



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

“DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN PAVIMENTO RÍGIDO PARA EL CENTRO OPERATIVO ESTAFETA, LOCALIZADO EN LA AVENIDA SAN PABLO XALPA N°331, COLONIA SAN PABLO XALPA EN LA CIUDAD DE MÉXICO, D.F.”

T E S I N A

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

ANASTACIO GONZÁLEZ LÓPEZ

ASESOR :INGENIERO FRANCISCO ANZURES ROSAS

MAYO 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi señora madre Ma. Praxedis López Luis, por darme su amor; su paciencia; sus ejemplos de superación; sus consejos voluntarios e involuntarios; por darme valores y principios; por enseñarme a trazarme el mejor camino por medio de una educación y instrucción; por enseñarme a observar, escuchar y analizar; por su apoyo incondicional para terminar esta empresa, tanto me has enseñado y dado, que es más estimable que las riquezas ¡gracias mamá!

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al ingeniero Francisco Anzures Rosas por asesorarme y apoyarme, en el desarrollo del trabajo.

Agradezco a los ingenieros Hugo Constantini Martínez, Liborio Julián Bravo Martínez, Juan Alfredo Corona Pérez y Martín Sánchez Muñoz, por sus observaciones, opiniones, recomendaciones y por el tiempo que dedicaron para revisar y dar forma al trabajo definitivo.

Agradezco a la empresa Grupo de Asfaltos y Terracerías de Ecatepec S. A. de C. V., a su personal de oficina y de campo, por darme la oportunidad de participar con ellos en el desarrollo de proyectos de pavimento rígido.

OBJETIVO GENERAL:

DESARROLLAR LOS MÉTODOS AASHTO Y PCA CON LA FINALIDAD DE DETERMINAR EL ESPESOR DEL PAVIMENTO RÍGIDO QUE SEA CAPAZ DE SOPORTAR LA CARGA PROYECTADA DE TRÁNSITO DURANTE EL PERIODO DE DISEÑO PARA EL CENTRO OPERATIVO ESTAFETA.

CONTENIDO

Página

INTRODUCCIÓN	1
---------------------	----------

CAPÍTULO 1 PAVIMENTO RÍGIDO	2
------------------------------------	----------

Objetivo particular: Conceptualizar, conocer los tipos de juntas y su clasificación de un pavimento rígido, así como explicar de una manera general los factores que afectan el diseño estructural del pavimento rígido.

1.1.-Concepto de pavimento rígido	3
1.2.-Tipos de junta de un pavimento rígido	3
1.3.-Clasificación de un pavimento rígido	10
1.4.-Factores que afectan el diseño estructural de un pavimento rígido	10

CAPÍTULO 2 MÉTODO AASHTO	58
---------------------------------	-----------

Objetivo particular: Conocer los factores que considera el método AASHTO y la importancia que tienen, así como comprender los pasos de diseño y aplicarlo para obtener el espesor óptimo del pavimento rígido para el Centro Operativo Estafeta.

2.1.- Factores de diseño	
2.1.1.- Tránsito	59
2.1.2.- Resistencia de la subrasante	61
2.1.3.- Propiedades del concreto	66
2.1.4.- Transferencia de carga	68
2.1.5.- Drenaje	71
2.1.6.- Confiabilidad	72
2.1.7.- Servicialidad	74
2.1.8.- Espesor	76
2.2.-Consideraciones generales de proyecto para el Centro Operativo Estafeta	82
2.3.-Diseño estructural de pavimento rígido para el Centro Operativo Estafeta	86

CAPÍTULO 3 MÉTODO DE LA PCA

109

Objetivo particular: Conocer los factores que considera el método de la PCA y la importancia que tienen, así como comprender los pasos de diseño y aplicarlo para obtener el espesor óptimo del pavimento rígido para el Centro Operativo Estafeta.

3.1.- Factores de diseño	
3.1.1.- Resistencia a la flexión del concreto	110
3.1.2.- Terreno de apoyo ó base	110
3.1.3.- Periodo de diseño	112
3.1.4.- Número de repeticiones esperadas para cada eje	112
3.1.4.1.-Factores que afectan las repeticiones esperadas para cada eje	
3.1.4.1.1.-Tránsito promedio diario anual	112
3.1.4.1.2.-Porcentaje del tránsito promedio diario anual para cada tipo de eje	112
3.1.4.1.3.-Factor de crecimiento anual	113
3.1.4.1.4.-Factor de sentido	114
3.1.4.1.5.-Factor de carril	114
3.1.4.1.6.-Días de un año	115
3.1.5.- Factor de seguridad de carga	115
3.1.6.-Tipo de junta y acotamiento	116
3.2.-Criterios de diseño considerados por el método de la PCA	120
3.2.1.-Análisis por fatiga	120
3.2.2.-Análisis por erosión	122
3.3.- Consideraciones generales de proyecto para el Centro Operativo Estafeta	128
3.4.- Diseño estructural de pavimento rígido para el Centro Operativo Estafeta	129
Conclusión	146
Apéndice 1. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos	152
Apéndice 2. Abreviaturas	156
Apéndice 3. Glosario	157
Bibliografía	158

INTRODUCCIÓN

El trabajo se enfoca en el diseño estructural de un pavimento rígido para el Centro Operativo Estafeta, específicamente en el espesor ya que juega un papel importante en la capacidad estructural y esto remarca que es necesario seleccionar uno o varios métodos de diseño y comprender sus pasos de diseño para realizar una estructuración adecuada.

Para el diseño estructural se ha elegido el método AASHTO y de la PCA, ambos son usados y aceptados a nivel mundial. Estos métodos se basan en experiencias del funcionamiento en campo comparado con otros resultados, es decir, son empíricos o semiempíricos.

En estos métodos se idealiza la estructura para poder estudiar los efectos de las acciones o solicitaciones a las que puede estar sometida la estructura. Esta idealización es necesaria, porque el problema real siempre es más complejo que lo que es práctico analizar. El grado de precisión que trata de obtenerse depende de la importancia de la estructura y de la posibilidad de conocer las acciones que realmente actuarán sobre la estructura. En pocas palabras en el proceso de diseño es de gran importancia la intuición y la capacidad creativa e innovadora, para obtener la mejor de todas las soluciones posibles, es decir, lo que es óptimo para el proyecto, ya que no existen soluciones únicas, sino solamente razonables.

De manera general el trabajo está compuesto por tres capítulos, en el primero presenta un concepto de pavimento rígido, los tipos de junta más usados en la práctica, la clasificación de los pavimentos rígidos según los métodos usados en el trabajo y los factores que afectan el diseño estructural del pavimento.

En los capítulos 2 y 3 se desarrollan los métodos AASHTO y de la PCA, respectivamente. Para cada método se dan a conocer las variables de diseño y se aplican para determinar el espesor de pavimento rígido óptimo para el Centro Operativo Estafeta.

Para el capítulo 1 mi propósito es dar a conocer los temas esenciales que debe saber el diseñador y no es mi propósito profundizar demasiado en cada tema; y no se pretende dar el proceso de diseño de cada método tratado, sino de proporcionar sugerencias obtenidas de la diferentes fuentes bibliográficas, de mi criterio y de las experiencias que me fueron compartidas para el desarrollo de este tema.

CAPÍTULO 1 PAVIMENTO RÍGIDO

Objetivo particular: Conceptualizar, conocer los tipos de juntas y su clasificación de un pavimento rígido, así como explicar de una manera general los factores que afectan el diseño estructural del pavimento rígido.

- 1.1 .-Concepto de pavimento rígido
- 1.2 .-Tipos de junta de un pavimento rígido
- 1.3 .-Clasificación de un pavimento rígido
- 1.4 .-Factores que afectan el diseño estructural de un pavimento rígido

1.1.-CONCEPTO DE PAVIMENTO RÍGIDO

Un pavimento rígido es aquel formado por una losa de concreto hidráulico con o sin acero de refuerzo en su masa, subdividida en tableros por medio de juntas de forma regular, donde se conecta cada tablero por medio de barras de acero o por una sección endentada realizada en la unión, la losa se apoya sobre una superficie que debe proporcionar la suficiente uniformidad y estabilidad durante el periodo o vida de diseño, puede apoyarse sobre el terreno natural(subrasante), colocarse sobre un suelo mejorado sobre el existente o una capa de material granular (subbase o base), figura 1.1.



Figura 1.1. Pavimento de concreto hidráulico.

1.2.-TIPOS DE JUNTA DE UN PAVIMENTO RÍGIDO

Las juntas en un pavimento rígido son cortes que se realizan en lugares previamente determinados, donde fueron colocadas barras de acero o se realizó un endentado en la junta, además de tener la geometría para poder colocarse el material que servirá para proteger a la misma junta y capas inferiores (figura 1.2).



Figura 1.2. Junta colocada de manera transversal.

Los objetivos de realizar una junta en un pavimento de concreto hidráulico es:

1. Mantener una continuidad entre las losas.
2. Transmitir las cargas de manera eficiente entre las losas adyacentes.
3. Proteger las capas inferiores.
4. Controlar el agrietamiento y su ubicación.
5. Permitir el movimiento de la losa de una manera controlada.
6. Mantener niveladas las losas.

Es necesario diseñar un sistema adecuado de juntas donde se deberán analizar las siguientes consideraciones:

Condiciones ambientales: Los cambios de temperatura y humedad inducen movimientos en la losa que originan a su vez concentraciones de esfuerzos, alabeo y ondulación.

Espesor de la losa: El espesor del pavimento afecta los esfuerzos de ondulación y las deflexiones debidas a transferencia de carga.

Transferencia de carga: La transferencia de cargas es necesaria a través de cualquier junta de pavimento. Sin embargo, la magnitud de la transferencia necesaria de carga varía según el tipo de junta. Cuando se usan pasajuntas o varillas de amarre, el tipo y diámetro de las varillas escogidas será un factor que deberá tomarse en cuenta para el diseño de la junta.

Tráfico: Las condiciones de tráfico son un factor extremadamente importante en el diseño de las juntas. La clasificación del tráfico, la canalización, las desviaciones de los vehículos y la predominancia de las cargas de borde, afecta los requisitos de comportamiento a largo plazo.

Características de los materiales para el concreto: Los materiales que constituyen el concreto influyen en su resistencia y en las especificaciones de las juntas. Los materiales seleccionados para fabricar el concreto determinan la contracción de la losa. El agregado grueso afecta el coeficiente térmico del concreto. Además, los materiales de mala calidad tienen un efecto perjudicial en el comportamiento de las juntas. El agrietamiento en el espesor y el despostillamiento, se produce por el uso de materiales constituyentes de mala calidad y se concentra a lo largo de las juntas.

Tipo de subbase: Los valores de apoyo y las características de fricción entre superficies de contacto de los diferentes tipos de subbase, afectan el movimiento y el apoyo de las losas.

Características del sellador de juntas: La separación de la junta afectará el tipo de sellador de juntas seleccionado. Otros aspectos, tales como factores de forma adecuados y costos del ciclo de vida también influye en la selección del sellador.

Diseño de acotamiento: El tipo de acotamiento (concreto ligado, asfalto, material granular o material térreo) afecta el apoyo en los bordes y la capacidad de las juntas de eje principal para transferir la carga. Los carriles extremos ampliados han resultado efectivos para conservar la transferencia de carga.

Comportamiento histórico: Los registros locales de comportamiento constituyen una fuente excelente para establecer el diseño de juntas. Sin embargo, las mejoras hechas a diseños anteriores aplicando la tecnología actual y nuevos materiales puede mejorar significativamente el comportamiento de las juntas.

En pocas palabras es necesario conocer que es una junta, su objetivo y los factores que afectan su diseño para un pavimento rígido. Pero primeramente es necesario distinguir la clasificación de las juntas en función del agrietamiento; generalmente aparecen de manera longitudinal y transversal en el pavimento de concreto hidráulico, por tal motivo, las juntas se clasifican de manera general en (figura 1.3):

- Junta transversal(a).
- Junta longitudinal(b)

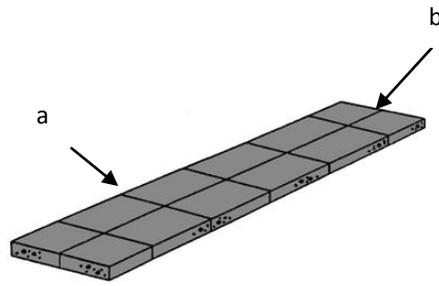


Figura 1. 3. Junta transversal y longitudinal.

Y de acuerdo a la necesidad de poder controlar en la losas la contracción, expansión y por método constructivo, se subdivide en (figura 1. 4):

Junta transversal:

- De contracción
- De expansión
- De construcción

Junta longitudinal:

- De contracción
- De construcción

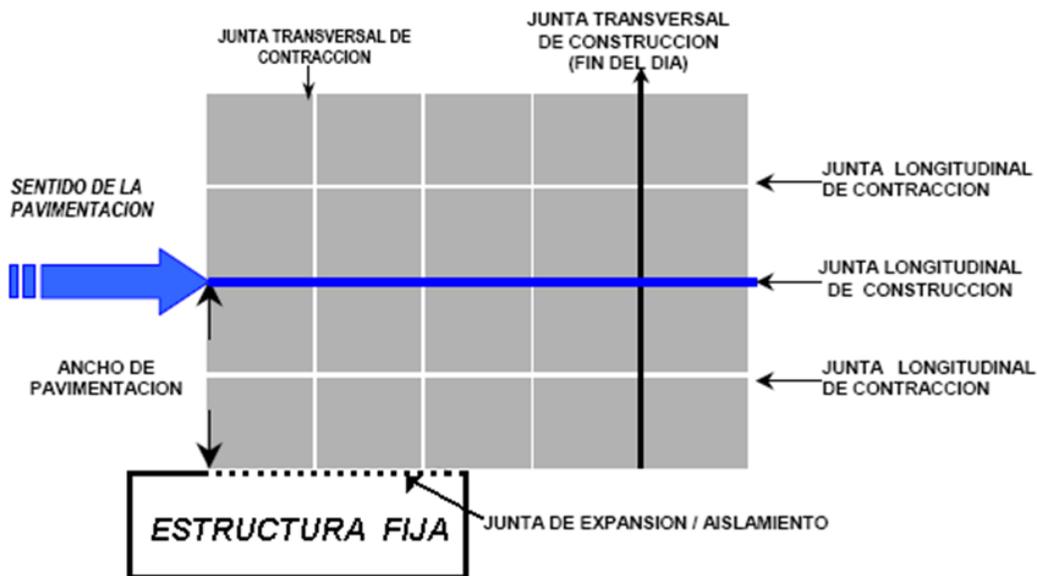


Figura 1.4. Tipos de juntas en un pavimento rígido visto en planta.

A continuación se hará una explicación breve de cada una de las subdivisiones, de la junta transversal y longitudinal.

Juntas transversal de contracción.

Es necesario este tipo de junta debido a una disminución de temperatura y humedad que provoca una contracción en la losa, esta junta se realiza en todo el ancho del pavimento. Este tipo de junta utiliza un mecanismo de transferencia de carga que puede ser mediante la trabazón de agregados, o utilizar un pasajuntas (figura 1.5 y 1.6).

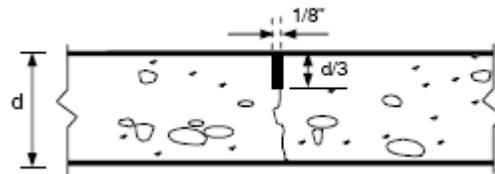


Figura 1. 5. Junta transversal de contracción sin pasajuntas.

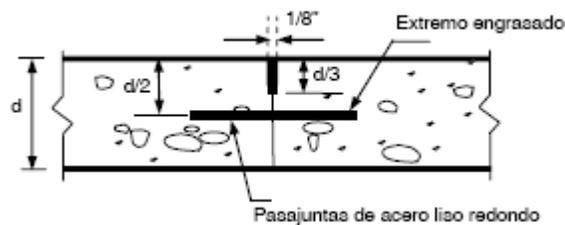


Figura 1. 6. Junta transversal de contracción con pasajuntas.

Junta longitudinal de contracción.

Se colocan en toda la longitud del pavimento, por necesidades constructivas ya sea para dividir carriles y por la facilidad de colar por franjas el pavimento que contendrá dos o más carriles. A diferencia de la junta de contracción transversal que utiliza pasajuntas, en esta se usa una barra de amarre (figura 1.7 y 1.8).

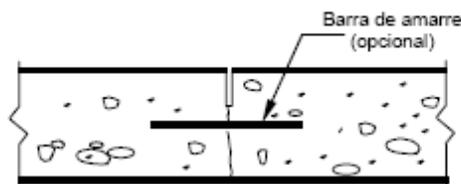


Figura1.7. Junta longitudinal de contracción en toda la longitud del área por pavimentar.

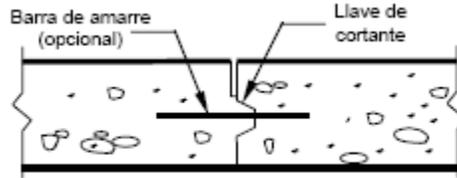


Figura 1.8. Junta longitudinal, pavimentación por franjas.

Junta transversal de expansión.

Es necesario este tipo de juntas para evitar el daño que puede provocar el pavimento a estructuras fijas o viceversa, debido al movimiento que se presente, las estructuras pueden ser un puente, alcantarillas, boca tormentas o cualquier estructura colocada dentro del pavimento y/o de manera adyacente al pavimento. En esta junta es necesario realizar un corte en todo el espesor de la losa de manera uniforme donde se coloca un relleno en casi todo el corte y se coloca un sellador en la parte superior, puede utilizar un mecanismo de transferencia (pasajuntas) o carecer del mecanismo (figura 1.9 y 1.10).

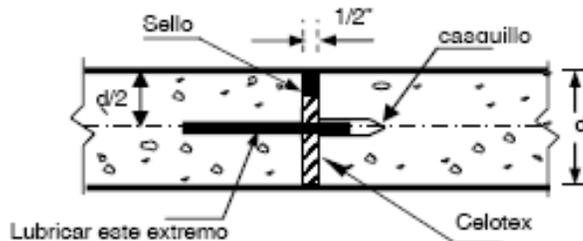


Figura 1.9. Junta de expansión con pasajuntas.

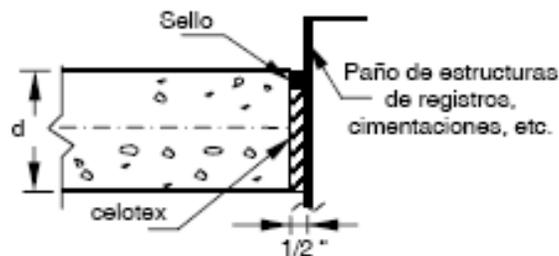


Figura 1.10. Junta de expansión, sin pasajunta.

Junta transversal de construcción.

Son necesarias cuando se retrasan las entregas de concreto a la obra y evitar la formación de una junta fría; por la necesidad de colocar una estructura no prevista, como alcantarillas, realizar aproches; por término de la jornada laboral, etc. En la junta el mecanismo de transferencia de carga que se puede utilizar es una barra de amarre o pasajunta (figura 1.11 y 1.12).

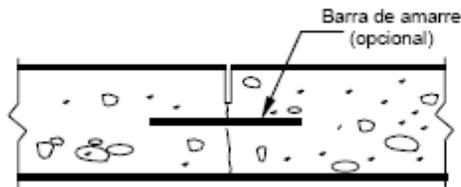


Figura 1.11. Junta transversal de construcción con barra de amarre.

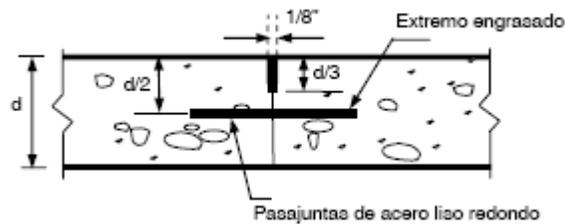


Figura 1.12. Junta transversal de construcción con pasajunta.

Junta longitudinal de construcción.

Se colocan en toda la longitud del pavimento, se realiza ya sea por la facilidad de colar por franjas el pavimento, para dividir los carriles y unir con estructuras adyacentes. A diferencia de la junta transversal de construcción en esta se utiliza una barra de amarre (figura 1.13).

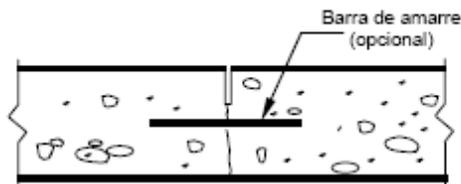


Figura 1.13. Junta longitudinal de construcción con barras de amarre.

1.3.-CLASIFICACIÓN DE UN PAVIMENTO RÍGIDO

La clasificación de un pavimento rígido está en función de la cantidad de acero utilizado y de la separación de las juntas.

La clasificación de un pavimento rígido se divide en:

1. Pavimento rígido simple.
2. Pavimento rígido con refuerzo simple.
3. Pavimento rígido con refuerzo continuo.

1. Pavimento rígido simple.

No tiene ninguna cantidad de acero y las juntas se colocan a distancias relativamente cortas.

2. Pavimento rígido con refuerzo simple.

Se coloca una cantidad de acero, que puede ser, pasajuntas o barras de amarre, la separación de las juntas es un poco mayor al pavimento rígido simple.

3. Pavimento rígido con refuerzo continuo.

Se utiliza acero de refuerzo continuo y pasajuntas en las juntas (construcción o expansión) que tiene una separación mucho mayor a las anteriores.

1.4.-FACTORES QUE AFECTAN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN PAVIMENTO RÍGIDO.

De manera general los factores que afectan el diseño estructural de un pavimento rígido son:

- 1.4.1 Tránsito.
- 1.4.2 Características de los materiales.
- 1.4.3 Factores regionales.
- 1.4.4 Construcción.

1.4.1 TRÁNSITO.

Los mayores esfuerzos en un pavimento, son provocados por el tránsito que utiliza o utilizará esta vía de comunicación, por tal motivo, es necesario considerarlo para realizar un diseño estructural adecuado y evitar la falla funcional del pavimento.

Del tránsito es necesario conocer la composición de vehículos de la zona en estudio y la tasa de crecimiento vehicular. De manera específica se debe conocer las características estáticas de cada vehículo como son:

1. Tipo de ejes.
2. Número de ejes y llantas.
3. Arreglo de las llantas.
4. Presión de inflado y de contacto de las llantas.
5. Peso del vehículo vacío y cargado en cada eje.

Además es indispensable obtener el tránsito promedio diario anual (TPDA) con el método de aforo y estadístico más adecuado y obtener el porcentaje que circulará en el carril donde se piensa que existe el mayor volumen de tránsito (carril de diseño). El TPDA obtenido, es necesario proyectarlo para el periodo de diseño del proyecto, teniendo en cuenta la tasa de crecimiento vehicular.

1.4.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.

Sin duda, las propiedades de los materiales constituyen uno de los factores más importantes en el diseño estructural del pavimento que presenta durante su vida útil.

Materiales a usar en la construcción de un pavimento rígido:

- 1.4.2.1 Terreno de cimentación.
- 1.4.2.2 Concreto hidráulico.
- 1.4.2.3 Acero de refuerzo.
- 1.4.2.4 Sello de las juntas.

1.4.2.1. Terreno de cimentación.

Las capas de apoyo del pavimento de concreto podrán ser el terreno natural, o una capa de transición o de subbase, afín de que cumpla con la función estructural, para que de esta manera los espesores requeridos para el pavimento sean menores.

En el diseño del pavimento es necesario determinar las propiedades de los materiales de las capas de apoyo, que nos permitirá conocer sus características generales y comportamiento.

Por todo lo anterior es necesario conocer:

- A. El tipo de suelo.
- B. La clasificación del suelo.
- C. Propiedades del suelo.
- D. Tratamiento de los suelos.

A. Tipo de suelo.

Es importante primero recolectar información existente sobre el tipo y las características del suelo del área donde se va a pavimentar, ya sea por medio de mapas geológicos, fotografías aéreas existentes, investigación en pozos a cielo abierto, cortes existentes, revisar el diseño y la construcción de otros pavimentos del área, esto servirá para desarrollar la comprensión de las condiciones del suelo en el área y para identificar cualquier problemas que pueden existir.

El siguiente paso es obtener e investigar suficientes muestras de suelo a lo largo de la ruta, para trazar un perfil del suelo, utilizado ya sea un método directo o indirecto.

B. Clasificación del suelo.

La clasificación sirve como un medio de identificación de los materiales idóneos de la zona o de bancos, para usarse en la subbase y de la predicción del comportamiento probable del suelo cuando se utiliza como material para subrasante.

Con la clasificación puede predecirse las propiedades técnicas de un suelo, aunque no es un sustituto de la investigación detallada de las propiedades del suelo.

C. Propiedades del suelo.

Las propiedades del suelo influyen en su comportamiento cuando están sujetas a cargas externas y es conocido que un depósito de suelo puede tener propiedades heterogéneas y depende de las condiciones de dicho suelo en el momento en que está siendo probado para conocer sus propiedades.

Alguna de las propiedades básicas que debe conocerse son las siguientes:

- El suelo es un sistema trifásico que consta de agua, aire y sólidos.
- Porosidad (cantidad relativa de vacíos).
- Relación de vacíos.
- Contenido de humedad.
- Grado de saturación.
- Peso específico del suelo:
 - Peso específico de la muestra.
 - Peso específico en seco.
 - Peso específico sumergido.
- Plasticidad.
- Permeabilidad.
- Resistencia al esfuerzo cortante. (Esta depende de la cohesión y del ángulo de fricción interna.)

Estas propiedades pueden obtenerse mediante las pruebas:

- Plasticidad.
- Proctor modificada.
- Porter estándar.
- Valor relativo de soporte o CBR.
- Módulo de reacción.
- Módulo de resiliencia.

Plasticidad.

Se determina empleado materiales que pasan la malla número 40, aplicando la metodología para determinar los límites de Atterberg:

- Límite líquido.
- Límite plástico.
- Límite contracción.

Prueba Proctor modificada (norma AASHTO T-180).

Se usa para la determinación del peso por unidad de volumen cuando el suelo ha sido compactado por el procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad, para el suelo que pasen totalmente la malla número 4, ó con retención de 10% en esta malla, pero que dicho retenido pase totalmente por la malla 3/8". La compactación mínima debe ser del 95%.

Prueba Porter modificada.

Esta prueba se aplica para la determinación del peso volumétrico seco máximo de compactación y la humedad óptima en el suelo con material mayor de 3/8", a las cuales no se les puede hacer la prueba Proctor. Con esta prueba se determina también la calidad de los suelos en cuanto a valor de soporte se refiere, midiendo la resistencia a la penetración del suelo compactado y sujeto a un determinado periodo de saturación.

Valor relativo de soporte.

El valor soporte de california (CBR), también conocido como valor relativo de soporte (VRS), es una prueba de penetración en un material con determinadas condiciones de compactación y humedad, para conocer sus características de resistencia al esfuerzo cortante y de esfuerzo-deformación.

Módulo de reacción (K).

Se debe tomar como parámetro de resistencia de la carga subrasante el valor del módulo de reacción (K), cuando las losas van apoyadas directamente sobre ella o en su caso adoptar el valor del módulo de reacción del conjunto subrasante-subbase.

Esta característica de resistencia se considera constante, lo que implica elasticidad del suelo. Su valor numérico depende de la textura, compacidad, humedad y otros factores que afectan la resistencia del suelo, lo que incide directamente en el diseño del espesor del pavimento.

La determinación de k (módulo de reacción) se hace mediante una placa circular de 30" de diámetro bajo una presión tal que produzca una deformación del suelo de 0.127 cm (0.05") (norma ASTM D1195 y D1196), figura 1.14. En general se puede decir que el módulo de reacción (k) es igual al coeficiente del esfuerzo aplicado por la placa entre la deformación correspondiente producida por este esfuerzo.



Figura 1.14. Prueba de placa.

Módulo de resiliencia.

El parámetro módulo de resiliencia, a través de las investigaciones, se ha constituido como un elemento fundamental en el diseño de pavimentos y ha despertado gran interés en el desarrollo de procedimientos de diseño con bases mecanicistas; los cuales lo introducen como un elemento que caracteriza de manera racional el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales que conforman la estructura.

Durante pruebas de carga repetida (norma AASHTO T274-82) se observa que después de un cierto número de ciclos de carga, el módulo llega aproximadamente a ser constante y la respuesta del suelo puede asumirse como elástica. Al módulo que permanece constante se le llama módulo de resiliencia. Este concepto aplica tanto para suelos finos como para materiales granulares. Así entonces, el concepto de módulo de resiliencia está ligado invariablemente a un proceso de carga repetida.

Módulo resiliencia (Seed et al, 1962), definido como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable, siendo este equivalente al módulo de Young (módulo de elasticidad) y se representa como sigue:

$$Mr = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{axial}}$$

Donde:

Mr = Módulo de resiliencia

σ_d = Esfuerzo desviador

ϵ_{axial} = Deformación recuperable

Existe una gran variedad de dispositivos que son utilizados para la medición del módulo de resiliencia, por ejemplo:

- Equipo triaxial cíclico
- Columna resonante
- Máquina servohidráulica universal

Es necesario remarcar que el módulo de resiliencia no es constante sino que depende de varios factores.

Lo anterior es con la finalidad de permitir identificar los suelos adecuados y decidir si pueden utilizarse en algunas de las capas estructurales y si no cumple realizar un tratamiento de los materiales con la finalidad de permitir realizar una estructuración racional de la sección transversal del pavimento.

D. Tratamiento de los materiales.

Cuando los materiales no cumplen con los requisitos para utilizarse en la subrasante o subbase es necesario realizar uno o varios tratamientos para mejorar sus características.

Principales tratamientos:

- Disgregación.
- Cribado.
- Trituración.
- Compactación.
- Estabilización.

Disgregación.

Se utiliza en materiales finos agrumados, en materiales granulares poco o medianamente cementados y en rocas alteradas (reducción de tamaño).

Cribado.

En un material granular, para mejorar su granulometría.

Trituración.

Reducir el tamaño de las partículas mayores que el máximo requerido, puede ser parcial o total.

Compactación.

Tiene la finalidad de aumentar el peso específico del suelo en un tiempo relativamente corto, con el fin que resistan las cargas y tengan una relación esfuerzo deformación conveniente durante su vida útil. Para la compactación es necesario conocer, el tipo de suelo, el peso específico seco máximo y la humedad óptima, con la finalidad de elegir el tipo de procedimiento y obtener el grado de compactación que mejore de una manera conveniente

Estabilización.

Estabilización de materiales, este tipo de tratamiento se divide en:

1. Mecánicas.
2. Químicas.

1. Mecánicas:

- Para mejorar la granulometría.
- Para reducir la plasticidad.
- Para aumentar el valor cementante.

2. Químicas:

- Usando cal o cemento, con la finalidad de bajar la plasticidad y aumentar la resistencia.

1.4.2.2 CONCRETO HIDRÁULICO.

Primeramente el concreto es producto de la mezcla de cemento, agregados, agua y en algunos casos aditivos, esta mezcla podrá ser moldeada y compactada con una relativa facilidad, pero irá perdiendo esta característica hasta que se torna rígida y comienza adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un sólido y convertirse en el material mecánicamente resistente.

El comportamiento mecánico de este material y su durabilidad en servicio depende de tres aspectos básicos:

1. Las características, composición y propiedades de la pasta de cemento, o matriz cementante, endurecida.
2. La calidad propia de los agregados, en el sentido más amplio.
3. La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto.

En el primer caso la selección de un cementante apropiado, el empleo de una relación agua–cemento conveniente y el uso eventual de un aditivo necesario, con lo cual queda asegurada la calidad de la matriz cementante.

En cuanto a la calidad de los agregados, es importante adecuarla a las funciones que debe desempeñar la estructura, a fin de que no represente el punto débil en el comportamiento del concreto y en su capacidad para resistir adecuadamente y por largo tiempo los efectos consecuentes de las condiciones de exposición y servicio a que este sometido.

Finalmente la compatibilidad y el buen trabajo del conjunto de la matriz cementante con los agregados, depende de diversos factores tales como las características físicas y químicas del cementante, la composición mineralógica y petrográfica de las rocas que constituyen los agregados, y la forma, tamaño máximo y textura superficial de estos.

De la esmerada atención a estos tres aspectos básicos, depende sustancialmente la capacidad potencial del concreto, como material de construcción, para responder adecuadamente a las acciones resultantes de las condiciones que debe prestar servicio. Pero esto, que solo representa la previsión de emplear el material potencialmente adecuado, no basta para obtener estructuras resistentes y durables, pues requiere conjugarse con el cumplimiento de previsiones igualmente eficaces en cuanto al diseño, especificación, construcción y mantenimiento de la propia estructura.

A continuación se analizara los componentes del concreto:

- A. Cemento.
- B. Agregado.
- C. Agua.
- D. Aditivos.

A. Cemento.

En el mercado existen diversas clases de cementos hidráulicos con diferente composición y propiedades, en México se usa la clase Pórtland, que se obtiene mediante un proceso industrial, pulverizando a un grado de finura determinado una mezcla fría de arcilla y materiales calcáreos, previamente sometida a cocción, que se denomina clinker Pórtland, al cual se le adiciona sulfato de calcio como anhidrita (CaSO_4), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), para regular el tiempo de fraguado. Según las propiedades que se requieran o para auxiliar la molienda, además se le pueden incorporar otros materiales como:

- Puzolanas que son materiales naturales, artificiales o subproductos industriales silíceos o silicoaluminosos, o una combinación de ambos, los cuales no endurecen por sí mismos, pero finamente molidos, reaccionan en presencia de agua a la temperatura ambiente con el hidróxido de calcio y forman compuestos con propiedades cementantes.
- Escoria granulada de alto horno, es decir, el residuo no metálico que se obtiene en el alto horno por la fusión de minerales de hierro, enfriado bruscamente con agua o vapor y aire, compuesto principalmente por silicatos y aluminosilicatos cálcicos.
- Humo de sílice, que es una puzolana muy fina constituida esencialmente por sílice amorfa, obtenida como un subproducto de la fabricación de silicio o aleaciones con arco eléctrico de ferro-silicio.
- Caliza, que es un material de naturaleza inorgánica de origen mineral carbonatado, compuesto principalmente por carbonatos de calcio en forma de calcita.

En la actualidad el cemento Pórtland se clasifica (norma de la SCT N.CMT.2.002/02):

1. Según su composición
2. Según su resistencia a la compresión
3. Según sus características especiales

1. Según su composición.

Tipo CPO (cemento Pórtland ordinario).

El producido mediante la molienda del clinker Pórtland y sulfato de calcio. Cuando el proyecto no establezca el tipo de cemento Pórtland por usar en cada caso, se entenderá que se trata de cemento tipo CPO.

Tipo CPP (cemento Pórtland puzolánico).

El que resulta de la molienda conjunta del clinker Pórtland, puzolanas y sulfato de calcio.

Tipo CPEG (cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno).

El producido mediante la molienda conjunta del clinker Pórtland, escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio.

Tipo CPC (cemento Pórtland compuesto).

El que se obtiene de la molienda conjunta del clinker Pórtland, puzolanas, escoria de alto horno, caliza y sulfato de calcio. En este tipo de cemento la caliza puede ser el único componente adicional al clinker Pórtland con el sulfato de calcio.

Tipo CPS (cemento Pórtland con humo de sílice).

El que resulta de la molienda conjunta del clinker Pórtland, humo de sílice y sulfato de calcio.

Tipo CEG (cemento con escoria granulada de alto horno).

El producido mediante la molienda conjunta del clinker Pórtland, sulfato de calcio y mayoritariamente escoria granulada de alto horno.

2. Según su resistencia mecánica a la compresión.

Según su resistencia mecánica a la compresión los cementos Pórtland se clasifican en las clases resistentes que se indican en la tabla 1.1.

Tabla1.1. Clases resistentes de los cementos Pórtland.

Unidades en MPa(kg/cm²)

Clase resistente	Resistencia a la compresión.		
	A 3 días ^[1]	A 28 días ^[2]	
	Mínimo	Mínimo	Máximo
20	-	20(204)	40(408)
30	-	30(306)	50(510)
30R	20(204)	30(306)	50(510)
40	-	40(408)	-
40R	30(306)	40(408)	-

[1]Correspondiente a la resistencia inicial del concreto

[1]Correspondiente a la resistencia normal del concreto

3. Según sus características especiales.

Los cementos Pórtland pueden presentar una o más de las características especiales que se indican en la tabla 1.2

Tabla1.2. Características especiales de los cementos Pórtland.

Características especiales	Nomenclatura
Resistente a lo sulfatos	RS
Baja reactividad álcali-agregado	BRA
Bajo calor de hidratación	BCH
Blanco	B

Asimismo, los cementos Pórtland cumplirán con los requisitos de calidad con respecto a:

- A. Composición del cemento.
- B. Requisitos físicos.

A. Composición del cemento (norma de la SCT N.CMT.2.002/02).

- La composición de los diferentes tipos de cemento Pórtland estará comprendida dentro de los límites que se establecen en la tabla1.3.
- El contenido de carbonato de calcio (CaCO_3) en la caliza que se utilice como componente principal del cemento Pórtland compuesto (CPC), determinado mediante cualquier método de análisis convencional, será como mínimo de setenta y cinco (75) por ciento en masa.
- En cualquier tipo de cemento Pórtland el contenido máximo de trióxido de azufre (SO_3) será tal que no cause una expansión mayor de cero coma cero dos (0,02) por ciento a los catorce (14) días de inmersión en agua, determinada de acuerdo con el procedimiento descrito en el manual M-MMP-2-02-011, de la SCT, “Expansión potencial por la acción de los sulfatos”.

Tabla 1.3. Composición de los cementos Pórtland.

Unidades en % en masa

Cemento Pórtland		Clinker Pórtland + Sulfato de calcio	Componentes principales				Componentes minoritarios
Tipo	Denominación		Puzolanas [1]	Escoria granular de alto horno	Humo sílice	Caliza	
CPO	Cemento Pórtland ordinario	95-100	--	--	--	--	0-5
CPP	Cemento Pórtland puzolánico	50-94	6-50	--	--	--	0-5
CPEG	Cemento Pórtland con escoria granular de alto horno	40-94	--	6-50	--	--	0-5
CPC [3]	Cemento Pórtland compuesto	50-94	6-35	6-35	1-10	6-35	0-5
CPS	Cemento Pórtland con humo de sílice	90-99	--	--	1-10	--	0-5
CEG	Cemento con escoria granular	20-39	--	61-80	--	--	0-5

[1] Las puzolanas pueden ser naturales, artificiales y cenizas volantes.

[2] Los componentes minoritarios pueden ser uno o más de los componentes principales, salvo que estén incluidos ya como tales en el cemento.

[3] Las puzolanas pueden ser naturales, artificiales y cenizas volantes

B. Requisitos físicos (norma de la SCT N.CMT.2.002/02).

Resistencia a la compresión.

Las resistencias mecánicas a la compresión, inicial y normal, determinadas de acuerdo con el procedimiento descrito en el manual M-MMP-2-02-004 de la SCT, "Resistencia a la compresión del cemento", de cualquier tipo de cemento Pórtland, serán las indicadas en la tabla 1.1.

Tiempo de fraguado.

Para cualquier tipo de cemento Pórtland y todas las clases resistentes, los tiempos de fraguado inicial y final serán como mínimo de cuarenta y cinco (45) y seiscientos (600) minutos, respectivamente, determinados de acuerdo con el procedimiento descrito en el manual M-MMP-2-02-006, de la SCT, "Tiempo de fraguado del cemento por el método de Vicat".

Estabilidad de volumen.

Para cualquier tipo de cemento Pórtland y todas las clases resistentes, la expansión y la contracción serán como máximo de cero coma ocho (0,8) por ciento y cero coma dos (0,2) por ciento, respectivamente, determinadas de acuerdo con el procedimiento descrito en el manual M·MMP·2·02·009, de la SCT, “Sanidad del cemento”.

Actividad puzolánica.

Para los componentes principales, el índice de actividad determinado de acuerdo con el procedimiento descrito en el manual M·MMP·2·02·010, de la SCT, “Actividad puzolánica del cemento”, con cemento Pórtland ordinario CPO 30, a veintiocho (28) días, será como mínimo de setenta y cinco (75) por ciento con las adiciones de puzolanas o de escoria granulada de alto horno y de cien (100) por ciento con las adiciones de humo de sílice.

Expansión por ataque de sulfatos.

La expansión por ataque de sulfatos en los cementos Pórtland de cualquier tipo y clase resistente, con la característica especial RS (resistentes a los sulfatos) será como máximo de cero coma cero cinco (0,05) por ciento a seis (6) meses y de cero coma uno (0,1) por ciento a un (1) año, determinada de acuerdo con el procedimiento descrito en el manual M·MMP·2·02·012, de la SCT, “Expansión por ataque de sulfatos”.

Expansión por reacción álcali-agregado.

La expansión por reacción álcali-agregado en los cementos Pórtland de cualquier tipo y clase resistente, con la característica especial BRA (baja reactividad álcali-agregado) será como máximo de cero coma cero dos (0,02) por ciento a catorce (14) días y de cero coma cero seis (0,06) por ciento a veintiocho (28) días, determinada de acuerdo con el procedimiento descrito en el manual M·MMP·2·02·034, de la SCT, “Reactividad potencial de los agregados mediante barras de mortero”.

Calor de hidratación.

El calor de hidratación de los cementos Pórtland de cualquier tipo y clase resistente, con la característica especial BCH (bajo calor de hidratación) será como máximo de doscientos cincuenta (250) y de doscientos noventa (290) kilojoules por kilogramo, a siete (7) y veintiocho (28) días, respectivamente, determinado de acuerdo con el procedimiento descrito en el manual M·MMP·2·02·013, de la SCT, “Calor de hidratación del cemento”.

Blancura.

La blancura de los cementos Pórtland de cualquier tipo y clase resistente, con la característica especial B (blanco) será como mínimo de setenta (70) por ciento, determinada de acuerdo con el procedimiento descrito en el manual M·MMP·2·02·014, de la SCT, “Blancura del cemento”.

En pocas palabras, la influencia que el cemento portland ejerce en el comportamiento y propiedades de la pasta de cemento y del concreto derivan fundamentalmente de la composición química del clínter y de su finura de molienda.

Cemento recomendados por su efecto en el concreto.

Las condiciones que deben tomarse en cuenta para especificar el concreto idóneo y seleccionar el cemento adecuado para una obra, pueden determinarse por la indagación oportuna de dos aspectos principales, como son:

1. Las características propias de la estructura y de los equipos y procedimientos previstos para construirla.
2. Las condiciones de exposición y servicio del concreto, dada por las características del medio ambiente y de su medio de contacto y por los efectos previsibles resultantes del uso destinado de la estructura.

Existen diversos aspectos del comportamiento del concreto en estado fresco o endurecido que pueden ser modificados mediante el empleo de un cemento adecuado, son las siguientes:

Concreto fresco.

1. Cohesión y manejabilidad.
2. Pérdida de revenimiento.
3. Asentamiento y sangrado.
4. Tiempo de fraguado.

Concreto endurecido.

1. Adquisición de resistencia mecánica.
2. Generación de calor.
3. Resistencia al ataque de sulfatos.
4. Estabilidad dimensional (cambios volumétricos).
5. Estabilidad química (reacciones cemento agregado).

Estabilidad química.

De tiempo atrás se reconoce que ningún agregado es completamente inerte al permanecer en contacto con la pasta de cemento, debido a diversos procesos y reacciones químicas que en distinto grado suelen producirse entre ambos. Algunas de estas reacciones son benéficas porque contribuyen a la adhesión del agregado con la pasta, mejorando las propiedades mecánicas del concreto, pero otras son perjudiciales porque generan expansiones internas que causan daño y pueden terminar con el concreto.

B. Agregado.

Los agregados son materiales pétreos naturales seleccionados; materiales sujetos a tratamientos de disgregación, cribado, trituración o lavado, o materiales producidos por expansión, calcinación o fusión excipiente.

Los agregados para concreto hidráulico se clasifican en:

1. Agregado fino.
2. Agregado grueso.

Las características y propiedades de los agregados tienen mucha influencia en el concreto. En manera de síntesis se muestra la tabla 1.4 donde se relaciona las características de los agregados y los correspondientes aspectos del comportamiento del concreto en el que ejerce mayor influencia tanto para el caso del concreto recién mezclado como ya en estado endurecido.

Tabla 1.4. Influencia del agregado en el concreto.

Característica de los materiales.	Aspectos influidos en el concreto	
	Concreto fresco	Concreto endurecido
Granulometría	Manejabilidad Requerimiento de agua Sangrado	Resistencia mecánica Cambios volumétricos Economía
Limpieza(materia orgánica, limo, arcilla y otros finos indeseables)	Requerimiento de agua Contracción plástica	Durabilidad Resistencia mecánica Cambios volumétricos
Densidad(gravedad específica)	Peso unitario	Peso unitario
Absorción y porosidad	Perdida de revenimiento Contracción plástica	Durabilidad Permeabilidad
Forma de las partículas	Manejabilidad Requerimiento de agua Sangrado	Resistencia mecánica Cambios volumétricos Economía
Textura superficial	Manejabilidad Requerimiento de agua	Durabilidad Resistencia al desgaste Economía
Tamaño máximo	Segregación Peso unitario Requerimiento de agua	Resistencia mecánica Cambios volumétricos Peso unitario Permeabilidad Economía
Reactividad con los álcalis		Durabilidad
Módulo de elasticidad		Módulo de elasticidad Cambios volumétricos
Resistencia a la abrasión		Resistencia a la abrasión Durabilidad
Resistencia mecánica (por aplastamiento)		Resistencia mecánica
Partículas friables y terrones de arcilla	Contracción plástica	Resistencia mecánica Durabilidad Reventones superficiales
Coeficiente de expansión térmica		Propiedades térmicas

C. Agua.

En relación con su empleo en el concreto, el agua tienen dos diferentes aplicaciones: como ingrediente en la elaboración de las mezclas y como medio de curado de las estructuras recién construidas.

Una práctica común consiste en utilizar el agua potable para fabricar concreto sin ninguna verificación previa, suponiendo que toda agua que es potable también es apropiada para elaborar concreto; sin embargo, hay ocasiones en que esta presunción no se cumple, porque hay aguas potables aderezadas con citratos o con pequeñas cantidades de azúcares que no afectan su potabilidad pero pueden ser inadecuadas para la fabricación de concreto. En todo caso, la consideración contraria pudiera ser más conveniente, es decir, que el agua para la elaboración del concreto no necesariamente requiere ser potable, aunque si debe satisfacer determinados requisitos mínimos de calidad.

Además debe estar libre de cualquier materia orgánica y sólidos en suspensión. En pocas palabras, es necesario determinar en primer término las características físico-químicas del agua y si estas son adecuadas, proceder a verificar sus efectos en el concreto.

Calidad del agua para concreto hidráulico.

La normativa de la SCT (N-CMT-2-02-003/02) considera analizar el contenido de sustancias perjudiciales en el agua para el concreto hidráulico, como:

1. Aceite, grasa y sólidos en suspensión en el agua.
2. Carbonatos y bicarbonatos alcalinos en el agua.
3. Sulfatos en el agua.
4. Cloruros en el agua.
5. Materia orgánica en el agua.
6. Magnesio en el agua.
7. Bióxido de carbono disuelto en el agua.
8. Potencial de hidrógeno (pH) del agua.
9. Impurezas en solución en el agua.
10. Álcalis en el agua.

D. Aditivo.

Los aditivos sea antes o después del mezclado se usan con el propósito fundamental de modificar convenientemente el comportamiento del concreto en estado fresco, y/o de inducir o mejorar determinadas propiedades deseables en el concreto endurecido.

Los principales aditivos químicos utilizados en la fabricación de concreto hidráulicos son:

1. Aditivos reductores de agua.

Se utilizan para disminuir la cantidad de agua de la mezcla, incrementar la resistencia del concreto reduciendo la relación agua/cemento, sin alterar su consistencia original, o bien para aumentar la trabajabilidad sin disminuir la resistencia.

2. Aditivos retardantes.

Se utilizan para retardar el fraguado del concreto aumentando así el tiempo de manejo antes de su colocación.

3. Aditivos acelerantes.

Se utilizan para acelerar el fraguado del concreto permitiendo obtener mayor resistencia a corta edad.

4. Aditivos reductores de agua y retardantes.

Producen efectos combinados de los aditivos reductores de agua y retardantes.

5. Aditivos reductores de agua y acelerantes.

Producen efectos combinados de los aditivos reductores de agua y acelerantes.

6. Aditivos reductores de agua de alto rango.

Proporcionan una reducción de agua mayor de la que producen los aditivos reductores de agua.

7. Aditivos reductores de agua de alto rango y retardantes.

Proporcionan una reducción mayor de agua que los aditivos reductores de agua y se combinan con los efectos de los retardantes de fraguado.

8. Aditivos superplastificantes.

Proporcionan un incremento mínimo de nueve (9) centímetros en el revenimiento, para producir un concreto fluido con revenimiento superior a diecinueve (19) centímetros, sin pérdida de cohesión ni retardo en el tiempo de fraguado.

9. Aditivos superfluidificantes y retardantes.

Proporcionan un incremento mínimo de nueve (9) centímetros en el revenimiento, para producir un concreto fluido con revenimiento superior a diecinueve (19) centímetros, sin pérdida de cohesión y con retardo en el tiempo de fraguado.

10. Aditivos inclusores de aire.

Se agregan al concreto durante su elaboración, con el fin de incorporar aire en él, mejorando su trabajabilidad y disminuyendo la segregación y el sangrado.

Uso de los aditivos.

El comportamiento y las propiedades del concreto hidráulico, en sus estados fresco y endurecido, suelen ser influenciados y modificados por diversos factores intrínsecos y extrínsecos. Los intrínsecos se relacionan esencialmente con las características de los componentes y las cantidades en que estos se proporcionan para elaborar el concreto. En cuanto a los extrínsecos, pueden citarse principalmente las condiciones ambientales que prevalecen durante la elaboración y colocación del concreto, las prácticas constructivas que se emplean en todo el proceso desde su elaboración hasta el curado, y las condiciones de exposición y servicio a permanecer sujeta la estructura durante su vida útil.

De acuerdo con este planteamiento, para influir en el comportamiento y las propiedades del concreto, a fin de adaptarlos a las condiciones externas, se dispone principalmente de dos recursos:

1. La selección y uso de componentes idóneos en el concreto, combinado en porciones convenientes.
2. El empleo de equipos, procedimientos, y prácticas constructivas en general, de eficacia comprobada y acordes con la obra que se construye.

El uso de aditivos queda comprendido dentro del primer recurso y normalmente representa una medida opcional, para cuando las otras medidas no alcanzan los efectos requeridos, en función de las condiciones externas actuales o futuras. Los aditivos son un medio complementario y no como sustituto de otras medidas primordiales.

Conforme a lo dicho anteriormente, no se debe esperar que con el uso de aditivos en el concreto se pueda omitir las prácticas tradicionalmente reconocidas como eficaces para la obtención de estructuras resistentes y durables. Esto es, el uso de un aditivo no puede corregir los errores que puedan cometerse al elegir los componentes o diseñar las mezclas de concreto, ni tampoco evitar los defectos de construcción que pueden originarse por el empleo de equipos y procedimientos inadecuados, o por las deficiencias de inspección, supervisión y/o control de calidad.

Antes de emplear un aditivo en el concreto, deben cumplirse las siguientes actividades:

1. Evaluar las condiciones ambientales y de trabajo en obra, y las acciones dañinas previsibles a que puede verse expuesta la estructura en servicio.
2. Determinar el comportamiento y las propiedades que se obtienen en el concreto sin aditivos, con los componentes y el diseño de mezcla sean idóneos y confrontarlos con los requerimientos impuestos por las condiciones y acciones previamente evaluadas.
3. Si de la confrontación anterior resulta insuficiente en el comportamiento o en las propiedades del concreto sin aditivos, hay que considerar la necesidad de emplear un aditivo de la clase cuyos efectos genéricos sean requerimientos en el concreto.
4. Ensayar el aditivo específicamente seleccionado, con objeto de definir la dosificación apropiada para producir el efecto requerido, y para comprobar que no produzca efectos secundarios indeseables en el concreto.

De manera general es necesario considerar todos los componentes del concreto para realizar un proporcionamiento adecuado para la estructura. Y es necesario conocer algunos principios básicos para realizar el diseño de la mezcla de concreto, como son:

1. Requisitos concernientes a la colocación.
2. Las interrelaciones entre el contenido de cemento, la relación agua cemento, la granulometría de los agregados y la cantidad de agua por unidad de volumen.
3. La resistencia requerida.
4. La calidad necesaria del concreto para resistir las condiciones a las que va estar expuesto.
5. Consideraciones económicas.

Propiedades del concreto.

Las propiedades del concreto que influyen en el diseño de un pavimento rígido y en su comportamiento a lo largo de su vida útil, son:

1. Módulo de elasticidad.
2. Módulo de ruptura.

1. Módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad o módulo de Young (E) es una medida del comportamiento esfuerzo-deformación del material. En el análisis mecanicista de pavimentos, el módulo de elasticidad del concreto tiene un fuerte efecto sobre la deflexión del pavimento y los esfuerzos en toda la estructura del pavimento.

El módulo de elasticidad del concreto es afectado por las características del agregado grueso como son peso específico, absorción, sanidad y resistencia, indicativas a su vez de buena calidad intrínseca de la roca. Si tiene buenas características lo más probable es que permita obtener concretos con características normales de deformabilidad, de lo contrario se manifiesta en las propiedades elásticas del agregado y en las del concreto constituido por ellos. El módulo también es afectado por la frecuencia de carga, la relación agua cemento, tiempo de curado, tipo de ensaye utilizado, contenido de humedad en el concreto y la temperatura.

El procedimiento recomendado para obtener el módulo de elasticidad (E), según la norma ASTM C469-94 para el módulo de elasticidad estático. La prueba se desarrolla sobre especímenes cilíndricos moldeados de acuerdo con los requerimientos para especímenes de prueba a compresión según la norma ASTM C192 ó C31 (figura 1.15).

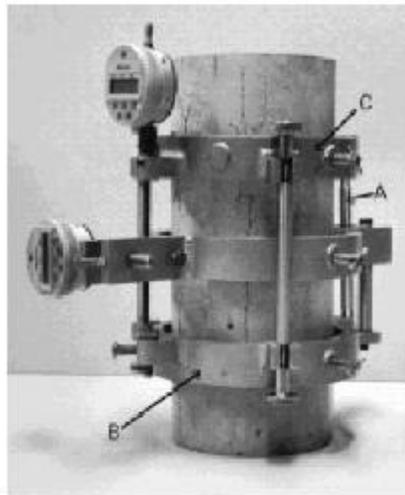


Figura 1.15. Especímen de prueba para determinar el módulo de elasticidad del concreto.

2. Módulo de ruptura.

Los pavimentos rígidos trabajan principalmente a flexión y por lo tanto la resistencia debe ser de acuerdo a su módulo de ruptura del concreto también conocido como resistencia a la flexión, es un indicador de la resistencia a la tensión y puede ser definido como el esfuerzo máximo a tensión para que ocurra la ruptura durante un ensayo de flexión de una viga de concreto simplemente apoyada.

Módulo de ruptura (MR) normalmente especificada a los 28 días debe ser medido mediante ensayos, utilizando una viga simple con carga en los tercios del claro (AASHTO T 97, ASTM C 78).

La figura 1.16 muestra un diagrama de la prueba a la flexión del concreto utilizando el método de carga en el tercio medio (ASTM, 1997). Para la realización de esta prueba se utiliza una viga con una sección transversal de 6in. por 6in. y 20 in. de largo, la cual se somete a repeticiones de carga flexionante. La carga normalmente se aplica a los tercios medios de la probeta, a una velocidad de 1 a 2 cargas por segundo y una duración de 0.1 segundos.

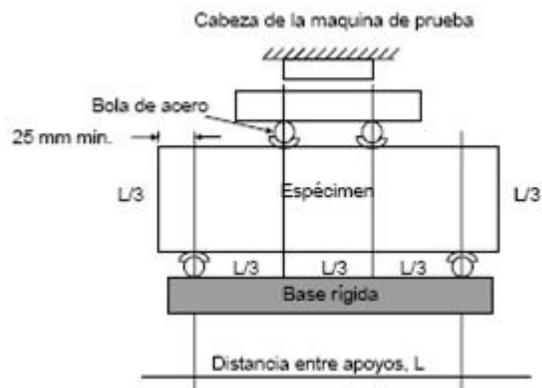


Figura 1.16. Prueba de flexión del concreto utilizando el método de carga en el tercio medio.

La resistencia máxima a la flexión (módulo de ruptura) se calcula con la fórmula para la flexión de la viga simple con carga en el tercio medio (Mindess y Young, 1981):

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde:

R = Resistencia a la flexión, MPa.

P = Carga máxima aplicada, N.

L = Distancia entre los apoyos del espécimen, mm.

b = Ancho del espécimen, mm.

d = Altura del espécimen, mm.

La ecuación anterior sólo se ocupa cuando el espécimen se rompe entre los dos puntos interiores de carga (tercio medio de la viga). Si la viga falla fuera de estos puntos por no más de 5% de la distancia entre los apoyos (L), la ecuación se reemplaza por (Mindess y Young, 1981):

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

Donde:

a = Distancia promedio entre el punto de fractura y el apoyo más cercano.

Si la falla ocurre más cerca de los apoyos, los resultados deben ser desechados ya que son erróneos. Aunque el concreto tiene una relación esfuerzo-deformación no lineal, la primera ecuación asume una relación lineal. El estado esfuerzo-deformación lineal asumido es verdadero para el tercio medio del espécimen de la prueba.

Calidad del Concreto Hidráulico.

Es necesario que el concreto hidráulico cumpla con los requisitos de calidad de las especificaciones y de la normativa, como la normativa de la SCT N·CMT·2·02·005/04, que establece los siguientes requisitos:

1. Requisitos de los componentes:

- Calidad del cemento Pórtland
- Calidad de agregados pétreos para concreto hidráulico
- Calidad del agua para concreto hidráulico
- Calidad de aditivos químicos para concreto hidráulico

2. Revenimiento

3. Temperatura

4. Resistencia

5. Volumen

6. Requisitos de mezclado

1.4.2.3 ACERO DE REFUERZO.

El acero de refuerzo en un pavimento de concreto hidráulico tiene tres propósitos:

1. Controlar el agrietamiento.
2. Funcionar como un mecanismo de transferencia de carga en las juntas o uniones.
3. Sujetar dos losas entre si.

Para controlar el agrietamiento se usa acero de temperatura o de refuerzo térmico, como mecanismo de transferencia de carga se usan pasajuntas y para sujetar dos losas se usan barras corrugadas o de amarre.

Acero de temperatura.

El acero de temperatura tiene la forma de una malla de varillas o de alambre, formada por alambres de acero longitudinales y transversales soldadas a intervalos regulares.

El acero de temperatura no evita el agrietamiento de las losas, pero si controla los anchos de grietas, porque actúan como una liga que sujeta unidas las orillas de las grietas. Esto ayuda a mantener la resistencia al esfuerzo cortante del pavimento y con ello mantiene su capacidad para soportar la carga de tránsito, aunque no mejore la resistencia a la flexión.

Pasajuntas.

Se usan principalmente como mecanismo de transferencia de carga por medio de la junta, proporcionando resistencia a la flexión, al cortante y soporte. Debe tener un diámetro mucho mayor al que se usan en los alambres por temperatura, se colocan en lo ancho de la losa. Al menos un extremo de la varilla debe ser liso y estar lubricado, para facilitar la dilatación libre, se espacian en forma regular, 30 cm. de centro a centro de cada barra.

Deben ser sencillas, redondas que se ajusten a las especificaciones. No deben ser ásperas ni desfiguradas, de manera que afecten su deslizamiento en el concreto, además deben tener un diseño tan rígido que el extremo cerrado no se aplaste durante la construcción.

Las pasajuntas deben diseñarse para transmitir las cargas de una losa a otra; se considera que una junta es 100 % efectiva si logra transferir la mitad de la carga aplicada al otro lado de la junta y 0% efectiva si no lo logra (figura 1.17).

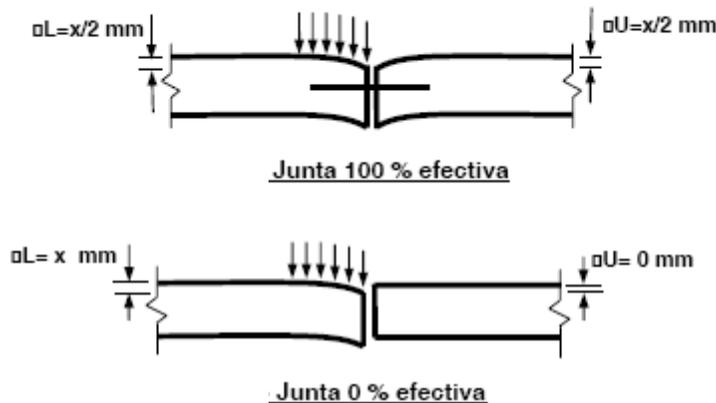


Figura 1.17. Transferencia de carga entre losas del pavimento.

Un pavimento podrá diseñarse con juntas con o sin pasajuntas dependiendo del tipo de estructura deseada, el tipo de tránsito y las condiciones ambientales, por ejemplo, para tránsitos intensos y pesados se debe utilizar varilla lisa de 1 1/4" y 1 1/2". La tabla 1.5 muestra los valores recomendados según el espesor de la losa.

Tabla 1.5. Recomendaciones de pasajuntas según el espesor de losa.

Espesor de losa		Barra de pasajuntas					
		Diámetro		Longitud		Separación	
cm.	In.	mm.	In.	cm.	In.	cm.	In.
13 a 15	5 a 6	19	¾	41	16	30	12
15 a 20	6 a 8	25	1	46	18	30	12
20 a 30	8 a 12	32	1 ¼	46	18	30	12
30 a 43	12 a 17	38	1 ½	51	20	38	15
43 a 50	17 a 20	45	1 ¾	56	22	46	18

Barras de amarre.

Se usan para ligar dos secciones de pavimento, deben ser varillas corrugadas, o contener ganchos para facilitar la unión de las dos secciones del pavimento de concreto con la varilla. Estas deben tener un diámetro menor a las pasajuntas y es mayor la distancia entre ellas, la tabla 1.6 muestra las recomendaciones para barras de amarre según el espesor de losa.

El acero de refuerzo debe estar libre de suciedad, aceite, pintura, grasa o de cualquier material orgánico que afecte adversamente su adherencia al concreto.

Tabla 1.6. Recomendación de barras de amarre.

Espesor pavimento(cm.)	Tamaño de varilla (cm)	Distancia al extremo libre.			
		305cm.	366cm.	427cm.	732cm.
12.7	1.27x 61	76 cm.	76 cm.	76 cm.	71 cm.
14.0	1.27x 64	76 cm.	76 cm.	76 cm.	64 cm.
15.2	1.27x 66	76 cm.	76 cm.	76 cm.	58 cm.
16.5	1.27x 69	76 cm.	76 cm.	76 cm.	53 cm.
17.8	1.27x 71	76 cm.	76 cm.	76 cm.	51 cm.
19.1	1.27x 74	76 cm.	76 cm.	76 cm.	46 cm.
20.3	1.27x 76	76 cm.	76 cm.	76 cm.	43 cm.
21.6	1.27x 79	76 cm.	76 cm.	71 cm.	41 cm.
22.9	1.59x 76	91 cm.	91 cm.	91 cm.	61 cm.
24.1	1.59x 79	91 cm.	91 cm.	91 cm.	58 cm.
25.4	1.59x 81	91 cm.	91 cm.	91 cm.	56 cm.
26.7	1.59x 84	91 cm.	91 cm.	91 cm.	53 cm.
27.9	1.59x 86	91 cm.	91 cm.	91 cm.	51 cm.
29.2	1.59x 89	91 cm.	91 cm.	91 cm.	48 cm.
30.5	1.59x 91	91 cm.	91 cm.	91 cm.	46 cm.

Silletas.

Y de manera adicional las silletas que servirán para sostener el acero de refuerzo, deben ser resistentes y diseño adecuado para soportar el desplazamiento o deformación, antes y durante el colado del concreto.

El acero de refuerzo para el pavimento rígido debe ajustarse a las especificaciones y normativa, según corresponda, por ejemplo:

Norma de la SCT N.CMT-2.03-001/04, Acero de refuerzo para concreto hidráulico.

Norma ASTM A 615, Acero de refuerzo, grado 28 ó grado 42.

Norma ASTM A 616, Acero de refuerzo, grado 35 ó grado 42.

Norma ASTM A 617, Acero de refuerzo, grado 28 ó grado 42.

1.4.2.4 SELLO DE LAS JUNTAS.

Caja para alojar el sello de la junta.

Antes iniciar la colocación del sello de la junta es necesario incrementar la junta (cuando sea necesario), es decir, formar una caja para alojar el sello y además sirve para eliminar esfuerzos excesivos en el interior del sellador y a lo largo de la línea de unión del sellador con la caja para la junta. Los factores de forma de la caja de junta se deben tomar en cuenta para que el material de sello quede ligeramente abajo del lecho superior de la losa (0.6 cm.), el factor de forma (Ff) queda definido por la relación que existe entre la profundidad y el ancho, siendo para el caso de selladores líquidos en caliente $Ff = 1.0$ y para silicón líquido $Ff = 0.50$ (figura 1.18). Es necesario aclarar que el factor de forma no aplica en los selladores premoldeados.

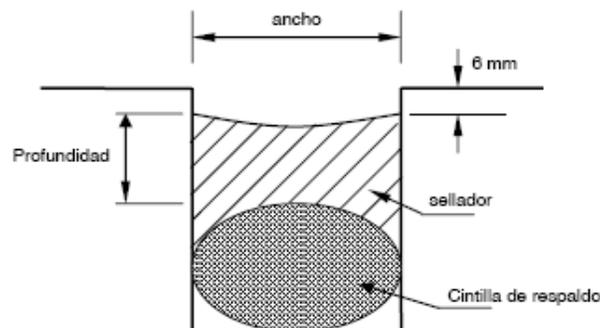


Figura 1.18. Caja de sello de junta.

Cintilla de respaldo.

Una vez realizada la caja que alojará el sello de la junta se colocará la cintilla de respaldo, su diámetro debe ser un 25% mayor que el ancho de la caja que alojará la junta, para asegurar un debido ajuste e impedir que el sello líquido fluya hasta el fondo de la junta.

Sellador para la junta.

El propósito del sellador es minimizar la infiltración del agua superficial y de materiales incompresibles al interior de la junta del pavimento, además, deben soportar esfuerzos alternados de compresión y de tensión, producidos por los cambios de temperatura y de humedad.

Tipo de selladores:

- A. Selladores líquidos.
- B. Selladores premoldeados a compresión.

A. Selladores líquidos.

Estos pueden ser colocados en frío, al ser autonivelables toman la forma de las cajas que los contienen, un sellado satisfactorio depende de una correcta adhesión de las caras de la junta.

B. Selladores premoldeados a compresión.

Para el diseño de este tipo de selladores se debe calcular el movimiento de los extremos de las secciones de la losa.

Movimientos de losas.

El movimiento de las losas depende de las características de contracción del concreto. El movimiento de una sección se puede estimar mediante la expresión:

$$\Delta L = faL(\alpha\Delta T + \varepsilon)$$

En donde:

ΔL = Cambio en la longitud de la losa.

fa = Coeficiente de fricción losa-capa de apoyo.

L = Longitud de la losa en mm.

α = Coeficiente de expansión térmica.

ΔT = Rango máximo de temperatura esperado.

ε = Coeficiente de contracción del concreto.

Las tablas 1.7 y 1.8, indican valores de los coeficientes de expansión térmica y de contracción del concreto, respectivamente.

Tabla 1.7. Coeficiente de expansión térmica.

Valores del coeficiente de expansión térmica del concreto en función del agregado	
Material	Coeficiente de expansión térmica $\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$
Cuarzo	11.9
Arenisca	11.7
Grava	10.8
Granito	9.5
Basalto	8.6
Caliza	6.8

Tabla 1.8. Coeficiente de contracción térmica.

Valores del coeficiente de contracción térmica del concreto en función de la resistencia a la tensión indirecta.	
Prueba brasileña Kg/cm^2	Coeficiente de contracción (deformación) $\times 10^4$
<21	8
28	6
35	4.5
42	3
>49	2

Una vez calculado el cambio de longitud de la losa, se seleccionara el sellador prefabricado que pueda absorber una deformación igual o menor al valor calculado, si el movimiento calculado es mayor a la compresión admisible del sellador prefabricado, entonces se debe escoger un sellador más deformable.

Recomendaciones para el uso de selladores premoldeados:

1. La profundidad de la caja para alojar el sello de la junta, debe ser mayor que la profundidad del sello.
2. El ancho del sello debe ser aproximadamente el doble del ancho de la caja.
3. El diseño de la caja y la selección del sello a compresión deben asegurar que el sello se mantenga a un nivel de compresión entre el 20 y el 50%.
4. A mayor temperatura durante la instalación se requiere más compresión del sellador ya que la losa tendera a expandirse.
5. La geometría para aplicación del sellador debe efectuarse atendiendo los movimientos esperados, suponiendo varias temperaturas y el tamaño del sellador premoldeado.
6. Los sellos premoldeados deben contar con al menos 5 celdas.

4.3 FACTORES REGIONALES.

Los principales factores regionales que afectan el diseño de un pavimento, son:

- A. Temperatura.
- B. Humedad.

Estos factores influyen en su comportamiento y funciones de un pavimento, ambas están en función del espacio y tiempo.

A. Temperatura.

Para predecir la temperatura de un pavimento es complejo, los factores que influyen en la temperatura se dividen en:

- 1. Extrínsecos.
- 2. Intrínsecos.

1. Factores extrínsecos.

Dependen de la localización, estos son:

- 1. Temperatura del aire.
- 2. Radiación solar.
- 3. Viento.
- 4. Precipitación.
- 5. Evaporación.
- 6. Condensación.

2. Factores intrínsecos.

La geología de la región es un factor que contribuye en este factor, incluyen:

- 1. Conductividad térmica
- 2. Capacidad calorífica
- 3. Calor de fusión de los materiales del pavimento y subrasante

En un ambiente dinámico los factores intrínsecos son relativamente constante en comparación con los extrínsecos.

En los factores extrínsecos la temperatura ambiental es el factor más importante en el equilibrio térmico del pavimento. Su amplitud y fluctuaciones decrecen con el incremento bajo la profundidad.

Todos los materiales son sensibles a cambios volumétricos debido a cambios de temperatura, el efecto de la variación térmica se refleja por expansión y compresión volumétrica del pavimento, la expansión térmica no es constante. Cuando se exceden los esfuerzos del material, se desarrollan grietas y cuando el pavimento está sujeto a las cargas.

La latitud es la más importante causa de variación de la temperatura, el propósito de considerarla es para:

1. Evaluar el cambio que sufre las propiedades físicas del material, la expansión volumétrica y compresión en el pavimento.
2. Estimar el equilibrio de los esfuerzos internos en varios años.

Para concluir es necesario considerar las propiedades físicas que se usan para medir el efecto de la temperatura, como son:

1. Esfuerzo a compresión.
2. Módulo de elasticidad del material.

Los efectos de temperatura en las propiedades físicas de la subrasante, es complicado por su humedad.

B. Humedad.

La humedad es la variable fundamental en todos los problemas de estabilidad de los suelos. Las principales condiciones para el cambio en el contenido de humedad en un pavimento son:

1. Filtración de agua en el pavimento por el suelo adyacente.
2. Filtración de agua a través de la superficie del pavimento.
3. Transmisión de la humedad desde las áreas circundantes.
4. Transferencia de la humedad desde el subsuelo.

La influencia de infiltración de agua depende significativamente del gradiente hidráulico, además es influenciado por el índice de agua, el coeficiente de permeabilidad de los materiales del pavimento y de un buen suelo de la subrasante.

Efectos de la humedad.

Muchos pavimentos fallan debido a la entrada de agua al pavimento por la superficie y/o la subrasante, la entrada de agua reduce la fuerza cortante, la elasticidad, plasticidad y afecta la estabilidad del pavimento y con la inducción de tráfico deteriora la carretera y si no es instantáneo incrementa con el tiempo.

En un pavimento rígido, el fenómeno que ocurre se conoce como bombeo, la presión y el movimiento inducido por el tráfico bombea el agua y frecuentemente lleva finos a la superficie por las grietas o juntas.

Pero solamente puede existir un cambio drástico del contenido de humedad, cuando llueve y existe un estrato impermeable, es necesario que este cambio sea muy bajo. Por lo tanto, es necesario tener información del sitio y la experiencia actual de la observación del sitio.

El efecto destructivo de la temperatura y humedad se reconocen que es más serio que los que genera las cargas del vehículo. Lo recomendable es mantener el agua lo más alejada del pavimento.

Reglas para diseñar un pavimento:

1. Mantener la base o subbase por arriba del nivel freático.
2. Desarrollar un adecuado sistema de drenaje para la recolección del agua superficial y minimizar la infiltración.
3. Proveer un subdrenaje de manera que intercepte la humedad del suelo debido a la migración al área del pavimento.
4. Mantener un bajo índice de agua en lo posible.
5. Conocer la profundidad de congelamiento.
6. Conservar el pavimento razonablemente impermeable y reducir la infiltración.

En el diseño es necesario ver la condición topográfica, geológica del área y definir el espesor del estrato compresible y evaluar el contenido de humedad.

La superficie del pavimento, cuando son propiamente diseñados y construidos, tienen una alta resistencia, aunque hay que remarcar que dependerá del tiempo tanto para sus propiedades y comportamiento.

1.4.4. CONSTRUCCIÓN.

Los factores que afectan la construcción de un pavimento rígido, son:

- A. Trabajos preliminares.
- B. Cimbras.
- C. Colocación de acero en el concreto.
- D. Concreto.
- E. Juntas.

A. Trabajos preliminares.

En los trabajos preliminares para realizar las capas inferiores del pavimento es necesario conocer los tres tipos de ensaye que servirán para clasificar el suelo, para controlar la obra y para proyectar el espesor, como a continuación se enlistan:

Terraplén.

Clasificación: Granulométrica; contenido de agua; densidad relativa y absorción; límites de Atterberg y expansión.

Control: Peso volumétrico máximo y humedad optima; peso volumétrico del lugar y grado de compactación. Además, cuando se dude de la calidad revisar la granulometría, límites Atterberg.

Subrasante.

Clasificación: Granulométrica; contenido de agua; densidad relativa y absorción; límites de Atterberg y expansión.

Control: Peso volumétrico máximo y humedad optima; peso volumétrico del lugar y grado de compactación; granulometría; límites Atterberg; CBR y expansión.

Diseño: CBR, prueba de placa, módulo de resiliencia, etc.

Subbase y base.

Clasificación: Granulométrica; contenido de agua; densidad relativa y absorción; límites de Atterberg; partículas alargadas y lajeadas.

Control: Peso volumétrico máximo y humedad optima; peso volumétrico del lugar y grado de compactación; granulometría; límites Atterberg; CBR; expansión; valor cementante índice de durabilidad y equivalente de arena.

Diseño: CBR, prueba de placa, módulo de resiliencia, etc.

Antes de iniciar la construcción del pavimento es necesario preparar el terreno donde se ubicará, es necesario realizar el desmonte, despalme y compactación.

Desmonte: consiste en quitar toda la vegetación.

Despalme y compactación.

Una vez desmontado el terreno natural, se extrae la capa de material que contenga materia vegetal, el espesor de esta capa puede variar de 10 a 50 cm. y en seguida se compacta el terreno natural solo si se requiere y cuando se hace necesario, se llega en general al 90% del peso volumétrico seco máximo.

Terracerías.

Constituye la estructura de los caminos, se forma de productos formados por secciones, como:

1. Secciones en corte.
2. Secciones en terraplén.
3. Secciones de balcón y mixtas.

Las secciones están formadas por:

1. Terreno natural.
2. Cuerpo de terraplén.
3. Subrasante.
4. Subbase.
5. Base.

Terraplén.

La finalidad del cuerpo del terraplén es proporcionar la altura necesaria para cumplir con el proyecto, debe resistir las cargas de las capas superiores y distribuir las adecuadamente en el terreno natural, el grado de compactación mínimo será del 90% y si es necesario realizar rellenos en barrancas donde no es fácil el empleo de equipo, se permite que el material se coloque a volteo hasta la altura donde ya se pueda operar la maquinaria.

Subrasante y subbase.

La subrasante y subbase, es parte fundamental en el diseño estructural, su objetivo principal es dar un apoyo uniforme, estable y constante durante su vida útil.

Subrasante.

Su objetivo es dar un soporte adecuado, y cuando no se puede dar es necesario usar métodos efectivos y económicos como la granulometría selectiva, control de humedad, y peso volumétrico durante la compactación y preparación de la subrasante. Es necesario poner atención cuando se presenta suelos expansivos y asentamientos diferenciales.

Subbases.

Son materiales granulares, que se colocan normalmente sobre la subrasante, para formar una capa de apoyo uniforme, estable y constante ya que es la clave para un buen desempeño del pavimento de concreto.

Desde el punto de vista económico la subbase tiene dos funciones:

1. Es esencial para evitar el efecto de bombeo de los suelos finos bajo condiciones que inducen el bombeo, esto se presenta principalmente en caminos altamente transitados y se refleja en el desempeño del pavimento.

2. Es opcional para:

1. Ayudar a controlar la contracción de suelos.
2. Ayudar a controlar la expansión de suelos.
3. Evitar el lodo en suelos de granulometría fina.
4. Para actuar como plataforma de trabajo para la construcción del pavimento.
5. Para proporcionar una capa de drenaje donde esta sea necesaria.

No es económico usar una capa gruesa para aumentar la capacidad estructural del pavimento, siendo que la mayor parte de esa capacidad la proporciona la losa de concreto.

Existen diversos tipos de subbase, el tipo elegido esta dictado por los requerimientos de diseño y por disponibilidad de los materiales locales, por ejemplo:

1. Subbases no tratadas.
2. Subbases tratadas con cemento.
3. Subbases de concreto pobre.
4. Subbases permeables.

Base.

La base o también conocida como base hidráulica, tiene la misma función que la subbase, aunque es de mejor calidad y se construye sobre la subbase o directamente sobre la subrasante según se requiera.

Equipo.

El equipo que se utilice para la construcción de las capas será el adecuado para obtener la calidad especificada en el proyecto. El equipo que se usa se divide en dos categorías, la primera se usa para esparcir el material con el espesor de capa o elevación requerida ya sea con bulldozer y motoconformadoras. La segunda incluye el equipo que se usa para compactar cada capa de material, usando rodillos que aplicarán al suelo una fuerza vibratoria o estática.

Drenaje en el pavimento.

Es necesario realizar antes o durante la construcción de las capas mencionadas anteriormente el drenaje, que servirá para captar, conducir y alejar el agua del pavimento. Por lo tanto, se debe elegir el sitio o ubicaciones donde se corta el escurrimiento natural en este caso es elegido por el proyectista y debe respetar el constructor.

La adecuada funcionalidad hidráulica y estructural, así como el aspecto económico está condicionada a los siguientes factores:

1. Altura del terraplén.
2. Forma de la sección en el cruce.
3. Pendiente de plantilla de la obra.
4. Capacidad de sustentación del terreno.
5. Materiales de construcción disponibles en la región.
6. Tipificación de las obras y dimensiones.

Por lo tanto, debe considerar el diseñador del drenaje los factores que afectan el escurrimiento de agua, como son:

1. Cantidad de precipitación.
2. Tipo de precipitación.
3. Tamaño de la cuenca.
4. Declive superficial.
5. Permeabilidad del suelo y rocas.
6. Condiciones de saturación.
7. Cantidad y tipo de vegetación.

Clasificación del drenaje.

La clasificación del drenaje es transversal y longitudinal según la posición que guarde con respecto al eje del camino, a su vez puede ser superficial y subterránea.

Drenaje longitudinal, estos se colocan más o menos paralelos al camino, como pueden ser:

1. Cunetas.
2. Contracunetas.
3. Bordillos.
4. Canales de encauzamiento.

Drenaje transversal, da paso expedito al agua que cruza de un lado a otro del camino, o bien la retira lo más pronto posible de la corona, como:

1. Tubos.
2. Losas.
3. Cajones.
4. Bóvedas.
5. Lavaderos.
6. Vados.
7. Sifones invertidos.
8. Puentes.
9. Bombeo de la corona.

Alcantarillas.

Las alcantarillas son estructuras transversales de forma diversa, cuya función es conducir y desalojar con la mayor rapidez posible el agua de las hondonadas y las partes bajas del terreno que atraviesa el camino. Por ejemplo:

1. Tubo.
2. Bóvedas.
3. Losas sobre estribos.
4. Cajones.

Materiales para drenaje.

Los materiales para realizar esta infraestructura son los convencionales, es decir, concreto hidráulico, mampostería, lámina de acero, acero estructural y morteros de cal o cemento.

B .Cimbras.

Cimbras para pavimentos.

Deben utilizarse cimbras capaces de soportar las cargas impuestas por el equipo de construcción. Se recomienda que la cimbra tenga una profundidad igual al grosor especificado del concreto y forma adecuada para dar a la superficie lateral de la losa la forma requerida y las perforaciones necesarias que permitan el paso del refuerzo. La cimbra debe limpiarse y engrasarse inmediatamente antes de vaciar el concreto.

Fijación de las cimbras.

La cimentación debajo de las cimbras debe estar compactada y cortada a nivel, para que al fijar las cimbras éstas queden apoyadas de forma uniforme y altura apropiada. Las secciones de la cimbra debe ajustarse con firmeza, libres de juego y movimiento en cualquier dirección, además de seguir el alineamiento indicado. Los desperfectos causados en la colocación de cimbra deben corregirse antes de vaciar el concreto.

Retiro de cimbras.

Las cimbras deben dejarse en su sitio al menos durante 8 horas después del colado del concreto, si la temperatura del aire es inferior a 10°C, las cimbras deben dejarse durante un periodo tan largo como fuese necesario. Al retirar la cimbra se extremarán las precauciones para no dañar el concreto. El curado de los bordes expuestos del pavimento de concreto debe iniciar inmediatamente después de retirar las cimbras.

C. Colocación de acero en el concreto.

1. Acero por temperatura.
2. Pasajuntas.
3. Barras de amarre.
4. Silletas.

1. Acero por temperatura.

El refuerzo debe consistir en telas de alambre o emparrillado de varillas, donde las intersecciones longitudinales y transversales debe sujetarse firmemente con alambres, biselarse o soldarse, deben estar libres de suciedad, aceite, pintura, grasa o cualquier material orgánico que pueda afectar adversamente o reducir la adherencia al concreto. Debe revisarse la posición del acero con respecto a los bordes de la losa o junta, cuidarse los traslapes, antes o durante las operaciones de colado y corregirse si es necesario.

2. Pasajuntas.

Deben cumplir con las especificaciones para varillas sencillas, redondas. El diámetro debe ser de acuerdo con el espesor de la losa y estar situado al espesor medio de la losa, además de colocarse paralelas a la superficie de apoyo y al eje del camino. Estarán libres de irregularidades y deberán cubrirse con asfalto, parafina, grasa o cualquier otro medio que impida efectivamente la adherencia del acero con el concreto, de manera que las losas puedan moverse libremente. Asimismo las barras pasajuntas podrán ser instaladas por medios mecánicos o por medio de canastas metálicas de sujeción, las cuales deben asegurar la posición correcta de proyecto, para finalizar, el concreto alrededor del acero deberá compactarse correctamente evitando la presencia de aire o segregaciones.

3. Barras de amarre.

Las barras de amarre deben ser varillas corrugadas de acero que cumplan con los requisitos de las especificaciones para varillas de acero de refuerzo, cuando se indique estas tendrán las características de doblarse y enderezarse. Las varillas de amarre pueden tener diversas formas para ajustarse al método de colocación; rectas para empotramiento desde la superficie; dobladas, para formar ángulos para precolocación en pendiente; sinuosas, para desarrollar adherencia al insertarlas en bordes frescos hechos con cimbras deslizantes. Estas barras de amarre deben quedar ahogadas en las losas a la mitad del espesor del pavimento.

4. Silletas.

Las silletas son utilizadas para sostener el acero de refuerzo en su posición correcta, asimismo, deben ser resistentes para soportar desplazamientos o deformación, antes y durante el colado.

D. CONCRETO.

Los componentes básicos para realizar el concreto deben tener la característica y calidad necesaria para cumplir con los requisitos que se demanden en estado fresco y endurecido; pueden usarse componentes adicionales como la inclusión de aire, cuando se tiene ciclos de congelación-deshielo; si es necesario aditivos especiales para modificar las propiedades de manera que sea más adecuada para determinado fin, es útil siempre en la mayoría de los casos pero ninguno de ellos debe emplearse sin una cuidadosa evaluación antes de iniciar la obra, en pocas palabras, es necesario realizar un proporcionamiento adecuado para cada componente básico y adicional según se requiera.

Los pavimentos de concreto hidráulico están expuestos a tratos severos, además existen muchos otros factores que tienden a destruirlo. Por estas razones y por supuesto por economía se justifica un cuidado adicional en la dosificación.

Proporcionamiento.

El objetivo de realizar un proporcionamiento de los componentes básicos y adicionales, es producir un concreto que alcance una resistencia compatible con el diseño estructural.

La dosificación establecerá los límites para estos factores básicos de la mezcla: ya sea la relación agua/cemento máxima, o la resistencia mínima, o el contenido mínimo de cemento. Además debe especificarse el contenido máximo y mínimo del aire, el revenimiento máximo y el tamaño máximo del agregado. Y si es necesario establecer la necesidad de utilizar aditivos.

En resumen, los métodos de proporcionamiento de un concreto son solo recomendaciones, finalmente el resultado obtenido por cualquier método debe ser validado mediante pruebas de laboratorio.

Control de calidad.

Es necesario un control de calidad para establecer que el concreto a producir y después de ser incorporado en la obra satisface los requisitos de las especificaciones en estado fresco y endurecido. Por lo que se justifica la realización de muestras y pruebas, que indicarán que tan bueno y malo se realizan los trabajos y el resultado que se espera de ellos.

Existen tres etapas para realizar muestras y pruebas antes, durante y después en los estados (fresco y endurecido) del concreto.

Muestreo.

Las muestras de materiales para su aceptación o rechazo deben tomarse cuidadosamente de acuerdo con procedimientos predeterminados. Deben pedirse al productor muestras para inspección y pruebas preliminares.

Ningún grado de cuidado y precisión en las pruebas subsecuentes proporciona información correcta si las muestras se toman descuidadamente y no representan el material muestreado. A continuación se da una lista de las pruebas a realizar dependiendo de la magnitud del proyecto.

Concreto fresco:

1. Muestras de concreto fresco (norma ASTM-C-172-82).
2. Revenimiento (norma ASTM-C143-90).
3. Determinación del contenido de aire por el método de presión (norma ASTM-C-231-91).
4. Prueba de contenido de aire por el método volumétrico (normas ASTM-C-173-78 y AASHTO T-196-80).
5. Determinación del peso volumétrico, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto por el método gravimétrico (norma AASHTO-T-121-86).
6. Elaboración de especímenes de concreto (norma ASTM-C-31-80).

Métodos de prueba.

Pruebas.

Como etapa preliminar debe determinarse mediante pruebas que el proporcionamiento cumple con el comportamiento y características requeridas por el proyecto en los dos estados (fresco y endurecido) para iniciar la producción. Deben probarse de acuerdo con los métodos a los que se hace referencia en las especificaciones apropiadas u otros procedimientos estándar reconocidos.

Pruebas de resistencia a la flexión del concreto como base del diseño.

Los resultados de las pruebas de resistencia a la flexión, que vayan a utilizarse como base para el diseño de mezclas de concreto, deben determinarse de acuerdo con la norma ASTM C78.

Pruebas de resistencia a la flexión del concreto en el campo.

De acuerdo con la norma ASTM C31, deben hacerse en el campo dos grupos de muestras de resistencia a la flexión. El primer grupo es para verificar la capacidad que tiene el diseño de laboratorio para las condiciones de dosificación y mezclado en la obra. El grupo dos, verifica lo adecuado del curado, así como otras condiciones de la obra. Para cada grupo deben realizarse al menos dos vigas.

No debe esperarse que los resultados obtenidos de la mezcla de prueba de laboratorio sean exactamente iguales a la producción, generalmente es necesario realizar ajustes en el diseño de la mezcla, es decir, conocer las variables que afectan la producción, lo anterior depende de los controles y verificación implementados, ya que de ello dependerá la homogeneidad, variabilidad y correcta dosificación de los componentes de la mezcla. Por lo tanto, es necesario identificar perfectamente las etapas en las que se encuentra dividido nuestro proceso para generar actividades o indicadores que nos permitan tener control sobre la producción.

En resumen, el concreto debe comportarse de una manera adecuada desde su fabricación, hasta su colocación, y aun después de colado; por lo tanto es importante la comunicación con el proceso de producción y el de construcción, con acciones reciprocas requeridas, que el constructor conozca el comportamiento del concreto que utilizará, las recomendaciones de colocación, consolidación y curado. En pocas palabras, la calidad del concreto depende no solo de su calidad, sino de sus cuidados.

Tendido de concreto.

Antes y durante el tendido de concreto es necesario remarcar la necesidad de comunicación entre la etapa de producción y construcción para generar información relevante, confiable y oportuna, con la finalidad de iniciar acciones preventivas, de verificación y correctivas, según sea el caso, con el motivo de dar la solución técnica y económica propia del proyecto.

Antes de realizar el tendido del concreto será necesario conocer el volumen de concreto para la jornada, las condiciones climáticas favorables y desfavorables de la zona para evitar realizar el tendido de concreto y proteger las losas recién terminadas, por ejemplo:

- Cuando exista amenaza de lluvia o esté lloviendo.
- No se debe vaciar el concreto cuando la temperatura ambiente exterior sea menor o igual a 4°C.
- Las losas de concreto hidráulico pueden ser construidas cuando la temperatura ambiente está por arriba de dos (2) grados Celsius y su tendencia sea a la alza.
- En clima frío, la temperatura de la mezcla no será menor de 15 °C ni mayor de 27°C, los agregados o el agua pueden calentarse antes de mezclar pero en ningún caso la temperatura del agua será mayor a 80°C y la de los agregados mayores a 65°C.
- En clima caluroso no debe mezclarse el concreto si la temperatura de la mezcla no puede mantenerse a un máximo de 32°C, la temperatura del cemento en el momento de emplearse no debe ser mayor de 70°C, ver norma NMX-403-1999-ONNCCE.
- Cuando la evaporación sobre la superficie de la losa sea mayor de un (1) kilogramo por metro cuadrado por hora, determinada de acuerdo a las recomendaciones de la Portland Cement Association (PCA), a menos que se levanten rompevientos para proteger el concreto hidráulico y lo apruebe.
- Si recién terminada la losa la temperatura baja a 2 °C o menos, el concreto se cubrirá con paja, hierba o cualquier material que conserve una temperatura de cuando menos 10 °C sobre la superficie del concreto.

Además de conocer la manera de realizar el tendido y las recomendaciones, por ejemplo:

- El concreto se colocará sobre una superficie limpia y humedecida para evitar que absorba el agua de la mezcla.
- El no se colocará sobre superficies con agua libre o encharcada.
- El colado se hará en una forma continua.
- El tendido puede realizarse mediante un dispositivo mecánico acoplado a la mezcladora, mediante herramientas manuales, o por otro medio, pero en todos los caso debe mantener el espesor adecuado.
- Cada franja de concreto hidráulico debe colocarse cubriendo como mínimo el ancho total del carril o, de preferencia, el ancho total de la calzada y sus acotamientos.
- No debe permitirse agregar agua para remezclar el concreto.

- Deberá colocarse el concreto lo más cerca a su posición final, con una segregación mínima.
- Cuando el colado sea suspendido por más de treinta (30) minutos, se hará una junta fría, tratando de utilizar este recurso lo menos posible.
- Al final de cada jornada y con la frecuencia necesaria, se limpiarán perfectamente todas aquellas partes que presenten residuos de concreto hidráulico.

Compactación.

Todo método de compactación es efectivo en cierto grado, pero nada asegura la obtención automática del concreto compactado, debe compactarse de la manera más efectiva posible teniendo cuidado alrededor de las pasajuntas, barras de amarre, y de las canastas de apoyo, en los bordes y en las esquinas, o alrededor de los drenes, así como en secciones irregulares que tengan relación con rampas o intercepciones.

Texturizado.

El texturizado es una operación de acabado superficial del pavimento, el método de texturización elegido debe ser compatible con el medio ambiente, la velocidad y densidad de tránsito, así como la topografía y geometría del pavimento, en algunos casos en diferentes ubicaciones del pavimento, puede convenir diferentes texturizados.

Tipo de texturizado:

1. Longitudinal
2. Transversal

1. Texturizado longitudinal.

El texturizado longitudinal es un microtexturizado realizado con una tela de yute húmedo a lo largo de la losa cuando el concreto está fresco.

2. Texturizado transversal.

El texturizado transversal se realiza con peine metálico con separación entre dientes de 1.9 cm. y de profundidad máxima entre 6.4 mm. y 3.0 mm., esta operación se debe realizar cuando el concreto este lo suficientemente plástico para permitir el texturizado, pero lo suficientemente seco para evitar que el concreto fluya hacia los surcos formados por el peine.

Curado y protección.

Curado.

Inmediatamente después de concluir las operaciones de acabado y que la película de agua se haya evaporado, o antes de que ocurran daños, toda la superficie del concreto recién colado debe cubrirse y curarse de acuerdo con alguno de los métodos recomendados. Debe remarcarse que el objetivo principal del curado es retener la humedad durante el tiempo necesario, para que la hidratación del cemento llegue a un punto aceptable.

Tipos de curado:

1. Curado de membrana.
 2. Carpetas de algodón o arpilleras.
 3. Papel impermeable.
-
1. Curado de membrana: Inmediatamente después de que la película de agua haya desaparecido de la superficie del pavimento, ésta última debe cubrirse de modo uniforme con el material líquido formador de membrana de curado, mediante una máquina de aspersión mecánica.
 2. Carpetas de algodón o arpilleras: Las superficies y bordes del pavimento deben cubrirse completamente con carpetas de algodón o arpilleras, que antes de colocarse deben saturarse con agua.
 3. Papel impermeable: Tan pronto como la superficie del pavimento se ha endurecido lo suficiente para no sufrir daño alguno, debe cubrirse por completo con papel impermeable y debe traslaparse 30 cm.

Los costados de la losa de pavimento deben recubrirse dentro de los 60 minutos siguientes al retiro de las cimbras. Cualquier área del recubrimiento que se vea dañada dentro del periodo de curado especificado debe repararse de inmediato. En clima frío debe proporcionar protección contra la congelación.

Protección.

Debe protegerse durante el tendido de concreto contra efectos naturales que alteren su comportamiento como la lluvia y temperatura, puede utilizarse telas de yute, algodón, etc. Asimismo también es necesario cuidarse del tránsito y personas, donde se puede hacer uso de vigilantes que dirijan el tránsito, así como la erección y conservación de señales y luces de advertencia, barricadas o cualquier medio conveniente.

E. JUNTAS.

Ubicación de juntas y de acero de refuerzo.

Toda junta, longitudinal o transversal, debe ajustarse a los detalles y posiciones señalados en los planos. Las pasajuntas y barras de amarre debe asegurarse su colocación precisa para asegurar que las ranuras aserradas o formadas estén sobre estas y trabajen de acuerdo a lo previsto. Las juntas de aislamiento deben colocarse en todas las estructuras que se proyecten a través, dentro o contra el pavimento.

Aserrado.

Para realizar el corte se debe utilizar cortadoras mecánicas con discos de diamante para corte con agua. El momento de aplicar esta operación debe de terminarse con oportunidad para que el concreto fresco no se desmorone en los bordes y debe efectuarse antes de que se presente el agrietamiento errático. Cuando el agrietamiento ya ha ocurrido debe omitirse el aserrado. Las juntas longitudinales son menos propensas al agrietamiento errático, que las juntas transversales.

La profundidad del corte deberá ser de 1/3 del espesor de losa para garantizar la creación de un plano de falla, el ancho de este corte será de 1/8 de pulgada, posteriormente a este corte y antes de la aplicación del sello, se debe ensanchar (cuando sea necesario), utilizando dos discos para formar una junta de ¼ de pulgada, este ensanchado se debe realizar a una profundidad de ¾ de pulgada para alojar la tirilla de respaldo y el sellador.

Limpieza de juntas.

Las juntas se deben limpiar perfectamente con agua y aire a presión garantizando que no existan polvos ni mortero en las caras expuestas, una vez limpia y seca la junta, se procederá a colocar una tira de respaldo.

Tira de respaldo.

Se colocan para las juntas longitudinales u otras juntas, son tiras de polietileno de espesor apropiado, instaladas mecánicamente en el concreto plástico a la profundidad especificada, teniendo cuidado de colocarse verticalmente. Una vez colocada la tira de respaldo se colocará el sellador de la junta.

Sellado de las juntas.

Para la colocación del sellador ya sea líquido o premoldeado es necesario tener en cuenta las recomendaciones del fabricante, para cumplir con la tarea asignada, cuando se utiliza un sellador líquido es necesario limpiar el material excedente de la superficie del pavimento de manera inmediata. Además debe sellarse antes de permitir el tránsito sobre el pavimento.

Apertura al tránsito.

Pueden permitirse la operación de equipo de construcción y de tránsito sobre los carriles ya colados, en las condiciones siguientes:

1. Las cargas de los vehículos no deben exceder de la carga de eje diseñada.
2. En ningún caso se permitirá el paso de equipo móvil de dosificación, pavimentadoras o camiones mezcladores sobre los carriles recién pavimentados, hasta que el pavimento se haya curado al menos durante 4 días y siempre que el concreto haya alcanzado una resistencia mínima a la flexión.
3. Las juntas transversales y longitudinales deben sellarse o protegerse de alguna manera, por ejemplo, utilizando tiras de poliuretano, silicón líquido, etc., antes de permitir el tránsito de construcción.
4. Debe retirarse todo desperdicio o salpicadura de concreto u otros materiales inmediatamente después de su ocurrencia.

CAPÍTULO 2 MÉTODO AASHTO

Objetivo particular: Conocer los factores que considera el método AASHTO y la importancia que tienen, así como comprender los pasos de diseño y aplicarlo para obtener el espesor óptimo del pavimento rígido para el Centro Operativo Estafeta.

2.1.-Factores de diseño

2.1.1.- Tránsito

2.1.2.- Resistencia de la subrasante

2.1.3.- Propiedades del concreto

2.1.4.- Transferencia de carga

2.1.5.- Drenaje

2.1.6.- Confiabilidad

2.1.7.- Servicialidad

2.1.8.- Espesor

2.2.-Consideraciones generales de proyecto para el Centro Operativo Estafeta

2.3.-Diseño estructural de pavimento rígido para el Centro Operativo Estafeta

2. MÉTODO AASHTO

El método AASHTO surge de la interpretación de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a gran escala tanto para pavimentos rígidos y flexibles, bajo condiciones conocidas y logrando obtener un diseño por fatiga. El método es adecuado para los diferentes pavimentos rígidos: concreto simple, concreto simplemente reforzado y concreto con refuerzo continuo. El procedimiento de diseño permite determinar el espesor de pavimento y cantidad de acero de refuerzo, cuando se usa, así como el diseño de las juntas. El método trata de involucrar un gran número de variables para tratar de modelar el pavimento a las condiciones más reales, pero es necesario adecuarla a las condiciones locales y a la experiencia. De manera general el proceso de diseño consiste en obtener las variables de diseño y propone dos maneras de realizar el cálculo del espesor de pavimento, por medio de nomogramas y por una ecuación.

2.1.-FACTORES DE DISEÑO

2.1.1.-TRÁNSITO

Un dato principal que considera el método AASHTO es obtener de la cantidad de tránsito el tipo y carga por eje, con la finalidad de homogeneizar estos ejes y calcular el número de ESAL's para diseño. Este número indica la cantidad de ejes equivalentes de 8.2 toneladas con una presión de inflado de 5.8 kg/cm².

Para la determinación del número de ejes sencillos equivalentes para diseño, se requiere conocer los datos que a continuación se mencionan:

1. Clasificación vehicular que deberá comprender todos y cada uno de los vehículos que circularán por la vialidad.
2. Tránsito diario promedio anual (TDPA) en el año inicial.
3. Porcentaje de vehículos en el TDPA.
4. Factor de crecimiento total (G), este factor depende de:

4.1. La tasa de crecimiento (r). Esta depende de muchos factores, tales como el desarrollo económico-social, la capacidad de la vía, dicha tasa puede variar de acuerdo a los tipos de vehículos ya que pueden crecer unos tipos más que otros, etc. Es importante investigar adecuadamente la tasa de crecimiento apropiada para el caso en particular. La tabla 2.1 muestra algunos valores típicos de tasa de crecimiento recomendados.

Tabla 2.1. Tasa de crecimiento.

Caso	Tasa de crecimiento
Crecimiento normal	1% a 3%
Vías completamente saturadas	0% a 1%
Con tráfico inducido	4% a 5%
Alto crecimiento	Mayor al 5%

4.2. Periodo de diseño o vida útil del pavimento (N). Puede elegirse por el diseñador o utilizar valores recomendados por la AASHTO mostrados en la tabla 2.2. El método considera un periodo de diseño mínimo de 20 años.

Tabla 2.2. Periodo de diseño.

Tipo de carretera	Periodo de diseño
Urbana con altos volúmenes de tránsito	30-50 años
Interurbana con altos volúmenes de tránsito	20-50 años
Pavimentada con bajos volúmenes de tránsito	15-25 años
Revestidas con bajos volúmenes de tránsito	10-20 años

Una vez conocida la tasa de crecimiento y periodo de diseño se calcula el factor de crecimiento, con la fórmula:

$$G = \frac{(1 + r)^N - 1}{r}$$

5. Número de carriles por sentido.
6. Factor de sentido. Representa el porcentaje por sentido de vehículos.
7. Factor de carga por eje equivalente (FCEE), este factor permite convertir el número de ejes equivalentes de peso normal a ejes equivalentes, para realizarlo es necesario considerar el espesor del pavimento, la carga de eje y de la servicialidad final que pretendemos para el pavimento, dicho factor es determinado por la AASHTO y es presentado en tablas (apéndice 1).
8. Factor de distribución de tránsito por carril (L). Es un factor que se obtiene de analizar la distribución de tránsito por carril, es decir, depende del número de carriles de proyecto de la vialidad. El método AASHTO recomienda factores de distribución mostrados en la tabla 2.3 y para la distribución de camiones pesados en vialidades con carriles múltiples, el carril de diseño será el exterior.

Tabla 2.3. Factor de distribución.

N. de carriles en cada sentido	Porcentaje de ejes equivalentes en el carril de diseño
1	100
2	80-100
3	60-80
4 o más	50-75

2.1.2.-RESISTENCIA DE LA SUBRASANTE

El método AASHTO considera necesario calcular la resistencia de la subrasante por medio de su módulo de reacción (o módulo efectivo de reacción), cuando se apoya directamente sobre esta, pero cuando no se tiene la capacidad es necesario colocarse una capa mejorada que cumpla con las características de subbase o base, en este caso será necesario modificar el módulo.

El valor del módulo de reacción puede obtenerse directamente de pruebas de campo, también pueden hacerse estimaciones de los valores ya sea por experiencia o por correlaciones con otras pruebas.

En proyectos nuevos las pruebas de campo son costosas y consume mucho tiempo, por lo general se realizan por correlaciones o pruebas más simples, como el valor relativo de soporte. Por ejemplo, con el valor relativo de soporte se puede utilizar la figura 2.1 para estimar K (módulo de reacción), en la parte superior de la figura se encuentra el porcentaje del valor relativo de soporte conocido, una vez ubicado se prolonga una línea vertical hasta la parte inferior y se lee el valor del módulo de reacción que corresponde.

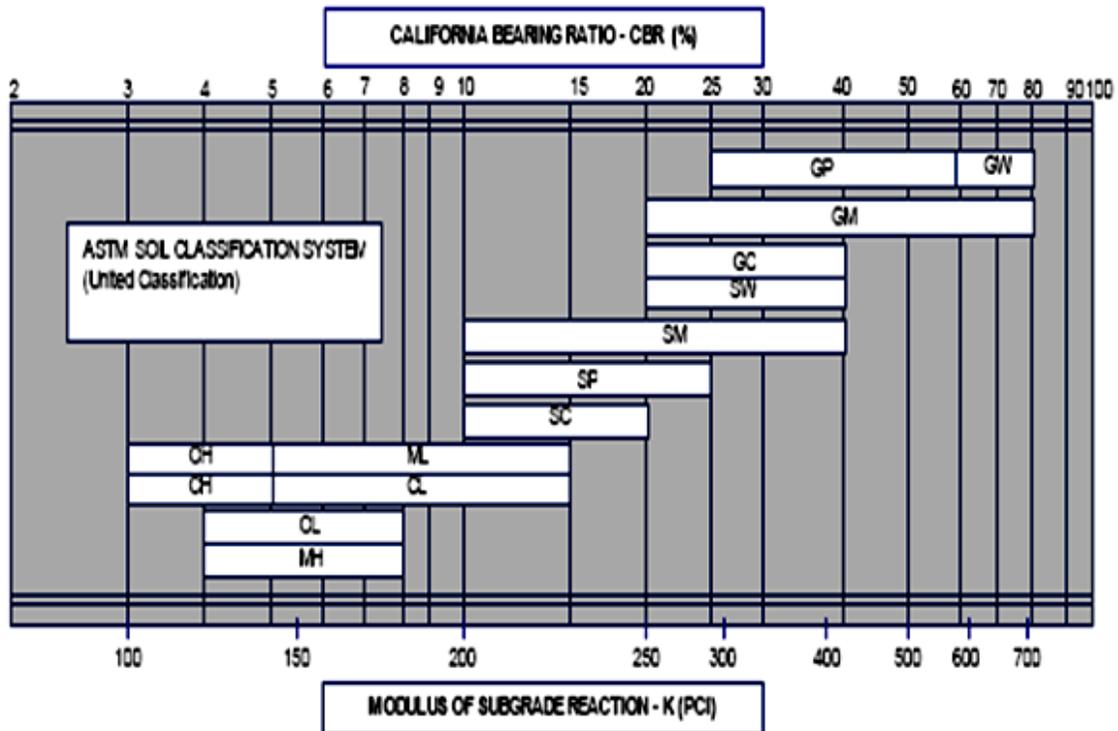


Figura 2.1. Estimación del módulo de reacción, mediante el uso del CBR.

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

Corrección del módulo de reacción por uso de una subbase.

Si se estima que la losa de concreto será apoyada sobre una capa mejorada utilizando material pétreo que cumpla con característica de base o subbase, estabilizado con cemento, cal, asfalto o de manera natural, etc., se estimará el módulo compuesto de reacción (Kc) que dependerá del espesor y tipo de material utilizado en la capa de mejoramiento.

El método proporciona la gráfica de la figura 2.2 para calcular K_c , conocido el espesor de la subbase, su módulo de elasticidad de la subbase o base y subrasante. Dicha gráfica supone una profundidad semi-infinita de la subrasante (espesor mayor de 10 pies bajo la superficie de la subrasante).

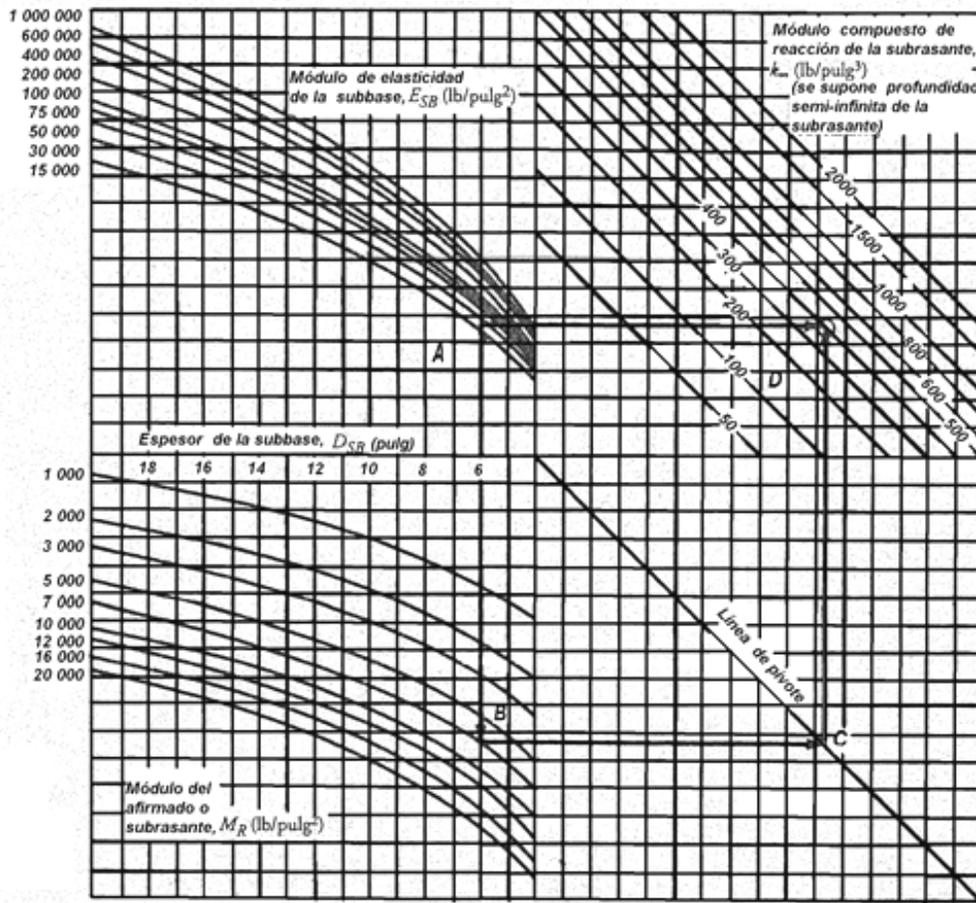


Figura 2.2. Corrección del módulo de reacción por uso de una subbase, suponiendo una profundidad semi-infinita de la subrasante.

Forma de estimar el módulo compuesto de reacción (K_c) con la gráfica de la figura 2.2.

1. Comenzar, en la gráfica, en el espesor de subbase y trazar una línea vertical para cruzar la gráfica del módulo de elasticidad de la subbase en A y la gráfica del módulo de elasticidad de la subrasante en B.
2. Trazar una recta horizontal desde B hasta cruzar la línea de pivote en C.
3. Trazar una vertical hacia arriba a partir de C, para cruzar la línea horizontal que se trazó desde A, como se indica en la figura 2.2. Este punto de intersección D es el módulo compuesto de reacción de la subrasante.

Corrección por presencia de una capa de roca.

Esta corrección se realiza cuando se tiene una capa de roca a una profundidad menor de 10 pies respecto de la subrasante, ya que puede ocasionar un aumento en el módulo de reacción; el método proporciona la gráfica de la figura 2.3, donde se tiene en cuenta la profundidad del estrato resistente con respecto a la subrasante, así como el módulo de elasticidad de la subrasante y el módulo efectivo de reacción.

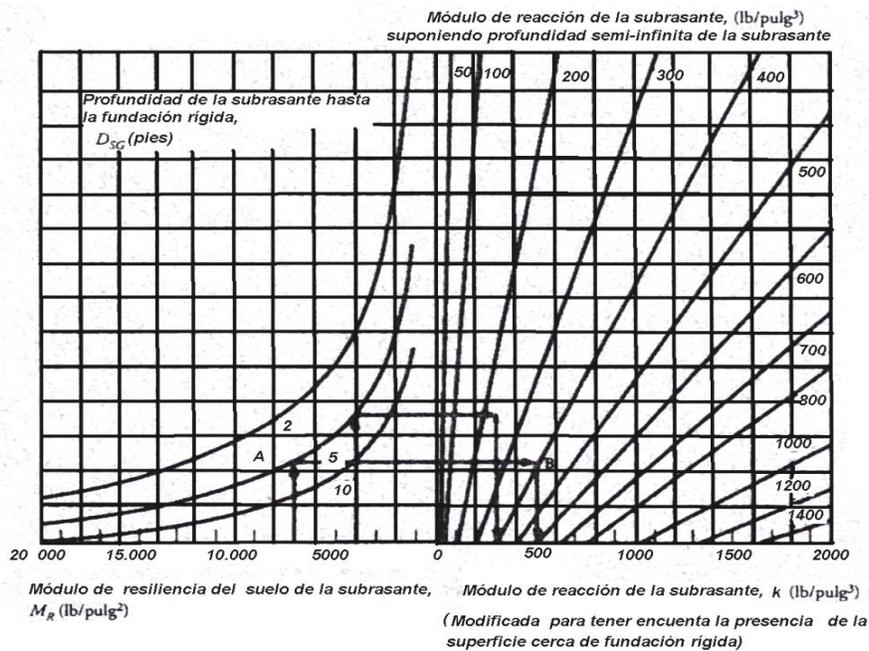


Figura 2.3. Corrección del módulo efectivo de reacción por presencia de una capa de roca a menos de 10 pies con respecto de la subrasante.

Forma de corregir el módulo efectivo de reacción (K) por presencia de una capa de roca utilizando la gráfica de la figura 2.3.

1. Comenzar en el módulo de elasticidad de la subrasante. Trazar una recta vertical que cruce la gráfica correspondiente a la profundidad de estrato resistente, punto A.
2. Partiendo de A, trazar una recta horizontal que cruce la línea correspondiente de K (módulo efectivo de reacción), punto B.
3. A partir de B, trazar una línea vertical hacia abajo, para determinar el módulo ajustado de reacción de la subrasante.

Corrección por pérdida de soporte.

El método AASHTO recomienda realizar una corrección del módulo efectivo de reacción de la subrasante por pérdida de soporte de la subbase o base, proporcionando la gráfica de la figura 2.4 para la corrección, donde es necesario conocer:

1. El módulo efectivo de reacción.
2. Factor de pérdida de soporte (Ls).

Es necesario aclarar que el factor de pérdida de soporte, depende del material de la subbase o base. El método proporciona la tabla 2.4 con datos del tipo de material y su pérdida de soporte.

Tabla 2.4. Pérdida de soporte.

Tipo de base	Pérdida de soporte (Ls)
Base granular tratada con cemento (E= 1000000 a 2000000 lb/in ²)	0.0-1.0
Mezcla de agregado y cemento (E=500000 a 1000000 lb/in ²)	0.0-1.0
Base tratada con asfalto (E=350000 a 1000000 lb/in ²)	0.0-1.0
Mezclas estabilizadas con materiales bituminosos (E=40000 a 300000 lb/in ²)	0.0-1.0
Mezclas estabilizadas con cal (E=20000 a 70000 lb/in ²)	1.0-3.0
Materiales granulares no aglomerados (E= 15000 a 45000 lb/in ²)	1.0-3.0
Materiales de grano fino o subrasante natural (E=3000 a 40000 lb/in ²)	2.0-3.0

Una vez conocido el valor del módulo efectivo de reacción y de pérdida de soporte (Ls) se procede a corregir el valor de K (módulo efectivo de reacción).

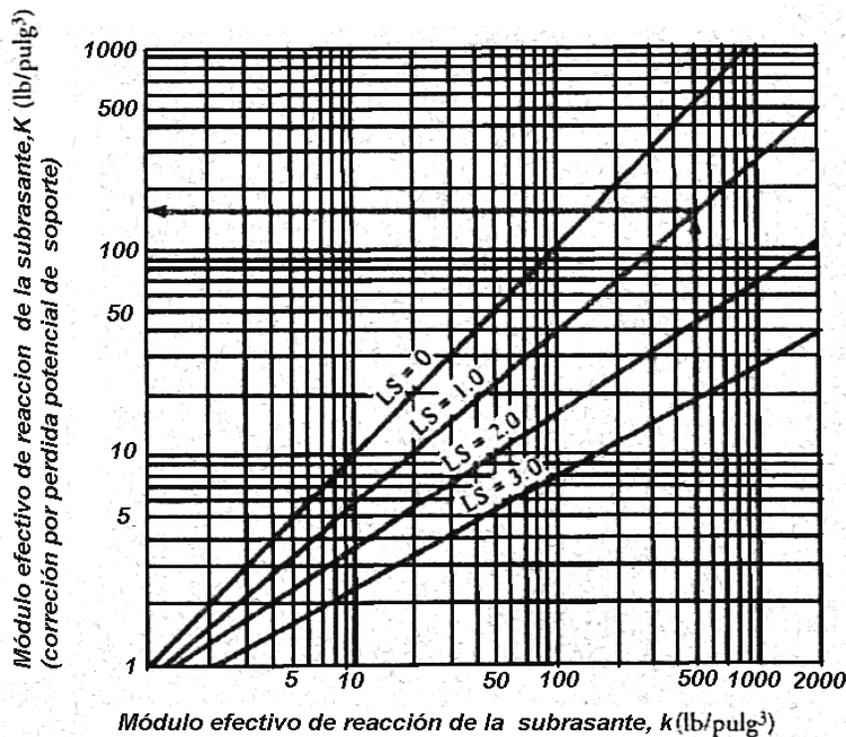


Figura 2.4. Corrección del módulo efectivo de reacción por pérdida de soporte.

La manera de utilizar la gráfica de la figura 2.4 es la siguiente:

1. Se ubica en la abscisa el módulo de reacción de la subrasante y se prolonga una línea de manera vertical hasta interceptar con la recta correspondiente al L_s (pérdida de soporte).
2. En la intercepción se prolonga una línea horizontal hasta la ordenada al origen y donde se intercepte, leer el módulo efectivo de reacción de la subrasante.

2.1.3.-PROPIEDADES DEL CONCRETO

Las propiedades del concreto que influyen en el diseño de pavimentos de concreto, son:

1. Módulo de elasticidad
2. Módulo de ruptura

Se pueden determinar mediante un proceso descrito en la norma (ASTM C78 y C469, respectivamente) o correlacionarlo con otras características, y/o tomando recomendaciones basados en experiencia.

Una manera sencilla de obtener las propiedades del concreto es utilizar la resistencia a la compresión (f'_c) ya que es una medida universal de calidad y durabilidad del concreto y la información esta fácilmente disponible. Las siguientes fórmulas utilizan dicha resistencia para determinar el módulo de ruptura y de elasticidad del concreto:

1. Módulo de ruptura.

$$S'_c = 2.3f'_c{}^{\frac{2}{3}}$$

Donde:

S'_c : Módulo de ruptura o resistencia a la flexión en lb/in².

f'_c : Resistencia a la compresión en lb/in².

2. Módulo de elasticidad.

Para el concreto de peso normal, el Instituto Americano del Concreto sugirió:

$$E_c = 57000\sqrt{f'_c}$$

Donde:

E_c : Módulo de elasticidad en lb/in².

f'_c : Resistencia a la compresión en lb/in².

O bien, tomando en cuenta las recomendaciones para el módulo de ruptura de la tabla 2.5 que varía desde los 41 kg/cm² (583psi) hasta 50 kg/cm² (771psi) a 28 días dependiendo del uso que se vaya tener y se debe elegir de acuerdo aun buen criterio.

Tabla 2.5. Recomendaciones de módulo de ruptura.

Tipo de pavimento	MR recomendado	
	kg/cm ²	Psi
Autopistas	48	682.7
Carreteras	48	682.7
Zonas industriales	45	640.1
Urbanas principales	45	640.1
Urbanas secundarias	42	597.4

La metodología AASHTO permite utilizar la resistencia a la flexión promedio, que se haya obtenido del resultado de ensayos a flexión de las mezclas diseñadas para cumplir la resistencia específica del proyecto. Estos resultados dependen de las condiciones de control y calidad que tenga el fabricante del concreto en sus procesos.

MR promedio = MR especificado + ZR (desviación estándar del MR)

La desviación estándar recomendado para calcular el módulo de ruptura promedio son mostrados en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Desviación estándar para calcular el módulo de ruptura.

Valores típicos de la desviación estándar.		Promedio.
Concreto premezclado.	6% a 12%	9.0%
Mezclado en planta.	5% a 10%	7.5%

2.1.4.-TRANSFERENCIA DE CARGA

Este factor se introduce para tener en cuenta la capacidad del pavimento de concreto para transmitir las cargas a través de las discontinuidades (juntas o grietas). El método AASHTO involucra la transferencia de carga mediante el coeficiente de transferencia de carga que depende de:

1. Los ejes equivalentes.
2. Tipo de transferencia de carga adoptado.
3. La existencia de soporte lateral.

1. Ejes equivalentes.

Los ejes equivalentes se obtienen de la transformación de los ejes sencillos mediante las consideraciones expuestas en el punto 2.1.1 Tránsito.

2. Tipo de transferencia de carga.

Una manera de realizar la transferencia es mediante la trabazón de agregados que se genera en la grieta debajo del corte de la junta, sin embargo esta forma de transferir carga solamente se recomienda para vías con tráfico ligero; otra manera de realizar dicha transferencia es mediante la utilización de pasajuntas, es la manera más conveniente de lograr la efectividad en la transferencia de cargas como puede observarse en la figura 2.5. Los investigadores recomiendan evaluar dos criterios para determinar la conveniencia de utilizar pasajuntas, cuando:

- El tráfico pesado sea mayor al 25% del tráfico total.
- El número de ejes equivalentes de diseño sea mayor de 5.0 millones de ESAL's.

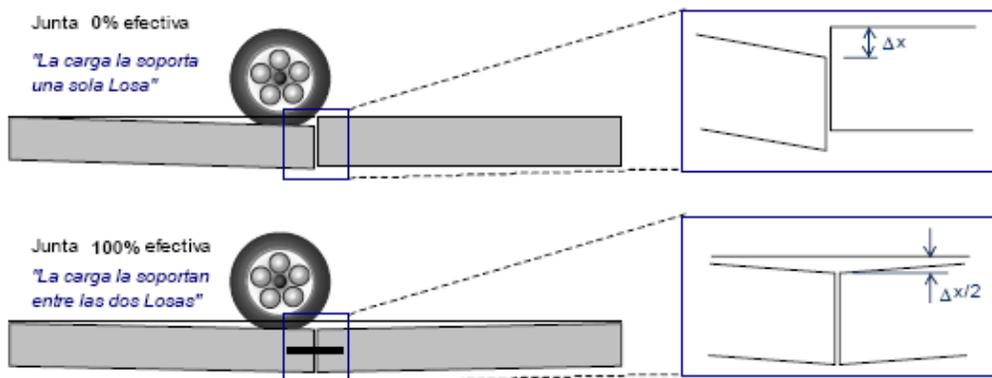


Figura 2.5. Transferencia de carga.

Otra manera de realizar la transferencia de carga es usando acero de refuerzo de varillas corrugadas armadas en ambas direcciones en la losa colada monóticamente, no se establece virtualmente la junta transversal, tomando en cuenta la remota aparición de grietas transversales.

3. Soporte lateral.

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

Carril ancho ≥ 4.0 m. (figura 2.6).

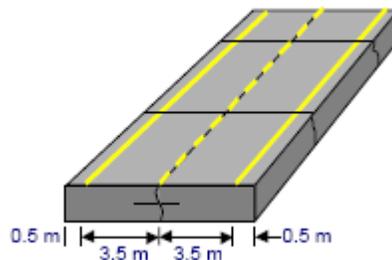


Figura 2.6. Carril ancho.

Confinamiento con guarniciones o banquetas (figura 2.7).



Figura 2.7. Confinamiento con guarnición.

Con acotamientos laterales (figura 2.8).

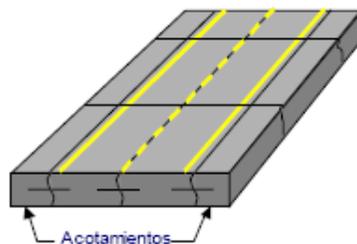


Figura 2.8. Acotamiento lateral.

El método AASHTO, proporciona la tabla 2.7 para determinar el valor del coeficiente de transferencia de carga.

Tabla 2.7. Coeficiente de transferencia.

Soporte lateral	Si	No	Si	No	Si	No	Tipo
ESAL's en millones	Con pasajuntas con refuerzo por temperatura		Sin pasajuntas (fricción entre agregados)		Con refuerzo continuo		
Hasta 0.3	2.7	3.2	2.8	3.2	-----	-----	Calles y caminos vecinales
0.3-1	2.7	3.2	3.0	3.4	-----	-----	
1 a 3	2.7	3.2	3.1	3.6	-----	-----	
3 a 10	2.7	3.2	3.2	3.8	2.5	2.9	Caminos principales y autopistas
10 a 30	2.7	3.2	3.4	4.1	2.6	3.0	
Más de 30	2.7	3.2	3.6	4.3	2.6	3.1	

2.1.5.-DRENAJE

El término drenaje a que se refiere el método AASHTO es la propiedad con que cuentan las capas que constituyen la estructura del pavimento para liberar el agua de sus granos, el valor del mismo depende de dos parámetros: la calidad del drenaje, que viene determinado por el tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada del pavimento y el porcentaje de tiempo a lo largo del año durante el cual el pavimento está expuesto a niveles de humedad aproximándose a la saturación. Dicho porcentaje depende de la precipitación media anual y de las condiciones de drenaje; en la tabla 2.8 se tabulan los valores recomendados por la AASHTO aplicables a pavimentos rígidos.

Tabla 2.8. Coeficiente de drenaje.

CD	Tiempo transcurrido para que el suelo libere el 50% de su agua libre	Porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad cercanas a la saturación			
		Menos a 1%	1-5%	5-25%	Más de 25%
Excelente	2 horas	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Bueno	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	Nunca	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

2.1.6.-CONFIABILIDAD

Se ha notado que la ESAL (número de ejes equivalentes) acumulada es un dato importante, para determinar el espesor de pavimento, el dato se suele basar en tasas de crecimiento que no pueden ser exactas, es decir, existen incertidumbres, el método AASHTO propone el uso de un factor de confiabilidad, que toma en cuenta las incertidumbres posibles en la predicción del tránsito y la predicción del funcionamiento.

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

Por lo tanto, el método AASHTO involucra factores estadísticos que influyen en el comportamiento del pavimento rígido, son:

- Desviación estándar
- Desviación normal estándar

Desviación estándar.

Representa la desviación estándar conjunta que conjuga la desviación estándar de la ley de predicción del tránsito en el periodo de diseño con la desviación estándar de la ley de predicción del comportamiento del pavimento, es decir, del número de ejes que puede soportar el pavimento hasta que su índice descienda por debajo de un determinado valor de índice de servicio último (Pt).

Se recomienda adoptar valores de desviación estándar (S_o) comprendidos dentro del siguiente intervalo:

$$0.30 \leq S_o \leq 0.40$$

Desviación normal estándar.

Si se supone que para un determinado conjunto de variables definiendo un pavimento (espesores de las capas, características de los materiales que las componen, condiciones de drenaje, etc.) el tránsito que puede soportar el mismo a lo largo de un determinado periodo de diseño sigue una ley de distribución normal, con una media M_t y una desviación típica S_o , por esta razón el método AASHTO propone valores de nivel de confiabilidad mostrados en la tabla 2.9 de acuerdo a la importancia del camino y está asociado a una desviación normal estándar (ZR), la tabla 2.10 muestra valores de ZR asociado a diferentes valores de confianza.

Tabla 2.9. Valores de confianza.

Tipo de camino	Zonas urbanas	Zonas rurales
Autopistas y carreteras	85-99.9	80-99.9
Arterias principales	80-99	75-95
Colectores	80-95	75-95
Caminos vecinales	50-80	50-80

Tabla 2.10. Desviación normal estándar asociados a diferentes valores de confianza.

Nivel de confianza	ZR	Nivel de confianza	ZR
50	0.000	93	1.476
60	0.253	94	1.555
70	0.524	95	1.645
75	0.674	96	1.751
80	0.841	97	1.881
85	1.037	98	2.054
90	1.283	99	2.327
91	1.340	99.9	3.090
92	1.405	99.99	3.750

El método involucra la desviación estándar y la desviación normal estándar mediante un producto ZRS_o que es un factor de seguridad, cabe aclarar que los valores recomendados del nivel de confianza depende del tráfico y del índice de servicio como se observa en la figura 2.9, donde se compara la curva de comportamiento y de diseño, donde se observa que no son coincidentes debido a errores asociados a la ecuación de comportamiento propuesto y a los errores de dispersión de la información con que se cálculo el dimensionamiento del pavimento y donde esta falta de coincidencia se debe ajustar mediante una desviación estándar S_o , para que se esté en el área de confiabilidad (figura 2.10).

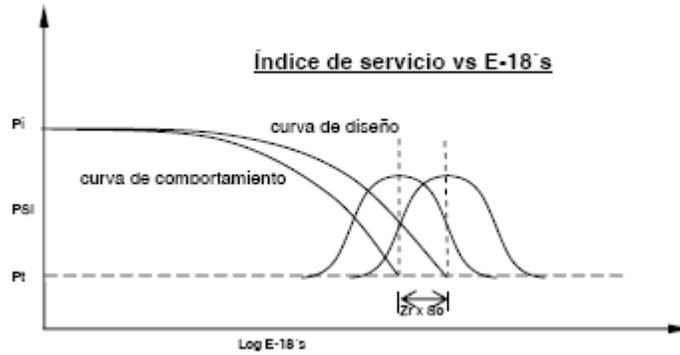


Figura 2.9. Falta de coincidencia de la curva de comportamiento y de diseño.

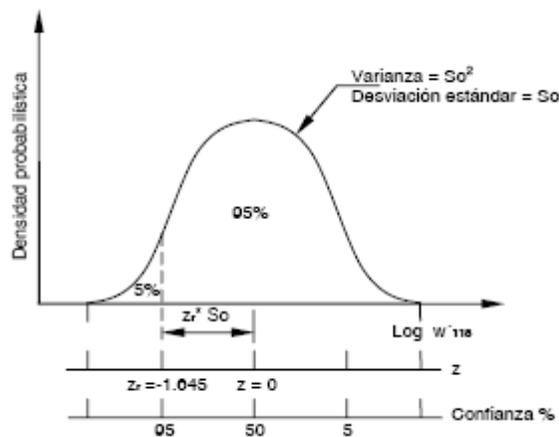


Figura 2.10. Ajuste del nivel de confiabilidad.

2.1.7.-SERVICIALIDAD

Al circular por primera vez o en repetidas ocasiones sobre una vialidad, el conductor experimenta la sensación de seguridad o inseguridad dependiendo de lo que ve y del grado de dificultad al controlar el vehículo.

La sensación de inseguridad en la entrada y salida de curvas horizontales podría deberse a una inadecuada velocidad de operación del vehículo que desaparecería simplemente reduciéndola a niveles especificados en el proyecto geométrico. Sin embargo, no siempre se reduce el concepto de seguridad al respetar las velocidades de proyecto, ya que existe otros factores asociados a ella. El principal factor asociado a la seguridad y comodidad del usuario, resulta ser la calidad de rodamiento; el agarre de la llanta al piso sin excesivo vibrado o sentir de juntas.

Por lo tanto, se califica la superficie del pavimento de acuerdo a una escala de valores de 0 a 5. Ciertamente que esta calificación decrece si el usuario observa agrietamientos o deterioros sobre la superficie del camino aun sin apreciar deformaciones. La valoración de estos elementos define el concepto del índice de servicio actual (PSI).

El índice de servicio actual (PSI) cataloga a la vialidad en estudio de acuerdo a la calificación otorgada por los usuarios con aproximaciones al décimo de unidad como se muestra en la tabla 2.11.

Tabla 2.11. Índice de servicio actual.

CALIFICACIÓN	CONCEPTO
0	Intransitable
0.1-1.0	Muy malo
1.1-2.0	Malo
2.1-3.0	Regular
3.1-4.0	Bueno
4.1-4.9	Muy bueno
5	Excelente

El diseño estructural basado en la servicialidad, considera necesario determinar los índices de servicio inicial (Po) y el índice de servicio terminal (Pt) para la vida útil o de diseño del pavimento.

El índice de servicio inicial (Po) se establece como la condición original del pavimento inmediatamente después de la construcción o rehabilitación. AASHTO estableció para pavimentos rígidos un valor deseable Po de 4.5 si no se tiene información disponible para diseño.

El índice de servicio terminal (Pt) ocurre cuando la superficie del pavimento ya no cumple con las expectativas de comodidad y seguridad exigidas por el usuario. Dependiendo de la importancia de la vialidad los valores del Pt pueden considerarse los indicados en la tabla 2.12.

Tabla 2.12. Índice de servicio terminal.

Pt	Clasificación
3	Autopista
2.5	Colectores
2.25	Calles comerciales e industriales
2.0	Calles residenciales y estacionamiento

La pérdida de servicialidad (ΔPSI), se define como la diferencia entre el índice de servicio inicial y final como se muestra en la figura 2.11.

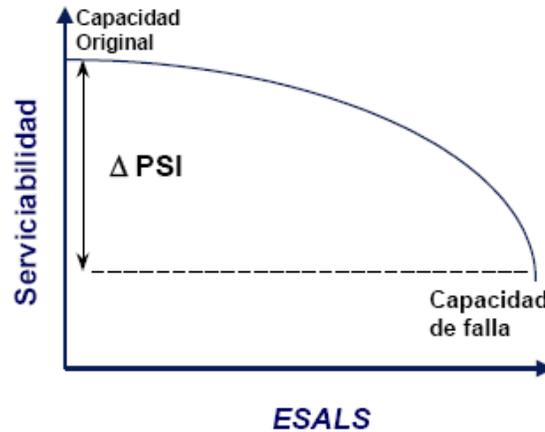


Figura 2.11. Pérdida de servicialidad.

2.1.8.-ESPESOR

Los factores que considera el método AASHTO son:

1. Módulo efectivo de reacción de la subrasante (lb/in³).
2. Módulo de elasticidad del concreto (lb/in²).
3. Módulo de ruptura (lb/in²).
4. Coeficiente de transferencia de carga.
5. Coeficiente de drenaje.
6. Desviación estándar.
7. Confiabilidad.
8. Índice de servicialidad.
9. Número de ejes equivalentes.

La lista anterior son datos necesarios para calcular el espesor del pavimento, que deberá soportar la carga proyectada de tránsito durante el periodo de diseño. El método AASHTO propone dos maneras de realizarlo:

1. Por nomogramas.
2. Por fórmula.

1. Usando nomogramas:

Para realizar el cálculo del espesor de pavimento se realiza en dos segmentos.

Segmento 1.

Para el segmento 1 se usa la figura 2.12 y es necesario conocer:

- Módulo efectivo de reacción.
- Módulo de elasticidad del concreto.
- Módulo de ruptura del concreto.
- Coeficiente de transferencia de carga.
- Coeficiente de drenaje.

A continuación se indica el procedimiento para usar la figura 2.12 para el segmento 1:

1. Con el valor del módulo efectivo de reacción, se busca en la primera gráfica ubicada a la izquierda en la figura 2.12, en el eje horizontal punto A y se prolonga de manera vertical hasta interceptar con el correspondiente módulo de elasticidad del concreto punto B, en ese punto se traza una línea perpendicular hacia la derecha hasta interceptar con la línea vertical punto C.
2. Se busca en la gráfica correspondiente el valor de módulo de ruptura del concreto punto D, una vez hecho esto se prolonga la línea que intercepto la vertical del punto C hasta cruzar por el punto D y llegar a la línea pivote (TL) punto E.
3. Se busca en la gráfica correspondiente el valor del coeficiente de transferencia de carga punto F, una vez ubicado se prolonga la línea que toca la línea pivote del punto E y se hace pasar por el punto F hasta la línea pivote (TL) punto G.
4. El siguiente paso es buscar en la gráfica correspondiente el valor del coeficiente de drenaje punto H, una vez ubicado se prolonga la línea que intercepto con TL del punto G y se hace pasar por el punto H y se prolonga hasta la línea de liga del punto I.

Para el primer segmento se determina un valor de línea de unión como se muestra en la figura 2.12 (línea continua ABCDEFGHI).

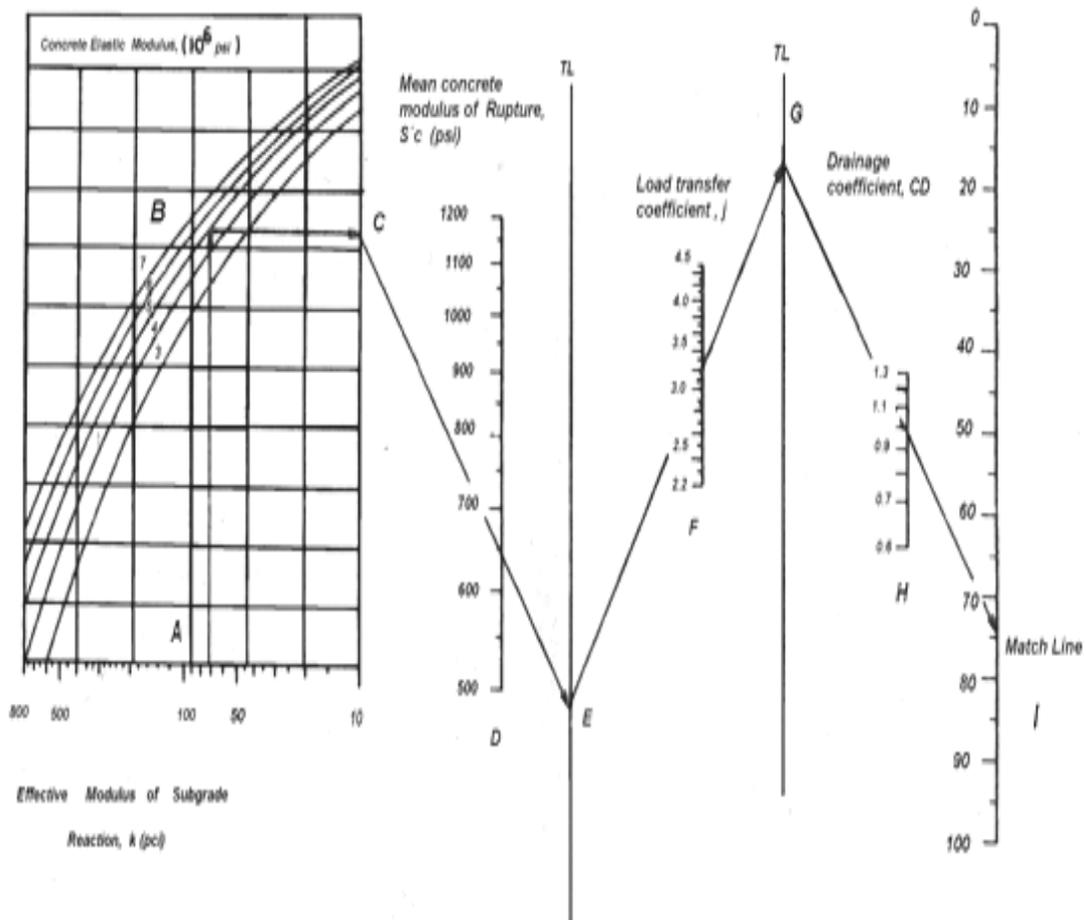


Figura 2.12. Nomograma para diseñar pavimentos rígidos, para el segmento 1.

Segmento 2.

Para el segmento 2 se usa la figura 2.13, donde es necesario conocer:

- El valor de la línea de liga del punto I, obtenido del paso anterior.
- Coeficiente de servicialidad.
- Confiabilidad, R% (ZR).
- Desviación estándar.
- Número de ejes equivalentes (ESAL's) estimado.

El procedimiento para usar el nomograma de la figura 2.13 es el siguiente:

5. Se ubica el valor de pérdida de servicialidad (Δ PSI) punto J, en su gráfica y se prolonga la línea que intercepta la línea de liga del punto I hasta cruzar por Δ PSI seleccionado punto J y se prolonga hasta tocar la línea vertical de la gráfica diseño de espesores punto K, sin introducirnos en ella.
6. Se ubica la gráfica que indica el porcentaje de confiabilidad elegido punto L, y también se ubica en la gráfica de la desviación estándar el respectivo valor adoptado punto M, se procede a unir el punto L, M con una línea que debe prolongarse hasta tocar con la línea pivote (TL) punto N.
7. Siguiendo con el paso anterior, se ubica en la gráfica que corresponde al número de ejes equivalentes (ESAL's) el valor estimado punto Ñ y se prolonga la línea que intercepto con la línea pivote del punto N hasta cruzar con el punto Ñ y se prolonga hasta la gráfica diseño de espesores de la losa en el eje horizontal punto O y sin introducirnos en la gráfica.
8. Con el punto K se traza una línea horizontal dentro de la gráfica diseño de espesores de la losa y de manera simultánea una línea vertical desde el punto O, con la finalidad de que ambas líneas se intercepten y donde se interceptan es el valor del espesor de la losa punto P.

Para el segmento 2 se continúa primeramente con la línea IJK, el segundo paso es unir los puntos LMÑO con una línea continua. El tercer paso es prolongar el punto O y el punto K como se muestra en la figura 2.13, para ubicar el espesor requerido según las condiciones establecidas. La condición es que el espesor obtenido sea igual al utilizado para calcular los ESAL's.

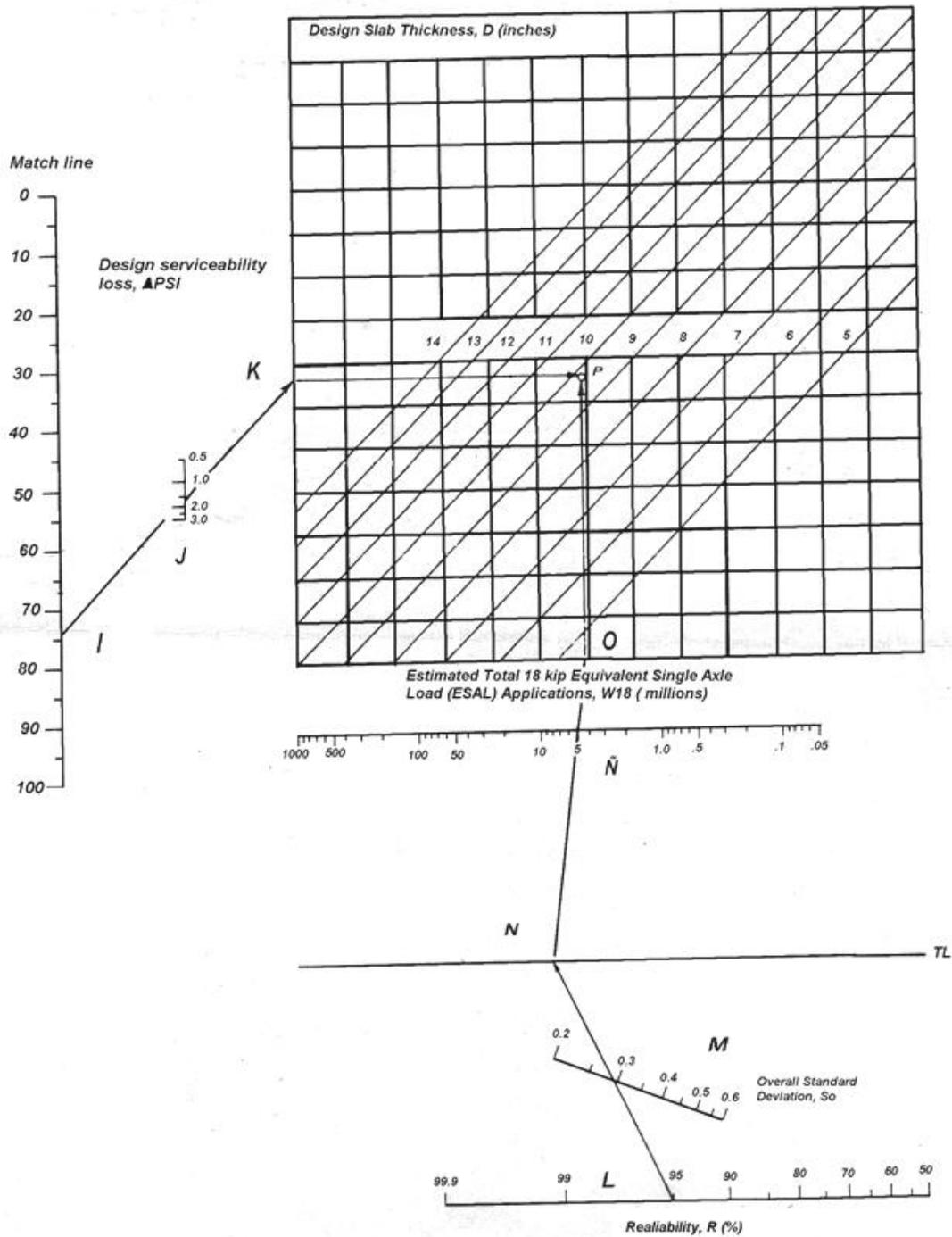


Figura 2.13. Nomograma para diseñar pavimentos rígidos, para el segmento 2.

2. Cálculo del espesor de pavimento por fórmula.

Los datos que se ocupan para los nomogramas son los mismos que se ocupan para la fórmula (indicada en la parte inferior). Se procede a sustituir valores en la fórmula propuesta y se tienen dos opciones para solucionar la ecuación:

1. Proponer valores de espesor (D) del pavimento, hasta que el espesor calculado sea igual al propuesto.
2. O despejar el valor de D de la ecuación.

$$\log_{10}(E18) = \left[Z_r \times S_o + 7.35 \times \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta \text{PSI}}{4.5-1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} \right] + (4.22 - 0.32 \times \text{pt}) \times \log_{10} \left[\frac{S'_c \times C_d \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[D^{0.75} \cdot \frac{18.42}{(E_c/k)^{0.25}} \right]} \right]$$

Diagram illustrating the formula for calculating pavement thickness (D) based on various parameters:

- Desviación Estándar Normal** (Normal Standard Deviation) points to Z_r .
- Error Estándar Combinado** (Combined Standard Error) points to S_o .
- Espeor** (Thickness) points to D .
- Diferencia de Serviciabilidad** (Difference in Serviceability) points to ΔPSI .
- Módulo de Ruptura** (Modulus of Rupture) points to S'_c .
- Coefficiente de drenaje** (Drainage Coefficient) points to C_d .
- Tráfico** (Traffic) points to $\log_{10}(E18)$.
- Serviciabilidad Final** (Final Serviceability) points to pt .
- Coefficiente de Transferencia de Carga** (Load Transfer Coefficient) points to J .
- Módulo de Elasticidad** (Modulus of Elasticity) points to E_c .
- Módulo de Reacción** (Modulus of Reaction) points to k .

2.2.-CONSIDERACIONES GENERALES DE PROYECTO PARA EL CENTRO OPERATIVO ESTAFETA.

El proyecto se ubica en la delegación Azcapotzalco, se encuentra en el altiplano mexicano a una altitud promedio de 2,240 m.s.n.m., con una pendiente media menor al 5%. Respecto de su zonificación geotécnica, se encuentra en la Zona II de transición en la que los depósitos profundos se encuentran a 20.00 m. de profundidad y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo-arenosos, intercalados con capas de arcilla lacustre. El clima predominante en la delegación es templado sub-húmedo con bajo grado de humedad, una temperatura media anual de 16°C y precipitación pluvial anual promedio de 758.4 mm.

La ubicación del proyecto se encuentra en una zona estratégica, por su ubicación con la zona industrial, comercial y recreativa, además de encontrarse comunicado al norte con el municipio de Tlalnepantla del Estado de México; al oriente, la delegación Gustavo A. Madero; al sur, las delegaciones Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo y al poniente, los municipios de Naucalpan y Tlalnepantla del Estado de México, esto tiene como ventaja un crecimiento en el servicio que presta la empresa, al parecer con un comportamiento lineal. El pavimento a proyectar será al interior de las instalaciones y exterior para comunicar con la vialidad primaria del Eje 5 Norte, que presenta un intenso uso de transporte público y de carga.

Según datos de las autoridades respectivas de la delegación, la clasificación de zona de riesgo en la colonia San Pablo Xalpa es predominante el riesgo de ruptura de ductos de Pemex debido a excavaciones, además de no existir problemas de encharcamientos graves.

El deterioro del pavimento existente en la zona es de un 10 a 15%, al parecer no existen demasiadas deformaciones plásticas, indicando que el índice de servicio es bueno.

Para la estructura del pavimento el módulo de elasticidad de la subrasante es de 5884psi; además se pretende colocar una capa de subbase de material proveniente de la mina Jesús del Monte (grava) y una base que corresponderá a una mezcla de material del banco Barrientos (tepetate) y mina Jesús del Monte, con un módulo de elasticidad de 20000psi.

Para el proyecto se pretende realizar dos carriles (un carril por sentido), ancho de carril de 7.1 metros, además todos los vehículos que entrarán y saldrán de las instalaciones lo harán cargados. La velocidad de proyecto será aproximadamente de 30km/hora. La clasificación vehicular así como el tránsito promedio diario anual para cada vehículo de proyecto son mostrados en la tabla 2.13. Para conocer el tipo y cargas por eje de vehículos máximas permitidas se considera la publicación del diario oficial del 26 de enero de 1994 (tabla 2.14).

Tabla 2.13. Clasificación vehicular y tránsito promedio diario anual.

Clasificación vehicular	TDPA
A2	15
A'2	15
B2	6
C2	15
C3	15
T2-S2	150
T3-S2	60
T3-S2-R2	15
T3-S2-R4	9
Total	300

Tabla 2.14. Tipo de carga por eje de vehículos máximas permitidas.

Clasificación	Carga por eje en toneladas									
	Cargados					Vacíos				
	Eje					Eje				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
A2	1	1				0.8	0.8			
A'2	1.7	3.8				1.3	1.2			
B2	5.5	10				3.5	7			
B3	5.5	14				4	8			
C2	6.2	11.3				3.5	3			
C3	6	20				4	4.5			
C4	6	25				4.5	8			

Tabla 2.14. Tipo de carga por eje de vehículos máximas permitidas (continuación).

Clasificación	Carga por eje en toneladas									
	Cargados					Vacíos				
	Eje					Eje				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
T2-S1	5.9	10.8	10.8			3.2	3.4	3.4		
T2-S2	5.8	10.5	19.2			4	3.5	4		
T3-S2	6	19	19			4	4	4		
T3-S3	5.8	19	23.7			4	4	5		
C2-R2	5.7	10.6	10.6	10.6		3.5	3	2	2	
C3-R2	5.8	19	10.6	10.6		4	4.5	2	2	
C3-R3	5.7	18.9	10.5	18.9		4	4.5	2	3	
T2-S1-R2	5.5	10.5	10.5	10.5	10.5	3.2	3.4	2.4	2.3	2.2
T2-S2-R2	5.5	10.5	19.2	10.5	10.5	3.2	3.5	4	2.3	2.2
T3-S1-R2	5.5	19	10.5	10.5	10.5	3.2	3.4	2.4	2.3	2.2
T3-S2-R2	5.5	17.7	17.7	9.8	9.8	4	4	3.5	2.3	2.2
T3-S2-R3	5.5	15	15	9.8	15	4	4	3.5	2.3	4
T3-S2-R4	5.5	15	15	15	15	4	4	3.5	3.3	3.2

El concreto a utilizar será elaborado y premezclado por una empresa particular y suministrada hasta la obra, además deberá cumplir con las especificaciones; el tendido del concreto se realizará por medios manuales, se considera que la experiencia del personal que realizará el tendido, la compactación, el curado, el texturizado y el aserrado de las juntas, así como la colocación del material para sellar la junta es regular.

Haciendo uso de las recomendaciones del módulo de ruptura (MR) de la tabla 2.5, se considera la sugerencia para vialidades secundarias ya que la vialidad solo recibirá vehículos de carga principalmente. Por lo tanto, el módulo de ruptura (MR) de proyecto será de 42 kg/cm², pero por incertidumbres en los procesos de elaboración, procesos constructivos y factores regionales, será necesario utilizar una resistencia mucho menor para diseñar el pavimento. Se recomienda hacer uso de una correlación con la resistencia a la compresión (f'c) de 250 kg/cm² equivalente a 3550 psi (lb/in²), para calcular el módulo de ruptura y de elasticidad del concreto.

La fórmula para estimar el módulo de elasticidad del concreto normal, del Instituto Americano del Concreto es:

$$E_c = 57000\sqrt{f'_c}$$

Y para el módulo de ruptura se utilizará la fórmula siguiente:

$$S'_c = 2.3f'_c\sqrt[3]{c}$$

Debido a los cambios constantes de temperatura y humedad en el Distrito Federal, se debe prevenir fenómenos de contracción y expansión de la losa lo cual originará agrietamientos que incrementarán por el uso de la vialidad de los vehículos pesados, que deberá controlarse mediante el uso de acero por temperatura. El pavimento se dividirá en losas de forma regular debido a requisitos del proceso constructivo, esto hace necesario colocar juntas con un mecanismo de transferencia de carga y barras de amarre, es decir, el pavimento debe ser con un refuerzo sencillo.

El proyecto exige que la pavimentación tenga tramos rectos y curvos, y que el nivel de rasante debe estar por arriba del nivel de rasante del pavimento exterior unos 30 cm., esto permitirá darle la pendiente longitudinal adecuada para desalojar el agua de lluvia lo más pronto posible de la estructura. Se considera proyectar una red de drenaje pluvial.

Debido al tipo de servicio que presta el Centro Operativo Estafeta es necesario que no existan demasiadas interrupciones del tránsito para realizar reparaciones en el pavimento.

Es necesario indicar que se repetirán las tablas y figuras necesarias para realizar la aplicación del método, con el fin de evitar las interrupciones en la lectura.

2.3.-DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO RÍGIDO PARA EL CENTRO OPERATIVO ESTAFETA.

El primer paso es obtener el número de vehículos esperados durante el primer año utilizando la tabla 2.15, donde es necesario considerar el crecimiento diario promedio anual de la clasificación vehicular; el número de sentidos, que servirá para seleccionar el factor de porcentaje de vehículos por sentido y la cantidad de carriles, para obtener el factor de tránsito por carril.

Tabla 2.15. Vehículos esperados el primer año.

Clasificación vehicular	%respecto al tránsito total	TDPA	TPD un sentido TDPA*D	L	Vehículos en el carril de diseño	Vehículos esperados durante el primer año carril de diseño
1	2	3	4	5	6	7
A2	5	15	7,5	0,5	3,75	1369
A'2	5	15	7,5	0,5	3.75	1369
B2	2	6	3	0,8	2,4	876
C2	5	15	7,5	0,8	6	2190
C3	5	15	7,5	0,8	6	2190
T2-S2	50	150	75	0,8	60	21900
T3-S2	20	60	30	0,8	24	8760
T3-S2-R2	5	15	7,5	0,8	6	2190
T3-S2-R4	3	9	4,5	0,8	3,6	1314
Total	100	300	150			

Descripción de tabla 2.15:

Columna 1: Representa la clasificación vehicular para el proyecto.

Columna 2: Muestra el porcentaje que corresponde a cada vehículo con respecto al tránsito diario promedio anual (TDPA), la fórmula utilizada es la siguiente:

$$\% \text{respecto al tránsito total} = \frac{\text{TDPA del vehículo}}{\text{TDPA total}} \times 100$$

Columna 3: Representa el tránsito diario promedio anual para cada vehículo.

Columna 4: Indica el tránsito promedio diario (TPD) en un sentido, para realizar el cálculo es necesario conocer si la vialidad será de un sentido o dos, que servirá para poder elegir el factor que representa el porcentaje por sentido de vehículos (D). Para el proyecto la vialidad será de dos carriles, un sentido por carril, ida y regreso, se elige un factor de 0.5, suponiendo que existirá un tránsito balanceado, es decir, los vehículos que entran son los que salen de la empresa. Una vez elegido dicho factor se ocupa la siguiente fórmula:

$$TPD \text{ por sentido} = TDPA \text{ del vehículo} \times D$$

Columna 5: Representa el factor de tránsito por carril (L), es decir, el porcentaje de tránsito a tener en cuenta en el carril de diseño. El valor puede obtenerse de las recomendaciones que da el método AASHTO (tabla 2.3) o realizar un análisis de distribución por carril de acuerdo al número total de carriles de proyecto, para nuestro caso se considera los valores que se muestran en la columna, el 0.5 debido a que los vehículos son del personal y de la empresa de uso no frecuente, y el 0.8 considerando los vehículos de la empresa, debido a que habrán ocasiones en donde el vehículo tarde 1 día en salir o entrar a la empresa, además de ser vehículos de uso frecuente.

Columna 6: Representa el total de vehículos en el carril de diseño y se obtiene considerando el TPD en un sentido y modificado por el factor de tránsito por carril, la fórmula utilizada es la siguiente:

$$Vehículos \text{ en el carril de diseño} = TPD \text{ en un sentido} \times L$$

Columna 7: Indica el número de vehículos esperados en el primer año en el carril de diseño. Se obtiene al considerar los vehículos en el carril de diseño y se multiplica por el número de días del año, la fórmula ocupada es:

$$\begin{aligned} Vehículos \text{ esperados en el primer año en el carril de diseño} \\ = 365 \times \text{vehículos en el carril de diseño} \end{aligned}$$

Una vez calculado el número de vehículos esperados en el primer año, el siguiente paso es calcular el número de ESAL's para los espesores de 20, 22.5, 23 y 25 centímetros, ocupando la tabla 2.16.

Tabla 2.16. Espesor supuesto 20 centímetros.

TIPO DE VEHÍCULO	EJE	CARGA TONELADAS	TIPO EJE	1)	Pt=2,5	r=1,5	ESAL's
1	2	3	4	5	6	7	8
A2	1	1	SENCILLO	1369	0.0002	23.12	6
	2	1	SENCILLO	1369	0.0002	23.12	6
A'2	1	1.7	SENCILLO	1369	0.002	23.12	63
	2	3.8	SENCILLO	1369	0.033	23.12	1044
B2	1	5.5	SENCILLO	876	0.181	23.12	3666
	2	10	SENCILLO	876	2.28	23.12	46184
C2	1	6.2	SENCILLO	2190	0.347	23.12	17572
	2	11.3	SENCILLO	2190	3.22	23.12	163063
C3	1	6	SENCILLO	2190	0.347	23.12	17572
	2	20	DOBLE	2190	5.16	23.12	261307
T2-S2	1	5.8	SENCILLO	21900	0.347	23.12	175724
	2	10.5	SENCILLO	21900	3.22	23.12	1630635
	3	19.2	DOBLE	21900	4.3	23.12	2177556
T3-S2	1	6	SENCILLO	8760	0.347	23.12	70289
	2	19	DOBLE	8760	4.3	23.12	871022
	3	19	DOBLE	8760	4.3	23.12	871022
T3-S2-R2	1	5.5	SENCILLO	2190	0.181	23.12	9166
	2	17.7	DOBLE	2190	3.55	23.12	179775
	3	17.7	DOBLE	2190	3.55	23.12	179775
	4	9.8	SENCILLO	2190	2.28	23.12	115461
	5	9.8	SENCILLO	2190	2.28	23.12	115461
T3-S2-R4	1	5.5	SENCILLO	1314	0.181	23.12	5500
	2	15	DOBLE	1314	1.87	23.12	56819
	3	15	DOBLE	1314	1.87	23.12	56819
	4	15	DOBLE	1314	1.87	23.12	56819
	5	15	DOBLE	1314	1.87	23.12	56819

TOTAL 7139148

En millones 7.14

Tabla 2.16. Espesor supuesto 22.5 centímetros.

TIPO DE VEHÍCULO	EJE	CARGA TONELADAS	TIPO EJE	1)	Pt=2,5	r=1,5	ESAL's
1	2	3	4	5	6	7	8
A2	1	1	SENCILLO	1369	0.0002	23.12	6
	2	1	SENCILLO	1369	0.0002	23.12	6
A'2	1	1.7	SENCILLO	1369	0.002	23.12	63
	2	3.8	SENCILLO	1369	0.032	23.12	1013
B2	1	5.5	SENCILLO	876	0.176	23.12	3565
	2	10	SENCILLO	876	2.34	23.12	47400
C2	1	6.2	SENCILLO	2190	0.341	23.12	17269
	2	11.3	SENCILLO	2190	4.67	23.12	236493
C3	1	6	SENCILLO	2190	0.341	23.12	17269
	2	20	DOBLE	2190	4.55	23.12	230416
T2-S2	1	5.8	SENCILLO	21900	0.341	23.12	172685
	2	10.5	SENCILLO	21900	3.36	23.12	1701532
	3	19.2	DOBLE	21900	4.55	23.12	2304158
T3-S2	1	6	SENCILLO	8760	0.341	23.12	69074
	2	19	DOBLE	8760	4.55	23.12	921663
	3	19	DOBLE	8760	4.55	23.12	921663
T3-S2-R2	1	5.5	SENCILLO	2190	0.176	23.12	8913
	2	17.7	DOBLE	2190	3.03	23.12	153442
	3	17.7	DOBLE	2190	3.03	23.12	153442
	4	9.8	SENCILLO	2190	2.34	23.12	118500
	5	9.8	SENCILLO	2190	2.34	23.12	118500
T3-S2-R4	1	5.5	SENCILLO	1314	0.176	23.12	5348
	2	15	DOBLE	1314	1.49	23.12	45273
	3	15	DOBLE	1314	1.49	23.12	45273
	4	15	DOBLE	1314	1.49	23.12	45273
	5	15	DOBLE	1314	1.49	23.12	45273

TOTAL 7383509
 En millones 7.38

Tabla 2.16. Espesor supuesto 23 centímetros.

TIPO DE VEHÍCULO	EJE	CARGA TONELADAS	TIPO EJE	1)	Pt=2,5	r=1,5	ESAL's
1	2	3	4	5	6	7	8
A2	1	1	SENCILLO	1369	0.0002	23.12	6
	2	1	SENCILLO	1369	0.0002	23.12	6
A'2	1	1.7	SENCILLO	1369	0.002	23.12	63
	2	3.8	SENCILLO	1369	0.032	23.12	1013
B2	1	5.5	SENCILLO	876	0.176	23.12	3565
	2	10	SENCILLO	876	2.34	23.12	47400
C2	1	6.2	SENCILLO	2190	0.341	23.12	17269
	2	11.3	SENCILLO	2190	3.36	23.12	170153
C3	1	6	SENCILLO	2190	0.341	23.12	17269
	2	20	DOBLE	2190	5.48	23.12	277512
T2-S2	1	5.8	SENCILLO	21900	0.341	23.12	172685
	2	10.5	SENCILLO	21900	3.36	23.12	1701532
	3	19.2	DOBLE	21900	4.55	23.12	2304158
T3-S2	1	6	SENCILLO	8760	0.341	23.12	69074
	2	19	DOBLE	8760	4.55	23.12	921663
	3	19	DOBLE	8760	4.55	23.12	921663
T3-S2-R2	1	5.5	SENCILLO	2190	0.176	23.12	8913
	2	17.7	DOBLE	2190	3.74	23.12	189397
	3	17.7	DOBLE	2190	3.74	23.12	189397
	4	9.8	SENCILLO	2190	2.34	23.12	118500
	5	9.8	SENCILLO	2190	2.34	23.12	118500
T3-S2-R4	1	5.5	SENCILLO	1314	0.176	23.12	5348
	2	15	DOBLE	1314	1.92	23.12	58338
	3	15	DOBLE	1314	1.92	23.12	58338
	4	15	DOBLE	1314	1.92	23.12	58338
	5	15	DOBLE	1314	1.92	23.12	58338

TOTAL 7488437

En millones 7.49

Tabla 2.16. Espesor supuesto 25 centímetros.

TIPO DE VEHÍCULO	EJE	CARGA TONELADAS	TIPO EJE	1)	Pt=2,5	r=1,5	ESAL's
1	2	3	4	5	6	7	8
A2	1	1	SENCILLO	1369	0.0002	23.12	6
	2	1	SENCILLO	1369	0.0002	23.12	6
A'2	1	1.7	SENCILLO	1369	0.002	23.12	63
	2	3.8	SENCILLO	1369	0.032	23.12	1013
B2	1	5.5	SENCILLO	876	0.175	23.12	3545
	2	10	SENCILLO	876	2.38	23.12	48210
C2	1	6.2	SENCILLO	2190	0.338	23.12	17117
	2	11.3	SENCILLO	2190	3.45	23.12	174711
C3	1	6	SENCILLO	2190	0.338	23.12	17117
	2	20	DOBLE	2190	5.75	23.12	291185
T2-S2	1	5.8	SENCILLO	21900	0.175	23.12	88621
	2	10.5	SENCILLO	21900	3.45	23.12	1747109
	3	19.2	DOBLE	21900	4.74	23.12	2400375
T3-S2	1	6	SENCILLO	8760	0.338	23.12	68466
	2	19	DOBLE	8760	4.74	23.12	960150
	3	19	DOBLE	8760	4.74	23.12	960150
T3-S2-R2	1	5.5	SENCILLO	2190	0.175	23.12	8862
	2	17.7	DOBLE	2190	3.87	23.12	195980
	3	17.7	DOBLE	2190	3.87	23.12	195980
	4	9.8	SENCILLO	2190	2.38	23.12	120525
	5	9.8	SENCILLO	2190	2.38	23.12	120525
T3-S2-R4	1	5.5	SENCILLO	1314	0.175	23.12	5317
	2	15	DOBLE	1314	1.95	23.12	59250
	3	15	DOBLE	1314	1.95	23.12	59250
	4	15	DOBLE	1314	1.95	23.12	59250
	5	15	DOBLE	1314	1.95	23.12	59250

TOTAL 7662034
 En
 millones 7.66

Descripción de la tabla 2.16. Para las columnas 2, 3 y 4 los datos se obtuvieron para cada vehículo de proyecto de la tabla 2.14 para el tipo y carga por eje de vehículos máximas permitidas, diario oficial 26 de enero de 1994.

Columna 5: Representa el número de vehículos esperados durante el primer año, previamente calculado en la tabla 2.15.

Columna 6: Representa los valores de factor de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, obtenido de las tablas del apéndice 1, donde es necesario considerar el tipo y carga por eje del vehículo, el espesor de la losa (suponiendo espesores de 20, 22.5, 23 y 25 centímetros) y índice de servicio final elegido (el valor para colectores y el mínimo índice de servicio en la República Mexicana es de 2.5).

A continuación se mostrara la manera de usar las tablas del apéndice 1 para obtener el factor de equivalencia de carga. Consideremos al vehículo C3 de proyecto, en su eje doble y conocido el índice de servicialidad final de 2.5 y suponiendo un espesor inicial de la losa de 20 cm. Se procede de la siguiente manera (ver figura 2.14):

1. Ubicar la tabla que corresponda al tipo de eje (tándem) y al índice de servicialidad final ($Pt=2.5$).
2. Ubicar en la columna de carga por eje (en toneladas) el valor que corresponde al vehículo seleccionado, en nuestro caso el vehículo C3 tiene una carga por eje doble según las cargas máximas permitidas diario oficial 26 de enero de 1994 (tabla 2.14) que considera un peso de 20 toneladas.
3. Ubicar el espesor propuesto de la losa en la columna respectiva.
4. Ubicar el valor del factor de equivalencia, que será donde intercepten los puntos ubicados en los pasos 2 y 3, para el vehículo seleccionado el valor es de 5.16.

De la misma manera que se realizo para vehículo C3 de proyecto se realiza para cada tipo de vehículo de proyecto.

Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos									
Ejes tándem Pt=2.5									
Carga por eje ton.	Espesor de la losa, cm.								
	15	17.5	20	23	25	28	30	33	35.5
1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
2	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
3	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
4	0.007	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
4.5	0.015	0.014	0.013	0.013	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120
5.5	0.031	0.028	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
6.5	0.057	0.052	0.049	0.048	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
7.0	0.097	0.089	0.084	0.082	0.081	0.081	0.080	0.080	0.080
8.0	0.155	0.143	0.136	0.133	0.132	0.131	0.131	0.131	0.131
9.0	0.234	0.220	0.211	0.206	0.204	0.203	0.203	0.203	0.203
10.0	0.340	0.325	0.313	0.308	0.305	0.304	0.303	0.303	0.303
11.0	0.475	0.462	0.450	0.444	0.441	0.440	0.439	0.439	0.439
12.0	0.644	0.637	0.627	0.622	0.620	0.619	0.618	0.618	0.618
13.0	0.855	0.854	0.852	0.850	0.850	0.850	0.849	0.849	0.849
14.0	1.11	1.12	1.13	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
14.5	1.43	1.44	1.47	1.49	1.50	1.51	1.51	1.51	1.51
15.5	1.82	1.82	1.87	1.92	1.95	1.96	1.97	1.97	1.97
16.5	2.29	2.27	2.35	2.43	2.48	2.51	2.52	2.52	2.53
17.5	2.85	2.80	2.92	3.03	3.12	3.16	3.18	3.20	3.20
18.5	3.52	3.42	3.58	3.74	3.87	3.94	3.98	4.00	4.01
19.5	4.32	4.16	4.37	4.57	4.74	4.86	4.91	4.95	4.96
20.0	5.26	5.01	5.16	5.41	5.63	5.92	6.01	6.06	6.09
21.0	6.36	6.01	6.14	6.53	6.90	7.14	7.28	7.36	7.40
22.0	7.64	7.16	7.27	7.73	8.21	8.55	8.75	8.86	8.92

Figura 2.14. Obtención del factor de equivalencia.

Columna 7: Representa el factor de crecimiento total, para realizar el cálculo es necesario considerar la tasa de crecimiento (r), se considera los valores propuestos en la tabla 2.1, para un crecimiento normal, el valor a considerar es de r=1.5%, considerando un rango de seguridad.

Tabla 2.1. Tasa de crecimiento.

Caso	Tasa de crecimiento
Crecimiento normal	1% a 3%
Vías completamente saturadas	0% a 1%
Con tráfico inducido	4% a 5%
Alto crecimiento	Mayor al 5%

Además es necesario establecer el periodo de diseño(N), se puede utilizar las recomendaciones de la tabla 2.2, para nuestro caso se toma en cuenta la recomendación a 20 años.

Una vez seleccionado los valores de la tasa de crecimiento (r=1.5) y el periodo de diseño (N=20), se sustituye en la fórmula siguiente, obteniéndose un factor de crecimiento (G) de 23.12.

$$G = \frac{(1 + r)^N - 1}{r} = \frac{(1 + 0.015)^{20} - 1}{0.015} = 23.12$$

Columna 8: Para obtener el número de ESAL's para el periodo de diseño se multiplico la columna 5, 6 y 7 obteniéndose los ejes equivalentes para cada vehículo, pero el resultado que nos interesa no son los números de ESAL para un vehículo en particular, sino la suma de ESAL's de todos los vehículos.

Conclusión.

Los números de ejes equivalentes (ESAL's) para los espesores propuestos son los siguientes:

Espesor (cm.)	ESAL`s (millones)
20	7.14
22.5	7.38
23	7.49
25	7.66

Podemos observar que los ejes equivalentes son superiores a los 5 millones, por lo tanto, es necesario usar pasajuntas en las juntas.

Cálculo del módulo de reacción de la subrasante (K).

Para nuestro caso utilizamos la gráfica proporcionada por la AASHTO (figura 2.2) donde es necesario conocer el módulo de elasticidad de la subrasante y subbase o base, siendo necesario establecer un espesor de subbase o base.

Valores considerados:

Espesor de la subbase 10 pulgadas (considerando subbase y base).

Módulo de elasticidad de la base 20000 psi (lb/in^2).

Módulo de elasticidad de la subrasante 5884 psi (lb/in^2).

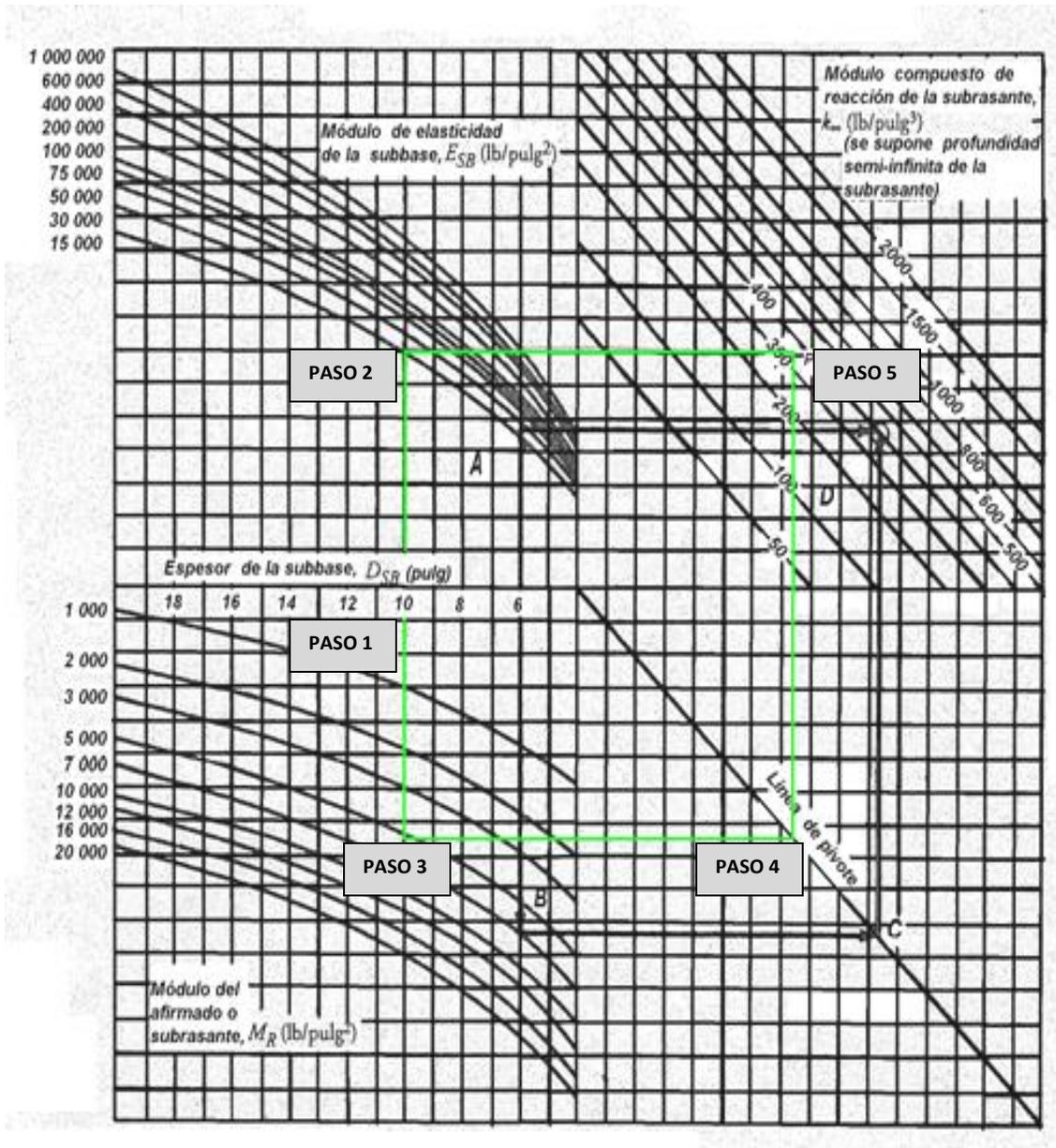


Figura 2.2. Corrección del módulo de reacción por uso de una subbase, suponiendo una profundidad semi-infinita de la subrasante.

Estimación del módulo compuesto de reacción de la subrasante (K_c), con la gráfica de la figura 2.2:

1. Comenzar en la gráfica en el espesor de base de 10 pulgadas paso 1 y trazar una línea vertical para cruzar la gráfica del módulo de elasticidad de la base de 20000 psi paso 2 y la gráfica del módulo de elasticidad de la subrasante de 5884 psi paso 3.

2. Trazar una recta horizontal del paso 3 hasta tocar la línea de pivote paso 4.
3. Trazar una vertical hacia arriba a partir del paso 4, de manera simultánea se traza una horizontal desde el paso 2 y donde se intercepten es el módulo compuesto de reacción de la subrasante paso 5, obteniéndose un valor de 320 pci (lb/in^3).

Corrección por pérdida de soporte.

El primer paso es seleccionar el factor de pérdida de soporte de la tabla 2.4, el valor del módulo de elasticidad de la base es de $20000 lb/in^2$, por lo que se clasifica como material granular no aglomerado, con una pérdida de soporte de 1.0 y 3.0 como se muestra en la tabla, se considera un valor de 1.0 debido a que se pretende colocar una subbase que garantiza el drenaje y reduce la erosión de la base.

Tabla 2.4. Pérdida de soporte.

Tipo de base	Pérdida de soporte (Ls)
Base granular tratada con cemento (E=1000000 a 2000000 lb/in ²)	0.0-1.0
Mezcla de agregado y cemento (E=500000 a 1000000 lb/in ²)	0.0-1.0
Base tratada con asfalto(E=350000 a 1000000 lb /in ²)	0.0-1.0
Mezclas estabilizadas con materiales bituminosos(E=40000 a 300000 lb/in ²)	0.0-1.0
Mezclas estabilizadas con cal (E=20000 a 70000 lb./in ²)	1.0-3.0
Materiales granulares no aglomerados (E=15000 a 45000 lb/in ²)	1.0-3.0
Materiales de grano fino o subrasante natural(E=3000 a 40000lb/in ²)	2.0-3.0

Una vez seleccionado el factor de pérdida de soporte es necesario modificar el valor del módulo de reacción de la base que tiene un valor de 320 pci, es necesario utilizar la gráfica de la figura 2.4.

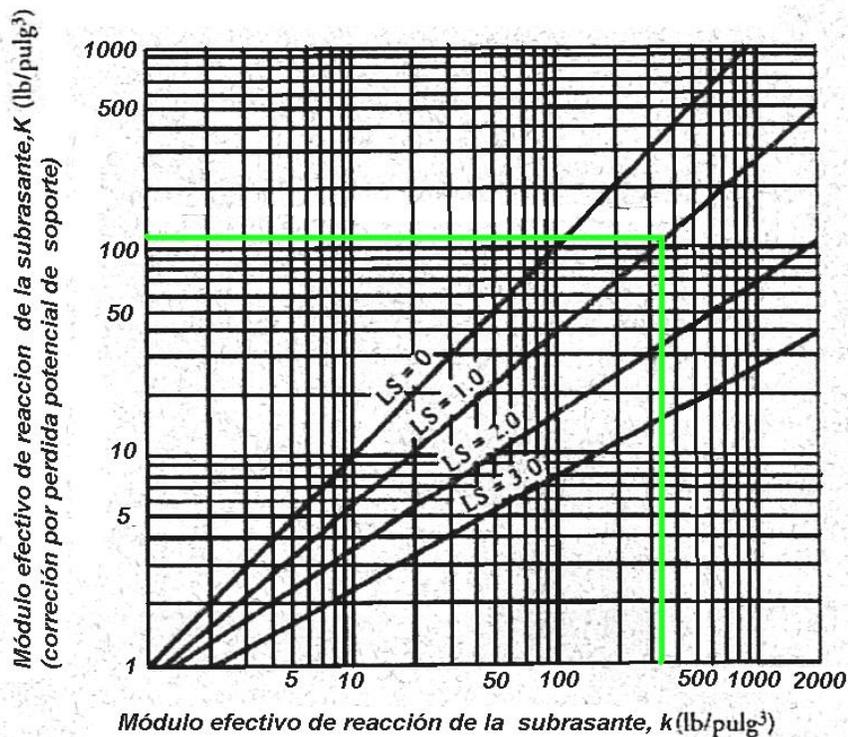


Figura 2.4. Corrección del módulo efectivo de reacción por pérdida de soporte.

Corrección por pérdida de soporte utilizando la gráfica de la figura 2.4:

1. Se ubica en la abscisa el módulo de reacción de la subrasante de 320pci paso 1 y se prolonga de manera vertical hasta interceptar con la recta correspondiente al Ls=1 paso 2.
2. En la intercepción se prolonga una línea horizontal del paso 2 hasta la ordenada al origen y donde se intercepte, se lee el módulo efectivo de reacción de la subrasante, para el proyecto es de 110 pci.

Cálculo del módulo de elasticidad del concreto.

Para el proyecto se realizará una correlación con el $f'c$ para obtener el módulo de elasticidad del concreto, se utiliza la fórmula propuesta para un concreto normal, del Instituto Americano del Concreto:

$$E_c = 57000^2 \sqrt{f'c}$$

El $f'c$ a utilizar es de $250kg/cm^2$

$$f'c = 250 \frac{kg}{cm^2} = 3550 \text{ psi} \left(\frac{lb}{in^2} \right)$$

$$E_c = 57000 \sqrt[3]{3550} = 3.4 \times 10^6 \text{ psi.}$$

Cálculo del módulo de ruptura del concreto.

Se obtendrá realizando una correlación con el $f'c$ ($250kg/cm^2$), utilizando la siguiente fórmula:

$$S'c = 2.3f'c^{\frac{2}{3}}$$

$$S'c = 2.3 \times 3550^{\frac{2}{3}} = 535 \text{ psi}$$

Coefficiente de transferencia de carga.

Considerando la tabla 2.7 proporcionada por el método AASHTO. Para el Centro Operativo Estafeta, se considera que tendrá soporte lateral, usando guarniciones y acotamientos. Debido a que no se permitirá demasiadas interrupciones en el tráfico y el pavimento lo usará principalmente el tráfico pesado, por lo que es necesario construir un pavimento en losas de forma regular y con pasajuntas en las juntas para la transferencia de carga entre las losas. Se utilizará refuerzo por temperatura en la losa de concreto, para controlar el agrietamiento debido a los cambios de temperatura. El número de ESAL's previamente calculado con los espesores supuestos, es mayor de 3 y menor de 10 millones, por lo tanto, el tipo de camino es principales y autopistas. El valor del coeficiente es de $J = 2.7$.

Tabla 2.7. Coeficiente de transferencia de carga.

Soporte lateral	Si		No		Si		No		Tipo
	ESAL's en millones	Con pasajuntas con refuerzo por temperatura.	con pasajuntas	sin pasajuntas (fricción entre agregados).	Con refuerzo continuo.				
Hasta 0.3	2.7	3.2	2.8	3.2	-----	-----	Calles y caminos vecinales		
0.3-1	2.7	3.2	3.0	3.4	-----	-----			
1 a 3	2.7	3.2	3.1	3.6	-----	-----			
3 a 10	2.7	3.2	3.2	3.8	2.5	2.9	Caminos principales y autopistas		
10 a 30	2.7	3.2	3.4	4.1	2.6	3.0			
Más de 30	2.7	3.2	3.6	4.3	2.6	3.1			

Coeficiente de drenaje.

Utilizando la tabla 2.8. Se considera para el Centro Operativo Estafeta proyectar un drenaje pluvial para que no se estanque el agua de lluvia en la estructura del pavimento, además existirá un desnivel con la calle de aproximadamente 30 centímetros. Para obtener el valor del coeficiente de drenaje según la tabla propuesta por el método es necesario calificar el drenaje, la calificación propuesta para el proyecto es buena y el tiempo transcurrido para que el suelo libere el 50% de su agua libre es de 1 día, es decir, aunque se encuentra en una zona de baja probabilidad de inundación según las autoridades, se considera que puede existir una inundación ya sea por un fenómeno extraordinario o por deficiencias en la construcción de la red de drenaje pluvial. Se considera un porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad cercanas a la saturación de menos a 1% debido a la subbase que se colocará. Se considera un coeficiente de drenaje $CD=1.15$ para diseño.

Tabla 2.8. Coeficiente de drenaje.

CD	Tiempo transcurrido para que el suelo libere el 50% de su agua libre	Porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad cercanas a la saturación			
		Menos a 1%	1-5%	5-25%	Más de 25%
Excelente	2 horas	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Bueno	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	Nunca	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

Desviación estándar.

Para pavimentos rígidos la AASHTO sugiere un valor de $S_0 = 0.30$ que será el que se considere para el proyecto.

Porcentaje de confianza (confiabilidad).

Se toma en cuenta los valores recomendados de la tabla 2.9. Se elige un nivel de confianza del 95 % debido a que no se permitirá demasiadas interrupciones en el tráfico, además de saber que el proyecto está en una zona urbana y considerando la sección de pavimento que comunica con el eje 1 Norte, que tendrá la función de colector. Y utilizando la tabla 2.10 se obtiene el valor de la desviación normal estándar que corresponde con el nivel de confianza elegido, con un valor de 1.645.

Tabla 2.9. Valores de confianza.

Tipo de camino	Zonas urbanas	Zonas rurales
Autopistas y carreteras	85-99.9	80-99.9
Arterias principales	80-99	75-95
Colectores	80-95	75-95
Caminos vecinales	50-80	50-80

Tabla 2.10. Desviación normal estándar asociados a diferentes valores de confianza.

Nivel de confianza	ZR	Nivel de confianza	ZR
50	0.000	93	1.476
60	0.253	94	1.555
70	0.524	95	1.645
75	0.674	96	1.751
80	0.841	97	1.881
85	1.037	98	2.054
90	1.283	99	2.327
91	1.340	99.9	3.090
92	1.405	99.99	3.750

Índice de servicio inicial (Po).

Se establece la condición del pavimento inmediatamente después de la construcción en un concepto de muy bueno según las recomendaciones de la tabla 2.11, pero atendiendo una segunda recomendación del método AASHTO con un valor deseable Po de 4.5 como valor de diseño.

Tabla 2.11. Índice de servicio actual.

CALIFICACIÓN	CONCEPTO
0	Intransitable
0.1-1.0	Muy malo
1.1-2.0	Malo
2.1-3.0	Regular
3.1-4.0	Bueno
4.1-4.9	Muy bueno
5	Excelente

Índice de servicio terminal (Pt).

Para obtener el índice de servicio final se utiliza la tabla 2.12. Considerando la sección de pavimento que servirá como colector para el Centro Operativo Estafeta se obtiene un valor de 2.5, siendo el mínimo índice de servicio para la República Mexicana.

Tabla 2.12. Índice de servicio terminal.

Pt	Clasificación
3	Autopista
2.5	Colectores
2.25	Calles comerciales e industriales
2.0	Calles residenciales y estacionamiento

Pérdida de servicialidad (ΔPSI).

Una vez seleccionado el índice de servicialidad inicial y final se calcula la pérdida que tendrá durante el periodo de diseño, mediante una diferencia, el valor calculado es de 2, es decir, que la calificación del pavimento estará dentro del concepto de regular según el método.

$$\Delta PSI = P_o - P_t = 4.5 - 2.5 = 2$$

Datos para calcular el espesor de losa:

Módulo efectivo de reacción. **$K=110pci$**

Módulo de elasticidad del concreto. $E_c = 3.4 \times 10^6 psi$

Módulo de ruptura. $S'_c = 535 psi$

Coeficiente de transferencia de carga. $J = 2.7$

Coeficiente de drenaje. $CD = 1.15$

Desviación estándar. $S_o = 0.30$

Confiabilidad. **95%**

Desviación normal estándar. $ZR = 1.645$

Pérdida de servicialidad. $\Delta PSI = 2$

Número de ejes equivalentes para los espesores propuestos.

Espesor (cm.)	ESAL`s (millones)
20	7.14
22.5	7.38
23	7.49
25	7.66

Con los datos anteriores y utilizando los nomogramas de las figuras 2.12 y 2.13 para el segmento uno y dos, respectivamente. Calcular el espesor de losa necesario.

Segmento 1.

Para el segmento 1 se usa la figura 2.12 (mostrada en la parte inferior de este segmento) y los datos necesarios son:

- Módulo efectivo de reacción **$K=110pci$**
- Módulo de elasticidad del concreto $E_c = 3.4 \times 10^6 psi$
- Módulo de ruptura $S'_c = 535 psi$
- Coeficiente de transferencia de carga $J = 2.7$
- Coeficiente de drenaje $CD = 1.15$

1. Con el módulo efectivo de reacción **110pci** se busca este valor en el eje horizontal punto A y se prolonga de manera vertical hasta interceptar con el correspondiente módulo de elasticidad del concreto $E_c = 3.4 \times 10^6 psi$ punto B, en ese punto se traza una línea perpendicular hacia la derecha hasta interceptar con la línea vertical punto C.

2. Se busca en la gráfica correspondiente el valor del módulo de ruptura del concreto $S'_c = 535\text{psi}$ punto D, una vez hecho esto se prolonga la línea que intercepto la vertical del punto C hasta cruzar por el punto D y llegar a la línea pivote (TL) punto E.
3. Se busca en la gráfica correspondiente el valor del coeficiente de transferencia $J = 2.7$ punto F, una vez ubicado se prolonga la línea que toca la línea pivote del punto E y se hace pasar por el punto F hasta la línea pivote (TL) punto G.
4. El siguiente paso es buscar en la gráfica correspondiente el valor del coeficiente de drenaje $CD = 1.15$ punto H, una vez ubicado se prolonga la línea que intercepto con TL del punto G y se hace pasar por el punto H hasta la línea de liga del punto I, obteniéndose una lectura de **67**.

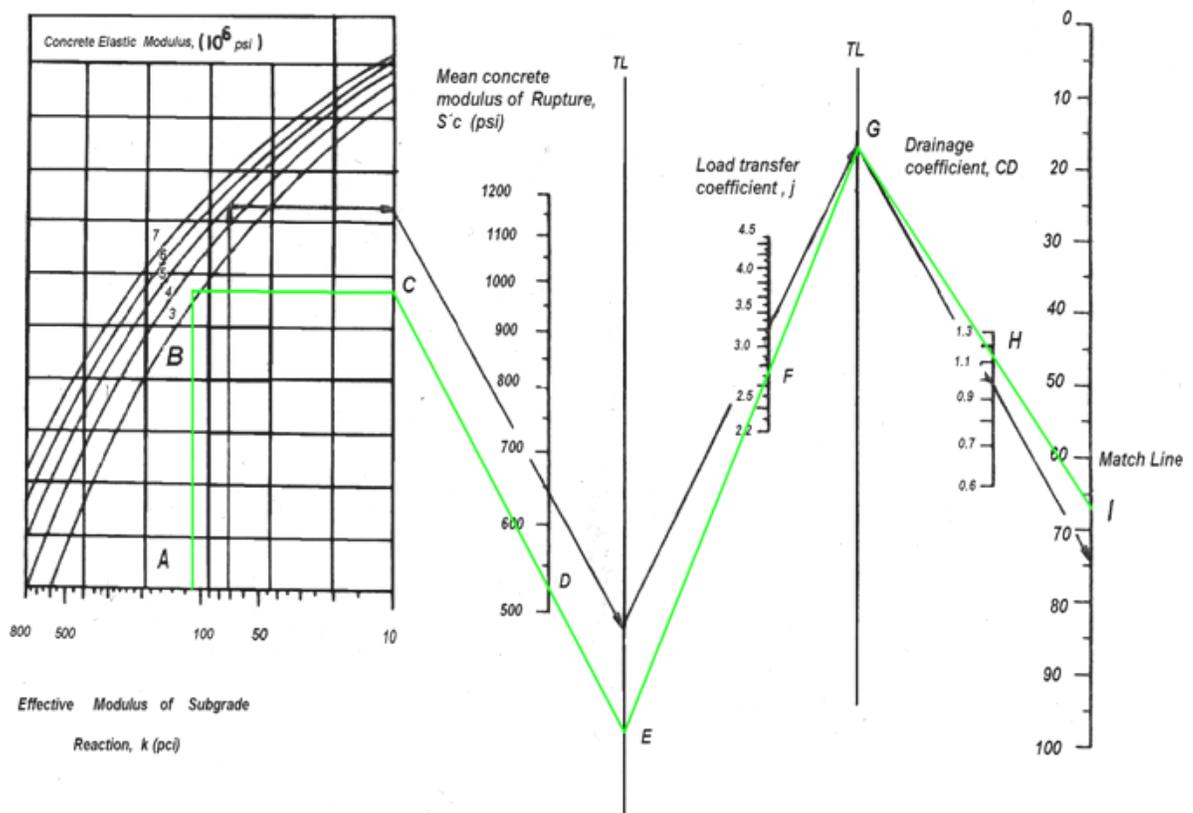


Figura 2.12. Nomograma para diseñar pavimentos rígidos, para el segmento 1.

Segmento 2.

Para el segmento 2 se usa la figura 2.13 (mostrada en la parte inferior de este segmento) y los datos necesarios son:

- El valor para la línea de liga del punto I es de **67**.
 - Desviación estándar $S_o = 0.30$
 - Confiabilidad **95%**
 - Pérdida de servicialidad $\Delta PSI = 2$
 - Número de ejes equivalentes (ESAL`s), solamente para el espesor de 23 centímetros, tiene un valor de **7488437**.
5. Se ubica en la gráfica correspondiente el valor del coeficiente de pérdida de servicio $\Delta PSI = 2$ punto J y se prolonga la línea que intercepta la línea de liga del punto I (en el valor de 67) hasta cruzar por el valor seleccionado en el punto J y se prolonga hasta tocar la línea vertical de la gráfica diseño de espesores punto K, sin introducirnos en ella.
 6. Se ubica en la gráfica correspondiente el porcentaje de confiabilidad elegido de **95%** punto L y también se ubica en la gráfica de la desviación estándar el respectivo valor de $S_o = 0.30$ punto M, se procede a unir el punto L, M con una línea que debe prolongarse hasta tocar con la línea pivote (TL) punto N.
 7. Siguiendo con el paso anterior, se ubica en la gráfica que corresponde al número de ejes equivalentes (ESAL`s) el valor de **7488437** punto Ñ y se prolonga la línea que intercepto con la línea pivote del punto N hasta cruzar con el punto Ñ y se prolonga hasta la gráfica diseño de espesores de la losa en el eje horizontal punto O y sin introducirnos en la gráfica.
 8. Con el punto K se traza una línea horizontal dentro de la gráfica diseño de espesores de la losa y de manera simultánea una línea vertical desde el punto O, con la finalidad de que ambas líneas se intercepten y donde se interceptan es el valor del espesor de pavimento, que es de **9.0** pulgadas punto P.

El espesor calculado mediante el nomograma es igual al supuesto que se utilizó para calcular el número de ESAL`s, esto indica que el espesor satisface con los requisitos y no es necesario calcular para los demás espesores propuestos.

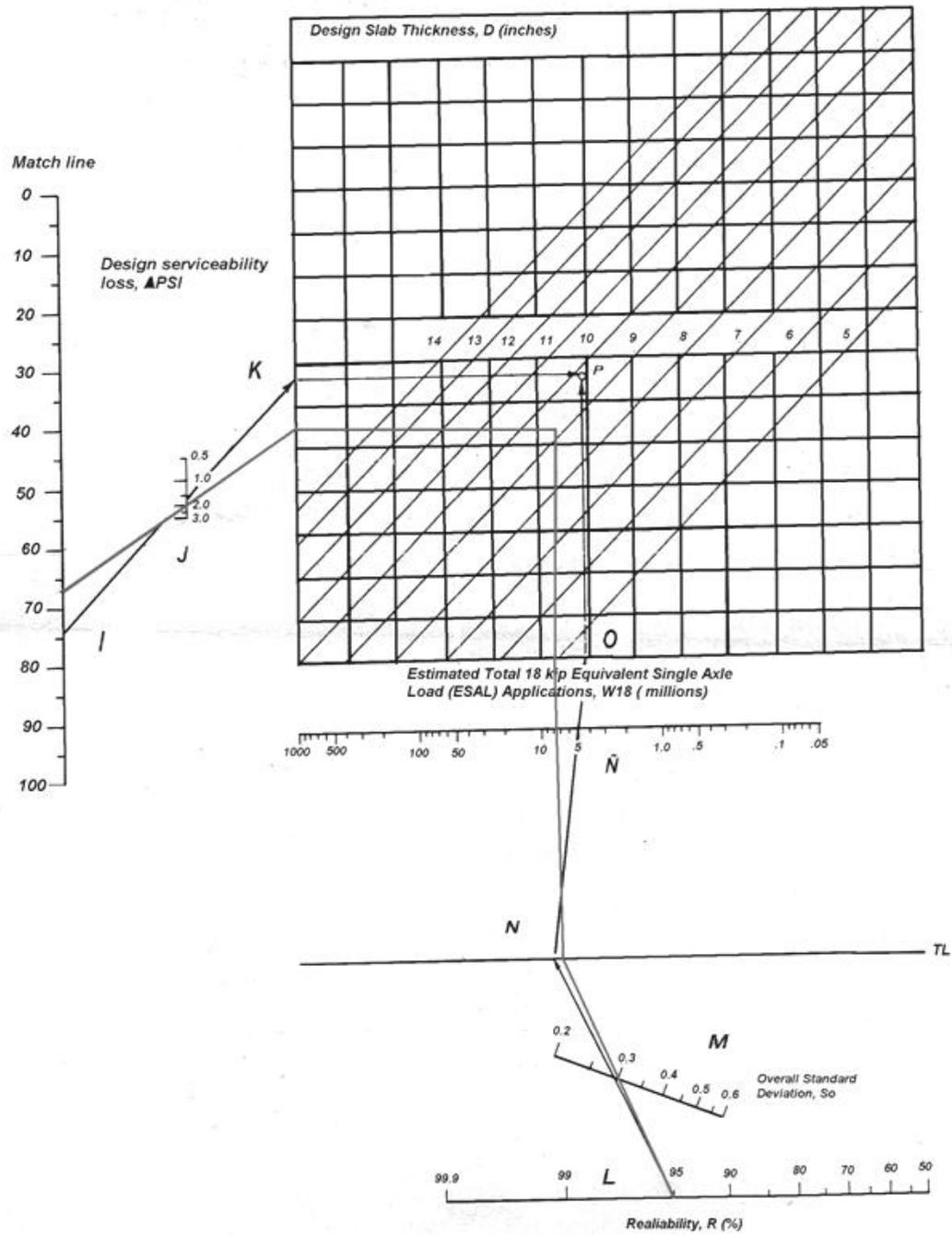


Figura 2.13. Nomograma para diseñar pavimentos rígidos, para el segmento 2.

A continuación se realizará el cálculo del espesor de losa ocupando la fórmula propuesta por el método AASHTO. Donde fue necesario condensar la ecuación, dando como resultado la ecuación 1.1:

$$A = B + C - D + \frac{E}{F} + G \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde:

$$A = \text{Log}_{10}(E18)$$

$$B = ZR \times S_o$$

$$C = 7.35 \times \text{Log}_{10}(D + 1)$$

$$D = 0.06$$

$$E = \text{Log}_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]$$

$$F = 1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}$$

$$G = \left[(4.22 - 0.32Pt) \times \text{Log}_{10} \left[\frac{S'c \times cd \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\frac{Ec}{k}^{0.25}} \right]} \right] \right]$$

La tabla 2.17 muestra el resultado que se obtienen de las variables de la ecuación 1.1 proponiendo espesores de 20, 22.5, 23 y 25 centímetros para el pavimento.

Tabla 2.17. Resultados de la ecuación 1.1

Espesor		A	B	C	D	E	F	G
Centímetros	pulgadas							
20	7.874	6.8536	-0.494	6.969	0.060	-0.17609126	1.155	0.19311682
22.5	8.858	6.8683	-0.494	7.304	0.060	-0.17609126	1.064	0.18065617
23	9.055	6.8744	-0.494	7.368	0.060	-0.17609126	1.054	0.17852835
25	9.843	6.8843	-0.494	7.608	0.060	-0.17609126	1.028	0.17095556

Se compara el resultado del lado izquierdo y derecho de la ecuación 1.1 (realizando previamente las operaciones indicadas en la ecuación) con la finalidad de obtener el espesor de pavimento que satisface la igualdad o equilibrio de la ecuación, la tabla 2.18 muestra el resultado de la comparación de ambos lados de la ecuación, se observa que el espesor que satisface dicha ecuación es de 9.055 pulgadas aunque también el espesor que satisface dicha ecuación con una aproximación de centésimas es el de 9.843 pulgadas, para el proyecto se elige un espesor de 9 pulgadas considerando que se encuentra en el rango de aceptable, recordando que el módulo de ruptura considerado para el diseño del espesor es menor al propuesto para el proyecto y además el resultado es igual al obtenido por medio del nomograma.

Tabla 2.18. Comparación del lado izquierdo y derecho de la ecuación 1.1

L. derecho	L. izquierdo	Espesor		Aproximación
		centímetros	pulgadas	
6.456	6.854	20	7.874	1.062
6.766	6.868	22.5	8.858	1.015
6.825	6.874	23	9.055	1.007
7.054	6.884	25	9.843	0.976

Conclusión.

El espesor que garantiza soportar los esfuerzos generados por la carga de tránsito (total de ejes equivalentes de 7488437), que se presentarán durante el periodo de diseño es de 9 pulgadas (23 centímetros).

Considerando que el tipo de pavimento rígido será con refuerzo sencillo, debido a que no se permitirá interrupciones frecuentes en el tránsito y el pavimento lo usará principalmente el tránsito pesado. Se usarán pasajuntas, barras de amarre y refuerzo por temperatura.

Para reducir los esfuerzos en los bordes de las losas será necesario colocar soportes laterales utilizando guarniciones, acotamientos y losas ampliadas.

La manera de reducir los problemas del agua se resolverá utilizando un drenaje pluvial y dando una pendiente longitudinal para alejar el agua lo más pronto posible de la estructura.

La sección estructural, para la losa el módulo de ruptura será de 42kg/cm² (594.7psi.), se utilizará una subrasante que será el suelo natural de la localidad, una subbase de material granular de 10 centímetros de la mina Jesús del Monte, para mejorar el drenaje y una base que corresponderá a una mezcla de material granular (de la mina Jesús del Monte) con tepetate (del banco Barrientos) de 15 centímetros, para aumentar la rigidez.

CAPÍTULO 3 MÉTODO DE LA PCA

Objetivo particular: Conocer los factores que considera el método de la PCA y la importancia que tienen, así como comprender los pasos de diseño y aplicarlo para obtener el espesor óptimo del pavimento rígido para el Centro Operativo Estafeta.

3.1.-Factores de diseño

3.1.1.- Resistencia a la flexión del concreto

3.1.2.- Terreno de apoyo ó base

3.1.3.- Periodo de diseño

3.1.4.- Número de repeticiones esperadas para cada eje

3.1.4.1.-Factores que afectan las repeticiones esperadas para cada eje

3.1.4.1.1.-Tránsito promedio diario anual

3.1.4.1.2.-Porcentaje del tránsito promedio diario anual para cada tipo de eje

3.1.4.1.3.-Factor de crecimiento anual

3.1.4.1.4.-Factor de sentido

3.1.4.1.5.-Factor de carril

3.1.4.1.6.-Días de un año

3.1.5.-Factor de seguridad de carga

3.1.6.-Tipo de junta y acotamiento

3.2.-Criterios de diseño considerados por el método de la PCA

3.2.1.-Análisis por fatiga

3.2.2.-Análisis por erosión

3.3.- Consideraciones generales de proyecto para el Centro Operativo Estafeta

3.4.- Diseño estructural de pavimento rígido para el Centro Operativo Estafeta

3. MÉTODO DE LA PCA

El método de la PCA se basa en la combinación de estudios teóricos, resultados de modelo y pruebas a escala real y en la experiencia adquirida del comportamiento de pavimentos de concreto. El método es aplicable a los diversos tipos de pavimento rígido: de concreto simple, concreto con refuerzo simple y concreto con refuerzo continuo. El método permite la determinación del espesor de pavimento rígido. De manera general, el proceso de diseño consiste en seleccionar los factores de diseño y proponer un espesor de pavimento que deberá satisfacer los dos criterios de diseño: por fatiga y erosión.

3.1.- FACTORES DE DISEÑO

3.1.1.- RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO

La resistencia a la flexión o módulo de ruptura es importante considerarse en el diseño, de manera específica en el criterio por fatiga. La resistencia puede obtenerse mediante correlaciones con otras pruebas, la experiencia, recomendaciones y por medio de un método de laboratorio reconocido, que deberá utilizarse el promedio de las pruebas a 28 días.

El método en las gráficas y tablas de diseño se incorpora la variación de la resistencia del concreto, de un punto a otro de la losa, y el aumento de la resistencia con el tiempo.

Con respecto al módulo de elasticidad, considera un valor fijo de 4,000,000psi y un módulo de Poisson de 0.15.

3.1.2.- TERRENO DE APOYO Ó BASE

Es el segundo factor considerado por el método y puede determinarse con una prueba de carga en placa, o correlacionando con resultados de otras pruebas.

El método recomienda incrementar el módulo de reacción de la subrasante usando una subbase de material granular no tratada o mejorada, pero también indica que el incremento puede no ser muy significativo como se aprecia en los valores presentados en la tabla 3.1, proporcionado por el método.

Tabla 3.1. Subbase granular no tratada.

K del suelo pci(lb/in^3)	K suelo subbase pci (lb/in^3)			
	Espesor de la subbase			
	4"	6"	9"	12"
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Los valores mostrados en la tabla 3.1 son basados del análisis de Burmister de un sistema de dos capas y cargado en pruebas de placa hechas para determinar los valores de módulo de reacción del conjunto subrasante-subbase en losas de pruebas completas.

Una segunda opción para incrementar el módulo de reacción, es usar una subbase mejorada o tratada con cemento que aporta mayor capacidad de carga y su comportamiento a largo plazo es mucho mejor; su uso principal es para pavimentos de concreto con tráfico pesado. El método proporciona la tabla 3.2, donde se muestra los posibles incrementos en el módulo de reacción usando esta segunda opción.

Tabla 3.2. Subbase mejorada.

K del suelo pci (lb/in^3)	K suelo subbase pci (lb/in^3)			
	Espesor de la subbase			
	4"	6"	9"	12"
50	170	230	310	390
100	280	400	520	640
200	470	640	830	---

Los materiales para la subbase mejorada o tratada, se construyen con materiales granulares con los tipos de suelos AASHTO A-1, A-2-4, A-2-5, A-3 y el contenido de cemento es determinado mediante las pruebas de congelación-descongelación y mojado-secado y el criterio de las pérdidas admisibles de la PCA.

3.1.3.- PERIODO DE DISEÑO

El periodo de diseño o vida útil del pavimento debe elegirse con un buen criterio, ya que se usa para tratar de estimar las repeticiones de carga a las que estará sometido el pavimento en el tiempo elegido de proyecto.

3.1.4.- NÚMERO DE REPETICIONES ESPERADAS PARA CADA EJE.

El método de la PCA considera necesario conocer el tipo de eje para cada vehículo de proyecto, que servirá para calcular las repeticiones esperadas en el periodo de diseño para cada eje y además de servir para determinar el criterio (fatiga o erosión) que gobernará el proyecto.

3.1.4.1.-FACTORES QUE AFECTAN LAS REPETICIONES ESPERADAS PARA CADA EJE.

3.1.4.1.1.- TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO ANUAL

De la zona en estudio es necesario conocer del tránsito: la clasificación vehicular, el tipo y carga por eje que van a circular por el pavimento y mediante el método de aforo y estadístico más adecuado el tránsito promedio diario anual (TPDA) de la clasificación vehicular. El método recomienda considerar únicamente el tránsito pesado, es decir, que se desprecien el tráfico ligero como automóviles y pick-ups de 4 llantas.

3.1.4.1.2.-PORCENTAJE DEL TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO ANUAL PARA CADA TIPO DE EJE.

El porcentaje se obtiene de analizar el tránsito promedio diario anual de la clasificación vehicular considerando los tipos de eje (ejes sencillos, tándem y triples) en relación a su carga para cada vehículo.

3.1.4.1.3.- FACTOR DE CRECIMIENTO ANUAL

Para conocer el factor de crecimiento anual es necesario establecer un periodo de diseño (n) y elegir una tasa de crecimiento anual (g) adecuada. Los factores que influyen en la tasa de crecimiento y proyección del tráfico son:

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

El método recomienda atender la tabla 3.3 si se quiere obtener de manera rápida el factor de crecimiento anual y cuando se quiere una exactitud, se puede obtener a partir de la fórmula siguiente:

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

Donde:

FCA: Factor de crecimiento anual

n: Vida útil en años

g: Tasa de crecimiento anual

Tabla 3.3. Factor de crecimiento anual.

Tasa de crecimiento anual de tráfico y sus correspondientes factores de crecimiento.		
Tasa de crecimiento anual del tráfico %	Factor de crecimiento anual para 20 años	Factor de crecimiento anual para 40 años
1	1.1	1.2
1 1/2	1.2	1.3
2	1.2	1.5
2 1/2	1.3	1.6
3	1.3	1.8
3 1/2	1.4	2.0
4	1.5	2.2
4 1/2	1.6	2.4
5	1.6	2.7
5 1/2	1.7	2.9
6	1.8	3.2

3.1.4.1.4.- FACTOR DE SENTIDO

El factor de sentido se emplea para diferenciar las vialidades de un sentido de las de doble sentido, el método recomienda un factor de 0.5 para vialidades en doble sentido, asumiendo que el tránsito (en sus diferentes tipos y pesos) viajan en igual cantidad para cada sentido y para vialidades de un solo sentido un factor de 1.0. Sin embargo esto puede no aplicar en algunos casos especiales en que muchos de los camiones viajan cargados en una dirección y regresan vacíos, por lo tanto, es necesario realizar el ajuste apropiado y tomar en cuenta el sentido con mayor tráfico.

3.1.4.1.5.- FACTOR DE CARRIL

El factor indica el porcentaje de vehículos que circularán por el carril de la derecha, que es el carril con más tráfico.

El método de la PCA recomienda emplear la figura 3.1 para determinar el factor de carril, donde el factor depende del número de carriles por sentido o dirección del tránsito promedio diario anual en un solo sentido.

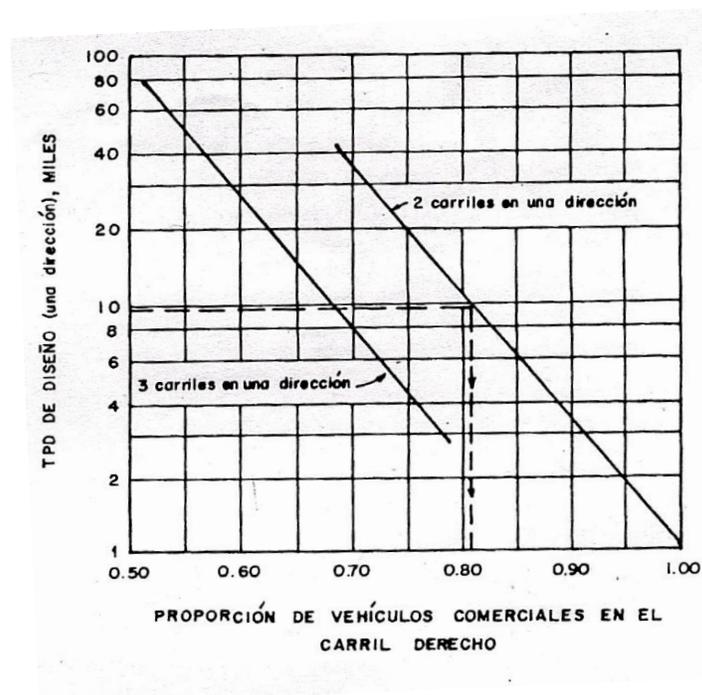


Figura 3.1. Factor de carril.

La manera de usar la gráfica de la figura 3.1 es la siguiente por ejemplo: si el tránsito promedio diario anual es de 9675 vehículos en dos carriles, el procedimiento es:

1. Ubicar en el eje vertical el tránsito promedio diario anual en miles, para nuestro ejemplo 9.675.
2. Se ubica la recta que indique el número de carriles en un sentido, para nuestro ejemplo es de 2.
3. Trazar una recta desde 9.675 hasta tocar la recta correspondiente al número de carriles por sentido y donde se intercepte, trazar una vertical hacia abajo y leer el factor de carril que corresponde, para el ejemplo es de 0.81 como se muestra en la figura 3.1.

3.1.4.1.6.- DÍAS DE UN AÑO

Los días de un año es una constante que afecta el cálculo del tránsito promedio diario anual en la vida útil del pavimento.

3.1.5.- FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA

El método exige que las cargas reales esperadas se multipliquen por un factor de seguridad de carga. Las recomendaciones son las siguientes:

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

Cuando el factor está comprendido entre 1.1 y 1.2 es para tener en cuenta el tránsito inesperado de camiones y cuando aumente hasta 1.3 es para mantener un nivel de durabilidad mayor que el normal durante la vida de diseño del pavimento.

3.1.6.- TIPO DE JUNTA Y ACOTAMIENTO

El método considera necesario establecer en las juntas transversales la presencia de pasajuntas o no, así mismo la elección de acotamientos de concreto de manera adyacente a las losas. Es importante elegir estas características ya que se consideran en el análisis por fatiga y erosión, las opciones para cada caso son las siguientes:

Análisis por fatiga:

1. Sin acotamiento de concreto (tabla 3.4).
2. Con acotamiento de concreto (tabla 3.5).

Análisis por erosión:

1. Con pasajuntas, sin acotamiento de concreto (tabla 3.6).
2. Sin pasajuntas, sin acotamiento de concreto (tabla 3.7).
3. Con pasajuntas, con acotamiento de concreto (tabla 3.8).
4. Sin pasajuntas, con acotamiento de concreto (tabla 3.9).

Tabla 3.4. Valores de esfuerzo equivalente para ejes sencillos y tándem (sin acotamiento de concreto).

Espesor de la losa (pulg.)	K de la subrasante-subbase (lb/in^3) (eje simple / tándem)						
	50	100	150	200	300	500	700
6	456/416	411/348	382/316	362/296	336/271	304/246	285/232
6.5	417/380	367/317	341/286	324/267	300/244	273/220	256/207
7	375/349	331/290	307/262	292/244	271/222	246/199	231/186
7.5	340/323	300/268	279/241	265/224	246/203	224/181	210/169
8	311/300	274/249	255/223	242/208	225/188	205/167	192/155
8.5	285/281	252/232	234/208	222/193	206/174	188/154	177/143
9	264/264	232/218	216/195	205/181	190/163	174/144	163/133
9.5	245/248	215/205	200/183	190/170	176/153	161/134	151/124
10	228/235	200/193	186/173	177/160	164/144	150/126	141/117
10.5	228/235	200/193	186/173	177/160	164/144	150/126	141/117
11	200/211	175/174	163/155	154/143	144/129	131/113	123/104
11.5	188/201	165/165	153/148	145/136	135/122	123/107	116/98
12	177/192	155/158	144/141	137/130	127/116	116/102	109/93
12.5	168/183	147/151	136/135	129/124	120/111	109/97	103/89
13	159/176	139/144	129/129	122/119	113/106	103/93	97/85
13.5	152/168	132/138	122/123	116/114	107/102	98/89	92/81
14	144/162	125/133	116/118	110/109	102/98	93/85	88/78

Tabla 3.5. Valores de esfuerzo equivalente para ejes sencillos y tándem (con acotamiento de concreto).

Espesor de la losa (pulg.)	K de la subrasante-subbase (lb/in ³) (eje simple / tándem)						
	50	100	150	200	300	500	700
4	640/534	559/468	517/469	489/422	452/403	409/388	383/384
4.5	547/461	479/400	444/372	421/356	309/338	355/322	333/316
5	475/404	417/349	387/323	367/308	341/290	311/274	294/267
5.5	418/360	368/309	342/285	324/271	302/254	276/238	261/231
6	372/325	327/277	304/255	289/241	270/225	247/210	234/203
6.5	334/295	294/251	274/230	260/218	243/203	223/188	212/180
7	302/270	266/230	248/210	236//198	220/184	203/170	192/162
7.5	275/250	243/211	226/193	215/182	201/168	185/155	176/148
8	252/232	222/196	207/179	197/168	185/155	170/142	162/135
8.5	232/216	205/182	191/166	182/156	170/144	157/131	150/125
9	215/202	190/171	177/155	169/146	158/134	146/122	139/116
9.5	200/190	176/160	164/146	157/137	147/126	136/114	129/108
10	186/179	164/151	153/137	146/129	137/118	127/107	121/101
10.5	174/170	154/143	144/130	137/121	128/111	119/101	113/95
11	164/161	144/135	135/123	129/115	120/105	112/95	106/90
11.5	154/153	136/128	127/117	121/109	113/100	105/90	100/85
12	145/146	128/122	120/111	114/104	107/95	99/86	95/81
12.5	137/139	121/117	113/106	108/99	101/91	94/82	90/77
13	130/133	115/112	107/101	102/95	96/86	89/78	85/73
13.5	124/127	10/107	102/97	97/91	91/83	85/74	81/70
14	118/122	104/103	97/93	93/87	87/79	81/71	77/67

Tabla 3.6. Factores de erosión para ejes simples y tándem (con pasajuntas, sin acotamiento de concreto).

Espesor de la losa (pulg.)	K de la subrasante-subbase (lb/in ³) (eje simple / tándem)					
	50	100	200	300	500	700
5	3.45/3.58	3.43/3.52	3.41/3.45	3.40/3.42	3.38/3.40	3.38/3.40
5.5	3.33/3.47	3.31/3.41	3.29/3.36	3.28/3.33	3.27/3.30	3.26/3.28
6	3.22/3.38	3.19/3.31	3.18/3.26	3.17/3.23	3.15/3.20	3.14/3.17
6.5	3.11/3.29	3.09/3.22	3.07/3.16	3.06/3.13	3.05/3.10	3.03/3.07
7	3.02/3.21	2.99/3.14	2.97/3.08	2.96/3.05	2.95/3.01	2.94/2.98
7.5	2.93/3.14	2.91/3.06	2.88/3.00	2.87/2.97	2.86/2.93	2.84/2.90
8	2.85/3.07	2.82/2.99	2.80/2.93	2.79/2.89	2.77/2.85	2.76/2.82
8.5	2.77/3.01	2.74/2.93	2.72/2.86	2.71/2.82	2.69/2.78	2.68/2.75
9	2.70/2.96	2.67/2.87	2.65/2.80	2.63/2.76	2.62/2.71	2.61/2.68
9.5	2.63/2.90	2.60/2.81	2.58/2.74	2.56/2.70	2.55/2.65	2.54/2.62
10	2.56/2.85	2.54/2.76	2.51/2.68	2.50/2.64	2.48/2.59	2.47/2.56
10.5	2.50/2.81	2.47/2.71	2.45/2.63	2.44/2.59	2.42/2.54	2.41/2.51

Tabla 3.6. Factores de erosión para ejes simples y tándem (con pasajuntas, sin acotamiento de concreto). (continuación).

Espesor de la losa (pulg.)	K de la subrasante-subbase (lb/in ³) (eje simple / tándem)					
	50	100	200	300	500	700
11	2.44/2.76	2.42/2.67	2.39/2.58	2.38/2.54	2.36/2.49	2.35/2.45
11.5	2.38/2.72	2.36/2.62	2.33/2.54	2.32/2.49	2.30/2.44	2.29/2.40
12	2.33/2.68	2.30/2.58	2.28/2.49	2.26/2.44	2.25/2.39	2.23/2.36
12.5	2.28/2.64	2.25/2.54	2.23/2.45	2.21/2.40	2.19/2.35	2.18/2.31
13	2.23/2.61	2.20/2.50	2.18/2.41	2.16/2.36	2.14/2.30	2.13/2.27
13.5	2.18/2.57	2.15/2.47	2.13/2.37	2.11/2.32	2.09/2.26	2.08/2.23
14	2.13/2.54	2.11/2.43	2.08/2.34	2.07/2.29	2.05/2.23	2.03/2.19

Tabla 3.7. Factores de erosión para ejes sencillos y tándem (sin pasajuntas, sin acotamiento de concreto).

Espesor de la losa (pulg.)	K de la subrasante-subbase (lb/in ³) (eje simple / tándem)					
	50	100	200	300	500	700
4	3.94/4.03	3.91/3.95	3.88/3.89	3.86/3.86	3.82/3.83	3.77/3.80
4.5	3.79/3.91	3.76/3.82	3.73/3.75	3.71/3.72	3.68/3.68	3.64/3.65
5	3.66/3.81	3.63/3.72	3.60/3.64	3.58/3.60	3.55/3.55	3.52/3.52
5.5	3.54/3.72	3.51/3.62	3.48/3.53	3.46/3.49	3.43/3.44	3.41/3.40
6	3.44/3.64	3.40/3.53	3.37/3.44	3.35/3.40	3.32/3.34	3.30/3.30
6.5	3.34/3.56	3.30/3.46	3.26/3.36	3.25/3.31	3.22/3.25	3.20/3.21
7	3.26/3.49	3.21/3.39	3.17/3.29	3.15/3.24	3.13/3.17	3.11/3.13
7.5	3.18/3.43	3.13/3.32	3.09/3.22	3.07/3.17	3.04/3.10	3.02/3.06
8	3.11/3.37	3.05/3.26	3.01/3.16	2.99/3.10	2.96/3.03	2.94/2.99
8.5	3.04/3.32	2.98/3.21	2.93/3.10	2.91/3.04	2.88/2.97	2.87/2.93
9	2.98/3.27	2.91/3.16	2.86/3.05	2.84/2.99	2.81/2.92	2.79/2.87
9.5	2.92/3.22	2.85/3.11	2.80/3.00	2.77/2.94	2.75/2.86	2.73/2.81
10	2.86/3.18	2.79/3.06	2.74/2.95	2.71/2.89	2.68/2.81	2.66/2.76
10.5	2.81/3.14	2.74/3.02	2.68/2.91	2.65/2.84	2.62/2.76	2.60/2.72
11	2.77/3.10	2.69/2.98	2.63/2.86	2.60/2.80	2.57/2.72	2.54/2.67
11.5	2.72/3.06	2.64/2.94	2.58/2.82	2.55/2.76	2.51/2.68	2.49/2.63
12	2.68/3.03	2.60/2.90	2.53/2.78	2.50/2.72	2.46/2.64	2.44/2.59
12.5	2.64/2.99	2.55/2.87	2.48/2.75	2.45/2.68	2.41/2.60	2.39/2.55
13	2.60/2.96	2.51/2.83	2.44/2.71	2.40/2.65	2.36/2.56	2.34/2.51
13.5	2.56/2.93	2.47/2.80	2.40/2.68	2.36/2.61	2.32/2.53	2.30/2.48
14	2.53/2.90	2.44/2.77	2.36/2.65	2.32/2.58	2.28/2.50	2.25/2.44

Tabla 3.8. Factores de erosión para ejes sencillos y tándem (con pasajuntas, con acotamiento de concreto).

Espesor de la losa (pulg.)	K de la subrasante-subbase (lb/in ³) (eje simple / tándem)					
	50	100	200	300	500	700
4	3.28/3.30	3.24/3.20	3.21/3.31	3.19/3.10	3.15/3.09	3.12/3.08
4.5	3.13/3.19	3.09/3.08	3.06/3.00	3.04/2.96	3.01/2.93	2.98/2.91
5	3.01/3.09	2.97/2.98	2.93/2.89	2.90/2.84	2.87/2.79	2.85/2.77
5.5	2.90/3.01	2.85/2.89	2.81/2.79	2.79/2.74	2.76/2.68	2.73/2.65
6	2.79/2.93	2.75/2.82	2.70/2.71	2.68/2.65	2.65/2.58	2.62/2.54
6.5	2.70/2.86	2.65/2.75	2.61/2.63	2.58/2.57	2.55/2.50	2.52/2.45
7	2.61/2.79	2.56/2.68	2.52/2.56	2.49/2.50	2.46/2.42	2.43/2.38
7.5	2.53/2.73	2.48/2.62	2.44/2.50	2.41/2.44	2.38/2.36	2.35/2.31
8	2.46/2.68	2.41/2.56	2.36/2.44	2.33/2.38	2.30/2.30	2.27/2.24
8.5	2.39/2.62	2.34/2.51	2.29/2.39	2.26/2.32	2.22/2.24	2.20/2.18
9	2.32/2.57	2.27/2.46	2.22/2.34	2.19/2.27	2.16/2.19	2.13/2.13
9.5	2.26/2.52	2.21/2.41	2.16/2.29	2.13/2.22	2.09/2.14	2.07/2.08
10	2.20/2.47	2.15/2.36	2.10/2.25	2.07/2.18	2.03/2.09	2.01/2.03
10.5	2.15/2.43	2.09/2.32	2.04/2.20	2.01/2.14	1.97/2.05	1.95/1.99
11	2.10/2.39	2.04/2.28	1.99/2.16	1.95/2.09	1.92/2.01	1.89/1.95
11.5	2.05/2.35	1.99/2.24	1.93/2.12	1.90/2.05	1.87/1.97	1.84/1.91
12	2.00/3.21	1.94/2.20	1.88/2.09	1.85/2.02	1.82/1.93	1.79/1.87
12.5	1.95/2.27	1.89/2.16	1.84/2.05	1.81/1.98	1.77/1.89	1.74/1.84
13	1.91/2.23	1.85/2.13	1.79/2.01	1.76/1.95	1.72/1.86	1.70/1.80
13.5	1.86/2.20	1.81/2.09	1.75/1.98	1.72/1.91	1.68/1.83	1.65/1.77
14	1.82/2.17	1.76/2.06	1.71/1.95	1.67/1.88	1.64/1.80	1.61/1.74

Tabla 3.9. Factores de erosión para ejes sencillos y tándem (sin pasajuntas, con acotamiento de concreto).

Espesor de la losa (pulg.)	K de la subrasante-subbase (lb/in ³) (eje simple / tándem)					
	50	100	200	300	500	700
4	3.46/3.49	3.42/3.39	3.38/3.32	3.36/3.32	3.32/3.26	3.28/3.24
4.5	3.32/3.39	3.28/3.28	3.24/3.19	3.22/3.16	3.19/3.12	3.15/3.09
5	3.20/3.30	3.16/3.18	3.12/3.09	3.10/3.05	3.07/3.00	3.04/2.97
5.5	3.10/3.22	3.05/3.10	3.01/3.00	2.99/2.95	2.96/2.90	2.93/2.86
6	3.00/3.15	2.95/3.02	2.90/2.92	2.88/2.87	2.86/2.81	2.83/2.77
6.5	2.91/3.08	2.86/2.96	2.81/2.85	2.79/2.79	2.76/2.73	2.74/2.68
7	2.83/3.02	2.77/2.90	2.73/2.78	2.70/2.72	2.68/2.66	2.65/2.61
7.5	2.75/2.97	2.70/2.84	2.65/2.72	2.62/2.66	2.60/2.59	2.57/2.54
8	2.69/2.92	2.63/2.79	2.57/2.67	2.55/2.61	2.52/2.53	2.50/2.48
8.5	2.63/2.88	2.56/2.74	2.51/2.62	2.48/2.55	2.45/2.55	2.43/2.43
9	2.57/2.83	2.50/2.70	2.44/2.57	2.42/2.51	2.39/2.43	2.36/2.38
9.5	2.51/2.79	2.44/2.65	2.38/2.53	2.36/2.46	2.33/2.38	2.30/2.33
10	2.46/2.75	2.39/2.61	2.33/2.49	2.30/2.42	2.27/2.34	2.24/2.28
10.5	2.41/2.72	2.33/2.58	2.27/2.45	2.24/2.38	2.21/2.30	2.19/2.24
11	2.36/2.68	2.28/2.54	2.22/2.41	2.19/2.34	2.16/2.26	2.14/2.20
11.5	2.32/2.65	2.24/2.51	2.17/2.38	2.14/2.31	2.11/2.22	2.09/2.16
12	2.28/2.62	2.19/2.48	2.13/2.34	2.10/2.27	2.06/2.19	2.04/2.13
12.5	2.24/2.59	2.15/2.45	2.09/2.31	2.05/2.24	2.0/2.15	1.99/2.10
13	2.20/2.56	2.11/2.42	2.04/2.28	2.01/2.21	1.98/2.21	1.95/2.06
13.5	2.16/2.53	2.08/2.39	2.00/2.25	1.97/2.18	1.93/2.09	1.91/2.03
14	2.13/2.51	2.04/2.36	1.97/2.23	1.93/2.15	1.89/2.06	1.87/2.00

3.2.- CRITERIOS DE DISEÑO CONSIDERADOS POR EL MÉTODO DE LA PCA.

El procedimiento se basa en un análisis detallado por computadora de elementos finitos de los esfuerzos y deflexiones del pavimento en las orillas, juntas, y esquinas. Toma en cuenta factores como dimensiones finitas de la losa, posición de la carga del eje, transferencia de carga en las juntas o grietas transversales y transferencia de carga en las juntas del pavimento y el concreto en el acotamiento. Las características de transferencia de carga se modela con el diámetro y el módulo de elasticidad de las barras, en las juntas con barras.

El método considera dos criterios de diseño para diseñar el espesor apropiado del pavimento de concreto hidráulico y ambos deben cumplir para que se acepte:

1. Análisis por fatiga.
2. Análisis por erosión.

3.2.1.- ANÁLISIS POR FATIGA

Se realiza para proteger al pavimento de los esfuerzos producidos por la acción repetida de las cargas, que generan agrietamiento en el concreto, el objetivo de este análisis es determinar el espesor mínimo de la losa para controlar el agrietamiento por fatiga. Esto se hace comparando las repeticiones esperadas para cada carga de eje, y asegurando que las repeticiones acumuladas sean menores que las admisibles. Las repeticiones admisibles por eje dependen del factor de razón de esfuerzos, es decir, la razón de esfuerzo equivalente entre el módulo de ruptura del concreto. El esfuerzo equivalente del pavimento depende del espesor de losa y del módulo de reacción (k) de la subbase- subrasante. Se usa el nomograma de la figura 3.2 para determinar las repeticiones admisibles de carga, con base en el factor de relación de esfuerzos.

Para los valores de esfuerzos equivalentes es necesario considerar las tablas 3.4 y 3.5, para pavimentos con y sin acotamientos de concreto. Los esfuerzos equivalentes no son otra cosa que los esfuerzos en la orilla multiplicado por un factor igual 0.894.

Este análisis influye en el diseño de pavimentos de tráfico ligero (calles residenciales y caminos secundarios independientemente de si las juntas tienen pasajuntas o no) y pavimentos con tráfico medio con pasajuntas en las juntas.

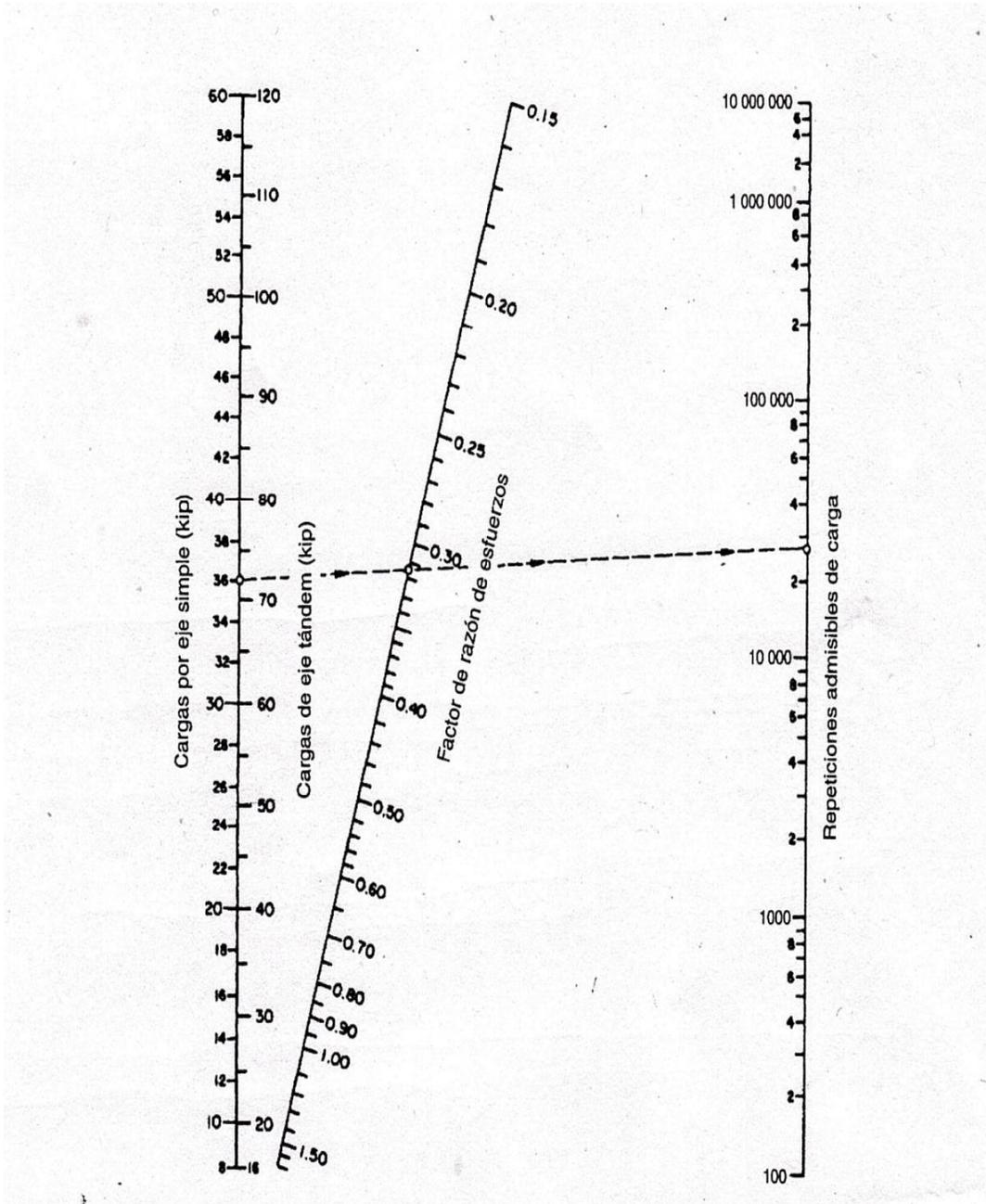


Figura 3.2. Repeticiones admisibles de carga, para análisis por fatiga.

3.2.2.- ANÁLISIS POR EROSIÓN

El objetivo del análisis de erosión es determinar el espesor mínimo de pavimento, necesario para controlar la erosión en el apoyo y el acotamiento, el bombeo y fallas. Es decir, se relaciona más con las deflexiones excesivas que con los esfuerzos flexionantes. Para el criterio de erosión se utiliza el parámetro de potencia. Esta se define como la velocidad de trabajo con que una carga por eje deforma una losa dada.

Influyen principalmente en el diseño de pavimentos de tráfico mediano a pesado con transferencia de carga por trabazón de agregados (sin pasajuntas) y pavimentos de tráfico pesado con pasajuntas.

El análisis se parece al análisis por fatiga, excepto que se usa un factor de erosión en lugar del factor de esfuerzo. También, el factor de erosión depende del espesor de la losa y del módulo de reacción (k) de la subbase-subrasante. Las tablas 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 muestran los valores de erosión para diversos tipos de construcción de pavimentos.

Las figuras 3.3 y 3.4 son las gráficas que se pueden usar para determinar las repeticiones admisibles, con base en la erosión, considerando con y sin acotamientos de concreto, respectivamente.

El método recomienda al ingeniero que use el criterio por erosión principalmente como guía, y lo modifique con base en la experiencia y las condiciones locales de clima y drenaje.

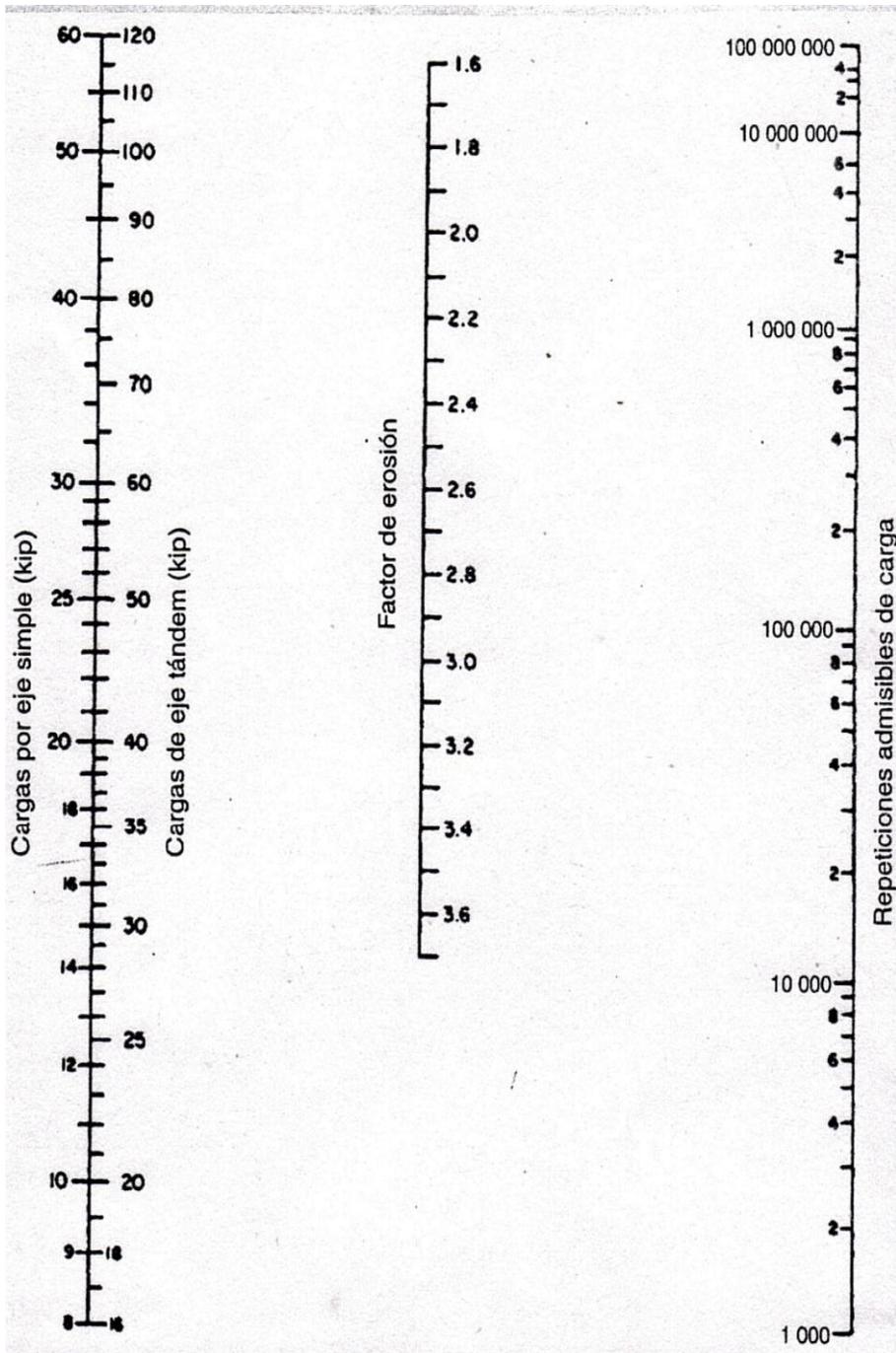


Figura 3.3. Repeticiones admisibles, para análisis por erosión (con acotamiento de concreto).

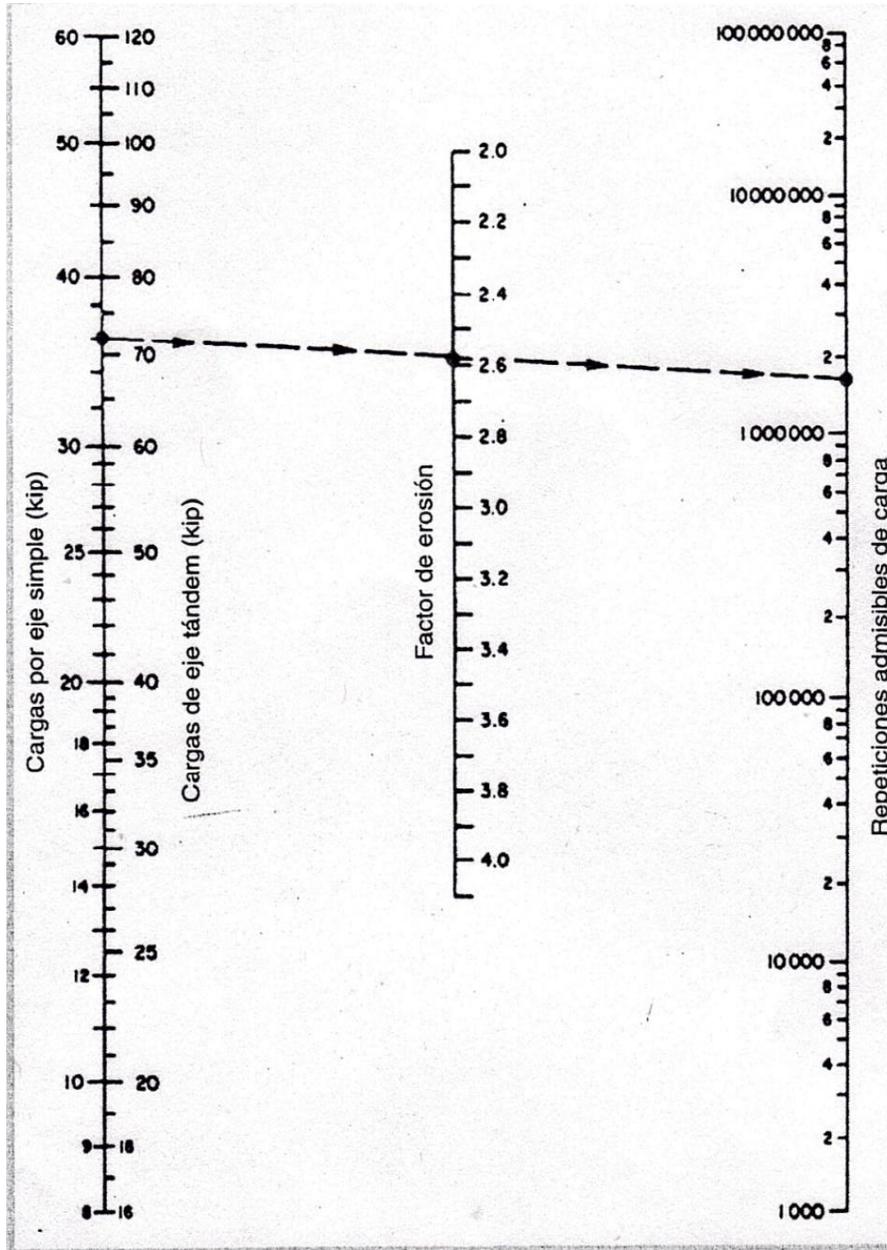


Figura 3.4. Repeticiones admisibles, para análisis por erosión (sin acotamiento de concreto).

El método proporciona la tabla 3.10 para realizar el diseño del espesor de pavimento rígido, en la que se presentan los dos tipos de análisis requeridos.

Tabla 3.10. Formato de diseño.

Proyecto	_____		Pasajuntas	Si	No
Espesor inicial	_____	In.	Apoyo lateral	Si	No
Módulo de reacción de la subrasante k	_____	pci	Periodo de diseño	_____	años
Módulo de ruptura MR	_____	psi	Base granular	_____	In.
Factor de seguridad de carga(FSC)	_____				

Carga del eje en kips	Multiplicada por FSC	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones permisibles	%de fatiga	Repeticiones permisibles	% de daño
			Figura 1		Figura 2	
1	2	3	4	5	6	7

Ejes sencillos

8.Esfuerzo equivalente

9.Factor de relación de esfuerzo

10.Factor de erosión

Sub total de ejes sencillos

Ejes dobles

11.Esfuerzo equivalente

12.Factor de relación de esfuerzos

13.Factor de erosión

Sub total de ejes dobles

Repeticiones en la vida útil

Total de fatiga

Total de erosión

Los datos básicos de entrada de la tabla 3.10 necesarios para elaborar el diseño son:

- Uso de pasajuntas y acotamientos de concreto.
- Resistencia a la flexión del concreto (MR).
- Valor del módulo de reacción (k).
- Factor de seguridad de carga (F.S.C).
- Distribución de carga por eje.
- Número esperado de repeticiones de las diversas cargas por eje en el carril de diseño y durante el periodo de diseño.
- Espesor propuesto.

En la tabla 3.10 para el diseño se realiza el análisis:

- a) De fatiga (para controlar el agrietamiento por fatiga).
- b) De erosión (para controlar la erosión del apoyo y el acotamiento de concreto, bombeo y fallas).

El procedimiento a seguir en el diseño es el siguiente:

- Se establece los datos básicos de entrada y se colocan en la parte superior de la tabla 3.10.
- Se debe disponer de los datos de tránsito, con los cuales se llenarán las columnas 1 y 3.
- Las cargas por eje deberán multiplicarse por el factor de seguridad de carga, para llenar la columna 2.
- Se efectúan los análisis de fatiga y erosión.

Análisis de fatiga.

Las tablas y gráficas empleadas son las mismas, tanto para pavimentos de concreto simple, con pasajuntas, o sin ellos, como para pavimentos con refuerzo continuo. La única diferencia la establece el tipo de acotamiento que tenga el pavimento.

- Sin acotamiento de concreto, usar la tabla 3.4 y la figura 3.2.
- Con acotamiento de concreto, usar la tabla 3.5 y la figura 3.2.

Los pasos a seguir son:

- a) En la tabla correspondiente, hallar los esfuerzos equivalentes en función del espesor de losa y del valor del módulo de reacción (k), colocar dichos valores frente a los números 8 y 11 de tabla 3.10.
- b) Dividir estos valores (esfuerzos equivalentes) por el módulo de ruptura del concreto y colocar los valores frente a los números 9 y 12.
- c) Con la magnitud de las cargas (columna 2) y los factores de la relación de esfuerzos, determinar en la figura 3.2 el número admisible de repeticiones de carga y colocarlo en la columna 4.
- d) Calcular los valores para llenar la columna 5, dividiendo cada valor de la columna 3, por el correspondiente de la columna 4 y multiplicar por cien. La suma de todos es la fatiga total.

Análisis por erosión.

A continuación se mostraran las opciones de análisis por erosión.

En el caso de que el pavimento no tenga acotamientos de concreto:

- Usar la tabla 3.6 y la figura 3.4 para pavimentos con pasajuntas en las juntas o con refuerzo continuo.
- Usar la tabla 3.7 para pavimentos sin pasajuntas.

Si el pavimento va a tener acotamientos de concreto:

- Usar la tabla 3.8 y la figura 3.3, si el pavimento tiene pasajuntas o es de tipo reforzado.
- Usar la tabla 3.9 y la figura 3.3, sin pasajuntas.

En este caso, los pasos a seguir son los siguientes:

- De la tabla apropiada extraer los factores de erosión y colocar los valores frente a los números 10 y 13 de la tabla 3.10.
- Llenar la columna 6 con las repeticiones admisibles halladas en las figuras 3.3 y 3.4, según sea el caso.

- Dividir cada valor de la columna 3 por el correspondiente de la 6 y multiplicar por cien. Colocar los valores calculados en la columna 7. La suma de ellos es el daño total por erosión.

El espesor de la losa escogido para el tanteo se considera inadecuado si los totales de fatiga y erosión superan el cien por ciento. En este caso se hará otro tanteo con un espesor mayor. Si los valores son muy inferiores al cien por ciento, se hará un nuevo tanteo con un espesor menor.

3.3.- CONSIDERACIONES GENERALES DE PROYECTO PARA EL CENTRO OPERATIVO ESTAFETA.

Los datos utilizados en el método AASHTO se consideran también para el método de la PCA:

- La misma clasificación vehicular; los datos de tipo y carga por eje para cada vehículo, se obtendrán de la publicación de las cargas máximas permitidas diario oficial 26 de enero de 1994, ubicada en la tabla 2.14 del capítulo 2. La carga por eje será necesario convertirla en kips.
- El tránsito promedio diario anual de 300 vehículos /día.
- El periodo de diseño de 20 años.
- Tasa de crecimiento anual del tránsito de 1.5%.
- Módulo de ruptura de 535 psi (lb/in^2).
- Módulo de reacción del suelo 320pci.
- Subbase y base de 10 y 15 centímetros, respectivamente.
- Espesores propuestos 20, 21.5, 23 y 25 centímetros.

El diseño se realizará utilizando la tabla 3.10, propuesta por el método de la PCA. Es necesario indicar que se repetirán las tablas y figuras necesarias para realizar la aplicación del método, con el fin de evitar las interrupciones en la lectura.

3.4.- DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO RÍGIDO PARA EL CENTRO OPERATIVO ESTAFETA.

De manera general, el primer paso de diseño para pavimentos rígidos con el método de la PCA es analizar el tránsito, con el objetivo de conocer las repeticiones y la magnitud de las cargas esperadas por eje en el periodo de diseño.

Para el análisis es necesario conocer los tipos de vehículos y la cantidad de ellos y las condiciones en las que viaja, es decir, si van vacíos o cargados. Para el proyecto los datos antes mencionados se muestran en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Tipos y cantidad de vehículos y condiciones en las que viaja

Clasificación vehicular	Total diarios	% del TPDA	Cargados
A2	15	5.0	100
A'2	15	5.0	100
B2	6	2.0	100
C2	15	5.0	100
C3	15	5.0	100
T2-S2	150	50	100
T3-S2	60	20	100
T3-S2-R2	15	5.0	100
T3-S2-R4	9	3.0	100
Total	300	100	

También es necesario conocer de cada vehículo el número y tipos de eje, así como, la magnitud de las cargas por eje en las condiciones en las que viaja, para el proyecto se considero que todos los vehículos entran y salen cargados del Centro Operativo Estafeta; en la tabla 3.12 se presentan dichos datos. Donde fue necesario convertir el peso de toneladas a kips para facilitar el cálculo.

Tabla 3.12. Peso de eje en kips.

TIPO DE VEHÍCULO	TIPO EJE	CARGA TONELADAS	PESO EN KIPS CARGADO
A2	SENCILLO	1	2,20462
	SENCILLO	1	2,20462
A'2	SENCILLO	1,7	3,747854
	SENCILLO	3,8	8,377556
B2	SENCILLO	5,5	12,12541
	SENCILLO	10	22,0462
C2	SENCILLO	6,2	13,668644
	SENCILLO	11,3	24,912206
C3	SENCILLO	6	13,22772
	DOBLE	20	44,0924
T2-S2	SENCILLO	5,8	12,786796
	SENCILLO	10,5	23,14851
	DOBLE	19,2	42,328704
T3-S2	SENCILLO	6	13,22772
	DOBLE	19	41,88778
	DOBLE	19	41,88778
T3-S2-R2	SENCILLO	5,5	12,12541
	DOBLE	17,7	39,021774
	DOBLE	17,7	39,021774
	SENCILLO	9,8	21,605276
	SENCILLO	9,8	21,605276
T3-S2-R4	SENCILLO	5,5	12,12541
	DOBLE	15	33,0693

Antes de calcular las repeticiones esperadas para cada tipo y carga por eje es necesario establecer los siguientes factores:

1. Factor de crecimiento anual.
2. Factor de sentido.
3. Factor de carril.

1. Factor de crecimiento anual.

Para calcular este factor es necesario conocer el periodo de diseño, que es de 20 años y una tasa de crecimiento vehicular, de 1.5%. Ocupando la fórmula propuesta por el método de la PCA resulta un factor de crecimiento anual de 1.15.

2. Factor de sentido.

Se considera para el Centro Operativo Estafeta que cada sentido de circulación estará separado en la pavimentación interior, por lo tanto, se considera cada sentido como una vialidad independiente y para este tipo de vialidades se recomienda un factor de sentido igual a 1.

3. Factor de carril.

Utilizando la gráfica de la figura 3.1 para calcular el factor de carril, conocido el tránsito promedio diario anual de 300 vehículos y el número de carriles por dirección igual a 2, debido a que se considera la sección de pavimentación que servirá como colector, justificando que se usará en un sentido como en otro o simultáneamente, es decir, según las condiciones que se demanden. Los pasos para calcular dicho factor son los siguientes:

1. Ubicar en el eje vertical de la gráfica de la figura 3.1 el tránsito promedio diario anual en miles, para el proyecto es de 0.3, pero se observa que no está en gráfica; por lo que se considera el valor de 1.
2. Se ubica la recta que indique el número de carriles en un sentido, igual a 2.
3. Se traza una recta horizontal desde el valor 1 de la recta vertical hasta interceptar con la recta que indica el número de carriles, obteniendo un factor de carril igual a 1.

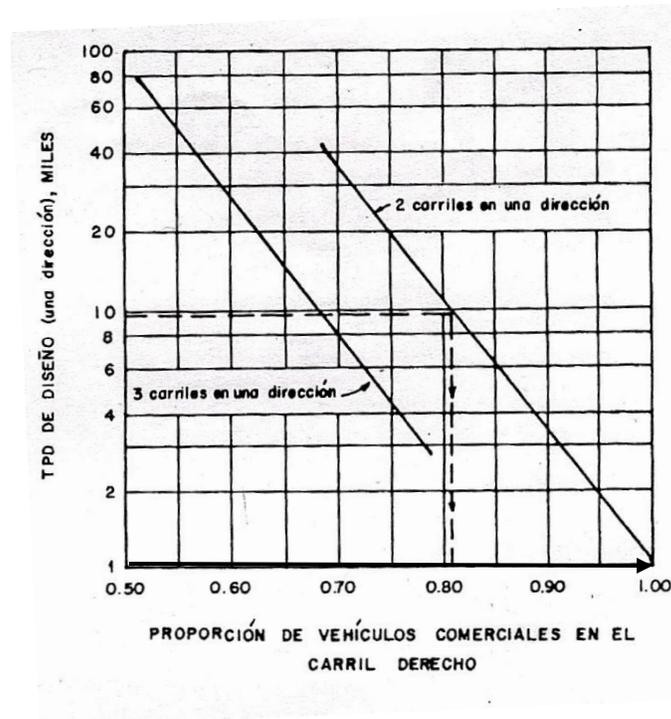


Figura 3.1. Factor de carril.

Una vez elegido los factores, se utilizará la tabla 3.13 y 3.14 para conocer las repeticiones esperadas para cada tipo de eje en el primer año y en la vida útil del pavimento, respectivamente.

Descripción de la tabla 3.13:

Columna 1: Tipos de vehículos de proyecto.

Columna 2: Tipo de eje de cada vehículo.

Columna 3: Peso de cada eje del vehículo expresado en toneladas.

Columna 4: Peso de cada eje del vehículo expresado en kips.

Columna 5: Repeticiones diarias del eje, obtenidas de la tabla 3.11.

Columna 6: Porcentaje de vehículos cargados o vacíos, se considera todos los vehículos cargados.

Columna 7: Factor de sentido.

Columna 8: Factor de carril.

Columna 9: Valor que indica los días del año.

Columna 10: Repeticiones al año de cada eje, se obtiene multiplicando la columna 3, 5, 6, 7, 8 y 9.

Tabla 3.13. Repeticiones esperadas para cada tipo de eje en el primer año.

Tipo de vehículo	Tipo eje	Carga toneladas	Peso en kips	Repeticiones esperadas	%cargado o vacío	Factor de sentido	Factor de carril	Días anuales	Repeticiones al año
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A2	Sencillo	1	2.20462	15	1	1	1	365	5475
	Sencillo	1	2.20462	15	1	1	1	365	5475
A'2	Sencillo	1.7	3.747854	15	1	1	1	365	5475
	Sencillo	3.8	8.377556	15	1	1	1	365	5475
B2	Sencillo	5.5	12.12541	6	1	1	1	365	2190
	Sencillo	10	22.0462	6	1	1	1	365	2190
C2	Sencillo	6.2	13.668644	15	1	1	1	365	5475
	Sencillo	11.3	24.912206	15	1	1	1	365	5475
C3	Sencillo	6	13.22772	15	1	1	1	365	5475
	Doble	20	44.0924	15	1	1	1	365	5475
T2-S2	Sencillo	5.8	12.786796	150	1	1	1	365	54750
	Sencillo	10.5	23.14851	150	1	1	1	365	54750
	Doble	19.2	42.328704	150	1	1	1	365	54750
T3-S2	Sencillo	6	13.22772	60	1	1	1	365	21900
	Doble	19	41.88778	60	1	1	1	365	21900
	Doble	19	41.88778	60	1	1	1	365	21900
T3-S2-R2	Sencillo	5.5	12.12541	15	1	1	1	365	5475
	Doble	17.7	39.021774	15	1	1	1	365	5475
	Doble	17.7	39.021774	15	1	1	1	365	5475
	Sencillo	9.8	21.605276	15	1	1	1	365	5475
	Sencillo	9.8	21.605276	15	1	1	1	365	5475
T3-S2-R4	Sencillo	5.5	12.12541	9	1	1	1	365	3285
	Doble	15	33.0693	9	1	1	1	365	3285
	Doble	15	33.0693	9	1	1	1	365	3285
	Doble	15	33.0693	9	1	1	1	365	3285
	Doble	15	33.0693	9	1	1	1	365	3285

Descripción de la tabla 3.14:

La columna 1, 2, 3 y 4 indican lo mismo que tabla 3.13.

Columna 5: Repeticiones al año de cada eje, calculado en la tabla 3.13.

Columna 6: Periodo de diseño elegido de 20 años.

Columna 7: Factor de crecimiento, calculado con la fórmula propuesta por la PCA.

Columna 8: Indican las repeticiones en la vida útil de cada eje. Se obtiene multiplicando la columna 5, 6 y 7.

Tabla 3.14. Repeticiones de los ejes en la vida útil del proyecto.

Tipo de vehículo	Tipo eje	Carga toneladas	Peso en kips	Repeticiones al año	Periodo de diseño	Factor de crecimiento	Repeticiones en la vida útil.
1	2	3	4	5	6	7	8
A2	Sencillo	1	2.20462	5475	20	1.15	125925
	Sencillo	1	2.20462	5475	20	1.15	125925
A'2	Sencillo	1.7	3.747854	5475	20	1.15	125925
	Sencillo	3.8	8.377556	5475	20	1.15	125925
B2	Sencillo	5.5	12.12541	2190	20	1.15	50370
	Sencillo	10	22.0462	2190	20	1.15	50370
C2	Sencillo	6.2	13.668644	5475	20	1.15	125925
	Sencillo	11.3	24.912206	5475	20	1.15	125925
C3	Sencillo	6	13.22772	5475	20	1.15	125925
	Doble	20	44.0924	5475	20	1.15	125925
T2-S2	Sencillo	5.8	12.786796	54750	20	1.15	1259250
	Sencillo	10.5	23.14851	54750	20	1.15	1259250
	Doble	19.2	42.328704	54750	20	1.15	1259250
T3-S2	Sencillo	6	13.22772	21900	20	1.15	503700
	Doble	19	41.88778	21900	20	1.15	503700
	Doble	19	41.88778	21900	20	1.15	503700
T3-S2-R2	Sencillo	5.5	12.12541	5475	20	1.15	125925
	Doble	17.7	39.021774	5475	20	1.15	125925
	Doble	17.7	39.021774	5475	20	1.15	125925
	Sencillo	9.8	21.605276	5475	20	1.15	125925
	Sencillo	9.8	21.605276	5475	20	1.15	125925
T3-S2-R4	Sencillo	5.5	12.12541	3285	20	1.15	75555
	Doble	15	33.0693	3285	20	1.15	75555
	Doble	15	33.0693	3285	20	1.15	75555
	Doble	15	33.0693	3285	20	1.15	75555
	Doble	15	33.0693	3285	20	1.15	75555

total

7404390

A continuación se separan las repeticiones para cada peso de eje y para cada tipo de eje, como se muestra en la tabla 3.15.

Tabla 3.15. Repeticiones para cada carga por eje en la vida útil.

Tipo de eje.	Peso en kips.	Repeticiones en la vida útil.
Sencillo	2.21	251,850
Sencillo	3.75	125,925
Sencillo	8.38	125,925
Sencillo	12.13	251,850
Sencillo	12.79	1,259,250
Sencillo	13.23	629,625
Sencillo	14.34	125,925
Sencillo	21.61	251,850
Sencillo	22.05	50,370
Sencillo	23.16	1,259,250
Sencillo	24.92	125,925
Doble	33.08	302,220
Doble	39.04	251,850
Doble	41.9	1,007,400
Doble	42.35	1,259,250
Doble	44.11	125,925

Para realizar el cálculo del espesor de losa se ocupará el formato propuesto por la PCA (tabla 3.10). Los valores de los peso en kips de la tabla 3.15 ocuparán la columna 1 del formato de diseño y las repeticiones de los ejes en la vida útil se colocarán en columna 3 del mismo formato y además estas repeticiones servirán para compararse con las repeticiones admisibles que se calcularán durante el proceso. Pero antes de iniciar el diseño con el formato de la tabla 3.10 es necesario establecer el factor de seguridad de carga, el módulo de reacción de la subrasante y el módulo de ruptura del concreto.

Factor de seguridad de carga.

La vialidad del Centro Operativo Estafeta dará servicio con frecuencia al tránsito pesado, por lo tanto, es necesario prevenir el incremento de este tipo de tránsito, se considera necesario adoptar un factor de seguridad de carga igual a 1.2. Atendiendo las recomendaciones de la PCA.

Cálculo del módulo de reacción (K) de diseño.

Se considera el mismo módulo de reacción de la subrasante, considerado en el método AASHTO de 320pci.

Cálculo del módulo de ruptura del concreto.

Se considera el mismo módulo de ruptura ocupado para el método AASHTO de 535psi.

De manera resumida los datos básicos de diseño requeridos por el formato de la tabla 3.10 propuesto por la PCA, son:

- Se usará pasajuntas y acotamientos de concreto.
- La resistencia a la flexión del concreto de 535 psi. (MR).
- Valor de módulo de reacción de la subrasante (K) de 320pci.
- Factor de seguridad de carga (F.S.C) igual a 1.2.
- La carga por eje, se muestran en la tabla 3.15.
- Número esperado de repeticiones de las diversas cargas por eje en el carril de diseño y durante el periodo de diseño, se muestran en la tabla 3.15.
- Los espesores propuestos para realizar el diseño son de 20, 21.5, 23 y 25 centímetros.

Estos datos se ocuparán para llenar la tabla 3.10 que servirá para diseñar el espesor del pavimento de concreto hidráulico para el Centro Operativo Estafeta. En este formato se realizara los dos tipos de análisis considerados en el método. Los formatos de diseño para los espesores propuestos de 20, 21.5, 23 y 25 centímetros se mostraran en las tablas 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19, respectivamente. A continuación se explicara la manera de realizar el cálculo, para el primer espesor propuesto utilizando el formato de diseño para la tabla 3.16 (espesor de 20cm.), para el análisis por fatiga y erosión. Es necesario aclarar que los pasos descritos son repetitivos durante el proceso de diseño, por lo tanto, no se repetirán para los demás espesores propuestos.

Análisis por fatiga.

Paso1: Se inicia llenando la columna 1, 2 y 3 del formato de diseño. Obsérvese que la columna 2 es la columna 1 multiplicada por el factor de seguridad de carga (FSC), que en este caso es de 1.2.

Paso 2: Determinar los esfuerzos equivalentes para eje sencillo y eje tándem. En este caso se usa la tabla 3.5, ya que hay acotamientos o margen lateral de concreto. Se interpolara para el valor de módulo de reacción de 320pci. para el eje simple y el eje tándem.

Tabla 3.5. Valores de esfuerzo equivalente para ejes sencillos y tándem (con acotamiento de concreto).

Espesor de la losa (pulg.)	K de la subrasante-subbase (lb/in^3) (eje simple / tándem)						
	50	100	150	200	300	500	700
6.5	334/295	294/251	274/230	260/218	243/203	223/188	212/180
7	302/270	266/230	248/210	236//198	220/184	203/170	192/162
7.5	275/250	243/211	226/193	215/182	201/168	185/155	176/148
8	252/232	222/196	207/179	197/168	185/155	170/142	162/135
8.5	232/216	205/182	191/166	182/156	170/144	157/131	150/125
9	215/202	190/171	177/155	169/146	158/134	146/122	139/116

Para eje sencillo:

$$Esfuerzo\ equivalente = 185 - \frac{185 - 170}{200} \times 20 = 183.5$$

Y para ejes tándem:

$$Esfuerzo\ equivalente = 155 - \frac{155 - 142}{200} \times 20 = 153.7$$

Se anotan estos valores en los espacios correspondientes de los números 8 y 11, respectivamente.

Paso 3: Determinar la razón de esfuerzos, que es el esfuerzo equivalente dividido entre el módulo de ruptura.

1. Para ejes sencillo

$$Razón\ de\ esfuerzos = \frac{183.5}{535} = 0.343$$

2. Para ejes tándem

$$Razón\ de\ esfuerzos = \frac{153.7}{535} = 0.287$$

Se anotan estos valores en los espacios correspondientes en los números 9 y 12, respectivamente, en el formato de diseño de la tabla 3.16.

Paso 4: Se usa la figura 3.2 para determinar las repeticiones admisibles de carga para cada eje, basadas en análisis por fatiga. Obsérvese que las cargas por eje que se usan son las de la columna 2 (esto después de multiplicar por el FSC). Por ejemplo, para la fila 8 de ejes sencillos, la carga por eje que se usa es 25.9. Se traza una línea que una 25.9 kips. en el eje de carga por eje simple (lado izquierdo) y 0.343 en la línea de factor de la relación de esfuerzos. Se prolonga la

línea hasta las repeticiones admisibles de carga y se lee que esas repeticiones que son de 2,000,000 (ver figura 3.2). Se repite lo anterior para todas las cargas por eje, teniendo en cuenta que para los ejes tándem la escala está en el lado derecho del eje de la carga por eje. Se llena la columna 4 de la tabla 3.16 con las repeticiones admisibles para cada caso.

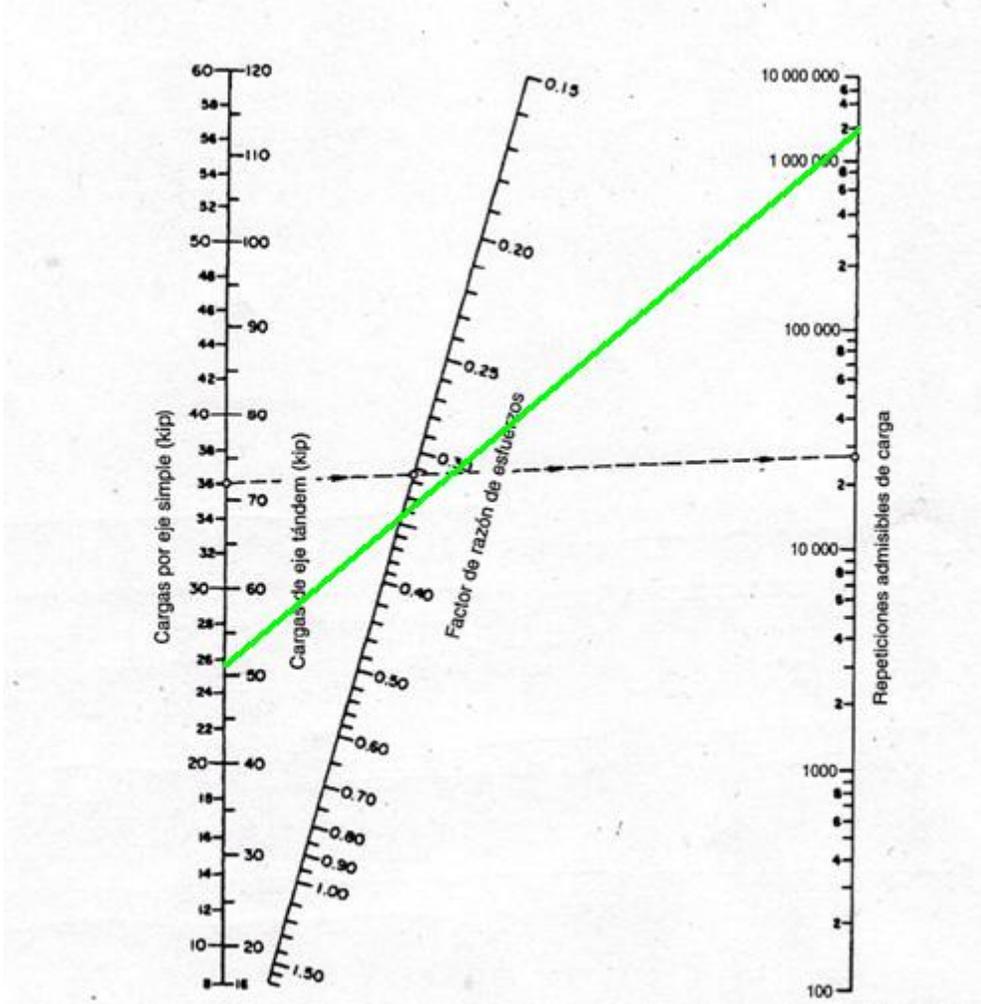


Figura 3.2. Repeticiones admisibles de carga, para análisis por fatiga

Paso 5: Determinar el porcentaje de fatiga por cada carga por eje, que es una indicación de la resistencia que consume la cantidad esperada de repeticiones de carga por eje. El valor se ocupa para llenar la columna 5 del formato. Dicho valor se obtiene con la siguiente ecuación.

$$\text{Porcentaje de fatiga} = \frac{\text{columna 3}}{\text{columna 4}} \times 100$$

Paso 6: Determinar la resistencia total a la fatiga consumida, sumando la columna 5 (eje sencillo y tándem). Si este total no excede el 100 %, el espesor supuesto es adecuado para la resistencia a la fatiga durante el periodo de diseño. El total obtenido es de 536.82%, que indica que 8 pulgadas no son adecuadas para la resistencia a la fatiga.

Análisis por erosión.

El paso uno del análisis por fatiga es igual en el análisis por erosión, por consiguiente no se repetirá. Son necesarios los procedimientos adicionales siguientes:

1.-Determinar el factor de erosión para las cargas por eje sencillo y eje tándem. Los factores de erosión dependen del tipo de construcción del pavimento, esto es, si son juntas con pasajuntas o sin pasajuntas, con o sin acotamientos de concreto. Para el proyecto el tipo de construcción es con pasajuntas y acotamiento. Por consiguiente se usa la tabla 3.8. Se interpola para el módulo de reacción de 320 pci. Para obtener el factor de erosión. Para ejes simples, el factor de erosión esta en los rangos 2.33 y 2.30 interpolando se obtiene un valor de 2.327. Para ejes tándem, el factor de erosión esta en los rangos de 2.38 y 2.30 interpolando se obtiene un valor de 2.372. Se anotan estos valores en los números 10 y 13, respectivamente.

Tabla 3.8. Factores de erosión para ejes sencillos y tándem (con pasajuntas, con acotamiento de concreto).

Espesor de la losa (pulg.)	K de la subrasante-subbase (lb/in^3) (eje simple / tándem)					
	50	100	200	300	500	700
7	2.61/2.79	2.56/2.68	2.52/2.56	2.49/2.50	2.46/2.42	2.43/2.38
7.5	2.53/2.73	2.48/2.62	2.44/2.50	2.41/2.44	2.38/2.36	2.35/2.31
8	2.46/2.68	2.41/2.56	2.36/2.44	2.33/2.38	2.30/2.30	2.27/2.24

2.-Determinar las repeticiones por eje admisibles para cada carga por eje, con base en el análisis por erosión, para el proyecto se usará la figura 3.3, por que el pavimento tiene acotamiento de concreto. Se anotan los valores en la columna 6. Por ejemplo, para la fila 8 de ejes sencillos, la carga por eje es 25.9 y el factor de erosión 2.327, ocupando la figura 3.3 se traza una línea que una 25.9 kips. en el eje de carga por eje simple (lado izquierdo) y 2.327 en la línea de factor de erosión. Se prolonga la línea hasta las repeticiones admisibles de carga y se lee que esas repeticiones son de 10,100,000.

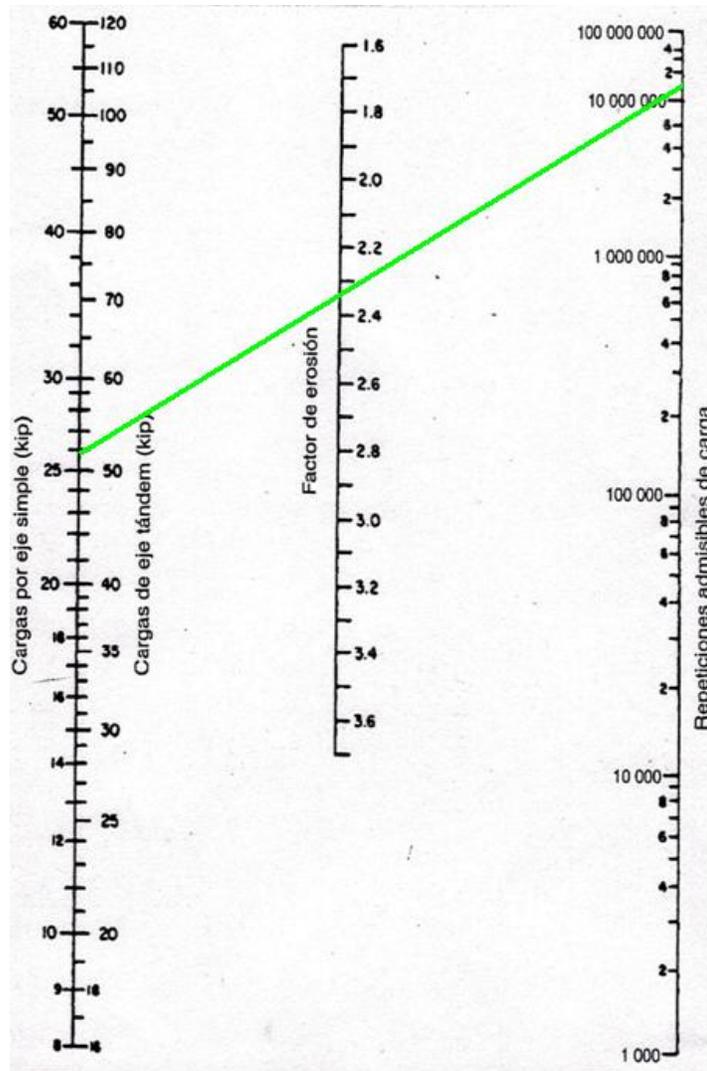


Figura 3.3 Repeticiones admisible, para análisis erosión (con acotamiento de concreto).

3.- Determinar el porcentaje de daño por erosión para cada carga por eje, esto es, dividir la columna 3 entre la columna 6 y multiplicar por cien. Y anotar esos valores en la columna 7.

4.-Determinación de daño total por erosión sumando la columna 7 (ejes sencillos y tándem). Obteniéndose el porcentaje de 58.09%.

Los resultados indica que 8 pulgadas (20 centímetros) no es adecuado de acuerdo con los análisis por fatiga y erosión. Ya que el daño total por el análisis por fatiga es superior al 100%. Por lo tanto, es necesario aumentar el espesor para satisfacer ambos análisis.

Tabla 3.17 Formato de diseño para el espesor de 8.5 pulgadas.

Proyecto	<u>C. O. E.</u>		Pasajuntas	<u>Si</u>	No
Espesor inicial	<u>8.5</u>	In	Apoyo lateral	<u>Si</u>	No
Módulo de reacción de la subrasante k	<u>320</u>	pci	Periodo de diseño	<u>20</u>	años
Módulo de ruptura MR	<u>535</u>	psi	Base granular	<u>10</u>	In
Factor de seguridad de carga(FSC)	<u>1.2</u>				

Carga del eje en kips	Multiplicada por FSC	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones permisibles	%de fatiga	Repeticiones permisibles	% de daño
			Figura 1		Figura 2	
1	2	3	4	5	6	7

Ejes sencillos

8.Esfuerzo equivalente	168.7		10.Factor de erosión	2.256
9.Factor de relación de esfuerzo	0.315			

2.21	2.7	251,850	ILIMITADO		ILIMITADO	
3.75	4.5	125,925	ILIMITADO		ILIMITADO	
8.38	10.1	125,925	ILIMITADO		ILIMITADO	
12.13	14.6	251,850	ILIMITADO		ILIMITADO	
12.79	15.3	1,259,250	ILIMITADO		ILIMITADO	
13.23	15.9	629,625	ILIMITADO		ILIMITADO	
14.34	17.2	125,925	ILIMITADO		ILIMITADO	
21.61	25.9	251,850	ILIMITADO		ILIMITADO	
22.05	26.5	50,370	10000000	0.50	80000000	0.06
23.16	27.8	1,259,250	3300000	38.16	20200000	6.23
24.92	29.9	125,925	500000	25.19	8000000	1.57
Sub total de ejes sencillos		4,457,745	SUMA	63.85	SUMA	7.87

Ejes dobles

11.Esfuerzo equivalente	142.7		13.Factor de erosión	2.312
12.Factor de relación de esfuerzos	0.267			

33.08	39.7	302,220	ILIMITADO		ILIMITADO	
39.04	46.8	251,850	ILIMITADO		ILIMITADO	
41.9	50.3	1,007,400	ILIMITADO		30000000	3.36
42.35	50.8	1,259,250	ILIMITADO		20000000	6.30
44.11	52.9	125,925	ILIMITADO		10000000	1.26
Sub total de ejes dobles		2,946,645	SUMA	0	SUMA	10.91

Repeticiones en la vida útil	7,404,390	Total de fatiga	63.85	Total de erosión	18.78
-------------------------------------	------------------	------------------------	--------------	-------------------------	--------------

Tabla 3.18 Formato de diseño para el espesor de 9 pulgadas.

Proyecto	<u>C. O. E.</u>		Pasajuntas	<u>Si</u>	No
Espesor inicial	<u>9</u>	In	Apoyo lateral	<u>Si</u>	No
Módulo de reacción de la subrasante k	<u>320</u>	pci	Periodo de diseño	<u>20</u>	años
Módulo de ruptura MR	<u>535</u>	psi	Base granular	<u>10</u>	In
Factor de seguridad de carga(FSC)	<u>1.2</u>				

Carga del eje en kips	Multiplicada por FSC	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones permisibles	%de fatiga	Repeticiones permisibles	% de daño
			Figura 1		Figura 2	
1	2	3	4	5	6	7

Ejes sencillos

8.Esfuerzo equivalente	156.8	10.Factor de erosión	2.187
9.Factor de relación de esfuerzo	0.29		

2.21	2.7	251,850	ILIMITADO		ILIMITADO	
3.75	4.5	125,925	ILIMITADO		ILIMITADO	
8.38	10.1	125,925	ILIMITADO		ILIMITADO	
12.13	14.6	251,850	ILIMITADO		ILIMITADO	
12.79	15.3	1,259,250	ILIMITADO		ILIMITADO	
13.23	15.9	629,625	ILIMITADO		ILIMITADO	
14.34	17.2	125,925	ILIMITADO		ILIMITADO	
21.61	25.9	251,850	ILIMITADO		ILIMITADO	
22.05	26.5	50,370	ILIMITADO		ILIMITADO	
23.16	27.8	1,259,250	ILIMITADO		ILIMITADO	
24.92	29.9	125,925	3500000	3.60	39000000	0.32
Sub total de ejes sencillos		4,457,745	SUMA	3.60	SUMA	0.32

Ejes dobles

11.Esfuerzo equivalente	132.8	13.Factor de erosión	2.262
12.Factor de relación de esfuerzos	0.248		

33.08	39.7	302,220	ILIMITADO		ILIMITADO	
39.04	46.8	251,850	ILIMITADO		ILIMITADO	
41.9	50.3	1,007,400	ILIMITADO		ILIMITADO	
42.35	50.8	1,259,250	ILIMITADO		ILIMITADO	
44.11	52.9	125,925	ILIMITADO		70000000	0.18
Sub total de ejes dobles		2,946,645	SUMA	0	SUMA	0.18

Repeticiones en la vida útil	7,404,390	Total de fatiga	3.60	Total de erosión	0.50
-------------------------------------	------------------	------------------------	-------------	-------------------------	-------------

Tabla 3.19 Formato de diseño para el espesor de 10 pulgadas.

Proyecto	<u>C. O. E.</u>		Pasajuntas	<u>Si</u>	No
Espesor inicial	<u>10</u>	In	Apoyo lateral	<u>Si</u>	No
Módulo de reacción de la subrasante k	<u>320</u>		Periodo de diseño	<u>20</u>	años
Módulo de ruptura MR	<u>535</u>	psi	Base granular	<u>10</u>	In
Factor de seguridad de carga(FSC)	<u>1.2</u>				

Carga del eje en kips	Multiplicada por FSC	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones permisibles	%de fatiga	Repeticiones permisibles	% de daño
			Figura 1		Figura 2	
1	2	3	4	5	6	7

Ejes sencillos

8.Esfuerzo equivalente	128		10.Factor de erosión	2.066
9.Factor de relación de esfuerzo	0.24			

2.21	2.7	251,850	ILIMITADO		ILIMITADO	
3.75	4.5	125,925	ILIMITADO		ILIMITADO	
8.38	10.1	125,925	ILIMITADO		ILIMITADO	
12.13	14.6	251,850	ILIMITADO		ILIMITADO	
12.79	15.3	1,259,250	ILIMITADO		ILIMITADO	
13.23	15.9	629,625	ILIMITADO		ILIMITADO	
14.34	17.2	125,925	ILIMITADO		ILIMITADO	
21.61	25.9	251,850	ILIMITADO		ILIMITADO	
22.05	26.5	50,370	ILIMITADO		ILIMITADO	
23.16	27.8	1,259,250	ILIMITADO		ILIMITADO	
24.92	29.9	125,925	ILIMITADO		ILIMITADO	

Sub total de ejes sencillos	4,457,745	SUMA	0	SUMA	0
------------------------------------	------------------	-------------	----------	-------------	----------

Ejes dobles

11.Esfuerzo equivalente	116.9		13.Factor de erosión	2.171
12.Factor de relación de esfuerzos	0.22			

33.08	39.7	302,220	ILIMITADO		ILIMITADO	
39.04	46.8	251,850	ILIMITADO		ILIMITADO	
41.9	50.3	1,007,400	ILIMITADO		ILIMITADO	
42.35	50.8	1,259,250	ILIMITADO		ILIMITADO	
44.11	52.9	125,925	ILIMITADO		ILIMITADO	

Sub total de ejes dobles	2,946,645	SUMA	0	SUMA	0
---------------------------------	------------------	-------------	----------	-------------	----------

Repeticiones en la vida útil	7,404,390	Total de fatiga	0	Total de erosión	0
-------------------------------------	------------------	------------------------	----------	-------------------------	----------

La tabla 3.20 muestra el porcentaje de daño para los espesores propuestos, obtenidos de los formatos de diseño de las tablas 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19, podemos concluir que los espesores que satisfacen el análisis por fatiga y erosión son los espesores de 8.5, 9 y 10 pulgadas. Aunque el espesor de 10 pulgadas satisface el análisis, el daño que provoca tanto por fatiga y erosión no es significativo, es decir, la estructura está sobrada y es necesario reducir el espesor. Por lo tanto, los espesores de 8.5 y 9 pulgadas satisfacen el análisis.

Tabla 3.20. Porcentaje de daño de los espesores propuestos.

ANÁLISIS	ESPESOR EN PULGADAS			
	8	8.5	9	10
FATIGA	536.82	63.85	3.60	0
EROSIÓN	58.09	18.78	0.50	0

Conclusión.

Los espesores de 8.5 (22.5cm.), 9(23cm.) y 10 (25cm.) pulgadas son capaces de soportar la carga de las repeticiones esperadas de cada tipo de eje y además satisfacen los dos criterios de análisis. El espesor de 25 centímetros indica que la estructura está sobrada, es decir, que es necesario reducir el espesor. El espesor de 22.5 y 23 centímetros son aceptables para ambos análisis. Debido a la alta confiabilidad demandada para la estructura se acepta como optimo el espesor de 23 centímetros (9 pulgadas) y recordando que también satisface el método AASHTO, por lo tanto, se recomienda la estructura propuesta en la conclusión del método AASHTO.

CONCLUSIÓN

Existen software en el mercado que facilita el cálculo estructural de un pavimento rígido, si aplicamos esta tecnología sin un conocimiento, para resolver un problema, tal vez por el momento se soluciona, si nos favorece la suerte. Pero lo que realmente importa es integrar el conocimiento de la materia, del método seleccionado para el diseño y de la experiencia en campo y de la comunicación entre los diversos participantes del proceso constructivo. Y una vez comprendido, tal vez desarrollar una tecnología a la medida que responda según las necesidades.

Es necesario tener conocimiento del área de pavimentos específicamente de concreto hidráulico, desde el concepto, hasta las partes que lo integran, las variantes en este tipo de pavimento y los factores que afectan el diseño estructural:

1. Tránsito. Que circula o circulará en el periodo de diseño.
2. Características de los materiales. Como es el suelo, concreto, acero de refuerzo y sellado de las juntas.
3. Factores regionales. Temperatura y humedad.
4. Construcción. Los trabajos preliminares, colocación de las capas de apoyo, colocación y retiro de las cimbras; colocación del acero de refuerzo en su posición correcta y características requeridas; el concreto tenga una resistencia compatible con el diseño estructural, la característica y calidad requerida desde su fabricación, hasta su colocación, y aún después de colado, además de realizarse la compactación, texturizado y curado con los cuidados necesarios. Conocer la ubicación y las características geométricas del corte, la colocación de las tiras de respaldo y sellado de las juntas. Las condiciones y el tiempo para permitir la apertura al tránsito.

Con el fin de responder adecuadamente y por largo tiempo los efectos consecuentes de las condiciones de exposición y servicio a que este sometido el pavimento.

Seleccionado el método AASHTO y de la PCA, es necesario conocer las variables de diseño y su proceso de idealización que depende de la importancia que tiene o tendrá la estructura y de la posibilidad de conocer los factores intrínsecos y extrínsecos que actuarán en la estructura, para realizar el diseño y obtener una

construcción que garantice el cumplimiento de las ventajas identificadas a nivel mundial de este tipo de pavimentos. Donde es necesario la intuición para detectar los errores que puedan cometerse como elegir los componentes de las capas de la estructura, diseñar las mezclas de concreto, los posibles defectos de construcción por el empleo de equipos y procedimientos inadecuados, o por deficiencias de inspección, supervisión y control de calidad, es decir, debe uno ser creativo para adoptar el diseño a las condiciones más reales. Una vez obtenidas las soluciones debe elegirse la más óptima, es decir, una solución razonada en la eficiencia y economía. En pocas palabras la solución dependerá de los cuidados que se tenga durante el diseño y el cumplimiento de la solución dependerá de los cuidados que se tenga en la construcción y mantenimiento.

Los métodos AASHTO y de la PCA surgen de las características propias de la localidad, procedimientos constructivos, la experiencia y las condiciones de tránsito, por lo tanto, es necesario adecuar los métodos a las condiciones particulares, para proyectar la estructura.

Para el Centro Operativo Estafeta se idealizó la estructura a las condiciones más reales propias del proyecto, según las variables de diseño de cada método. Obteniéndose una solución que responde de una manera adecuada a los métodos y a las solicitudes del usuario, propietario, locales, proceso constructivo, mantenimiento y al tiempo.

El tipo de pavimento rígido será con refuerzo sencillo, el espesor que garantiza soportar los esfuerzos generados por la carga de tránsito que se presentará durante el periodo de diseño es de 9 pulgadas (23 centímetros). Para la estructura se usará juntas de contracción, construcción, y expansión (evitándose en lo posible), ver figura c.1, c.2, c.3 y c.4. Se colocará pasajuntas en las juntas de 1 ¼", con una longitud de 46 centímetros y a cada 30 centímetros; barras de amarre de ½", con una longitud y separación de 76 centímetros. Y debido a los cambios de temperatura es necesario colocar malla electrosoldada para controlar los anchos de agrietamiento, considerando el reglamento ACI 318-02 referente a losas, el área necesaria por metro para refuerzo por temperatura es de 4.14 centímetros cuadrados, se propone una malla tipo ESAN E66-22, colocando una malla en la parte inferior y superior para cumplir con el área necesaria; la malla se colocará a no menos de 5 centímetros ni de 15 centímetros de los bordes de las losas y se traslaparán 5 centímetros como mínimo, figura c.5.

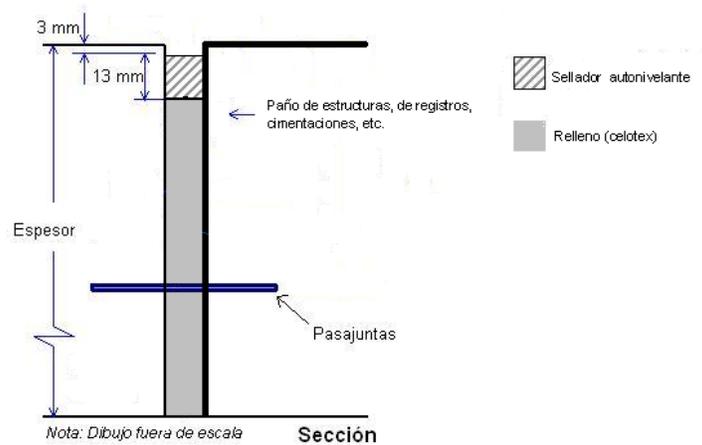


Figura c.4. Junta de expansión.

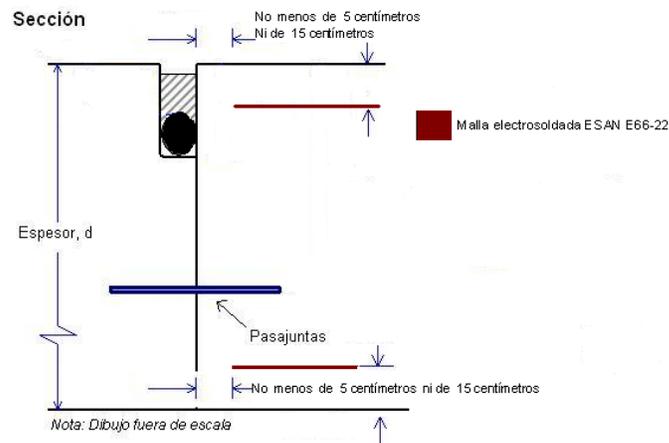


Figura c.5. Refuerzo por temperatura.

Para reducir los esfuerzos en los bordes de la losa será necesario colocar soportes laterales utilizando guarniciones, acotamientos y losas ampliadas, según se requiera. El ancho de carril es de 7.10 metros, por lo tanto, se recomienda modular los tableros de 4 metros de largo y 3.05 de ancho; pero se colocará como mínimo un largo de 4.27 y un ancho de 2.17 metros, figura c.6.

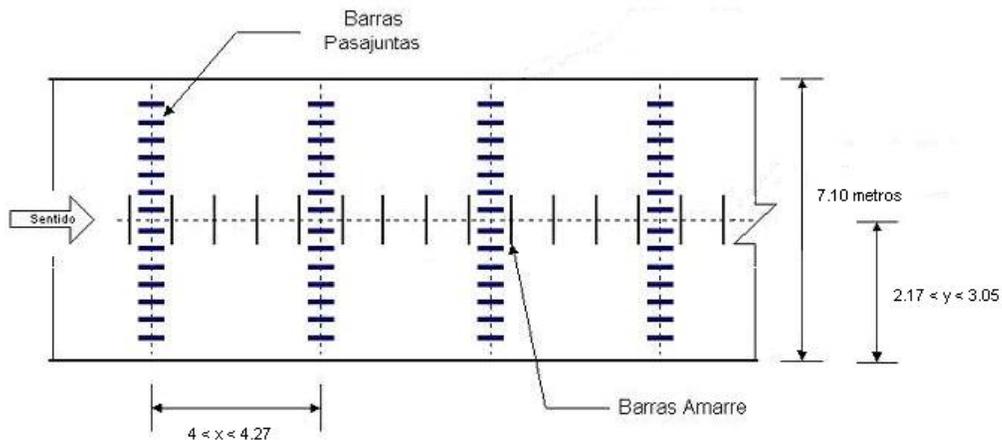


Figura c.6. Dimensiones de tableros.

La manera de reducir los problemas del agua se resolverá utilizando un drenaje pluvial, mediante el texturizado y dando una pendiente longitudinal, y transversal para alejar el agua lo más pronto posible de la estructura. Para evitar problemas de introducción de agua y de material incompresible en las juntas, se colocará una cintilla de poliuretano (cola de ratón), un sellador líquido autonivelable y un relleno (celotex) para la junta de expansión o aislamiento.

El módulo de ruptura del concreto será de 42 kg/cm² (594.7psi.) superior al utilizado en el diseño debido a la alta confiabilidad seleccionada y para evitar problemas de diseño del concreto, dosificación de componentes durante la producción, mezclado y transporte. Ya que el concreto será elaborado y premezclado por una empresa particular y suministrara a la obra.

La sección estructural utilizará una subrasante que será el suelo natural de la localidad, una subbase de material granular de 10 centímetros de la mina Jesús del Monte, para mejorar el drenaje y una base que corresponderá a una mezcla de material granular (de la mina Jesús del Monte) con tepetate (del banco Barrientos) de 15 centímetros, para aumentar la rigidez. Las capas deberán tener materiales en calidad y cantidad apropiada; geometría, nivel, pendiente, y espesor indicado y compactación adecuada, para dar la resistencia requerida, el soporte uniforme, constante y estable durante el periodo de diseño de 20 años.

Se deberá tener cuidado durante la construcción y servicio para garantizar su estabilidad, seguridad, funcionalidad y durabilidad, es decir, satisfacer las necesidades que se demanden.

Los cuidados a considerar en un sentido muy amplio durante la construcción es la falta de experiencia o negligencia del residente y del personal que realizarán las capas de apoyo; el drenaje; la colocación de cimbra y retiro de cimbras; colocación de acero de refuerzo; el control del comportamiento y propiedades del concreto desde su fabricación, recepción, tendido y compactación, y aun después de colado; control sobre su geometría, niveles, pendientes y espesor de la losa de concreto hidráulico; acabado superficial del pavimento, protección y curado; realización de las juntas en los lugares previamente determinados y con su geometría; limpieza de la juntas; terminado de las actividades del sellado de las juntas y haya alcanzado la resistencia del concreto antes de la apertura al tránsito. Y durante el servicio se realicen las reparaciones y uso adecuado.

APÉNDICE 1. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos.

Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos									
a) Ejes sencillos Pt=2.5									
Carga por eje ton.	Espesor de la losa, cm.								
	15	17.5	20	23	25	28	30	33	35.5
1	0.0002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
2	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
3	0.012	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
4	0.039	0.035	0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
4.5	0.097	0.089	0.084	0.082	0.081	0.080	0.080	0.080	0.080
5.5	0.203	0.189	0.181	0.176	0.175	0.174	0.174	0.173	0.173
6.5	0.376	0.360	0.347	0.341	0.338	0.337	0.336	0.336	0.366
7.0	0.634	0.623	0.610	0.604	0.601	0.599	0.599	0.599	0.598
8.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
9.0	1.51	1.52	1.55	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59	1.59
10.0	2.21	2.20	2.28	2.34	2.38	2.40	2.41	2.41	2.41
11.0	3.16	3.10	3.22	3.36	3.45	3.50	3.53	3.54	3.55
12.0	4.41	4.26	4.42	4.67	4.85	4.95	5.01	5.04	5.05
13.0	6.05	5.76	5.92	6.29	6.61	6.81	6.92	6.98	7.01
14.0	8.16	7.67	7.79	8.28	8.79	9.14	9.35	9.46	9.52
14.5	10.8	10.1	10.1	10.7	11.4	12.0	12.3	12.6	12.7
15.5	14.1	13.0	12.9	13.6	14.6	15.4	16.0	16.4	16.5
16.5	18.2	16.7	16.4	17.9	18.3	19.5	20.4	21.0	21.3
17.0	23.1	21.1	20.6	21.3	22.7	24.3	25.6	26.4	27.0
18.0	29.1	26.5	25.7	26.3	27.9	29.9	31.6	32.9	33.7
19.0	36.2	32.9	31.7	32.2	34.0	36.3	38.7	40.4	41.6
20.0	44.6	40.4	38.8	39.2	41.0	43.8	46.7	49.1	50.8
21.0	54.5	49.3	47.1	47.3	49.2	52.3	55.9	59.0	61.4
22.0	66.1	59.7	56.9	56.8	58.7	62.1	66.3	70.3	73.4
23.0	79.4	71.7	68.2	67.8	69.6	73.3	78.1	83.0	87.1

Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos									
a) Ejes tándem Pt=2.5									
Carga por eje ton.	Espesor de la losa, cm.								
	15	17.5	20	23	25	28	30	33	35.5
1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
2	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
3	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
4	0.007	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
4.5	0.015	0.014	0.013	0.013	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120
5.5	0.031	0.028	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
6.5	0.057	0.052	0.049	0.048	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
7.0	0.097	0.089	0.084	0.082	0.081	0.081	0.080	0.080	0.080
8.0	0.155	0.143	0.136	0.133	0.132	0.131	0.131	0.131	0.131

Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos									
a) Ejes tándem Pt=2.5 (continuación)									
Carga por eje ton.	Espesor de la losa, cm.								
	15	17.5	20	23	25	28	30	33	35.5
9.0	0.234	0.220	0.211	0.206	0.204	0.203	0.203	0.203	0.203
10.0	0.340	0.325	0.313	0.308	0.305	0.304	0.303	0.303	0.303
11.0	0.475	0.462	0.450	0.444	0.441	0.440	0.439	0.439	0.439
12.0	0.644	0.637	0.627	0.622	0.620	0.619	0.618	0.618	0.618
13.0	0.855	0.854	0.852	0.850	0.850	0.850	0.849	0.849	0.849
14.0	1.11	1.12	1.13	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
14.5	1.43	1.44	1.47	1.49	1.50	1.51	1.51	1.51	1.51
15.5	1.82	1.82	1.87	1.92	1.95	1.96	1.97	1.97	1.97
16.5	2.29	2.27	2.35	2.43	2.48	2.51	2.52	2.52	2.53
17.0	2.85	2.80	2.91	3.03	3.12	3.16	3.18	3.20	3.20
18.0	3.52	3.42	3.55	3.74	3.87	3.94	3.98	4.00	4.01
19.0	4.32	4.16	4.30	4.55	4.74	4.86	4.91	4.95	4.96
20.0	5.26	5.01	5.16	5.48	5.75	5.92	6.01	6.06	6.09
21.0	6.36	6.01	6.14	6.53	6.90	7.14	7.28	7.36	7.40
22.0	7.64	7.16	7.27	7.73	8.21	8.55	8.75	8.86	8.92
23.0	9.11	8.50	8.55	9.07	9.68	10.14	10.42	10.58	10.66
24.0	10.8	10.0	10.0	10.6	11.3	11.9	12.3	12.5	12.7
24.5	12.8	11.8	11.7	12.3	13.2	13.9	14.5	14.8	14.9
25.5	15.0	13.8	13.6	14.2	15.2	16.2	16.8	17.3	17.5
26.5	17.5	16.0	15.7	16.3	17.5	18.6	19.5	20.1	20.4
27.0	20.3	18.5	18.1	18.7	20.0	21.4	22.5	23.2	23.6
28.0	23.5	21.4	20.8	21.4	22.8	24.4	25.7	26.7	27.3
29.0	27.0	24.6	23.8	24.4	25.8	27.7	29.3	30.5	31.3
30	31.0	28.1	27.1	27.6	29.2	31.3	33.2	34.7	35.7
31.0	35.4	32.1	30.9	31.3	32.9	35.2	37.5	39.3	40.5
32.0	40.3	36.5	35.0	35.3	37.0	39.5	42.1	44.3	45.9
33.0	45.7	41.4	39.6	39.8	41.5	44.2	47.2	49.8	51.7
33.5	51.7	46.7	44.6	44.7	46.4	49.3	52.7	55.7	58.0
34.5	58.2	52.6	50.2	50.1	51.8	54.9	58.6	62.1	64.8
35.5	65.5	59.1	56.3	56.1	57.7	60.9	65.0	69.0	72.3
36.5	73.4	66.2	62.9	62.5	64.2	67.5	71.9	76.4	80.2
37.0	82.0	73.9	70.2	69.6	71.2	74.7	79.4	84.4	88.8
38.0	91.4	82.4	78.1	77.3	78.9	82.4	87.4	93.0	98.1
39.0	102.0	92.0	87.0	86.0	87.0	91.0	96.0	102.0	108.0
40.0	113.0	102.0	96.0	95.0	96.0	100.0	105.0	112.0	119.0
41.0	125.0	112.0	106.0	105.0	106.0	110.0	115.0	123.0	130.0

Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos									
a) Ejes simple Pt=2.5									
Carga por eje en kN.	Espesor de la losa, mm.								
	150	175	200	225	250	275	300	325	350
9.1	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
18.2	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
27.3	0.012	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
36.4	0.039	0.035	0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
45.5	0.097	0.089	0.084	0.082	0.081	0.080	0.080	0.080	0.080
54.5	0.203	0.189	0.181	0.176	0.175	0.174	0.174	0.173	0.173
63.6	0.376	0.360	0.347	0.341	0.338	0.337	0.336	0.336	0.336
72.7	0.634	0.623	0.610	0.604	0.601	0.599	0.599	0.599	0.598
81.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
90.9	1.51	1.52	1.55	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59	1.59
100.0	2.21	2.20	2.28	2.34	2.38	2.40	2.41	2.41	2.41
109.1	3.16	3.10	3.22	3.36	3.45	3.50	3.53	3.54	3.55
118.2	4.41	4.26	4.42	4.67	4.85	4.95	5.01	5.04	5.05
127.3	6.05	5.76	5.92	6.29	6.61	6.81	6.92	6.98	7.01
136.4	8.16	7.67	7.79	8.28	8.79	9.14	9.35	9.46	9.52
145.5	10.8	10.1	10.1	10.7	11.4	12.0	12.3	12.6	12.7
154.5	14.1	13.0	12.9	13.6	14.6	15.4	16.0	16.4	16.5
163.6	18.2	10.7	16.4	17.1	18.3	19.5	20.4	21.0	21.3
172.7	23.1	21.1	20.6	21.3	22.7	24.3	25.6	26.4	27.0
181.8	29.1	26.5	25.7	26.3	27.9	29.9	31.6	32.9	33.7
190.9	36.2	32.9	31.7	32.2	34.0	36.3	38.7	40.4	41.6
200.0	44.6	40.4	38.8	39.2	41.0	43.8	46.7	49.1	50.8
209.1	54.5	49.3	47.1	47.3	49.2	52.3	55.9	59.0	61.4
218.2	66.1	59.7	56.9	56.8	58.7	62.1	66.3	70.3	73.4
227.3	79.4	71.7	68.2	67.8	69.6	73.3	78.1	83.0	87.1

Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos									
a) Ejes tándem Pt=2.5									
Carga por eje en kN.	Espesor de la losa, mm.								
	150	175	200	225	250	275	300	325	350
9.1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
18.2	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
27.3	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
36.4	0.007	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
45.5	0.015	0.014	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
54.5	0.031	0.028	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
63.6	0.057	0.052	0.049	0.048	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
72.7	0.097	0.089	0.084	0.082	0.081	0.081	0.080	0.080	0.080
81.8	0.155	0.143	0.136	0.133	0.132	0.131	0.131	0.131	0.131
90.9	0.234	0.220	0.211	0.206	0.204	0.203	0.203	0.203	0.203
100.0	0.340	0.325	0.313	0.308	0.305	0.304	0.303	0.303	0.303
109.1	0.475	0.462	0.450	0.444	0.441	0.440	0.439	0.439	0.439
118.2	0.644	0.637	0.627	0.622	0.620	0.619	0.618	0.618	0.618
127.3	0.855	0.854	0.852	0.850	0.850	0.850	0.849	0.849	0.849
136.4	1.11	1.12	1.13	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
145.5	1.43	1.44	1.47	1.49	1.50	1.51	1.51	1.51	1.51
154.5	1.82	1.82	1.87	1.92	1.95	1.96	1.97	1.97	1.97
163.6	2.29	2.27	2.35	2.43	2.48	2.51	2.52	2.52	2.53
172.7	2.85	2.80	2.91	3.03	3.12	3.16	3.18	3.20	3.20
181.8	3.52	3.42	3.55	3.74	3.87	3.94	3.98	4.00	4.01
190.9	4.32	4.16	4.30	4.55	4.74	4.86	4.91	4.95	4.96
200.0	5.26	5.01	5.16	5.48	5.75	5.92	6.01	6.06	6.09
209.1	6.36	6.01	6.14	6.53	6.90	7.14	7.28	7.36	7.40
218.2	7.64	7.16	7.27	7.73	8.21	8.55	8.75	8.86	8.92
227.3	9.11	8.50	8.55	9.07	9.68	10.14	10.42	10.58	10.66
236.4	10.8	10.0	10.0	10.6	11.3	11.9	12.3	12.5	12.7
244.5	12.8	11.8	11.7	12.3	13.2	13.9	14.5	14.8	14.9
254.5	15.0	13.8	13.6	14.2	15.2	16.2	16.8	17.3	17.5
263.6	17.5	16.0	15.7	16.3	17.5	18.6	19.5	20.1	20.4
272.7	20.3	18.5	18.1	18.7	20.0	21.4	22.5	23.2	23.6
281.8	23.5	21.4	20.8	21.4	22.8	24.4	25.7	26.7	27.3
290.9	27.0	24.6	23.8	24.4	25.8	27.7	29.3	30.5	31.3
300.0	31.0	28.1	27.1	27.6	29.2	31.3	33.2	34.7	35.7
309.1	35.4	32.1	30.9	31.3	32.9	35.2	37.5	39.3	40.5
318.2	40.3	36.5	35.0	35.3	37.0	39.5	42.1	44.3	45.9
327.3	45.7	41.4	39.6	39.8	41.5	44.2	47.2	49.8	51.7
336.4	51.7	46.7	44.6	44.7	46.4	49.3	52.7	55.7	58.0
345.5	58.3	52.6	50.2	50.1	51.8	54.9	58.6	62.1	64.8
354.5	65.5	59.1	56.3	56.1	57.7	60.9	65.0	69.0	72.3
363.6	73.4	66.2	62.9	62.5	64.2	67.5	71.9	76.4	80.2
372.7	82.0	73.9	70.2	69.9	71.2	74.7	79.4	84.4	88.8
381.8	91.4	82.4	78.1	77.3	78.9	82.4	87.4	93.0	98.1
390.6	102	92	87	86	87	91	96	102	108
400.0	113	102	69	95	96	100	105	112	119
409.1	125	112	106	105	106	110	115	123	130

APÉNDICE 2. Abreviaturas

AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials.

ACI American concrete institute.

ASTM American Society for Testing and Materials.

PCA Portland Cement Association.

CD Coeficiente de drenaje.

COE Centro Operativo Estafeta.

D Factor de porcentaje por sentido de vehículos.

E Módulo de elasticidad.

Ec Módulo de elasticidad del concreto.

ESAL's Equivalent Single Axis Loads.

f'c Resistencia a la compresión del concreto a los 28 días de colocado.

Ff Factor de forma.

FCA Factor de crecimiento anual.

FCEE Factor de carga por eje equivalente.

FSC Factor de seguridad de carga.

G Factor de crecimiento total.

K Módulo de reacción o módulo efectivo de reacción de la subrasante.

Kc Módulo compuesto de reacción de la subrasante.

J Coeficiente de transferencia de carga.

L Factor de distribución de tránsito por carril.

Ls Factor de pérdida de soporte.

MR ó S'c Módulo de ruptura o resistencia a la flexión.

Mr Módulo de resiliencia o de elasticidad.

pci unidad, libras por pulgada cubica.

psi unidad, libras por pulgada cuadrada.

PSI índice de servicio actual.

Pt Índice de servicio último.

Po Índice de servicio inicial.

r ó g Tasa de crecimiento.

R(%) Confiabilidad.

SCT Secretaria de Comunicación y Transporte.

So Desviación estándar.

N ó n Periodo de diseño o vida útil en años.

TPD Transito promedio diario.

TPDA Tránsito promedio diario anual.

VRS Valor relativo de soporte.

ZR Desviación normal estándar.

ΔPSI Pérdida de servicialidad.

Abreviatura de la clasificación vehicular de proyecto.

A2 Automóvil.

A'2 Camión Ligero.

B2 Autobús de dos ejes.

C2 Camión de dos ejes.

C3 Camión de tres ejes.

T2-S2 Tractor de dos ejes con semirremolque de dos ejes.

T3-S2 Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes.

T3-S2-R2 Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de dos ejes.

T3-S2-R4 Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de cuatro ejes.

APÉNDICE 3. Glosario

Alabeo: Distorsión de una superficie plana de concreto o elemento de concreto en forma de curva debido al flujo plástico o diferencias de temperatura o cantidad de humedad en áreas adyacentes a sus caras expuestas.

ESAL's: Equivalent Single Axis Loads. Eje normalizado de carga por eje de peso nominal de 8.2 toneladas con una presión de inflado de 5.8kg/cm².

Endentado: Se forma en el borde de la losa ya sea por una protuberancia con una pavimentadora de cimbra deslizante ó uniéndole a la cimbra una cuña ó diente de metal ó madera de la forma, dimensiones y profundidad adecuada. Las formas más comunes del endentado son en forma de un medio círculo y en forma trapezoidal.

BIBLIOGRAFÍA.

1. "Pavimentos de concreto: diseño y construcción, juntas, sobrecarpetas apertura rápida al tráfico". Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. México 1995.
2. Montejo Fonseca Alfonso. "Ingeniería de pavimentos". Bogotá, D.C.: Universidad Católica de Colombia, 2006, 3a ed. Volumen 1.
3. Nicholas J. Garber, Lester A. Hoel; "Ingeniería de tránsito y de carreteras", tercera edición, editorial Thompson.
4. Olivera Bustamante, Fernando. "Estructuras de vías terrestres". Segunda edición, México, editorial C.E.S.A.
5. Salazar Rodríguez, Aurelio. "Guía para el diseño y construcción de pavimentos rígidos". Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C México.
6. Rico Alfonso, Del Castillo H. "La ingeniería de suelos en las vías terrestres". Volumen 2, México, editorial Limusa.
7. Yoder E. J.; Withczak M. W. "Principles of pavement design". Second edition, John Wiley and Sons Inc. U.S.A.
8. Garnica Anguas, Paul; Gómez López, José Antonio; Sesma Martínez, Jesús Armando. "Mecánica de materiales para pavimentos". Publicación Técnica No. 197. Sanfandila, Qro, 2002.
9. PEMEX. "Pavimentos de concreto". Número de documento GNT-SSNP-C005-2004.
10. H. Calo Diego. "Jornada de actualización técnica diseño y construcción de pavimentos de hormigón". Instituto del Cemento Portland Argentino. Ciudad de Córdoba, 20 de noviembre del 2008.
11. Cárdelas Alcántara, José Jesús. Tesis profesional titulada: "Procedimiento constructivo de un pavimento rígido". Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Acatlán. Estado de México, agosto 2001.

12. CEMEX, "Pavimentos". www.cemex.com.mx.
13. Secretaría de Desarrollo Social, Subsecretaria de Desarrollo Urbano y Vivienda, Dirección General de Infraestructura y Equipamiento "Manual de administración de pavimentos en vialidades urbanas". Segunda edición 2001, México. Editado por Santaló Estudios y Proyectos, S. A. de C.V. (SEPSA).
14. Diario oficial de la federación, 26 de enero de 1994. "Cargas máximas permitidas".
15. Instituto de ingeniería de la UNAM, Comisión Federal de Electricidad. "Manual de tecnología del concreto". Volumen 1. Editorial Limusa.
16. F. R. McMillan y Lewis H. Tuthill. "Cartilla del concreto". Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A. C.
17. "Recomendaciones para la construcción de pavimentos y bases de concreto". Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A. C.
18. By. M. G. Lay. "Handbook of road technology". Volumen 1. Gordon and Breach Science Publishers.
19. SCT, "norma métodos de muestreo y pruebas de materiales: M-MMP-1-01-03, M-MMP-1-02-03, M-MMP-1-04-03, M-MMP-1-05-03, M-MMP-1-06-03, M-MMP-1-07-03, M-MMP-1-08-03, M-MMP-1-09-03, M-MMP-1-11-08 y M-MMP-1-12-08."
20. SCT, "norma características de los materiales: N-CMT-2-02-003/02, N-CMT-2-02-004/04, N-CMT-2-02-005/04, N-CMT-2-03-001/04, N-CMT-2-02-002/02, N-CMT-2-02-001/02, N-CMT-1-01/02, N-CMT-1-03/02, N-CMT-4-02-001/04 y N-CMT-4-02-002/04".
21. SCT, "norma construcción: N-CTR-CAR-1-03-008/00 y N-CTR-CAR-1-04-009/00".