



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO
POR LOS MÉTODOS AASTHO Y PCA**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

P R E S E N T A:

ING. LUIS EDUARDO MIRANDA PÉREZ

DIRECTOR DE TESINA: **M.I. AGUSTÍN DEMÉNEGHI COLINA**

MÉXICO, D.F.

OCTUBRE 2018

Agradecimientos

A mi padre Gumersindo Miranda Hernández, por todos sus valiosos consejos y palabras de aliento, formando en mí siempre el sentimiento de superación, así como el apoyo incondicional que siempre me ha brindado en todo momento de mi vida. A mi madre, Irma Pérez Segura, por siempre estar al pendiente de los problemas que tenía así como ayudarme en situaciones difíciles y, sobre todo, brindarme todo su cariño y comprensión durante mi trayectoria académica. Nunca encontraré las palabras necesarias para darles las gracias de todo lo que me han enseñado y brindado en mi vida.

A mi hermano Víctor Manuel Miranda Pérez, por ser un amigo desde la infancia, cuidando siempre de mí, apoyándome y alentándome en no dejarme vencer por las adversidades que surjan.

A mis apreciables amigos de la especialidad David y Edher, por el apoyo en todo momento y la buena amistad que existe, a Antonio por siempre tener palabras de aliento en esos días difíciles, el ser ya un buen amigo y hermano desde la secundaria. A Sobeida, por darme esos consejos que en su momento hicieron que retomara mejor mis acciones, gracias por ser una amiga incondicional. A todos mis amigos de la licenciatura de ingeniería civil que siempre me brindaron su amistad sincera y apoyo incondicional.

A mi novia Yunuen, por brindarme todo su cariño, palabras de aliento y apoyo. Gracias por llegar a mi vida y quererme tanto como te quiero yo. Quiero seguir cumpliendo metas junto a ti.

Al Ing. Roberto Sosa Garrido, por siempre estar en la mejor disposición de ayudarme y compartir sus conocimientos durante la realización de este trabajo.

Índice

Introducción.....	7
Objetivos.....	7
1. ESTRUCTURACIÓN DEL PAVIMENTO RÍGIDO	8
1.1 Antecedentes.....	8
1.2 Pruebas de Campo y Laboratorio.....	9
2. ESFUERZOS Y DEFORMACIONES.....	11
3. TRÁNSITO VEHICULAR.....	12
3.1 Análisis de Tránsito.....	13
4. METODOLOGÍAS DE DISEÑO.....	14
4.1 Método AASHTO.....	15
4.2 Método de la PCA.....	20
5. EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	23
5.1 Antecedentes	23
5.1.1 Ubicación.....	23
5.1.2 Clasificación Climatológica	24
5.2 Estudios de Campo	24
5.2.1 Estudio de Banco de Materiales.....	27
5.2.2 Tipo de Materiales a Utilizar y Especificaciones Técnicas de Calidad	32
5.3 Análisis de Tránsito	37
5.1.1 Método AASTHO.....	37
5.1.2 Método de la PCA.....	40
5.4 Diseño del Pavimento	43
5.4.1 Método AASTHO.....	43
5.4.2 Método de la PCA.....	48
5.5 Diseño de Juntas y Pasajuntas	61
6. CONCLUSIONES	66
7. BIBLIOGRAFÍA.....	68

Fig. 1 Capas de un Pavimento Rígido (Recuperado de: <a)<="" a="" href="https://www.slideserve.com/laksha/pavimentos,s.f.">.....	9
Fig. 2 Falla de colapso en la orilla de una losa de concreto (Recuperado de <a)<="" a="" href="https://es.slideshare.net/henryj20/diseo-pavimento-rigido,s.f.">.....	12
Fig. 3 Distribución de Esfuerzos en la losa de concreto. (Recuperado de <a)<="" a="" href="http://www.duravia.com.pe/category/conoce-el-pavimento/page/2/,s.f.">.....	12
Fig. 4 Configuración de Ejes Vehiculares (Recuperado de: <a)<="" a="" href="https://slideplayer.es/slide/13283867,s.f.">.....	13
Fig. 5 Precipitación media anual en mm. (Roberto, Sosa “Factores Regionales”, UNAM, Ciudad de México a 12 de Septiembre de 2018)	19
Fig. 6 Posición de las cargas para análisis por fatiga. (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).....	21
Fig. 7 Posición de las cargas para análisis por erosión. (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).	21
Fig. 8 Análisis por fatiga - Repeticiones permisibles con base en el factor de relación de esfuerzos con y sin acotamiento de concreto. (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).....	22
Fig. 9 Análisis de Erosión -Repeticiones permisibles de carga con base en el factor de erosión con acotamientos de concreto. (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).....	22
Fig. 10 Caseta La Pera - Cuautla.....	23
Fig. 11 Ampliación de la Caseta de Cobro La Pera - Cuautla	23
Fig. 12 Perfil Estratigráfico - Sondeo 2.....	25
Fig. 13 Perfil Estratigráfico - Sondeo 1.....	25
Fig. 14 Bancos de Materiales.....	27
Fig. 15 Requisitos de Calidad de Materiales para Capa Subrasante (SCT. Características de los Materiales. N ·CMT ·1 ·03/02)	33
Fig. 16 Zona granulométrica recomendable de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico (SCT. Características de los Materiales. N ·CMT ·4 ·02 ·002/16.Figura 1).....	34
Fig. 17 Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico. (SCT. Características de los Materiales. N ·CMT ·4 ·02 ·002/16.Tabla 2).	34
Fig. 18 Correlaciones entre resistencia y tipo de suelos. (Salazar Rodríguez. (2015). Guía para el diseño y construcción de pavimentos rígidos 2a. Edición).....	43
Fig. 19 Ábaco para definir el Módulo de Reacción para Bases de Grava Triturada.(Roberto, Sosa “Diseño Estructural de Pavimentos de Concreto para Carreteras ”, UNAM, Ciudad de México a 22 de Octubre de 2018).....	44
Fig. 20 Ábaco para determinar el Módulo de Reacción para Bases Tratadas con Cemento Portland. (Roberto, Sosa “Diseño Estructural de Pavimentos de Concreto para Carreteras”, UNAM, Ciudad de México a 22 de Octubre de 2018).....	44
Fig. 21 Secciones estructurales del pavimento de concreto por el Método AASTHO.....	47
Fig. 22 Análisis por Fatiga empleando el nomograma con base en el factor de relación de esfuerzos con y sin acotamiento de concreto (Alt.1)	52
Fig. 23 Análisis por Fatiga empleando el nomograma con base en el factor de relación de esfuerzos con y sin acotamiento de concreto (Alt.2)	53

Fig. 24 Análisis por Erosión empleando el nomograma con base en el factor de erosión con acotamientos de concreto (Alt.1)	57
Fig. 25 Análisis por Erosión empleando el nomograma con base en el factor de erosión con acotamientos de concreto (Alt.2)	58
Fig. 26 Sección Estructural para la Base de Agregados Triturados - Alt.1	61
Fig. 27 Sección Estructural para la Base Tratada con Cemento Pórtland – Alt.2	61
Fig. 28 Elementos del pavimento de concreto simple. (Recuperado de: https://www.sioingenieria.com/sitio/contenidos_mo.php?it=556 , s.f.)	62
Fig. 29 Transferencia de carga entre losas sin y con pasajunta. (Recuperado de: http://libro-pavimentos.blogspot.com/2012/10/transferencia-de-cargas-i.html , s.f.)	62
Fig. 30 Junta Longitudinal Tipo A y dimensiones del machihembrado	63
Fig. 31 Diseño de Juntas de Contracción y Construcción. (Roberto, Sosa “Diseño de juntas”, UNAM, Ciudad de México a 22 de Octubre de 2018)	64
Fig. 32 Junta Transversal de Contracción y Construcción	64
Fig. 33 Juntas de Expansión	65
Fig. 34 Sellado de Juntas	65

Tabla 1 Niveles de Confianza para el tipo de carretera (AASHTO.(1993). <i>Guide for Design of Pavement Structures</i>)	16
Tabla 2 Valores de (t), So en función del Qu. (AASHTO.(1993). <i>Guide for Design of Pavement Structures</i>)	16
Tabla 3 Valores típicos para el Índice de Servicio de Rechazo. (AASHTO.(1993). <i>Guide for Design of Pavement Structures</i>)	17
Tabla 4 Coeficientes de Drenaje recomendados. (AASHTO. (1993). <i>Guide for Design of Pavement Structures</i>)	18
Tabla 5 Tipologías de climas en México. (Roberto, Sosa “Factores Regionales”, UNAM, Ciudad de México a 12 de Septiembre de 2018)	18
Tabla 6 Coeficientes de Transferencia de Cargas. (AASHTO.(1993). <i>Guide for Design of Pavement Structures</i>)	20
Tabla 7 Clasificación Climatológica	24
Tabla 8 Resumen de ensayos de las calas realizadas	26
Tabla 9 Cédula de Campo del Banco de Material KM 80+000	29
Tabla 10 Cédula del Banco de Material KM 80+000	30
Tabla 11 Banco de Materiales para Pavimentos	31
Tabla 12 Requisitos de granulometría de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico. (SCT. <i>Características de los Materiales. N · CMT · 4 · 02 · 002/16. Tabla 1</i>)	34
Tabla 13 Valores del Factor de carril de diseño. (AASHTO.(1993). <i>Guide for Design of Pavement Structures</i>)	38
Tabla 14 Análisis de Tránsito por el Método AASTHO	39
Tabla 15 Porcentaje de Frecuencia de cargas. (Roberto, Sosa “Análisis del Tránsito Carretero”, UNAM, Ciudad de México a 27 de Agosto de 2018)	40
Tabla 16 Obtención del Tránsito en el Carril de Diseño	41
Tabla 17 Determinación del número de repeticiones por tipo y peso de ejes de vehículos	42

Tabla 18 Datos para el diseño del pavimento de concreto por el Método AASTHO	46
Tabla 19 Datos para el diseño del pavimento por el método de la PCA	48
Tabla 20 Valores de LSF para distintas vialidades.(Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).....	48
Tabla 21 Determinación de los Esfuerzos Equivalentes (Alt.1)	49
Tabla 22 Determinación de los Esfuerzos Equivalentes (Alt. 2)	49
Tabla 23 Esfuerzos Equivalentes para Losa con Acotamientos de Concreto (Alt.1). (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).....	50
Tabla 24 Esfuerzos Equivalentes para Losas con Acotamientos de Concreto (Alt.2). (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).	51
Tabla 25 Determinación de los Factores de Erosión (Alt.1).....	54
Tabla 26 Determinación de los Factores de Erosión (Alt.2).....	54
Tabla 27 Factores de Erosión considerando Juntas con Pasajuntas y con Acotamientos de Concreto (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).	55
Tabla 28 Factores de Erosión considerando Juntas con Pasajuntas y con Acotamientos de Concreto (Alt.2). (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).	56
Tabla 29 Cálculo del Espesor del Pavimento (Alt.1).....	59
Tabla 30 Cálculo del Espesor del Pavimento (Alt.2).....	60

Introducción

El diseño de un pavimento rígido como en toda obra civil, engloba una cantidad importante de elementos a considerar, que van desde los estudios de campo, pruebas de laboratorio, análisis del tráfico vehicular, etc., esto con el fin de obtener parámetros que nos sirvan en el diseño. Desde luego, también dependerá en gran medida del tipo de metodología a emplear. La AASTHO (American Association of State Highway and Transportation Officials) al igual que la PCA (Portland Cement Association) presentan respectivamente, metodologías de diseño con diferentes variables los cuales aportan resultados respectivamente de acuerdo al tipo de proyecto que se pretende realizar.

En este trabajo se dará a conocer los aspectos que se tienen que tomar en cuenta para el diseño de un pavimento rígido así como las vertientes que posee cada método al momento de elegir uno, en el capítulo I se abordará la estructuración del pavimento, así como las pruebas que se realizan tanto en laboratorio como en campo, en el capítulo II se hará mención de los esfuerzos y deformaciones que se presentan en las capas que constituyen un pavimento, un aspecto de suma importancia en el diseño se verá en el capítulo III, ya que se hablará del tránsito vehicular, en el capítulo IV se verá con más detalle las metodologías AASTHO y PCA así como las consideraciones que se presentan en cada una, el ejemplo de aplicación se verá en el capítulo V y respectivamente las conclusiones de los resultados obtenidos en el capítulo VI.

Objetivo

Diseñar un pavimento rígido por el método AASTHO y PCA para realizar una comparativa en los resultados y poder decidir cuál es el más óptimo a emplear.

Alcance

Realizar una comparación de los resultados obtenidos de un diseño de pavimentos por medio de los métodos AASTHO y PCA.

1.-Estructuración del Pavimento Rígido

1.1 Antecedentes

El pavimento rígido, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, tiende a distribuir la carga sobre un área relativamente amplia de suelo; es así que una parte importante de la capacidad de la estructura es suministrada por la propia losa. El factor principal considerado en el diseño de pavimentos rígidos es la resistencia estructural del concreto. Por esta razón, las variaciones menores en la resistencia de la capa subrasante tienen poca influencia sobre la capacidad estructural del pavimento. A continuación, se expone las capas que conforman un pavimento rígido:

- **Subrasante**

Es una capa que puede estar formado por el propio terreno natural, perfilado y con su respectiva compactación. Aunque si las condiciones del suelo no cumplieran con las características necesarias, se utilizan materiales de mejor calidad, o bien, pueden tratarse con productos como son el cemento portland, cal, etc. Su función es proporcionar un apoyo uniforme a la estructura del pavimento, los materiales que se utilicen deben de ser de buena calidad, resistentes a los esfuerzos cortantes y deformaciones que se le presenten.

- **Base**

Se define como base (o subbase) a la capa de material que subyace a la losa de concreto y se encuentra constituida con materiales granulares, materiales tratados o concreto pobre. La función que cumple es la de ser una capa drenante la cual permita expulsar el agua que se vaya filtrando a través de las juntas que presenta la losa de concreto. También impide la ascensión de finos cuando la subrasante se encuentre saturada y presente una consistencia casi líquida, fenómeno es denominado pumping.

- **Losa de Concreto**

Representa la capa superficial del pavimento, está recibirá todos los esfuerzos del tránsito vehicular y por lo tanto debe de estar constituido por agregados de buena calidad, cemento portland, aditivos en caso de ser necesario. El trabajo que ejerce es a la tensión por flexión.

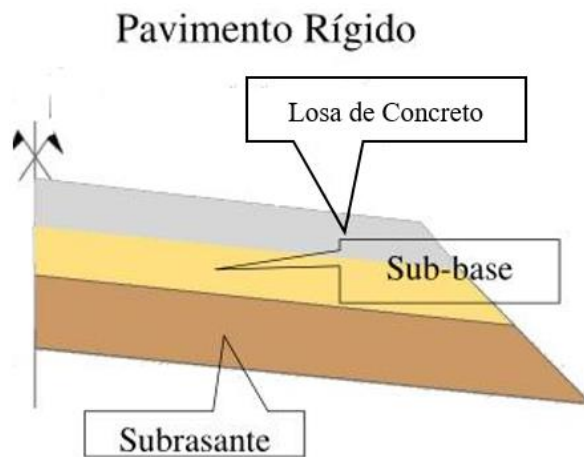


Fig. 1 Capas de un Pavimento Rígido (Recuperado de:

1.2. Pruebas de Laboratorio y de Campo

Siempre hay que tener presente las pruebas de calidad que se tienen que realizar y a su vez, que parámetros se obtendrán a partir de ellas, ya que esto definirá en muchos ámbitos el correcto diseño del pavimento rígido. Claro está que una correcta selección de materiales representativas de campo, hará que los resultados sean más concisos. Para la estructuración de las capas se tiene que realizar una serie de ensayos, dependiendo su conformación respectivamente:

- **Análisis Granulométrico**

Ensayo que se realiza para conocer la forma, tamaño y distribución que presenta una muestra de material a través de una serie de mallas de abertura conocida. Se pesan los materiales retenidos en cada malla, posteriormente se obtiene el porcentaje correspondiente y se grafican los resultados para así conocer si es un material graduado o mal graduado.

- **Límites de Consistencia**

El objetivo es determinar los valores correspondientes de Limite Líquido, Limite Plástico, el Índice de Plasticidad y su correspondiente Contenido de Agua. En función de la correcta caracterización del suelo, podremos conocer mejor las propiedades que puede presentar el material que utilizaremos como capa constitutiva del pavimento.

- **Compactación**

Es una prueba en la cual se busca obtener el peso volumétrico seco máximo al igual que el contenido de agua óptimo en función de impactos por medio un pisón a través de un molde

de 4 o 6". El llevar a cabo de igual forma pruebas en campo para determinar el peso volumétrico determinará junto con el que se obtiene en laboratorio el Grado de Compactación.

- **Prueba de Placa**

Se coloca una placa de 76.2 cm de diámetro, y arriba de ella, se colocan una serie de placas con el fin de reducir los efectos de flexión. Se le aplica una carga constante por medio de gatos hidráulicos y como medio de reacción se coloca una viga que a su vez sujeta a la parte inferior de un camión el cual sirve como contrapeso. Además, se le colocan tres micrómetros los cuales miden los desplazamientos verticales. El resultado de la prueba es la determinación del módulo de reacción del suelo.

- **Permeabilidad**

Es una prueba en la cual se determina la capacidad que tiene el material para retener o caso contrario, facilitar el paso del flujo de agua. Esto se realiza en permeámetro de carga variable para suelos gruesos y, carga constante para suelos finos.

- **Desgaste a la degradación**

La prueba consiste en obtener el grado de desintegración y descomposición de los materiales ante el grado de intemperismo o por cargas de tráfico. Para materiales gruesos se utiliza la máquina de los Angeles.

- **Resistencia del concreto a la tensión por flexión**

Se ensayan vigas de concreto en una prensa aplicando dos cargas puntuales a 1/3 de la parte central, obteniendo así el esfuerzo de ruptura. Posteriormente se deduce el esfuerzo a la tensión por flexión.

- **CBR**

La prueba consiste en penetrar un vástago de 19.4 cm² en un espécimen de suelo en una proporción de 0.127 cm/min. Se realizan la medición de las cargas aplicadas necesarias para penetrar 0.25. Se podría definir como: la relación entre la presión necesaria para penetrar los primeros 0.25 cm en un material de prueba y la presión requerida para penetrar la misma cantidad en un material de características conocidas.

- **Pruebas Triaxiales**

Estas pruebas son cíclicas, es decir, se le aplica un esfuerzo desviado sin llevar la probeta analizada a la falla, esto se realiza para así poder aplicarle distintos ciclos de carga. Después de un número de ciclos, la probeta muestra un comportamiento elástico en el cual se determina el módulo de rigidez o módulo resiliente. Puede obtenerse como la relación que hay entre el esfuerzo desviador cíclico en compresión triaxial y la deformación unitaria axial recuperable.

2.- Esfuerzos y Deformaciones

Las losas de concreto reciben una gran parte de los esfuerzos ocasionados por el tránsito que presenta el pavimento, sin embargo, hay otros factores que inducen a la presencia de esfuerzos como pueden ser: cambios variables de temperatura, lo que da origen a la deformación ya sea contracción o expansión en los materiales, cambios en la humedad al igual que los cambios volumétricos en la base. En este apartado se centrará solo en los esfuerzos generados por las cargas del tránsito ya que son los que consideran con mayor impacto.

Se presenta tres posiciones posibles las cuales se idealizan ante la carga de una llanta de vehículo.

- Centro de la Losa
- En las orillas
- En las esquinas

La zona en la cual se producen los mayores esfuerzos por tensión en una losa son en las esquinas, por lo tanto, si el esfuerzo rebasa la resistencia del concreto se empezará a producir fallas de colapso. Así pues, existen métodos en los cuales a través de ecuaciones se pueden determinar la magnitud de los esfuerzos considerando diferentes zonas de la losa. A continuación, se hará mención de tres formas de hacerlo:

- Fórmulas de soluciones cerradas: Es utilizada solo para una carga concentrada por rueda, sea de dimensiones o configuración circular, semicircular, elíptica o semielíptica. El análisis de Westergaard supone a las losas del pavimento como placas delgadas apoyadas sobre una subrasante, elástica sólo en la dirección vertical, por lo cual la reacción es proporcional a la deformación.
- Cartas de influencias: Son gráficas desarrolladas por Pickett y Ray las cuales dan solución a las ecuaciones realizadas por Westergaard. En ellas se pueden emplear una configuración de varias ruedas y obtener los esfuerzos a la orilla o al centro de la losa en relación de expresiones que toman en cuenta los valores obtenidos de las gráficas, así como un factor de escala de las cartas de influencias, que corresponde al radio de rigidez relativa.

- Método de elementos finitos: Es usado cuando se tiene una serie de capas apoyadas en un sistema de resorte para la suposición de Winkler, representando el suelo como un sistema de resortes lineales, bajo la suposición de que las presiones de contacto son proporcionales a las deformaciones.



Fig. 2 Falla de colapso en la orilla de una losa de concreto
(Recuperado de :<https://es.slideshare.net/henryj20/diseo-pavimento-rigido>, s.f.)

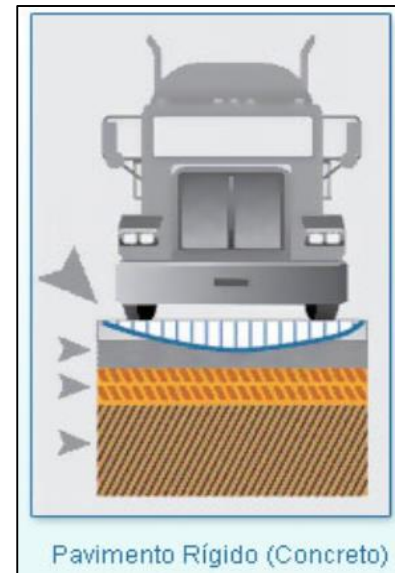


Fig. 3 Distribución de Esfuerzos en la losa de concreto. (Recuperado de <http://www.duravia.com.pe/category/conoce-el-pavimento/page/2/>, s.f.)

3.- Tránsito Vehicular

Este es el aspecto fundamental quizá más importante para el diseño de pavimentos. Se tiene que tener en cuenta el tipo y configuración de los vehículos, el volumen de tránsito, funcionamiento del vehículo, y distribución e intensidad de las cargas. Se puede hacer mención de tres formas sencillas de considerar la relación de los vehículos:

- Tránsito Fijo

La distribución vehicular se convierte a una carga de llanta sencilla equivalente, CLLSE, la cual determina el espesor del pavimento. Se utiliza este enfoque más en aeropuertos o en cuyo caso, en carreteras de tránsito muy pesado y de bajo volumen. La realización de esto se hace en función de la carga mayor que se puede prever.

- Vehículo Fijo

La determinación del espesor del pavimento va asociada por el número de repeticiones de carga de un vehículo estándar o de carga por eje de peso nominal, usualmente de 8.2 ton (18,000 lb o

18 kips). Así la distribución de vehículos ya sean ejes sencillos, en tándem o tridem se transforman al eje nominal de 8.2 ton mediante factores de carga por eje equivalente, FCEE. A estos ejes ya normalizados se denominan ESAL's denominados por sus siglas (Equivalent Single Axis Loads). Así pues, las repeticiones de carga de eje cualquiera se multiplican por los FCEE para obtener los ejes reales en términos de ejes normalizados, este valor de tránsito es el que se utilizará para el diseño del pavimento.

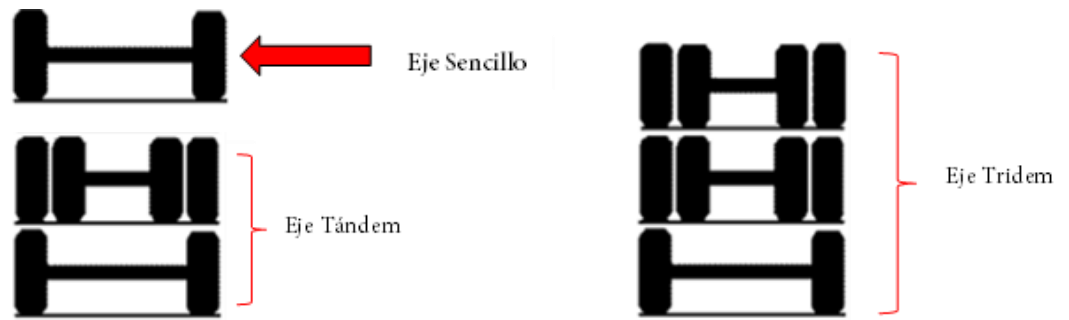


Fig. 4 Configuración de Ejes Vehiculares (Recuperado de: <https://slideplayer.es/slide/13283867.s.f.>).

- Vehículo y Trafico variable

En este tipo de enfoque se toman en cuenta los vehículos al igual que su tráfico por separado e individualmente sus características para evaluar los efectos que repercutirá a futuro el conjunto de todos ellos. Esto se logra formando grupos de iguales cargas, para determinar y obtener los efectos por separado de cada grupo de esfuerzo, deformación y deflexiones.

Como se hizo mención, los factores de equivalencia de carga por eje son empleados para normalizar un cierto número de ejes. Dependen del tipo de pavimento, espesor o capacidad estructural y el índice de servicio terminal o de rechazo que se considere. Se hablará con más detalle de esto en el capítulo 4.

La AASTHO define al eje estándar como aquel conformado por un arreglo de ruedas sencilla (dos llantas en cada extremo de un muelle), que transmite a la superficie del pavimento una carga de 8.2 t cuando la presión de inflado de sus neumáticos es de 5.8 kg/cm^2 (83 lb/pulg^2). Posteriormente, se introdujo la definición del Tránsito Equivalente como el número de aplicaciones acumuladas de un eje estándar, que produce el mismo daño que el tránsito real en una carretera para un periodo determinado.

3.1 Análisis de Tránsito

El diseño del pavimento será regido por el número de vehículos que transitarán a lo largo de la vida útil del mismo. El volumen de tránsito será obtenido de los registros con que cuente las instancias de gobierno (SCT).

Se obtiene el tránsito diario promedio anual en ambas direcciones. Los volúmenes se ven afectados por factores direccionales y de distribución para obtener el tránsito diario para el carril de diseño en el caso de la metodología AASHTO. En cambio, la PCA opta por tomar en cuenta frecuencias de cargas relativas en función de cada tipo de vehículo y sus respectivos ejes para asignarles un porcentaje conforme al peso que presentan, que consecutivamente será evaluado ante la composición vehicular que se tenga contemplado en la proyección de la carretera, para después obtener las incidencias de acuerdo a cada eje de todos los grupos de vehículos que se presente. Obteniendo posteriormente el coeficiente de acumulación de daño y contando con el tránsito diario promedio anual en el carril de diseño, se puede conocer el número de repeticiones totales por tipo y peso de eje vehicular que impactará sobre el pavimento.

La tasa de crecimiento ($r \%$) está en función de la proyección que se tenga en el horizonte de proyecto. La composición de los vehículos es indispensable, ya que de esto dependerá el grado de impacto que tendrá el pavimento. En el capítulo 4 se abordará el análisis de tránsito correspondiente para cada metodología de diseño.

4.- Metodologías de Diseño

A lo largo del tiempo, se han ido realizado diferentes tipos de pruebas para poder crear metodologías de diseño, las cuales pretendían brindar buenos resultados en función de experimentación constante. Este fue el caso de la AASTHO y la PCA, organismos que dispusieron de investigación y varios años de dedicación para poder obtener relaciones y correlaciones en el diseño de los pavimentos de concreto, creando tramos de pruebas en los cuales realizaban mediciones con y sin condiciones de tránsito, esto con el objetivo de visualizar el comportamiento que iba presentando el pavimento. En este apartado se hará mención de ambas metodologías, así como la determinación de los parámetros que considera cada método.

Así pues, los pavimentos de concreto presentan las siguientes variables las cuales son de gran importancia obtenerlas a detalle:

- Módulo de reacción (k_{sr})
- Módulo de reacción combinado (k_c)
- La resistencia a la tensión por flexión del concreto
- El tránsito vehicular obtenido mediante ejes equivalentes.
- Las condiciones del clima y el análisis de prever el uso de usar pasajuntas o barras de sujeción, y si en dado caso, contará o no con acotamientos de concreto.

4.1 Método AASTHO

La ecuación obtenida a partir de los resultados de las pruebas realizadas para el diseño estructural de un pavimento de concreto es la siguiente:

$$\log \Sigma_L = -t_{Qu} \times S_0 + 7.35 \times \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log(\Delta IS/3)}{1 + 1.624 \times 10^7 / (D + 1)^{8.46}} + (4.22 - 0.32 \text{ ISR}) \times \log \left[\frac{\sigma'_r \times C_d \times [D^{0.75} - 1.132]}{215.63 \times J \times \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/k)^{0.25}} \right]} \right]$$

Donde:

Σ_L = Tránsito equivalente, en repeticiones acumuladas de ejes estándar (8.2 t de peso en eje sencillo y presión de inflado de neumáticos de 5.8 kg/cm²).

t_{Qu} = Coeficiente de student para un nivel de confianza Q_u , conforme al tipo de carretera.

S_0 = Desviación estándar global combinado para las predicciones del tránsito y del desempeño del pavimento.

D = Espesor de diseño de la losa de concreto (pulg), constitutiva del pavimento.

ΔIS = Caída del Índice de Servicio (ISA), para un período de vida dado de un pavimento.

ISI = Índice de Servicio esperado en la carretera al inicio de su operación.

ISR = Índice de Servicio de Rechazo, al final de la vida útil de la carretera.

σ'_r = Módulo de resistencia a la tensión por flexión del concreto (psi) de diseño.

C_d = Coeficiente de drenaje, de acuerdo con las condiciones regionales, el tiempo de remoción del agua y el tiempo de saturación probable de las capas subyacentes al pavimento.

J = Coeficiente de Transferencia de carga, de acuerdo a los tipos de acotamiento y pasajuntas.

E_c = Módulo de elasticidad del concreto (psi).

k = Módulo de reacción efectivo (pci), en las capas de sustentación de las losas de concreto.

Para poder determinar el tránsito equivalente, se habló en el capítulo III de la utilización de Factores de Carga por Eje Equivalente, así pues, la AASHTO tiene expresiones con las cuales se puede determinar estos factores en función del peso de eje correspondiente de cualquier vehículo.

A continuación, se muestran:

EJES SENCILLOS

$$FEC_1 = 0.0002 W_1^{4.1397}$$

EJES EN TANDEM

$$FEC_2 = 0.00004 W_2^{3.9389}$$

EJES EN TRIDEM O TRIPLE

$$FEC_3 = 0.00003 W_3^{3.6952}$$

Es importante mencionar y hacer énfasis que se determinó para el ejercicio práctico todos los factores en función de los pesos establecidos por la norma oficial mexicana **NOM-012-SCT-2-2017** “Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal”. Con esto, se pretende obtener los pesos que competen para nuestro territorio nacional. La AASTHO propone valores recomendados a utilizar para las variables de su ecuación, a continuación, se presentarán una serie de tablas que hace énfasis a esto:

- Niveles de Confianza (Q_u)

Estarán en función del tipo de carretera y el grado de importancia que se tenga, así como el tipo de vialidad, maneja un rango de valores en los cuales dependerá del proyectista la elección del mismo. Puede definirse como la probabilidad estadística de que el pavimento cumpla la vida de diseño.

Carretera Tipo	Nivel de Confianza	
	Urbana	Rural
Autopistas y Carreteras Troncales de la Red Federal	85 – 99.9	80 – 99.9
Carreteras secundarias de la red Federal	80 - 99	75 - 95
Carreteras Estatales	80 - 95	75 - 95
Carreteras Alimentadoras Rurales	-----	50 - 80

Tabla 1 Niveles de Confianza para el tipo de carretera (AASHTO.(1993). *Guide for Design of Pavement Structures*).

- Coefficiente de Student (t) para diferentes Niveles de Confianza (Q_u) y Deviación Estándar (S).

Se hace mención del Coeficiente de Student así como la Desviación Estándar Global en función del (Q_u), y de acuerdo al tipo de pavimento que se presenta.

Nivel de Confianza (Q_u)	Coefficiente de Student (t)	Desv. Std. Global (S_0)
75 %	-0.674	Pavimentos Asfálticos
80 %	-0.841	0.40 -0.50
85 %	-1.037	
90 %	-1.282	Pavimentos de Concreto
95 %	-1.645	0.30 - 0.40
99 %	-2.327	

Tabla 2 Valores de (t), S_0 en función del Q_u . (AASHTO.(1993). *Guide for Design of Pavement Structures*).

- Calidad de Servicio o serviciabilidad

La calidad de servicio o serviciabilidad de un pavimento es la habilidad que presenta para proporcionar un servicio adecuado al tipo de tránsito (automóviles y camiones) que lo usan. El índice de Servicio Inicial (*ISI*), representa la condición del pavimento inmediatamente después de su construcción o rehabilitación. Debido a los nuevos procesos de construcción, así como de su correcta supervisión, en los pavimentos de alta calidad se han alcanzado valores de 4.7 a 4.8, regularmente se toma un valor de 4.5 cuando no se tenga mucha información.

El Índice de Servicio de Rechazo (*ISR*) corresponde al nivel de servicio en el cual el pavimento ya necesita algún tipo de rehabilitación para tener un nuevo ciclo de vida. Este valor se encuentra relacionado con la importancia de la carretera, en la tabla 3 se muestran valores típicos.

ISR	Clasificación
3.00	Autopistas
2.50	Carreteras principales, arterias urbanas
2.25	Carreteras secundarias importantes, calles comerciales e industriales
2.00	Carretera secundaria, calles residenciales y estacionamientos

Tabla 3 Valores típicos para el Índice de Servicio de Rechazo. (AASHTO.(1993). *Guide for Design of Pavement Structures*).

Habiendo mencionado los parámetros anteriores, la diferencia entre ambos índices dan como resultado la Caída del Índice de Servicio. Por lo tanto, se tiene que verificar que el ISI alcance el mayor valor posible con el objetivo de incrementar el ciclo de vida del pavimento.

- Coeficiente de Drenaje (C_d)

La presencia de agua es uno de los factores que contribuye primordialmente al deterioro de los pavimentos, ya sea por la saturación y reducción de la resistencia de los materiales que subyacen la losa de concreto, o por favorecer el fenómeno de bombeo con la inevitable erosión y expulsión de materiales finos a través de grietas y juntas. Para considerar las condiciones de saturación que se tendrá, se muestran valores en la Tabla 4 para cada caso particular que pretenden tomar los efectos de las condiciones buenas o malas del drenaje en el pavimento.

Calidad del Drenaje	Remoción del Agua	Tiempo de saturación del pavimento			
		<1%	1-5%	5-25%	>25%
Excelente	2 horas	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
Buena	1 día	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Regular	1 semana	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Pobre	1 mes	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy Pobre	>1 mes	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Tabla 4 Coeficientes de Drenaje recomendados. (AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*).

Para mejorar las condiciones de drenaje se recomienda el empleo de subdrenes y de capas de subbase permeable, para prevenir el bombeo prematuro. Cuando el $C_d = 1$, se menciona que las condiciones del drenaje no causan ningún impacto en el espesor de la losa. Cabe recalcar que es necesario conocer el clima del lugar de estudio para poder determinar el coeficiente de drenaje adecuado. Se hará uso del criterio de Köppen-Geiger para clasificar en función de la tipología de climas que existen el que reside en la zona.

A	1	Afa	Tropical	Ecuatorial, tipo amazónico caluroso regular
	2	Ama		Subecuatorial, tipo sudanés, caluroso regular
	3	Awa		Tropical tipo senegalés con variaciones térmicas
B	4	BSk	Seco	Estepario tipo senegalés o tipo sirio. Caluroso o templado medio con oscilaciones térmicas sensibles
	5	BWh		Desértico, tipo sahariano extremoso
C	6	Cfa	Subtropical	Subtropical mediterráneo con influencia de monzón, tipo chino, caluroso medio y oscilaciones
	7	Csb		Mediterráneo, tipo portugués templado medio. Veranos secos y calientes
	8	Cwh		Subtropical de altura, tipo mexicano, templado regular
H	9	H	De montaña	De montaña extremoso, tipo alpino

Tabla 5 Tipologías de climas en México. (Roberto, Sosa "Factores Regionales", UNAM, Ciudad de México a 12 de Septiembre de 2018).

Primera letra

A, C, D Suficiente calor y precipitación para el crecimiento de árboles grandes

A Climas tropicales. Todas las temperaturas medias mensuales mayores de 18 °C

B Climas secos. Fronteras determinadas mediante las gráficas T-Pp

C Climas templado-calurosos. Temperatura media del mes más frío entre -3 y 18 °C

H Clima montañoso. Extremoso, tipo alpino

Segunda letra

- S Clima estepario
- W Clima desértico
- f Suficiente precipitación todos los meses
- a Clima selvático, a pesar de una estación seca
- s Estiaje en el verano
- w Estiaje en el invierno

Tercera letra

- a Temperatura media del mes más caluroso, mayor de 22 °C
- b Temperatura media del mes más caluroso, menor de 22 °C (por lo menos cuatro meses tienen medias mayores de 10 °C)
- c Menos de cuatro meses tienen medias mayores de 10 °C
- h Seco y caliente. Temperatura media anual mayor de 18 °C
- k Seco y frío. Temperatura media anual menor de 18 °C

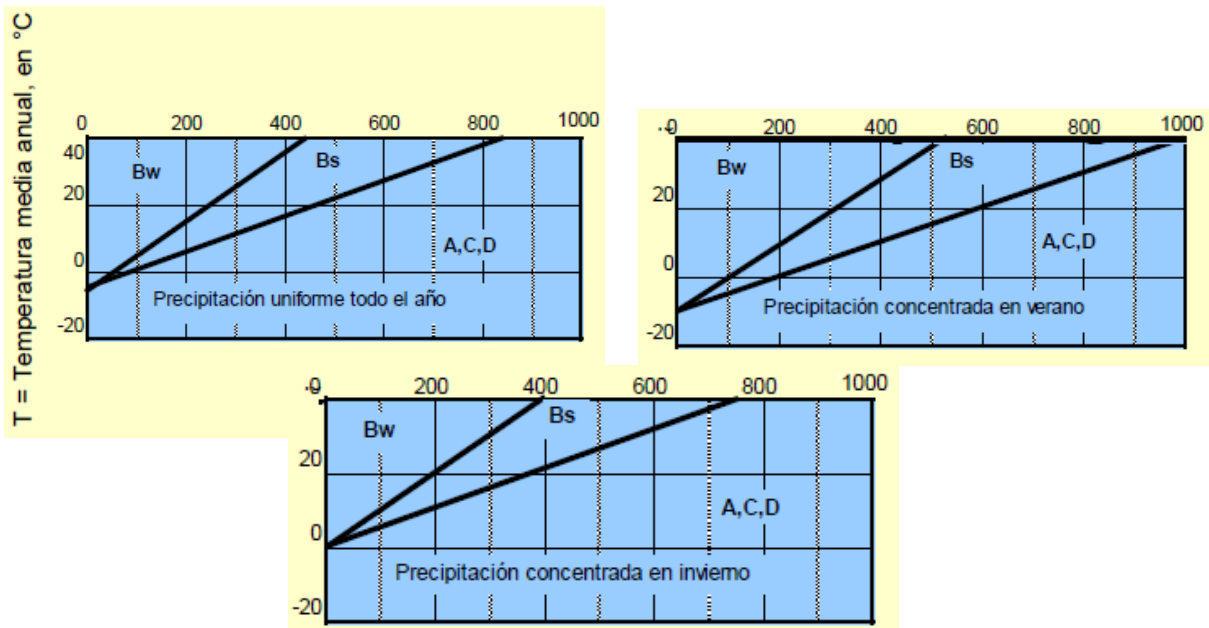


Fig. 5 Precipitación media anual en mm. (Roberto, Sosa "Factores Regionales", UNAM, Ciudad de México a 12 de Septiembre de 2018)

- Coeficiente de Transferencia de Carga (J)

Es un valor que representa la cantidad de transferencia que se espera a lo largo de una junta para un periodo de diseño establecido. Esto va en función del tipo de elemento a considerar, el cual permitirá la correcta distribución de cargas, ya sea la utilización de barras de sujeción,

pasajuntas lisas, acotamientos de concreto, etc. A continuación, se muestra una tabla con valores para distintas condiciones:

Tipo de Acotamiento		Asfáltico		Concreto con barras de sujeción	
Tipo de Pavimento	Pasajuntas	Si	No	Si	No
	Concreto Simple	3.2	3.8-4.4	2.5-3.1	3.6-4.2
	Concreto Reforzado	2.9-3.2	N/A	2.3-2.9	N/A

Tabla 6 Coeficientes de Transferencia de Cargas. (AASHTO.(1993). *Guide for Design of Pavement Structures*).

- Módulo de Elasticidad del Concreto (E_c)

Es una propiedad del concreto que se puede determinar siguiendo el método ASTM en la norma C 469 (Método de prueba estándar para el módulo de elasticidad estática y la relación de Poisson del concreto en compresión), o bien, a través de expresiones como las del ACI, que se muestran en seguida:

$$E_c = 57,000 (f'c)^{0.5} \qquad E_c = 6750 S'_c$$

Donde:

$f'c$ = Resistencia a la compresión a los 28 días de los especímenes cilíndricos, lb/ pulg².

S'_c = Módulo de ruptura a los 28 días, aplicando cargas a los tercios del claro, lb/pulg².

Regularmente los valores en los que se encuentra el Módulo Elástico es entre 14,000 y 42,000 Mpa.

4.2 Método de la PCA

La Portland Cement Association toma en cuenta el análisis de dos fenómenos que se presentan en las losas de concreto: fatiga y erosión. El primero se refiere al número permisible de repeticiones que se presentan generadas ante un grupo de cargas establecidas en función de la relación esfuerzo flexionante y resistencia a la flexión, esto se conoce como la relación de esfuerzos. Esto establece una curva de diseño entre repeticiones permisibles y relación de esfuerzo, la cual es introducida en nomogramas de dimensionamiento de pavimentos. Cabe mencionar que los esfuerzos se determinan en las orillas, indicando con esto que los pavimentos sin acotamientos presentan mayor magnitud de esfuerzo.

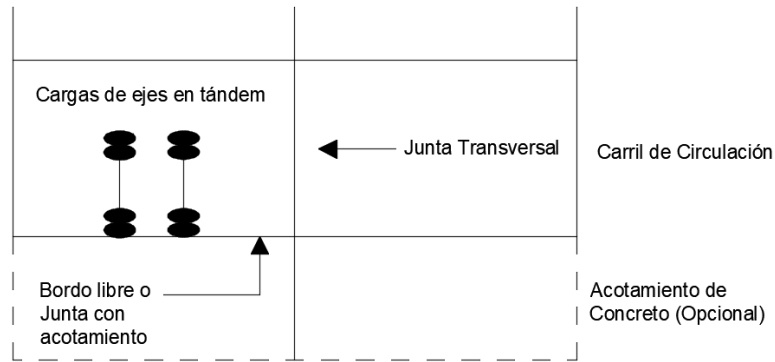


Fig. 6 Posición de las cargas para análisis por fatiga. (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras)

Para encontrar solución de la problemática que surge ante estas condiciones, la PCA realizó dos tablas para obtener los esfuerzos equivalentes, éstas surgieron a partir de multiplicar los esfuerzos a las orillas por un factor igual a 0.894. Obteniendo estos valores se dividen con la resistencia a la flexión para después hacer uso del nomograma y con esto, determinar las repeticiones admisibles. El nomograma da solución para pavimentos con y sin pasajuntas. Ante la situación de que el número de repeticiones admisibles se encuentre fuera de las gráficas se asume que tales repeticiones son ilimitadas.

En el caso de la erosión, ocurre cuando existe un reblandecimiento del material de la capa de apoyo o sub-base en suelos que presentan un alto contenido de finos debido al ingreso de agua a través de las grietas y juntas. El daño que se presenta es en virtud de las deflexiones que se originan por las magnitudes de las cargas que se generan en las esquinas y juntas de las losas. De igual manera, existen tablas que son de utilidad para determinar elementos que toman en cuenta este criterio, la obtención de factores de erosión dados los casos de juntas con o sin pasajuntas y con o sin acotamientos tendrán como función encontrar el número de repeticiones admisibles en su respectivo nomograma.

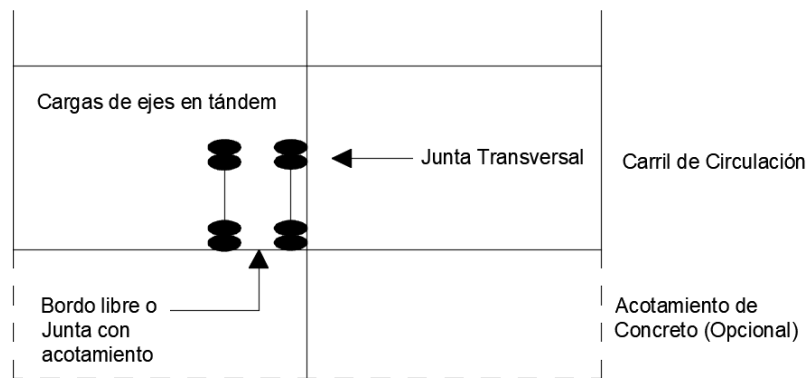


Fig. 7 Posición de las cargas para análisis por erosión. (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).

En seguida se muestran como ejemplo los nomogramas antes mencionados para la obtención de las repeticiones de carga permisibles.

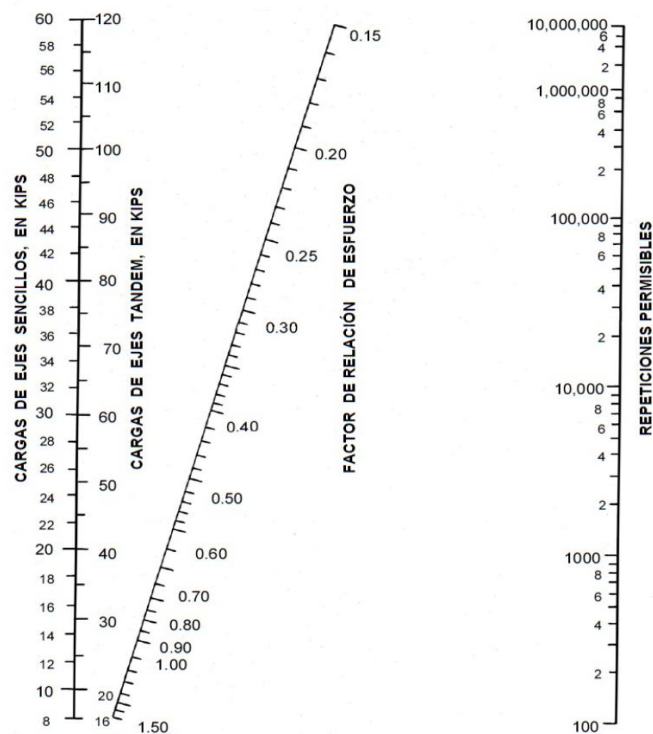


Fig. 8 Análisis por fatiga - Repeticiones permisibles con base en el factor de relación de esfuerzos con y sin acotamiento de concreto. (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).

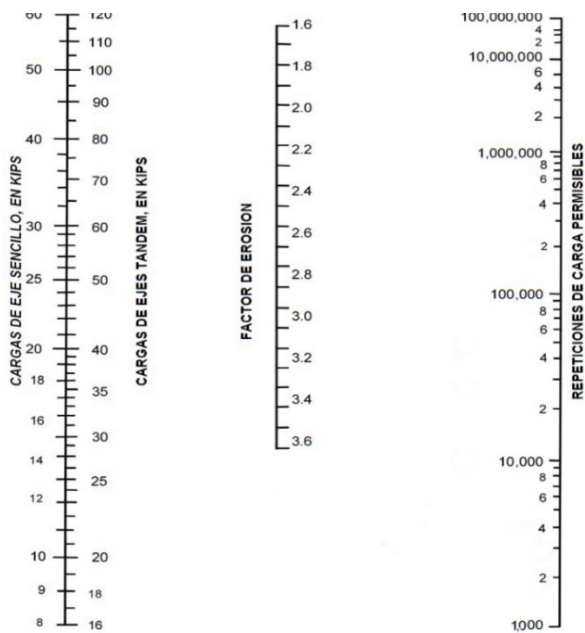


Fig. 9 Análisis de Erosión -Repeticiones permisibles de carga con base en el factor de erosión con acotamientos de concreto. (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).

5.- Ejemplo de Aplicación

5.1- Antecedentes

5.1.1.- Ubicación

Se realizará el diseño del pavimento de concreto para la modernización de la caseta principal ubicada en el entronque Tepoztlán, del tramo La Pera-Cuautla, de la autopista México-Cuernavaca. La localización del sitio al igual que el esquema donde se visualiza la implementación de más casetas de cobro se muestran en la Figura 10 y 11.

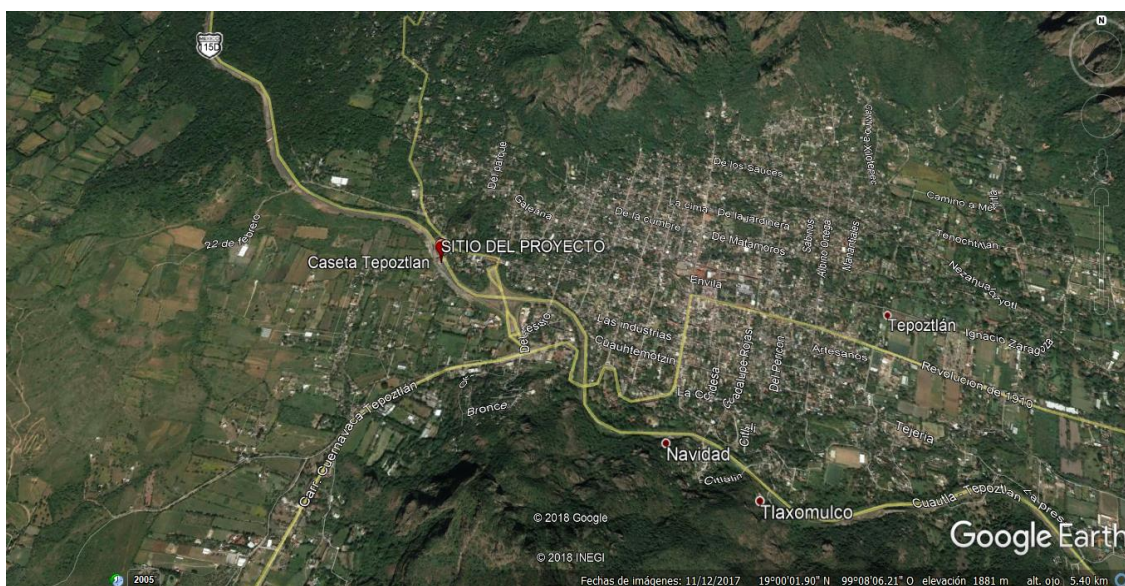


Fig. 10 Caseta La Pera - Cuautla

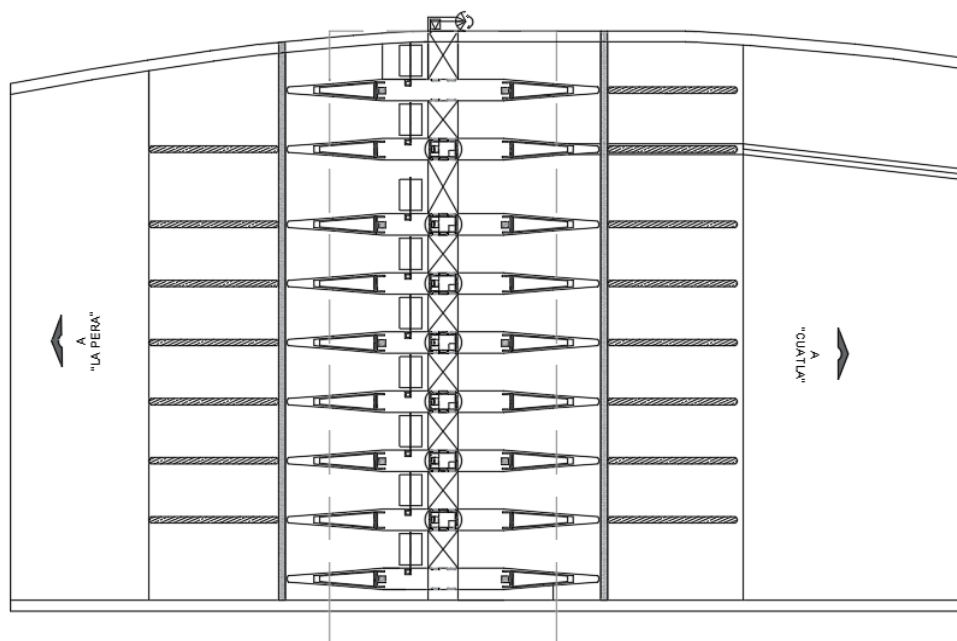


Fig. 11 Ampliación de la Caseta de Cobro La Pera - Cuautla

5.1.1.- Clasificación Climatológica

En función de las mediciones de la estación meteorológica ubicada en Cuautla, Morelos, se obtuvieron los siguientes datos:

Mes	Precipitación		Observaciones Termométricas			Días de Helada
	Pluvial (mm)	Días de Lluvia	Media Mens (C°)	Máx. Extrema (C°)	Mín. Extrema (C°)	
Enero	26	2	15.6	25	5.5	0
Febrero	-	-	-	-	-	0
Marzo	-	-	-	-	-	0
Abril	26.2	3	-	-	-	0
Mayo	79	6	21.4	30.5	12	0
Junio	165	12	19.9	29.5	13	0
Julio	149	19	18.5	25	11.5	0
Agosto	196	19	17	25	11	0
Septiembre	192	15	18.5	25.5	11.5	0
Octubre	118	10	17.5	25.5	10	0
Noviembre	20	1	17.7	26	9	0
Diciembre	0	2	16.7	25	8.5	0

p (mm)		t anual	t máx	t mín	
971.2	89	18	26	10	0

Tabla 7 Clasificación Climatológica

Teniendo en cuenta la clasificación de Köppen-Geiger la tipología de clima que existe en la zona del proyecto es: Subtropical de altura, tipo mexicano (Cwh), templado regular.

5.2- Estudios de Campo

Para conocer el tipo de suelo que se encuentra en el entronque, así como visualizar el espesor de las capas que conforman el pavimento existente, se realizaron 5 calas a profundidades de 1 a 1.15 m. De las cuales se realizaron los ensayos de laboratorio siguientes:

- Análisis Granulométrico
- Límites de Plasticidad
- Equivalente de Arena
- Clasificación SUCS
- Compactación AASTHO Estándar
- CBR

A continuación, se muestran dos perfiles estratigráficos de los sondeos realizados y posteriormente, una tabla resumen de los resultados de los ensayos en cada muestra respectiva de las calas.

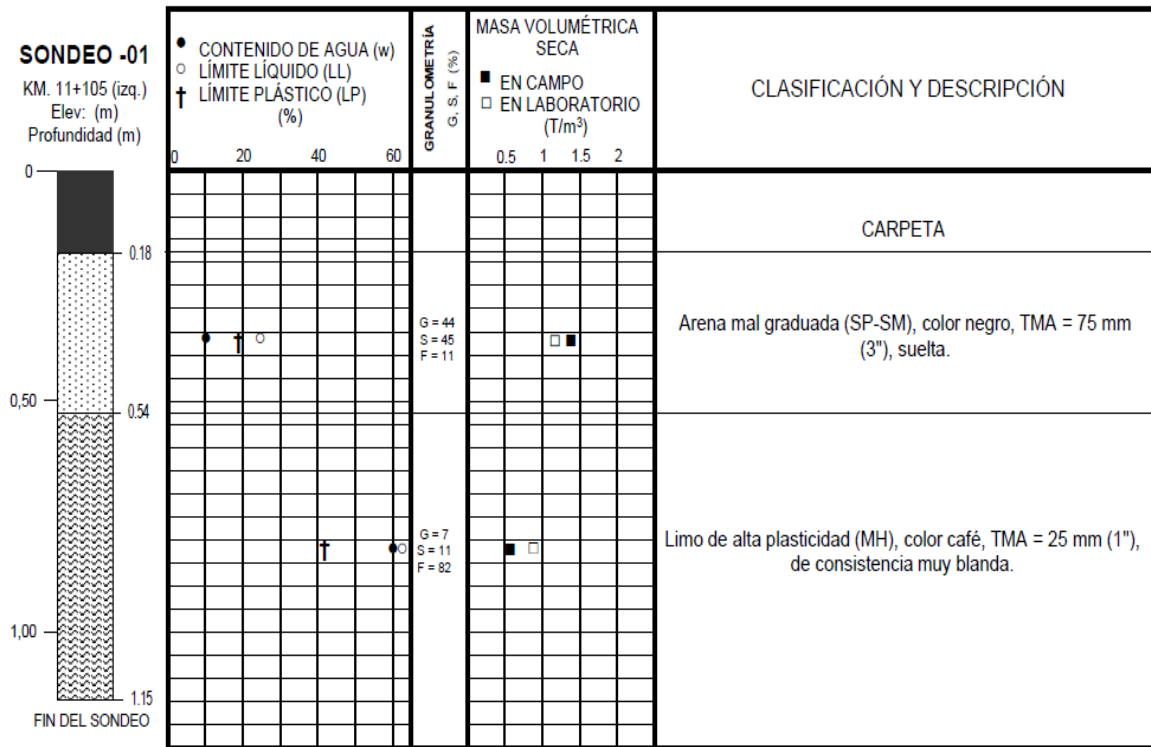


Fig. 12 Perfil Estratigráfico - Sondeo 1

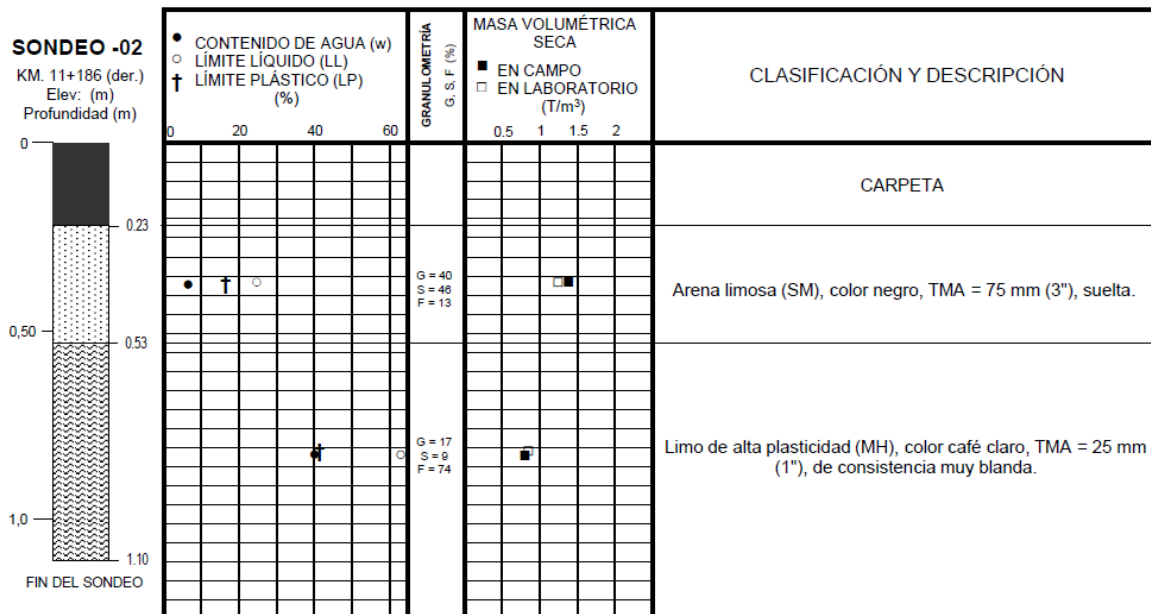


Fig. 13 Perfil Estratigráfico - Sondeo 2

IDENTIFICACIÓN											
NÚMERO CONSECUTIVO DE ENSAYE:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CALA :	1	1	2	2	3	3	4	4	8	8	8
LOCALIZACIÓN (Km):	11+105 (Izq)	11+105 (Izq)	11+186 (der)	11+186 (der)	10+220 (der)	10+220 (der)	40+160 (der)	40+160 (der)	8+040	8+040	8+040
MUESTRA No.	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	3
ENSAYE No.											
EMPLEO:	BASE	C. TERR.	BASE	C. TERR.	BASE	C. TERR.	BASE	C. TERR.	BASE	SUBBASE	TR
PROFUNDIDAD (m):	0.18 - 0.54	0.54 - 1.15	0.23 - 0.53	0.53 - 1.10	0.23 - 0.53	0.53 - 1.00	0.16-0.40	0.40-1.10	0.19-0.49	0.49-0.93	0.93-1.10
GRANULOMETRÍA POR MALLAS:											
TAMANO MÁXIMO (mm)	75.0	25.0	75.0	25.0	75.0	25.0	50.0	25.0	50.0	75.0	25.0
% QUE PASA LA MALLA DE 4.75 mm	56.0	93.0	60.0	83.0	51.0	71.0	60.0	81.0	66	60	82
% QUE PASA LA MALLA DE 0.425 mm	32.0	90.0	31.0	81.0	28.0	65.0	37.0	77.0	38	43	72
% QUE PASA LA MALLA DE 0.075 mm	11.0	82.0	13.0	74.0	10.0	54.0	14.0	70.0	20	35	53
LÍMITES DE PLASTICIDAD:											
LÍMITE LÍQUIDO (%)	25	64	24	65	28	55	25	56	28	31	35
ÍNDICE PLÁSTICO (%)	7	22	7	24	9	23	NP	23.0	15	5	11
EQUIVALENTE DE ARENA (%)	42		33		36		47		26.7	15.3	
CLASIFICACIÓN S.U.C.S.											
SP-SM	MH	SM	MH	SM	MH	MH	SM	MH	SC	GM	ML
MASA VOLUMÉTRICA SECA Y SUELTA (kg/m³)	1181	910	1,269	792	1,241	1,075	1,271	942	1,322	1,318	1,970
MASA VOLUMÉTRICA SECA DE LUGAR (kg/m³)	1,451	524	1,484	788	1,502	591	1,496	728	1,284	1,446	1,130
HUMEDAD DE LUGAR (%)	10.4	61.7	7.2	40	6.5	55.8	8.6	49.0	4.3	13.6	23.0
COMPACTACIÓN AASHTO ESTÁNDAR											
MASA VOLUMÉTRICA MÁXIMA (kg/m³)	1758	1530	1744	1522	1750	1545	1759	1541	1692	1686	1566
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	13.2	22.5	12.8	24.8	12.9	20.5	11.9	23.6	15.2	20.4	24.2
GRADO DE COMPACTACIÓN (%)											
RESISTENCIA:											
PRUEBAS DE VALOR RELATIVO DE SOPORTE											
C.B.R. 3 PTOS. SATURADO (%)	65.0	7.0	62.0	8.9	70.0	8.9	64.5	9.7	60.0	7.5	11.7
EXPANSIÓN (%)	0.89	0.76	1.75	1.30	0.11	1.01	0.00	1.24	0.00	0.01	0.00
90%	HUMEDAD DE PRUEBA (%)		13.2	46.3	12.1	24.8	12.9	20.5	11.9	23.6	15.3
	C.B.R. (%)		52.0	2.5	51.9	4.4	62.0	4.5	53.0	4.2	44.0
95%	HUMEDAD DE PRUEBA (%)		13.2	46.3	12.1	24.8	12.9	20.5	11.9	23.6	15.3
	C.B.R. (%)		54.0	3.0	53.6	4.9	64.0	5.3	55.5	4.9	46.0
100%	HUMEDAD DE PRUEBA (%)		13.2	46.3	12.1	24.8	12.9	20.5	11.9	23.6	15.3
	C.B.R. (%)		65.0	7.0	62.0	8.9	70.0	8.9	64.5	9.7	60.0

Tabla 8 Resumen de ensayos de las calas realizadas

5.2.1 Estudio de Banco de Materiales

Con el fin de poder encontrar los materiales más adecuados para el proyecto se realizó un estudio de los bancos de material existente en la zona. A continuación, se menciona la ubicación de cada uno de los mismos en la Figura 14.

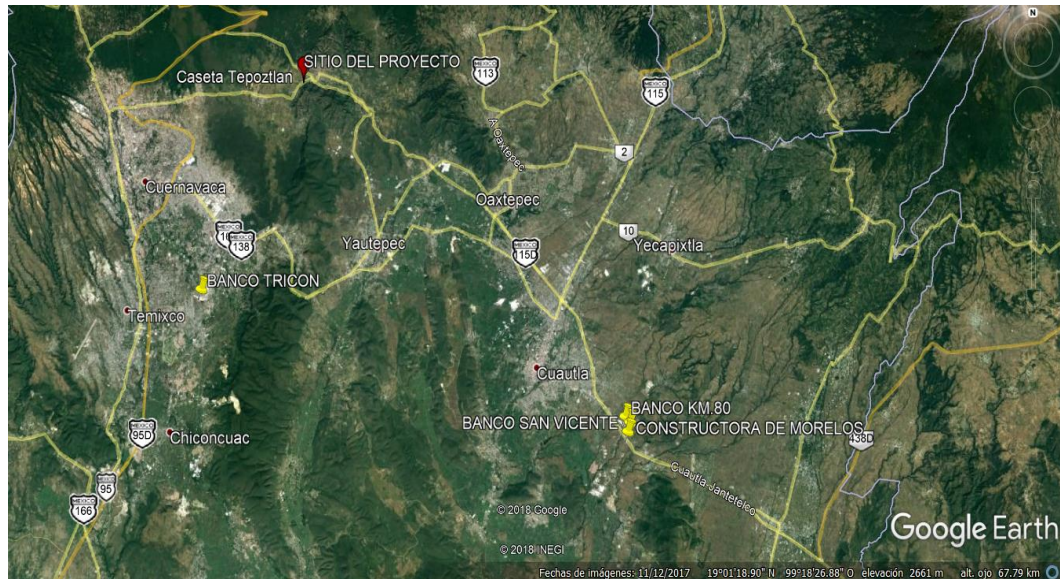


Fig. 14 Bancos de Materiales

Se visitaron cada uno de los bancos y se realizaron las cédulas de campo de los levantamientos correspondientes, así como las cédulas caracterizando el tipo de material que se encuentra en cada uno de ellos mencionando la utilización que se tendrá, ya sea para el empleo en la carpeta asfáltica, subbase o base, y las observaciones que se tuvieron al momento de realizar las pruebas de clasificación. Cabe mencionar que se acudió a la planta de concreto ubicado en Ahuatepec para proporcionar el concreto premezclado necesario para la losa de concreto.

En las tablas 9 y 10 se muestra a manera de ejemplo dos cedulas correspondientes a un banco de material. Es importante señalar que la elección del banco se hizo en función de la calidad del material existente ya que este podría tener varios usos, además de que por normativa era el que mejor características presentaba.

El banco que se usará es el que tiene denominación km 80+000, se le dará un tratamiento previo los cuales puede ser:

I. Materiales Cribados

Son las arenas, gravas y limos, así como las rocas alteradas y fragmentadas, que al extraerlos quedan sueltos o pueden disgregarse mediante el uso de maquinaria y que para hacerlos utilizables, requieren de un tratamiento mecánico de cribado, con el equipo adecuado, para eliminar las partículas mayores que el tamaño máximo establecido en la Norma N-CMT-4-02-002-16 y satisfacer la composición granulométrica.

II. Materiales Parcialmente Triturados

Son los poco o nada cohesivos, como mezclas de gravas, arenas y limos, que al extraerlos quedan sueltos o pueden ser disgregados y que para hacerlos utilizables, requieren un tratamiento mecánico de trituración parcial y cribado, con el equipo adecuado, para aprovechar las partículas mayores que el tamaño máximo establecido en la Norma N-CMT-4-02-002-16 y satisfacer la composición granulométrica.

III. Materiales Totalmente Triturados

Son los materiales extraídos de un banco o pepenados, que requieren un tratamiento mecánico de trituración total y cribado, con el equipo adecuado, para satisfacer la composición granulométrica.

IV. Materiales Mezclados

Son los que se obtienen mediante la mezcla de dos o más de los materiales a que se refieren los puntos I a III., en las proporciones necesarias para satisfacer los requisitos de calidad establecidos en la Norma N-CMT-4-02-002-16.

Los bancos que se recomienda se muestran en la siguiente tabla, en ella se hace énfasis al banco más idóneo de acuerdo a lo antes mencionado, subsecuentemente los bancos que también podría representar una alternativa viable.

No. Banco	Denominación	Localización	Régimen de Propiedad	Clasificación Geológica	Coeficiente de Variación Volumétrica			Atacabilidad			Despalme (m)	Utilización	Tratamiento
					90%	95%	100%	A	B	C			
1	Km.80	Adelante del Km. 9+780 del eje de trazo de la carretera "La Pera - Cuautla", a 37 km, desviación a la izquierda	Particular	Conglomerado poco cementado de tamaño máximo de 3" se obtendrán Fc,G y S	1.16	1.1	1.05	20	80	0	0.4	Carpeta Asfáltica, Base Hidráulica y Subbase	Trituración Parcial, Cribado y Compactación
2	San Vicente	Adelante del Km 9+780 del eje de trazo de la carretera "La Pera - Cuautla", a 36 km, desviación a la derecha	Particular	Conglomerado poco cementado de tamaño máximo de 3" se obtendrán Fc,G y S	1.16	1.1	1.05	20	80	0	0.3	Base Hidráulica y Subbase	Cribado y Compactación
3	Tricon	Adelante del Km. 9+780 del eje de trazo de la carretera "La Pera - Cuautla", a 38.8 km, desviación a la derecha	Particular	Caliza medianamente fracturada que al extraerse se obtendrán Fcm, G y S	1.16	1.1	1.05	20	80	0	1	Carpeta Asfáltica, Base Hidráulica	Trituración Total, Cribado y Compactación

Tabla 11 Banco de Materiales para Pavimentos

5.2.2 Tipo de Materiales a Utilizar y Especificaciones Técnicas de Calidad

Es importante mencionar que tipo de material se utilizará para la estructuración de las capas del pavimento, a continuación, se hará mención de cuales fueron seleccionados para su futuro uso y posteriormente, en función del diseño, seleccionar el más idóneo. También se hará énfasis de las especificaciones que se tienen que cumplir para llegar a la calidad adecuada y poder tener un correcto funcionamiento.

- **Subrasante**

El material que lo conforma es una grava bien graduada con limo (GW-GM). Los materiales que se utilicen para la formación de dicha capa, en función de sus características y de la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de ocho comas dos (8,2) toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento cumplirán con lo que se indica a continuación:

- D.1. Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea igual a (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 la Norma N•CMT•1•03/02, y tendrá un espesor mínimo de veinte (20) centímetros.
- D.2. Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea igual a (1) millón a diez (10) millones de ejes equivalentes, el material cumplirá con las características granulométricas y con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 1 de la Norma N•CMT•1•03/02, y tendrá un espesor mínimo de veinte (30) centímetros.
- D.3. Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea igual 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 la Norma N•CMT•1•03/02, 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.

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.

Fig. 15 Requisitos de Calidad de Materiales para Capa Subrasante (SCT. *Características de los Materiales. N·CMT·1·03/02*)

- **Base Hidráulica**

Se puede utilizar una grava bien graduada (GW) la cual contiene los siguientes porcentajes: G (91.24%), S (7.51%) y F (1.25%). Como recomendación es necesario cribar el material, así mismo, se hará mención de la especificación correspondiente:

- El material para la base hidráulica será cien (100) por ciento producto de la trituración de roca sana, cuando el tránsito esperado durante la vida útil del pavimento (ΣL) sea mayor de diez (10) millones de ejes equivalentes acumulados de ocho coma dos (8,2) toneladas; cuando ese tránsito sea de uno (1) a diez (10) millones, el material contendrá como mínimo setenta y cinco (75) por ciento de partículas producto de la trituración de roca sana y si dicho tránsito es menor de (1) millón, el material contendrá como mínimo cincuenta (50) por ciento de esas partículas.
- Cuando inmediatamente después de la construcción de la base se coloque una carpeta de concreto hidráulico, el material para la base tendrá las características granulométricas que se establecen en la Tabla 1 y se muestran en la Figura 1, con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 2 que se indica en la Norma N·CMT·4·02·002/16.

Malla		Porcentaje que pasa
Abertura mm	Designación	
37,5	1 1/2"	100
25	1"	70-100
19	3/4"	60-100
9,5	3/8"	40-100
4,75	Nº4	30-80
2	Nº10	21-60
0,85	Nº20	13-44
0,425	Nº40	8-31
0,25	Nº60	5-23
0,15	Nº100	3-17
0,075	Nº200	0-10

Tabla 12 Requisitos de granulometría de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico (SCT. Características de los Materiales. N · CMT · 4 · 02 · 002/16. Tabla 1)

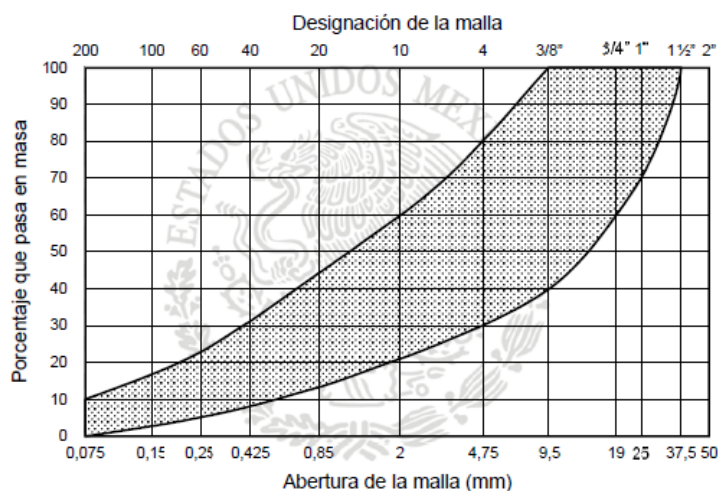


Fig. 16 Zona granulométrica recomendable de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico (SCT. Características de los Materiales. N · CMT · 4 · 02 · 002/16. Figura 1)

Característica	Valor %
Límite líquido ^[1] , máximo	25
Índice plástico ^[1] , máximo	6
Equivalente de arena, mínimo ^[1]	40
Valor Soporte de California (CBR), mínimo ^[1, 2]	80
Desgaste Los Ángeles, máximo ^[1]	35
Partículas alargadas y lajeadas, máximo	40
Grado de compactación ^[1, 3] , mínimo	100

[1] Determinado mediante el procedimientos de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.

[2] Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.

[3] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

Fig. 17 Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico. (SCT. Características de los Materiales. N · CMT · 4 · 02 · 002/16. Tabla 2).

- **Base Tratada**

Las características del material son las mismas que presenta la Base Hidráulica con la excepción de que se le incorpora cemento Portland con un $f'c = 50 \text{ kg/cm}^2$. En seguida se menciona la clasificación de los materiales según el producto que se utilice en el tratamiento, se hace solo mención los cuales utilizan cemento Portland.

- I. 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. (SCT.N•CMT•4•02•003/16)
- II. Materiales estabilizados con cemento. Cuando se les incorpora de ocho (8) a diez (10) por ciento de masa, de cemento Portland, para obtener una resistencia a la compresión simple a los veintiocho (28) días de edad, no menor de dos coma cinco (2,5) megapascals (25 kg/cm²) e incrementar su rigidez, reduciendo así el efecto de la fatiga sobre la carpeta o mejorando el apoyo de las losas de concreto hidráulico. (SCT.N•CMT•4•02•003/16)

Los materiales modificados o estabilizados con cemento, cumplirán con los requisitos de calidad que se indican a continuación de acuerdo a la Norma de la SCT, N•CMT•4•02•003/16 :

- I. La cal o el cemento Portland 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 Portland.
- II. Salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa, cuando se utilice cemento Portland en la modificación o estabilización, éste será ordinario (TIPO CPO).
- III. El material por modificar con cal o con cemento Portland, o por estabilizar con cemento Portland, 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.
- IV. El material una vez modificado con cal o cemento Portland, cumplirá con el límite líquido, el índice plástico, el equivalente de arena, el Valor Soporte de California (CBR) y el Desgaste Los Ángeles, que correspondan entre los indicados en la Norma N•CMT•4•02•002, Materiales para Bases Hidráulicas.

- V. 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 AASTHO Modificada, conforme a lo indicado en el Manual M·MMP·4·01·010, Compactación AASTHO 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) megapascuales (25 kg/cm^2).
- VI. 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 AASTHO Modificada, conforme a lo indicado en el Manual M·MMP·4·01·010, Compactación AASTHO.

5.3- Análisis de Tránsito

5.3.1.- Método AASTHO

Se determinó el tránsito equivalente para la caseta de cobro Tepoztlán con la información obtenida de los datos viales que proporciona la Secretaría de Comunicaciones y Transporte para el estado de Morelos. El factor direccional (D) que se utilizó fue de 0.5, con un horizonte de proyecto de 30 años, teniendo en cuenta que el año inicial de operaciones será en el 2020. El Tránsito Diario Promedio Anual inicial en un sentido [TDPA_i (1)] se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$TDPA_i (1) = TDPA (2) \times D \times (1 - r)^n$$

Donde:

TDPA (2) = Tránsito Diario Promedio Anual en dos sentidos

D = Factor Direccional

r = Tasa de crecimiento

n = Año asignado a partir de la diferencia del año en que se estable el TDPA (2) y el año inicial de operaciones

Por lo que la expresión para el TDPA i (1) quedaría de la siguiente manera:

Sustituyendo:

$$TDPA_i (1) = TDPA (2) \times D \times (1 - r)^n$$

$$TDPA_i (1) = 9864 \times 0.5 \times (1 - 0.064)^7$$

$$TDPA_i (1) = 7614$$

Se consideró para este trabajo el uso solamente de cargas legales ya que el diseño del pavimento se tiene que estructurar de tal forma que resista las cargas que en verdad son significativas a lo más real posible. Los valores de porcentajes para cada tipo de vehículo que se presentarán en el carril de diseño (%DSL_N) fueron obtenidos de tablas del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Un aspecto importante a considerar es que se contará con 9 carriles para las casetas en donde el tránsito de los vehículos tendrá una distribución variable. La AASTHO recomienda el uso de factores para el carril de diseño (D_L) dependiendo del número de carriles que se tengan, a continuación se muestra una tabla donde se hace referencia a dichos factores:

Number of Lanes in Each Direction	Percent of 18-kip ESAL in Design Lane
1	100
2	80–100
3	60–80
4	50–75

Tabla 13 Valores del Factor de carril de diseño. (AASHTO.(1993). *Guide for Design of Pavement Structures*)

Se utilizó el factor de carril del 75% para el tránsito pesado y se mantendrá los porcentajes del IMT ya que los vehículos con bajo impacto en el pavimento no repercuten en absoluto. Fueron utilizadas las ecuaciones AASHTO para obtener los Factores de Carga por Eje Equivalente mencionadas en el capítulo 4.1. El coeficiente de acumulación de tránsito (CAT) toma en cuenta los días totales del año, la tasa de crecimiento (r) y la diferencia del año proyectado con el que se consideró para el TDPA (2), la ecuación se muestra a continuación:

$$CAT = \frac{365 \times [(1 + r)^n - 1]}{r}$$

El $TDAP_n$ será el tránsito diario promedio anual proyectado. Así pues, las cargas legales se obtendrán mediante la siguiente relación:

$$L_{cc} = FECL_p \times TDAP_n \times CAT$$

Donde:

$FECL_p$ = Factor de Equivalencia de Carga Legal Proporcional

$$FECL_p = \%DSL_N \times Compos \times FECI$$

En las siguientes tablas se muestra el análisis de tránsito equivalente con las consideraciones antes expuestas:

Datos							
TDPA (2) en el año 2013: 9864				Año Inicial de Operaciones : 2020			
D: 0.5							
TDPAi (1)	HORIZONTE	r	LANES	COMPOSICION %			
(vehiculos)	(años)	(%)	/SENT	Ap+Ac	B2+B3	C2+C3	T-S
7614	30	6.4	9	88.4%	4.2%	3.3%	4.10%

EJES EQUIVALENTES PROPORCIONALES					
VEHICULO	%DSLN	COMPOS	FECv	FECI	FECLp
Ap	0%	87.1%	0.0002	0.0004	0.000
Ac	50%	1.3%	0.0010	0.0521	0.0003
B2	60%	2.5%	0.6660	7.4125	0.1121
B3	60%	1.7%	0.2064	6.9225	0.0698
C2	80%	1.7%	0.1633	7.4125	0.1008
C3	75%	1.6%	0.0771	6.9225	0.0831
T2-S1	75%	0.0%	0.0921	11.5059	0.0000
T2-S2	75%	0.0%	0.1073	11.7670	0.0000
T3-S2	75%	2.2%	0.0810	11.2770	0.1861
T3-S3	75%	0.5%	0.0830	12.3713	0.0464
C3-R2	75%	0.2%	0.1487	0.1244	0.0002
T3-S2-R4	75%	1.2%	0.0998	12.4124	0.1117
	Suma	100%			0.710

TRÁNSITO EN MILES DE EJES ACUMULADOS				
AÑO		TDAPn	CAT	Lcl
0	2019	7,614	-	-
1	2020	8,101	365	2,101
2	2021	8,620	753	4,336
3	2022	9,171	1,167	6,714
4	2023	9,758	1,606	9,245
5	2024	10,383	2,074	11,937
6	2025	11,048	2,572	14,802
7	2026	11,755	3,101	17,850
8	2027	12,507	3,665	21,093
9	2028	13,307	4,264	24,544
10	2029	14,159	4,902	28,215
11	2030	15,065	5,581	32,122
12	2031	16,029	6,303	36,278
13	2032	17,055	7,072	40,701
14	2033	18,147	7,889	45,406
15	2034	19,308	8,759	50,413
16	2035	20,544	9,685	55,740
17	2036	21,859	10,670	61,408
18	2037	23,258	11,717	67,439
19	2038	24,746	12,832	73,856
20	2039	26,330	14,019	80,684
21	2040	28,015	15,281	87,948
22	2041	29,808	16,624	95,678
23	2042	31,716	18,053	103,902
24	2043	33,745	19,573	112,652
25	2044	35,905	21,191	121,963
26	2045	38,203	22,912	131,869
27	2046	40,648	24,743	142,409
28	2047	43,249	26,692	153,624
29	2048	46,017	28,765	165,557
30	2049	48,962	30,971	178,253

Tabla 14 Análisis de Tránsito por el Método AASTHO

El tránsito acumulado en ejes equivalentes resultante para 30 años es de 1.78×10^8 .

5.3.2.- Método de la PCA

En función a la composición vehicular dada, se obtendrá por cada tipo de vehículo el porcentaje de incidencia eje por eje que es transmitido a la superficie de rodamiento del pavimento de concreto. Se utilizará las siguientes tablas las cuales contienen valores de frecuencias de cargas las cuales nos ayudaran a calcular las incidencias.

Vehículo tipo	No.Eje	W Vacío (t)	W Legal (t)	W Máx (t)	Pesos de ejes sencillos (t) – Eje Sencillo								
					<10	10 a 11	11 a 12	12 a 13	13 a 14	14 a 15	15 a 16	16 a 17	17 a 18
B2	2	7	11	12	16.0%	24.0%	33.0%	27.0%					
C2	2	4.5	12.5	17.5	8.0%	13.0%	20.0%	24.0%	16.0%	9.0%	5.0%	3.0%	2.0%
T2	2	3.5	12.5	13	18.0%	13.0%	20.0%	25.0%	17.0%	7.0%			
S1 Y R3	3	3.4	11	13	24.7%	17.0%	23.3%	18.0%	13.0%	4.0%			
R2	3 y 4	3.4	11	13	24.7%	17.0%	23.3%	18.0%	13.0%	4.0%			

Vehículo tipo	No. Eje	W Vacío (t)	W Legal (t)	W Máx (t)	Pesos de ejes Tándem (t) –Eje Tándem								
					14 Ó <	14 a 16	16 a 18	18 a 20	20 a 22	22 a 24	24 a 26	26 a 28	28 a 30
B3	2	8	18	21	6.0%	15.0%	25.0%	30.0%	24.0%				
C3	2	4.5	21	29.5	1.0%	7.0%	13.0%	20.0%	23.0%	18.0%	10.0%	5.0%	3.0%
T3	2	4	21	27	2.0%	9.0%	16.0%	20.0%	23.0%	16.0%	9.0%	5.0%	
S2, R3 Y R4	3	4	19	26.5	2.0%	9.0%	16.0%	20.0%	23.0%	16.0%	9.0%	5.0%	

Vehículo tipo	No. Eje	W Vacío (t)	W Legal (t)	W Máx (t)	Pesos de Ejes Sencillos (t) – Eje Trídem								
					20 ó <	20 a 22	22 a 24	24 a 26	26 a 28	28 a 30	30 a 32	32 a 34	34 a 36
S3	3	5	26.5	36	2.0%	8.0%	13.0%	20.0%	22.0%	16.0%	11.0%	6.0%	2.0%

Tabla 15 Porcentaje de Frecuencia de cargas. (Roberto, Sosa “Análisis del Tránsito Carretero”, UNAM, Ciudad de México a 27 de Agosto de 2018).

La incidencia ya sea para un eje sencillo, tándem o trídem se determinará de la siguiente manera:

$$\% \text{ Incid} = \% \text{ Composición} \times \% \text{ Frecuencia}$$

Así mismo, el cálculo de la incidencia estará en función también de la carga máxima del tipo de vehículo para determinar el porcentaje correspondiente de las frecuencias de cargas. Al determinar todas las incidencias para cada tipo de vehículo, se realiza la sumatoria correspondiente de todos los porcentajes obtenidos en función del tipo de eje. Esto con la finalidad de calcular las repeticiones esperadas, la siguiente expresión menciona el procedimiento necesario para conocer dicha incógnita:

$$RE = TDPA (1) \times \Sigma \% \text{ Incid} \times CAT$$

Donde:

TDPA (1) = Tránsito Diario Promedio Anual para el carril de diseño

Σ % Incid = Sumatoria del porcentaje de incidencias

CAT = Coeficiente de Acumulación de Tránsito

Se determina las repeticiones esperadas para tipo de eje y posteriormente se realiza la sumatoria para conocer el resultado final. Es importante mencionar que en este análisis no puede existir un peso mayor que el peso máximo registrado, al igual que no puede haber un peso menor que el peso vacío. El TDPA (1) en un sentido, fue determinado mediante la información recopilada de los datos viales al igual que manteniendo los porcentajes para el carril de diseño exceptuando los vehículos compactos ya que no causan ningún impacto a la estructura del pavimento. Las siguientes expresiones dan solución a la manera en la cual se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 14:

$$COMP/DSGL = \%DSL N \times COMP$$

$$TDPA (1) = (COMP/DSGL) \times TDPAi (1)$$

Datos							
TDPA (2) en el año 2013: 9864				Año Inicial de Operaciones : 2020			
D: 0.5							
TDPAi (1)	HORIZONTE	r	LANES	COMPOSICION %			
(vehiculos)	(años)	(%)	/SENT	Ap+Ac	B2+B3	C2+C3	T-S
7614	30	6.4	9	88.4%	4.2%	3.3%	4.10%

COMPOSICIÓN EN EL CARRIL DE DISEÑO				TDPA INICIAL EN EL CARRIL DE DISEÑO	
VEHÍCULO	%DSL N	COMPOS	COMP/DSGL	TDPA (1)	RELATIVO
B2	60%	2.5%	1.5%	115	19
B3	60%	1.7%	1.0%	77	12
C2	80%	1.7%	1.4%	104	17
C3	75%	1.6%	1.2%	91	15
T2-S1	75%	0.0%	0.0%	0	0
T2-S2	75%	0.0%	0.0%	0	0
T3-S2	75%	2.2%	1.7%	126	20
T3-S3	75%	0.5%	0.4%	29	5
C3-R2	75%	0.2%	0.2%	11	2
T3-S2-R4	75%	1.2%	0.9%	69	11
	Suma	11.6%	8%	621	100

Tabla 16 Obtención del Tránsito en el Carril de Diseño

Vehículo tipo	Composición	Ejes		Incidencia de Ejes Sencillo (%)										Incidencia de Ejes Tandem (%)						Incidencia de Ejes Tridem (%)						Repeticiones esperadas
		No.	Tipo	W Legal	9%	10%	11%	12%	13%	14%	15%	14%	16%	18%	20%	22%	24%	20%	22%	24%	26%	28%	30%			
B2	2.52%	2	1	11	0.4%	0.6%	0.8%	0.7%																		
B3	1.68%	2	2	19.5																						
C2	1.70%	2	1	11	0.1%	0.2%	0.3%	0.4%	0.3%	0.2%	0.1%															
C3	1.60%	2	2	19.5																						
T2-S1	0.00%	2	1	11	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%																		
		3	1	10	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%																		
T2-S2	0.00%	2	1	11	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%																		
		3	2	18																						
T3-S2	2.20%	2	2	19.5																						
		3	2	18																						
T3-S3	0.50%	2	2	19.5																						
		3	3	22.5																						
C3-R2	0.20%	2	2	19.5																						
		3	1	10	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%																	
		4	1	10	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%																	
		2	2	19.5																						
T3-S2-R4	1.20%	3	2	18																						
		4	2	8.8																						
		5	2	18																						
Suma de Incidencias:				0.64%	0.9%	1.3%	1.2%	0.3%	0.2%	0.1%	1.3%	2.2%	2.8%	3.0%	1.9%	1.1%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%			
TDPA= r= Vida útil= CAT=	621 6.40% 30 años 30,971	3,309,072		10,577	15,385	21,154	19,231	12,500	7,692	202,500	360,769	586,191	539,230	424,230	240,577	16,346	29,423	62,308	223,154	243,230	171,884	122,692				

Tabla 17 Determinación del número de repeticiones por tipo y peso de ejes de vehículos

5.4- Diseño del Pavimento

5.4.1.- Método AASTHO

Conociendo el tránsito equivalente, se procederá a obtener los demás valores que son necesarios para el diseño. Primero obtendremos el módulo de reacción de la capa subrasante (k_{sc}), proponiendo un espesor de 30 cm y presentando un CBR de 20%, el cual cumple con el valor mínimo de acuerdo a la Norma de la SCT N-CMT-1-03/02. Respectivamente, se calcula el módulo mediante correlaciones estimadas de resistencia de acuerdo a diferentes tipos de suelo, en la siguiente figura se visualiza el resultado.

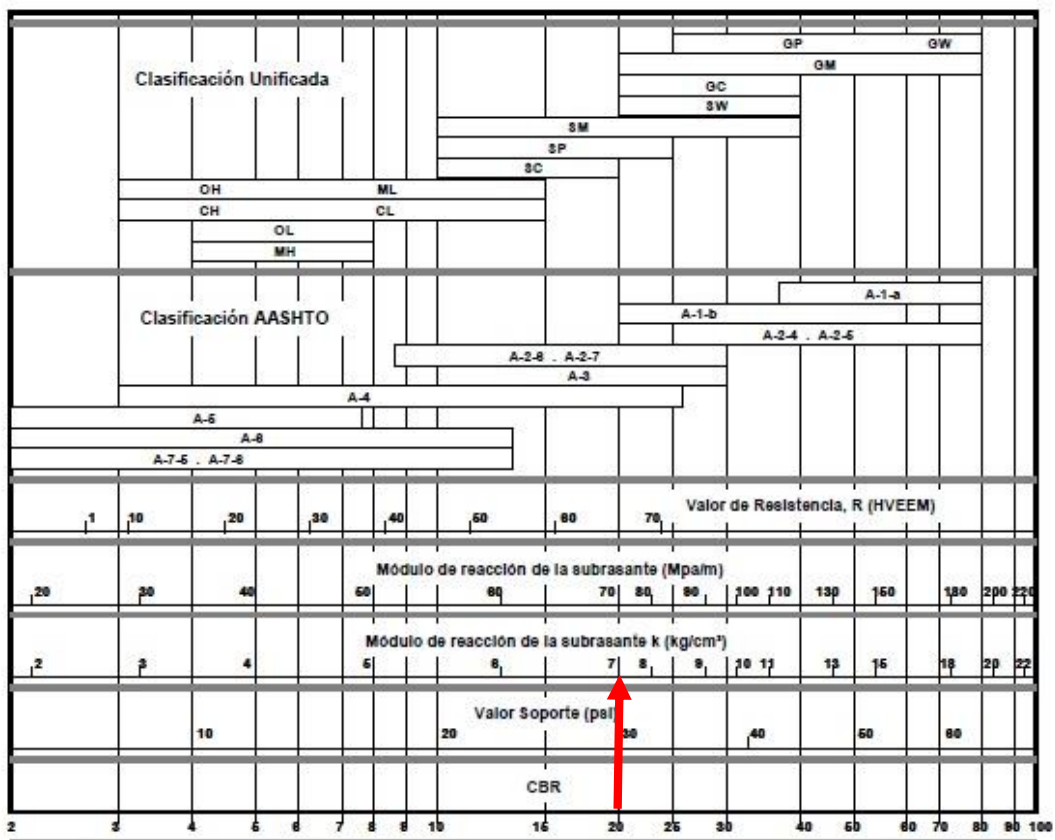


Fig. 16 Correlaciones entre resistencia y tipo de suelos. (Salazar Rodríguez. (2015). *Guía para el diseño y construcción de pavimentos rígidos* 2a. Edición).

Dando como resultado un k_{sc} de 7 kg/cm³. Para conocer el módulo de reacción combinado que tiene la base (k_c), se tiene que saber el tipo de material que será utilizado para su elaboración, en este caso se propondrá dos alternativas las cuales son: base de material granular y base tratada con cemento, con un espesor de 20 cm. A partir de este criterio se usaran dos ábacos que junto con el valor de k_{sc} y el espesor, se podrá obtener el k_c .

En las siguientes figuras se obtienen los resultados:

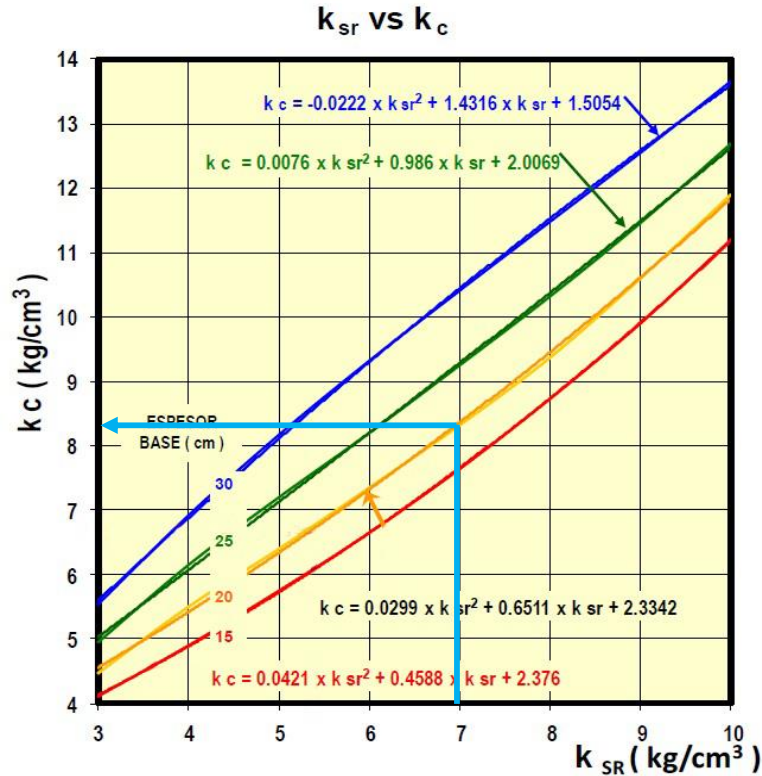


Fig. 19 Ábaco para definir el Módulo de Reacción para Bases de Grava Triturada. (Roberto, Sosa "Diseño Estructural de Pavimentos de Concreto para Carreteras", UNAM, Ciudad de México a 22 de Octubre de 2018).

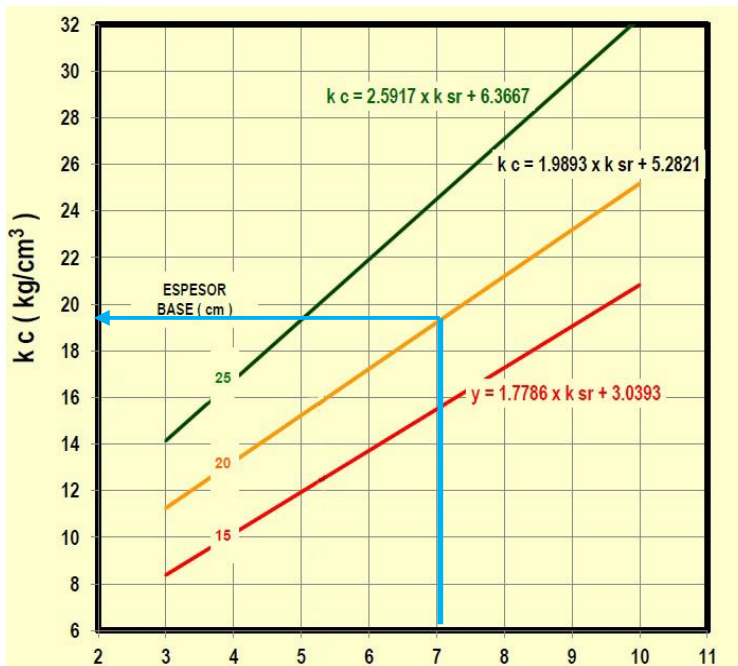


Fig. 20 Ábaco para determinar el Módulo de Reacción para Bases Tratadas con Cemento Portland. (Roberto, Sosa "Diseño Estructural de Pavimentos de Concreto para Carreteras", UNAM, Ciudad de México a 22 de Octubre de 2018).

Se determina un k_c para la base con grava triturada de 8.4 kg/cm^3 y para la base tratada con cemento pórtland de 19.2 kg/cm^3 . El siguiente paso es saber las propiedades del concreto por lo que realizando ensayos de laboratorio a la resistencia de tensión por flexión dio como resultado un esfuerzo a la ruptura de 45 kg/cm^2 , propiamente se emplea un coeficiente de variación del 12 % con la cual se obtiene una resistencia a la flexión de 54 kg/cm^2 . El módulo de elasticidad se obtiene mediante la ecuación presentada en el apartado “4.1 Método AASHTO”, utilizando el valor del esfuerzo a la ruptura da como resultado un $E_c = 4.32 \times 10^6 \text{ psi}$.

Para el Nivel de Confianza se tomará un valor de 95% ya que si bien no es propiamente un tramo carretero es parte de continuidad de la misma, así pues, se toma el valor que oscila entre los rangos de 88-99 para “Autopista y Carreteras Troncales de la Red Federal”. Con el valor antes obtenido se obtiene un Coeficiente de Student de -1.645 con una Desviación Estándar Global de 0.35. El  ndice de Servicio Inicial será de 4.5 y para el índice de Servicio Terminal es de 2.5.

El Coeficiente de Drenaje teniendo en cuenta el tipo de clima de la zona, el nivel freático de esta a 3.2 metros y que se presenta buen drenaje, se tomará el valor de 1.05. La propuesta que se hará para determinar el Coeficiente de Transferencia de Carga será que el pavimento tendrá acotamientos de concreto con barras de sujeción y pasajuntas. Sacando una media entre el rango de valores para el tipo de concreto el cuál será simple se obtiene un valor de 2.8.

También se obtuvo la vida útil del pavimento de concreto que se tendrá en función de la siguiente expresión:

$$VIDA \acute{U}TIL = \frac{\log \left[\frac{\Sigma_L \times r}{365 \times TDPAi \times FEC_p} + 1 \right]}{\log(1 + r)}$$

Donde:

Σ_L = Ejes Equivalentes Acumulados de las Cargas Legales

r = Tasa de Crecimiento

$TDPAi$ = Tránsito Diario Promedio Anual en el carril de diseño

FEC_p = Factor de Equivalencia de Cargas Proporcional

En la siguiente tabla se muestran los valores antes descritos y posteriormente, se determinan los resultados de los espesores del pavimento de concreto para ambas propuestas de bases.

Es importante mencionar que el método es un proceso iterativo, ya que la capacidad en ejes equivalentes tiene que ser un valor mayor puesto que la estructura del pavimento tendrá que soportar el tránsito equivalente calculado con la información del tránsito.

Tipo de Obra Vial:

Caseta Principal Tramo La Pera - Cuautla

Transito Vehicular:

Transito en:

2013

Vida útil:

30 años

Tasas r:

6.4%

Carriles por sentido:

9

Nivel de confianza (Qu):

tqu

Desv. STD Global:

0.35

0.95

1.645

Condiciones Regionales

Morfología del terreno:

9864

Coef. De Drenaje (mi):

2020

0.5

D

Clima:

Subtropical de altura, tipo mexicano (Cwh), templado regular

Composición del Tránsito:

A

88.40%

B

4.20%

C

3.30%

T-S

4.10%

Ap

87.10%

Ac

1.30%

B2

2.52%

B3

1.68%

C2

1.70%

C3

1.60%

T2-S1

0.00%

T2-S2

0.00%

T3-S2

2.20%

T3-S3

0.50%

C3R2

0.20%

T3S2R4

1.20%

TRANSITO EQUIVALENTE (ΣL)

1.78E+08

Características Estructurales de los Materiales

Capa

Parametro

De lab

Espesores

Capa Subrasante

CBR

20%

30 cm

Base de Grava Triturada

CBR

80%

20 cm

Base tratada con Cemento

f'c (kg/cm²)

50 kg/cm²

20 cm

Carpeta de Concreto Vibrado

σ'f (kg/cm²)

45 kg/cm²

c.v.(%)

12%

Ec

4.32E+06 psi

Condiciones de servicio

Servicio inicial (ISI)

4.5

Servicio terminal (ISR)

2.5

Condiciones constructivas

con Pasajuntas y barras de sujeción

con Acotamientos de Concreto

J

2.8

Tabla 18 Datos para el diseño del pavimento de concreto por el Método AASTHO

Página 46 | 68

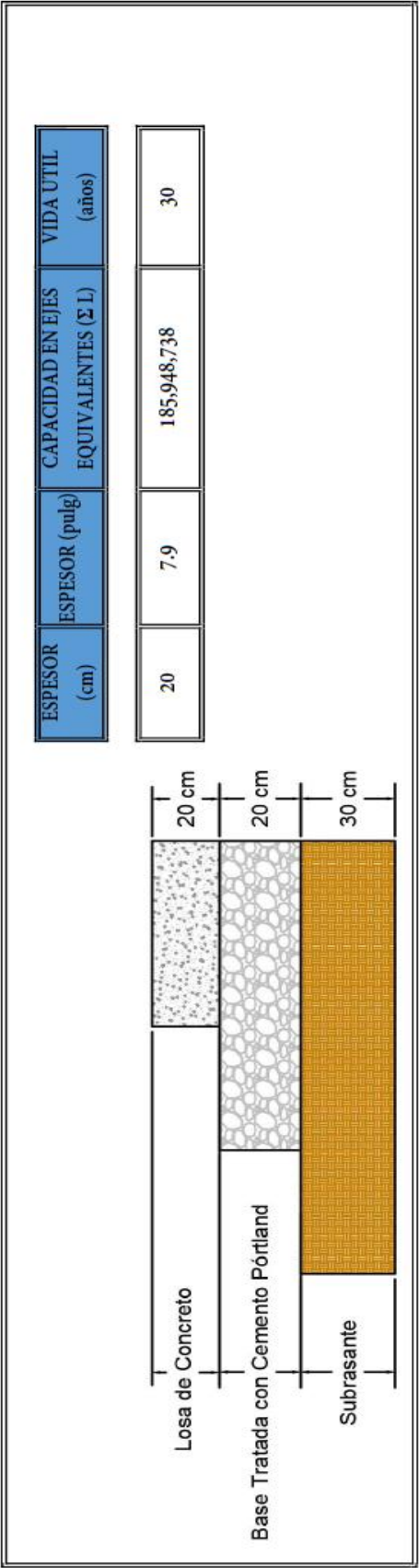
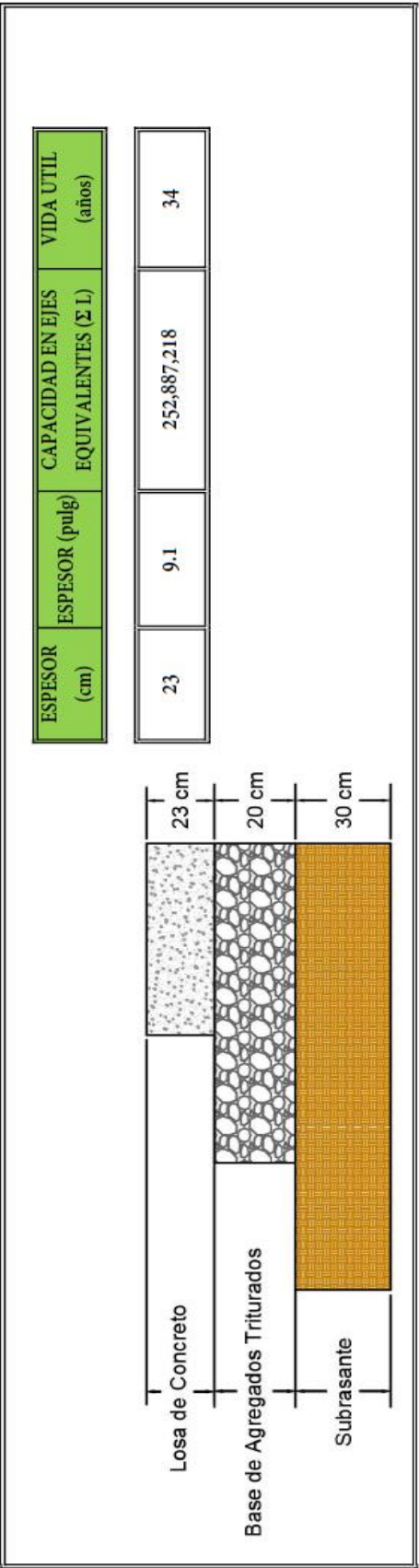


Fig. 17 Secciones estructurales del pavimento de concreto por el Método AASTHO

5.4.2.- Método de la PCA

De igual manera, habiendo calculado con anterioridad el tránsito con la misma metodología, se procederá a utilizar los resultados para las repeticiones esperadas de cada tipo de eje. Primeramente, se tiene que conocer la información de las capas estructurales del pavimento de concreto, por lo que se tomará la misma información determinada que en el método AASTHO, que comprende el tipo de material, módulo de reacción, módulo de ruptura para el concreto y propuesta para las juntas y bordes. En la siguiente tabla se muestra lo antes mencionado:

CAPA SUBRASANTE			TRÁNSITO	
CBR=	20%		TDPAi=	621
Ksr=	7		A=	88.40%
			B=	4.20%
BASE	ALT. 1	ALT. 2	C=	3.30%
TIPO:	BG	BTC	TS=	4.10%
ESPESOR=	20	20	r=	6.4%
kc=	8.4	19.2	VIDA ÚTIL	30 años
CONCRETO			JUNTAS Y BORDES	
σ'_{28} =	45	kg/cm ²	CON	PASAJUNTAS
c.v.=	12%		CON	ACOTAMIENTOS
$\sigma_{\wedge}$ =	54	kg/cm ²		

Tabla 19 Datos para el diseño del pavimento por el método de la PCA

Es importante mencionar que se hicieron las conversiones pertinentes para poder usar los nomogramas en el sistema inglés, así pues, los pesos por eje se multiplicarán por un factor de seguridad del carril (LSF) dependiendo del tipo de vialidad que se presente, en este caso se propuso usar un factor de 1.1.

Factor de Seguridad LSF	
Clasificación de la vialidad	Factor de Seguridad
Carreteras principales, vialidades de carriles múltiples, con alto volumen de tránsito pesado	1.2
Carreteras y vialidades urbanas con volumen moderado de tránsito pesado	1.1
Carreteras y calles con bajo volumen de tránsito pesado	1

Tabla 20 Valores de LSF para distintas vialidades. (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).

Posteriormente, se procede a realizar el análisis por Fatiga que este comprende primero en obtener los esfuerzos equivalentes para cada tipo de eje (sencillo, tándem y trídem). A través del valor del Módulo de Reacción Combinado de la Base y con un espesor de losa de concreto propuesto, se determinan los esfuerzos equivalentes en las tablas correspondientes, en este caso, se propuso un espesor de 19 cm para la Alternativa 1 y de 18 cm para la Alternativa 2. Como los

valores mencionados en pulgadas no son exactos para los espesores que se mencionan en las tablas al igual que el valor del Módulo de Reacción Combinado, se optó por realizar interpolaciones lineales de tal manera que se obtuviera los valores de acuerdo a la información que se maneja. Se mostrarán los resultados de las respectivas alternativas de las bases propuestas.

Espesor de losa (pulg.)	Módulo de Reacción Combinado (pci)					
	300			500		
7	220	184	149	203	170	142
7.48	201.75	168.63	135.55	185.71	155.59	127.59
7.5	201	168	135	185	155	127

Módulo de Reacción Combinado (pci)	Esfuerzos Equivalentes		
300	202	169	136
302	201.59	168.50	135.47
500	186	156	128

Tabla 21 Determinación de los Esfuerzos Equivalentes (Alt.1)

Espesor de losa (pulg.)	Módulo de Reacción Combinado (pci)					
	500			700		
7	203	170	142	192	162	138
7.1	199.98	167.40	139.40	189.23	159.58	135.58
7.5	185	155	127	176	148	124

Módulo de Reacción Combinado (pci)	Esfuerzos Equivalentes		
500	199.88	167.40	139.40
694	189.55	159.81	135.69
700	189.23	159.58	135.58

Tabla 22 Determinación de los Esfuerzos Equivalentes (Alt. 2)

Se calcula ahora la relación de esfuerzos que se obtendrá de la siguiente manera:

$$R_{esf} = \frac{\sigma_{eq}}{\sigma^{\wedge}}$$

Donde:

σ_{eq} = Esfuerzo Equivalente (eje sencillo, tándem o trídem)

$\sigma^{\wedge}$ = Módulo de Ruptura del Concreto

Con el uso del nomograma se van obteniendo las repeticiones de carga permisibles que se puede permitir en el pavimento, respectivamente se obtiene un porcentaje de la fatiga dividiendo este valor entre las repeticiones esperadas. Se realiza la sumatoria de todos los porcentajes obtenidos y se verifica que no sobre pasa el valor del 100%.

Espesor de la Losa (pulg.)		Módulo de Reacción Combinado (pci)																							
		50			100			150			200			300			500			700					
		E.Sen	E.Tan	E. Trid	E.Sen	E.Tan	E. Trid	E.Sen	E.Tan	E. Trid	E.Sen	E.Tan	E. Trid	E.Sen	E.Tan	E. Trid	E.Sen	E.Tan	E. Trid	E.Sen	E.Tan	E. Trid			
4	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	297	390	338	297	355	322	292	333	316	291				
5	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	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	325	294	251	196	274	230	183	260	218	175	243	203	166	223	188	159	212	180	156				
7	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	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	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	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	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	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	130	133	85	115	112	79	107	101	74	102	95	70	96	86	65	89	78	60	85	73	57				
13.5	124	127	80	109	107	75	102	97	70	97	91	67	91	83	62	85	74	57	81	70	54				
14	118	122	75	104	103	71	97	93	67	93	87	63	87	79	59	81	71	54	77	67	51				

Tabla 23 Esfuerzos Equivalentes para Losa con Acotamientos de Concreto (Alt.1). (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).

Espesor de la Losa (pulg.)	Módulo de Reacción Combinado (pci)																							
	50			100			150			200			300			500			700					
	E.Sen	E.Tan	E. Trid	E.Sen	E.Tan	E. Trid	E.Sen	E.Tan	E. Trid	E.Sen	E.Tan	E. Trid	E.Sen	E.Tan	E. Trid	E.Sen	E.Tan	E. Trid	E.Sen	E.Tan	E. Trid	E.Sen	E.Tan	E. Trid
4	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	297	390	338	297	355	322	292	333	316	291			
5	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	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	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	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	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	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	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	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	130	133	85	115	112	79	107	101	74	102	95	70	96	86	65	89	78	60	85	73	57			
13.5	124	127	80	109	107	75	102	97	70	97	91	67	91	83	62	85	74	57	81	70	54			
14	118	122	75	104	103	71	97	93	67	93	87	63	87	79	59	81	71	54	77	67	51			

Tabla 24 Esfuerzos Equivalentes para Losas con Acotamientos de Concreto (Alt.2). (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).

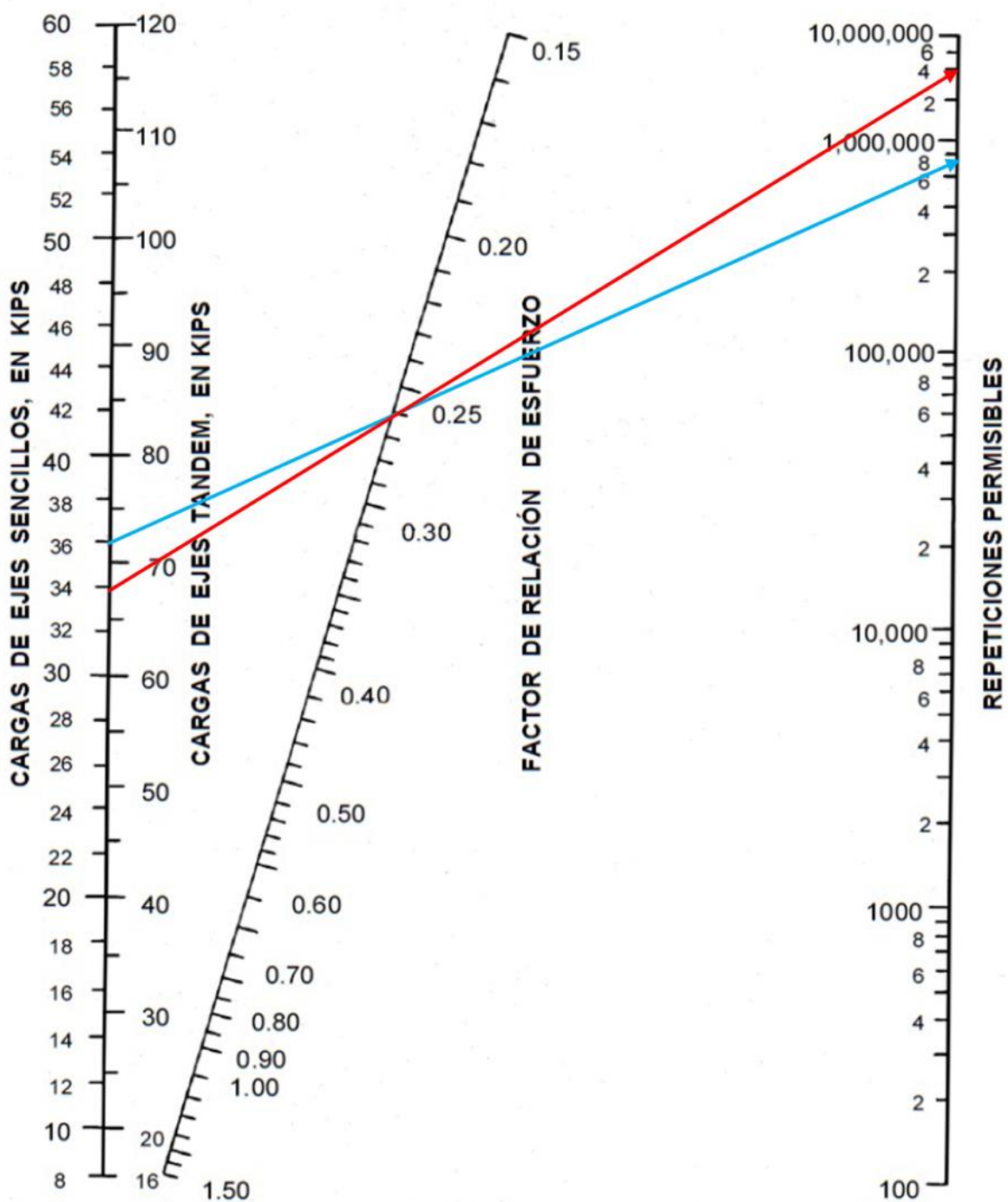


Fig. 18 Análisis por Fatiga empleando el nomograma con base en el factor de relación de esfuerzos con y sin acotamiento de concreto (Alt.1)

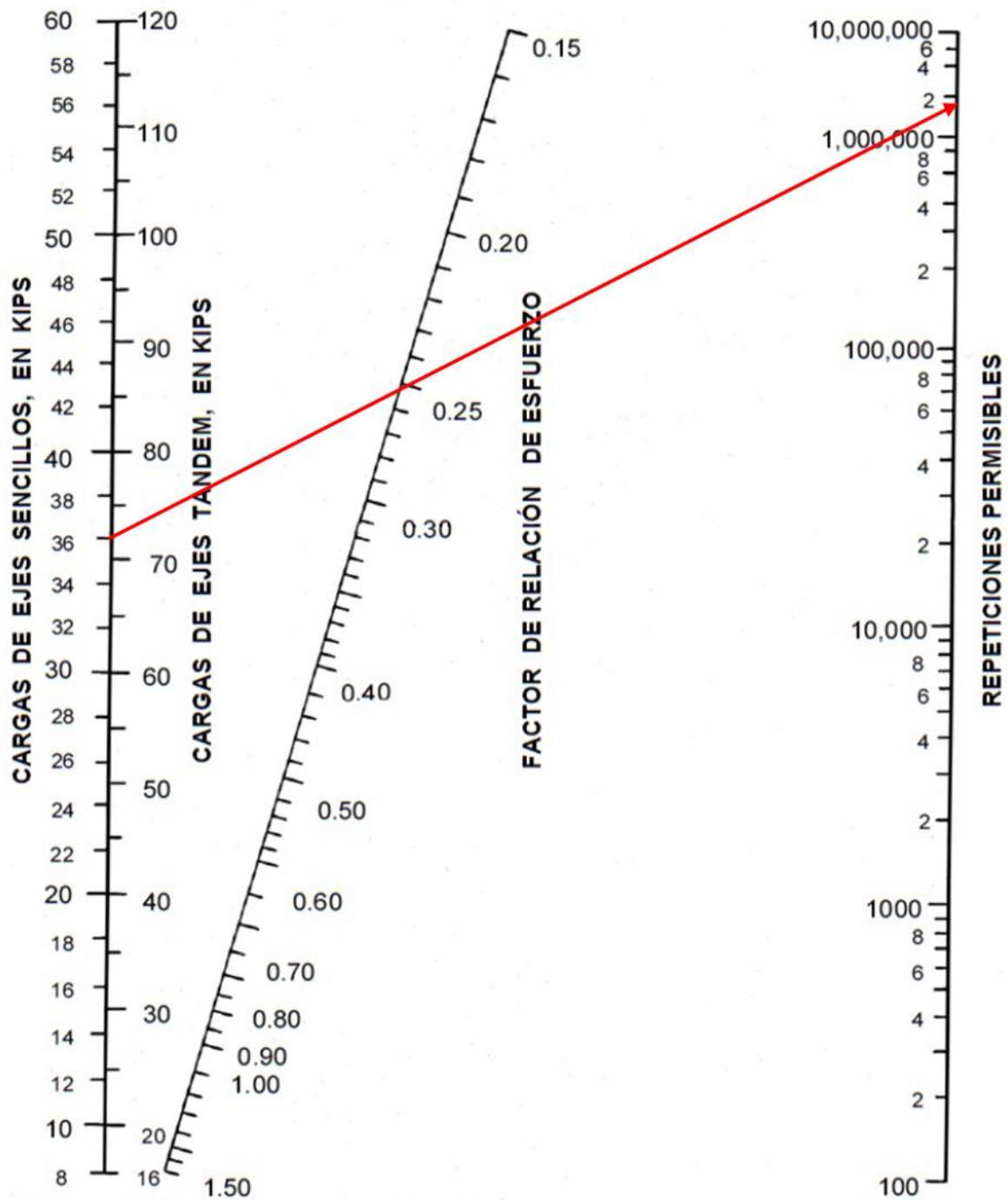


Fig. 19 Análisis por Fatiga empleando el nomograma con base en el factor de relación de esfuerzos con y sin acotamiento de concreto (Alt.2)

El análisis por Erosión se inicia mediante la obtención de los factores de erosión que de igual forma, son para cada tipo de eje, estos son visualizados en la tabla de Factores de Erosión - Juntas con Pasajuntas con Acotamientos de Concreto, utilizando el espesor propuesto y el Módulo de Reacción de la Base se realizan las interpolaciones lineales correspondientes. A continuación, se muestran los valores obtenidos para los factores de erosión.

Espesor de losa (pulg.)	Módulo de Reacción Combinado (pci)					
	300			500		
7	2.49	2.5	2.53	2.46	2.42	2.43
7.48	2.41	2.44	2.47	2.38	2.36	2.37
7.5	2.41	2.44	2.47	2.38	2.36	2.37

Módulo de Reacción Combinado (pci)	Factores de Erosión		
300	2.41	2.44	2.47
302	2.41	2.44	2.47
500	2.38	2.36	2.37

Tabla 25 Determinación de los Factores de Erosión (Alt.1)

Espesor de losa (pulg.)	Módulo de Reacción Combinado (pci)					
	500			700		
7	2.46	2.42	2.43	2.43	2.38	2.37
7.1	2.45	2.41	2.42	2.42	2.37	2.36
7.5	2.38	2.36	2.37	2.35	2.31	2.31

Módulo de Reacción Combinado (pci)	Factores de Erosión		
500	2.45	2.41	2.42
694	2.42	2.37	2.36
700	2.42	2.37	2.36

Tabla 26 Determinación de los Factores de Erosión (Alt.2)

Con el peso de las cargas que presentan los ejes y los valores del factor de erosión calculados, se utiliza el nomograma correspondiente para obtener las Repeticiones Permisibles, posteriormente se obtiene el porcentaje de Erosión, el cual resulta de dividir los resultados de las repeticiones antes calculado y las repeticiones esperadas. En las tablas 27 y 28 se muestran los valores considerados para obtener los factores de erosión y posteriormente, las figuras 24 y 25 el nomograma que se utilizó para realizar el análisis correspondiente. Los resultados que se obtuvieron para ambas alternativas se exponen en las tablas 29 y 30, definiendo así que los espesores propuestos para la losa de concreto en ambas alternativas de Base cumplen con no excederse del 100% para el análisis de fatiga y erosión.

Espesor de la Losa (pulg.)		Módulo de Reacción Combinado (pci)																	
		50			100			200			300			500			700		
		E.Sim	E.Tan	E. Trid	E.Sim	E.Tan	E. Trid	E.Sim	E.Tan	E. Trid	E.Sim	E.Tan	E. Trid	E.Sim	E.Tan	E. Trid	E.Sim	E.Tan	E. Trid
4		3.28	3.3	3.33	3.24	3.2	3.2	3.21	3.13	3.13	3.19	3.1	3.1	3.15	3.09	3.05	3.12	3.08	3
4.5		3.13	3.19	3.24	3.09	3.08	3.1	3.06	3	2.99	3.04	2.96	2.95	3.01	2.93	2.91	2.98	2.91	2.87
5		3.01	3.09	3.16	2.97	2.98	3.01	2.93	2.89	2.89	2.9	2.84	2.83	2.87	2.79	2.79	2.85	2.77	2.75
5.5		2.9	3.01	3.09	2.85	2.89	2.94	2.81	2.79	2.8	2.79	2.74	2.74	2.76	2.68	2.67	2.73	2.65	2.64
6		2.79	2.93	3.03	2.75	2.82	2.87	2.7	2.71	2.73	2.68	2.65	2.66	2.65	2.58	2.58	2.62	2.54	2.54
6.5		2.7	2.86	2.97	2.65	2.75	2.82	2.61	2.63	2.67	2.58	2.57	2.59	2.55	2.5	2.5	2.52	2.45	2.45
7		2.61	2.79	2.92	2.56	2.68	2.76	2.52	2.56	2.61	2.49	2.5	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	2.5	2.56	2.41	2.44	2.47	2.38	2.36	2.37	2.35	2.31	2.31
8		2.46	2.68	2.83	2.41	2.56	2.67	2.36	2.44	2.51	2.33	2.38	2.42	2.3	2.3	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	2.2	2.18	2.2
9		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	2.3	2.09	2.14	2.18	2.07	2.08	2.11
10		2.2	2.47	2.67	2.15	2.36	2.51	2.1	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	2.2	2.32	2.01	2.14	2.23	1.97	2.05	2.11	1.95	1.99	2.04
11		2.1	2.39	2.6	2.04	2.28	2.45	1.99	2.16	2.29	1.95	2.09	2.2	1.92	2.01	2.08	1.89	1.95	2
11.5		2.05	2.35	2.57	1.99	2.24	2.42	1.93	2.12	2.26	1.9	2.05	2.16	1.87	1.97	2.05	1.84	1.91	1.97
12		2	2.31	2.54	1.94	2.2	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	2.2	1.81	1.98	2.11	1.77	1.89	1.99	1.74	1.84	1.91
13		1.91	2.23	2.48	1.85	2.13	2.33	1.79	2.01	2.17	1.75	1.95	2.08	1.72	1.86	1.96	1.7	1.8	1.88
13.5		1.86	2.2	2.46	1.81	2.09	2.3	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		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	1.8	1.91	1.62	1.74	1.83

Tabla 27 Factores de Erosión considerando Juntas con Pasajuntas y con Acotamientos de Concreto (Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).

Espesor de la Losa (pulg.)	Módulo de Reacción Combinado (pci)																	
	50						100						200					
	E.Sim			E.Tan			E.Sim			E.Tan			E.Sim			E.Tan		
	E.Sim	E.Tan	E. Trid	E.Sim	E.Tan	E. Trid	E.Sim	E.Tan	E. Trid	E.Sim	E.Tan	E. Trid	E.Sim	E.Tan	E. Trid	E.Sim	E.Tan	E. Trid
4	3.28	3.3	3.33	3.24	3.2	3.2	3.21	3.13	3.13	3.19	3.1	3.1	3.15	3.09	3.05	3.12	3.08	3
4.5	3.13	3.19	3.24	3.09	3.08	3.1	3.06	3	2.99	3.04	2.96	2.95	3.01	2.93	2.91	2.98	2.91	2.87
5	3.01	3.09	3.16	2.97	2.98	3.01	2.93	2.89	2.89	2.9	2.84	2.83	2.87	2.79	2.79	2.85	2.77	2.75
5.5	2.9	3.01	3.09	2.85	2.89	2.94	2.81	2.79	2.8	2.79	2.74	2.74	2.76	2.68	2.67	2.73	2.65	2.64
6	2.79	2.93	3.03	2.75	2.82	2.87	2.7	2.71	2.73	2.68	2.65	2.66	2.65	2.58	2.58	2.62	2.54	2.54
6.5	2.7	2.86	2.97	2.65	2.75	2.82	2.61	2.63	2.67	2.58	2.57	2.59	2.55	2.5	2.5	2.52	2.45	2.45
7	2.61	2.79	2.92	2.56	2.68	2.76	2.52	2.56	2.61	2.49	2.5	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	2.5	2.56	2.41	2.44	2.47	2.38	2.36	2.37	2.35	2.31	2.31
8	2.46	2.68	2.83	2.41	2.56	2.67	2.36	2.44	2.51	2.33	2.38	2.42	2.3	2.3	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	2.2	2.18	2.2
9	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	2.3	2.09	2.14	2.18	2.07	2.08	2.11
10	2.2	2.47	2.67	2.15	2.36	2.51	2.1	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	2.2	2.32	2.01	2.14	2.23	1.97	2.05	2.11	1.95	1.99	2.04
11	2.1	2.39	2.6	2.04	2.28	2.45	1.99	2.16	2.29	1.95	2.09	2.2	1.92	2.01	2.08	1.89	1.95	2
11.5	2.05	2.35	2.57	1.99	2.24	2.42	1.93	2.12	2.26	1.9	2.05	2.16	1.87	1.97	2.05	1.84	1.91	1.97
12	2	2.31	2.54	1.94	2.2	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	2.2	1.81	1.98	2.11	1.77	1.89	1.99	1.74	1.84	1.91
13	1.91	2.23	2.48	1.85	2.13	2.33	1.79	2.01	2.17	1.75	1.95	2.08	1.72	1.86	1.96	1.7	1.8	1.88
13.5	1.86	2.2	2.46	1.81	2.09	2.3	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	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	1.8	1.91	1.62	1.74	1.83

Tabla 28 Factores de Erosión considerando Juntas con Pasajuntas y con Acotamientos de Concreto (Alt.2).
(Zárate Aquino, Salazar Rodríguez & Tena Colunga, (2015). Pavimentos de Concreto para Carreteras).

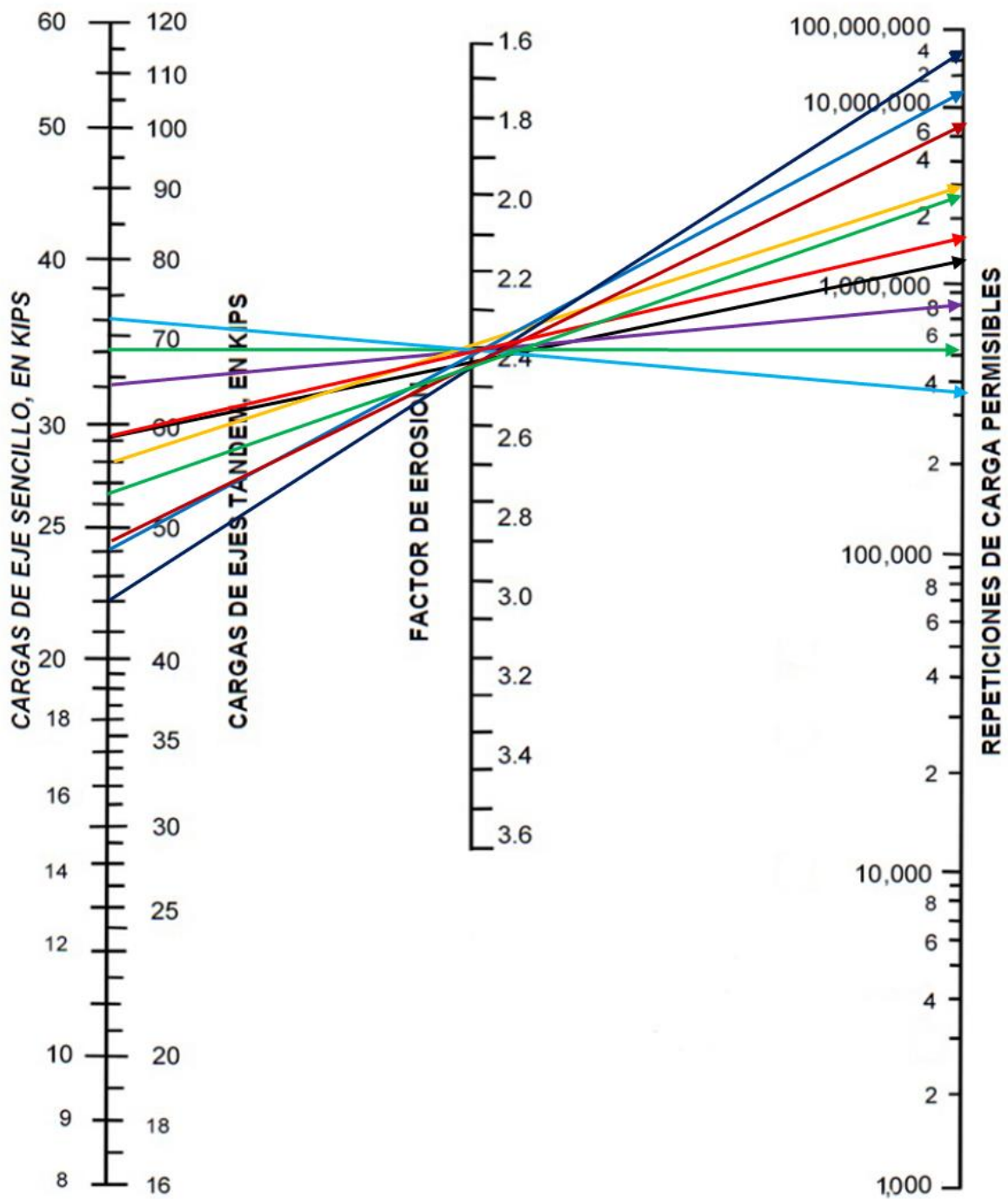


Fig. 20 Análisis por Erosión empleando el nomograma con base en el factor de erosión con acotamientos de concreto (Alt.1)

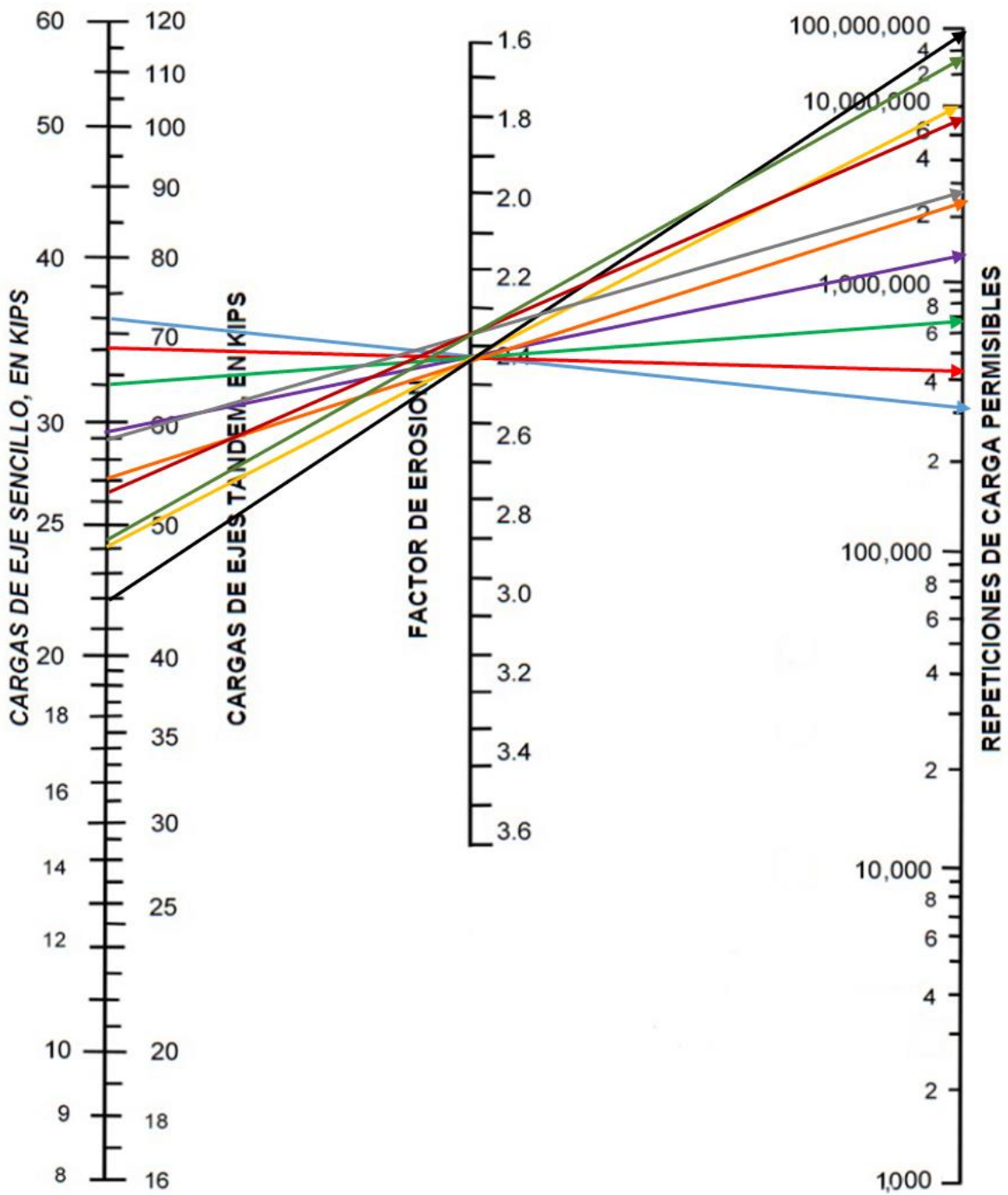


Fig. 21 Análisis por Erosión empleando el nomograma con base en el factor de erosión con acotamientos de concreto (Alt.2)

Espesor de Losa de Concreto: 19 cm

W eje (kips)	Repeticiones Esperadas	Análisis por Fatiga					Análisis por Erosión		
		LSF	σ_{eq}	r_{sf}	Repeticiones Permisibles	Fatiga (%)	F erosión	Repeticiones Permisibles	Daño (%)
Ejes Sencillos		1.1	201.59	0.26			2.41		
33	16,346	36			750,000	2.18%		360,000	4.54%
31	29,423	34			4,000,000	0.74%		500,000	5.88%
29	62,308	32			Ilimitadas	0.00%		780,000	7.99%
26	223,154	29			Ilimitadas	0.00%		1,800,000	12.40%
24	243,230	27			Ilimitadas	0.00%		2,900,000	8.39%
22	171,884	24			Ilimitadas	0.00%		15,000,000	1.15%
20	122,692	22			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
Ejes Tándem			168.50	0.22			2.44		
53	202,500	58			Ilimitadas	0.00%		1,300,000	16%
49	360,769	53			Ilimitadas	0.00%		2,800,000	13%
44	586,191	49			Ilimitadas	0.00%		6,200,000	9%
40	539,230	44			Ilimitadas	0.00%		40,000,000	1%
35	424,230	39			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
31	240,577	34			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
Ejes Trídem			135.47	0.18			2.47		
66	10,577	73			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
62	15,385	68			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
57	21,154	63			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
53	19,231	58			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
49	12,500	53			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
44	7,692	49			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
					% Fatiga	2.92%		% Daño	79.61%

Tabla 29 Cálculo del Espesor del Pavimento (Alt.1)

Espesor de Losa de Concreto: 18 cm

W eje (kips)	Repeticiones Esperadas	Análisis por Fatiga					Análisis por Erosión		
		LSF	σ eq	r esf	Repeticiones Permisibles	Fatiga (%)	F erosión	Repeticiones Permisibles	Daño (%)
Ejes Sencillos		1.1	189.55	0.25			2.42		
33	16,346	36			1,800,000	0.91%		300,000	5.45%
31	29,423	34			Ilimitadas	0.00%		430,000	6.84%
29	62,308	32			Ilimitadas	0.00%		690,000	9.03%
26	223,154	29			Ilimitadas	0.00%		1,400,000	15.94%
24	243,230	27			Ilimitadas	0.00%		2,300,000	10.58%
22	171,884	24			Ilimitadas	0.00%		10,000,000	1.72%
20	122,692	22			Ilimitadas	0.00%		90,000,000	0.14%
Ejes Tándem			159.81	0.21			2.37		
53	202,500	58			Ilimitadas	0.00%		2,800,000	7.23%
49	360,769	53			Ilimitadas	0.00%		8,000,000	4.51%
44	586,191	49			Ilimitadas	0.00%		31,000,000	1.89%
40	539,230	44			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
35	424,230	39			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
31	240,577	34			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
Ejes Trídem			135.69	0.18			2.36		
66	10,577	73			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
62	15,385	68			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
57	21,154	63			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
53	19,231	58			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
49	12,500	53			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
44	7,692	49			Ilimitadas	0.00%		Ilimitadas	0.00%
				% Fatiga	0.91%		% Daño	63.32%	

Tabla 30 Cálculo del Espesor del Pavimento (Alt.2)

A continuación, se muestran las secciones respectivas de pavimento de cada alternativa de base propuesta:

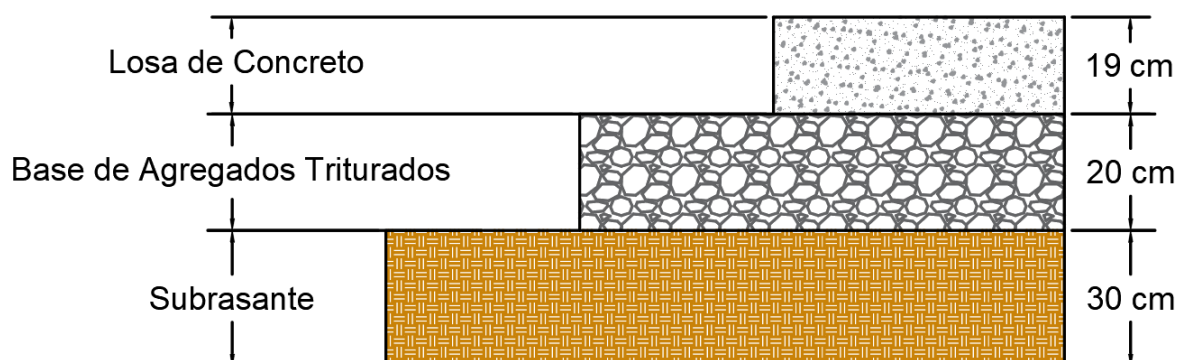


Fig. 226 Sección Estructural para la Base de Agregados Triturados - Alt.1

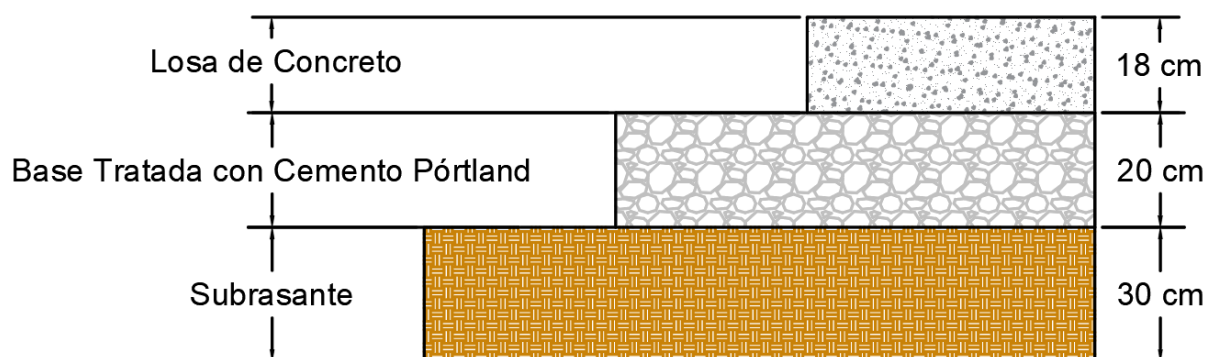


Fig. 27 Sección Estructural para la Base Tratada con Cemento Pórtland- Alt.2

5.5- Diseño de Juntas y Pasajuntas

El concreto presenta un comportamiento de expansión y contracción debido a cambios de temperatura y humedad. A raíz de esto se generan grietas, las cuales tendrán una tendencia en formar bloques manteniendo una terminación en ángulo recto. Para controlar este tipo de problemas se tienen que realizar juntas, las cuales son simplemente grietas planificadas en el sentido longitudinal y transversal.

Se pueden clasificar en tres tipos importantes:

1. Juntas de Contracción: Se pretende crear planos débiles en el concreto y regular la ubicación de grietas que se formarán como resultado de los cambios dimensionales.

2. Juntas de Construcción: Pueden ser diseñadas para permitir el movimiento y/o transferir cargas, regularmente se realizan al final del día de trabajo o cuando se detenga la colocación del concreto.
3. Juntas de Expansión: Permiten los movimientos independientes verticales y horizontales de las losas ocasionados por la dilatación que se presenta debido a la temperatura.

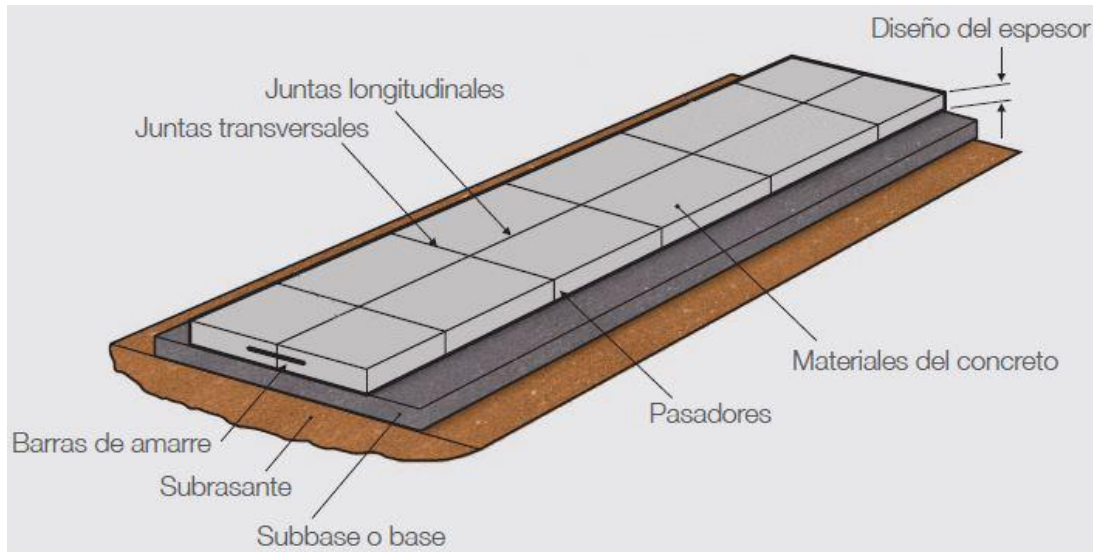


Fig. 23 Elementos del pavimento de concreto simple. (Recuperado de: https://www.sioingenieria.com/sitio/contenidos_mo.php?it=556, s.f.).

Aunado a esto se tiene que tomar en cuenta que, si las losas longitudinales no presentan elementos que restrinjan los movimientos transversales es necesario colocar barras de sujeción corrugada o barras de amarre para evitar su desplazamiento. De igual forma, las losas al contraerse en el sentido longitudinal forman un espaciamiento, mismo que desde en las juntas transversales pueden ser manejadas a través de pasajuntas lisas de acero estructural que, a su vez, ayudarán a una correcta transferencia de carga entre losa y losa.

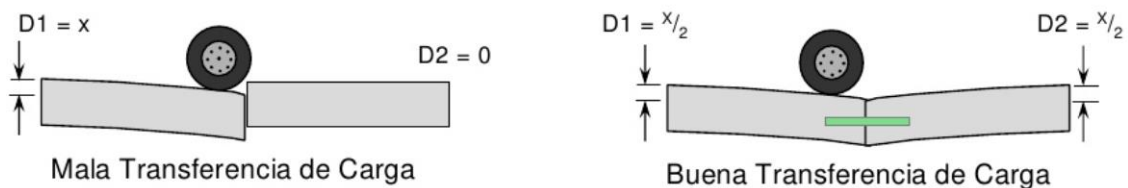


Fig. 24 Transferencia de carga entre losas sin y con pasajunta. (Recuperado de: <http://libro-pavimentos.blogspot.com/2012/10/transferencia-de-cargas-i.html>, s.f.).

De acuerdo a la Fig.11 Ampliación de la Caseta de Cobro La Pera – Cuautla, se realizará el diseño de las juntas y pasajuntas necesarias. Primeramente, empezaremos con determinar las dimensiones de las losas de concreto que se construirán, se propone un ancho de 3.5 m debido a que es la medida usualmente de los carriles al igual que las proporciones de la máquina extendidora, haciendo caso a la recomendación de realizar juntas transversales de contracción con una relación longitud-ancho no mayor a 1.25, se establece que la longitud de las losas será de 4.5 m. Cabe mencionar que en algunos casos se varió este valor debido a la configuración de estructuras existentes, así como elementos de confinamiento, ya que se pretende tener una distribución proporcional.

Tomando en consideración lo anterior, no será necesario realizar el diseño de las barras de sujeción. A continuación, se muestra el detalle de la junta longitudinal con su detalle respectivo del machihembrado.

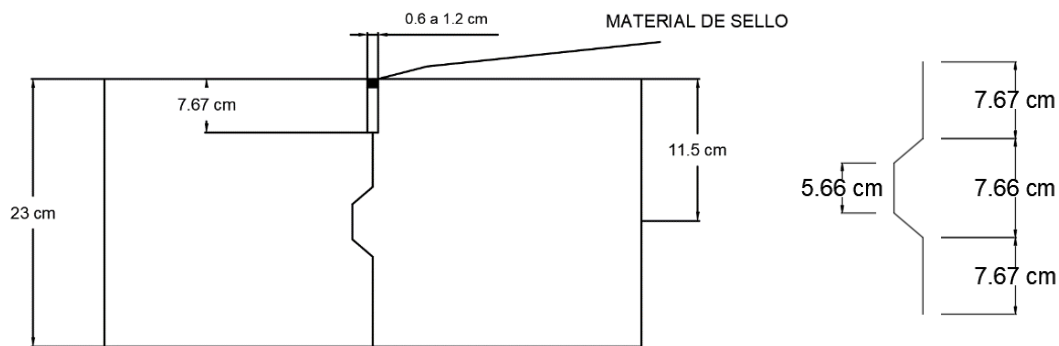


Fig. 25 Junta Longitudinal Tipo A y dimensiones del machihembrado

En el caso de las juntas transversal de contracción y construcción se empleará un nomograma para determinar el tipo de elemento a considerar como pasajunta. En la figura 24 se muestra la obtención de los resultados de las juntas con base en el espesor del pavimento (23 cm) y el Módulo de Reacción Combinado de la Base Granular (8.2 kg/cm^3).

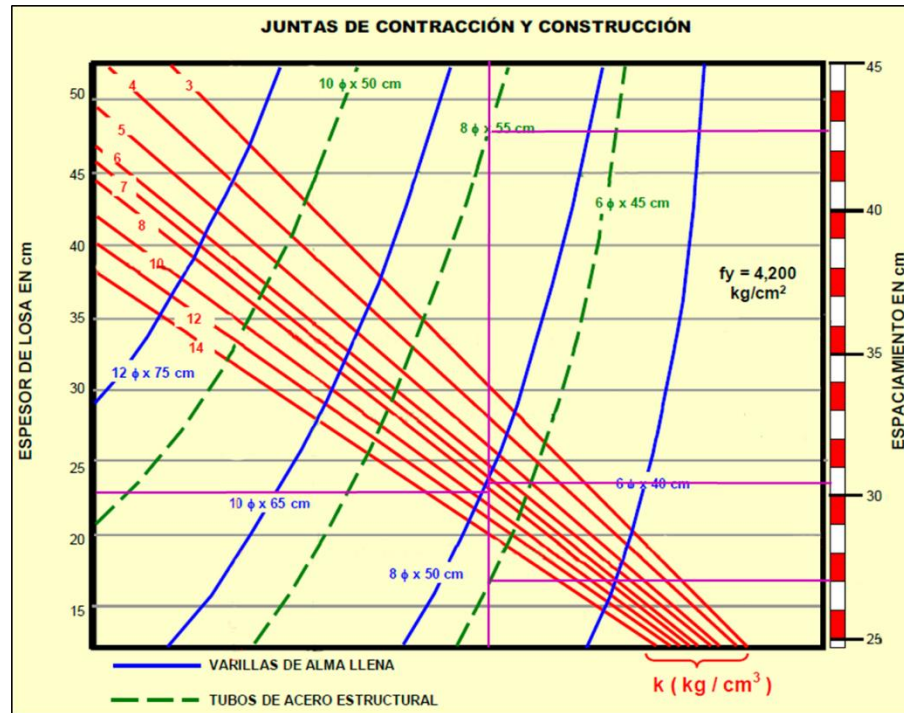


Fig. 26 Diseño de Juntas de Contracción y Construcción. (Roberto, Sosa "Diseño de juntas", UNAM, Ciudad de México a 22 de Octubre de 2018).

Se puede visualizar que los valores obtenidos son los siguientes:

- Tubos de Acero Estructural del No.6 de 45 cm de longitud @ 27 cm
- Tubos de Acero Estructural del No. 8 de 55 cm de longitud @ 43 cm
- Varilla de Alma llena del No. 8 de 50 cm de longitud @ 31 cm

La propuesta a emplear para ambas juntas se muestra a continuación:

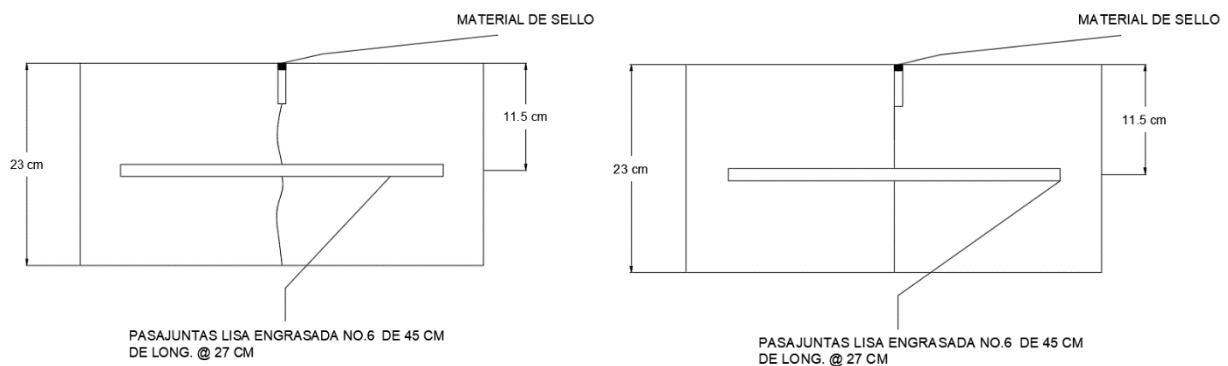


Fig. 27 Junta Transversal de Contracción y Construcción

Es importante mencionar que sólo se utilizarán las juntas de construcción en caso de alguna eventualidad durante el colado o si al final del día de trabajo se necesite.

Para las juntas de expansión se realizarán de acuerdo a la siguiente propuesta:

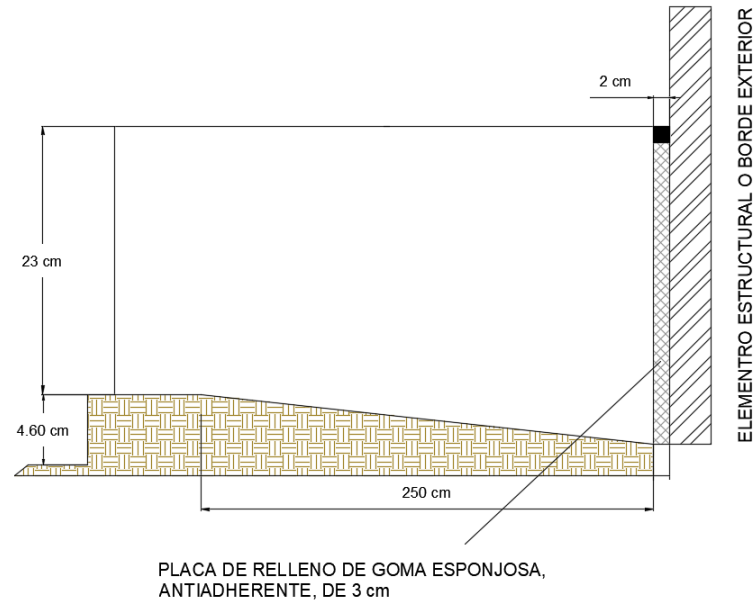


Fig. 28 Juntas de Expansión

Cada tipo de junta se tiene que sellar de manera que, se utilizan materiales los cuales impidan el ingreso de algún agente externo a la misma. En seguida se observa el detalle del sellado:

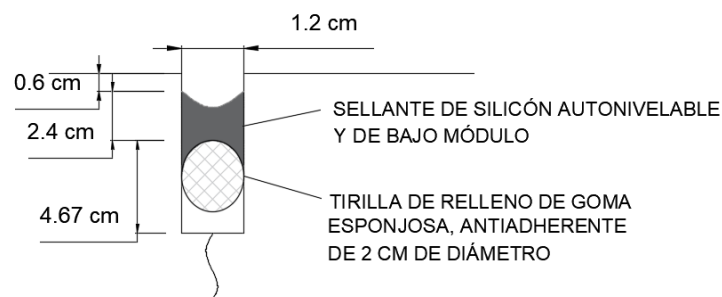


Fig. 29 Sellado de Juntas

6.-Conclusiones

El diseño de un pavimento rígido implica tener un amplio conocimiento de las variables que se tienen que tomar en cuenta, que van desde los estudios de campo previos, pruebas de laboratorio, una correcta selección de materiales de construcción, hasta tener el grado de sensibilidad al momento de elegir los parámetros que repercuten directamente el espesor de la losa de concreto hidráulico. Así pues, se realizaron dos metodologías de diseño de pavimento para una caseta en el tramo La Pera – Cuautla, en ambos casos, se encuentran diferencias notorias en los resultados y que a continuación se mencionará la comparativa entre ellas:

Variable	Metodología	
	AASHTO	PCA
Tránsito	Se determina el Tránsito Equivalente el cual consiste en obtener las repeticiones acumuladas de un eje estándar de características ya conocidas, las cuales serán equivalentes a las repeticiones del tránsito real, toma en cuenta toda la composición vehicular.	Se obtiene las incidencias que provoca el tránsito eje por eje para después conocer las repeticiones esperadas que tendrá el pavimento, no toma en consideración vehículos ligeros puesto que no tiene un impacto considerable en la estructura.
	Se usan Factores de Equivalencia de Cargas para vehículos con carga vacía, legal y sobrecarga, que a su vez, harán tener un rango de seguridad en cuanto al resultado de los ejes equivalentes.	Son tomados en cuenta las frecuencias de cargas por eje de cada tipo de vehículo, por lo que se consideran tal cual los esfuerzos que presenta el pavimento.
	Es considerado un factor de carril de diseño para el número total de carriles que existen el cual es usado para obtener.	-
Diseño	El diseño del espesor del pavimento se base en determinar primeramente el tránsito equivalente, el cual tiene que rebasar al tránsito calculado en el análisis de tránsito, el método es proponer espesores de tal forma que se cumpla lo antes expuesto.	El diseño tiene que cumplir dos condiciones de análisis para poder estructurar bien el pavimento, por fatiga y erosión los cuales no deben exceder un valor del 100%.
	Se hace uso de una ecuación general así como tablas que brindan los valores a tomar en cuenta para el diseño.	Se emplean tablas de fatiga y erosión así como el uso de nomogramas dependiendo si son o no considerados acotamientos de concreto.
	Considera valores probabilísticos resultado de tramos experimentales de medición, tomando en cuenta Niveles de Confianza, Desviación Estándar Global, Coeficiente de Student.	Se usa un factor de seguridad (LSF) dependiendo de la importancia que tenga la vialidad y el cual afectará a cada uno de los pesos de ejes
	Toma en cuenta el clima de la región del proyecto.	-
	Se puede conocer la vida útil que tendrá la estructura del pavimento.	Se proyecta solamente a los años teóricos que estará en funcionamiento.

Variable	Metodología	
	AASHTO	PCA
Espesor	Los espesores obtenidos para las dos alternativas de subbases propuestas resultan cumplir con el parámetro de vida útil de 30 años.	Los espesores que se obtuvieron para las dos alternativas de subbases propuestas cumplen para los análisis de fatiga y erosión, sin embargo, no se tiene la certeza de que cumplan con la vida útil propuesta.
	La diferencia que existe entre los resultados determinados no es amplia, este método considera múltiples variables que pueden dañar al pavimento y que si bien resultan un poco mayor el valor del espesor, se tiene la certeza en función de los cálculos sustentados de la vida útil que se tendrá.	Los valores de espesor resultan menores, sin embargo, su determinación a raíz de nomogramas lo hace poco confiable ya que queda prácticamente a criterio del proyectista la visualización de las repeticiones permisibles, por lo que puede no ser el correcto. Los porcentajes de los análisis de fatiga y erosión indican la variable por la cual pueden fallar primero.
Viabilidad Económica	En términos de costos, podrían reflejarse en ese ámbito los centímetros de diferencia calculados, pero si se ve desde la perspectiva de seguridad en cuanto al soporte de la composición del tránsito en su totalidad, resulta idóneo emplear este método.	Se podría tener un menor costo en su elaboración, sin embargo, quedan al aire un múltiple de variables a considerar como por ejemplo, la confiabilidad que se tendrá en cuanto al tránsito que se estima, el funcionamiento que pudiera tener al no tomar en cuenta con factores como pueden ser el clima, el grado de incertidumbre por parte del contratista en su elaboración, entre otros.

La importancia de tener un criterio en la forma de evaluación de los resultados que se obtienen en función los parámetros utilizados, así como la correcta comparación y elección de la metodología a emplear, nos podrá garantizar parte de un adecuado diseño del pavimento para, posteriormente, brindar las recomendaciones necesarias y así cubrir sin problema alguno la vida útil. La siguiente etapa sería contar con una adecuada supervisión durante la construcción para así tener el modelo de diseño idóneo proyectado. Así pues, la metodología AASHTO es de tipo experimental, y que conforme el paso del tiempo fue teniendo procesos empíricos–mecanicistas, en cambió el de la PCA es meramente mecanicista, sustentando así tener un mayor rango de alcance en cuanto a los resultados que se obtienen por parte de la primera metodología.

7.-Bibliografía

Salazar A. (2015). *GUIA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS RÍGIDOS*, 2a. edición. Av. Insurgentes Sur 1846, Col. Florida, México, D.F.: IMCYC.

ZÁRATE A., SALAZAR A. & TENA J. (2015). *PAVIMENTOS DE CONCRETO PARA CARRETERAS VOLUMEN 1*. Av. Insurgentes Sur 1846, Col. Florida, México, D.F.: IMCYC.

YODER E. & WITCZAK M. (1975). *PRINCIPLES OF PAVEMENT DESIGN*. UNITED STATES OF AMERICA: JOHN WILEY & SONS, INC.

OTÁLVARO I. & NANCLARES F. (2008). *ELEMENTOS PARA OBTENER EL MÓDULO DE REACCIÓN DE SUBRASANTE*. Medellín.

DURAVIA. *Pavimento de Concreto*. enero 15,2019, de UNICON & UNACEM Sitio web:

<http://www.duravia.com.pe/wp-content/uploads/COLECCIONABLE-DURAVIA-V.2.pdf>

National Ready Mixed Concrete Association. *CIP 6 -Juntas en el concreto, Losas sobre el suelo*. En *El Concreto en la Práctica*(2): NRMCA.

Rodden R.. (marzo 4,2008). *Joint Layout and Design*. United States of America: ACP.