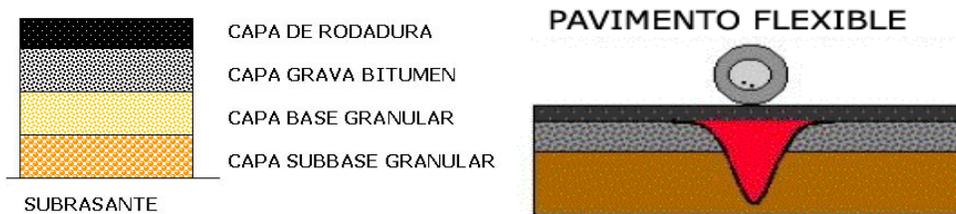
Un pavimento flexible es una carpeta asfáltica, la cual proporciona la superficie de rodamiento. Las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores se distribuyen por medio de las características de fricción y de cohesión de las partículas de los materiales y la carpeta asfáltica se pliega a pequeñas deformaciones de las capas inferiores sin que su estructura se rompa. Las capas que forman un pavimento flexible son:

CARPETA ASFALTICA.

BASE.

SUB-BASE.

Todas estas capas se construyen sobre la capa subrasante.



ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE

Esta estructura se diseña según condiciones especiales, los principales parámetros de diseño de un pavimento por métodos racionales son:

- ✚ Numero de ejes o vehículos que pasan por la vía.
- ✚ Módulos elásticos de las capas que conforman el pavimento.
- ✚ Temperatura del proyecto.
- ✚ Espesores de las capas.

Este tipo de pavimento llamado flexible, se diseña para un determinado número de repeticiones de carga, y alcanzar este número de repeticiones, se espera que el pavimento se fatigue y falle, este fallo del pavimento se demuestra con la presencia de fisuras y grietas en la parte superficial.

PAVIMENTOS RIGIDOS.

Un pavimento rígido es aquel cuyo elemento fundamental es una losa de concreto hidráulico en la que se distribuyen las carga de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes que trabajan en conjunto con la que recibe directamente las cargas. Este tipo de pavimento no puede plegarse a las deformaciones de las capas inferiores sin que se presente la falla estructural. Aunque en teoría las losas de concreto hidráulico pueden colocarse en forma directa sobre la sub-rasante, es necesario construir

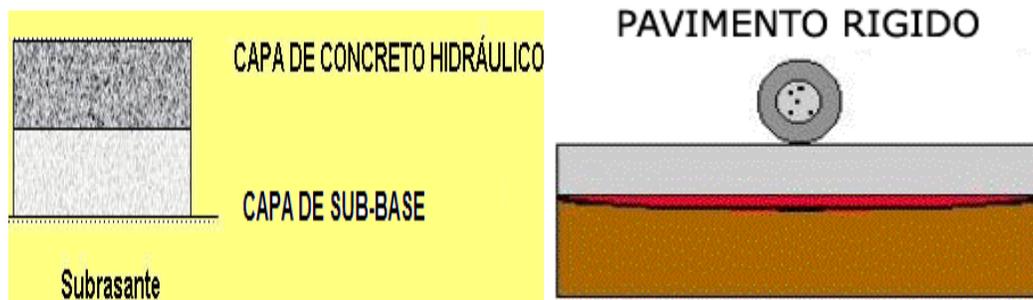
una capa de sub-base para evitar que los finos sean bombeados hacia la superficie de rodamiento al pasar los vehículos, lo cual puede provocar fallas de esquina o de orilla de la losa.

La sección transversal de un pavimento rígido está constituido por:

✚ Losa de concreto.

✚ Capa de sub-base.

Ambas apoyadas sobre la sub-rasante.



ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RIGIDO

Para el caso de un pavimento rígido el cual no posee, todas estas capas y donde la más externa es una capa construida en concreto que por lo general es colocada en placas, se diseña también con un tráfico específico, con la diferencia que este pavimento puede fallar con solo una repetición de carga. La grafica anterior nos muestra un ejemplo de materiales en la conformación de un pavimento rígido.

Como vemos un pavimento no es solo lo que vemos, es una estructura funcional, compleja y donde la tecnología nos lleva a utilizar materiales no convencionales para su diseños, por ejemplo en pavimentos flexibles se realizan diseños con capas de grava –escoria, grava – cemento, cauchos etc., con el fin de brindar calidad a menores costos.

Hay que tomar en cuenta diversos factores para el diseño de los pavimentos rígidos, por ejemplo cuando el material local no tiene las características para cumplir tal función, por presentar problemas de expansión, bajo valor relativo de soporte, se recurre a la utilización de materiales seleccionados de mejor calidad, o bien a su tratamiento con productos tales como cemento portland, cal, asfaltos; dependiendo su selección de aspectos prácticos y económicos.

La capacidad de respuesta estructural de la subrasante se determina mediante el modulo de reacción, k , que constituye uno de los principales parámetros de diseño de los pavimentos rígidos. Teniendo en cuenta la elevada rigidez del concreto y el efecto de la viga desarrollado por las losas del pavimento, los niveles de esfuerzo y deformaciones producidos en la subrasante son muy bajos, de manera que no se requiere un elevado valor de soporte en dicha capa, siendo más importante que dicho efecto de soporte sea uniforme, condición que además debe mantenerse a través del tiempo.

En la medida en que el modulo de reacción k aumenta, el espesor necesario de la losa se reduce para iguales condiciones de transito y de resistencia d concreto, de manera que una mejoría en la calidad o resistencia de la capa subrasante se traduce en un ahorro en el espesor del concreto, el cual llega a ser significativo, hasta el orden del 10 por ciento, principalmente cuando se trata de pavimentos de transito intenso.

Debe mencionarse, por otro lado, que actualmente se están aplicando algunos métodos de diseño de espesores, principalmente del tipo mecanistico - empírico, que se basan en la caracterización de los materiales utilizando el modulo de resistencia, M_r , que es una medida de las propiedades elásticas de los suelos, parámetro que ha sido reconocido internacionalmente como un medio para caracterizar los materiales para propósitos de diseño o evaluación de pavimentos.

Con respecto a la sub-base debe fundamentalmente evitar el efecto de bombeo de los suelos finos. Una capa de sub-base es obligada en los casos en que se combinen suelos finos, agua y tránsito pesado, de tal forma que se induzca el efecto de bombeo. Dichas condiciones se presentan frecuentemente en el caso de pavimentos importantes que soportaran un elevado volumen de tránsito pesado. Las condiciones necesarias para producir dicho efecto no se tienen en caminos secundarios de bajo nivel de tránsito ni en calles residenciales. En estos últimos casos la utilización de una capa de sub-base no se justifica desde el punto de vista económico y los resultados deseados se pueden lograr mediante la preparación adecuada y menos costosa de la subrasante.

Las variaciones de temperatura y humedad que ocurren estacionalmente e inclusive en lapsos tan cortos como un día, producen gradientes que generan esfuerzos y deformaciones en las losas que contribuyen a grietamiento.

Bajo tales efectos, las losas se expanden y se contraen, produciéndose además alabeos que adoptan curvaturas cóncavas durante la noche y convexas durante el día, pudiendo adicionalmente el suelo de cimentación experimentar cambios volumétricos.

II.2 METODOS DE DISEÑOS DE PAVIMENTOS.

Los métodos de diseños de pavimentos, tanto rígidos como flexibles, han sufrido importantes transformaciones a lo largo del tiempo. Desde aquellos primeros métodos de diseño de tipo empírico de principios del presente siglo, basados en un sistema de clasificación de suelos o apoyados en pruebas de resistencia igualmente empíricas, hasta la época actual, los métodos de diseño se han visto fuertemente enriquecidos por las aportaciones de importantes investigaciones, tales como las realizadas en tramos experimentales, entre los que destaca el llevado a cabo bajo la dirección de la entonces American Association of State Highway Officials (AASHO), en Estados Unidos, cuyos primeros resultados se incorporaron en 1962 a la tecnología de los pavimentos.

A partir de ese momento y con la introducción de las computadoras, la utilización de complicados instrumentos y equipos de ensaye y medición, y de procedimientos de análisis tales como el método de los elementos finitos, se han desarrollado métodos de diseño más avanzados como los denominados mecanístico – empíricos, basado en resultados de laboratorio y observaciones de comportamiento en el campo, con los cuales se configura un modelo de comportamiento.

Westergaard considero, en 1927, tres posiciones de las cargas sobre el pavimento: en una esquina, en el borde y en el interior de la losa, en la cuales los esfuerzos producidos alcanzaban niveles decrecientes en ese orden, razón por la cual debe recurrirse a elementos de transferencia de cargas en las juntas, a sobre anchos o a acotamientos de concreto para que se presenten siempre condiciones equivalentes a cargas aplicadas en el interior de las losas. Las condiciones de cargas en borde o de las losas. Las condiciones de cargas en borde o esquina pueden ocurrir por la presencia de una grieta, cuando deja de haber trabazón mecánica en sus caras.

METODO AASHTO.

El método de diseño de espesores de pavimentos rígidos está basado en los resultados obtenidos de la prueba de carreteras concebida y promovida gracias a la organización que ahora conocemos como AASHTO para estudiar el comportamiento de estructuras de pavimento de espesores conocidos, bajo cargas móviles de magnitudes y frecuencias conocidas y bajo el efecto del medio ambiente en secciones conocidas de pavimentos rígidos y flexibles. La planeación empezó en 1951, la construcción del proyecto comenzó en 1956 muy cerca de Ottawa, Illinois. El tráfico controlado de la prueba se aplicó de octubre de 1958 a noviembre de 1960 y el método estuvo listo para 1961.

El objetivo principal de las pruebas consistía en determinar relaciones significativas entre el comportamiento de varias secciones de pavimento y las

cargas aplicadas sobre ellas, o bien para determinar las relaciones significativas entre un número de repeticiones de ejes con cargas, de diferente magnitud y disposición, y el comportamiento de diferente espesores de pavimentos, conformados con bases y sub-bases, colocados en suelos de características conocidas.

En total se examinaron 368 secciones de pavimento rígido y 468 secciones de pavimento flexible. Las mediciones físicas de las secciones de prueba se transfirieron a fórmulas que podían dar nuevamente valores numéricos de capacidad de servicio. Estos valores graficados contra las aplicaciones de carga forman una historia de comportamiento para cada sección de prueba que permiten la evaluación de cada uno de los diversos diseños.

En 1993 se realizó una Revisión del Diseño de Sobrecarpetas de pavimento. Para 1998 se publicó un método alternativo para diseño de pavimentos, que corresponde a un "Suplemento a la guía de diseño de estructuras de pavimento".

Las variables que intervienen en el diseño de los pavimentos constituyen en realidad la base del diseño del pavimento por lo que es necesario conocer las consideraciones más importantes que tienen que ver con cada una de ellas para así poder realizar diseños confiables y óptimos al mismo tiempo.

Variables de diseño de Pavimentos Rígidos:

- ✚ Espesor.
- ✚ Serviciabilidad (inicial y final).
- ✚ Tráfico (ejes equivalentes).
- ✚ Transferencia de carga.
- ✚ Propiedades del concreto (módulos de ruptura y elasticidad).
- ✚ Resistencia de la subrasante (módulo de reacción).
- ✚ Drenaje.
- ✚ Confiabilidad (confiabilidad y desviación estándar).

ESPESOR.

El espesor del pavimento de concreto es la variable que pretendemos determinar al realizar un diseño, el resultado del espesor se ve afectado por todas las demás variables que intervienen en los cálculos. Es importante especificar lo que se diseña, ya que a partir de espesores regulares una pequeña variación en el espesor puede significar una variación importante en la vida útil.

SERVICIABILIDAD.

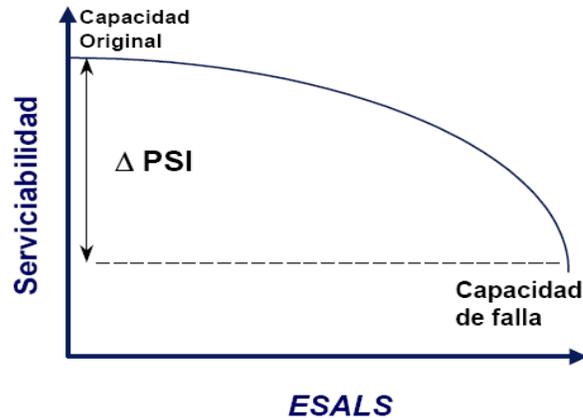
Se define como la habilidad del pavimento de servir al tipo de tráfico (autos y camiones) que circulan en la vía. Se mide en una escala del 0 al 5 donde 0 (cero) significa una calificación para pavimento intransitable y 5 (cinco) para un pavimento excelente.

La servicialidad es una medida subjetiva de la calificación del pavimento, sin embargo la tendencia es poder definirla con parámetros medibles como lo son: el índice de perfil, índice de rugosidad internacional, coeficiente de fricción, distancias de frenado, visibilidad, etc.

INDICE DE SERVICIO.	CALIFICACION.
	EXCELENTE
	MUY BUENO
	BUENO
	REGULAR
	MALO
	INTRANSITABLE

ESCALA DE CALIFICACION PARA LA SERVICIALIDAD

El procedimiento de diseño AASHTO predice el porcentaje de pérdida de servicialidad (Δ PSI) para varios niveles de tráfico y cargas de ejes. Entre mayor sea el Δ PSI será la capacidad de carga de pavimento antes de fallar.

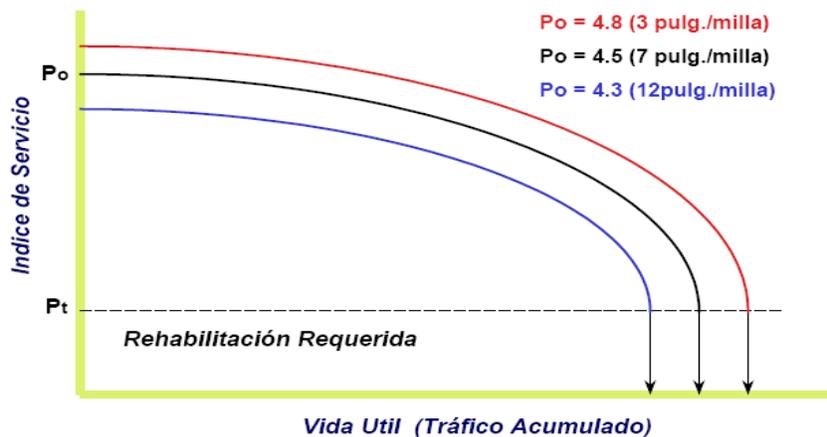


Serviciabilidad Inicial (P_o), es la condición que tiene un pavimento inmediatamente después de la construcción del mismo. Los valores recomendados por AASHTO para este parámetro son:

- ✚ Para pavimento de Concreto = 4.5
- ✚ Para pavimento de Asfalto = 4.2

Usando buenas técnicas de construcción, el pavimento de concreto puede tener una serviciabilidad $P_o = 4.7$ ó 4.8 .

Mientras mejor se construya inicialmente un pavimento, o bien, mientras mejor índice de serviciabilidad inicial tenga mayor será su vida útil, esto es debido a que las curvas de deterioro se comportan de manera paralela o con el mismo gradiente para unas condiciones determinadas, como se muestra a continuación:



Serviciabilidad Final (Pt), la serviciabilidad final tiene que ver con la calificación que esperamos tenga el pavimento al final de su vida útil. Los valores recomendados de Serviabilidad Final Pt para el caso de México, son:

- ✚ Para Autopistas 2.5.
- ✚ Para Carreteras 2.0.
- ✚ Para Zonas Industriales 1.8.
- ✚ Pavimentos Urbanos Principales 1.8.
- ✚ Pavimentos Urbanos Secundarios 1.5.

TRAFICO.

El Tráfico es una de las variables más significativas del diseño de pavimentos y sin embargo es una de las que más incertidumbre presenta al momento de estimarse. Es importante hacer notar que debemos contar con la información más precisa posible del tráfico para el diseño, ya que de no ser así podríamos tener diseños inseguros o con un grado importante de sobre diseño.

La metodología AASHTO considera la vida útil de un pavimento relacionada el número de repeticiones de carga que podrá soportar el pavimento antes de llegar a las condiciones de servicio final predeterminadas para el camino. El método AASHTO utiliza en su formulación el número de repeticiones esperadas de carga de Ejes Equivalentes, es decir, que antes de entrar a las fórmulas de diseño, debemos transformar los Ejes de Pesos Normales de los vehículos que circularán por el camino, en Ejes Sencillos Equivalentes de 18 kips (8.2 Ton) también conocidos como ESAL's.

Lo conducente es realizar los cálculos para el carril de diseño, seleccionado para estos fines por ser el que mejor representa las condiciones críticas de servicio de la calle o camino. Existen algunos factores que nos ayudan a determinar con precisión el tráfico que circulará por el carril de diseño.

Los pavimentos de concreto el AASHTO los diseña por fatiga. La fatiga la podemos entender como el número de repeticiones ó ciclos de carga y descarga

que actúan sobre un elemento. En realidad al establecer una vida útil de diseño, en realidad lo que estamos haciendo es tratar de estimar, en un período de tiempo, el número de repeticiones de carga a las que estará sometido el pavimento.

La vida útil mínima con la que se debe diseñar un pavimento rígido es de 20 años, es común realizar diseños para 30, 40 ó más de 50 años. Adicionalmente se deberá contemplar el crecimiento del tráfico durante su vida útil, que depende en gran medida del desarrollo económico - social de la zona en cuestión, del mejoramiento de las características del pavimento se puede generar tráfico atraído e igualmente se debe considerar la capacidad de tráfico de la vía.

$$T_{vu} = T_{pa} \times FCT.$$

Donde:

T_{vu} = Tráfico en la vida útil.

T_{pa} = Tráfico durante el primer año.

FCT = Factor de crecimiento del tráfico, que depende de la Tasa de Crecimiento Anual y de la Vida Útil.

TASA DE CRECIMIENTO ANUAL.

Dependiendo de muchos factores, tales como el desarrollo económico - social, la capacidad de la vía, etc. Es normal que el tráfico vehicular vaya aumentando con el paso del tiempo, hasta que llega a un punto tal de saturación en el que el tráfico se mantiene prácticamente sin crecer.

Es conveniente prever este crecimiento del tráfico, tomando en consideración una tasa de crecimiento anual con la que se calcula un factor de crecimiento del tráfico. La tasa de crecimiento pudiera variar de acuerdo a los tipos de vehículos, pueden crecer más unos tipos que otros.

A medida que un camino se va congestionando de tráfico su crecimiento se va haciendo más lento, este efecto debemos considerarlo pudiendo estimar una

Tasa de Crecimiento Equivalente, para considerar las variaciones en el crecimiento durante la vida útil.

Es importante investigar adecuadamente la tasa de crecimiento apropiada para el caso en particular que se esté considerando. A continuación se muestran algunos valores típicos de tasas de crecimiento, sin embargo estos pueden variar según el caso.

Valores comunes de tasas de crecimiento			
Caso	Tasa de Crecimiento		
Crecimiento Normal	1%	a	3%
Vías Completamente Saturadas	0%	a	1%
Con tráfico inducido *	4%	a	5%
Alto crecimiento *	mayor al 5%		
* SOLAMENTE DURANTE 3 A 5 AÑOS.			

FACTOR DE CRECIMIENTO DEL TRÁFICO.

El factor de crecimiento del tráfico considera los años de vida útil más un número de años adicionales debidos al crecimiento propio de la vía.

$$FCT = (1+g)^n - 1 / g$$

DONDE: g = Tasa de crecimiento.
n= años de vida útil.

FACTOR DE SENTIDO.

Del total del tráfico que se estima para el diseño del pavimento deberá determinarse el correspondiente a cada sentido de circulación, esto se realiza mediante la introducción del Factor de Sentido, cuyos valores recomendados son:

-  Un sentido de Circulación 1.0
-  Doble sentido de Circulación 2.0

FACTOR DE CARRIL.

El factor de Carril es un coeficiente que nos permite estimar que tanto del tráfico en el sentido de diseño circula por el carril de diseño. En una vía de un solo carril en el sentido de circulación de diseño, obviamente el 100% del tráfico circulará por ese carril que al mismo tiempo será nuestro carril de diseño.

Una vía con dos carriles en el sentido de diseño, dependiendo del tipo de camino: carretero ó urbano, y de que tan saturada esté la vía, pueda ser que sobre el carril de diseño circule entre un 50% a un 80% del tráfico en ese sentido.

El AASHTO recomienda algunos valores, sin embargo no necesariamente deben utilizarse.

NUMERO DE CARRILES.	FACTOR DE CARRIL.
1	1
2	0.8 a 1.00
3	0.60 a 0.80
4	0.50 a 0.75

FACTOR DE CARRIL

FACTOR DE EQUIVALENCIA DE TRABAJO.

Las fórmulas que permiten convertir el número de ejes de pesos normales a ejes equivalentes dependen del espesor del pavimento, de la carga del eje, del tipo de eje y de la serviciabilidad final que pretendemos para el pavimento. A continuación se muestran dichas fórmulas:

$$F_{ec} = \frac{W_{t18}}{W_{tx}}$$

$$\log \frac{W_{tx}}{W_{t18}} = 4.62 \log (18+1) - 4.62 \log (L_x + L_2) + 3.28 \log (L_2) + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}$$

$$G_t = \log \frac{4.5 - Pt}{4.5 - 1.5} \quad \beta_x = 1 + \frac{3.63 (L_x + L_2)^{5.20}}{(D + 1)^{8.46} (L_2)^{3.52}}$$

En Donde:

W_{tx} = # Aplicaciones de carga definida al final del tiempo t.

W_{t18} = # Aplicaciones de carga equivalente al final del tiempo t.

L_x = Carga del eje en kips
 L_2 = Código de eje cargado:
 $L_2 = 1$ Para eje Sencillo
 $L_2 = 2$ Para eje Tandem
 $L_2 = 3$ Para eje Tridem
 $G_t = f (P_t)$
 β_{18} = Valor de β_x cuando $L_x=18$ y $L_2 = 1$

Es importante hacer notar que los ejes equivalentes se calculan de manera diferente para un pavimento rígido que para un flexible. Cuando se multiplica el tráfico por las diferentes factores de equivalencias, se obtienen los ESAL's (Ejes Sencillos Equivalentes).

El tráfico pesado es el que mayor daño produce a los pavimentos por lo que deberá estimarse con la mayor precisión posible. Como ejemplo podemos mencionar que el daño que produce una sola aplicación de carga de un camión semi-remolque de 36 Ton. equivale al daño que producen 9,523 repeticiones de carga de un vehículo tipo automóvil.

Otro factor importante a considerar es la sobrecarga, debemos conocer con la mayor certeza posible los pesos de los ejes de los vehículos que estarán circulando sobre el pavimento que estamos diseñando, ya que las sobrecargas generan un daño muy importante al pavimento y su crecimiento es de orden exponencial.

TRANSFERENCIA DE CARGAS.

La transferencia de carga es la capacidad que tiene una losa del pavimento de transmitir fuerzas cortantes con sus losas adyacentes, con el objeto de minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura del pavimento, mientras mejor sea la transferencia de cargas mejor será el comportamiento de las losas del pavimento.

El método AASHTO considera la transferencia de cargas mediante el factor de transferencia de cargas J.

La efectividad de la Transferencia de Carga entre losas adyacentes depende de varios factores:

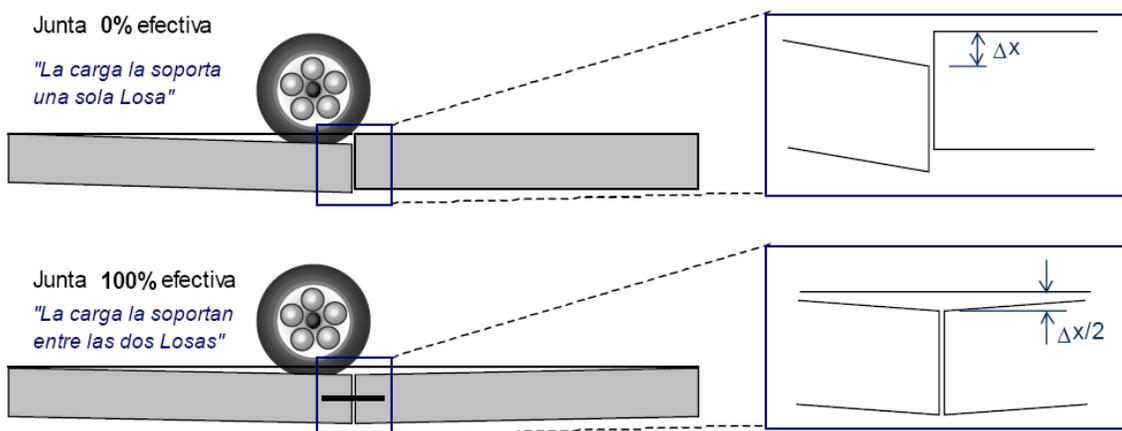
- + Cantidad de Tráfico.
- + Utilización de Pasajuntas.
- + Soporte Lateral de las Losas.

Una manera de transferir la carga de una losa a otra es mediante la trabazón de agregados que se genera en la grieta debajo del corte de la junta, sin embargo esta forma de transferir carga solamente se recomienda para vías con tráfico ligero.

La utilización de pasajuntas es la manera más conveniente de lograr la efectividad en la transferencia de cargas, los investigadores recomiendan evaluar dos criterios para determinar la conveniencia de utilizar pasajuntas. Utilizar pasajuntas cuando:

- El tráfico pesado sea mayor al 25% del tráfico total.
- El número de Ejes Equivalentes de diseño sea mayor de 5.0 millones de Esal's.

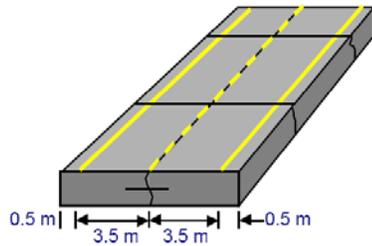
El Coeficiente de Transferencia de Carga considera el esfuerzo de transferencia a través de la junta o grieta.



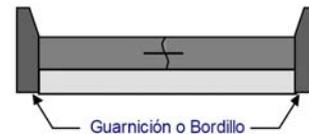
SOPORTE LATERAL.

El confinamiento que produce el soporte lateral contribuye a reducir los esfuerzos máximos que se generan en el concreto por efecto de las cargas. Un pavimento de concreto puede considerarse lateralmente soportado cuando tenga algunas de las siguientes características en su sección:

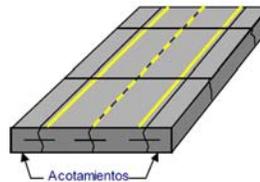
- Carril Ancho ≥ 4.0 m



- Confinamiento con Guarniciones o Banquetas



- Con Acotamientos Laterales



PASAJUNTAS.

Barra de acero redondo liso $f_y = 4,200$ kg/cm² la cual no se debe de adherir al concreto permitiendo el libre movimiento de losas longitudinalmente, pero si debe de transferir verticalmente parte de la carga aplicada en una losa a la adyacente. Se colocan perfectamente alineadas a la mitad del espesor de la losa.

El diámetro, longitud y separación de las pasajuntas está en función del espesor de las losas principalmente. Algunas recomendaciones prácticas para la selección de la Barra son las siguientes:

Espesor de Losa		Barras Pasajuntas					
		Diámetro		Longitud		Separación	
cm	in	mm	in	cm	in	cm	in
13 a 15	5 a 6	19	3/4	41	16	30	12
15 a 20	6 a 8	25	1	46	18	30	12
20 a 30	8 a 12	32	1 1/4	46	18	30	12
30 a 43	12 a 17	38	1 1/2	51	20	38	15
43 a 50	17 a 20	45	1 3/4	56	22	46	18

PROPIEDADES DEL CONCRETO.

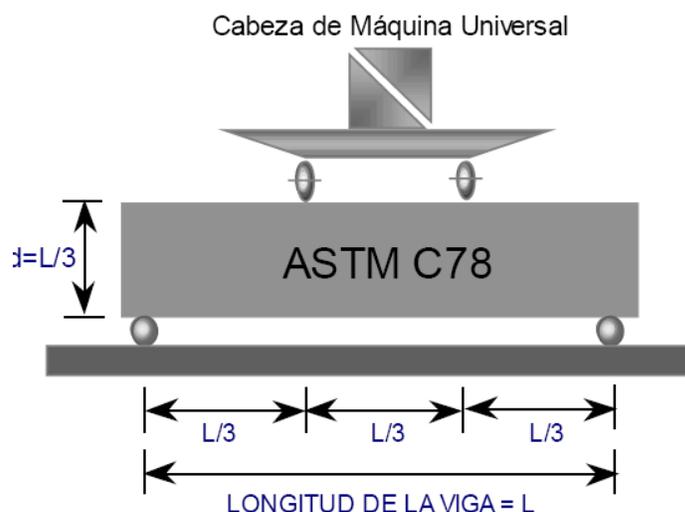
Son dos las propiedades del concreto que influyen en el diseño de un pavimento de concreto y en su comportamiento a lo largo de su vida útil:

- ✚ Resistencia a la tensión por flexión ($S'c$) ó Módulo de Ruptura (MR).
- ✚ Módulo de Elasticidad del Concreto (E_c).

MÓDULO DE RUPTURA (MR).

Debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello, por eso el diseño considera la resistencia del concreto trabajando a flexión, que se le conoce como resistencia a la flexión por tensión ($S'c$) o Módulo de Ruptura (MR) normalmente especificada a los 28 días.

El módulo de ruptura se mide mediante ensayos de vigas de concreto aplicándoles cargas en los tercios de su claro de apoyo. Esta prueba está normalizada por la ASTM C78. Existe una prueba similar con la aplicación de la carga al centro del claro que genera resultados diferentes de resistencia a la flexión (aproximadamente 15% a 20% mayores) pero que no son los que considera AASHTO para el diseño.



Los valores recomendados para el Módulo de Ruptura varían desde los 41 kg/cm² (583 psi) hasta los 50 kg/cm² (711 psi) a 28 días dependiendo del uso que vayan a tener. En seguida se muestran valores recomendados, sin embargo el diseñador deberá elegir de acuerdo a un buen criterio.

Tipo de Pavimento	MR recomendado	
	Kg/cm ²	psi
Autopistas	48.0	682.7
Carreteras	48.0	682.7
Zonas Industriales	45.0	640.1
Urbanas Principales	45.0	640.1
Urbanas Secundarias	42.0	597.4

MÓDULO DE RUPTURA PROMEDIO.

La metodología de diseño de AASHTO permite utilizar la resistencia a la flexión promedio, que se haya obtenido del resultado de ensayos a flexión de las mezclas diseñadas para cumplir la resistencia especificada del proyecto. Estos resultados dependen de las condiciones de control y calidad que tenga el fabricante del concreto en sus procesos. En todos los casos se recomienda que sea Concreto Premezclado Profesionalmente.

$$\text{MR promedio} = \text{MR especificado} + Z_r \times (\text{Desviación Estándar}^* \text{ del MR})$$

Valores típicos de la Desviación Estándar		Promedio
Concreto Premezclado	6% a 12%	9.0 %
Mezclado Central	5% a 10%	7.5 %

MÓDULO DE ELASTICIDAD.

El Módulo de Elasticidad del concreto está íntimamente relacionado con su Módulo de Ruptura y se determina mediante la norma ASTM C469. Existen varios criterios con los que se puede estimar el Módulo de Elasticidad a partir del Módulo de Ruptura. Los dos más utilizados son:

$$E_c = 6,750 * MR$$

$$E_c = 26,454 * MR ^ 0.77$$

Estas formulas aplican con unidades inglesas.

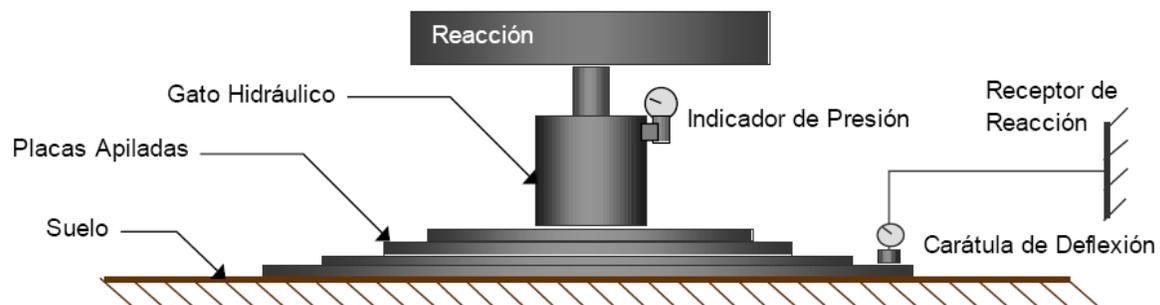
RESISTENCIA DE LA SUBRASANTE.

La resistencia de la subrasante es considerada dentro del método por medio del Módulo de Reacción del Suelo K que se puede obtener directamente mediante la prueba de placa.

El módulo de reacción de suelo corresponde a la capacidad portante que tiene el terreno natural en donde se soportará el cuerpo del pavimento. El valor del módulo de reacción (K) se puede obtener directamente del terreno mediante la prueba de placa ASTM D1195 y D1196. El valor de K representa el soporte (terreno natural y terraplén si lo hay) y se puede incrementar al tomar la contribución de la sub-base.

Cuando se diseña un pavimento es probable que se tengan diferentes valores de K a lo largo del tramo por diseñar, el método AASHTO recomienda utilizar el valor promedio de los módulos K para el diseño estructural.

Esquema de la prueba de placa.

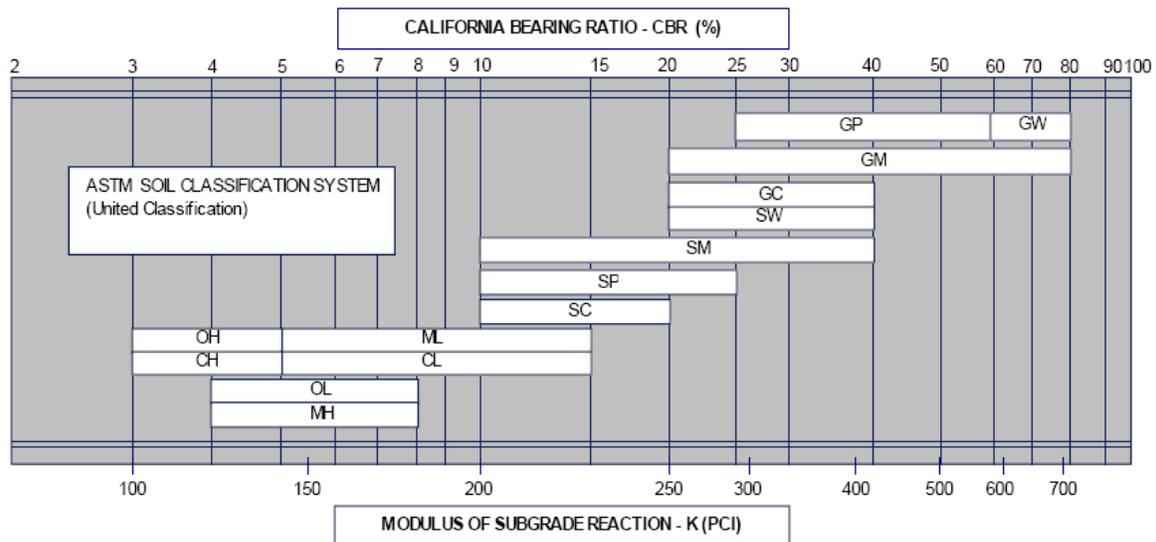


$$k \text{ (psi/in)} = \text{carga unitaria por placa} / \text{deflexión de la placa}$$

ESTIMACIONES Y CORRELACIONES DE K.

En base a un gran número de muestras y estudios se han podido desarrollar algunos valores estimativos del módulo de reacción del suelo en función a diferentes propiedades. Diferentes autores han publicado sus resultados y en general no difieren notablemente.

Correlación 1 con SUCS y VRS.



Correlación 2 con SUCS y VRS.

Tipo de Suelo	SUCS	Densidad Seca lb/ft ³	CRB %	K * pci
Suelos Granulares				
Grava	GW, GP	125 a 140	60 a 80	300 a 450
Arena Gruesa	SW	110 a 130	35 a 60	300 a 400
Arena Fina	SP	105 a 120	20 a 40	200 a 400
Suelos de Material Granular con Alto Contenido de Finos				
Grava - Limosa	GM	130 a 145	40 a 80	300 a 500
Grava - Arena - Limosa				
Arena - Limosa	SM	120 a 135	20 a 40	300 a 400
Arena - Limo - Gravosa				
Grava - Arcillosa	GC	120 a 140	20 a 40	200 a 450
Grava - Arena - Arcillosa				
Arena - Arcillosa	SC	105 a 130	10 a 20	150 a 350
Suelos de Material Fino **				
Limo	ML, OL	90 a 105	4 a 8	25 a 165
Limo - Arenoso				
Limo - Gravoso	MH	80 a 100	4 a 8	25 a 190
Limo Mal Graduado				
Arcilla Plástica	CL, OL	100 a 125	5 a 15	25 a 255
Arcilla Medianamente Plástica				
Arcilla Altamente Plástica	CH, OH	80 a 110	3 a 5	40 a 220

* estos rangos de K aplican para estratos homogéneos de suelo de por lo menos 3 metros de espesor. Si un estrato de suelo de menos de 3 metros existe sobre un suelo más blando, el valor de K deberá corresponder al del suelo blando inferior y se podrá considerar el incremento de K debido al estrato superior. Si por el contrario existiera un estrato de roca el valor de K deberá ser ajustado.

DRENAJE.

En cualquier tipo de pavimento, el drenaje, es un factor determinante en el comportamiento de la estructura del pavimento a lo largo de su vida útil, y por lo tanto lo es también en el diseño del mismo. Es muy importante evitar que exista presencia de agua en la estructura de soporte, dado que en caso de presentarse esta situación afectará en gran medida la respuesta estructural del pavimento.

Aspectos que debemos de cuidar para evitar que el agua penetre en la estructura de soporte:

- ✚ Mantener perfectamente selladas las juntas del pavimento.
- ✚ Sellar las juntas entre pavimento y acotamiento o cuneta.
- ✚ Colocar barreras rompedoras de capilaridad (en donde se requiera).
- ✚ Utilizar cunetas, bordillos, lavaderos, contracunetas, subdrenajes, etc.
- ✚ Construir o aprovechar los drenajes pluviales en las ciudades.

Tener agua atrapada en la estructura del Pavimento produce efectos nocivos en el mismo, como pueden ser:

- ✚ Reducción de la resistencia de materiales granulares no ligados.
- ✚ Reducción de la resistencia de la subrasante.
- ✚ Expulsión de finos.
- ✚ Levantamientos diferenciales de suelos expansivos.
- ✚ Expansión por congelamiento del suelo.

Algunos de estos fenómenos se pueden minimizar cuando se utilizan bases estabilizadas con cemento o bases de relleno fluido. Los valores recomendados para el coeficiente de drenaje deberán estar entre 1.0 y 1.10.

CONFIABILIDAD.

Los factores estadísticos que influyen el comportamiento de los pavimentos son:

- ✚ Confiabilidad R.

✚ Desviación Estándar.

La confiabilidad está definida como "la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación". Otra manera de entender la confiabilidad, por ejemplo es: si se considera una confiabilidad "R" del 80% estaríamos permitiendo que el 20% de las losas del pavimento alcancen al final de su vida útil una serviciabilidad igual a la serviciabilidad final seleccionada en el diseño.

Confiabilidad recomendada por AASHTO *

Clasificación Funcional	Urbano	Rural
Autopistas	85% - 99.9%	80% - 99.9%
Arterias Principales	80% - 99%	75% - 99%
Colectoras	80% - 95%	75% - 95%
Locales	50% - 80%	50% - 80%

También podemos entender a la confiabilidad como un Factor de Seguridad y ante esa situación debemos reflexionar en los valores de confiabilidad que debemos utilizar en México, con el mejor de los criterios, al hacer un diseño para un pavimento.

Confiabilidad Recomendada para México.

Tipo de Pavimento	Confiabilidad R
Autopistas	95 %
Carreteras	80 %
Rurales	70 %
Zonas Industriales	65 %
Urbanas Principales	60 %
Urbanas Secundarias	50 %

Como se menciona anteriormente la confiabilidad puede relacionarse con un Factor de Seguridad, a continuación se presentan los factores de seguridad

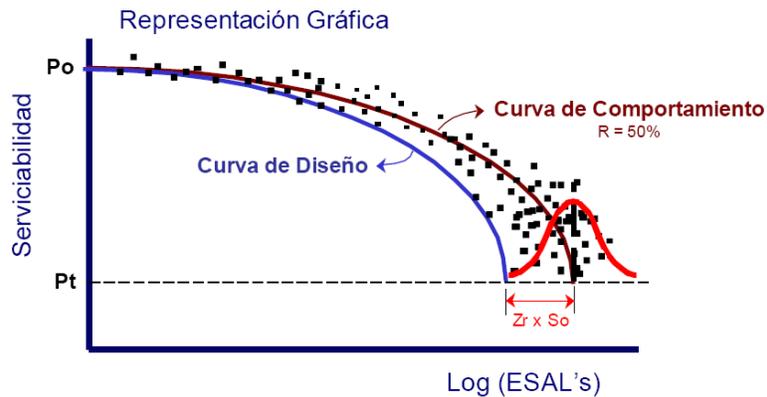
aproximados a los que corresponde la confiabilidad. Estos factores de seguridad van asociados con la Desviación Estándar "So".

Factor de Seguridad AASHTO

Desviación Estándar So	Confiabilidad "R"					
	50%	60%	70%	80%	90%	95.00%
0.30	1.00	1.19	1.44	1.79	2.42	3.12
0.35	1.00	1.23	1.53	1.97	2.81	3.76
0.39	1.00	1.26	1.60	2.13	3.16	4.38
0.40	1.00	1.26	1.62	2.17	3.26	4.55

$$FS_{AASHTO} = 10^{(-Z_r \times S_o)}$$

donde: Z_r = desviación normal estandar para "R"
 S_o = desviación estándar



METODO PORTLAND CEMENT ASSOCIATION.

A continuación se describen los lineamientos generales del método del Portland Cement Association (PCA).

FACTORES DE DISEÑO.

Resistencia a la Flexión del Concreto.

La consideración de la resistencia a la flexión del concreto es aplicable en el procedimiento de diseño para el criterio de fatiga, que controla el agrietamiento del pavimento bajo la repetición de cargas.

El alabeo del pavimento de concreto bajo las cargas del tráfico provoca esfuerzos tanto de compresión como de flexión. Sin embargo la proporción de los esfuerzos a compresión contra la resistencia a la compresión del concreto es mínima como para influir en el diseño de espesor de la losa.

En cambio la relación de los esfuerzos a flexión contra la resistencia a la flexión del concreto es mucho más alta y frecuentemente excede valores de 0.5.

Por este motivo los esfuerzos y la resistencia a la flexión son los empleados para el diseño de espesores. La resistencia a la flexión del concreto es determinada por la prueba del modulo de ruptura, realizada en vigas de 6x6x30 pulgadas.

El módulo de ruptura puede encontrarse aplicando la carga en cantiléver, punto medio ó en 3 puntos. Una diferencia importante en estos métodos de prueba es que al aplicar la carga en 3 puntos se obtiene la mínima resistencia del tercio medio de la viga de prueba, mientras que los otros 2 métodos muestran la resistencia en un solo punto.

El valor determinado por el método de aplicación de carga de 3 puntos (American Society for Testing and Materials, ASTM C78) es el empleado en este método de diseño.

La prueba del módulo de ruptura es comúnmente realizada a los 7, 14, 28 y 90 días. Los resultados a los 7 y 14 días son comparados contra especificaciones de control de calidad y para determinar cuándo puede ser abierto al tránsito un pavimento.

Los resultados a los 28 días se han usado generalmente para el diseño de espesores de autopistas y calles; mientras que los resultados a los 90 días son usados para el diseño de aeropistas, esto es debido a que se presentan muy pocas repeticiones de esfuerzos durante los primeros 28 ó 90 días del pavimento

comparado contra los millones de repeticiones de esfuerzos que ocurrirán posteriormente.

Sabemos que el concreto continua ganando resistencia con el paso del tiempo. Esta ganancia de resistencia es mostrada en la curva que representa valores de módulo de ruptura (MR) promedios para varias series de pruebas de laboratorio, pruebas de vigas curadas en campo y secciones de concreto tomadas de pavimentos en servicio.

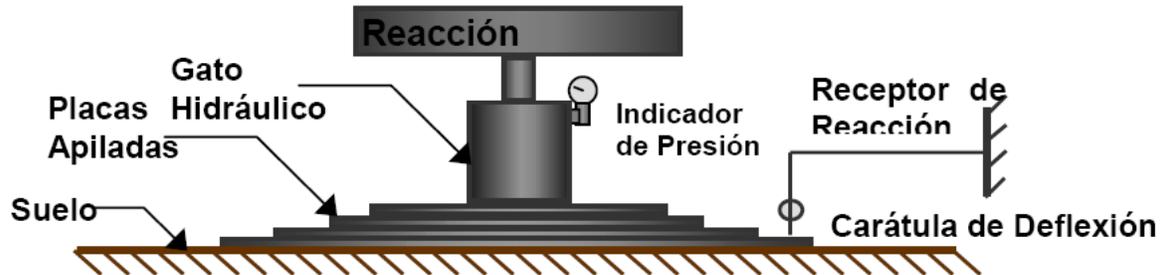
En este procedimiento de diseño los efectos de las variaciones en la resistencia del concreto de punto a punto del pavimento y el incremento de resistencia con el paso del tiempo están incorporados en las gráficas y tablas de diseño. El diseñador no aplica directamente estos efectos, sino que simplemente ingresa el valor de la resistencia promedio a los 28 días, que en nuestro país se recomienda como mínimo 41 kg/cm^2 (583 psi) y como máximo 50 kg/cm^2 (711 psi).



El soporte dado a los pavimentos de concreto por la base y la sub-base, es el segundo factor en el diseño de espesores. El terreno de apoyo está definido en términos del módulo de reacción de la subrasante de Westergaard (k). Es igual a la carga en libras por pulgada cuadrada de un área cargada (un plato de 30" de diámetro) dividido entre la deformación en pulgadas que provoca dicha carga. Los

valores de k son expresados como libras por pulgada cuadrada por pulgada (psi / in) ó más comúnmente, por libras por pulgada cúbica (pci).

La figura nos muestra una ilustración de la prueba de placa regulada por la norma ASTM D1195 y D1196.



$$k \text{ (psi/in)} = \text{carga unitaria por placa} / \text{deflexión de la placa}$$

Dado que la prueba de placa lleva tiempo y dinero, los valores de k son usualmente estimados mediante una correlación a pruebas más simples como la del VRS (valor Relativo de Soporte).

El resultado es válido por qué no se requiere una exacta determinación del valor k; ya que variaciones normales del valor k no afecta significativamente los requerimientos del espesor del pavimento. La relación mostrada en la figura es correcta para estos propósitos.

La prueba de caminos AASHTO comprobó convincentemente que la reducción de pérdida de terreno de soporte durante los períodos de descongelamiento tienen ningún ó muy poco efecto en el espesor requerido de los pavimentos de concreto. Esto es cierto porque los pocos períodos en que los valores de k son bajos durante el descongelamiento de la primavera se compensan con los largos períodos en que se congelan y los valores de k son mucho mayores que los asumidos para el diseño.

Para evitar métodos tediosos que requieren de diseño para las variaciones de k en las épocas del año, los valores recomendables como valores promedio son los de verano u otoño.

El contar con una sub-base permite incrementar en parte el valor de k del suelo que deberá usarse en el diseño de espesor. Si la base es de material granular no tratada ó mejorada el incremento puede no ser muy significativo como se aprecia en los valores presentados en la tabla.

Los valores mostrados en la tabla son basados del análisis de Burmister de un sistema de dos capas y cargado en pruebas de placa hechas para determinar los valores k del conjunto suelo - subbase en losas de prueba completas.

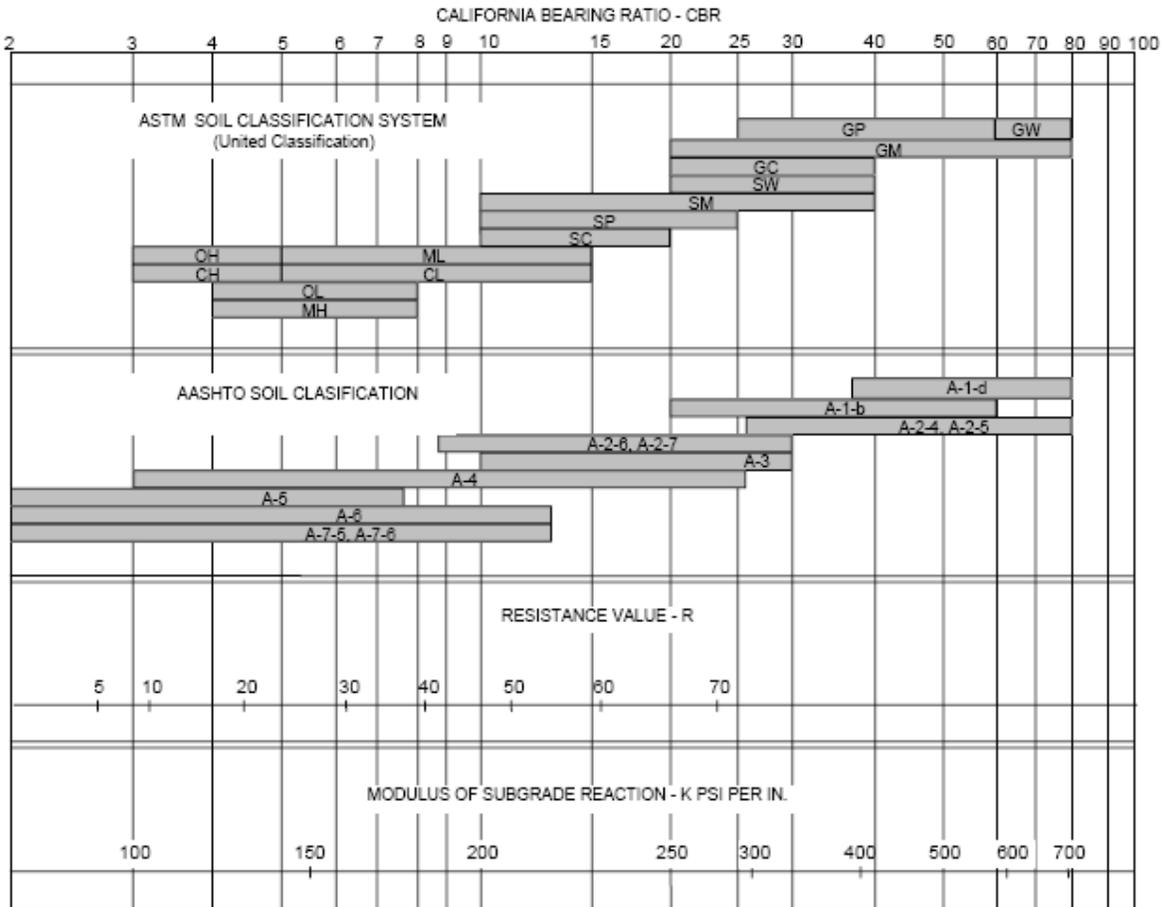
Las bases mejoradas ó tratadas con cemento aportan mayor capacidad de carga y su comportamiento a largo plazo es mucho mejor y son ampliamente empleadas para pavimentos de concreto con tráfico pesado. Se construyen con materiales granulares como los tipos de suelos AASHTO A-1, A-2-4, A-2-5 y A-3, el contenido de cemento es determinado mediante las pruebas de Congelación - Descongelación y Mojado - Secado y el criterio de pérdidas admisibles de la PCA.

Los valores de diseño de módulo de sub-reacción (k) para bases cementadas que cumplen con éste criterio se muestran en la tabla.

PERÍODO DE DISEÑO.

El término de período de diseño es algunas veces considerado sinónimo del término período de análisis de tráfico. Dado que el tráfico muy probablemente no puede ser supuesto con precisión por un período muy largo, el período de diseño de 20 años es el comúnmente empleado en el procedimiento de diseño de pavimentos.

El período de diseño seleccionado afecta el espesor de diseño ya que determina por cuantos años y por ende cuantos camiones deberá servir el pavimento.



k Suelo - Subbase (pci)				
k del Suelo (pci)	Espesor Subbase			
	4"	6"	8"	10"
50	170	230	310	390
100	280	400	520	640
200	470	640	830	--

NUMERO DE REPETICIONES ESPERADAS PARA CADA EJE.

Toda la información referente al tráfico termina siendo empleada para conocer el número de repeticiones esperadas durante todo el período de diseño de cada tipo de eje. Para poder conocer estos valores tendremos que conocer varios factores referentes al tránsito como lo es el tránsito promedio diario anual (TPDA), el % que representa cada tipo de eje en el TPDA, el factor de crecimiento del tráfico, el factor de sentido, el factor de carril y el período de diseño.

Repeticiones Esperadas.

$$Re = TPDA \times \%Te \times FS \times FC \times Pd \times FCA \times 365$$

Donde:

TPDA = Tránsito Promedio Diario Anual.

% Te = % del TPDA para cada tipo de eje.

FS = Factor de Sentido.

FC = Factor de Carril.

Pd = Período de Diseño.

FCA = Factor de Crecimiento Anual.

365 = días de un año.

TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO ANUAL. (TPDA).

El TPDA puede obtenerse de aforos especializados ó de algún organismo relacionado con el transporte, ya sea municipal, estatal ó federal. Lo importante es que se especifique la composición de este tráfico, es decir que se detalle el tráfico por tipo de vehículo, para que de esta manera se pueda identificar los tipos y pesos de los ejes que van a circular sobre el pavimento.

El método de diseño de la PCA recomienda que considera únicamente el tráfico pesado, es decir que se desprece todo el tráfico ligero como automóviles y pick-ups de 4 llantas. Sin embargo no es tan importante el hacer caso a esta recomendación debido a que el tráfico ligero no influye demasiado en el diseño de espesores.

FACTOR DE CRECIMIENTO ANUAL (FCA).

Para conocer el factor de crecimiento anual se requiere únicamente del período de diseño en años y de la tasa de crecimiento anual. Con estos datos podemos saber el factor de crecimiento de manera rápida con la ayuda de la tabla que presenta relaciones entre tasas de crecimiento anual y factores de crecimiento anual para períodos de diseño de 20 y 40 años.

Si se desea obtener el factor de crecimiento anual del tráfico (FCA) de manera más exacta, se puede obtener a partir de la siguiente fórmula:

$$FC = \frac{(1 + g)^n - 1}{(g)(n)}$$

Donde:

FC = Factor de Crecimiento Anual.

n = Vida útil en años.

g = Tasa de crecimiento anual, en %.

TASAS DE CRECIMIENTO ANUAL DE TRAFICO Y SUS CORRESPONDIENTES FACTORES DE CRECIMIENTO		
TASA DE CRECIMIENTO ANUAL DEL TRAFICO, %	FACTOR DE CRECIMIENTO ANUAL PARA 20 AÑOS	FACTOR DE PROYECCIÓN ANUAL PARA 40 AÑOS
1	1.1	1.2
1 ½	1.2	1.3
2	1.2	1.5
2 ½	1.3	1.6
3	1.3	1.8
3 ½	1.4	2.0
4	1.5	2.2
4 ½	1.6	2.4
5	1.6	2.7
5 ½	1.7	2.9
6	1.8	3.2

En un problema de diseño el factor de proyección se multiplica por el TPDA presente para obtener el TPDA de diseño representando el valor promedio para el período de diseño. Los siguientes factores influyen en las tasas de crecimiento anual y proyecciones de tráfico:

1. El tráfico atraído ó desviado. El incremento del tráfico existente debido a la rehabilitación de algún camino existente.
2. Crecimiento normal de tráfico. El crecimiento normal provocado por el incremento del número de vehículos.
3. Tráfico generado. El incremento provocado por los vehículos que no circularían por la vía si la nueva facilidad no se hubiese construido.
4. Tráfico por desarrollo. El incremento provocado por cambios en el uso del suelo debido a la construcción de la nueva facilidad.

Los efectos combinados provocan tasas de crecimiento anual de 2 al 6%. Estas tasas corresponden como se muestra en la tabla 2.5.3 a factores de crecimiento del tráfico de 1.2 a 1.8, diseñando a 20 años.

FACTOR DE SENTIDO.

El factor de sentido se emplea para diferenciar las vialidades de un sentido de las de doble sentido, de manera que para vialidades en doble sentido se utiliza un factor de sentido de 0.5 y para vialidades en un solo sentido un factor de 1.

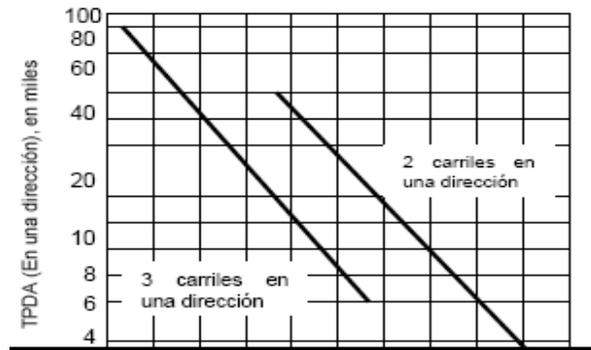
En el caso de vialidades de doble sentido generalmente se asume que el tránsito (en sus diferentes tipos y pesos) viajan en igual cantidad para cada dirección (FS=0.5). Sin embargo esto puede no aplicar en algunos casos especiales en que muchos de los camiones viajan cargados en una dirección y regresan vacíos, si éste es el caso, se deberá hacer el ajuste apropiado y tomar en cuenta el sentido con mayor tráfico.

FACTOR DE CARRIL.

Después de verse afectado el tráfico por el factor de sentido, también debemos de analizar el número de carriles por sentido mediante el factor de carril.

El factor de carril nos va a dar el porcentaje de vehículos que circulan por el carril de la derecha, que es el carril con más tráfico. Para esto, la PCA recomienda

emplear la figura en donde este factor depende del número de carriles por sentido ó dirección del tráfico y del tránsito promedio diario anual en un solo sentido.



FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA.

Una vez que se conoce la distribución de carga por eje, es decir ya que se conoce cuantas repeticiones se tendrán para cada tipo y peso de eje, se utiliza el factor de seguridad de carga para multiplicarse por las cargas por eje.

Los factores de seguridad de carga recomendados son:

- ✚ 1.3 Casos especiales con muy altos volúmenes de tráfico pesado y cero mantenimiento.
- ✚ 1.2 Para Autopistas ó vialidades de varios carriles en donde se presentará un flujo ininterrumpido de tráfico y altos volúmenes de tráfico pesado.
- ✚ 1.1 Autopistas y vialidades urbanas con volúmenes moderados de tráfico pesado.
- ✚ 1.0 Caminos y calles secundarias con muy poco tráfico pesado.

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.

El método descrito en ésta sección es empleado una vez que ya tenemos los datos del tráfico esperado, como lo es el tránsito diario promedio anual, la composición vehicular del tráfico y de esta información obtenemos el número de repeticiones esperadas para cada tipo de eje durante el período de diseño.

En la figura se presenta un formato empleado para resolver el diseño de pavimentos, el cual requiere de conocer algunos factores de diseño, como:

- ✚ Tipo de junta y acotamiento.
- ✚ Resistencia a la flexión del concreto (MR) a 28 días.
- ✚ El valor del módulo de reacción K del terreno de apoyo.
- ✚ Factor de seguridad de la carga (LSF).
- ✚ Número de repeticiones esperadas durante el período de diseño, para cada tipo y peso de eje.

El método considera dos criterios de diseño:

- ✚ Fatiga.
- ✚ Erosión.

El Análisis por fatiga (para controlar el agrietamiento por fatiga) influye principalmente en el diseño de pavimentos de tráfico ligero (calles residenciales y caminos secundarios independientemente de si las juntas tienen ó o pasajuntas) y pavimentos con tráfico mediano con pasajuntas en las juntas.

El análisis por erosión (el responsable de controlar la erosión del terreno de soporte, bombeo y diferencia de elevación de las juntas) influye principalmente el diseño de pavimentos con tráfico mediano a pesado con transferencia de carga por trabazón de agregados (sin pasajuntas) y pavimentos de tráfico pesado con pasajuntas.

Para pavimentos que tienen una mezcla normal de pesos de ejes, las cargas en los ejes sencillos son usualmente más severas en el análisis por fatiga y las cargas en ejes tándem son más severas en el análisis por erosión.

El diseño del espesor se calcula por tanteos con ayuda del formato de diseño de espesores por el método de la PCA que se presenta en la tabla.

CALCULO DE ESPESOR DEL PAVIMENTO

PROYECTO: Diseño Carretera Inter-estatal de 4 carriles.

ESPELOR INICIAL: 9.5 in

9.5 in

PASAJUNTAS: SI NO

MÓDULO DE REACCIÓN K, DE LA SUBRASANTE: 130 pci

130 pci

APOYO LATERAL: SI NO

MÓDULO DE RUPTURA, MR: 650 psi

650 psi

PERÍODO DE DISEÑO(AÑOS): 20

FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA, LSF: 1.2

1.2

COMENTARIOS:

4" de base cementada

Carga del eje, en kips	Multiplicada por LSF	Repeticiones Esperadas	Análisis de Fatiga		Análisis de Erosión	
			Repeticiones Permisible (FIG 2.5.5)	% de Fatiga	Repeticiones permisibles (FIG 2.5.6 ó 2.5.7)	% de Daño
1	2	3	4	5	6	7

8. Esfuerzo equivalente 206

206

10. Factor de Erosion 2.59

2.59

9. Factor de relación de esfuerzo 0.317

0.317

Ejes Sencillos

30	36.0	6,310	27,000	23.4	1,500,000	0.4
28	33.6	14,690	77,000	19.1	2,200,000	0.7
26	31.2	30,140	230,000	13.1	3,500,000	0.9
24	28.8	64,410	1,200,000	5.4	5,900,000	1.1
22	26.4	106,900	Ilimitado	0	11,000,000	1.0
20	24.0	235,800	Ilimitado	0	23,000,000	1.0
18	21.6	301,200	Ilimitado	0	64,000,000	0.5
16	19.2	422,500	Ilimitado	0	Ilimitado	0
14	16.8	586,900	Ilimitado	0	Ilimitado	0
12	14.4	1,837,000	Ilimitado	0	Ilimitado	0

11. Esfuerzo equivalente 192

192

13. Factor de Erosion 2.79

2.79

12. Factor de relación de esfuerzo 0.295

0.295

Ejes Tandem

52	62.4	21,320	1,100,000	1.9	920,000	2.3
48	57.6	42,870	Ilimitado	0	1,500,000	2.9
44	52.8	124,900	Ilimitado	0	2,500,000	5.0
40	48.0	372,900	Ilimitado	0	4,600,000	8.1
36	43.2	865,800	Ilimitado	0	9,500,000	9.3
32	38.4	930,100	Ilimitado	0	24,000,000	3.9
28	33.6	1,656,000	Ilimitado	0	92,000,000	1.8
24	28.8	984,900	Ilimitado	0	Ilimitado	0
20	24.0	1,227,000	Ilimitado	0	Ilimitado	0
16	19.2	1,356,000	Ilimitado	0	Ilimitado	0

14. Esfuerzo equivalente 148

148

16. Factor de Erosion 2.95

2.95

15. Factor de relación de esfuerzo 0.228

0.228

Ejes Tridem

18	21.6	250,000	Ilimitado	0	2,700,000	9.3
----	------	---------	-----------	---	-----------	-----

TOTAL	62.9	TOTAL	48.0
--------------	-------------	--------------	-------------

Esfuerzo equivalente - Sin Apoyo Lateral

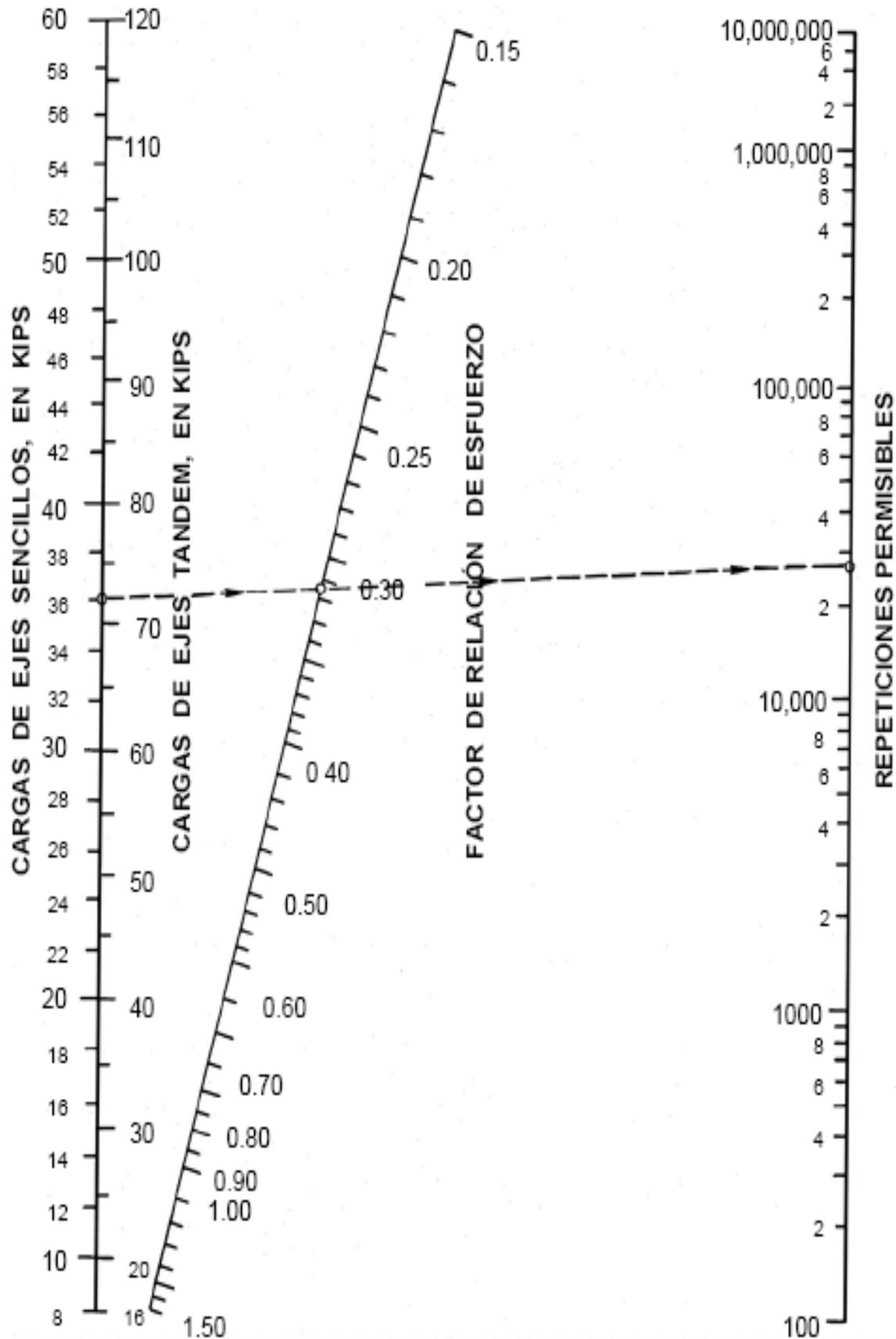
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	825	679	510	726	585	456	671	542	437	634	516	428	584	486	419	523	457	414	484	443	412
4.5	699	586	439	616	500	380	571	460	359	540	435	349	498	406	339	448	378	331	417	363	328
5.0	602	516	387	531	436	328	493	399	305	467	376	293	432	349	282	390	321	272	363	307	269
5.5	526	461	347	464	387	290	431	353	266	409	331	253	379	305	240	343	278	230	320	264	226
6.0	465	416	315	411	348	261	382	316	237	362	296	223	336	271	209	304	246	198	285	232	193
6.5	417	380	289	367	317	238	341	286	214	324	267	201	300	244	186	273	220	173	256	207	168
7.0	375	349	267	331	290	219	307	262	196	292	244	183	272	222	167	246	199	154	231	186	148
7.5	340	323	247	300	268	203	279	241	181	265	224	168	246	203	153	224	181	139	210	169	132
8.0	311	300	230	274	249	189	255	223	168	242	208	156	225	188	141	205	167	128	192	155	120
8.5	285	281	215	252	232	177	234	208	158	222	193	145	208	174	131	188	154	116	177	143	109
9.0	264	264	200	232	218	166	218	195	148	205	181	136	190	163	122	174	144	108	163	133	101
9.5	245	248	187	215	205	157	200	183	140	190	170	129	178	153	115	161	134	101	151	124	93
10.0	228	235	174	200	193	148	186	173	132	177	160	122	164	144	108	150	128	95	141	117	87
10.5	213	222	163	187	183	140	174	164	125	165	151	115	153	136	103	140	119	89	132	110	82
11.0	200	211	153	175	174	132	163	155	118	154	143	110	144	129	98	131	113	85	123	104	78
11.5	188	201	142	165	165	125	153	148	113	145	136	104	135	122	93	123	107	80	118	98	74
12.0	177	192	133	155	158	118	144	141	108	137	130	100	127	116	89	118	102	77	109	93	70
12.5	168	183	123	147	151	113	136	135	103	129	124	95	120	111	85	109	97	73	103	89	67
13.0	159	176	114	139	144	107	129	129	98	122	119	91	113	106	81	103	93	70	97	85	64
13.5	152	168	105	132	138	101	122	123	93	118	114	87	107	102	78	98	89	67	92	81	61
14.0	144	162	97	125	133	96	116	118	89	110	109	83	102	98	75	93	85	65	88	78	59

Esfuerzo equivalente - Con Apoyo Lateral.

Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	640	534	431	559	468	392	517	439	377	489	422	369	452	403	362	409	388	360	383	384	359
4.5	547	461	365	479	400	328	444	372	313	421	356	305	390	338	297	355	322	292	333	316	291
5.0	475	404	317	417	349	281	387	323	266	367	308	258	341	290	250	311	274	244	294	267	242
5.5	418	360	279	368	309	246	342	285	231	324	271	223	302	254	214	276	238	208	261	231	206
6.0	372	325	249	327	277	218	304	255	204	289	241	196	270	225	187	247	210	180	234	203	178
6.5	334	295	225	294	251	196	274	230	183	260	218	175	243	203	166	223	188	159	212	180	156
7.0	302	270	204	266	230	178	248	210	165	236	198	158	220	184	149	203	170	142	192	162	138
7.5	275	250	187	243	211	162	226	193	151	215	182	143	201	168	135	185	155	127	176	148	124
8.0	252	232	172	222	196	149	207	179	138	197	168	131	185	155	123	170	142	116	162	135	112
8.5	232	216	159	205	182	138	191	166	128	182	156	121	170	144	113	157	131	106	150	125	102
9.0	215	202	147	190	171	128	177	155	119	169	146	112	158	134	105	146	122	98	139	116	94
9.5	200	190	137	176	160	120	164	146	111	157	137	105	147	126	98	136	114	91	129	108	87
10.0	186	179	127	164	151	112	153	137	104	146	129	98	137	118	91	127	107	84	121	101	81
10.5	174	170	119	154	143	105	144	130	97	137	121	92	128	111	86	119	101	79	113	95	76
11.0	164	161	111	144	135	99	135	123	92	129	115	87	120	105	81	112	95	74	106	90	71
11.5	154	153	104	136	128	93	127	117	86	121	109	82	113	100	76	105	90	70	100	85	67
12.0	145	146	97	128	122	88	120	111	82	114	104	78	107	95	72	99	86	66	95	81	63
12.5	137	139	91	121	117	83	113	106	78	108	99	74	101	91	68	94	82	63	90	77	60
13.0	130	133	85	115	112	79	107	101	74	102	95	70	96	86	65	89	78	60	85	73	57
13.5	124	124	80	109	107	75	102	97	70	97	91	67	91	83	62	85	74	57	81	70	54
14.0	118	122	75	104	103	71	97	93	67	93	87	63	87	79	59	81	71	54	77	67	51



Factores de Erosión - Con Pasajuntas - Sin Apoyo Lateral

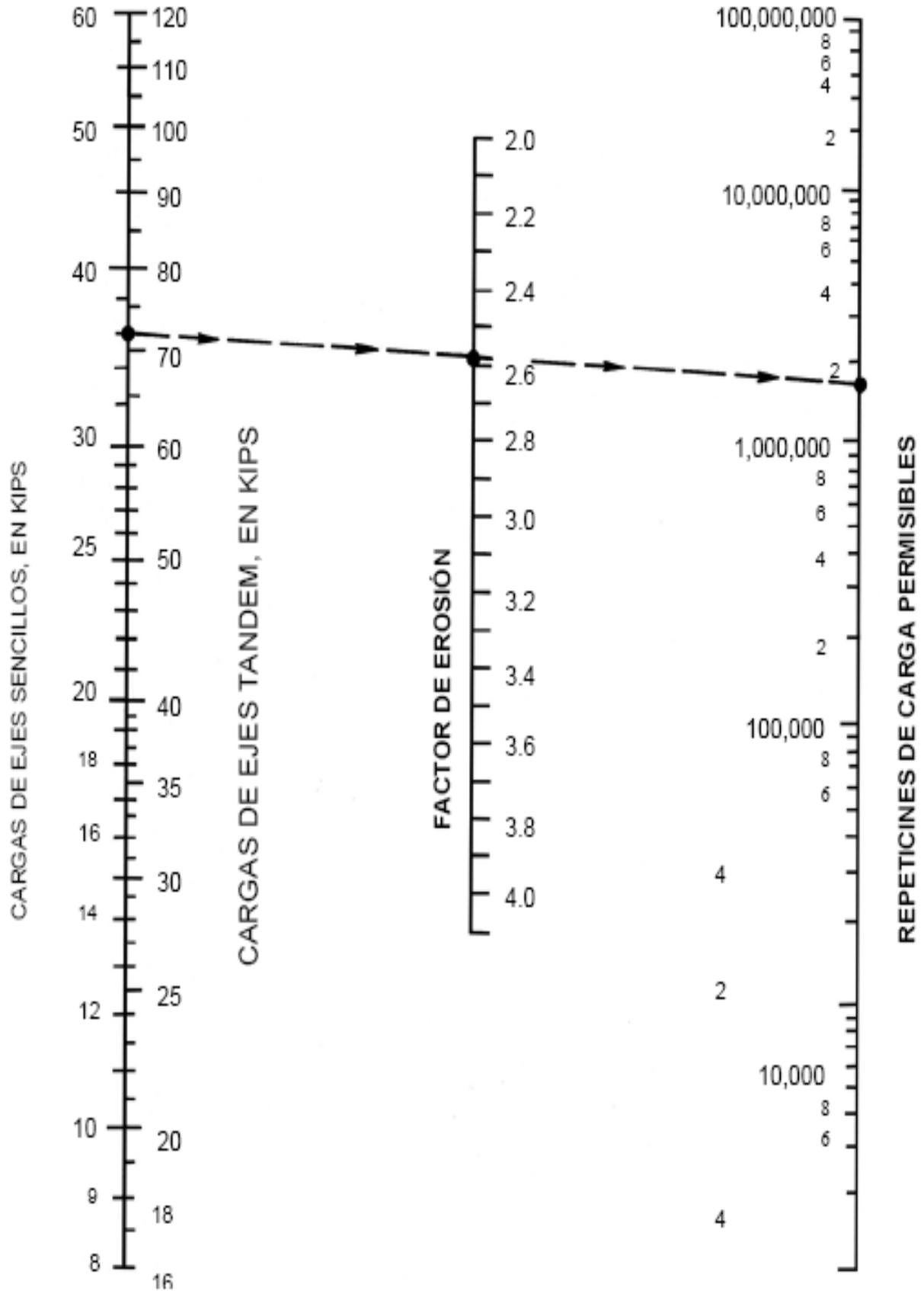
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			30			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.74	3.83	3.89	3.73	3.79	3.82	3.72	3.75	3.75	3.71	3.73	3.70	3.70	3.70	3.61	3.68	3.67	3.53
4.5	3.59	3.70	3.78	3.57	3.65	3.69	3.56	3.61	3.62	3.55	3.58	3.57	3.54	3.55	3.50	3.52	3.53	3.44
5.0	3.45	3.58	3.68	3.43	3.52	3.58	3.42	3.48	3.50	3.41	3.45	3.46	3.40	3.42	3.40	3.38	3.40	3.34
5.5	3.33	3.47	3.59	3.31	3.41	3.49	3.29	3.36	3.40	3.28	3.33	3.36	3.27	3.30	3.30	3.26	3.28	3.25
6.0	3.22	3.38	3.51	3.19	3.31	3.40	3.18	3.26	3.31	3.17	3.23	3.26	3.15	3.20	3.21	3.14	3.17	3.16
6.5	3.11	3.29	3.44	3.09	3.22	3.33	3.07	3.16	3.23	3.06	3.13	3.18	3.05	3.10	3.12	3.03	3.07	3.08
7.0	3.02	3.21	3.37	2.99	3.14	3.26	2.97	3.08	3.16	2.96	3.05	3.10	2.95	3.01	3.04	2.94	2.98	3.00
7.5	2.93	3.14	3.31	2.91	3.06	3.20	2.88	3.00	3.09	2.87	2.97	3.03	2.86	2.93	2.97	2.84	2.90	2.93
8.0	2.85	3.07	3.26	2.82	2.99	3.14	2.80	2.93	3.03	2.79	2.89	2.97	2.77	2.85	2.90	2.76	2.82	2.86
8.5	2.77	3.01	3.20	2.74	2.93	3.09	2.72	2.86	2.97	2.71	2.82	2.91	2.69	2.78	2.84	2.68	2.75	2.79
9.0	2.70	2.96	3.15	2.67	2.87	3.04	2.65	2.80	2.92	2.63	2.76	2.86	2.62	2.71	2.78	2.61	2.68	2.73
9.5	2.63	2.90	3.11	2.60	2.81	2.99	2.58	2.74	2.87	2.56	2.70	2.81	2.55	2.65	2.73	2.54	2.62	2.68
10.0	2.56	2.85	3.06	2.54	2.76	2.94	2.51	2.68	2.83	2.50	2.64	2.76	2.48	2.59	2.68	2.47	2.56	2.63
10.5	2.50	2.81	3.02	2.47	2.71	2.90	2.45	2.63	2.78	2.44	2.59	2.72	2.42	2.54	2.64	2.41	2.51	2.58
11.0	2.44	2.76	2.98	2.42	2.67	2.86	2.39	2.58	2.74	2.38	2.54	2.68	2.36	2.49	2.59	2.35	2.45	2.54
11.5	2.38	2.72	2.94	2.36	2.62	2.82	2.33	2.54	2.70	2.32	2.49	2.64	2.30	2.44	2.55	2.29	2.40	2.50
12.0	2.33	2.68	2.91	2.30	2.58	2.79	2.28	2.49	2.67	2.26	2.44	2.60	2.25	2.39	2.51	2.23	2.36	2.46
12.5	2.28	2.64	2.87	2.25	2.54	2.75	2.23	2.45	2.63	2.21	2.40	2.56	2.19	2.35	2.48	2.18	2.31	2.42
13.0	2.23	2.61	2.84	2.20	2.50	2.72	2.18	2.41	2.60	2.16	2.36	2.53	2.14	2.30	2.44	2.13	2.27	2.39
13.5	2.18	2.57	2.81	2.15	2.47	2.68	2.13	2.37	2.56	2.11	2.32	2.49	2.09	2.26	2.41	2.08	2.23	2.35
14.0	2.13	2.54	2.78	2.11	2.43	2.65	2.08	2.34	2.53	2.07	2.29	2.46	2.05	2.23	2.38	2.03	2.19	2.32

Factores de Erosión - Sin Pasajuntas - Sin Apoyo Lateral

Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			30			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.94	4.03	4.06	3.91	3.95	3.97	3.88	3.89	3.88	3.86	3.86	3.82	3.82	3.83	3.74	3.77	3.80	3.67
4.5	3.79	3.91	3.95	3.76	3.82	3.85	3.73	3.75	3.76	3.71	3.72	3.70	3.68	3.68	3.63	3.64	3.65	3.56
5.0	3.66	3.81	3.85	3.63	3.72	3.75	3.60	3.64	3.66	3.58	3.60	3.60	3.55	3.55	3.52	3.52	3.52	3.46
5.5	3.54	3.72	3.76	3.51	3.62	3.66	3.48	3.53	3.56	3.46	3.49	3.51	3.43	3.44	3.43	3.41	3.40	3.37
6.0	3.44	3.64	3.68	3.40	3.53	3.58	3.37	3.44	3.48	3.35	3.40	3.42	3.32	3.34	3.35	3.30	3.30	3.29
6.5	3.34	3.56	3.61	3.30	3.46	3.50	3.26	3.36	3.40	3.25	3.31	3.34	3.22	3.25	3.27	3.20	3.21	3.21
7.0	3.26	3.49	3.54	3.21	3.39	3.43	3.17	3.29	3.33	3.15	3.24	3.27	3.13	3.17	3.20	3.11	3.13	3.14
7.5	3.18	3.43	3.48	3.13	3.32	3.37	3.09	3.22	3.26	3.07	3.17	3.20	3.04	3.10	3.13	3.02	3.06	3.08
8.0	3.11	3.37	3.42	3.05	3.26	3.31	3.01	3.16	3.20	2.99	3.10	3.14	2.96	3.03	3.07	2.94	2.99	3.01
8.5	3.04	3.32	3.37	2.98	3.21	3.25	2.93	3.10	3.15	2.91	3.04	3.09	2.88	2.97	3.01	2.87	2.93	2.96
9.0	2.98	3.27	3.32	2.91	3.16	3.20	2.86	3.05	3.09	2.84	2.99	3.03	2.81	2.92	2.95	2.79	2.87	2.90
9.5	2.92	3.22	3.27	2.85	3.11	3.15	2.80	3.00	3.04	2.77	2.94	2.98	2.75	2.86	2.90	2.73	2.81	2.85
10.0	2.86	3.18	3.22	2.79	3.06	3.11	2.74	2.95	3.00	2.71	2.89	2.93	2.68	2.81	2.85	2.66	2.76	2.80
10.5	2.81	3.14	3.18	2.74	3.02	3.06	2.68	2.91	2.95	2.65	2.84	2.89	2.62	2.76	2.81	2.60	2.72	2.76
11.0	2.77	3.10	3.14	2.69	2.98	3.02	2.63	2.86	2.91	2.60	2.80	2.84	2.57	2.72	2.77	2.54	2.67	2.71
11.5	2.72	3.06	3.10	2.64	2.94	2.98	2.58	2.82	2.87	2.55	2.76	2.80	2.51	2.68	2.72	2.49	2.63	2.67
12.0	2.68	3.03	3.07	2.60	2.90	2.95	2.53	2.78	2.83	2.50	2.72	2.76	2.46	2.64	2.68	2.44	2.59	2.63
12.5	2.64	2.99	3.03	2.55	2.87	2.91	2.48	2.75	2.79	2.45	2.68	2.73	2.41	2.60	2.65	2.39	2.55	2.59
13.0	2.60	2.96	3.00	2.51	2.83	2.88	2.44	2.71	2.76	2.40	2.65	2.69	2.36	2.56	2.61	2.34	2.51	2.56
13.5	2.56	2.93	2.97	2.47	2.80	2.84	2.40	2.68	2.73	2.36	2.61	2.66	2.32	2.53	2.58	2.30	2.48	2.52
14.0	2.53	2.90	2.94	2.44	2.77	2.81	2.36	2.65	2.69	2.32	2.58	2.63	2.28	2.50	2.54	2.25	2.44	2.49



Factores de Erosión - Con Pasajuntas - Con Apoyo Lateral

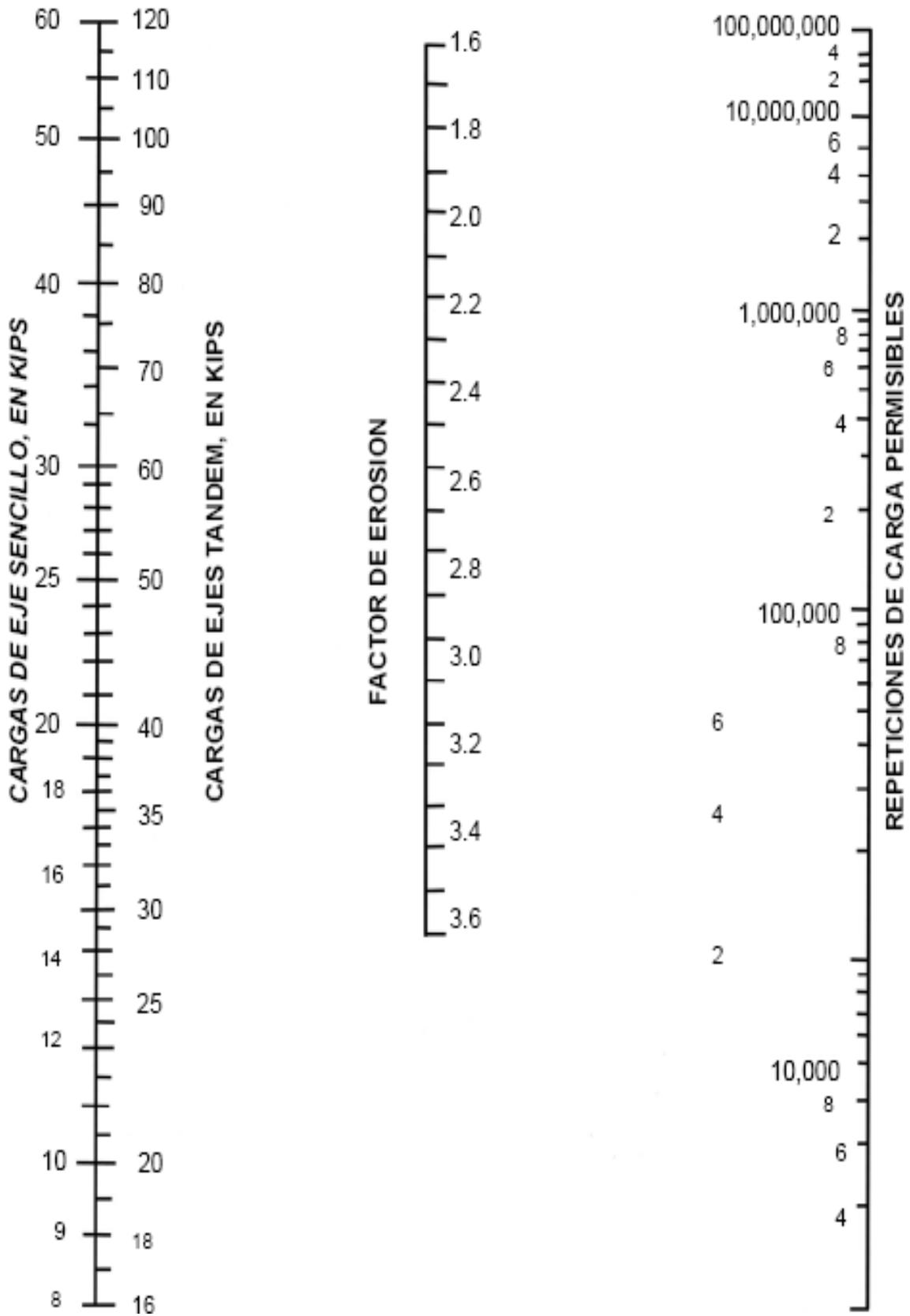
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			30			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.28	3.30	3.33	3.24	3.20	3.20	3.21	3.13	3.13	3.19	3.10	3.10	3.15	3.09	3.05	3.12	3.08	3.00
4.5	3.13	3.19	3.24	3.09	3.08	3.10	3.06	3.00	2.99	3.04	2.96	2.95	3.01	2.93	2.91	2.98	2.91	2.87
5.0	3.01	3.09	3.16	2.97	2.98	3.01	2.93	2.89	2.89	2.90	2.84	2.83	2.87	2.79	2.79	2.85	2.77	2.75
5.5	2.90	3.01	3.09	2.85	2.89	2.94	2.81	2.79	2.80	2.79	2.74	2.74	2.76	2.68	2.67	2.73	2.65	2.64
6.0	2.79	2.93	3.03	2.75	2.82	2.87	2.70	2.71	2.73	2.68	2.65	2.66	2.65	2.58	2.58	2.62	2.54	2.54
6.5	2.70	2.86	2.97	2.65	2.75	2.82	2.61	2.63	2.67	2.58	2.57	2.59	2.55	2.50	2.50	2.52	2.45	2.45
7.0	2.61	2.79	2.92	2.56	2.68	2.76	2.52	2.56	2.61	2.49	2.50	2.53	2.46	2.42	2.43	2.43	2.38	2.37
7.5	2.53	2.73	2.87	2.48	2.62	2.72	2.44	2.50	2.56	2.41	2.44	2.47	2.38	2.36	2.37	2.35	2.31	2.31
8.0	2.46	2.68	2.83	2.41	2.56	2.67	2.36	2.44	2.51	2.33	2.38	2.42	2.30	2.30	2.32	2.27	2.24	2.25
8.5	2.39	2.62	2.79	2.34	2.51	2.63	2.29	2.39	2.47	2.26	2.32	2.38	2.22	2.24	2.27	2.20	2.18	2.20
9.0	2.32	2.57	2.75	2.27	2.46	2.59	2.22	2.34	2.43	2.19	2.27	2.34	2.16	2.19	2.23	2.13	2.13	2.15
9.5	2.26	2.52	2.71	2.21	2.41	2.55	2.16	2.29	2.39	2.13	2.22	2.30	2.09	2.14	2.18	2.07	2.08	2.11
10.0	2.20	2.47	2.67	2.15	2.36	2.51	2.10	2.25	2.35	2.07	2.18	2.26	2.03	2.09	2.15	2.01	2.03	2.07
10.5	2.15	2.43	2.64	2.09	2.32	2.48	2.04	2.20	2.32	2.01	2.14	2.23	1.97	2.05	2.11	1.95	1.99	2.04
11.0	2.10	2.39	2.60	2.04	2.28	2.45	1.99	2.16	2.29	1.95	2.09	2.20	1.92	2.01	2.08	1.89	1.95	2.00
11.5	2.05	2.35	2.57	1.99	2.24	2.42	1.93	2.12	2.26	1.90	2.05	2.16	1.87	1.97	2.05	1.84	1.91	1.97
12.0	2.00	2.31	2.54	1.94	2.20	2.39	1.88	2.09	2.23	1.85	2.02	2.13	1.82	1.93	2.02	1.79	1.87	1.94
12.5	1.95	2.27	2.51	1.89	2.16	2.36	1.84	2.05	2.20	1.81	1.98	2.11	1.77	1.89	1.99	1.74	1.84	1.91
13.0	1.91	2.23	2.48	1.85	2.13	2.33	1.79	2.01	2.17	1.76	1.95	2.08	1.72	1.86	1.96	1.70	1.80	1.88
13.5	1.86	2.20	2.46	1.81	2.09	2.30	1.75	1.98	2.14	1.72	1.91	2.05	1.68	1.83	1.93	1.65	1.77	1.86
14.0	1.82	2.17	2.43	1.76	2.06	2.28	1.71	1.95	2.12	1.67	1.88	2.03	1.64	1.80	1.91	1.61	1.74	1.83

Factores de Erosión - Sin Pasajuntas - Con Apoyo Lateral

Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			30			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.46	3.49	3.50	3.42	3.39	3.38	3.38	3.32	3.30	3.36	3.29	3.25	3.32	3.26	3.21	3.28	3.24	3.16
4.5	3.32	3.39	3.40	3.28	3.28	3.28	3.24	3.19	3.18	3.22	3.16	3.13	3.19	3.12	3.08	3.15	3.09	3.04
5.0	3.20	3.30	3.32	3.16	3.18	3.19	3.12	3.09	3.08	3.10	3.05	3.03	3.07	3.00	2.97	3.04	2.97	2.93
5.5	3.10	3.22	3.26	3.05	3.10	3.11	3.01	3.00	3.00	2.99	2.95	2.94	2.96	2.90	2.87	2.93	2.86	2.83
6.0	3.00	3.15	3.20	2.95	3.02	3.05	2.90	2.92	2.92	2.88	2.87	2.86	2.86	2.81	2.79	2.83	2.77	2.74
6.5	2.91	3.08	3.41	2.86	2.96	2.99	2.81	2.85	2.86	2.79	2.79	2.79	2.76	2.73	2.72	2.74	2.68	2.67
7.0	2.83	3.02	3.09	2.77	2.90	2.94	2.73	2.78	2.80	2.70	2.72	2.73	2.68	2.66	2.65	2.65	2.61	2.60
7.5	2.76	2.97	3.05	2.70	2.84	2.89	2.65	2.72	2.75	2.62	2.66	2.67	2.60	2.59	2.59	2.57	2.54	2.54
8.0	2.69	2.92	3.01	2.63	2.79	2.84	2.57	2.67	2.70	2.55	2.61	2.62	2.52	2.53	2.54	2.50	2.48	2.48
8.5	2.63	2.88	2.97	2.56	2.74	2.80	2.51	2.62	2.65	2.48	2.55	2.58	2.45	2.48	2.49	2.43	2.43	2.43
9.0	2.57	2.83	2.94	2.50	2.70	2.77	2.44	2.57	2.61	2.42	2.51	2.53	2.39	2.43	2.44	2.36	2.38	2.38
9.5	2.51	2.79	2.91	2.44	2.65	2.73	2.38	2.53	2.58	2.36	2.46	2.49	2.33	2.38	2.40	2.30	2.33	2.34
10.0	2.46	2.75	2.88	2.39	2.61	2.70	2.33	2.49	2.54	2.30	2.42	2.46	2.27	2.34	2.36	2.24	2.28	2.29
10.5	2.41	2.72	2.85	2.33	2.58	2.67	2.27	2.45	2.51	2.24	2.38	2.42	2.21	2.30	2.32	2.19	2.24	2.26
11.0	2.36	2.68	2.83	2.28	2.54	2.65	2.22	2.41	2.48	2.19	2.34	2.39	2.16	2.26	2.29	2.14	2.20	2.22
11.5	2.32	2.65	2.80	2.24	2.51	2.62	2.17	2.38	2.45	2.14	2.31	2.36	2.11	2.22	2.26	2.09	2.16	2.19
12.0	2.28	2.62	2.78	2.19	2.48	2.59	2.13	2.34	2.43	2.10	2.27	2.33	2.06	2.19	2.23	2.04	2.13	2.16
12.5	2.24	2.59	2.76	2.15	2.45	2.57	2.09	2.31	2.40	2.05	2.24	2.31	2.02	2.15	2.20	1.99	2.10	2.13
13.0	2.20	2.56	2.74	2.11	2.42	2.55	2.04	2.28	2.38	2.01	2.21	2.28	1.98	2.12	2.17	1.95	2.06	2.10
13.5	2.16	2.53	2.72	2.08	2.39	2.53	2.00	2.25	2.35	1.97	2.18	2.26	1.93	2.09	2.15	1.91	2.03	2.07
14.0	2.13	2.51	2.70	2.04	2.36	2.51	1.97	2.23	2.33	1.93	2.15	2.24	1.89	2.06	2.12	1.87	2.00	2.05



PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO DE DISEÑO.

El método de diseño de la PCA incluye un aspecto novedoso en el procedimiento de diseño, el criterio de erosión, que es ahora tomado en cuenta, junto con el criterio de fatiga. El criterio de erosión reconoce que el pavimento puede fallar por un excesivo bombeo, erosión del terreno de soporte y diferencias de elevaciones en las juntas. El criterio del esfuerzo de fatiga reconoce que el pavimento pueda fallar, presentando agrietamiento derivado de excesivas repeticiones de carga. Esta sección explica las bases de estos criterios y el desarrollo del procedimiento de diseño.

ANÁLISIS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO.

El procedimiento de diseño está basado en un minucioso análisis de esfuerzos en el concreto y deformaciones en las juntas, esquinas y bordes del pavimento, por un programa de computadora de elemento finito. El análisis consideró losas con dimensiones finitas, colocación variable de las cargas por eje y el modelaje de la transferencia de carga en las juntas transversales ó grietas, así como también en las juntas ubicadas entre el pavimento y el acotamiento.

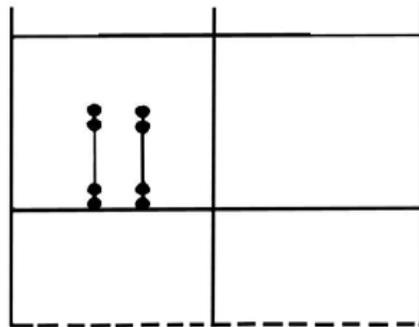
Después de analizar diferentes posiciones de los ejes en la losa, se ha encontrado la posición crítica y se muestra en la figura, con las siguientes conclusiones:

1. Los esfuerzos críticos en el pavimento ocurren cuando el camión es colocado cerca ó sobre los bordes del pavimento y a la mitad de las juntas transversales. Dado que las juntas se encuentran a la misma distancia de esta ubicación, el espaciamiento de las juntas transversales y el tipo de transferencia de carga tienen muy poco efecto en la magnitud de los esfuerzos. En el procedimiento de diseño, debido a eso, el análisis basado en los esfuerzos de flexión y fatiga producen los mismos valores para diferentes espaciamientos de

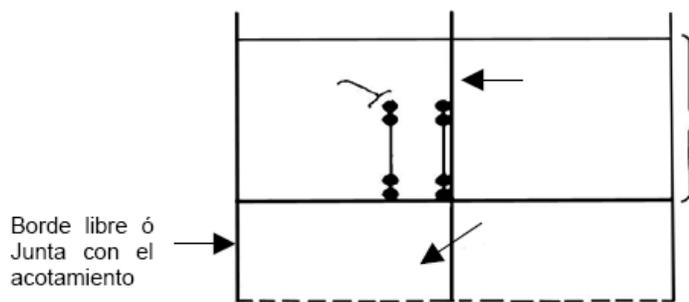
juntas y diferentes mecanismos de transferencia de carga en las juntas transversales. Cuando el pavimento central se apoya lateralmente en un carril de acotamiento, la magnitud de los esfuerzos críticos se ve considerablemente reducida.

2. Las deformaciones más críticas del pavimento ocurren en las esquinas de las losas cuando una carga es colocada sobre la junta con las ruedas cerca ó sobre la esquina. En esta situación, el espaciamiento de las juntas transversales no tiene efecto en la magnitud de las deformaciones en las esquinas pero el mecanismo de transferencia de carga si tiene un gran efecto.

Esto significa que los resultados del diseño basados en el criterio de erosión (deformaciones) puede ser substancialmente afectado por el tipo de transferencia de carga seleccionado, especialmente cuando se tiene un alto volumen de tráfico pesado. El tener apoyo lateral también reduce considerablemente las deformaciones en las esquinas de las losas.



a) Ubicación de las cargas de eje críticas para los esfuerzos a flexión.



b) Ubicación de las cargas de eje críticas para las deformaciones.

UBICACIÓN DE LAS CARGAS.

Las cargas de los camiones ubicados en el borde exterior del pavimento provoca las condiciones más severas que cualquier otra ubicación de las cargas.

Sí esta ubicación del camión la movemos unas cuantas pulgadas al interior del pavimento, el efecto decrece substancialmente.

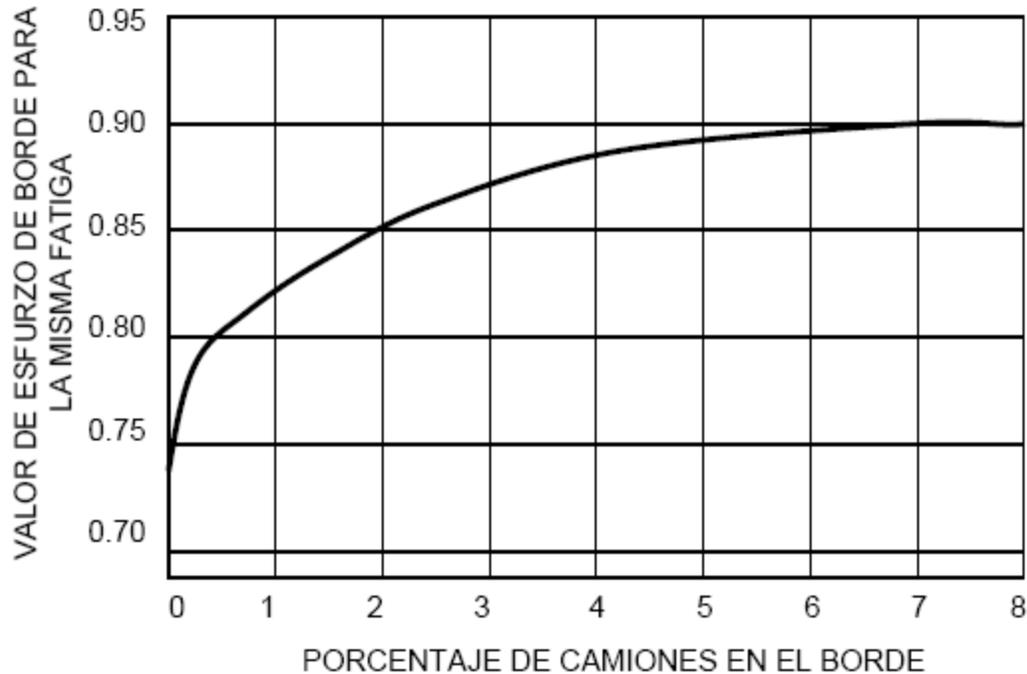
Solamente una pequeña fracción de todos los camiones circulan con sus llantas exteriores sobre los bordes del pavimento. La mayoría de los camiones circulando sobre el pavimento se ubican con sus llantas exteriores aproximadamente a una distancia de 60 centímetros del borde del pavimento.

Para el procedimiento de diseño de este método, la condición más severa es supuesta con un 6 % de camiones en el borde, esto para estar del lado de la seguridad. Al incrementar la distancia hacia el interior del pavimento, la frecuencia de las repeticiones de carga aumenta mientras que disminuye la magnitud de los esfuerzos y las deformaciones

La información sobre la distribución de las ubicaciones de los camiones y de los esfuerzos y deformaciones provocados por las cargas colocadas sobre o cerca del borde del pavimento es muy difícil de emplear directamente en un procedimiento de diseño. Como resultado de esto, las distribuciones fueron analizadas y se prepararon técnicas de fácil aplicación para propósitos de diseño.

Para análisis de esfuerzo por fatiga, la fatiga fue calculada en incrementos de fracciones de pulgadas hacia el interior desde el borde de la losa, para diferentes distribuciones de ubicación del camión; obteniéndose los factores de esfuerzo de borde equivalente (Este factor, al multiplicarse por esfuerzos de borde nos da el mismo grado de consumo de fatiga que resultaría de una distribución de

ubicación del camión específica.) La condición más severa de 6% de intromisión de los camiones ha sido incorporada en las tablas de diseño.



Para el análisis de erosión que involucra las deformaciones en la esquina de la losa, el caso más severo (6% de camiones sobre el borde) es nuevamente supuesto. Cuando no existe apoyo lateral, las cargas en las esquinas (6% de los camiones) son críticas, y cuando no se cuenta con apoyo lateral, el mayor número de cargas hacia el interior de la esquina del pavimento (94% de los camiones) son críticas. Estos factores son incorporados a las gráficas de diseño de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de daño de erosión} = 100 \sum n_i (C/N_i).$$

Donde:

n_i = número esperado de repeticiones de carga para cada grupo de ejes i .

N_i = número permitido de repeticiones de carga para cada grupo de ejes i .

$C = 0.06$ para pavimentos sin apoyo lateral.

0.94 para pavimentos con apoyo lateral.

Variación en la resistencia del concreto.

El procedimiento de diseño reconoce que puede haber variaciones en la resistencia del concreto y así lo manifiesta en sus ecuaciones, nomogramas y tablas de diseño, al reducir en un 15% el módulo de ruptura del concreto. Es importante aclarar que el diseñador no aplica esta reducción directamente al módulo de ruptura, ya que el método automáticamente lo considera.

Desarrollo de la resistencia a través del tiempo.

La resistencia a los 28 días (módulo de ruptura) es usada como la resistencia de diseño. Sin embargo, este procedimiento de diseño incorpora el efecto de la resistencia del concreto ganado a después de 28 días. Esta modificación está basada en un análisis que, la resistencia incrementada y las repeticiones de carga mes por mes por 20 y 40 años de periodos de diseño. El efecto está incluido en las gráficas y tablas de diseño para que el usuario simplemente dé el valor de 28 días como la resistencia de diseño.

Alabeo del concreto por gradientes de temperatura y humedad.

Además de las cargas del tráfico, las losas de concreto también están sometidas a alabeos. El alabeo por humedad es la deformación cóncava hacia arriba de la losa debido a las variaciones de contenido de humedad con la profundidad de la losa y tiene 2 efectos: provoca pérdida de soporte a lo largo de los bordes de la losa y además provoca una restricción en el esfuerzo de compresión en el fondo de la losa. Debido a que el pandeo es un fenómeno a largo plazo, sus efectos avanzan lentamente.

El alabeo de las losas de concreto por variaciones de temperatura se manifiesta durante el día, cuando la superficie está más caliente que la parte inferior, desarrollando esfuerzos de tensión en la parte inferior de la losa. Durante

la noche, la distribución de la temperatura se revierte y los esfuerzos de tensión se desarrollan en la parte superior de la losa, además que la distribución de la temperatura no es lineal y cambia constantemente. Sin embargo, dado que los efectos combinados de los alabeos por variaciones de temperatura y de humedad son muy difícil de medir ó evaluar, no se incorporan en este método de diseño.

Esfuerzo Equivalente:

En el procedimiento de diseño de la PCA, la determinación del esfuerzo equivalente está basado en el esfuerzo máximo de flexión de borde del análisis de elemento finito del software J-Slab, bajo la carga de un eje sencillo y la carga de un eje tándem para diferentes profundidades en el espesor de la losa y módulos de reacción del suelo.

Los parámetros básicos de entrada asumidos son:

- ✚ Módulo de elasticidad de la losa, $E = 4'000,000$ psi.
- ✚ Módulo de Poisson $\mu = 0.15$.
- ✚ Longitud finita de la losa, $L = 180$ pulgadas.
- ✚ Ancho finita de la losa, $W = 144$ pulgadas.

Eje estándar sencillo de 18 kips de carga del eje (llantas dual), con una carga por llanta de 4,500 lbs, llanta con área de contacto de 7×10 in² (radio de carga equivalente de 4.72"), separación entre llantas de 12" y ancho del eje (distancia entre el centro de las llantas dual) $D = 72$ " fue usado para el análisis, así como también se usó un eje estándar tándem de 36 kips de carga en el eje (llantas dual) con separación entre ejes de $t = 50$ " y el resto de las especificaciones idénticas al eje sencillo.

DISEÑO CON SUB-BASES DE CONCRETO POBRE (ECOCRETO).

En los casos que se asumió un acotamiento de concreto, se supuso una trabazón de agregado de 25,000 psi. La PCA incorporó además los resultados de un programa de computadora llamado "MATS", desarrollado para el análisis y diseño de losas de cimentación, para estimar el soporte proporcionado por la subrasante, extendiéndose más allá de los bordes de la losa, para una losa sin apoyo lateral.

Lo anterior junto con otros factores de ajuste, concluye en la definición del esfuerzo equivalente (σ_{eq}) como se presenta a continuación:

$$\sigma_{eq} = \frac{6 * M_e}{h^2} * f_1 * f_2 * f_3 * f_4$$

Eje Sencillo sin Apoyo Lateral (SA/NS):

$$-1600 + 2525 * \log(l) + 24.42 * l + 0.204 * l^2$$

Eje Tándem sin Apoyo Lateral (TA/NS):

$$3029 - 2966.8 * \log(l) + 133.69 * l - 0.0632 * l^2$$

Me= Eje Sencillo con Apoyo Lateral (SA/WS):

$$(-970.4 + 1202.6 * \log(l) + 53.87 * l) * (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447})$$

Eje Tándem con Apoyo Lateral (TA/WS):

$$(2005.4 - 1980.9 * \log(l) + 99.008 * l) * (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447})$$

$$f_1 = \begin{cases} \text{Eje Sencillo:} \\ (24/\text{SAL})^{0.06} * (\text{SAL}/18) \\ \text{Eje Tándem:} \\ (48/\text{TAL})^{0.06} * (\text{SAL}/36) \end{cases} \quad f_2 = \begin{cases} \text{Sin Apoyo Lateral:} \\ 0.892 + h/85.71 - h^2/3000 \\ \text{Con Apoyo Lateral} \\ 1 \end{cases}$$

$f_3 = 0.894$ para un 6 % de camiones en el borde de la losa

$f_4 = 1 / [1.235*(1 - CV)]$

Donde:

σ_{eq} = Esfuerzo equivalente.

f_1 = Factor de ajuste debido al efecto de las cargas del eje y áreas de contacto.

f_2 = Factor de ajuste para una losa sin apoyo lateral, basado en los resultados del programa de computadora MATS.

f_3 = Factor de ajuste para valorar el efecto de la ubicación del camión en los esfuerzos de borde (la PCA recomienda un 6 % de intromisión de camiones, lo que resulta un $f_3 = 0.894$).

f_4 = Factor de ajuste para tomar en cuenta el incremento en la resistencia del concreto a través del tiempo después de los 28 días, además de una reducción de la resistencia por un coeficiente de variación (CV); (la PCA usa un CV = 15%, $f_4 = 0.953$) y de las cargas por eje sencillo (SAL) y tándem (TAL), en kips.

Análisis de Fatiga.

El concepto de análisis de fatiga de la PCA es las fallas del pavimento (ó los agrietamientos iniciales) por la fatiga del concreto debido a los esfuerzos de repeticiones de carga. Basándose en la hipótesis de Miner, es decir, que la resistencia a la fatiga no consumida por la repetición de una carga está disponible para las repeticiones de otras cargas, el procedimiento de diseño de la PCA permite que el diseñador elija un espesor inicial, calcule la relación de esfuerzos, es decir la relación entre el esfuerzo equivalente y el módulo de ruptura del concreto (relación de esfuerzos= σ_{eq} / MR) para cada carga de eje y tipo de eje,

para después determinar el número máximo de repeticiones permisibles (N_f), dependiendo del rango de relación de esfuerzos.

Para $\sigma_{eq} / MR \geq 0.55$

$$\text{Log } N_f = 11.737 - 12.077 * (\sigma_{eq} / MR)$$

Para $0.45 < \sigma_{eq} / MR < 0.55$

$$N_f = \left[\frac{4.2577}{(\sigma_{eq} / MR) - 0.4325} \right]^{3.268}$$

Para $\sigma_{eq} / MR \leq 0.45$

$N_f = \text{ilimitado}$

El procedimiento de diseño continúa dividiendo el número esperado de repeticiones de carga entre las repeticiones permisibles (N_f) para de esa manera obtener el daño por fatiga para cada carga y tipo de eje. Posteriormente se suman los daños provocados por cada tipo de eje y el daño total por fatiga deberá ser inferior al 100 %, por lo que se deberán hacer varios tanteos de espesor y el óptimo será aquel que provoque el daño más cercano al 100 % sin sobrepasarse.

Análisis de Erosión.

Las fallas del pavimento tales como bombeo, erosión del terreno de soporte y diferencia de elevación en las juntas son relacionadas más a las deflexiones del pavimento que a sus esfuerzos a flexión. La deflexión más crítica en la esquina de la losa cuando la carga del eje se ubica en la junta cerca de la esquina.

La falla principal en la prueba AASHTO de camino fue el bombeo ó la erosión de la base granular bajo la losa. Sin embargo no se pudieron obtener correlaciones confiables entre las deflexiones de la esquina de la losa y el

comportamiento de estos pavimentos, se encontró que para predecir el comportamiento de los pavimentos se deben aplicar diferentes criterios de deflexión, dependiendo del espesor de la losa y un poco en el módulo de reacción del suelo.

Una correlación mejor se obtuvo relacionando el comportamiento de los pavimentos con su valor de trabajo definido como un producto de la deflexión en la esquina (w) y la presión (p) en la interface de la losa con el suelo, dividido por la longitud de la cavidad de la deflexión, la cuál es función del valor de rigidez relativa (I).

El concepto es que una losa delgada con una deflexión pequeña recibe más rápido el golpe de la carga que una losa con mayor espesor. Las siguientes ecuaciones fueron desarrolladas para calcular el número permisible de repeticiones de carga:

$$\text{Log } N = 14.524 - 6.777 (C_1 P - 9.0)^{0.103}$$

Donde:

N = Numero de repeticiones permisibles de carga basadas en un índice de serviciabilidad presente de 3.0.

C1 = Factor de ajuste con valor de 1.0 para bases granulares y de 0.9 para bases mejoradas con cemento.

P = Trabajo, definido por la siguiente ecuación:

$$P = 268.7 \frac{p^2}{h * k^{0.73}}$$

Donde:

p = Presión en la base, bajo la esquina de la losa, igual a k*w para una cimentación líquida y sus unidades son psi.

h = Espesor de la losa en pulgadas.

k = Módulo de reacción del suelo en pci (libras sobre pulgada cúbica)

La ecuación para obtener el daño por erosión es:

$$\% \text{ de daño por erosión} = 100 \sum_{i=1}^m \frac{C_2 n_i}{N_i}$$

Donde:

$C_2 = 0.06$ para pavimentos sin apoyo lateral y 0.94 para pavimentos con apoyo lateral. Con apoyo lateral, la deflexión en la esquina no se afecta significativamente por la ubicación de los camiones y por esa razón se puede usar un C_2 mayor.

n_i = Repeticiones esperadas para el eje i .

N_i = Repeticiones permisibles para el eje i .

La ecuación anterior es en donde se suman los porcentajes de daño de cada tipo de eje y el análisis de erosión también debe arrojar un resultado final inferior al 100 %.

II.3 METODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTO DE CONCRETO.

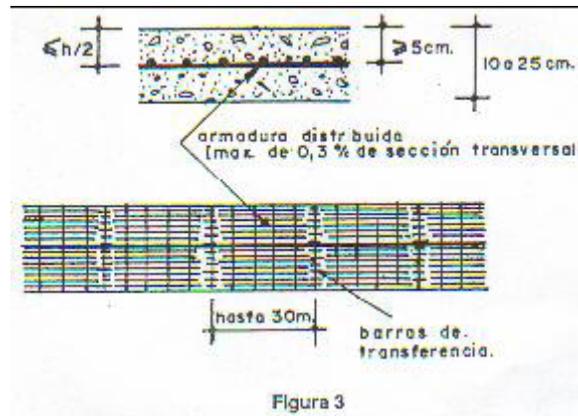
SOLIDO.

Pavimentos de Concreto con Refuerzo de Acero.

PCH RA no Estructural.

El refuerzo no cumple función estructural, su finalidad es resistir las tensiones de contracción del concreto en estado joven y controlar los agrietamientos. Tienen el refuerzo de acero en el tercio superior de la sección transversal a no menos de 5cm. Bajo la superficie. La sección max. de acero es de 0.3% de la sección transversal del Pavimento.

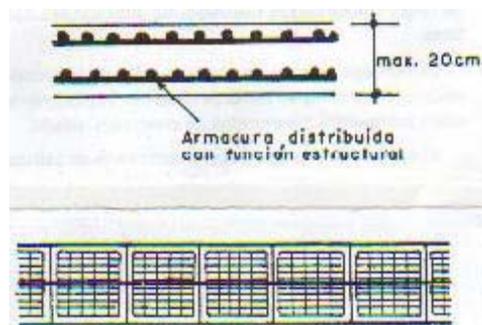
Aplicación: Es restringida, mayormente a pisos Industriales.



PCH RA Estructural.

El refuerzo de acero asume tensiones de tracción y compresión, por lo que es factible reducir el espesor de la losa hasta 10 o 12 cm.

Aplicación: Pisos Industriales, las losas resisten cargas de gran magnitud.



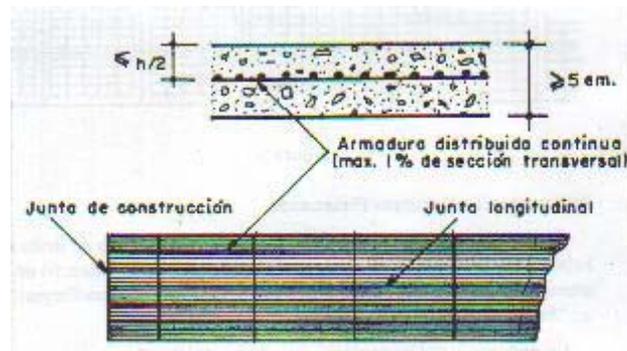
PCH RC

Pavimentos de Concreto Hidráulico con Refuerzo Continuo.

El refuerzo asume todas las deformaciones, en especial las de temperatura, eliminando las juntas de contracción, quedando solo las juntas de construcción y de dilatación en la vecindad de alguna obra de arte.

La fisura es controlada por una armadura continua en el medio de la calzada, diseñada para admitir una fina red de fisuras que no comprometan el buen comportamiento de la estructura del pavimento.

Aplicación: En la Parkway USA, zonas de clima frío, recubrimientos en pavimentos deteriorados.



PCH PP - PCH RF

Pavimentos de Concreto Hidráulico Pre o Postensado.

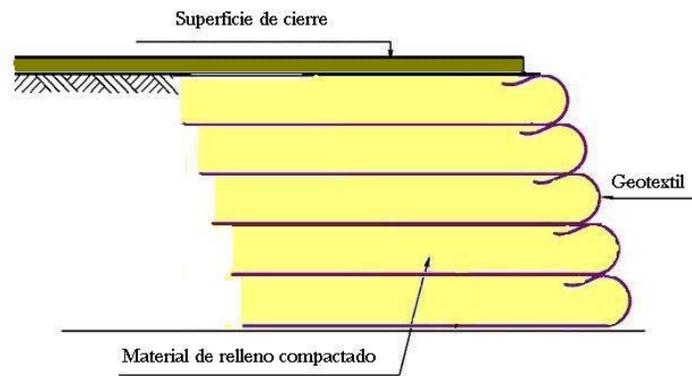
Su desarrollo es limitado, la primera experiencia es en el Aeropuerto de Orly (Paris-1948) y posteriormente en el Aeropuerto de Galeao (Río de Janeiro). El diseño trata de compensar su costo vs. disminución del espesor, presenta problemas en su ejecución y mantenimiento.

Pavimentos de Concreto Hidráulico Reforzado con Fibras.

Incorpora fibras metálicas, de propileno, carbón, etc. con excelentes resultados en Aeropuertos y sobre capas delgadas de refuerzo. El diseño es más estructural y de buen comportamiento mecánico, pero sus costos y los cuidados requeridos en su ejecución, dificultan su desarrollo.

PERMEABLE.

El pavimento permeable es una estructura que permite el filtrado del agua a través de ella, por medio de una capa porosa la cual llega hasta el subsuelo. Siendo una estructura compuesta de un pavimento poroso, una base, una estructura de almacenamiento o sub-rasante y posiblemente una membrana filtrante (geotextil).



Como ya se menciona la estructura del pavimento permeable está compuesta de un pavimento poroso, una base, una sub-rasante y una membrana filtrante (geotextil).

La capa superficial es un pavimento poroso que puede ser de asfalto (PAP), de concreto (PCP), o bien Bloque de Concreto Modular Entrelazado de Celdas Internas (Concrete Grid o MICBIC) y Bloque de Concreto Modular Entrelazado con Celdas Externas (Modular Pavement o MICBEC).

Bajo esta capa esta la base, compuesta de 2 - 5 mm de agregado para MICBEC y 10 – 12.5 mm de agregado para PAP y PCP.

En la estructura de depósito o depósito de almacenamiento, la profundidad está basada en la capacidad de la instalación. Una membrana filtrante o geotextil colocada entre la estructura de depósito o del suelo natural para prevenir la ascensión en la entrada del depósito de las pequeñas partículas del suelo natural. Aunque también el filtro puede estar entre la base y la subrasante para prevenir la mezcla de las dos capas.

El pavimento de concreto permeable tiene ventajas:

- ✚ Reduce el riesgo de inundaciones.
- ✚ Evita el acuaplaneo de los autos ocasionado por la acumulación de agua en la superficie de los pavimentos.
- ✚ Evita el arrastre de basura por el agua reduciendo el riesgo de tapado de alcantarillas.
- ✚ Proporciona una superficie rugosa la cual favorece el frenado eficiente de los vehículos sobre el pavimento.
- ✚ Permite un mejor aprovechamiento del agua de lluvia, la cual generalmente se contamina al mezclarse con el agua del drenaje sanitario.
- ✚ Disminuye los costos asociados con la instalación de drenaje pluvial.
- ✚ Permite que los suelos retengan la humedad por más tiempo favoreciendo las aéreas verdes.
- ✚ Permite la recarga de los mantos freáticos.
- ✚ Permite un ahorro de energía durante la colocación y a lo largo de la vida útil de este material.
- ✚ El pavimento permeable por su color claro refleja la luz solar y artificial absorbiendo menor cantidad de calor a diferencia de los pavimentos de asfalto. Esto permite un ahorro de energía al disminuir el uso de aires acondicionados y luz eléctrica para iluminar las calles hasta en un tercio con respecto al asfalto.
- ✚ Es de rápida y fácil colocación.
- ✚ Para su colocación solo es necesario extender el material y compactarlo evitando así el vibrado.
- ✚ Se puede evitar el uso de cortadoras de disco diamante.
- ✚ Se evita el sellado de juntas.
- ✚ Para el curado es suficiente cubrir el pavimento permeable con una cubierta de polietileno.
- ✚ Evita las operaciones de texturizado.

DESVENTAJAS:

- ✚ El pavimento permeable puede perder permeabilidad a lo largo del tiempo al taparse los espacios vacios con material fino, por lo que requiere de un mantenimiento que consiste en un lavado con agua a presión aproximadamente cada dos años.
- ✚ Tiene una menor resistencia al desgaste que el concreto normal por lo que solo debe colocarse en zonas de transito ligero.
- ✚ Requiere de mano de obra especializada.

Existen varios tipos de pavimento permeable y cada uno de ellos con características propias, los cuales son:

- ✚ Pavimento permeable de asfalto. (PAP).
- ✚ Bloque de concreto modular entrelazado de celdas internas (MICBIC), “concrete grid”.
- ✚ Bloque de concreto modular entrelazado con celdas externas (MICBEC), “modular pavement”.
- ✚ Pavimento permeable de concreto (PCP).

El asfalto permeable se ha utilizado como material emergente en los caminos desde los años 50. El laboratorio del transporte y de la investigación sobre los caminos investigo el material para su uso en caminos durante los años 70 pero los resultados no eran buenos. Los nuevos materiales han sido desde entonces desarrollados y renovados y un gran número de ensayos se han emprendido en años recientes.

El pavimento permeable de asfalto (PAP) es como un pavimento de asfalto convencional, con agregado grueso, con asfalto como aglutinante, pero con muy poco agregado fino (polvo o arena) permitiendo la filtración del agua de lluvia en la estructura.

Algunas de las funciones del asfalto permeable son en la seguridad del tráfico y la reducción del nivel de ruido, dada su alta porosidad. Tal funcionamiento es altamente atractivo no solo a los usuarios si no también a los residentes de obras referidos a caminos. Sin embargo, estas ventajas no duran indefinidamente dado que los poros se reducen gradualmente por el tráfico.