



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



...: Ingeniería de Civil

**CA 57  
DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES**

**TEMARIO**

**COORDINADOR: ING. MIGUEL SÁNCHEZ MEJÍA**

**DEL 18 AL 22 DE ABRIL DE 2005**

**PALACIO DE MINERÍA**



**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**





Asociación Mexicana  
del Asfalto, A.C.

# **DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES**

Primera Parte

**ING. MANUEL ZARATE AQUINO**

## Presentación

En sus manos está otro de los trabajos que promueve la Asociación Mexicana del Asfalto, una obra que será, con seguridad, de gran atractivo y utilidad para todos aquellos profesionales interesados en construir un pavimento flexible de cualquier magnitud.

El libro, *Diseño de pavimentos flexibles* representa el esfuerzo por exponer lo último en innovaciones y conocimientos acerca del tema, lo cual incide en la vigencia que pueda tener la información incluida y, a la vez, fomenta una reedición próxima, considerando la opinión de aquellos familiarizados con este volumen. Del mismo modo, pretendemos difundir las grandes ventajas que los pavimentos flexibles conllevan y facilitar el aprendizaje de su uso.

El presente es el primero de dos tomos en los que se abordarán los temas: Aspectos conceptuales y Proyecto de los pavimentos flexibles. El contenido del segundo tomo, próximo a editarse, será Materiales, Evaluación y Rehabilitación.

El autor, ingeniero Manuel Zárate Aquino, a quien agradecemos su valiosa colaboración, enfatiza la importancia de la calidad y el profesionalismo, y promueve una conciencia de madurez técnica, que tanto necesita la ingeniería mexicana.

Este documento es una inmejorable oportunidad para los interesados en el ramo de incrementar nuestros conocimientos y participar en el óptimo desarrollo tecnológico de nuestro país, que no podemos desaprovechar.

Si logramos comprender lo que el ingeniero Zárate Aquino promueve a través de este trabajo, producto de muchos años de experiencia en campo y en las aulas, tomaremos un lugar de privilegio en el constante avance en aras del progreso de nuestra ingeniería y, a la vez, seremos parte de esa importante tarea de difusión de la calidad que AMMAC ha tomado como estandarte.

Sinceramente deseamos que este documento sea de gran utilidad para todos los ingenieros que participan en la labor de construir nuestra red carretera, y también que pronto puedan emplear estos conocimientos con la mayor destreza, para alcanzar así un nivel más elevado en la calidad de nuestra infraestructura y procurar un desarrollo óptimo para México.

Rodolfo Zueck Rodríguez  
PRESIDENTE  
TERCER CONSEJO DIRECTIVO

# Contenido

<b>Capítulo I</b>	<b>Generalidades y aspectos conceptuales</b>	<b>9</b>
1.1	Introducción	9
1.2	Necesidades de la infraestructura del transporte para las próximas dos décadas	13
1.3	Aspectos conceptuales	18
1.3.1	Descripción y funciones de los pavimentos	21
1.3.2	Características funcionales y estructurales de los pavimentos	22
1.3.3	Factores a considerar en el proyecto	23
1.4	Principales materiales básicos empleados en los pavimentos	27
1.5	Tipos de pavimentos	28
1.6	Elementos que constituyen los pavimentos flexibles y sus funciones	29
1.7	Estado actual y futuro de la tecnología de los pavimentos	31
<b>Capítulo II</b>	<b>Proyecto de los pavimentos flexibles</b>	<b>35</b>
2.1	Introducción	35
2.2	Aspectos teóricos y fundamentos de diseño	36
2.2.1	Generalidades	36
2.2.2	Métodos de diseño	40
2.2.2.1	Metodología general del diseño mecanístico - empírico	40
2.2.3	Método AASHTO para pavimentos flexibles	52
2.2.4	Método del Instituto del Asfalto	86
2.2.5	Método de diseño español. Catálogo de secciones de pavimento	105

2.2.6	Método del Instituto de Ingeniería de la UNAM	114
2.2.6.1	Diseño por deformación permanente en la rodada	121
2.2.6.2	Revisión del diseño por efectos de fatiga	122
2.2.7	Consideraciones adicionales	127
2.2.7.1	Acotamientos	127
2.2.7.2	Materiales	128
2.2.7.3	Drenaje y subdrenaje	129
2.2.7.4	Texturizado	130
2.2.7.5	Rugosidad	130
2.2.7.6	Resistencia al derrapamiento	133
2.2.7.7	Alcances del proyecto	133
2.2.7.8	Objetivos y limitaciones	135



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



...: Ingeniería de Civil

**CA 57  
DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES**

**CAPÍTULO I  
GENERALIDADES Y ASPECTOS  
CONCEPTUALES**

**COORDINADOR: ING. MIGUEL SÁNCHEZ MEJÍA**

**DEL 18 AL 22 DE ABRIL DE 2005**

**PALACIO DE MINERÍA**



**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES Y ASPECTOS CONCEPTUALES

### 1.1 Introducción

Es generalmente reconocido que no podrá darse un desarrollo económico sostenido ni equilibrado si no se cuenta con la infraestructura adecuada, incluyendo en ésta las redes carreteras, ferroviarias, urbanas, de puertos y aeropuertos.<sup>1</sup>

La inversión en infraestructura es importante para incrementar la productividad y competitividad económica y no debe posponerse, pues no se puede alcanzar un desarrollo de primer mundo con una infraestructura del tercero, por lo que es necesario igualar o superar los estándares de los países competidores.

Debe tomarse en cuenta, además, que la infraestructura toma tiempo en planearse y desarrollarse, por lo que, generalmente, siempre se encuentra en desventaja en relación con las necesidades. Una buena inversión en infraestructura, bien planeada y dimensionada, se traduce en desarrollo económico. Al respecto, los países de la Cuenca del Pacífico reconocen que el 25% de la inversión en infraestructura se recupera aproximadamente en el primer año de operaciones.

---

<sup>1</sup> Vid. en "Situación actual y futura de la infraestructura del transporte en México", *Memorias de la XIII Reunión Nacional de Vías Terrestres*, Oaxtepec, Morelos. 1998;

–, Óscar Ferrel, "Los desafíos de la infraestructura vial en el umbral del siglo XXI", tercera conferencia "Rodolfo Félix Valdez". México, AMVTAC, 1998;

–, Daniel Díaz Díaz, "Situación actual y futura de la infraestructura del transporte en México", cuarta conferencia "Rodolfo Félix Valdez". México, AMVTAC, 1999, y

–, Manuel Zárate Aquino, "Reflexiones sobre la aplicación de la geotecnia a las vías terrestres de México en las próximas dos décadas", Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Oaxaca, México, SMMS, 2000.

En el seno de la Comunidad Europea se ha detectado un incremento en el movimiento de carga y pasajeros que, según las expectativas, puede duplicarse en menos de 20 años, lo cual requiere la existencia de una adecuada red de infraestructura de transporte, que en este momento no está completamente adaptada ni para recibir el fuerte crecimiento del tránsito ni para enfrentar los cambios que el transporte moderno está requiriendo, al punto que ha llegado a establecerse que el éxito del mercado de la Comunidad Europea está condicionado a la existencia de dicha red.<sup>2</sup>

Cuando la infraestructura vial es eficiente y adecuada, se realiza con facilidad el transporte de personas, bienes y servicios, lo que promueve el desarrollo económico. Por otro lado, aún cuando el aparato productivo lograra avances notables en cuanto a tecnología, productividad y competitividad, los beneficios económicos no podrían concretarse sin el respaldo de comunicaciones eficientes. En caso contrario se generarían cuellos de botella que pondrían en serio riesgo el futuro del país.

En el actual contexto mundial, México no puede rezagarse, deberá hacer el mayor esfuerzo del que sea capaz para ocupar el lugar que le corresponde dentro de este nuevo orden económico. Uno de los aspectos prioritarios será el desarrollo de su infraestructura vial, aplicando una equilibrada combinación de recursos humanos, materiales y tecnológicos.

Como podrá observarse, para alcanzar niveles más altos de desarrollo, el país requerirá modernizar y ampliar su infraestructura con objeto de que puedan satisfacerse los requerimientos de alimentos, vivienda, agua, transportes, etcétera; necesitará inicialmente reconocer lo que existe de esas infraestructuras y valorar lo que se requiera para un futuro a mediano plazo.

En concreto, en el caso de las vías terrestres, que constituyen una de las infraestructuras más importantes de un país, dada su función generadora del crecimiento económico, su participación en la cadena productiva y por ser factor básico en el crecimiento de otras ramas productivas, es importante evaluar lo existente, analizar las experiencias adquiridas en los últimos tiempos

---

<sup>2</sup> Rafael Izquierdo, "El desarrollo del transporte por carretera en Europa después de 1993". XII Congreso Mundial IRF. Madrid, España, 1993.

y plantear las necesidades para el corto y mediano plazos, considerando los requerimientos de los nuevos escenarios.

La infraestructura física del transporte de nuestro país en términos generales, es la siguiente: la red carretera nacional comprende unos 335000 kilómetros de los cuales 110000, aproximadamente, se encuentran pavimentados, incluyéndose en ellos alrededor de 8000 kilómetros de autopistas y carreteras de altas especificaciones. En esta red circula una flota de cerca de 15 millones de vehículos automotores.

Debe mencionarse que los pavimentos existentes son principalmente de tipo flexible, aunque existen alrededor de unos mil kilómetros de carreteras con pavimento rígido. Por otra parte, aproximadamente 53% de la red tiene más de 30 años y solamente 16% tiene menos de 15 años; 21% soporta tránsitos diarios de más de 5000 vehículos, y solamente 61% de la red se encuentra en estado de regular a bueno. Por esta red se mueve poco más del 80% de la carga y cerca del 99% de pasajeros en el ámbito nacional.

Por lo que se refiere al transporte ferroviario, existe una red de poco más de 26000 kilómetros, de los cuales 77% corresponde a vías troncales y de las que sólo 40% es moderna, destacando en ese sentido los ejes Nuevo Laredo-México y Guadalajara-México. La productividad de este modo de transporte ha disminuido con el tiempo, pues se encarga del movimiento del 12% de la carga del territorio nacional. Ante el evidente deterioro, el gobierno federal decidió la privatización de los servicios, con el objeto de permitir la inversión extranjera, aporte de tecnología y la integración de ejes ferroviarios hacia Estados Unidos.

La infraestructura aeroportuaria nacional es la más extensa de América Latina y consta de 80 aeropuertos, de los cuales 20 son administrados por gobiernos estatales o municipales. Los 60 restantes corresponden a la red principal, por la cual se atiende a cerca de 60 millones de pasajeros; de éstos, 40% es atendido por el aeropuerto de la ciudad de México, concentrándose el 60% en siete aeropuertos, incluido el antes citado. La mayor parte de la infraestructura carretera fue construida o modernizada en la década de los sesenta. Actualmente se han efectuado inversiones principalmente en los rubros de conservación, ampliación y modernización.

También en la actualidad, se estableció un programa de concesión que cubre 35 aeropuertos; incluyendo el de la ciudad de México en su posible nueva ubicación, con el fin de elevar los niveles de eficiencia, seguridad y modernización de estos lugares.

En relación con el transporte marítimo, cabe anotar que se cuenta con 85 puertos, aunque la mayor actividad se concentra principalmente en 33. De estos últimos, diez son puertos de altura a través de los cuales se realiza en su mayor parte el movimiento de carga al extranjero, principalmente de petróleo y sus derivados; si bien, se registra una subutilización de la infraestructura.

Por lo que respecta a la infraestructura vial urbana, es importante señalar que en términos generales es deficiente. Cerca del 80% de la población del país se concentra en zonas urbanas que se han desarrollado en forma desordenada. Abundan los asentamientos irregulares, carentes de servicios y muchas veces ubicados en zonas de alto riesgo. Existe, asimismo, una carencia de redes viales de alta velocidad, libramientos, sistemas de metro, etcétera, así como de reglamentos de construcción.

La situación anterior, brevemente expuesta, es valorada mediante ciertos indicadores por organismos internacionales, como el World Economic Forum, que en un universo de 46 países, sitúa a México en las siguientes posiciones en relación con la infraestructura (datos de 1994):

<b>Infraestructura</b>	<b>lugar</b>
Carreteras	29
Transporte aéreo	29
Ferrocarriles	34
Desarrollo de puertos	38
Urbanización	34
Mantenimiento de infraestructura	36
Ciencia y educación	42
Desarrollo y aplicación de tecnología	39

Los parámetros anteriores inciden en la productividad del país, afectan su competitividad y señalan el rezago que existe en esos renglones.

## **1.2 Necesidades de la infraestructura del transporte para las próximas dos décadas**

En las últimas décadas del siglo anterior, era común señalar las metas que en varios rubros de la infraestructura necesitaban ser alcanzadas para llegar a determinados niveles de desarrollo económico, teniendo como referencia el año 2000. Hoy en día, se están fijando nuevas referencias y nuevas metas en las cuales se tomarán en cuenta tanto los rezagos como los nuevos requerimientos para un lapso de 20 años.

Es importante señalar que de no atenderse los procesos de cambio requeridos, se corre el riesgo de que el país sea rebasado por la dinámica del cambio mundial, con las graves consecuencias que esto supondría.

Por lo anterior, es importante mencionar algunos de los requerimientos más importantes del país para las próximas dos décadas en el rubro de las vías terrestres, y la aplicación de la geotecnia en este importante campo.

- a) Carreteras. La red pavimentada deberá alcanzar los 150 000 kilómetros, y se requerirán unos 12 000 kilómetros adicionales de autopistas y carreteras de altas especificaciones. Deberá incrementarse la inversión destinada a la conservación y modernización de la red. Se deben diseñar las carreteras con las especificaciones requeridas para garantizar su durabilidad, seguridad y economía, utilizando materiales y productos con especificaciones que tomen en cuenta su comportamiento a largo plazo. Además, deberá hacerse una aplicación más intensa de túneles y viaductos. Las carreteras existentes deberán reforzarse y ampliarse para dar cabida a volúmenes mayores de tránsito, principalmente el pesado. Será importante efectuar un análisis de los problemas ocurridos en las obras realizadas en las dos últimas décadas, así como de su comportamiento, para adecuar los procedimientos de diseño, construcción y control de calidad. Habrá que incorporar a las regiones más atrasadas del país, para su inserción en la dinámica económica.
- b) Ferrocarriles. Posiblemente se requiera construir 1 800 kilómetros de vías principales, 2 800 de vías secundarias y 2 000 de vías dobles, así como

modernizar y adecuar 1 600 kilómetros en tramos críticos. Se requerirá, además, reforzar unos 5 000 puentes y optimizar el funcionamiento de terminales. Esta red es muy importante, ya que al funcionar de manera adecuada podrá abatirse la presión sobre la red carretera. En su modernización deberán considerarse las altas velocidades necesarias y la seguridad de su operación, y diseñar terracerías y sistemas de vía adecuados, con el objeto de satisfacer los requerimientos geométricos para las vías de alta velocidad. Quizá, una de las líneas que deban planearse sea la del Istmo de Tehuantepec, entre Coatzacoalcos y Salina Cruz, por ser un elemento necesario de conexión entre los océanos. Deberá considerarse que tendrán que moverse unos 200 millones de toneladas de carga por este sistema, además del transporte de pasajeros.

- c) Aeropuertos. Para la segunda década de este siglo la red aeroportuaria con seguridad deberá atender una demanda de cerca de cien millones de pasajeros, para lo cual será necesario modernizar alrededor de 12 aeropuertos y ampliar unas seis terminales aéreas, además de desarrollar el sistema aeroportuario de la ciudad de México. Varios aeropuertos tendrán que adaptarse para que puedan recibir aeronaves de gran capacidad, que podrán transportar unos mil pasajeros, y cuyo peso será del orden de unas 900 toneladas. Se requerirá, por lo tanto, reforzar los pavimentos existentes y adecuarlos geométricamente para la operación de tales aeronaves. Es posible que sea necesario construir de seis a ocho aeropuertos para atender las necesidades de nuevos asentamientos habitacionales, desarrollos turísticos y zonas fabriles, además de varios aeropuertos de tipo municipal para integrar de manera adecuada la red.
- d) Puertos. Un aspecto importante de los puertos, independientemente de las instalaciones propias de este sistema, es el que se refiere a las instalaciones necesarias para el proceso intermodal. Se requerirán grandes áreas para carga y descarga, almacenamiento y maniobras, así como los elementos de conexión con los sistemas de transporte carretero y ferroviario, para el manejo y movilización de los grandes volúmenes de carga con productos de exportación e importación utilizando, por ejemplo, contenedores, procedimiento por el que actualmente ya se manejan unos 130 millones de toneladas.

- e) Vialidades urbanas. Como ya se mencionó, la población del país en unas dos décadas alcanzará los 120 millones de personas, y cerca del 80% vivirá en zonas urbanas, lo cual exigirá la creación de nuevos espacios para su futuro crecimiento, además de terrenos necesarios para nuevas zonas industriales y áreas de desarrollo turístico. Solamente para alojar el incremento demográfico se requerirá incorporar cerca de 5 600 hectáreas al año, dentro de las cuales deberán considerarse 20 millones de metros cuadrados de vialidades, desde calles residenciales hasta avenidas y autopistas urbanas de alta velocidad. Es importante que estas áreas de crecimiento se desarrollen en áreas adecuadas, no en zonas de alto riesgo y dentro de planes coherentes de crecimiento urbano. En este renglón la geotecnia deberá tener una gran participación, y colaborar en la oferta ordenada del suelo, zonificando el terreno según su utilización, identificando las zonas de alto riesgo y participando en la elaboración, revisión, actualización y adecuación de los reglamentos de construcción. Se ha visto que el crecimiento desordenado de las zonas urbanas, que ofrece suelo muy barato en zonas no aptas y de riesgo para la población, cuesta al país aproximadamente 30 mil millones de pesos al año, al considerar, entre otros factores, las grandes acciones correctivas y de remediación que deben ejecutarse. Adicionalmente, deben considerarse otros sistemas de transporte como el metro en sus tres modalidades: superficie, elevado y subterráneo, así como tren ligero y ferrocarriles suburbanos, en grandes asentamientos como lo previsto para la ciudad de México, que para esa época estará prácticamente conurbada con Puebla, Pachuca, Toluca y Cuernavaca, o la zona formada por San Juan del Río, Querétaro, Celaya, Salamanca, Irapuato, Silao y León, las zonas fronterizas, etcétera, en donde se requerirán sistemas de transporte masivo, seguros y eficientes. Por lo que deberán atenderse los requerimientos de la infraestructura que requerirá el país para su desarrollo y, entre otras cosas, considerar los elementos de la tecnología moderna del transporte, como autobuses eléctricos, metro, trenes de alta velocidad, aviones supersónicos de alta capacidad, autopistas inteligentes, etcétera, que cubran los requerimientos de durabilidad, seguridad, mínimo o nulo mantenimiento y máxima economía.

Los diseños de los pavimentos tendrán que efectuarse con base en las propiedades fundamentales de los materiales, y tomando en cuenta el comportamiento a largo plazo, envejecimiento y fatiga, a partir de modelos matemáticos y herramientas de cálculo más avanzados, que consideren, por ejemplo, el comportamiento reológico de los materiales. Surgirán nuevos materiales y productos, como geosintéticos, agentes estabilizadores y modificadores, y se utilizarán con mayor profusión los materiales reciclados que sean más amigables con el ambiente, más resistentes y durables. Se analizará su costo no desde el punto de vista monetario, sino a partir de la energía empleada en su obtención.

Los ingenieros deberán utilizar métodos mecanístico-empíricos para los diseños, aunque con mayor participación de los conceptos probabilísticos, y aplicar, además, los conceptos de calidad total y aseguramiento de la calidad, para cumplir con las normas internacionales de calidad, y satisfacer así los conceptos de normalización, acreditación y certificación, además de aquellos de mayor sensibilidad al impacto ambiental.

Deberán considerar utilizar equipos de construcción más avanzados y multifuncionales de alto rendimiento, inteligentes, automatizados y robotizados, y será indispensable definir los procesos logísticos adecuados para obtener el máximo rendimiento y la más alta calidad de construcción. En este sentido será importante juzgar la construcción en la medida que se ejecute mediante técnicas de evaluación con pruebas no destructivas y equipos de alto rendimiento.

Habrá también que promoverse avances significativos en la evaluación, conservación y rehabilitación de las obras viales, y tener presente interferir lo menos posible con el tránsito, utilizando técnicas, equipos y materiales adecuados.

El fin de esta publicación es proporcionar al profesional guías para el diseño de pavimentos flexibles para carreteras y la evaluación de su comportamiento, con el objetivo de lograr su mejor desempeño. Se establecen, en consecuencia, los elementos considerados fundamentales para la elaboración integral de un proyecto de pavimento, entendiendo como tal no solamente el dimensionamiento de la estructura del pavimento, sino también todos los demás conceptos que deben establecerse como parte del proyecto, como es-

pecificaciones de materiales, lineamientos constructivos, etcétera, y muy especialmente los aspectos de condiciones de textura superficial, que son fundamentales desde el punto de vista de la seguridad y comodidad del usuario, y cuyas repercusiones son importantes en los costos de operación. Es básico tener en mente que no se puede aspirar a la realización exitosa de un pavimento si no se parte de un proyecto acertado, eficiente e integral, en el cual se incluyan los requerimientos de materiales, recursos técnicos y humanos necesarios para lograr la calidad requerida.

Además, es necesario tomar en cuenta que la calidad es un concepto que entraña una serie de atributos que deben satisfacerse para lograr un determinado estándar de perfección prefijado de antemano en el proyecto. Dicho estándar o patrón de calidad lo establece cada organismo mediante un conjunto de lineamientos y especificaciones que forman parte del proyecto, aunado a determinados criterios de tolerancias estadísticas que habrán de satisfacerse, tanto en la selección de los materiales como en los diversos procesos constructivos que integran la obra y en el producto final. De esta manera, se puede establecer que, para satisfacer las metas previstas en el proyecto del pavimento, no sólo debe hacerse uso de materiales apropiados en su modalidad de materia prima, sino también, y con el mismo nivel de importancia, seguir los procedimientos adecuados que permitan construir los diferentes elementos estructurales que integrarán la obra planeada, de tal suerte que, en su conjunto, ésta logre cumplir con los atributos de funcionalidad, seguridad y economía que debe satisfacer un pavimento, conforme a los criterios de la ingeniería moderna.

Ahora bien, cabe mencionar que en la actualidad los usuarios exigen cada vez mayor calidad de los pavimentos, lo cual hace obsoletos los estándares tradicionales y los métodos de control aplicados. En otras palabras, el concepto de "calidad" ha evolucionado. Se observan mejoras continuas en los materiales y productos, y se dedica mayor atención al control de los procesos. También se vigila que éstos se desarrollen de forma adecuada, con el objeto de obtener resultados más seguros y económicos, en lugar del clásico control de calidad y el rechazo de los elementos que no cumplen con los requisitos.

Los materiales que intervienen en la construcción de un pavimento proceden en una proporción abrumadora de la propia superficie de la corteza

terrestre, y son extraídos por lo regular en las inmediaciones de la obra misma, identificados como suelos y rocas, y sometidos generalmente a procesos mecánicos de fragmentación, trituración y cribado. Otros materiales, resultado de una mayor industrialización, tales como cementantes, acero, aglutinantes y otros productos sintéticos, aunque son de importancia fundamental, sólo intervienen en proporciones reducidas. Si bien, por su costo, adquieren relevancia, en uno y otro caso es importante establecer los lineamientos que controlen su calidad.

Los requerimientos y condicionantes establecidos en un proyecto determinado son integrados en un documento al que se le conoce como “las especificaciones”. Este documento actúa como marco técnico y legal y rige la obligatoriedad del cumplimiento de lo en él establecido. De aquí se desprende la importancia de que el proyecto incluya especificaciones actualizadas, debidamente respaldadas por conceptos tecnológicos y experimentales, de eficiencia comprobada y, al mismo tiempo, ajustadas a las necesidades y peculiaridades de cada obra, y que se indiquen también los métodos de ensaye y de control debidamente estandarizados, en los que se establezcan, para cada condición, el tipo, frecuencia y número de ensayos y mediciones, manejo estadístico de los datos y criterios claros de aceptación, corrección o rechazo, que permitan realizar su interpretación en forma ágil y convertirla, en el menor tiempo posible, en un elemento de decisión en beneficio de la obra.

### **1.3 Aspectos conceptuales**

Con base en la concepción actual de los pavimentos, puede definirse la forma como un sistema funciona obedeciendo determinadas leyes físicas, reaccionando en forma de respuestas cuando es activado por funciones de excitación. Las leyes físicas consideradas indicarán la manera como se relacionan los esfuerzos, deformaciones unitarias, tiempo y temperatura.

El pavimento, como sistema, está caracterizado por las propiedades, espesores y disposición de los materiales que forman un conjunto de capas superpuestas,

así como por la calidad de la construcción, en la que tienen gran importancia las especificaciones, la supervisión de la obra y el control de calidad ejercido.

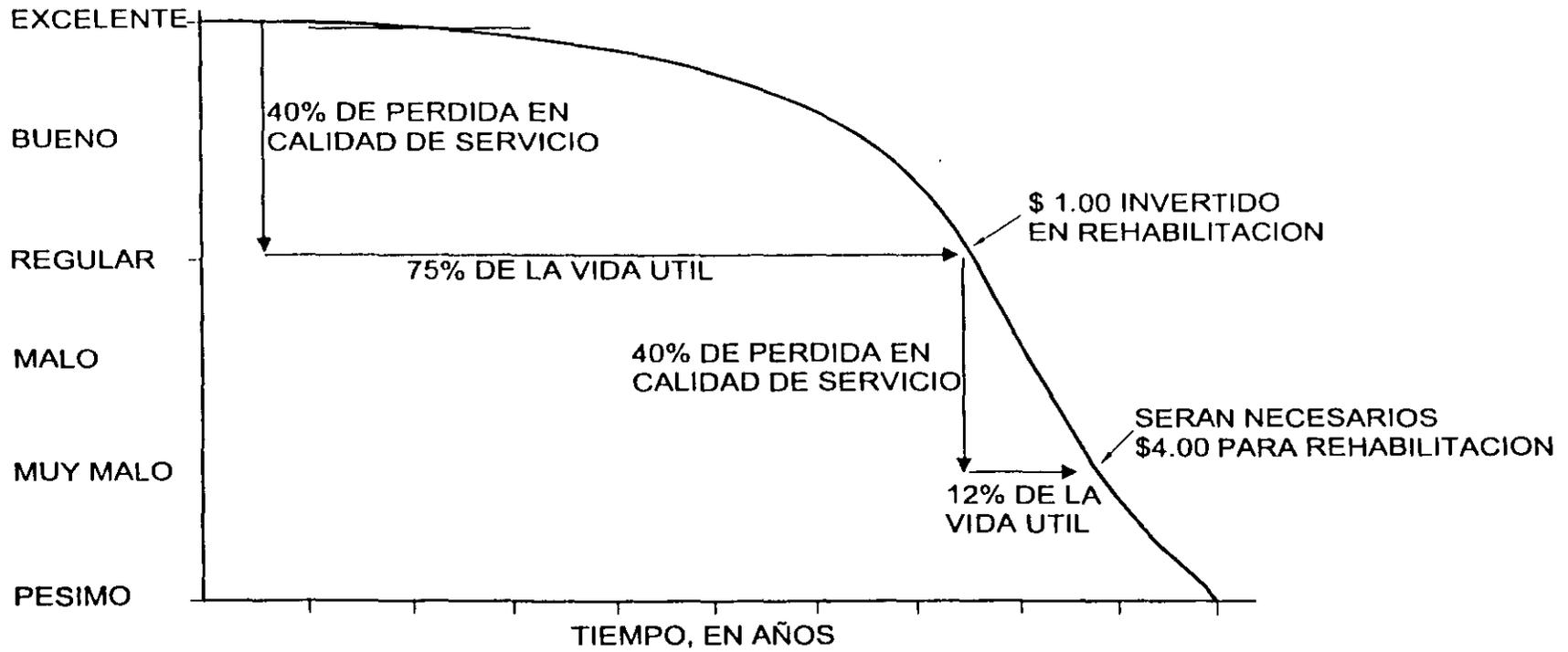
Las funciones de excitación, como son las cargas aplicadas por los vehículos, al actuar sobre el sistema, generan respuestas mecánicas inmediatas, derivadas de las leyes físicas involucradas, que se identifican como estados de esfuerzos, de deformaciones unitarias y de deflexiones, ( $\sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $\delta$ ), a los cuales están asociados determinados efectos, conocidos como deterioros, que son funciones del tiempo y del espacio y que se caracterizan por ser acumulativos, progresivos, permanentes e interactuantes; estos efectos se identifican como agrietamientos, deformaciones, desintegración y reducción de la resistencia al derrapamiento.

La presencia repetida de los estados de respuesta tiene un efecto progresivo en los deterioros, y produce la degradación gradual del pavimento, hasta alcanzar ciertos valores críticos, límites o terminales, que constituyen un estado de falla del pavimento. En ese momento se considera que éste ya no es capaz de cumplir con su función y que ha llegado al final de su vida útil. En la figura 1.1 se presenta una gráfica de la evolución de la calidad de servicio de un pavimento en el transcurso del tiempo, y se muestra la magnitud de la pérdida de calidad y el costo necesario para su rehabilitación en diferentes etapas de su vida.

En relación con la función que deben desempeñar los pavimentos, debe mencionarse que ésta consiste fundamentalmente en hacer posible el tránsito de los vehículos con seguridad, comodidad, eficiencia y economía, en el plazo establecido en el proyecto, para lo cual, los pavimentos deben satisfacer los siguientes atributos:

- Regularidad superficial longitudinal y transversal.
- Resistencia adecuada al derrapamiento en todo tiempo.
- Rápida eliminación del agua superficial.
- Capacidad para soportar las cargas.
- Bajo nivel de ruido.
- Bajo nivel de desgaste de las llantas.
- Adecuadas propiedades de reflexión luminosa.
- Apariencia agradable.

Figura 1.1 Ciclo de vida de un pavimento



Es importante tomar en cuenta que los atributos aquí citados deben ser considerados en el proyecto, y deben verse reflejados debiendo establecerse en los planos las especificaciones y lineamientos constructivos, las recomendaciones y acciones que se ejercerán para satisfacer dichos atributos. Por otra parte, durante la construcción de los pavimentos, la supervisión y el grupo de control de calidad estarán pendientes de vigilar el cumplimiento de las acciones y recomendaciones prescritas antes citadas.

De esta manera, el proyecto, las especificaciones, la supervisión y el control de calidad, actuarán, de manera conjunta, y en la misma dirección, para alcanzar un objetivo común, que es el cumplimiento cabal de los atributos de calidad.

### **1.3.1 Descripción y funciones de los pavimentos**

Como se mencionó en páginas anteriores, los pavimentos están constituidos por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales y de varios centímetros de espesor, de diferentes materiales, adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan en la capa subrasante, constituida por el terreno natural o por material seleccionado, y han de soportar las cargas del tránsito durante un periodo de varios años, sin deterioros que afecten la seguridad o la comodidad de los usuarios, o a la propia integridad del pavimento. Por consiguiente, el pavimento tiene las siguientes funciones:

- a) Proporcionar una superficie de rodamiento segura, cómoda y de características permanentes bajo las cargas repetidas del tránsito a lo largo de un periodo de tiempo, denominado vida de diseño o ciclo de vida, durante el cual sólo deben ser necesarias algunas actuaciones esporádicas de conservación, locales o de poca magnitud en importancia y costo.
- b) Resistir las sollicitaciones del tránsito previsto durante la vida de diseño y distribuir las presiones verticales ejercidas por las cargas, de forma que a la capa subrasante sólo llegue una pequeña fracción de aquéllas, compatible con su capacidad de soporte. Las deformaciones recuperables que se produzcan tanto en la capa subrasante como en las diferentes capas

del pavimento deberán ser admisibles, teniendo en cuenta la repetición de cargas y la resistencia a la fatiga de los materiales.

- c) Constituir una estructura resistente a los factores climatológicos, en especial de la temperatura y del agua, por sus efectos adversos en el comportamiento de los materiales del pavimento y de los suelos de cimentación.

### **1.3.2 Características funcionales y estructurales de los pavimentos**

Los pavimentos deben poseer determinadas características funcionales, que corresponden prácticamente a las condiciones superficiales del pavimento y que afectan especialmente a los usuarios. Además, han de tener ciertas características estructurales que interesan más específicamente a los técnicos encargados de la conservación y operación de los pavimentos.

Entre las características superficiales o funcionales pueden citarse las siguientes:

- La resistencia al derrapamiento obtenida a través de una adecuada textura superficial, adaptada a las velocidades previstas de circulación y cuya influencia en la seguridad vial es decisiva. Esta característica permite al vehículo acelerar, girar y detenerse.
- La regularidad superficial del pavimento, tanto transversal como longitudinal, que afecta a la comodidad de los usuarios en mayor o menor medida en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación. Esta característica está también ligada igualmente a la facilidad para eliminar el agua superficial, que afecta a la seguridad del usuario, y evita el efecto de acuaplaneo.
- El ruido generado al circular tanto en el interior de los vehículos (usuarios) como en el exterior (entorno).
- Las propiedades de reflexión luminosa, que son importantes para la conducción nocturna y para el diseño adecuado de las instalaciones de iluminación. Es igualmente útil el color correcto para efectos de contraste con el señalamiento del piso.

- El desagüe superficial rápido para limitar el espesor de la película de agua, salpicaduras u otros factores mediante pendientes adecuadas que conduzcan el agua hacia los dispositivos de drenaje.

Por su parte, las características estructurales están relacionadas con las de los materiales empleados en las diferentes capas del pavimento, en particular las mecánicas, y con los espesores de estas capas. Un análisis mecánico da una idea de los efectos de las cargas del tránsito, en cuanto a estados de esfuerzo, deformaciones unitarias y deflexiones. Si se conocen las leyes de fatiga de los materiales, se podrá estimar el número de aplicaciones de cargas que pueden soportar las distintas capas o su durabilidad y, por tanto, la del pavimento en su conjunto.

### **1.3.3 Factores a considerar en el proyecto**

El proyecto del pavimento debe perseguir una optimización desde el punto de vista de la resistencia y funcionalidad de la estructura, con un costo global mínimo, que incluye los costos de construcción, conservación, rehabilitación y operación en un periodo general de 15 a 40 años.

Además de las características funcionales y estructurales, el proyecto de los pavimentos requiere la consideración de aspectos constructivos. El análisis de los costos debe completarse con una previsión del comportamiento del pavimento durante el periodo de diseño, la conservación necesaria y su costo actualizado y, finalmente, una estimación de futuros refuerzos estructurales, renovaciones superficiales o reconstrucciones. A la par de los costos actualizados, deben tomarse en cuenta los costos del usuario, relacionados con su seguridad, comodidad y con las demoras que se originan en vialidades relativamente congestionadas por los trabajos de conservación y repavimentación. Es importante que cada tipo de pavimento se asocie a los requerimientos de conservación necesarios, con el fin de poder evaluar económicamente cada una de las opciones consideradas.

Para el diseño o dimensionamiento de los pavimentos existen varios métodos desarrollados por diferentes organismos, cuya aplicación se basa principalmente en los siguientes factores:

- a) Tránsito: constituye sin duda el principal factor para el diseño.

Interesan las cargas más pesadas por eje (simple, tándem o triple) esperadas en el carril de proyecto (que generalmente es el más solicitado y que determinará la estructura del pavimento de la vialidad) durante el periodo de proyecto adoptado. Sin embargo, en los casos de vialidades con carriles múltiples podrá realizarse un diseño con estructuras y espesores diferenciados, de acuerdo con el tránsito asignado a cada carril. La repetición de cargas y la acumulación de sus efectos sobre el pavimento, como la fatiga o la deformación permanente, son fundamentales para el cálculo. Por otro lado, se tendrán en cuenta las máximas presiones de contacto, las sollicitaciones tangenciales en tramos especiales (curvas, zonas de frenado y aceleración, etcétera), las velocidades de aplicación (en particular, las lentas en rampas y zonas de estacionamiento de vehículos pesados), la canalización del tránsito, etcétera. El tránsito generalmente se establece como número de ejes acumulados de 82 kN (18000 lb), en el periodo de diseño.

- b) Capa subrasante: es la capa de apoyo de la estructura del pavimento.

Como parámetro fundamental se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas de tránsito. Debe considerarse la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a su resistencia como a las eventuales variaciones de volumen, (expansión-contracción). Por lo general el parámetro de resistencia utilizado para caracterizar la resistencia de los materiales es el Valor Relativo Soporte (CBR), aunque actualmente algunos métodos emplean el Módulo de Resiliencia ( $M_R$ ), siendo común, además, manejar correlaciones entre CBR y  $M_R$ .

- c) Clima

Constituye un factor aún no suficientemente considerado en el diseño. Normalmente debe tenerse en mente cuando se seleccionan los materiales y en determinados elementos colaterales, como el drenaje. En el diseño de la propia estructura del pavimento interesa su comportamiento bajo

efectos de temperatura y humedad. Son objeto de consideración las temperaturas extremas diarias y estacionales, así como el régimen e intensidad de las precipitaciones, aspectos que además inciden en los aspectos constructivos.

d) Los materiales disponibles

Son determinantes para la selección de la estructura del pavimento en la forma más adecuada técnica y económicamente. Por una parte, se considerarán los agregados disponibles en los bancos de materiales de la zona. Además de la calidad requerida, en la que se incluye la deseada homogeneidad, deben verificarse las cantidades disponibles, el suministro y su precio, condicionado en gran medida por la distancia de transporte. Por otro lado, se considerarán los materiales básicos de mayor costo, como cementantes, estabilizadores y modificadores, así como la experiencia y habilidad en su manejo y uso. En general, los materiales de las capas del pavimento están estandarizados y definidos en las normas de los organismos, aunque vale aclarar que en años recientes se marca una tendencia a emplear materiales locales, marginales, reciclados, y también nuevos, como los modificadores asfálticos.

e) Drenaje y subdrenaje

El agua es uno de los factores que más contribuye en el deterioro de los pavimentos, por lo que deberá concederse importancia a su rápido desalojo, para evitar su concentración, tanto en la superficie como en alguna de las capas que constituyen el pavimento, incluyendo la subrasante.

Para obtener un mejor comportamiento del pavimento, el proyectista debe reconocer que el agua puede entrar a la estructura del pavimento y a la capa subrasante de varias maneras, como en grietas, baches y juntas, jardineras y camellones, fugas en los sistemas de drenaje y agua potable, ascensión capilar, posición del nivel freático, etcétera.

El agua afecta a los materiales del pavimento en distintas formas, modificando o alterando algunas de sus propiedades:

- Resistencia al esfuerzo cortante.
- Cohesión.
- Expansión–contracción.
- Erosión.
- Grado de compactación.
- Corrosión.
- Envejecimiento de los asfaltos.
- Adherencia entre agregados y asfalto.
- Efecto de congelamiento–deshielo.

Por esta razón, se deben tomar las medidas pertinentes para proponer sistemas de drenaje y subdrenaje que actúen con efectividad, captando, conduciendo y desalojando el agua, sin afectar al pavimento o a la capa subrasante.

En cuanto al drenaje superficial, deben tomarse en cuenta los siguientes aspectos:

- La pendiente transversal del pavimento deberá ser por lo menos del uno por ciento.
- No se deberán admitir depresiones en la superficie que puedan provocar estancamientos de agua.
- La textura superficial debe facilitar la expulsión rápida del agua de manera transversal.
- No deberán existir obstáculos que faciliten el encharcamiento del agua en las bocas de tormenta o rejillas, lavaderos, cunetas y alcantarillas.
- Las juntas de construcción en el pavimento deberán tratarse en forma adecuada. Tampoco deberán permitirse agrietamientos en el pavimento ya que facilitan la filtración de agua a las capas inferiores.

Otro aspecto que deberá recordarse que la textura superficial determina la rapidez con que el agua puede escapar de entre la llanta y el pavimento y también la rapidez con que escurre por la superficie durante la lluvia. El agua en el pavimento puede ocasionar una pérdida de contacto entre la llanta y su superficie, y provocar la pérdida del control de la dirección del

vehículo y su deslizamiento, fenómeno que se conoce como hidropelaje o acuaplanaje. Generalmente ocurre cuando se conduce un vehículo bajo la lluvia a gran velocidad y se forma una lámina de agua sobre la superficie de rodaje que alcanza un nivel crítico en función de la velocidad del vehículo.

Con el fin de minimizar o evitar que ocurra este fenómeno, a los pavimentos debe proporcionarse una textura superficial compatible con el ambiente, velocidad de circulación, intensidad de tránsito, topografía y características geométricas de la vialidad.

f) Otros factores

Existen otros factores que en ocasiones afectan de manera importante el proyecto de un pavimento, como el entorno urbano, las dimensiones de la obra, la experiencia y equipos de las empresas constructoras, así como algunas medidas de política general o local, entre otros.

## 1.4 Principales materiales básicos empleados en los pavimentos

Entre los materiales básicos utilizados en la construcción de las diversas capas del pavimento se pueden mencionar los siguientes:

- Suelos granulares seleccionados.
- Agregados naturales, cribados y/o triturados parcialmente.
- Agregados producto de trituración total y cribados.
- Agregados procedentes de procesos de reciclado.
- Productos asfálticos, como cementos y emulsiones, con o sin agentes modificadores.
- Productos cementantes y estabilizadores, como cemento Portland, cal, etcétera.
- Agua.
- Productos geosintéticos, como geotextiles, geomallas, geodrenes, etcétera.

- Materiales varios, como productos especiales para sellado de juntas y grietas, fibras, etcétera.

Los suelos y agregados, incluyendo los productos cementantes, estabilizadores y modificadores, se utilizan para construir los siguientes elementos:

- Capas de agregados granulares como sub-base, bases, capa subrasante.
- Materiales granulares estabilizados o tratados, como suelos estabilizados con cemento, cal o productos asfálticos, mezclados en el sitio o en planta, gravacemento, gravaemulsión, principalmente.
- Tratamientos superficiales y riegos asfálticos, que comprenden los riegos de impregnación, liga y sellado, las lechadas asfálticas, morteros asfálticos, carpetas delgadas de granulometría abierta, entre otros.
- Mezclas asfálticas, como mezclas en caliente o en frío, mezclas densas o de granulometría abierta, etcétera.
- Concretos pobres para bases, concreto compactado con rodillo, por citar algunos.

## **1.5 Tipos de pavimentos**

La tecnología actual cuenta con una gran variedad de pavimentos que, siguiendo criterios tradicionales, suele clasificarse en dos grandes grupos: flexibles y rígidos.

Los llamados pavimentos flexibles están formados por capas constituidas por materiales con una resistencia a la deformación decreciente con la profundidad, de modo análogo a la disminución de las presiones de las cargas vehiculares transmitidas desde la superficie. Cuentan con una capa de rodamiento constituida por mezcla asfáltica, por lo que también se les denomina pavimentos asfálticos.

El aumento de las intensidades y número de aplicaciones de cargas llevó en su día a pavimentos con mayor capacidad estructural, recurriendo a capas tratadas o estabilizadas con cemento o con un espesor muy importante de

mezclas asfálticas como las denominadas full depth, con espesores del orden de 30 centímetros. Estos pavimentos suelen incluirse también formalmente en el grupo de los flexibles, debido a que tienen superficialmente capas asfálticas, pero su comportamiento estructural es muy diferente, con capas inferiores de igual o mayor rigidez que las superiores, como en el caso de los pavimentos de sección invertida.

Los pavimentos rígidos constan de una losa de concreto hidráulico. Por su mayor rigidez distribuyen las cargas verticales sobre un área grande y con presiones muy reducidas. Salvo en bordes de losas y juntas sin pasajuntas, las deflexiones o deformaciones elásticas son casi inapreciables.

Los pavimentos mixtos o compuestos están constituidos por una capa de concreto hidráulico, cubierta por una carpeta asfáltica. Se emplean en calles y su justificación se basa entre otras razones en la presencia de redes y servicios bajo la vialidad, que han de protegerse de la acción del tránsito o que su posición impide efectuar excavaciones de mayor profundidad para alojar una estructura de pavimento flexible convencional. También pueden tener una mayor capacidad estructural y, por lo tanto, un mejor desempeño, bajo el efecto de tránsito pesado e intenso.

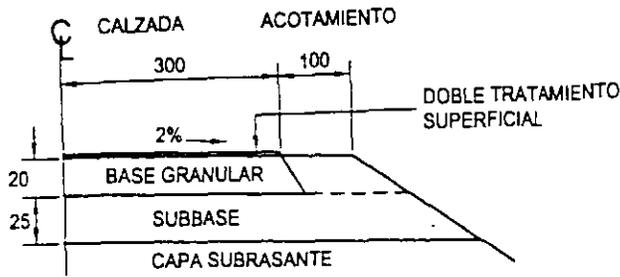
En la figura 1.2 se presentan secciones típicas de pavimentos flexibles para diferentes niveles de intensidad de tránsito.

## **1.6 Elementos que constituyen los pavimentos flexibles y sus funciones**

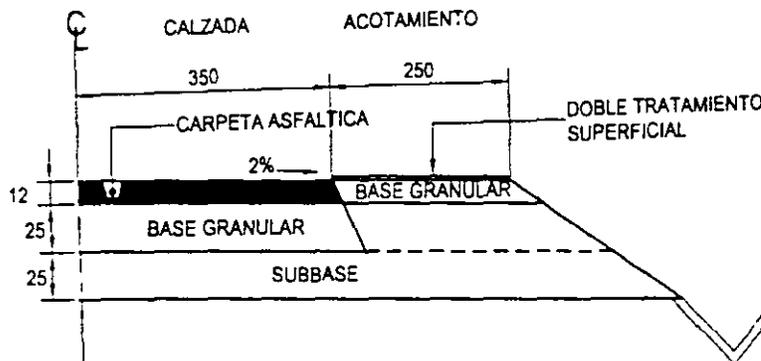
Los pavimentos flexibles están constituidos por varias capas denominadas, de arriba hacia abajo, como carpeta, base y sub-base.

La carpeta es la parte que soporta directamente las sollicitaciones del tránsito y, como ya se ha indicado, aporta las características funcionales. Estructuralmente, absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los verticales. En condiciones de alta intensidad de tránsito puede llegar a alcanzar espesores importantes. Se construye con mezclas asfálticas en frío o en caliente, denominándose, en este último caso, concretos asfálticos, que pueden tener algún

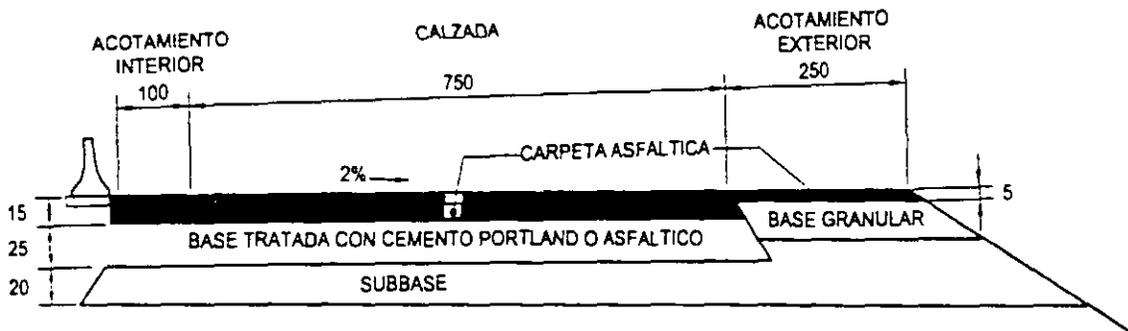
Figura 2.1 Secciones típicas para pavimentos flexibles.



a) PAVIMENTO PARA TRANSITO LIGERO



b) PAVIMENTO PARA TRANSITO MEDIANO



c) PAVIMENTO PARA TRANSITO PESADO

ACOT. EN Cm.

agente modificador para mejorar alguna de sus características. Cuando el espesor total de la carpeta es superior a ocho centímetros, se construye por capas. Para mejorar sus características superficiales, o con fines de conservación, se pueden aplicar a la carpeta tratamientos superficiales, como capas delgadas de mortero y lechadas asfálticas, carpetas drenantes de granulometría abierta, u otro tipo de mejoras.

La base es la capa situada bajo la carpeta. Su función es eminentemente resistente, pues absorbe la mayor parte de los esfuerzos verticales y su rigidez o su resistencia a la deformación bajo las sollicitaciones repetidas del tránsito suele corresponder a la intensidad del tránsito pesado. Así, para tránsito medio y ligero se emplean las tradicionales bases granulares, pero para tránsito pesado se emplean materiales granulares tratados con un cementante, denominadas bases asfálticas o bases de gravacemento.

La sub-base es la capa que va debajo de la base y sobre la capa subrasante. Esta capa puede no ser necesaria cuando la capa subrasante es de elevada capacidad de soporte. Su función es proporcionar a la base un cimiento uniforme y constituir una adecuada plataforma de trabajo para su colocación y compactación. Es deseable que cumpla también una función drenante, para lo cual es imprescindible que los materiales utilizados carezcan de finos y en todo caso suele ser una capa de transición necesaria. Se emplean normalmente sub-bases granulares constituidas por materiales cribados o de trituración parcial, suelos estabilizados con cemento, etcétera.

## **1.7 Estado actual y futuro de la tecnología de los pavimentos**

El estado actual y futuro de la tecnología de pavimentos se enfrenta a grandes retos debido a que se están presentando nuevas condiciones y necesidades, derivadas de las características impuestas por los escenarios sociales, económicos y tecnológicos en que se desarrolla la vida moderna.

Un aspecto muy interesante es el originado por los importantes incrementos en el número y en el peso de los vehículos de mayor carga, así como

en los avances de la industria automotriz. Esto ha generado la necesidad de introducir nuevos materiales, más resistentes y durables, así como nuevas estructuras o tipos de pavimentos, lo que, además, exige mejores modelos matemáticos que consideren la presencia de tales materiales en el diseño de los pavimentos. Entre los nuevos materiales pueden mencionarse los concretos asfálticos de alto módulo, los geotextiles, así como los agentes modificadores, y entre las nuevas tecnologías, los conceptos reológicos de los materiales, los módulos de elasticidad y dinámicos. También deben utilizarse programas de computación más avanzados y los sistemas expertos, así como aplicar métodos mecanístico-empíricos, que son, hoy en día, los más promisorios por las siguientes razones:

- Su aplicación resulta trascendental en la rehabilitación de pavimentos. Permiten efectuar una evaluación racional de las propiedades mecánicas de los materiales existentes.
- Brindan gran ayuda en la evaluación de la influencia de la variación de espesores, cargas, nuevos materiales, clima, ambiente, etcétera.
- Permiten predecir el comportamiento del pavimento a lo largo del tiempo, su vida remanente, y son de gran utilidad en la ejecución de análisis de tipo económico.
- Constituyen un valioso auxiliar en la fase de operación, incorporados a sistemas de administración de pavimentos.

Por otra parte, el citado incremento del tránsito pesado en el sistema carretero principal, hará necesario reforzar los pavimentos existentes, construir sobrecarpetas asfálticas o concreto hidráulico sobre pavimentos flexibles antiguos (*White topping*) o implementar técnicas de reciclado o recuperación de los pavimentos existentes.

Con respecto a la interacción del pavimento con el usuario, debe mencionarse que éste se ha vuelto más exigente, y sus umbrales de aceptación son más altos, lo cual modificará los estándares de calidad actuales, de manera que los que ahora parecen niveles de excelencia, en poco tiempo serán considerados de nivel medio. Se deberá dar más importancia a las características superficiales del pavimento que controlan la comodidad, la resistencia al derrapamiento,

el desgaste de las llantas y del automotor, así como al ruido, tanto en el interior como en el exterior del automotor. En este último aspecto, se deberán controlar los niveles de ruido y contaminación ambiental en el entorno, con disposiciones y medidas de mayor cobertura.

En lo que se refiere a los materiales, hay que hacer notar que deberán también quedar sujetos a mejores controles y estándares de calidad, requiriéndose la aplicación de los conceptos de calidad total y aseguramiento de la misma. Un aspecto que hoy por hoy, preocupa es el consumo de energía para la producción de los materiales y de su puesta en obra, por lo que se efectúan análisis tanto de su costo como de la energía consumida en obtenerlos. De igual manera, se investigan las condiciones de su comportamiento a largo plazo, lo que da lugar a la elaboración de especificaciones que toman en cuenta esta propiedad. Ante la carencia de su calidad, se investiga también sobre la utilización de elementos fuera de especificaciones, o alternativos, y técnicas de reciclado. Este aspecto se encuentra muy ligado al problema del refuerzo de los pavimentos antiguos, que se ha incrementado dadas las cargas y sus repeticiones, por lo que deben desarrollarse técnicas de evaluación, análisis y diagnóstico, así como aquellas referidas al diseño del refuerzo necesario para ciclos de vida adicionales.

En el campo de la construcción también ha habido y habrá cambios importantes. Los equipos y maquinaria son más potentes y versátiles; se ha desarrollado el concepto de máquinas inteligentes, con cada vez mayor participación de la electrónica y la robotización y menor utilización de la mano de obra, así como con el empleo de dispositivos más sensibles que permiten obtener mejores condiciones de acabado superficial (sensores electrónicos, rayos láser, radar, etcétera). Es importante destacar, en el aspecto constructivo, que se debe definir adecuadamente la logística de la obra, para evitar interrupciones en la secuencia de construcción, dado el efecto negativo que tienen sobre las condiciones superficiales del pavimento, en su calidad general y en su costo.

Finalmente, hay que hacer mención de la utilización de los sistemas de administración de pavimentos, como el recientemente incorporado HDM-4<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Pavement Evaluator, versión 2.0, FICEM, 1998.

para pavimentos rígidos y flexibles, capacitados para considerar la presencia de nuevos materiales y estructuras del pavimento, los costos –principalmente los de operación–, así como los diferentes ciclos de vida. Estos sistemas están capacitados para efectuar análisis de sensibilidad en diferentes escenarios de economía, de políticas de mantenimiento y de variabilidad en los materiales, en el tránsito y en la construcción, y posibilitan, de esta forma, contar con la mejor información para tomar las decisiones adecuadas con la máxima eficiencia de los recursos disponibles.

En el presente capítulo se han descrito los pavimentos asfálticos, y se han señalado las funciones y características de los elementos que los constituyen. También se han mencionado las condiciones que guarda el estado de la red vial en México, así como las tendencias que se vislumbran hacia el futuro.

En el siguiente capítulo se abordarán aspectos relativos a la realización del proyecto estructural del pavimento, y se presentarán las metodologías propuestas por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), por el Instituto del Asfalto, por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, así como el método de catálogo utilizado en España. También se platearán así como algunas recomendaciones prácticas útiles para complementar el proyecto.



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



...: Ingeniería de Civil

**CA 57  
DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES**

**CAPÍTULO II  
PROYECTO DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES**

**COORDINADOR: ING. MIGUEL SÁNCHEZ MEJÍA**

**DEL 18 AL 22 DE ABRIL DE 2005**

**PALACIO DE MINERÍA**



**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



## **CAPÍTULO II**

### **PROYECTO DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES**

#### **2.1 Introducción**

El proyecto de un pavimento tiene, como último objetivo, la definición de las características y propiedades de los distintos elementos estructurales o capas del pavimento, sus espesores, así como de los correspondientes procedimientos constructivos, para poder garantizar que la estructura va a prestar adecuadamente el servicio para el que se proyecta y construye durante un determinado periodo de diseño o vida útil. Además, como en otras estructuras, hay que tener en cuenta, especialmente en ese proceso, las características del terreno de cimentación (capa subrasante), las cargas procedentes de los vehículos y los efectos del clima.

La definición del tipo de pavimento condiciona al proyecto de construcción, que debe comprender las características de los materiales y procedimientos constructivos, así como las especificaciones técnicas particulares.

El proyecto del pavimento debe apoyarse en criterios técnicos y económicos. Los primeros se refieren a las características estructurales, a las características funcionales o superficiales, al proceso constructivo y a la evolución del comportamiento del pavimento después de su construcción y puesta en servicio. Los aspectos económicos deben incluir no sólo los costos de construcción, sino también los de conservación y los de operación.

## **2.2 Aspectos teóricos y fundamentos de diseño**

### **2.2.1 Generalidades**

Los métodos de diseño de pavimentos, tanto rígidos como flexibles, han sufrido importantes transformaciones a lo largo del tiempo. Desde aquellos primeros métodos de tipo empírico a principios del siglo pasado, que se basaban en un sistema de clasificación de suelos, o se apoyaban en pruebas de resistencia igualmente empíricas, hasta la época actual, estos sistemas se han visto fuertemente enriquecidos por las aportaciones de importantes investigaciones, como las realizadas en tramos experimentales, entre los que destaca el llevado a cabo bajo la dirección de la AASHTO, en Estados Unidos, y cuyos primeros resultados se incorporaron en 1962 a la tecnología de los pavimentos. Conceptos como el de equivalencia de cargas respecto a un eje, simple patrón en función de su efecto destructivo, el índice de espesor o número estructural para la equivalencia en la capacidad resistente de los diferentes materiales del pavimento y del índice de servicio para evaluar el comportamiento de los mismos, son aportaciones importantes del tramo de prueba AASHTO. Actualmente, con la introducción de las computadoras, la utilización de sofisticados instrumentos, equipos de ensaye y medición, y procedimientos de análisis como el método del elemento finito, se han desarrollado métodos de diseño más avanzados, como los denominados mecanístico-empíricos, los cuales tienen un componente teórico, basado en un modelo estructural y un componente empírico, basado en resultados de laboratorio y observaciones en el campo, con los cuales se configura un modelo de comportamiento. Más recientemente, las investigaciones llevadas a cabo dentro del programa SHRP han revolucionado la tecnología principalmente de los asfaltos, con el objeto de mejorar el estado del conocimiento en cuanto al comportamiento de los pavimentos.

En la tabla 2.1 se presenta un breve resumen de algunos de los diferentes tipos de métodos de diseño utilizados a través del tiempo.

Los modelos estructurales de la parte mecanicista están más avanzados que los modelos de comportamiento de la parte empírica. Los primeros generalmente se basan en una teoría mecánica, como la de la elasticidad, por ejemplo, mientras que los segundos son producto de ecuaciones de regresión,

Tabla 2.1 Principales métodos de diseño

- 
- Métodos basados en pruebas de resistencia, CBR, 1925
  - Métodos basados en pruebas elaboradas, de placa y triaxiales, 1945
  - Métodos basados en análisis estructural de sistemas multicapa, Método Shell, 1950
  - Métodos basados en evaluación estadística de comportamiento de los pavimentos, Método AASHTO, 1961
  - Métodos de catálogo, basados en análisis mecanicistas y matizados con información experimental, presentados en forma práctica mediante secciones estructurales típicas. Método español MOPU, 1989.
- 

que pueden dar lugar a dispersiones importantes, por lo que requieren de cuidadosas calibraciones y revisiones que aseguren una concordancia satisfactoria entre la predicción y la realidad, aspecto importante para el desarrollo confiable del método. Los modelos así desarrollados permiten evaluar la influencia de la variación de los espesores de las capas, de las cargas aplicadas, de la introducción de nuevos materiales, la influencia del medio, la aplicación de medidas de rehabilitación, la predicción del comportamiento del pavimento a través del tiempo, así como su vida remanente, y permite, entre otros beneficios, obtener un mayor nivel de confianza en el diseño. Estos métodos hoy en día parecen ser los procedimientos de análisis más promisorios para el diseño y evaluación de pavimentos.

El estado tecnológico actual permite calcular los estados de esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones, al aplicar las leyes físicas disponibles, a partir de una respuesta mecánica: elástica, viscoelástica, etcétera. Por lo que toca a los modos de falla, cabe apuntar que los métodos de diseño generalmente están calibrados para considerar la ocurrencia de algunos de ellos, principalmente los que se relacionan con el fenómeno de fatiga y de deformación permanente, aunque no todos, ya que ejemplo las fallas por desintegración o por reducción de resistencia al derrapamiento, por ejemplo, son generalmente cubiertos con los diseños de las mezclas y especificaciones de

materiales y de construcción. Por otra parte, los valores críticos, límite o terminales que definen una condición de falla, son establecidos en el diseño, y toman en cuenta aspectos tanto estructurales como funcionales. Un ejemplo es el que corresponde a la serviciabilidad\*, la cual está estrechamente ligada a la rugosidad de la superficie del pavimento (figura 2.1). La curva de degradación correspondiente a este parámetro indica la forma en que disminuye la calidad de rodamiento a través del tiempo, hasta alcanzar los valores límite seleccionados, para indicar que el pavimento se encuentra en condiciones inadecuadas de servicio, mismos que dependen de la categoría del pavimento o de la carretera.

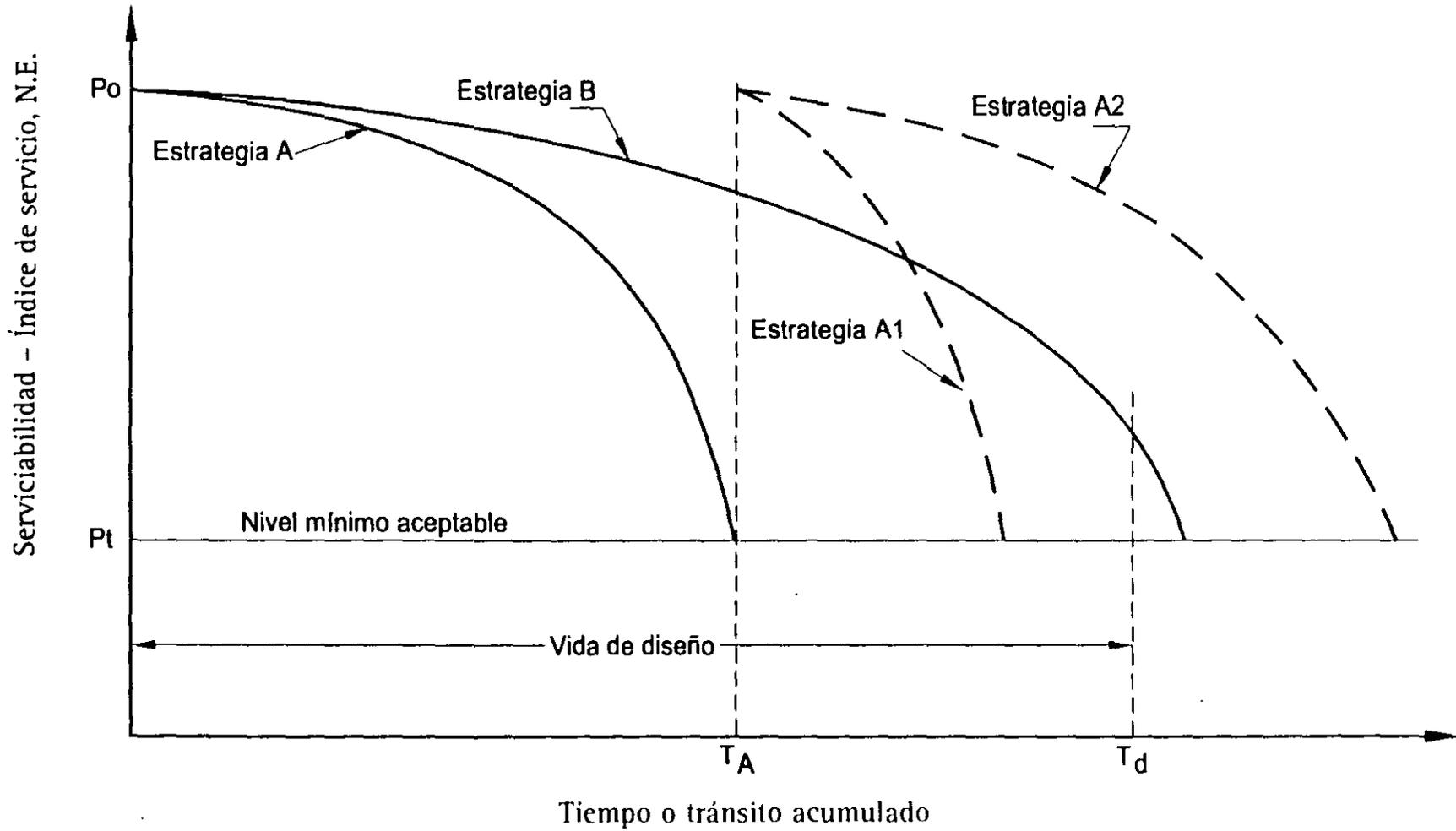
Debe mencionarse, finalmente, que en la actualidad, los organismos encargados de la operación y administración de los pavimentos están preocupados por las implicaciones de éstos, principalmente en lo concerniente a su comportamiento, en las economías de los países, sobre todo en aquellos que se encuentran en proceso de desarrollo.

Debido a esto, se ha implementado un sistema de análisis que comprende la evaluación económica de las diferentes alternativas de estructuras de pavimentos propuestas para cada caso, con sus correspondientes estrategias de conservación, dentro de un determinado periodo de análisis. De esta manera se desarrolla el concepto de análisis del costo de ciclo de vida, que se utiliza como factor fundamental para la toma de decisiones. En este concepto interviene el comportamiento de cada una de las alternativas planteadas en el ciclo de vida analizado, y se consideran los efectos de su conservación, las características del tránsito en el mismo ciclo y, finalmente, los costos generados en dicho lapso, como costo inicial de construcción, costos de conservación y de rehabilitación, así como los inherentes al usuario, siendo éstos últimos determinantes en muchos casos para seleccionar la mejor alternativa que, a fin de cuentas, será aquella en la cual la combinación de materiales y fondos genere la situación económica más ventajosa. Este análisis conduce a los denominados sistemas de administración de pavimentos, en los cuales es fundamental contar con tres modelos adecuados: estructural, de predicción de comportamiento y económico.

---

\* Serviciabilidad: Índice de Servicio. N.E.

Figura 2.1 Vida de diseño de varias estrategias



$T_A$  Vida de diseño de la estrategia A  
 $T_d$  Vida de diseño deseada

Estos sistemas, entre otras cosas, también han puesto en evidencia aspectos en los que el estado de conocimiento es menor, por lo que se ha impulsando el estudio e investigación para el desarrollo de un mejor conocimiento de ellos, como el comportamiento y su evolución, los costos de operación en función del estado superficial del pavimento, la influencia de las acciones de rehabilitación en los costos de operación, etcétera.

### **2.2.2 Métodos de diseño**

Los métodos actuales de diseño de pavimentos se inclinan hacia el concepto mecanístico-empírico, que involucra la aplicación de modelos estructurales para calcular las respuestas de los pavimentos, así como el desarrollo de modelos de deterioro para predecir el comportamiento del pavimento a partir de las respuestas estructurales. Los esquemas de predicción de comportamiento son posteriormente calibrados a partir de evaluaciones y observaciones del comportamiento de pavimentos en servicio. En la concepción de los modelos estructurales intervienen los aspectos teóricos que involucran esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones, así como la temperatura y el tiempo, con apoyo de herramientas modernas como el método del elemento finito y los programas de computación, que consideran sistemas elásticos multicapa. Esto ha simplificado notablemente el procedimiento de análisis teóricos.

En la tabla 2.2 se presentan algunos de los programas de computación más utilizados.

#### **2.2.2.1 Metodología general del diseño mecanístico-empírico**

La metodología general para el diseño de pavimentos flexibles asume que los materiales utilizados en la estructura del pavimento son conocidos anticipadamente y que sólo sus espesores están sujetos a iteraciones de diseño. Si los espesores propuestos no satisfacen los requisitos de diseño, será entonces necesario cambiar los tipos y propiedades de los materiales a utilizar.

a) Configuración del pavimento

El primer paso implica la suposición de una configuración inicial del pavimento que incluye el número de capas, su espesor y el tipo de materiales a utilizar. Esto se puede realizar convenientemente con base en

Tabla 2.2 Programas de computadora que consideran sistemas elásticos multicapa

Programa	Número de capas (máximo)	Número de cargas	Condición de continuidad en la interfase	Consideraciones probabilísticas	Fuente del programa
WESLEA	10	10	total sin fricción	no	Cuerpo de ingenieros, Estados Unidos.
BISAR	10	10	total sin fricción	no	Compañía Shell, Inglaterra
CHEV	5	2	total	no	Compañía Chevron
ELSYM 5	5	10	total sin fricción	no	Universidad de California, Berkeley
PDMAP	5	2	total	sí	National Cooperative Highway Research Program (Proyecto 1-10B)
VESYS	5	2	total	sí	FHWA-US-DOT
CHEVIT	5	12	total	sí	Cuerpo de ingenieros, Estados Unidos
CIRCLY	5	10	total sin fricción	no	Sistemas MINCAB, Australia

la experiencia local o haciendo referencia a catálogos de secciones estructurales para pavimentos, como los que emplean países como Francia y España. Las especificaciones de los materiales a utilizar en cada una de las capas pueden basarse en la experiencia de cada organismo, como las incluidas en la Normativa para la infraestructura del transporte,<sup>4</sup> la AASHTO,<sup>5</sup> etcétera.

b) Caracterización de materiales

La propiedad básica de los materiales que conforman las capas de un pavimento (carpeta asfáltica, base, sub-base y subrasante) es el módulo de resiliencia, que es una medida de las propiedades elásticas de un suelo, pero que reconoce la existencia de características no lineales en su comportamiento. Según la guía para el diseño de pavimentos estructurales de la AASHTO,<sup>6</sup> el módulo de resiliencia está llamado a sustituir al valor relativo soporte por las razones siguientes:

- es una propiedad mecánica básica que puede usarse en análisis mecanicistas de sistemas de capas múltiples para predecir diferentes tipos de deterioros, como son agrietamientos, deformaciones permanentes, rugosidad, entre otros.
- Se le ha reconocido internacionalmente como método para la caracterización de materiales y para su uso en diseño y evaluación de pavimentos.
- Existen técnicas no destructivas para su medición indirecta en campo, utilizando, por ejemplo, deflectómetros de impacto. El procedimiento para obtener el módulo de resiliencia está normalizado en la prueba AASHTO T274, sin embargo, la dificultad actual para determinar este módulo es la necesidad de equipos capaces de aplicar esfuerzos triaxiales en forma cíclica, que no son todavía accesibles. Debido a

---

<sup>4</sup> *Normativa para la infraestructura del Transporte*. México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 1999.

<sup>5</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Materials. Specifications Tests.

<sup>6</sup> *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D. C., AASHTO, 1993.

ello se han propuesto ecuaciones de correlaciones entre el módulo de resiliencia y otros parámetros de fácil obtención, como el valor relativo soporte. Dichas correlaciones pueden tener desviaciones importantes, por lo que su aplicación debe hacerse con cuidado.

c) Modelos climáticos

Los fenómenos ambientales no son todavía suficientemente considerados en los métodos de diseño, por lo que es frecuente que sólo se tomen en cuenta la temperatura y el agua.

Si la temperatura y los contenidos de agua en el pavimento varían considerablemente durante el año, será necesario considerar diferentes valores para los módulos de resiliencia de cada una de las capas que conforman el pavimento en función de la época bajo la influencia de la temperatura en los materiales asfálticos y del agua en los materiales de base, sub-base y subrasante. La determinación de dicha variación requiere la utilización de modelos climáticos que incluyen los de **transferencia de calor**,<sup>7</sup> para determinar la distribución espacial y temporal de temperaturas, los de **equilibrio**,<sup>8</sup> para determinar la distribución final de humedades al nivel de la subrasante y los de **infiltración y drenaje**<sup>9</sup> para poder predecir el grado de saturación en capas granulares. La utilización práctica de los modelos climáticos necesita la determinación y/o la medición de ciertos parámetros, como los datos climáticos y las propiedades térmicas de los materiales. Los datos incluyen las temperaturas del aire diarias máxima y mínima, la velocidad del viento y el porcentaje de insolación. Las propiedades térmicas incluyen la conductividad térmica, el calor específico y el punto de fusión. De éstas, la primera se define como la medida de la rapidez de transferencia de calor a través de un material. Calor específico es el calor

---

<sup>7</sup> B. J. Dempsey et al., "A heat transfer model for evaluating frost action and temperature related effects in multilayered pavement Systems". HRB, núm. 342. Estados Unidos, 1970.

<sup>8</sup> —, "Climatic materials structural pavement analysis program". TRR, núm, 1095. Estados Unidos, 1986.

<sup>9</sup> S. J. Lin et al., "Rainfall infiltration drainage and load-carrying capacity of pavements". TRR, núm. 993, Estados Unidos, 1984.

requerido para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia. El punto de fusión se refiere a la temperatura en la cual se presenta la transformación de sólido a líquido al calentar un material. El grado de saturación en la base y en la subrasante se predice cada día considerando la distribución de probabilidad de la cantidad de lluvia, las probabilidades de días secos y lluviosos, la infiltración de agua en el pavimento a través de grietas y juntas, el drenaje de la capa de base, y las probabilidades de aumento o disminución del contenido de agua en las capas del pavimento.

La temperatura y la humedad son variables climáticas importantes en el diseño de pavimentos. El módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica depende de la temperatura del pavimento, la cual puede variar considerablemente en el transcurso de un año e inclusive durante el día, mientras que los módulos de la base, sub-base y subrasante varían considerablemente con los cambios en sus contenidos de agua con variaciones estacionales importantes. En suelos cohesivos, incluyendo suelos granulares con un significativo porcentaje de finos, la resistencia y el módulo de resiliencia son muy sensibles a pequeños cambios en el contenido de agua, inclusive del orden del uno por ciento.

d) Condiciones de tránsito

El tránsito debe subdividirse en un cierto número de grupos, cada uno con diferentes configuraciones, pesos y número de repeticiones. El peso, la configuración, separación entre ejes, el radio y la presión de contacto son variables utilizadas en los modelos estructurales, mientras que el número de repeticiones se usa en los modelos de deterioro. En México, las condiciones de tránsito actuales se conocen con buena medida gracias a los aforos y al estudio realizado por *Mendoza et al.*, titulado "Estudio de pesos y dimensiones. Análisis estadístico del peso y dimensiones de vehículos de carga que circulan por la red nacional de carreteras", que fue promovido por el Instituto Mexicano del Transporte, de la secretaría de Comunicaciones y Transportes, en 1991, a través del *Documento Técnico*, número 8.

e) Modelos estructurales

Los programas de capas elásticas más utilizados son los presentados en la tabla 2.2 para la modelación estructural de los pavimentos. De igual manera existen modelos de elementos finitos, como el ILLI-PAVE, desarrollado por la Universidad de Illinois y el MICH-PAVE, desarrollado por la Universidad de Michigan.

Ambos tipos de programas, los de capas elásticas y los de elementos finitos presentan aún deficiencias y limitaciones, por lo que se sugiere utilizar las relaciones de módulos de elasticidad contra profundidad, obtenidos con un programa de elementos finitos que son útiles para determinar los valores de los módulos que puedan utilizarse en un programa de capas elásticas con capacidad para considerar cargas múltiples.<sup>10</sup>

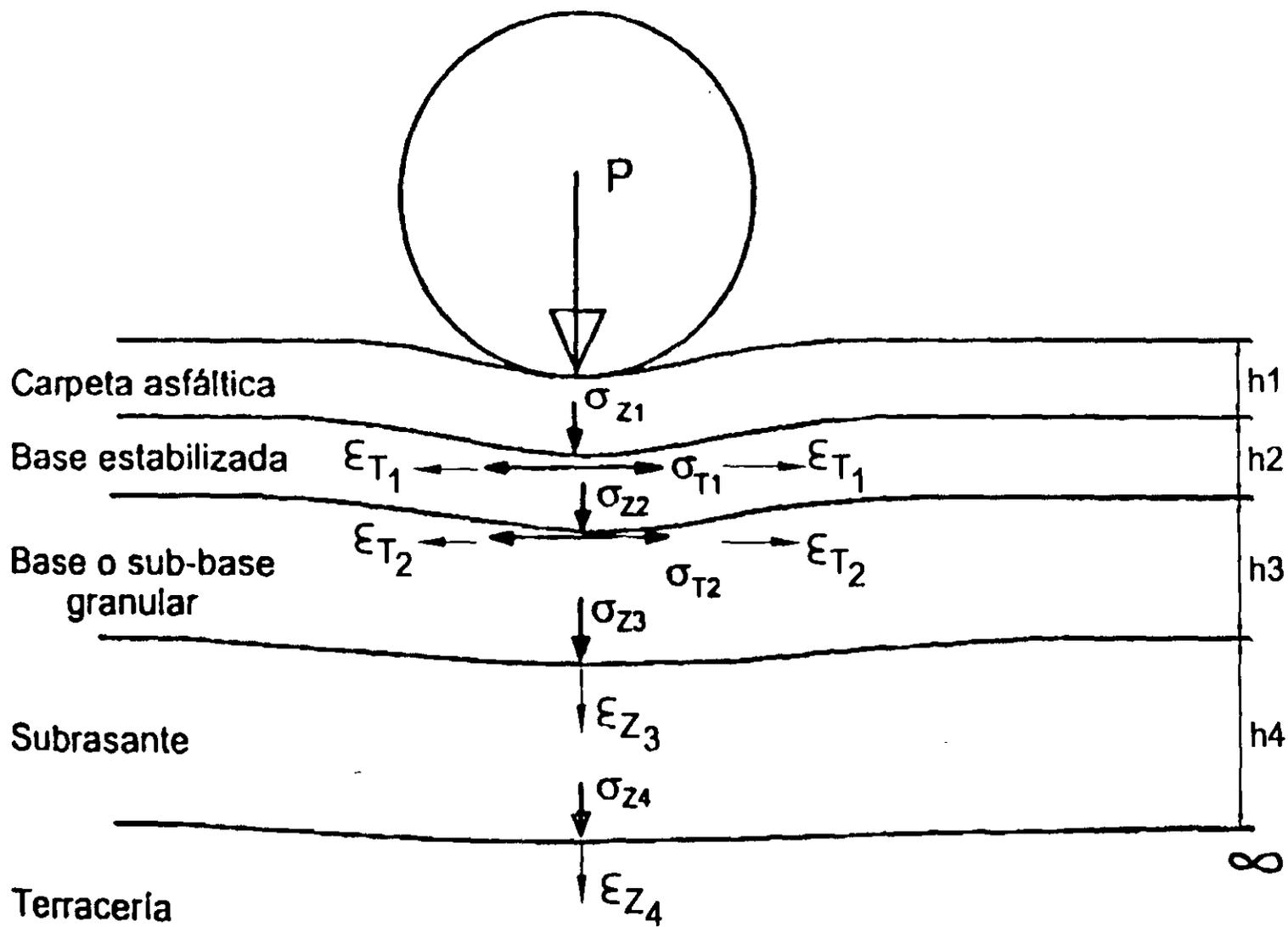
f) Respuesta del pavimento

La respuesta de un pavimento ante una sollicitación está dada en términos de esfuerzos, deformaciones permanentes y deflexiones, y es obtenida a partir de los modelos estructurales utilizados. En general, se acepta que los cuatro indicadores más significativos del comportamiento de un pavimento flexible son la deflexión superficial, la deformación a la tensión en la carpeta asfáltica, y los esfuerzos y deformaciones de compresión en la subrasante (figura 2.2). La deflexión superficial y la máxima deformación a la tensión en el plano inferior de las capas asfálticas están directamente relacionadas con el agrietamiento del concreto asfáltico por fatiga. Los esfuerzos y deformaciones de compresión en la subrasante se relacionan con las deformaciones permanentes (roderas) en el pavimento. La suficiencia del diseño estructural de un pavimento puede evaluarse al comparar los esfuerzos y deformaciones calculados en puntos críticos del pavimento con los valores de diseño, obtenidos de ensayos de laboratorio en los materiales constitutivos.

---

<sup>10</sup> Vid. "Pavement Analysis and Design. Estados Unidos, Huang Y. H. Prentice Hall, 1996.

Figura 2.2 Esfuerzos y deformaciones críticos



g) Análisis de confiabilidad

Dada la variabilidad que existe en las características de los materiales de los factores de clima, en la valoración del tránsito y en los procesos constructivos, será necesario realizar un análisis de confiabilidad en el proyecto.

Los métodos de diseño de pavimentos pueden ser de tipo determinístico o probabilístico. En el tipo determinístico, cada factor o variable que interviene en el diseño tiene un valor fijo determinado, con un factor de seguridad asignado por el proyectista, el cual asignará variables de seguridad altas donde la incertidumbre sea alta, o bien, donde exista mucha influencia en el diseño final. Esta manera de proceder puede producir un sobrediseño o un subdiseño, dependiendo de las magnitudes de los factores de seguridad aplicados y de la sensibilidad de los procedimientos de diseño. Otro procedimiento es el método probabilístico, en donde a cada factor o variable de diseño se le asigna un valor medio y una variabilidad o coeficiente de variación. De esta manera, el factor de seguridad que se aplica a cada una de las variables, así como su influencia en el diseño final, son automáticamente tomados en consideración y entonces se puede valorar la confiabilidad del diseño, que se define entonces como el nivel de probabilidad de que el diseño propuesto cumpla con las funciones especificadas en el proyecto durante el periodo de diseño considerado.

h) Modelos de deterioro

Los modelos de deterioro principalmente consideran el agrietamiento debido a la fatiga, las deformaciones permanentes y la rugosidad. Si la confiabilidad para un cierto deterioro es menor que el nivel mínimo requerido, la configuración del pavimento deberá modificarse y comenzar una nueva iteración, hasta que se obtenga el nivel requerido.

Los modelos de deterioro son funciones de transferencia que relacionan la respuesta estructural de un sistema con varios tipos de deterioro. Estos modelos requieren una extensiva y permanente calibración y verificación en campo para que sean confiables, y tomar en cuenta las condiciones locales del ámbito en que serán utilizados.

En la literatura especializada existen muchos modelos útiles para predecir la ocurrencia de deformaciones permanentes en subrasantes y para agrietamiento por fatiga en capas asfálticas; sin embargo, es necesario mayor investigación en lo que se refiere a deformaciones permanentes en materiales granulares y capas asfálticas. El reporte I-26 de la NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) de Estados Unidos, recomienda el modelo de agrietamiento térmico de Shahin-McCullough para evaluar el potencial de agrietamiento, una vez que el diseño de espesores ha terminado. Si el potencial obtenido es alto o insatisfactorio debe utilizarse un cemento asfáltico más blando. Si se considera, además, que las deformaciones permanentes de las capas asfálticas son la principal componente de la deformación total en pavimentos de alto tránsito, en donde los espesores de carpeta son grandes, una vez terminado el diseño de dichos espesores debe evaluarse el potencial de deformaciones permanentes esperado. Si dicho potencial es alto, debe modificarse el diseño de la mezcla asfáltica hasta la obtención de un potencial aceptable.

i) Modelos de agrietamiento por fatiga

El concepto de daño acumulado, propuesto por Miner, se utiliza para predecir el agrietamiento por fatiga, considerando que el número permisible de repeticiones de carga está relacionado con el valor de la deformación unitaria por tensión en el lecho inferior de las capas asfálticas. La cantidad de daño es expresada como relación de daño, que es la relación entre los números de repeticiones esperadas y las permisibles. Teóricamente, cuando esta relación es igual a 1, el daño se produce. Por supuesto, dadas las incertidumbres involucradas, todo el daño no se produce una vez que alcanza ese valor de 1. Si se utilizan en el diseño los valores medios de cada parámetro, una relación de daño igual a 1 indica que la probabilidad de falla es del orden del 50%; es decir, el 50% del área presentará agrietamiento por fatiga.

La diferencia principal entre los métodos de diseño es la forma de la función de transferencia que relaciona las deformaciones de tensión; en la fibra inferior de las capas asfálticas, cuyo módulo de elasticidad es  $E_1$ , con

el número de repeticiones admisibles  $N_f$  para producir agrietamiento por fatiga. La Compañía Shell y el Instituto del Asfalto usan la expresión:

$$N_f = f_1 (\epsilon_t)^{-f_2} (E_1)^{-f_3}$$

en donde  $N_f$  es el número de repeticiones de carga admisible para evitar el agrietamiento por fatiga,  $E_1$  es el módulo de elasticidad de las capas asfálticas,  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$ , son constantes que se determinan a partir de ensayos de fatiga en el laboratorio, y  $f_1$  debe modificarse posteriormente para correlacionarlo con el comportamiento observado en el campo. Para una mezcla asfáltica estandarizada de diseño, la ecuación del Instituto del Asfalto para limitar a 20% el área afectada por agrietamiento es:

$$N_f = 0.0796 (\epsilon_t)^{-3.291} (E_1)^{-0.854}$$

y para la Compañía Shell es:

$$N_f = 0.0685 (\epsilon_t)^{-5.671} (E_1)^{-2.363}$$

Debido a que el exponente  $f_2$  es mayor que  $f_3$ , el efecto de  $\epsilon_t$  en  $N_f$  es más importante que el de  $E_1$ . Por ello, el término  $E_1$  puede llegar a omitirse y la ecuación de transferencia puede simplificarse:

$$N_f = f_1 (\epsilon_t)^{-f_2}$$

Ahora bien, dadas las diferencias en materiales, contenido de asfalto, métodos de prueba, condiciones de campo, modelos estructurales y sobre todo el criterio de falla, es decir, porcentaje de área afectada, intensidad, etcétera, es de suponer que puede haber un gran número de funciones de transferencia, lo importante es realizar cuidadosamente la calibración para ajustar las predicciones de deterioros con las observaciones de campo, y efectuarla frecuentemente para definir con mayor aproximación los coeficientes involucrados.

#### j) Modelos de deformación permanente

Los procedimientos más usuales para limitar las deformaciones permanentes son de dos clases. El primero consiste en limitar únicamente la deformación vertical de compresión en la superficie superior de la capa subrasante, y el segundo, en limitar la deformación permanente acumulada total en la superficie, debida a la deformación de cada una

de las capas que conforman el pavimento. En los métodos de diseño del Instituto del Asfalto y de la Compañía Shell el número de repeticiones admisibles  $N_d$  para limitar las deformaciones permanentes, se relaciona con la deformación vertical de compresión  $\epsilon_c$  en la superficie superior de la subrasante, con una ecuación del tipo  $N_d = f_4 (\epsilon_c)^{-f_5}$  en donde  $f_4$  y  $f_5$  son constantes que se determinan a partir de ensayos de laboratorio, de tramos de prueba o del comportamiento observado en el campo. Debe notarse que el exponente  $f_5$  varía en un rango estrecho, pero no así el coeficiente  $f_4$ ; por las razones expuestas a propósito del agrietamiento por fatiga, los coeficientes  $f_4$  y  $f_5$  deben calibrarse para ajustar las predicciones con las observaciones de campo. En la tabla 2.3 se presentan los valores de los coeficientes  $f_4$  y  $f_5$  por diferentes instituciones.

Tabla 2.3 Coeficiente  $f_4$  y  $f_5$  propuestos por diferentes instituciones

Institución	$f_4$	$f_5$	Profundidad de rodera máxima admisible, en mm
Compañía Shell			
confiabilidad:			
50%	$6.15 \cdot 10^{-7}$	4.00	
85%	$1.94 \cdot 10^{-7}$	4.00	
95%	$1.05 \cdot 10^{-7}$	4.00	
Instituto del Asfalto	$1.365 \cdot 10^{-6}$	4.477	12.7 (0.5 pulgadas)
TRRL, Inglaterra	$6.18 \cdot 10^{-8}$	3.97	10.2 (0.4 pulgadas)
85% de confiabilidad			
Centro belga de Investigación de Carreteras	$3.05 \cdot 10^{-6}$	4.35	

En el primer procedimiento de control de deformaciones permanentes, se considera que si se controla la deformación de compresión en la superficie superior de la subrasante, se pueden limitar razonablemente las deformaciones permanentes en la superficie del pavimento. Por ejem-

plo, el método del Instituto del Asfalto limita la profundidad de rodadura a 12.7 milímetros, en tanto que el método del TRRL lo limita a no más de 10.2 milímetros. Sin un procedimiento definido, el control de deformaciones permanentes o roderas en las capas asfálticas, se debe realizar mediante el mejoramiento de las técnicas de selección de materiales y del diseño de la mezcla, utilizando las recomendaciones emitidas por cada organismo.

Sin embargo, a menos de que se utilicen espesores y materiales estandarizados en el diseño, la evaluación de deformaciones permanentes en la superficie a partir de las deformaciones de compresión en la subrasante no es razonable. Bajo condiciones de tránsito pesado y con importantes espesores de capas asfálticas la mayor parte de la deformación permanente ocurre en esas capas que no en la subrasante. Lo más razonable es determinar las deformaciones debidas a cada una de las capas del pavimento y sumarlas para obtener la deformación total. Para tal objeto pueden utilizarse programas como el VESYS (tabla 2.2). Debe tomarse en cuenta que la deformación depende del nivel de esfuerzos, la temperatura y humedad; el tiempo de aplicación de las cargas y el tipo de material, contenido de asfalto y grado de compactación.

k) Diseño final

El diseño final del pavimento se obtiene cuando la configuración del pavimento, es decir la geometría y las propiedades de los materiales, satisfacen los requisitos de confiabilidad para cada tipo de deterioro.

Debe mencionarse, finalmente, que los métodos de diseño han simplificado notablemente los procedimientos de aplicación, presentando al usuario tablas, nomogramas y elementos de cálculo relativamente sencillos, además de programas de computadora, mediante los cuales se pueden efectuar rápidamente estudios de alternativas y análisis de sensibilidad, que incluyen sus costos, lo cual permite obtener un panorama completo del problema, con la información necesaria para la toma correcta de decisiones.

Además, existen algunos conceptos que deben ser tomados en cuenta por el proyectista, pues corresponden a las necesidades que se manifiestan actualmente con respecto a los requerimientos de los pavimentos:

- Mayores niveles de seguridad y comodidad para el usuario.
- Materiales y superficies de rodamiento más durables y resistentes.
- Requerimientos de mínima conservación.
- Menor nivel de ruido dentro de la carretera y en el entorno.
- Mejor apariencia.

A continuación se describen algunos de los métodos de diseño más frecuentemente utilizados en el país, como el método AASHTO, el del Instituto del Asfalto, el del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, así como el método de catálogo español.

### **2.2.3 Método AASHTO para pavimentos flexibles**

A partir de los resultados de la investigación efectuada en el “tramo de prueba AASHTO”, a finales de la década de los cincuenta, se desarrolló la AASHTO Interim Guide for the Design of Rigid Pavement Structures, que fue publicada en 1962, en forma semejante a la la AASHTO Interim Guide for the Design of Rigid Pavement Structures, publicada en 1961. A principio de la década de los setenta, el organismo modificó su denominación a AASHTO, y para 1972 ambas publicaciones fueron actualizadas y presentadas en un solo documento, la AASHTO Interim Guide for the Design of Rigid Pavement Structures, que fue publicada posteriormente con algunas modificaciones en 1981. En 1986 reapareció después de ser nuevamente revisada, con el título de la AASHTO Interim Guide for the Design of Rigid Pavement Structures, versión que incluyó muchos cambios así como nuevos conceptos, tales como los de nivel de confianza, análisis de costos en el ciclo de vida y administración de pavimentos. Finalmente, la versión editada en 1993 corrige y aclara algunos conceptos relativos al proyecto de capas de refuerzo de los pavimentos, y es la versión que se utiliza en este capítulo para describir el método de diseño propuesto por la AASHTO.

Este método se clasifica dentro de los procedimientos de diseño basados en ecuaciones de regresión desarrolladas a partir de los resultados de tramos de prueba. Sin embargo, en la actualidad está adquiriendo un carácter mecanístico,

al introducirse en el procedimiento conceptos como los módulos de resiliencia y elásticos de los materiales.

El diseño parte de determinar el número estructural, SN, necesario para que el pavimento pueda soportar las cargas consideradas.

La ecuación original de regresión obtenida a partir de los resultados de la prueba AASHTO ha sido modificada, principalmente en los valores de las constantes de regresión, con base en la teoría y la experiencia. La ecuación para pavimentos flexibles presentada en 1993 es la siguiente:

$$\log_{10} W_{18} = Z_R \cdot S_o + 9.36 \cdot \log_{10} (SN+1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{1094} + 2.32 \cdot \log_{10} M_R - 8.07 - \frac{0.40}{(SN+1)^{5.19}}$$

en donde:

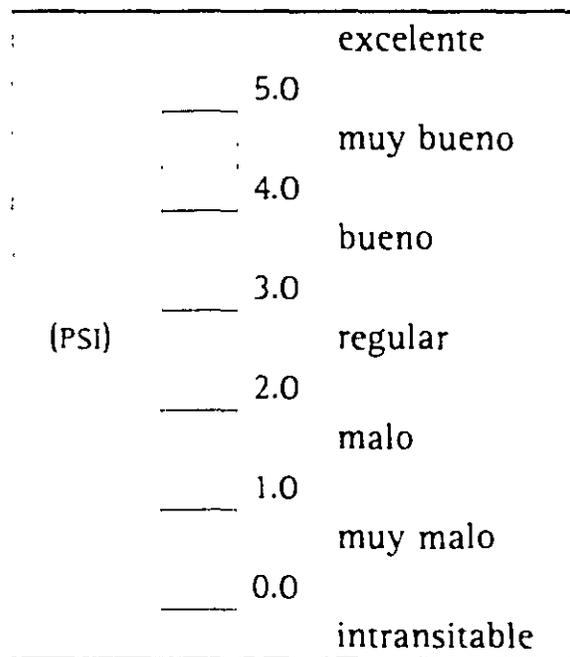
- $W_{18}$  = número admisible de ejes equivalentes de 18000 lb
- $Z_R$  = desviación normal estándar
- $S_o$  = desviación estándar integral
- $SN$  = número estructural del pavimento  
 $SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$
- $\Delta PSI$  = diferencia entre los índices de servicio inicial y terminal  
 $(p_o - p_t)$
- $p_o$  = índice de servicio inicial
- $p_t$  = índice de servicio terminal
- $M_R$  = módulo de resiliencia, PSI
- $m_2, m_3$  = coeficientes de drenaje para las capas de base y sub-base
- $a_1, a_2, a_3$  = coeficientes de capas representativos de la carpeta, base y sub-base
- $D_1, D_2, D_3$  = espesores de las capas de carpeta, base y sub-base en pulgadas

Para facilitar la utilización de la fórmula se ha preparado un nomograma, adaptado a unidades en el sistema inglés.

A continuación se presenta una breve discusión sobre los factores que intervienen en la ecuación, que será de utilidad para la correcta utilización de la misma en el proceso de diseño del espesor del pavimento.

a) Serviciabilidad—Índice de servicio (*serviciability*)

De acuerdo con la AASHTO, la serviciabilidad de un pavimento puede definirse como “su habilidad para proporcionar un servicio adecuado al tipo de tránsito (automóviles y camiones) que lo usan”. En el tramo de prueba se desarrolló una escala con valores cuyos rangos van del 0 al 5, que representan los diferentes niveles de calidad de servicio, en función del grado de deterioro superficial del pavimento, manifestado principalmente por la rugosidad de su superficie. Estos niveles definen el concepto de índice de servicio actual (PSI, Present Serviciability Index). Debe señalarse que los niveles 0 y 5 en raras ocasiones son alcanzados.



Escala del índice de servicio actual (PSI)

El índice de servicio inicial,  $p_o$ , representa la condición del pavimento inmediatamente después de su construcción o rehabilitación. Con las técnicas modernas de construcción, control y supervisión, en los pavimentos de concreto de alta calidad se han alcanzado valores iniciales de 4.7 a 4.8, por lo

que se recomienda tomar un valor de 4.5 para efectos de diseño, cuando no se tenga mejor información.

El índice de servicio terminal,  $p_t$ , corresponde al nivel de servicio en el cual el pavimento requiere de algún tipo de rehabilitación para iniciar un nuevo ciclo de vida. El valor del índice de servicio terminal está relacionado con la importancia de la carretera o elemento. En la tabla 2.4 se muestran los valores típicos recomendados para diferentes tipos de utilización, si bien el proyectista podrá adoptar el que considere conveniente para un caso en particular.

Tabla 2.4. Valores terminales típicos para el índice de servicio terminal

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

Con base en lo anterior, el parámetro que indica la diferencia entre los índices de servicio inicial y terminal se expresa de la siguiente manera:  
 $\Delta PSI = p_o - p_t$

Por lo tanto, es recomendable que el índice  $p_o$  alcance el mayor valor posible con el objeto de incrementar el ciclo de vida del pavimento, lo cual depende de la aplicación correcta de técnicas de construcción, control y supervisión.

Por otra parte, se reconoce que el tránsito no es el único factor que reduce con el tiempo el índice de servicio. Existen algunos otros, de tipo ambiental, que también reducen el valor de dicho índice, como el tipo de suelo del terreno natural o las condiciones de drenaje entre otros, cuyo efecto debe tomarse en cuenta para determinar el espesor de pavimento necesario para soportar el efecto combinado del tránsito y factores ambientales. A falta de mejor información y de elementos para definir el valor de la reducción producida por

factores ambientales,  $\Delta\text{PSI}_{\text{SW-FH}}$ , puede esperarse que tal valor se encuentre entre 0.0 y 0.7, empleándose la siguiente expresión para valuar la pérdida de índice de servicio total:  $\Delta\text{PSI} = \Delta\text{PSI}_{\text{TR}} + \Delta\text{PSI}_{\text{SW-FH}}$

en donde:

$\Delta\text{PSI}_{\text{TR}}$  = pérdida del índice de servicio debida al efecto del tránsito

$\Delta\text{PSI}$  = pérdida de índice de servicio total en el ciclo de vida considerado ( $p_o - p_t$ )

$\Delta\text{PSI}_{\text{SW-FH}}$  = pérdida del índice de servicio debida a factores ambientales

Un aspecto importante que debe estar presente en el diseño del pavimento, es tratar de reducir al máximo o nulificar la pérdida de índice de servicio debida a factores ambientales, lo cual debe obligar al proyectista a reducir el posible efecto adverso de los factores ambientales.

b) Tránsito, W-18

La aplicación del método AASHTO requiere la transformación a ejes sencillos de 82 kN (18000 lb) de los ejes de diferentes pesos y configuraciones (sencillos, tandem y tridem) que circularán sobre el pavimento a lo largo del ciclo de proyecto. Para ello, en la guía se han incluido una serie de tablas con los factores de conversión, los que dependen de diferentes factores, como tipo de pavimento (flexible o rígido), tipo de eje (sencillo, tandem, tridem), magnitud de la carga en el eje, índice de servicio final y, en el caso de pavimentos rígidos, espesor de la losa del pavimento. Para este caso se presentan nueve tablas, en las que se combinan cada uno de los tres tipo de ejes, con tres valores de índice de servicio final; 2.0, 2.5 y 3.0, tablas 2.5 a 2.13.

Para determinar el número de ejes acumulados equivalentes de 82 kN (18000 lb) (E-18, ESAL), el proyectista debe conocer las características del tránsito que circulará sobre el pavimento en el ciclo de proyecto; esto es, número y tipos de vehículos clasificados de acuerdo a una tipología determinada, las cargas correspondientes a cada tipo de eje, tasa de crecimiento prevista, periodo o ciclo de proyecto y número de carriles. El método aconseja utilizar la siguiente expresión para determinar el tránsito equivalente:  $W_{18} = D_D \cdot D_L \cdot w_{18}$

Tabla 2.5 Factores de equivalencia para cargas por ejes sencillos y Pt de 2.0

Carga por eje (kips)	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002
4	.002	.003	.002	.002	.002	.002
6	.009	.012	.011	.010	.009	.009
8	.030	.035	.036	.033	.031	.029
10	.075	.085	.090	.085	.079	.076
12	.165	.177	.189	.183	.174	.168
14	.325	.338	.354	.350	.338	.331
16	.589	.598	.613	.612	.603	.596
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.59	1.56	1.55	1.57	1.59
22	2.49	2.44	2.35	2.31	2.35	2.41
24	3.71	3.62	3.43	3.33	3.40	3.51
26	5.36	5.21	4.88	4.68	4.77	4.96
28	7.54	7.31	6.78	6.42	6.52	6.83
30	10.4	10.0	9.2	8.6	8.7	9.2
32	14.0	13.5	12.4	11.5	11.5	12.1
34	18.5	17.9	16.3	15.0	14.9	15.6
36	24.2	23.3	21.2	19.3	19.0	19.9
38	31.1	29.9	27.1	24.6	24.0	25.1
40	39.6	38.0	34.3	30.9	30.0	31.2
42	49.7	47.7	43.0	38.6	37.2	38.5
44	61.8	59.3	53.4	47.6	45.7	47.1
46	76.1	73.0	65.6	58.3	55.7	57.0
48	92.9	89.1	80.0	70.9	67.3	68.6
50	113.	108.	97.	86.	81.	82.

Tabla 2.6 Factores de equivalencia para cargas por ejes tandem y Pt de 2.0

Carga por eje (kips)	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
4	.0003	.0003	.0003	.0002	.0002	.0002
6	.001	.001	.001	.001	.001	.001
8	.003	.003	.003	.003	.003	.002
10	.007	.008	.008	.007	.006	.006
12	.013	.016	.016	.014	.013	.012
14	.024	.029	.029	.026	.024	.023
16	.041	.048	.050	.046	.042	.040
18	.066	.077	.081	.075	.069	.066
20	.103	.117	.124	.117	.109	.105
22	.156	.171	.183	.174	.164	.158
24	.227	.244	.260	.252	.239	.231
26	.322	.340	.360	.353	.338	.329
28	.447	.465	.487	.481	.466	.455
30	.607	.623	.646	.643	.627	.617
32	.810	.823	.943	.842	.829	.819
34	1.06	1.07	1.08	1.08	1.08	1.07
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.76	1.75	1.73	1.72	1.73	1.74
40	2.22	2.19	2.15	2.13	2.16	2.18
42	2.77	2.73	2.64	2.62	2.66	2.70
44	3.42	3.36	3.23	3.18	3.24	3.31
46	4.20	4.11	3.92	3.83	3.91	4.02
48	5.10	4.98	4.72	4.58	4.68	4.83
50	6.15	5.99	5.64	5.44	5.56	5.77
52	7.37	7.16	6.71	6.43	6.56	6.83
54	8.77	8.51	7.93	7.55	7.69	8.03
56	10.4	10.1	9.3	8.8	9.0	9.4
58	12.2	11.8	10.9	10.3	10.4	10.9
60	14.3	13.8	12.7	11.9	12.0	12.6
62	16.6	16.0	14.7	13.7	13.8	14.5
64	19.3	18.6	17.0	15.8	15.8	16.6
66	22.2	21.4	19.6	18.0	18.0	18.9
68	25.5	24.6	22.4	20.6	20.5	21.5
70	29.2	28.1	25.6	23.4	23.2	24.3
72	33.3	32.0	29.1	26.5	26.2	27.4
74	37.8	36.4	33.0	30.0	29.4	30.8
76	42.8	41.2	37.3	33.8	33.1	34.5
78	48.4	46.5	42.0	38.0	37.0	38.6
80	54.4	52.3	47.2	42.5	41.3	43.0
82	61.1	58.7	52.9	47.6	46.0	47.8
94	68.4	65.7	59.2	53.0	51.2	53.0
86	76.3	73.3	66.0	59.0	56.8	58.6
88	85.0	81.6	73.4	65.5	62.8	64.7
90	94.4	90.6	81.5	72.6	69.4	71.3

Tabla 2.7 Factores de equivalencia para cargas por ejes triples y Pt de 2.0

Carga por eje (kips)	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
4	.0001	.0001	.0001	.0001	.0001	.0001
6	.0004	.0004	.0003	.0003	.0003	.0003
8	.0009	.0010	.0009	.0008	.0007	.0007
10	.002	.002	.002	.002	.002	.001
12	.004	.004	.004	.003	.003	.003
14	.006	.007	.007	.006	.006	.005
16	.010	.012	.012	.010	.009	.009
18	.016	.019	.019	.017	.015	.015
20	.024	.029	.029	.026	.024	.023
22	.034	.042	.042	.038	.035	.034
24	.049	.058	.060	.055	.051	.048
26	.068	.080	.083	.077	.071	.068
28	.093	.107	.113	.105	.098	.094
30	.125	.140	.149	.140	.131	.126
32	.164	.182	.194	.194	.173	.167
34	.213	.233	.248	.238	.225	.217
36	.273	.294	.313	.303	.288	.279
38	.346	.368	.390	.381	.364	.353
40	.434	.456	.491	.473	.454	.443
42	.538	.560	.587	.580	.561	.548
44	.662	.682	.710	.705	.686	.673
46	.907	.825	.852	.849	.831	.818
48	.976	.992	1.015	1.014	.999	.997
50	1.17	1.18	1.20	1.20	1.19	1.18
52	1.40	1.40	1.42	1.42	1.41	1.40
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.95	1.93	1.93	1.94	1.94
58	2.29	2.27	2.24	2.23	2.25	2.27
60	2.67	2.64	2.59	2.57	2.60	2.63
62	3.10	3.06	2.98	2.95	2.99	3.04
64	3.59	3.53	3.41	3.37	3.42	3.49
66	4.13	4.05	3.89	3.83	3.90	3.99
68	4.73	4.63	4.43	4.34	4.42	4.54
70	5.40	5.28	5.03	4.90	5.00	5.15
72	6.15	6.00	5.68	5.52	5.63	5.82
74	6.97	6.79	6.41	6.20	6.33	6.56
76	7.88	7.67	7.21	6.94	7.08	7.36
79	8.88	8.63	8.09	7.75	7.90	8.13
50	9.98	9.69	9.05	9.63	8.79	9.18
82	11.2	10.9	10.1	9.6	9.8	10.2
84	12.5	12.1	11.2	10.6	10.8	11.3
86	13.9	13.5	12.5	11.8	11.9	12.5
88	15.5	15.0	13.8	13.0	13.2	13.8
90	17.2	16.6	15.3	14.3	14.5	15.2

Tabla 2.8 Factores de equivalencia para cargas por ejes sencillos y Pt de 2.5

Carga por eje (kips)	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	.0004	.0004	.0003	.0002	.0002	.0002
4	.003	.004	.004	.003	.002	.002
6	.011	.017	.017	.013	.010	.009
8	.032	.047	.051	.041	.034	.031
10	.078	.102	.118	.102	.088	.080
12	.168	.198	.229	.213	.189	.176
14	.328	.358	.399	.388	.360	.342
16	.591	.613	.646	.645	.623	.606
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.57	1.49	1.47	1.51	1.55
22	2.48	2.38	2.17	2.09	2.18	2.30
24	3.69	3.49	3.09	2.89	3.03	3.27
26	5.33	4.99	4.31	3.91	4.09	4.48
28	7.49	6.98	5.90	5.21	5.39	5.98
30	10.3	9.5	7.9	6.8	7.0	7.8
32	13.9	12.8	10.5	8.8	8.9	10.0
34	18.4	16.9	13.7	11.3	11.2	12.5
36	24.0	22.0	17.7	14.4	13.9	15.5
38	30.9	28.3	22.6	18.1	17.2	19.0
40	39.3	35.9	28.5	22.5	21.1	23.0
42	49.3	45.0	35.6	27.8	25.6	27.7
44	61.3	55.9	44.0	34.0	31.0	33.1
46	75.5	68.8	54.0	41.4	37.2	39.3
48	92.2	83.9	65.7	50.1	44.5	46.5
50	112.	102.	79.	60.	53.	55.

Tabla 2.9 Factores de equivalencia para cargas por ejes tandem y Pt de 2.5

Carga por eje (kips)	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	.0001	.0001	.0001	.0000	.0000	.0000
4	.0005	.0005	.0004	.0003	.0003	.0002
6	.002	.002	.002	.001	.001	.001
8	.004	.006	.005	.004	.003	.003
10	.008	.013	.011	.009	.007	.006
12	.015	.024	.023	.018	.014	.013
14	.026	.041	.042	.033	.027	.024
16	.044	.065	.070	.057	.047	.043
18	.070	.097	.109	.092	.077	.070
20	.107	.141	.162	.141	.121	.110
22	.160	.198	.229	.207	.180	.166
24	.231	.273	.315	.292	.260	.242
26	.327	.370	.420	.401	.364	.342
28	.451	.493	.548	.534	.495	.470
30	.611	.648	.703	.695	.658	.633
32	.813	.843	.889	.887	.857	.834
34	1.06	1.08	1.11	1.11	1.09	1.08
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.75	1.73	1.69	1.68	1.70	1.73
40	2.21	2.16	2.06	2.03	2.08	2.14
42	2.76	2.67	2.49	2.43	2.51	2.61
44	3.41	3.27	2.99	2.88	3.00	3.16
46	4.18	3.98	3.58	3.40	3.55	3.79
48	5.08	4.80	4.25	3.98	4.17	4.49
50	6.12	5.76	5.03	4.64	4.86	5.28
52	7.33	6.87	5.93	5.38	5.63	6.17
54	8.72	8.14	6.95	6.22	6.47	7.15
56	10.3	9.6	8.1	7.2	7.4	8.2
58	12.1	11.3	9.4	8.2	8.4	9.4
60	14.2	13.1	10.9	9.4	9.6	10.7
62	16.5	15.3	12.6	10.7	10.8	12.1
64	19.1	17.6	14.5	12.2	12.2	13.7
66	22.1	20.3	16.6	13.8	13.7	15.4
68	25.3	23.3	18.9	15.6	15.4	17.2
70	29.0	26.6	21.5	17.6	17.2	19.2
72	33.0	30.3	24.4	19.8	19.2	21.3
74	37.5	34.4	27.6	22.2	21.3	23.6
76	42.5	38.9	31.1	24.8	23.7	26.1
78	48.0	43.9	35.0	27.8	26.2	28.8
80	54.0	49.4	39.2	30.9	29.0	31.7
82	60.6	55.4	43.9	34.4	32.0	34.8
84	67.8	61.9	49.0	38.2	35.3	38.1
86	75.7	69.1	54.5	42.3	38.8	41.7
88	84.3	76.9	60.6	46.8	42.6	45.6
90	93.7	85.4	67.1	51.7	46.8	49.7

Tabla 2.10 Factores de equivalencia para cargas por ejes triples y Pt de 2.5

Carga por eje (kips)	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
4	.0002	.0002	.0002	.0001	.0001	.0001
6	.0006	.0007	.0005	.0004	.0003	.0003
8	.001	.002	.001	.001	.001	.001
10	.003	.004	.003	.002	.002	.002
12	.005	.007	.006	.004	.003	.003
14	.008	.012	.010	.008	.006	.006
16	.012	.019	.018	.013	.011	.010
18	.018	.029	.028	.021	.017	.016
20	.027	.042	.042	.032	.027	.024
22	.038	.058	.060	.048	.040	.036
24	.053	.078	.084	.068	.057	.051
26	.072	.103	.114	.095	.080	.072
28	.098	.133	.151	.128	.109	.099
30	.129	.169	.195	.170	.145	.133
32	.169	.213	.247	.220	.191	.175
34	.219	.266	.308	.281	.246	.228
36	.279	.329	.379	.352	.313	.292
38	.352	.403	.461	.436	.393	.368
40	.439	.491	.554	.533	.487	.459
42	.543	.594	.661	.644	.597	.567
44	.666	.714	.781	.769	.723	.692
46	.811	.854	.918	.911	.868	.838
48	.979	1.015	1.072	1.069	1.033	1.005
50	1.17	1.20	1.24	1.25	1.22	1.20
52	1.40	1.41	1.44	1.44	1.43	1.41
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.93	1.90	1.90	1.91	1.93
58	2.29	2.25	2.17	2.16	2.20	2.24
60	2.67	2.60	2.48	2.44	2.51	2.58
62	3.09	3.00	2.82	2.76	2.85	2.95
64	3.57	3.44	3.19	3.10	3.22	3.36
66	4.11	3.94	3.61	3.47	3.62	3.81
68	4.71	4.49	4.06	3.88	4.05	4.30
70	5.38	5.11	4.57	4.32	4.52	4.94
72	6.12	5.79	5.13	4.80	5.03	5.41
74	6.93	6.54	5.74	5.32	5.57	6.0.4
76	7.94	7.37	6.41	5.88	6.15	6.71
78	8.83	8.28	7.14	6.49	6.78	7.43
80	9.92	9.28	7.95	7.15	7.45	8.21
82	11.1	10.4	8.8	7.9	8.2	9.0
84	12.4	11.6	9.8	8.6	8.9	9.9
86	13.8	12.9	10.8	9.5	9.8	10.9
88	15.4	14.3	11.9	10.4	10.6	11.9
90	17.1	15.8	13.2	11.3	11.6	12.9

Tabla 2.11 Factores de equivalencia para cargas por ejes sencillos y Pt de 3.0

Carga por eje (kips)	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	.0008	.0009	.0006	.0003	.0002	.0002
4	.004	.008	.006	.004	.002	.002
6	.014	.030	.028	.018	.012	.010
8	.035	.070	.080	.055	.040	.034
10	.082	.132	.168	.132	.101	.086
12	.173	.231	.296	.260	.212	.187
14	.332	.388	.468	.447	.391	.358
16	.594	.633	.695	.693	.651	.622
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.60	1.53	1.41	1.38	1.44	1.51
22	2.47	2.29	1.96	1.83	1.97	2.16
24	3.67	3.33	2.69	2.39	2.60	2.96
26	5.29	4.72	3.65	3.08	3.33	3.91
28	7.43	6.56	4.88	3.93	4.17	5.00
30	10.2	8.9	6.5	5.0	5.1	6.3
32	13.8	12.0	8.4	6.2	6.3	7.7
34	18.2	15.7	10.9	7.8	7.6	9.3
36	23.8	20.4	14.0	9.7	9.1	11.0
38	30.6	26.2	17.7	11.9	11.0	13.0
40	38.8	33.2	22.2	14.6	13.1	15.3
42	48.8	41.6	27.6	17.8	15.5	17.8
44	60.6	51.6	34.0	21.6	18.4	20.6
46	74.7	63.4	41.5	26.1	21.6	23.8
48	91.2	77.3	50.3	31.3	25.4	27.4
50	110.	94.	61.	37.	30.	32.

Tabla 2.12 Factores de equivalencia para cargas por ejes tandem y Pt de 3.0

Carga por eje (kips)	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	.0002	.0002	.0001	.0001	.0000	.0000
4	.001	.001	.001	.000	.000	.000
6	.003	.004	.003	.002	.001	.001
8	.006	.011	.009	.005	.003	.003
10	.011	.024	.020	.012	.008	.007
12	.019	.042	.039	.024	.017	.014
14	.031	.066	.068	.045	.032	.026
16	.049	.096	.109	.076	.055	.046
18	.075	.134	.164	.121	.090	.076
20	.113	.181	.232	.182	.139	.119
22	.166	.241	.313	.260	.205	.178
24	.238	.317	.407	.358	.292	.257
26	.333	.413	.517	.476	.402	.360
28	.457	.534	.643	.614	.538	.492
30	.616	.684	.788	.773	.702	.656
32	.817	.870	.956	.953	.896	.855
34	1.07	1.10	1.15	1.15	1.12	1.09
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.75	1.71	1.64	1.62	1.66	1.70
40	2.21	2.11	1.94	1.89	1.98	2.08
42	2.75	2.59	2.29	2.19	2.33	2.50
44	3.39	3.15	2.70	2.52	2.71	2.97
46	4.15	3.81	3.16	2.89	3.13	3.50
48	5.04	4.58	3.70	3.29	3.57	4.07
50	6.08	5.47	4.31	3.74	4.05	4.70
52	7.27	6.49	5.01	4.24	4.57	5.37
54	8.65	7.67	5.81	4.79	5.13	6.10
56	10.2	9.0	6.7	5.4	5.7	6.9
58	12.0	10.6	7.7	6.1	6.4	7.7
60	14.1	12.3	8.9	6.8	7.1	8.6
62	16.3	14.2	10.2	7.7	7.8	9.5
64	18.9	16.4	11.6	8.6	8.6	10.5
66	21.8	18.9	13.2	9.6	9.5	11.6
68	25.1	21.7	15.0	10.7	10.5	12.7
70	28.7	24.7	17.0	12.0	11.5	13.9
72	32.7	28.1	19.2	13.3	12.6	15.2
74	37.2	31.9	21.6	14.8	13.8	16.5
76	42.1	36.0	24.3	16.4	15.1	17.9
78	47.5	40.6	27.3	18.2	16.5	19.4
90	53.4	45.7	30.5	20.1	18.0	21.0
82	60.0	51.2	34.0	22.2	19.6	22.7
84	67.1	57.2	37.9	24.6	21.3	24.5
86	74.9	63.8	42.1	27.1	23.2	26.4
88	83.4	71.0	46.7	29.8	25.2	28.4
90	92.7	78.8	51.7	32.7	27.4	30.5

Tabla 2.13 Factores de equivalencia para cargas por ejes triples y Pt de 3.0

Carga por eje (kips)	Número estructural					
	1	2	3	4	5	6
2	.0001	.0001	.0001	.0000	.0000	.0000
4	.0005	.0004	.0003	.0002	.0001	.0001
6	.001	.001	.001	.001	.000	.000
8	.003	.004	.002	.001	.001	.001
10	.005	.008	.005	.003	.002	.002
12	.007	.014	.010	.006	.004	.003
14	.011	.023	.018	.011	.007	.006
16	.016	.035	.030	.018	.013	.010
18	.022	.050	.047	.029	.020	.017
20	.031	.069	.069	.044	.031	.026
22	.043	.090	.097	.065	.046	.039
24	.059	.116	.132	.092	.066	.056
26	.079	.145	.174	.126	.092	.078
28	.104	.179	.223	.168	.126	.107
30	.136	.218	.279	.219	.167	.143
32	.176	.265	.342	.279	.218	.188
34	.226	.319	.413	.350	.279	.243
36	.286	.382	.491	.432	.352	.310
38	.359	.456	.577	.524	.437	.389
40	.447	.543	.671	.626	.536	.483
42	.550	.643	.775	.740	.649	.593
44	.673	.760	.889	.865	.777	.720
46	.817	.894	1.014	1.001	.920	.865
48	.994	1.048	1.152	1.148	1.080	1.030
50	1.18	1.23	1.30	1.31	1.26	1.22
52	1.40	1.43	1.47	1.48	1.45	1.43
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.92	1.86	1.85	1.88	1.91
58	2.28	2.21	2.09	2.06	2.13	2.20
60	2.66	2.54	2.34	2.28	2.39	2.50
62	3.08	2.92	2.61	2.52	2.66	2.84
64	3.56	3.33	2.92	2.77	2.96	3.19
66	4.09	3.79	3.25	3.04	3.27	3.58
68	4.68	4.31	3.62	3.33	3.60	4.00
70	5.34	4.88	4.02	3.64	3.94	4.44
72	6.08	5.51	4.46	3.97	4.31	4.91
74	6.89	6.21	4.94	4.32	4.69	5.40
76	7.78	6.98	5.47	4.70	5.09	5.93
78	8.76	7.83	6.04	5.11	5.51	6.48
80	9.84	8.75	6.67	5.54	5.96	7.06
82	11.0	9.8	7.4	6.0	6.4	7.7
84	12.3	10.9	8.1	6.5	6.9	8.3
86	13.7	12.1	8.9	7.0	7.4	9.0
88	15.3	13.4	9.8	7.6	8.0	9.6
90	16.9	14.8	10.7	8.2	8.5	10.4

en donde:

$W_{18}$  es el tránsito acumulado en el primer año, en ejes acumulados sencillos, de 82 kN (18 000 lb), en el carril de diseño

$D_D$  es el factor de distribución direccional, 50% en general

$w_{18}$  son los ejes acumulados equivalentes en ambas direcciones

$D_L$  es el factor de distribución por carril

Por otro lado, debe tomarse en cuenta la distribución del tránsito de manera transversal, considerando el número de carriles de la vialidad, a partir de lo indicado en la tabla 2.14.

Tabla 2.14 Factor de distribución por carril

Número de carriles en cada dirección	Porcentaje del número de ejes equivalente en el carril de diseño
1	100
2	80-100
3	60-80
4	50-75

Una vez calculados los ejes equivalentes acumulados en el primer año se deberá calcular el número de ejes equivalentes acumulados para el periodo de diseño con base en la tasa de crecimiento anual.

c) Tipología de vehículos.

En la tabla 2.15 se indican los diferentes tipos de vehículos autorizados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, para circular por las vialidades nacionales.

d) Periodo o ciclo de proyecto.

Es importante definir la magnitud del ciclo de proyecto, ya que el número de ejes equivalente deberá acumularse en dicho ciclo. Por lo general se consideran periodos de diseño de diez a 20 años, lapso en el cual se espera que el

Tabla 2.15 Tipología de vehículos autorizados por la SCT para circular por las vialidades nacionales

Vehículo	Designación	Peso por eje, tonelada				
		1	2	3	4	5
Automóvil	A2	1.0	1.0			
Camión ligero con capacidad de carga hasta de 3 toneladas	A'2	1.7	3.8			
Autobús de dos ejes	B2	5.5	10.0			
Autobús de tres ejes	B3	5.5	14.0 D			
Autobús de cuatro ejes	B4	7.0 D	14.0-D			
Camión de dos ejes	C2	5.5	10.0			
Camión de tres ejes	C3	5.5	18.0-D			
Camión de cuatro ejes	C4	5.5	22.5-T			
Tractor de dos ejes con semirremolque de un eje	T2-S1	5.5	10.0	10.0		
Tractor de dos ejes con semirremolque de dos ejes	T2-S2	5.5	10.0	18.0-D		
Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes	T3-S2	5.5	18.0-D	18.0-D		
Tractor de tres ejes con semirremolque de tres ejes	T3-S3	5.5	18.0-D	22.5-T		
Camión de dos ejes con remolque de dos ejes	C2-R2	5.5	10.0	10.0	10.0	
Camión de tres ejes con remolque de dos ejes	C3-R2	5.5	18.0-D	10.0	10.0	
Camión de tres ejes con remolque de tres ejes	C3-R3	5.5	18.0-D	10.0	18.0-D	
Tractor de dos ejes con semirremolque de un eje y remolque de dos ejes	T2-S1-R2	5.5	10.0	10.0	10.0	
Tractor de dos ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de dos ejes	T2-S2-R2	5.5	10.0	18.0-D	10.0	10.0

Tabla 2.15 Tipología de vehículos autorizados por la SCT para circular por las vialidades nacionales (continuación)

Vehículo	Designación	Peso por eje, tonelada				
		1	2	3	4	5
Tractor de tres ejes con semirremolque de un eje y remolque de dos ejes	T3-S1-R2	5.5	18.0-D	10.0	10.0	10.0
Tractor de dos ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de dos ejes	T3-S2-R2	5.5	18.0-D	18.0-D	10.0	10.0
Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de tres ejes	T3-S2-R3	5.5	18.0	18.0	10.0	18.0
Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de cuatro ejes	T3-S2-R4	5.5	18.0	18.0	18.0	18.0

D = eje doble o tandem

T = eje triple o tridem

pavimento alcance el índice de servicio terminal elegido. Dicho periodo puede ser asignado por el organismo que requiere el proyecto o bien propuesto por el proyectista, en función de su experiencia, tipo de carretera, etcétera, pudiendo utilizar como guía los periodos presentados en la tabla 2.16.

Tabla 2.16 Periodos o ciclos de proyecto de acuerdo con el tipo de vialidad

Tipo de vialidad	Periodo de proyecto, años
Urbana, con elevado nivel de tránsito	30-50
Principal, con elevado nivel de tránsito	20-50
Secundaria, con bajo nivel de tránsito	15-25

e) Volumen de tránsito y tasa de crecimiento.

Generalmente el número inicial de vehículos que operará en el pavimento es proporcionado por el organismo que requiere el proyecto, así como la respectiva tasa de crecimiento que deberá considerarse aplicada en el periodo de análisis. El proyectista puede, en caso dado, recurrir a la información obtenida a partir del estudio de tránsito para vialidades semejantes al objeto del estudio, además de la información estadística.

En relación con la forma de tomar en cuenta el aspecto del incremento en el volumen de tránsito, en el apéndice D de la guía AASHTO de referencia, se presentan lineamientos útiles para tal objeto. Ahí se plantea recurrir a factores de incremento de tránsito para diferentes tasas de incremento desde 0 a 10 y periodos de análisis de uno a 35 años. Los factores propuestos multiplicados por el volumen de tránsito inicial, proporcionarán el volumen total de tránsito esperado en el periodo de análisis.

f) Coeficiente de drenaje ( $C_d$ )

Es ampliamente conocido que la presencia de agua es uno de los factores que mayormente contribuye al deterioro de los pavimentos, bien sea por la saturación y reducción de la resistencia de los materiales de las capas subrasante y de sub-base, o por favorecer el fenómeno de bombeo con expulsión de las partículas finas de las bases granulares a través de grietas y juntas, lo que conduce a una degradación de la capacidad de soporte estructural, oxidación y envejecimiento de las carpetas asfálticas, e inestabilidad y agrietamientos por cambios volumétricos debidos a cambios de humedad. En climas fríos ocurre el fenómeno de congelamiento-deshielo.

En la versión de 1986 de la guía, se propone reconocer la importancia del drenaje, haciendo intervenir un coeficiente ( $m_1$ ), que pretende tomar en cuenta los efectos de buenas o malas condiciones del drenaje en el diseño del pavimento.

Para seleccionar el valor del coeficiente  $m_1$ , se deben considerar las condiciones de saturación a que están expuestas las capas de sub-base y capa subrasante, debiendo consultarse la tabla 2.17, para determinar el valor del coeficiente en cada caso particular.

Para mejorar las condiciones de drenaje, se sugiere el empleo de subdrenes y capas de sub-base permeable, para prevenir, además, el bombeo prematuro y los deterioros asociados en el pavimento.

Tabla 2.17 Valores recomendados del coeficiente de drenaje ( $m_d$ ), para el diseño de pavimentos flexibles

Condición del drenaje	Porcentaje del tiempo en que la estructura del pavimento se encuentra expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación			
	< 1%	1 - 5%	5 - 25%	> 25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Buena	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Mala	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy mala	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Condición del drenaje	Lapso transcurrido para que el suelo sea drenado hasta alcanzar el 50% de saturación
Excelente	2 horas
Buena	1 día
Regular	7 días
Mala	1 mes
Muy mala	infinito

En el caso de que  $m_d = 1$ , se estima que las condiciones del drenaje no causan ningún impacto en el espesor del pavimento; si es menor que la unidad, el espesor se incrementa y para valores superiores a la unidad, el espesor decrecerá.

g) Confiabilidad ( $R, Z_R, S_o$ )

La confiabilidad puede definirse como la probabilidad estadística de que el pavimento cumpla con la vida de diseño. Generalmente, el comportamiento de un pavimento a lo largo del tiempo se representa mediante una curva, que manifiesta la forma en que el pavimento pierde progresivamente alguna de sus cualidades, por ejemplo su servicialidad. La ecuación de diseño propuesta por la AASHTO define la forma de la curva de comportamiento del pavimento atendiendo al concepto de servicialidad, con un nivel de confianza ( $R$ ) de 50%. El nivel de confianza para un proyecto en especial debe seleccionarse de acuerdo con el tipo e importancia de la carretera o vialidad, teniendo en cuenta lo recomendado en la tabla 2.18. Debe notarse que los valores mayores se recomiendan para vialidades sujetas a un uso intenso y con mayores exigencias de un mantenimiento mínimo.

Tabla 2.18 Niveles de confianza sugeridos para diferentes tipos de vialidades y carreteras.

Tipo de vialidad	Nivel de confianza	
	Vialidades urbanas	Carreteras
Autopistas y carreteras de primer orden	85-99.9	80-99.9
Carreteras y vialidades principales	80-99	75-95
Carreteras y vialidades secundarias	80-95	75-95
Vialidades de acceso y calles en general	50-80	50-80

Los niveles de confianza propuestos indican el porcentaje del área comprendida en la curva de distribución normal de servicialidad, a la derecha del nivel de confianza elegido. La distancia entre el valor medio, equivalente a un nivel de confianza  $R= 50\%$  y el correspondiente al nivel de confianza elegido para un caso en particular, es igual al producto  $Z_R * S_o$ ,

en donde:

$S_o$  es la desviación estándar total, que considera el monto del error estadístico incluido en la ecuación, como resultado de la variabilidad inherente a los materiales y a la construcción.

$Z_R$  es la desviación normal estándar para la distribución normal, para un nivel de confianza determinado.

Determinar el valor de  $S_o$  es difícil, pues requiere conocer la desviación estándar para cada parámetro involucrado, teniendo en cuenta las condiciones locales, razón por la cual se ha considerado a  $S_o$  dentro de un rango entre 0.3 y 0.4, recomendándose un valor de 0.45, para tomar en cuenta, además, el error relativo a la predicción del tránsito.

Por lo que respecta al parámetro  $Z_R$ , su valor depende del nivel de confianza elegido, y puede determinarse en tablas de tipo estadístico. Para efectos de su aplicación práctica, la tabla 2.19 presenta los valores de  $Z_R$  para los niveles de confianza recomendados en la tabla 2.18.

Tabla 2.19 Relación entre el nivel de confianza y la desviación normal estándar,  $Z_R$

Nivel de confianza, R	Desviación normal estándar $Z_R$	$Z_R S_o$
50	0.00	0.0
75	-0.674	-0.236
80	-0.841	-0.294
85	-1.037	-0.363
90	-1.282	-0.449
95	-1.645	-0.576
99.9	-3.090	-1.082

h) Módulo de resiliencia ( $M_r$ )

La característica básica que se requiere para el diseño de pavimento es el módulo de resiliencia ( $M_r$ ), que ha sustituido al valor de CBR y valor de "R" o módulo de reacción del estabilómetro de Hveem, aunque se establecen correlaciones al respecto y se obtiene de acuerdo con la especificación AASHTO T-274 como una medida de las propiedades elásticas del suelo.

Las razones principales por las que se adopta esta característica son las siguientes:

1. Indica la propiedad básica del material que puede utilizarse en el análisis mecanístico del sistema multicapa para predecir la rugosidad, agrietamiento, roderas, deterioros, etcétera.
2. Es una característica reconocida internacionalmente, como dato para la evaluación y diseño de pavimentos.
3. Se emplea una técnica de pruebas no destructivas que permite estimar el  $M_R$  de varios materiales directamente en el lugar.

Sin embargo, se han establecido correlaciones razonables con el CBR o valor relativo de soporte y el valor de "R", que están dadas por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}M_R \text{ (psi)} &= 1500 \times \text{CBR} \\M_R \text{ (psi)} &= 1000 + 555 \times R\end{aligned}$$

Estas expresiones son válidas, básicamente, para suelos finos o granulares, que cubren una amplia gama de materiales de terreno natural o terracerías, de soporte para pavimentos.

En aquellos casos especiales de suelos finos arcillosos y expansivos de muy bajo CBR, habrá que tomar las precauciones del caso, y hacer un análisis más detallado para determinar el  $M_R$ , con las debidas reservas en la aplicación de las expresiones anteriores.

Por otra parte, el diseñador deberá tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Asegurar que la compactación o densidad relativa del suelo de soporte se cumpla, ya que de ello depende el  $M_R$ . En caso de no lograrse la compactación deseada, ajustar el valor de  $M_R$ .
2. Suelos muy expansivos o resilentes deberán recibir especial atención, manteniendo el contenido de humedad bajo límites razonables que no afecten sustancialmente su comportamiento. Para ello, se analizarán cuestiones de drenaje y subdrenaje; o bien, procedimientos de estabilización

- con algún aditivo (cemento o cal); asimismo el uso de geotextiles puede ayudar en la solución de un buen diseño.
3. Problemas de suelos de alto contenido de materia orgánica, extremadamente compresibles, requieren de soluciones especiales, como sustitución por materiales adecuados, técnicas de preconsolidación, geotextiles, etcétera.
  4. Atención a suelos de características variables, con tratamientos de escarificación, recompactación, mezclado, como es el caso de zonas de cortes y rellenos, y tratar de manera adecuada las zonas de transición.
  5. A pesar de que en el diseño del pavimento se involucran consideraciones de drenaje, debe ponerse especial atención en aquellas zonas de alta precipitación pluvial donde los escurrimientos (superficiales y subterráneos) son considerables en época de lluvias. Al respecto, el diseñador debe considerar soluciones especiales de obras complementarias de subdrenaje, capas drenantes, filtros, tuberías de drenaje adicionales y canales, entre otros. Sobre todo donde existan suelos susceptibles a los cambios de humedad que afecten su capacidad de soporte.
  6. En suelos donde se dificulte la construcción, como son los suelos cohesivos que retienen mucho tiempo la humedad y no se pueden compactar adecuadamente, habría que adoptar soluciones especiales, como mezclado con materiales granulares, con arena o material seco, que aceleren el secado; o bien, colocar una capa subrasante sobre dicho suelo con material adecuado para trabajar sobre ella y que sirva de desplante al pavimento.

Se hace énfasis en el criterio de elegir el módulo resiliente adecuado, pues son muchos los factores asociados a él; no se debe limitar a contar con pocos valores de  $M_R$ , debiendo siempre obtener los suficientes para obtener un factor adecuado de confiabilidad.

Deberá obtenerse un "módulo de resiliencia efectivo", que es equivalente al efecto combinado de todos los valores de módulos estacionales.

Para la obtención del módulo estacional, o variaciones del  $M_R$  a lo largo de todas las estaciones del año, se ofrecen dos procedimientos: que se obtenga a partir de relación en el laboratorio entre el módulo de resiliencia y el

contenido de humedad de diferentes muestras en diferentes estaciones del año, o bien, utilizando algún equipo para medición de deflexiones sobre carreteras en servicio durante diferentes estaciones del año.

Para el diseño de pavimentos flexibles, se recomienda convertir los datos estacionales en módulo de resiliencia efectivo de la capa subrasante, con el auxilio de la figura 2.3 que proporciona un valor ponderado en función del "daño equivalente anual" obtenido para cada estación en particular. También puede utilizarse la siguiente ecuación:  $U_f = 1.18 \times 10^8 \cdot M_R^{-2.32}$

Donde:

$U_f$  = Daño relativo en cada estación (por mes o quincenal).

$M_R$  = Módulo de resiliencia de la capa subrasante, obtenido en laboratorio o con deflexiones cada quincena o mes.

Y, por último:

$$U_f = \text{promedio de daño relativo} = \frac{\sum U_f}{n}$$

por lo que el  $M_R$  efectivo será el que corresponda al  $U_f$  promedio.

En cuanto a los materiales de sub-base y base, el método reconoce la dificultad actual de determinar el  $M_R$  de estos materiales en el laboratorio y recomienda el uso de correlaciones con pruebas más accesibles, como el CBR, presentando gráficas en las que se correlacionan dichos parámetros para materiales granulares y estabilizados, incluyendo, además, correlaciones con otros parámetros.

i) Coeficiente de capa ( $a_i$ )

El método proporciona gráficas en las que pueden obtenerse los coeficientes de capa aplicables a los diferentes materiales de las capas consideradas de la estructura del pavimento, en función del  $M_R$  correspondiente. Las figuras 2.4 a 2.8 presentan los coeficientes de capas para concreto asfáltico, bases y sub-bases granulares y bases estabilizadas con cemento Pórtland o asfáltico.

Figura 2.3 Formato para calcular el módulo de resiliencia efectivo de la subrasante en pavimento flexible

Mes	Módulo de Resiliencia de la Subrasante $M_R(\text{psi})$	Daño Relativo $U_r$
Ene.		
Feb.		
Mar.		
Abr.		
May.		
Jun.		
Jul.		
Ago.		
Sept.		
Oct.		
Nov.		
Dic.		
Sumatoria:	$\Sigma U_f =$	

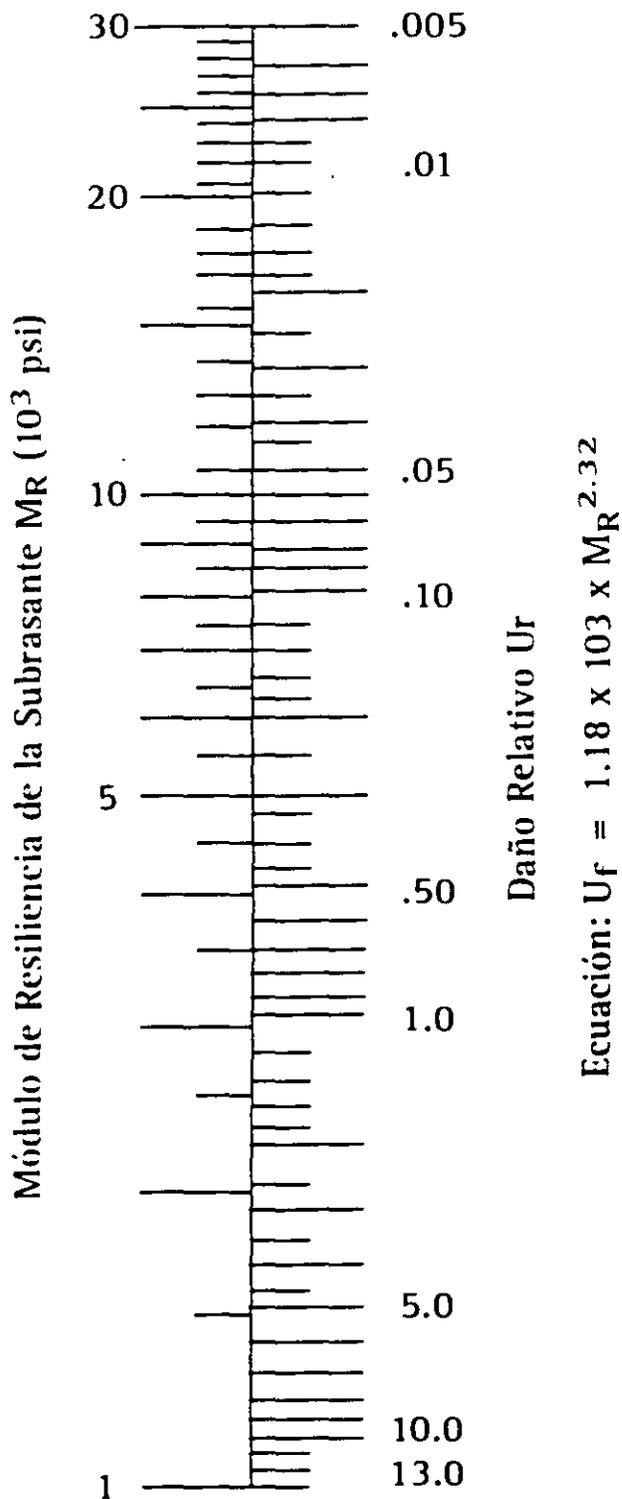


Figura 2.4 Gráfica para determinar el coeficiente estructural de capa "a<sub>1</sub>" en función del módulo elástico del concreto asfáltico

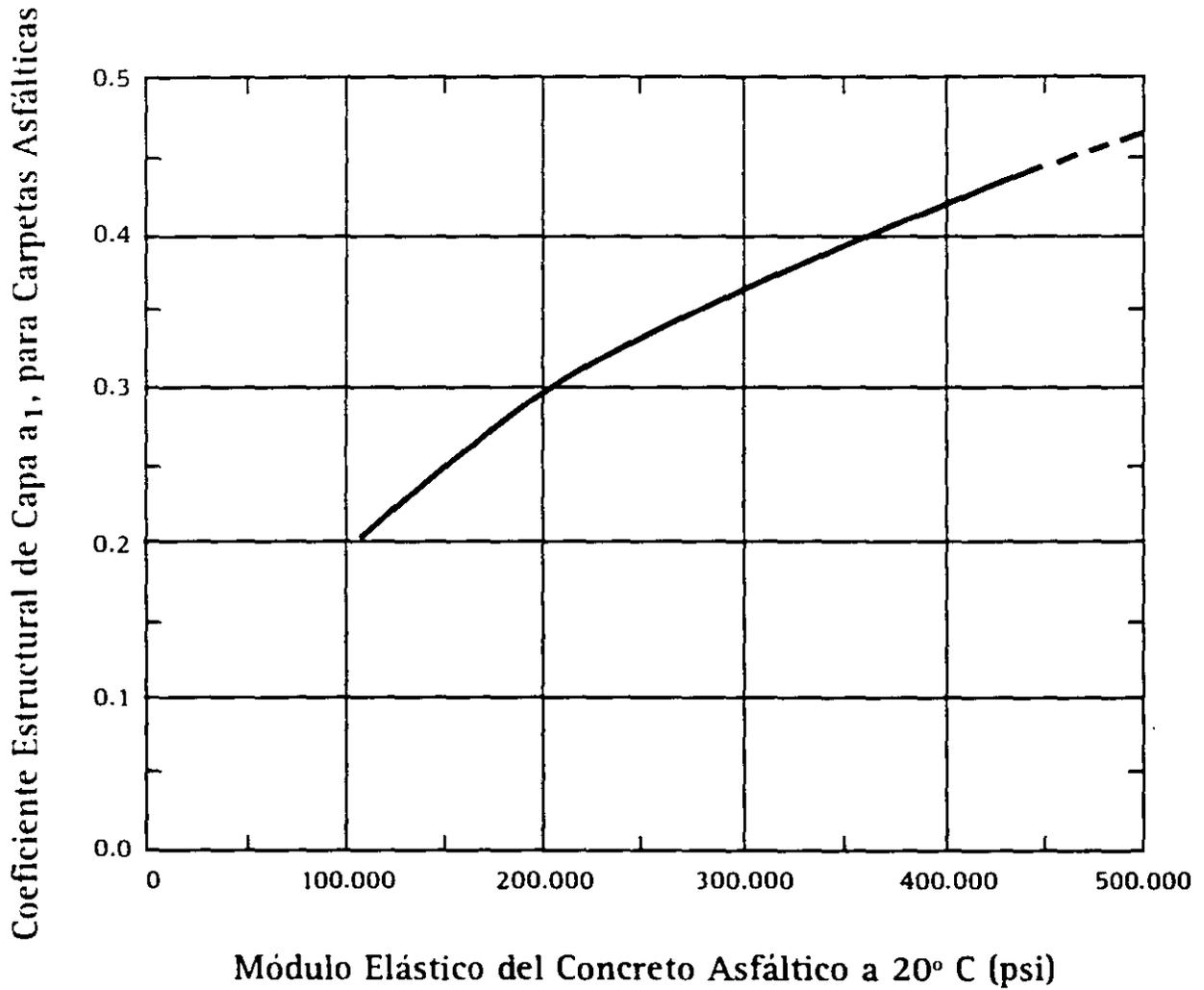
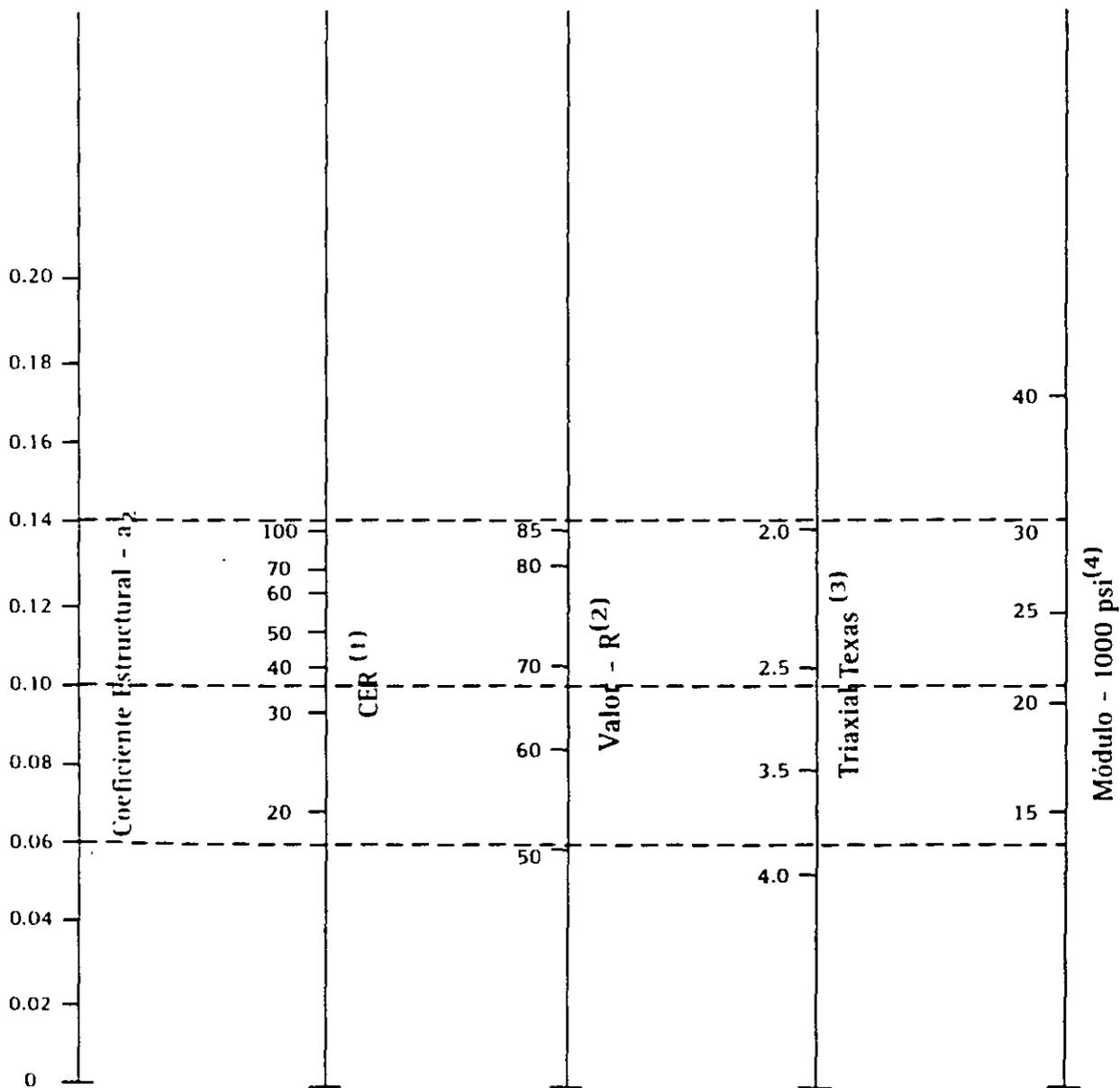
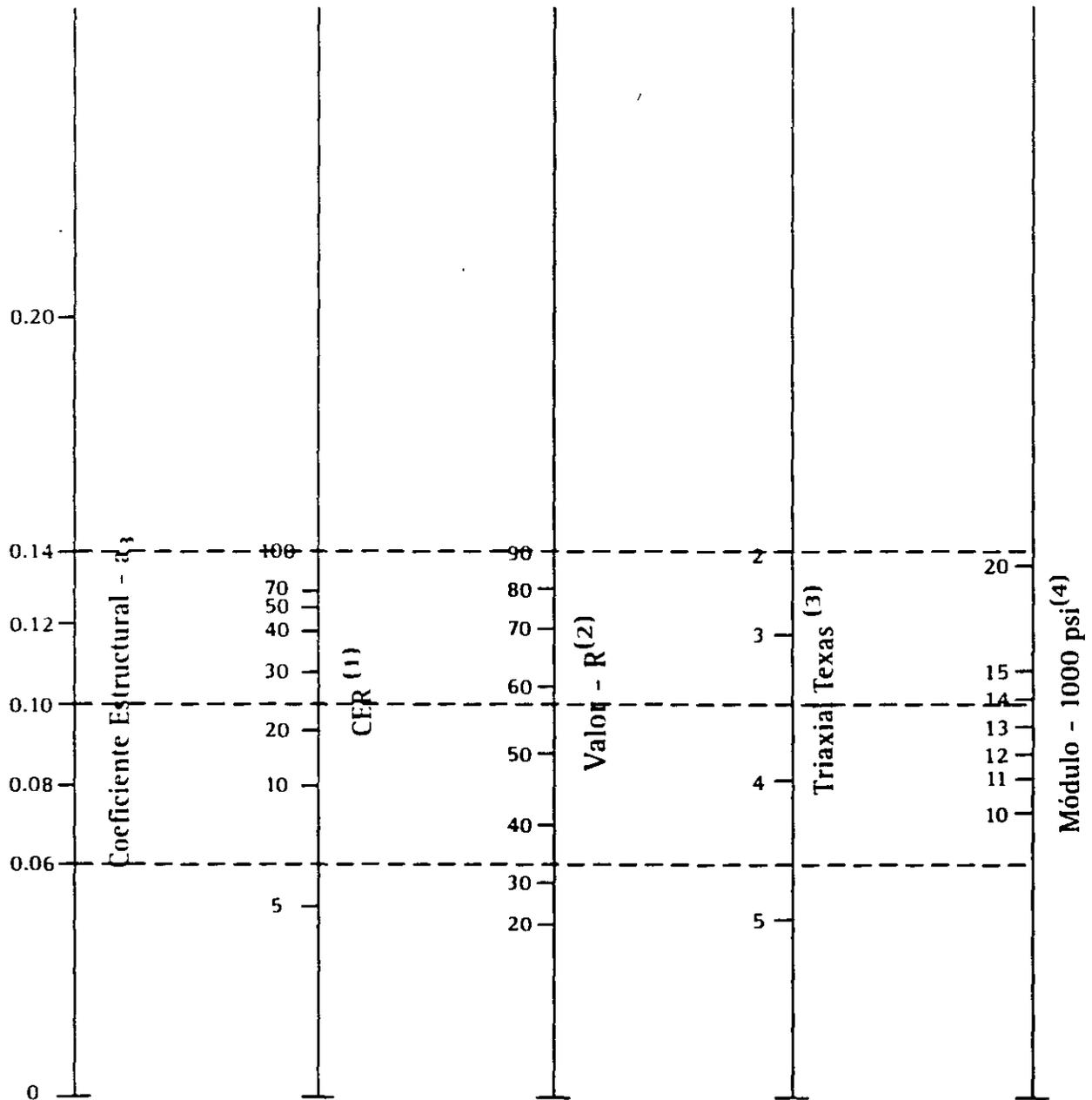


Figura 2.5 Variación de los coeficientes de capa "a<sub>2</sub>", en bases granulares



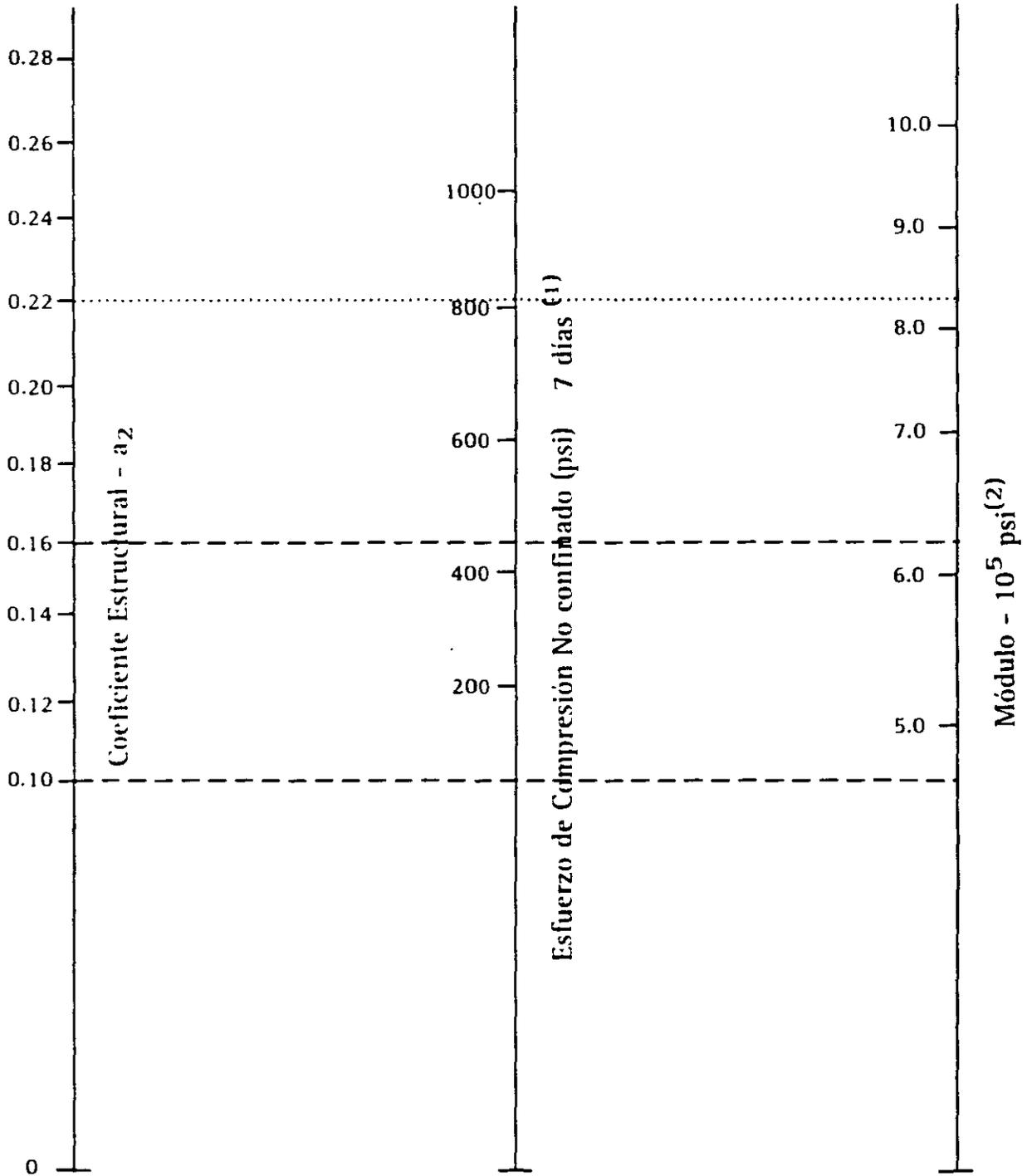
- (1) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de Illinois.
- (2) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de California, Nuevo México y Wyoming.
- (3) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de Texas.
- (4) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP.

Figura 2.6 Variación de los coeficientes de capa "a<sub>3</sub>",  
en sub-bases granulares



- (1) Escala derivada por correlaciones de Illinois.
- (2) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas del Instituto del Asfalto, California, Nuevo México y Wyoming.
- (3) Escala derivada por correlaciones obtenidas de Texas.
- (4) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP.

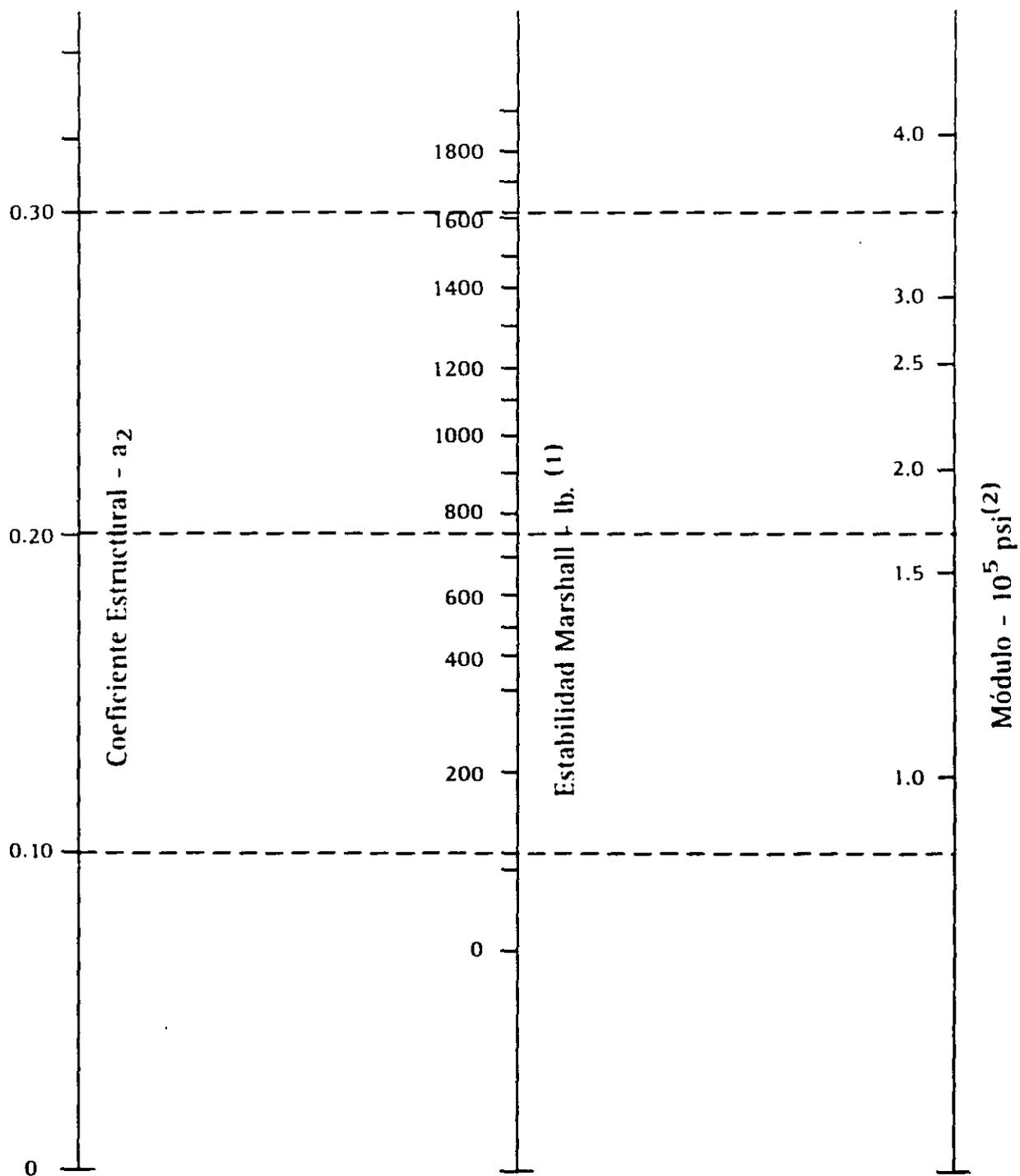
Figura 2.7 Variación de los coeficientes de capa "a<sub>2</sub>", en bases estabilizadas con cemento Portland



(1) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de Illinois, Louisiana y Texas.

(2) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP.

Figura 2.8 Variación de los coeficientes de capa "a<sub>2</sub>", en bases estabilizadas con asfalto



(1) Escala derivada por correlación obtenida de Illinois.

(2) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP.

Procedimiento de diseño.

1. Se utiliza el nomograma propuesto por el método asignando valores convenientes al nivel de confianza,  $R$ , y a la desviación estándar,  $S_o$  (figura 2.9).

El nivel de confianza se elige de acuerdo con el tipo considerado de vialidad (tabla 2.18), y el valor de  $S_o$  debe determinarse experimentalmente en función de la variabilidad observada en los materiales y en la calidad de la construcción, lo cual requiere de un seguimiento constante; por eso, en caso de no contar con la experiencia local, puede tomarse un valor de 0.45.

2. A continuación se deberá aplicar el tránsito equivalente acumulado, determinado para el carril de diseño. Es conveniente señalar que la capacidad de la escala es de 50 millones de ejes acumulados equivalentes, siendo necesario en caso de rebasar este valor, reconsiderar la distribución del tránsito, por ejemplo aumentando el número de carriles, etcétera. Para elegir los factores de equivalencia, deberá considerarse el valor terminal del índice de servicio considerado,  $P_t$  y partir de un número estructural adecuado, en función del espesor esperado de pavimento, o considerando un valor de 5 si no se puede estimar y repetir el proceso si el número estructural obtenido implica una diferencia en espesor de 2.5 centímetros en relación con el valor estimado.
3. Enseguida se utilizará el módulo de resiliencia de la capa de apoyo del pavimento para determinar el valor de  $SN$ , considerando, además, el decremento en la servicialidad y teniendo en cuenta el valor terminal de diseño y un valor inicial, que dependerá de la calidad de la construcción. Es conveniente que este valor inicial sea el mayor posible, para cumplir satisfactoriamente con la vida de diseño. La figura 2.10 presenta, en forma gráfica, el procedimiento recomendado.
4. Finalmente se procederá a determinar los espesores de las capas restantes considerando los coeficientes de cada capa y los números estructurales a diferentes niveles, como se indica en la citada figura 2.10.

Figura 2.9 Gráfica de diseño para estructuras de pavimento flexible

$$\log_{10} W_{18} = Z_R \cdot S_0 + 9.36 \cdot \log_{10}(SN+1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta \text{PSI}}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(NS+1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \log_{10} M_R - 8.07$$

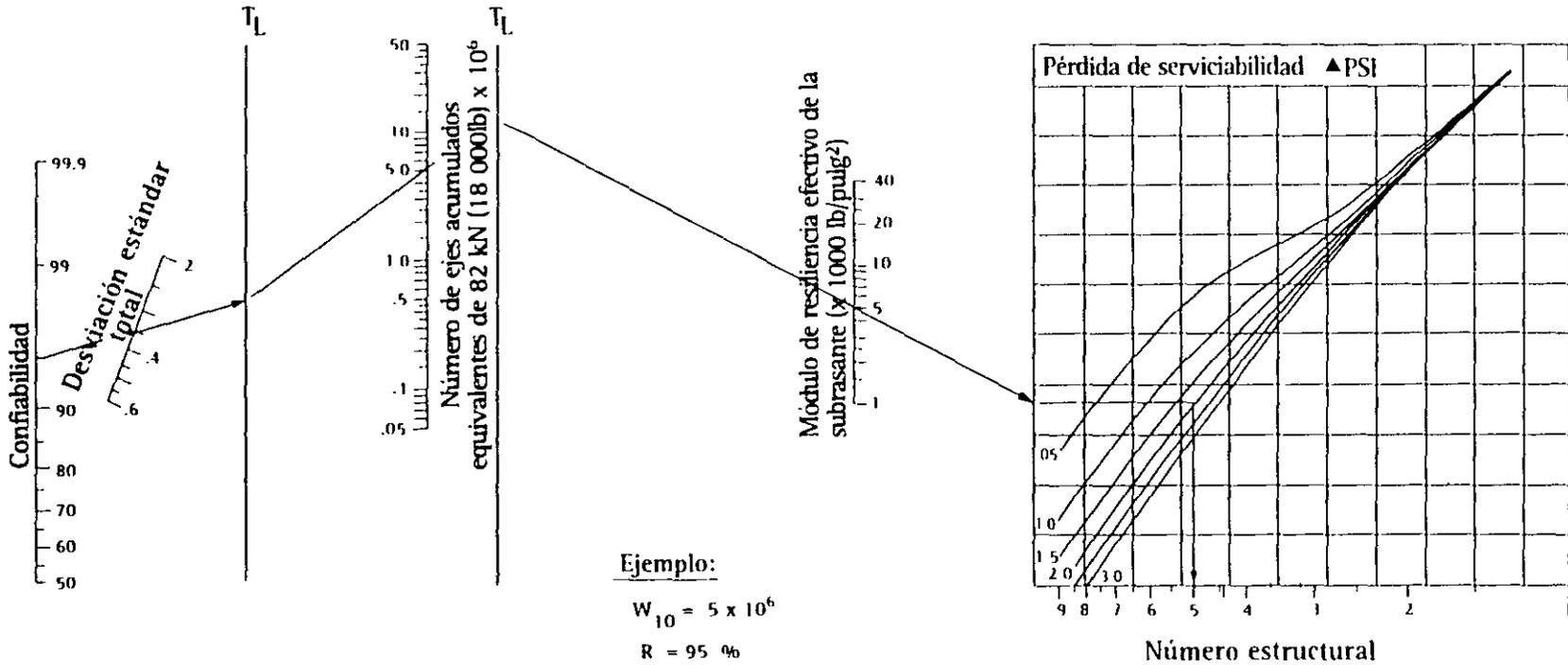
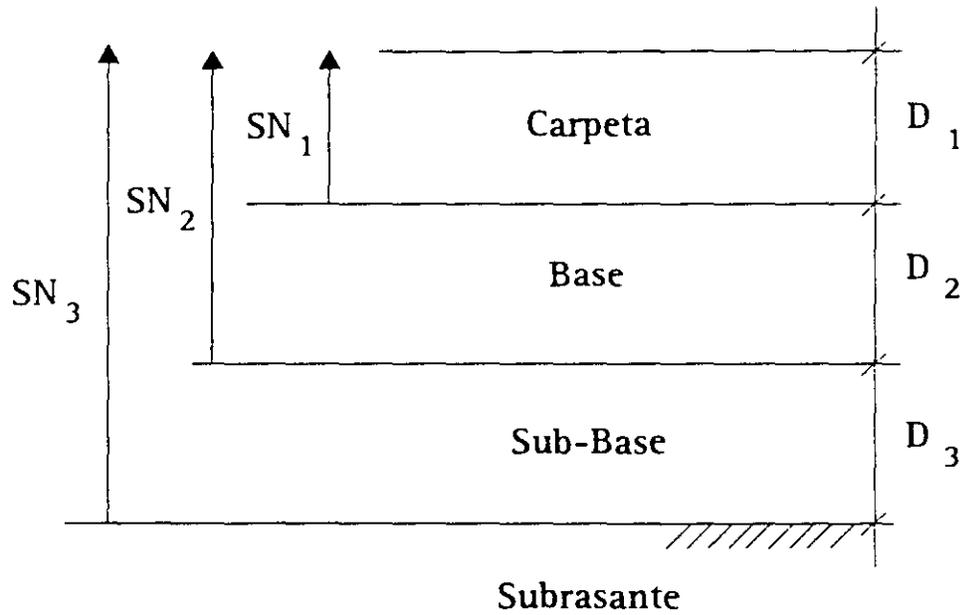


Figura 2.10 Procedimiento para determinar el espesor de las capas



$$D^*_{1} \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN^*_{1} = a_1 D_1 \geq SN_1$$

$$D^*_{2} \geq \frac{SN_2 - SN^*_{1}}{a_2 m_2}$$

$$SN^*_{1} + SN^*_{2} \geq SN_2$$

$$D^*_{3} \geq \frac{SN_3 - (SN^*_{1} + SN^*_{2})}{a_3 m_3}$$

Notas: 1) a, D, m, y SN corresponden a valores mínimos requeridos.

2) D\* y SN\* representan los valores finales de diseño.

También habrá que tomar en cuenta los valores mínimos de espesor recomendados en la siguiente tabla.

Espesor mínimo, en centímetros.

Tránsito acumulado equivalente	Concreto asfáltico	Base granular
< 50000	2.5 (1)	10
50001 - 150000	5.0	10
150001 - 500000	6.5	10
500001 - 2000000	7.5	15
2000001 - 7000000	9.0	15
> 7000000	10.0	15

(1) o tratamiento superficial

Debe hacerse notar que los módulos de resiliencia  $M_R$ , y los respectivos coeficientes estructurales  $a_i$ , que intervienen como factores de diseño, corresponden a los diferentes materiales disponibles, los cuales deberán satisfacer adicionalmente las especificaciones de calidad establecidas por el organismo (SCT, IMT AASHTO, etc.). Por otra parte, es conveniente plantear y analizar varias alternativas y definir sus correspondientes curvas de degradación y, por consiguiente, sus ciclos de vida, y tomar en cuenta, además, los trabajos de conservación y rehabilitación de cada una de las alternativas, para efectuar un análisis beneficio-costos, mediante el cual pueda determinarse la alternativa más económica o que corresponda a la utilización más conveniente de los recursos dentro de un presupuesto definido.

Es conveniente señalar que en este método se consideran y aplican los conceptos derivados del experimento llevado a cabo por la AASHTO, tales como la diferenciación entre falla estructural y funcional, índice de espesor y carga equivalente, conceptos que, por otro lado, son también utilizados por la moderna tecnología de pavimentos.

## **2.2.4 Método del Instituto del Asfalto**

En el periodo de 1954 a 1969 el Instituto del Asfalto publicó ocho ediciones de su manual *Manual Series (MS-1)*, para el diseño de pavimentos flexibles.

La publicación más reciente del instituto, editada en 1991, presenta cambios significativos respecto a los métodos anteriores para el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles. El método se basa principalmente en la aplicación de la teoría elástica en multicapas, que utiliza resultados de investigaciones recientes por parte de ese organismo.<sup>11</sup>

El manual presenta un procedimiento de diseño para obtener los espesores de la sección estructural de pavimentos, mediante un programa de computadora como DAMA o un conjunto de gráficas que cubren tres niveles de temperatura, donde se utilizan cemento asfáltico y emulsiones asfálticas en toda la sección o en parte de ella. Se incluyen varias combinaciones de superficies de rodamiento con concreto asfáltico, carpetas elaboradas con emulsiones asfálticas, bases asfálticas y bases o sub-bases granulares naturales.

### a) Estimación del tránsito

El método actual distingue el "periodo de diseño" del "periodo de análisis", considerando que un pavimento debe ser diseñado para soportar los efectos acumulados del tránsito para cualquier periodo de tiempo. El periodo, seleccionado en años, se define como "periodo de diseño". Al término de éste, se espera que el pavimento requiera alguna acción de rehabilitación mayor, como puede ser una sobrecarpeta de refuerzo para restaurar su condición original. La vida útil del pavimento, o "periodo de análisis", puede ser extendida indefinidamente a través de sobrecarpetas u otras acciones de rehabilitación, hasta que la carretera sea obsoleta por cambios significativos en pendientes, alineamiento geométrico y otros factores. En la versión reciente, el método considera periodos de diseño de unos 35 años, y tasas de crecimiento del tránsito del 2 al 10% anual. En la tabla 2.20 se presenta el denominado factor de crecimiento

---

<sup>11</sup> K. Lexington, "Thickness Design, Asphalt Pavements for Highways and Streets", en *Manual Series*, núm. 1. Estados Unidos, Instituto del Asfalto, 1993.

anual para determinar el tránsito acumulado en diferentes periodos de diseño y tasas de crecimientos de 2 a 10% anual.

Tabla 2.20. Factor de crecimiento del tránsito

Periodo de diseño, años (n)	Factor de crecimiento anual						
	2	4	5	6	7	8	10
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28
25	30.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35
30	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49
35	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02

Para calcular el porcentaje de camiones en el flujo vehicular sobre el carril de diseño, el método recomienda los valores indicados en la tabla 2.21.

Tabla 2.21 Porcentaje de camiones en el carril de diseño

Número de carriles en ambas direcciones	% de camiones en el carril de diseño
2	50
4	45
6 o más	40

Para el cálculo de los ejes equivalentes, el método recomienda utilizar la metodología de la AASHTO, en su versión 1993. Ahí el método proporciona, en la tabla 2.22, factores de equivalencia de la carga o coeficiente de daños para ejes sencillos, dobles o triples, incluyendo cargas sobre el eje desde 0.5 toneladas (1000 lb) hasta 41 toneladas (90000 lb), lo que se estima cubre sobradamente cualquier condición de peso de vehículos de carga.

Después de obtener los coeficientes por cada eje o conjunto de ejes, para cada vehículo, la suma de ellos proporcionará el coeficiente total de equivalencia del vehículo, factor de camión. Si se utiliza el factor anual de crecimiento del tránsito señalado en la tabla 2.20 y se multiplica por los coeficientes totales de equivalencia y por el número de vehículos del aforo del tránsito promedio anual, se obtendrán los ejes equivalentes acumulados reales para el periodo de diseño considerado.

El método incorpora factores de ajuste de los ejes equivalentes de diseño, para diferentes presiones de contacto de las llantas sobre el pavimento, en función de su presión de inflado y de los espesores de la carpeta asfáltica, donde contempla desde cuatro hasta diez pulgadas de espesor (10 y 25 centímetros respectivamente), ver figura 2.11.

Figura 2.11 Factor de ajuste de los ejes equivalentes por presión de la llanta

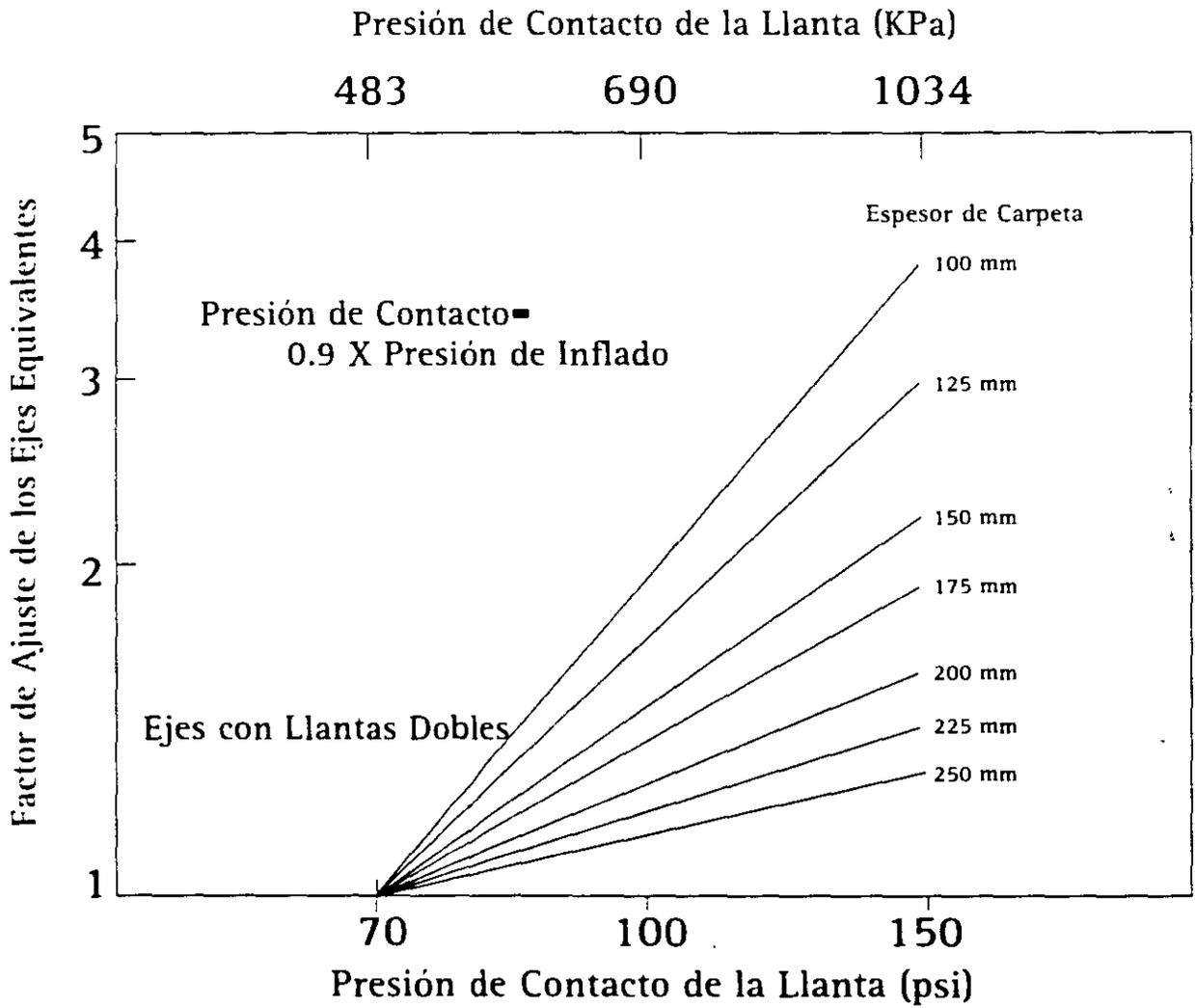


Tabla 2.22 Factores de equivalencia de carga

Carga total por eje o conjunto de ejes		Factores de equivalencia de carga		
KN	lb	eje sencillo	ejes dobles	ejes triples
4.45	1.000	0.00002		
8.9	2.000	0.00018		
17.8	4.000	0.00209	0.0003	
26.7	6.000	0.01043	0.001	0.0003
35.6	8.000	0.0343	0.003	0.001
44.5	10.000	0.0877	0.007	0.002
53.4	12.000	0.189	0.014	0.003
62.3	14.000	0.360	0.027	0.006
71.2	16.000	0.623	0.047	0.011
80.0	18.000	1.000	0.077	0.017
89.0	20.000	1.51	0.121	0.027
97.9	22.000	2.18	0.180	0.040
106.8	24.000	3.03	0.260	0.057
115.6	26.000	4.09	0.364	0.080
124.5	28.000	5.39	0.495	0.109
133.4	30.000	6.97	0.658	0.145
142.3	32.000	8.88	0.857	0.191
151.2	34.000	11.18	1.095	0.246
160.1	36.000	13.93	1.38	0.313
169.0	38.000	17.20	1.70	0.393
178.0	40.000	21.08	2.08	0.487
187.0	42.000	25.64	2.51	0.597
195.7	44.000	31.00	3.00	0.723
204.5	46.000	37.24	3.55	0.868
213.5	48.000	44.50	4.17	1.033
222.4	50.000	52.88	4.86	1.22
231.3	52.000		5.63	1.43
240.2	54.000		6.47	1.66

Tabla 2.22 Factores de equivalencia de carga (continuación)

Carga total por eje o conjunto de ejes		Factores de equivalencia de carga		
KN	lb	eje sencillo	ejes dobles	ejes triples
249.0	56.000		7.41	1.91
258.0	58.000		8.45	2.20
267.0	60.000		9.59	2.51
275.8	62.000		10.84	2.85
284.5	64.000		12.22	3.22
293.5	66.000		13.73	3.62
302.5	68.000		15.38	4.05
320.0	72.000		19.16	5.03
329.0	74.000		21.32	5.57
338.0	76.000		23.66	6.15
347.0	78.000		26.22	6.78
356.0	80.000		29.00	7.45
364.7	82.000		32.00	8.2
373.6	84.000		35.30	8.9
382.5	86.000		38.80	9.8
391.4	88.000		42.60	10.6
400.3	90.000		46.80	11.6

b) Evaluación de los materiales

Para el diseño de los espesores de una sección estructural de pavimento flexible, el método considera como parámetro fundamental, dentro de la evaluación de los materiales, la obtención del módulo de resiliencia ( $M_R$ ), con recomendaciones del método de prueba descrito en el Manual de Suelos MS-10 del propio instituto. Sin embargo, se reconoce que no todos los organismos o dependencias tienen el equipo necesario para llevar a cabo tal prueba, por lo que han establecido factores de correlación entre  $M_R$  y la prueba de valor

relativo de soporte (CBR), AASHTO T.193 compactando las muestras según el método AASHTO T 180, método B o D. Señalan que los resultados son bastante aproximados; sin embargo, para un diseño preciso, se recomienda llevar a cabo la prueba del módulo de resiliencia para la capa de subrasante. Se establecen los siguientes factores de correlación entre módulo de resiliencia y el CBR.

$$M_R \text{ (MPa)} = 10.3 \text{ CBR}$$

$$M_R \text{ (psi)} = 1,500 \text{ CBR}$$

Cabe hacer notar que tales correlaciones sólo se aplican a materiales de la capa subrasante, y no deben aplicarse a materiales granulares para capas de sub-base o de base.

Se recomienda, además, aplicar los métodos de prueba normalizados por AASHTO siguientes: límite líquido T89, límite plástico T90, índice plástico T90, granulometría T88, compactación T180, valor relativo soporte T193, valor R T190 y, para el módulo de resiliencia  $M_R$ , se recomienda utilizar el método descrito en el Manual de Suelos MS-10 del propio Instituto.

En función del tránsito esperado sobre el pavimento en estudio, el método recomienda los siguientes valores percentiles para definir el módulo de resiliencia de diseño de la capa subrasante.

Tabla 2.23 Valor de percentil para diseño de acuerdo al nivel del tránsito

Nivel del tránsito, EAL	Valor percentil, %
Menor de $10^4$ ejes equivalentes	60
Entre $10^4$ y $10^6$ ejes equivalentes	75
Mayor de $10^6$ ejes equivalentes	87.5

Con las muestras de material obtenidas en el campo y con los resultados obtenidos en el laboratorio para determinar los módulos de resiliencia, el diseñador deberá calcular el  $M_R$  de diseño de la capa subrasante, con los percentiles sugeridos en la tabla anterior.

Para los requerimientos de compactación en las capas de base y sub-base, el método proporciona las siguientes recomendaciones:

Capas de base y sub-base formadas con materiales granulares sin tratamiento, esto es, no estabilizadas, deberán compactarse con un contenido de humedad óptimo más menos 1.5 puntos en porcentaje, para alcanzar una densidad mínima del 100% de la densidad máxima de laboratorio, sugiriendo se utilice el método AASHTO T180.

También recomienda los siguientes valores para las diferentes pruebas a realizarse con materiales de bases y subbases.

**Tabla 2.24a Requisitos de calidad para materiales de bases y sub-bases**

Prueba	Requisitos para subbase	Requisitos para base
CBR, mínimo	20	80
Valor R, mínimo	55	78
Límite líquido, máximo	25	25
Índice plástico, máximo	6	NP
Equivalente de arena, mínimo	25	35
Material que pasa la malla 200, máximo,	12	7

El método contempla, además, factores de ambiente y varios tipos o clases de asfalto según las necesidades particulares de los usuarios. Esto es, tres diferentes temperaturas, según la región donde se pretenda construir el pavimento, climas fríos, templados y calientes, 7°C, 15.5°C y 24°C, respectivamente, empleando cementos asfálticos desde el AC-5 hasta el AC-40. Se recomienda la clasificación siguiente:

**Tabla 2.24b Grados de asfalto de acuerdo al tipo de clima**

Clima	Temperatura	Grados de asfalto
Frio	≤ 7°C	AC-5, AC-10
Templado	entre 7 y 24°C	AC-10, AC-20
Caliente	≥ 24°C	AC-20, AC-40

Para mezclas asfálticas con emulsiones se pueden utilizar tanto emulsiones catiónicas (AASHTO M208) o aniónicas (AASHTO M140). El grado o tipo de asfalto dependerá principalmente de su habilidad para cubrir los agregados, además de factores como la disponibilidad de agua en el sitio de trabajo, clima durante la construcción, procedimiento de mezclado y curado del material.

En cuanto a requerimientos de espesores mínimos en función del nivel de tránsito en ejes equivalentes, el método recomienda los siguientes valores:

- a) Para superficies de concreto asfáltico construidas sobre bases estabilizadas con emulsiones.

**Tabla 2.25 Espesores mínimos de carpeta asfáltica, de acuerdo al nivel de tránsito**

Nivel de tránsito en ejes equivalentes	Espesor mínimo de carpeta asfáltica en centímetros (1)
10.000	5.0
100.000	5.0
1'000.000	7.5
10'000.000	10.0
Mayor de 10'000.000	13.0

- (1) Podrá usarse concreto asfáltico o mezclas asfálticas con emulsiones tipo I, con un tratamiento superficial, sobre bases asfálticas tipo II o tipo III.

Tipo I Mezclas elaboradas con agregados procesados, textura cerrada.

Tipo II Mezclas elaboradas con agregados semi-procesados.

Tipo III Mezclas elaboradas con arenas o arenas limosas.

- b) Para superficies de concreto asfáltico construidas sobre granulares sin estabilizar.

Nivel de tránsito en ejes equivalentes	Condición de tránsito	Espesor mínimo de carpeta asfáltica en centímetros
Hasta 10.000	ligero	7.2 (2)
Entre 10.000 y 1'000.000	mediano	10.0
Mayor de 1'000.000	pesado	12.5 o más

(2) Para pavimentos de una sola capa formada con concreto asfáltico (*full-depth*) o pavimentos con emulsiones asfálticas, se requiere un mínimo de 10 centímetros.

c) Cálculos de espesores de diseño.

Para el diseño de la sección estructural del pavimento flexible, el método proporciona 18 gráficas o cartas de diseño en sistema métrico más otras tantas en sistema inglés, las cuales cubren las variables involucradas en los párrafos anteriores.

En el método se presentan gráficas con escalas logarítmicas para las tres condiciones climáticas consideradas, por el parámetro temperatura ambiente media anual (MAAT, por sus siglas en inglés), con el total de ejes equivalentes sencillos acumulados en el periodo de diseño, y el módulo de resiliencia de diseño de la capa subrasante, para obtener los espesores finales de pavimentos de una sola capa formada con concreto asfáltico (*full-depth*), pavimentos elaborados con emulsiones asfálticas tipos I, II y III y bases granulares sin tratamiento con espesores de 15 a 30 centímetros. Las gráficas para 7°C deberán emplearse para temperaturas menores o iguales a 7°C; las gráficas para 24°C para temperaturas iguales o mayores a esta temperatura, y las gráficas para 15.5°C para temperaturas intermedias.

Para fines prácticos se incluyen nueve cartas de diseño en sistema métrico, figuras 2.12 a 2.20, con las cuales se puede obtener el espesor total de la estructura de concreto asfáltico, que podrá convertirse en una estructura multicapa, formada por la carpeta de rodamiento, base y sub-base, empleando los coeficientes estructurales recomendados por la AASHTO para esas capas o los coeficientes de equivalencia sugeridos por el mismo Instituto del Asfalto. Se sugiere también consultar para mayor detalle el método del Instituto del Asfalto en su Manual MS-1, o en su versión computarizada "HWY", que incluye el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles y el diseño de sobrecarpetas de refuerzo.

Figura 2.12 Carpeta asfáltica en una sola capa (full-depth)

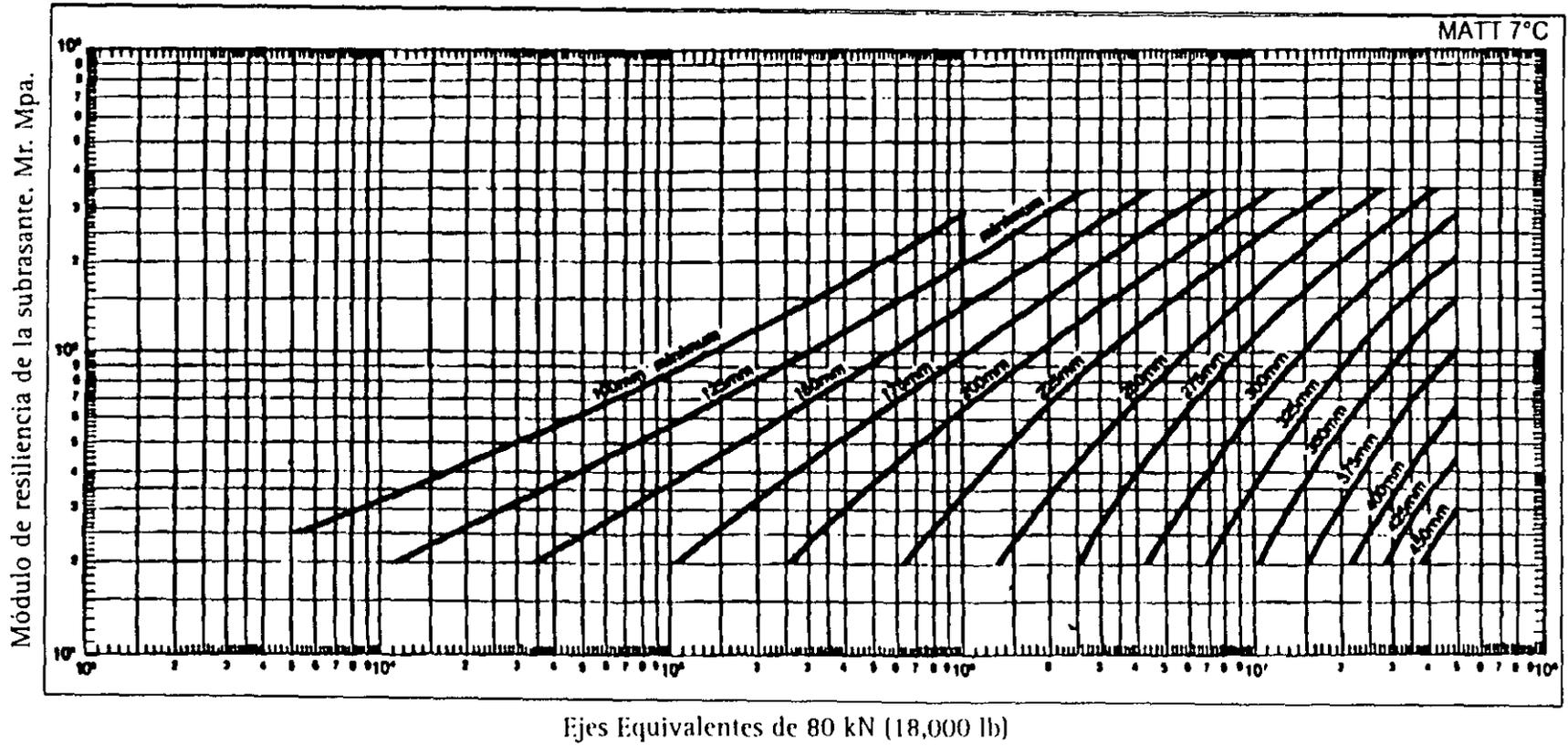


Figura 2.13 Carpeta asfáltica y base granular de 15 centímetros

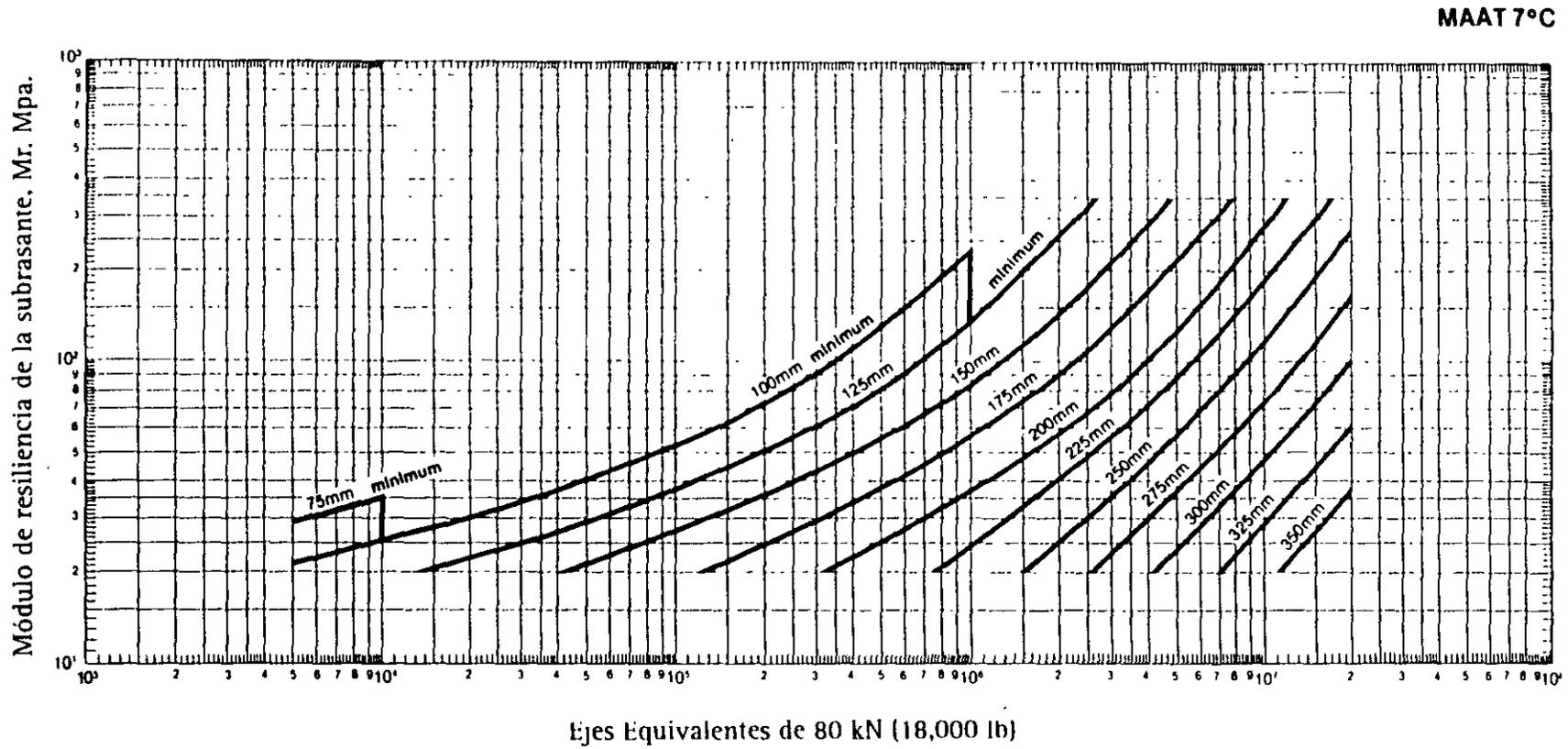


Figura 2.14 Carpeta asfáltica y base granular de 30 centímetros

MAAT 7°C

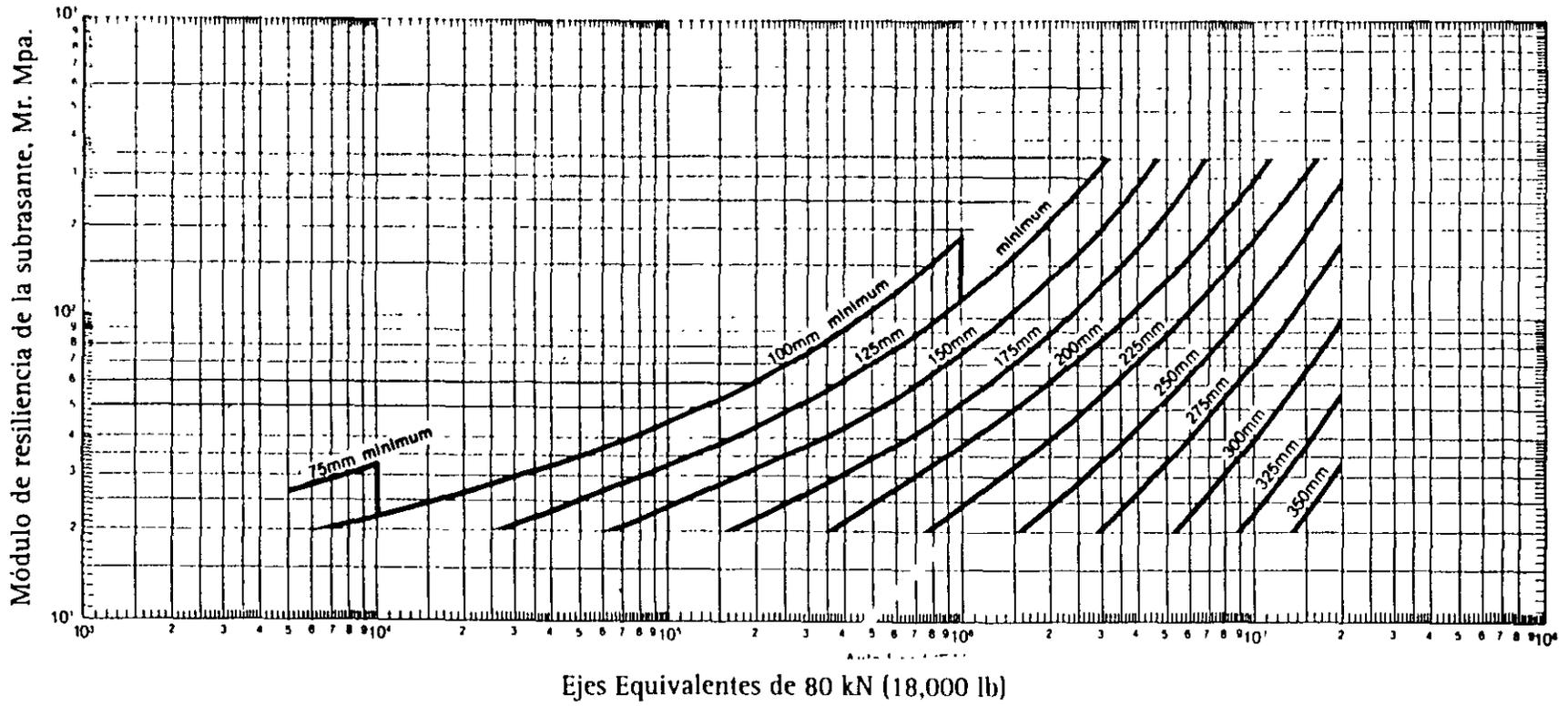


Figura 2.15 Carpeta asfáltica en una sola capa (full-depth)

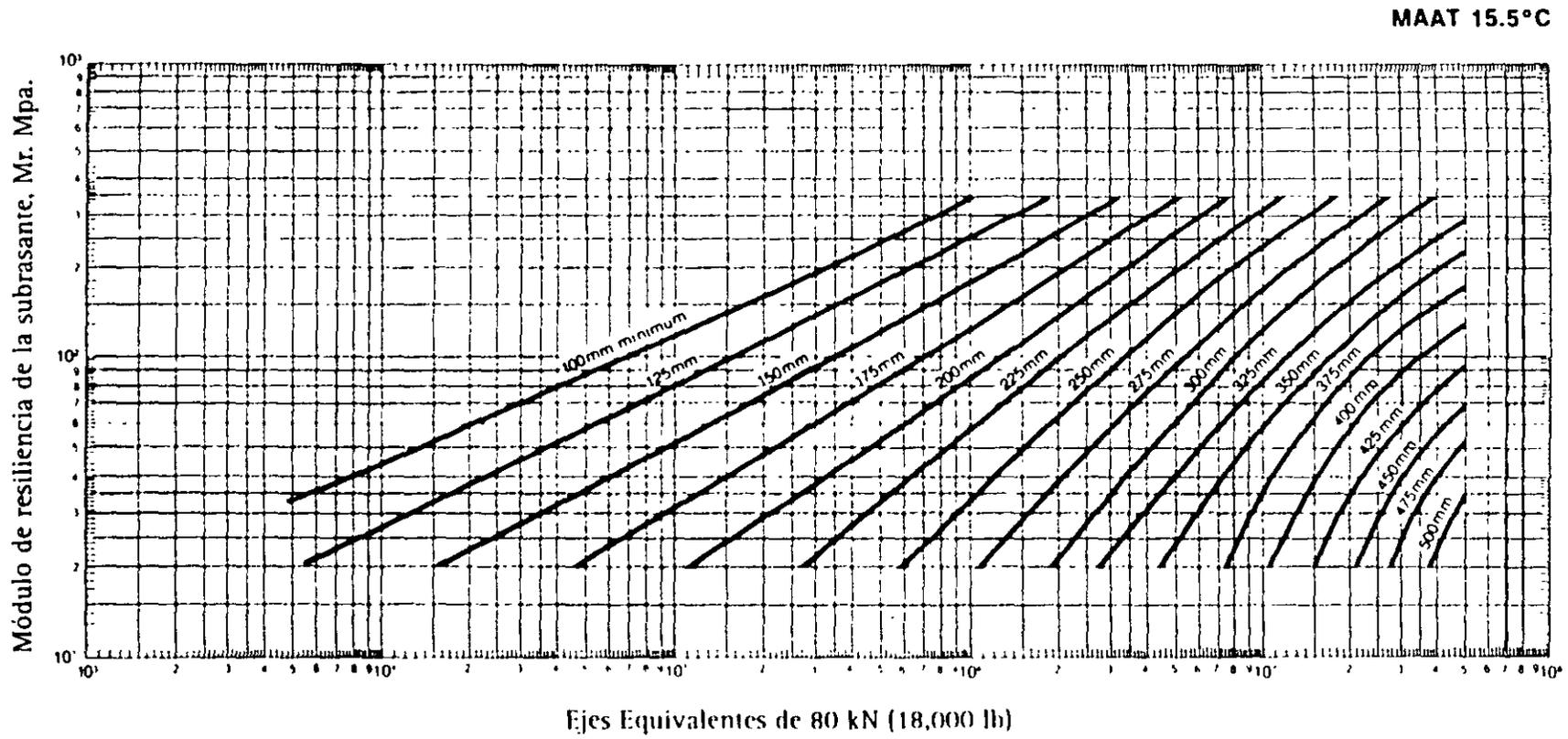


Figura 2.16 Carpeta asfáltica y base granular de 15 centímetros

MAAT 15.5°C

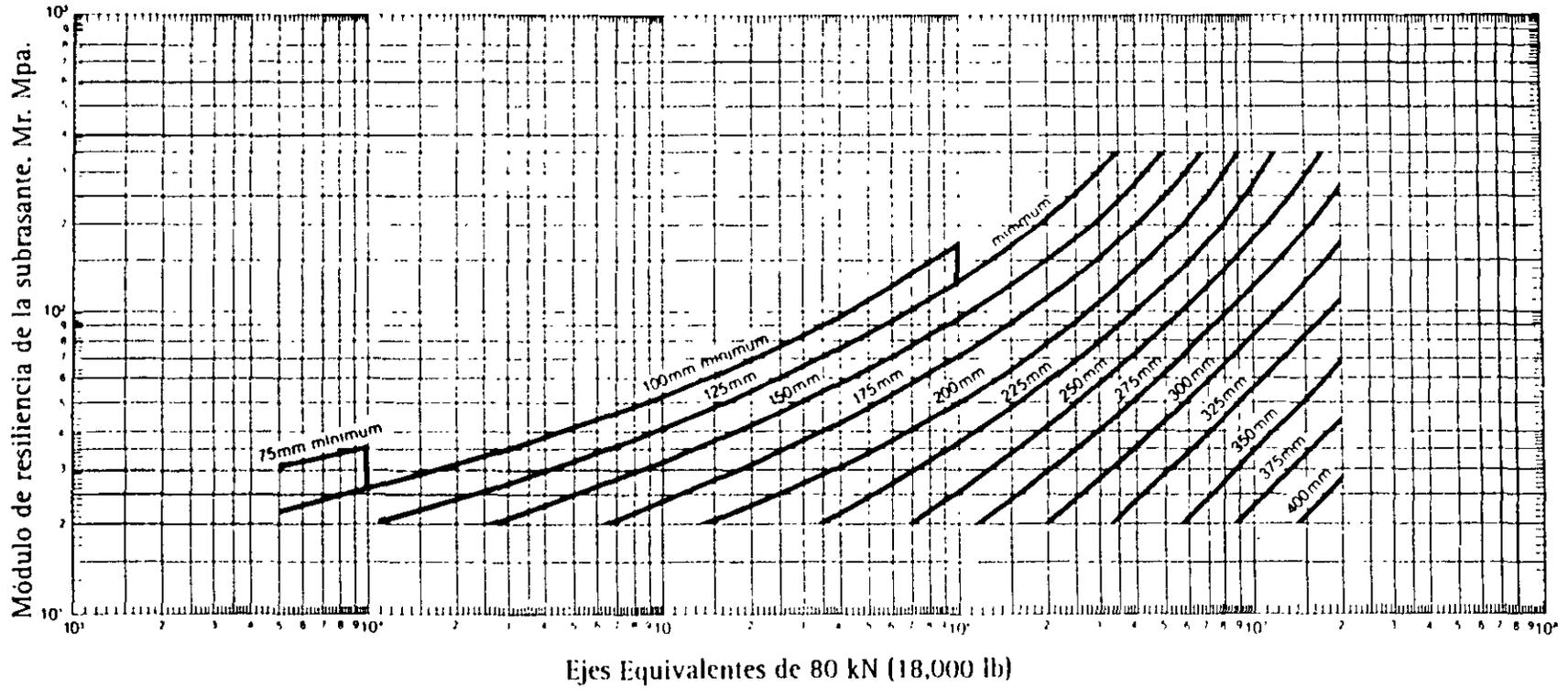


Figura 2.17 Carpeta asfáltica y base granular de 30 centímetros

MAAT 15.5°C

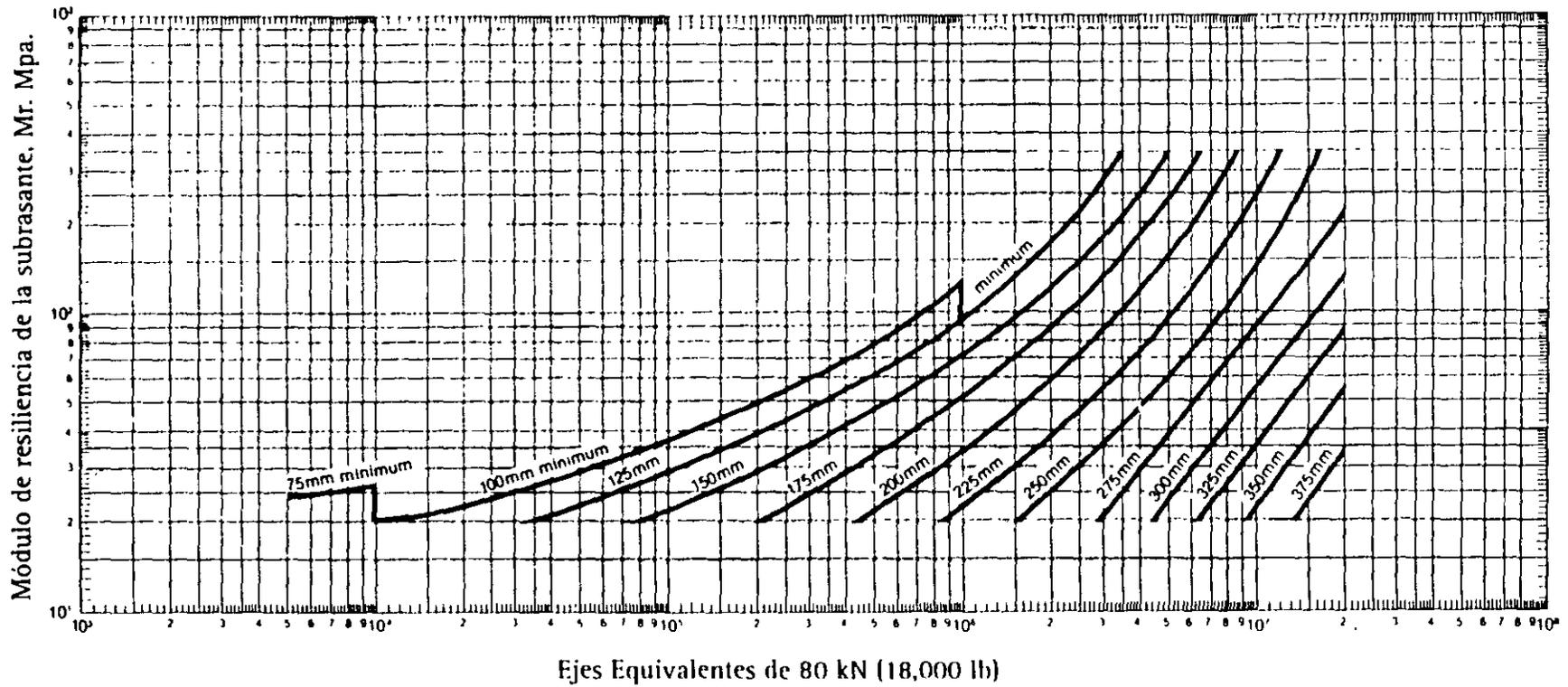


Figura 2.18 Carpeta asfáltica en una sola capa (full-depth)

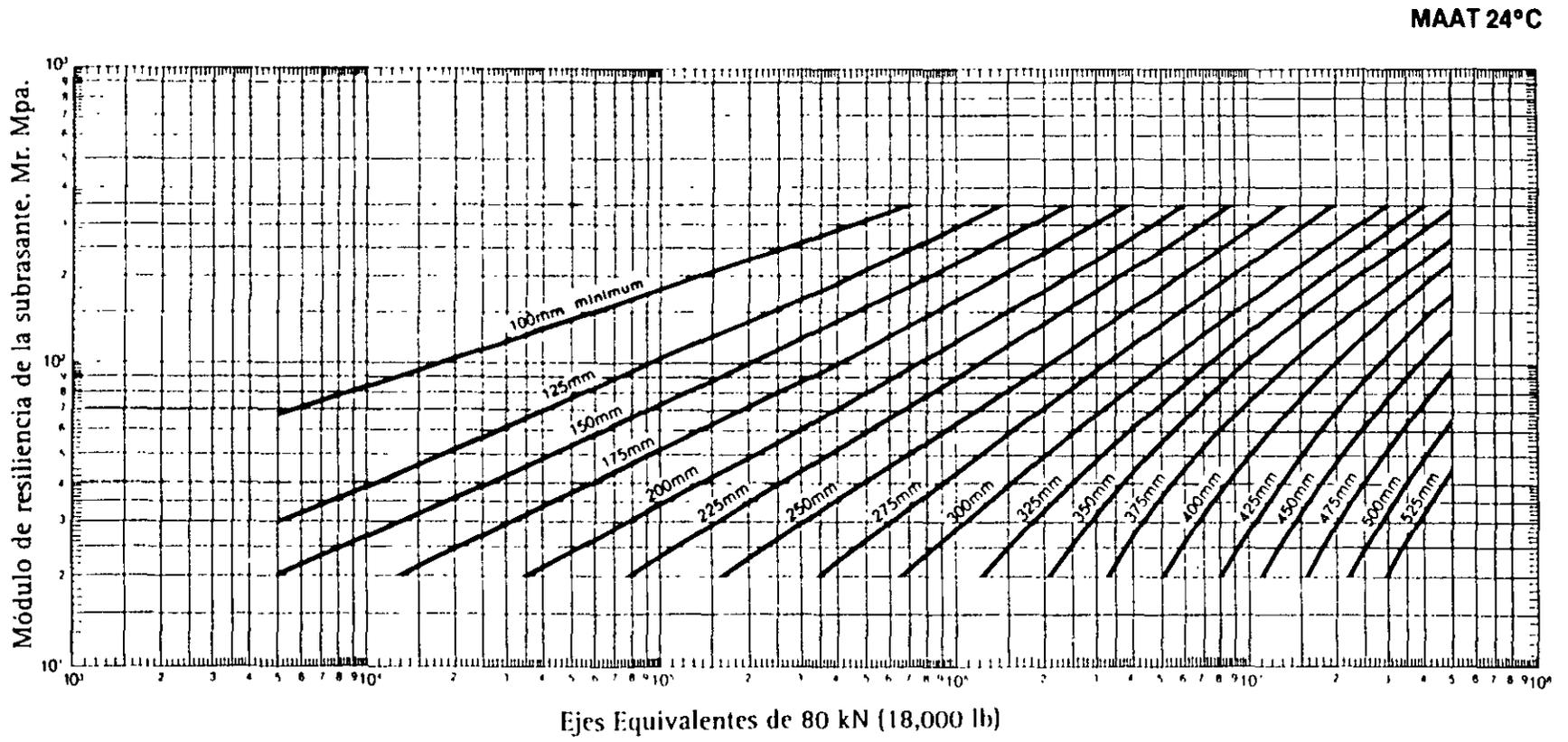


Figura 2.19 Carpeta asfáltica y base granular de 15 centímetros

MAAT 24°C

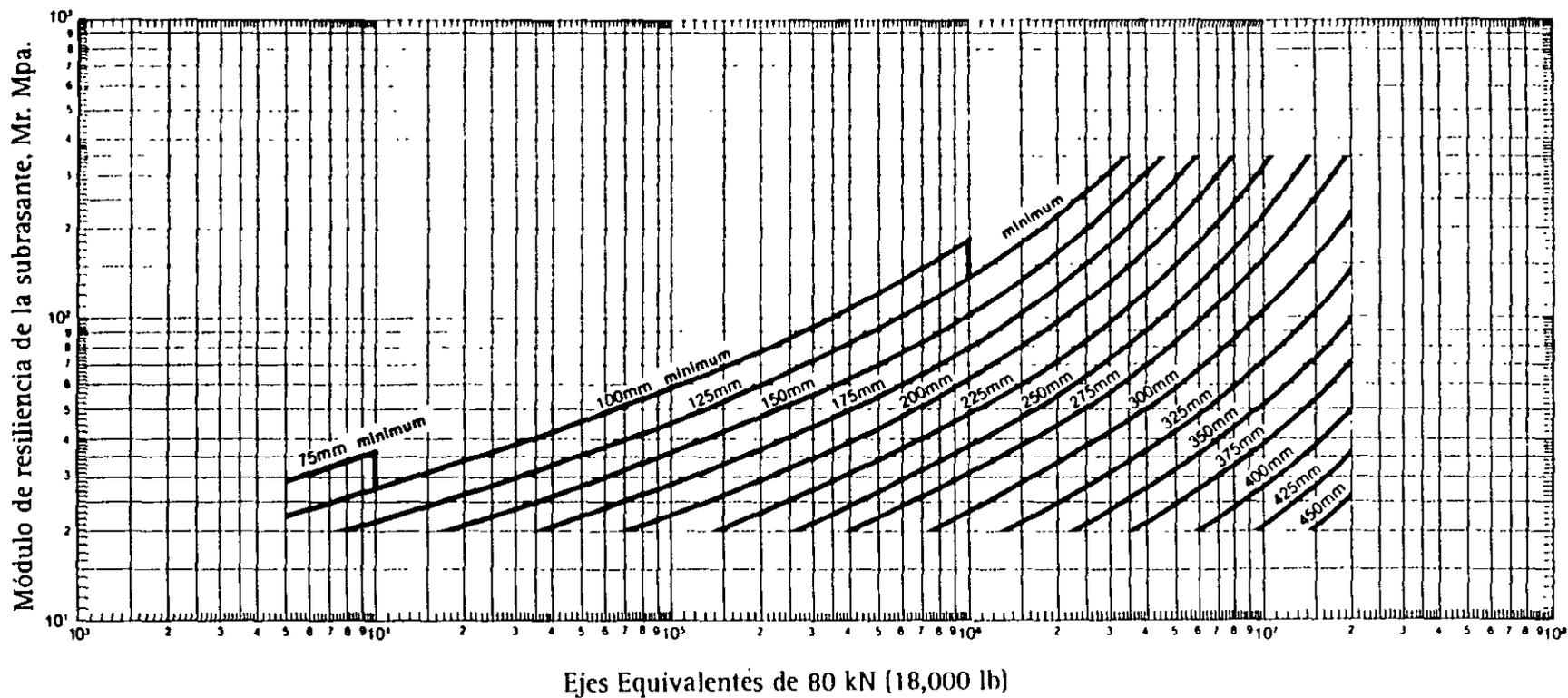
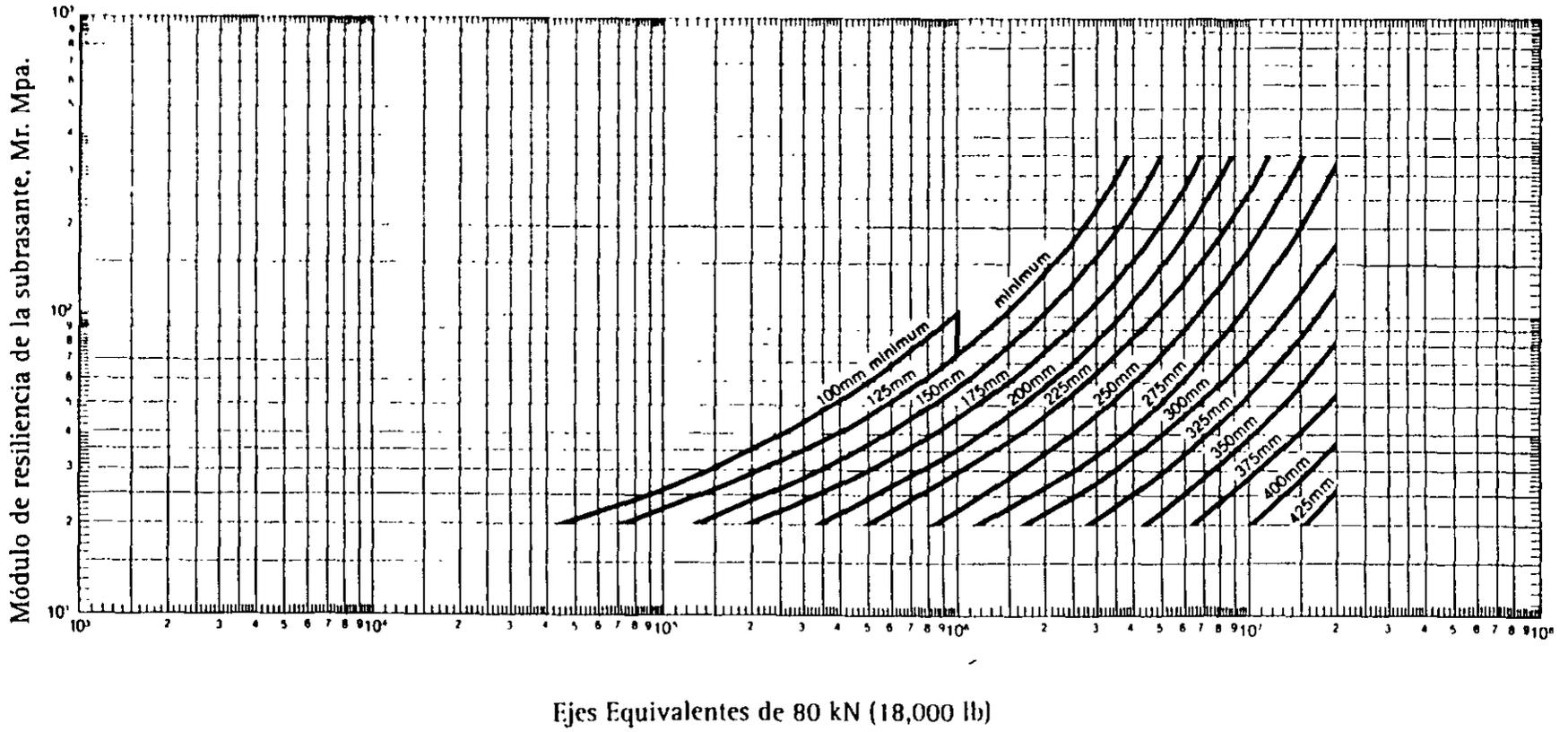


Figura 2.17 Carpeta asfáltica y base granular de 30 centímetros

MAAT 24°C



Finalmente se debe mencionar que para el análisis por fatiga, el método consideró una mezcla estandarizada con un volumen de asfalto de 11% y un volumen de aire de 5%, la que fue utilizada para desarrollar las gráficas de diseño citadas, con las cuales podría obtenerse un agrietamiento en el 20% del área. De igual manera, no se podrán alcanzar deformaciones en roderas mayores de 12.7 milímetros, por lo que deberá considerarse que con las gráficas propuestas se cubren ambos modos de falla.

### **2.2.5 Método de diseño español. Catálogo de secciones de pavimento**

En 1975, la Dirección General de Carreteras publicó en España la Instrucción 6.1-I.C y la Instrucción 6.2-1C, para pavimentos flexibles y rígidos, que instruyen para que los proyectos de construcción de nuevas carreteras o reconstrucción de las existentes utilicen el Catálogo de secciones de pavimento flexibles y rígidos. En ellas se hace notar que no se considera el diseño de refuerzos de pavimentos.<sup>12</sup>

El catálogo modificado se editó en 1989 y continúa vigente a la fecha como un producto de impulso que experimentó España con el Programa de Autovías incluido en el Plan General de Carreteras, el cual proporciona a la fecha una amplia gama de soluciones para todas las categorías de tránsito pesado; si bien no se conoce suficientemente su efecto en el comportamiento de los pavimentos. En la metodología se incluyen soluciones de diseños de pavimentos para carreteras, tanto del tipo flexible como del tipo rígido.

El inventario considera periodos de diseño de 20 años para los pavimentos flexibles y de 30 años para los pavimentos rígidos elaborados con concreto hidráulico vibrado. También toma en cuenta la intensidad media diaria de vehículos pesados que se prevea en el carril de proyecto ( $IMD_p$ ) y en el año de la puesta en servicio. Se utilizan para el diseño tres categorías de subrasante, definidas por su valor relativo soporte (CBR). Con base en las variables

---

<sup>12</sup> Instrucción 6.1-I.C y 6.2-1C. Madrid, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1989.

anteriores, el catálogo proporciona de seis a siete alternativas de solución para cinco diferentes categorías de tránsito, tres categorías de subrasante y ocho clases de materiales diferentes, para usarse en las distintas capas de la sección estructural de los pavimentos propuestos. Todo lo anterior se traduce finalmente en un catálogo que proporciona al usuario un total de 85 secciones de pavimento.

a) Tránsito

Para el diseño de secciones estructurales de los pavimentos flexibles o rígidos, el método considera exclusivamente los vehículos pesados, definidos de la siguiente manera:

- Camiones de carga útil superior a tres toneladas, de más de cuatro ruedas y sin remolque.
- Camiones con uno o varios remolques.
- Vehículos articulados.
- Vehículos especiales.
- Vehículos de pasajeros con más de nueve plazas.

Este trabajo abarca cinco categorías de tránsito pesado, desde el T0 al T4, y cubre intensidades medias diarias de vehículos pesados entre 50 y más de 2000 vehículos sobre el carril de diseño (ver tabla 2.26). Cuando no se dispone de datos confiables del aforo vehicular, en el carril de diseño se admite la siguiente asignación de tránsito por carriles:

- En cuerpos de dos carriles y doble sentido de circulación incide sobre cada carril la mitad de los vehículos pesados.
- En cuerpos de cuatro carriles (dos por sentido de circulación) inciden sobre el carril exterior todos los vehículos pesados que circulen en el sentido considerado.
- En cuerpos de tres o más carriles por sentido de circulación incide sobre el carril exterior el 85% de los vehículos pesados que circulen en el sentido considerado.

Tabla 2.26 Categorías de tránsito pesado. En función de la intensidad media diaria, en el carril de proyecto y en el año de puesta en obra.

Categorías de tránsito pesado	IMD <sub>p</sub>
T0	≥ 2,000
T1	entre 800 y 2,000
T2	entre 200 y 800
T3	entre 50 y 200
T4	< 50

b) Subrasante

También se consideran tres categorías de subrasante, definidas por el índice CBR mínimo; esto es: E1, entre 5 y 10, E2, entre 10 y 20 y E3, para índices mayores de 20%, determinados por los métodos de ensaye especificados y en las condiciones más desfavorables de humedad y grado de compactación.

Se hace notar que el método no admite subrasante del tipo E1 para categorías de tránsito pesado T0 y T1, y además para esos casos se recomienda la utilización de materiales estabilizados con cal o cemento. En la tabla 2.27 se sugieren algunos materiales utilizables en las subrasantes.

Tabla 2.27 Materiales utilizables en subrasante

Símbolo	Definición del material	Prescripciones complementarias
0	suelo tolerable	
1	suelo adecuado	
2	suelo seleccionado	
3	suelo seleccionado	CBR ≥ 20
T	material de la zona de transición en pedraplenes	
S-EST 1	suelo estabilizado <i>in situ</i> con cemento o con cal	CBR de la mezcla a los siete días ≥ 5 (cemento o cal ≥ 2%)
S-EST 2	suelo adecuado estabilizado <i>in situ</i> con cemento o con cal	CBR de la mezcla a los siete días ≥ 10 (cemento o cal ≥ 3%)
S-EST 3	suelo adecuado estabilizado <i>in situ</i> con cemento o con cal	Resistencia a compresión simple a los siete días ≥ 1.5 MPa

c) Materiales para capas superiores

El catálogo recomienda que para las categorías de tránsito pesado T0, T1 y T2 (o sea para intensidades diarias mayores de 200 vehículos pesados en el carril de diseño), se utilicen exclusivamente mezclas asfálticas en caliente o concreto hidráulico para la superficie de rodamiento. En los casos de categorías T3 o T4 ( $IMD_p$  entre 50 y 200) se permite el empleo de mezclas asfálticas en frío, además de las mezclas en caliente, pero se admiten espesores mínimos de la capa citada a cuatro y cinco centímetros. Para la categoría T4 se permiten cuatro centímetros de mezcla asfáltica de granulometría abierta sellada con tratamiento superficial.

También cubre brevemente características para los tratamientos superficiales con lechada asfáltica, concreto compactado con rodillos, suelo-cemento, agregados pétreos artificiales o naturales, riego de sello, riego de liga y de curado.

El catálogo también recomienda materiales y pautas de dimensionamiento geométrico para los pavimentos en carreteras, tanto flexibles como rígidos, relativos a espesores, anchos de acotamientos, juntas longitudinales y transversales para la superficie de rodamiento, texturas abiertas o cerradas, drenaje superficial y subdrenaje, etcétera. Para el caso de pavimentos rígidos, se emiten recomendaciones relativas a juntas longitudinales y transversales, involucrando su dimensionamiento, los tipos de material y los pasajuntas.

En las figuras 2.21 a 2.25 se muestra un resumen que involucra las posibles soluciones de las secciones requeridas.

Se observa en el catálogo que no se permite ninguna sección estructural de pavimento para las categorías de tránsito T0 y T1 apoyadas sobre subrasantes clase E1. Asimismo se sugiere tomar en cuenta las recomendaciones de utilizar espesores importantes de materiales de alta resistencia, bien sea concreto asfáltico o vibrado, grava cemento u otro, sobre todo en categorías de tránsito pesado intenso. Es interesante conocer las estructuras recomendadas en el catálogo, pues constituyen opciones que pueden ser consideradas en el proyecto de un pavimento.

La elección de la estructura deberá realizarse sin omitir aspectos económicos o de factibilidad constructiva, por citar algunos.

No debe olvidarse que el método descrito está calibrado para las condiciones y experiencias de España, por lo que se presenta como un ejemplo de métodos de catálogo; sin embargo, como se mencionó anteriormente, puede ser útil como una guía, considerando el número de posibles soluciones para un proyecto de pavimentación.

Figura 2.21 Catálogo de secciones de pavimento para T0

Tránsito	T0														
	Sección núm.	021	022	023	024	025	026	027	031	032	033	034	035	036	037
concreto vibrado	N O C O N S I D E R A D A S						28	28						28	28
concreto asfáltico		35	30	30	15	10			35	30	27	15	10		
concreto compactado						25							25		
concreto pobre							15							15	
grava cemento					25			15				22			15
suelo cemento				20	20	20					20	20	20		
grava triturada		20	25							25					
grava natural			25				20	20							
subrasante		E1	E2						E3						

Dimensiones en centímetros

Figura 2.22 Catálogo de secciones de pavimento para T1

Tránsito	T1															
Sección núm.		121	122	123	124	125	126	127	131	132	133	134	135	136	137	
concreto vibrado	N O C O N S I D E R A D A S						25	25						25	25	
concreto asfáltico		30	25	25	15	10			30	25	22	15	10			
concreto compactado						22								22		
concreto pobre							15								15	
grava cemento					22			15					20			15
suelo cemento				20	20	20						20	20	20		
grava triturada		20	25								25					
grava natural			25					20	20							
subrasante		E1	E2						E3							

Dimensiones en centímetros

Figura 2.23 Catálogo de secciones de pavimento para T2

Tránsito	T2																					
Sección núm.	211	212	213	214	215	216	217	221	222	223	224	225	226	227	231	232	233	234	235	236	237	
concreto vibrado						23	23						23	23							23	23
concreto asfáltico	30	25	18	12	8			25	20	18	12	8			25	20	18	12	8			
concreto compactado					20							20								20		
concreto pobre						15							15								15	
grava cemento				20			15				20			15				20				15
suelo cemento			25	20	20					22	20	20					20	15	15			
grava triturada	25	25						20	25							25						
grava natural		25	20	20	20	20	20		25													
subrasante	E1							E2							E3							

Dimensiones en centímetros

Figura 2.24 Catálogo de secciones de pavimento para T3

Tránsito	T3																		
	311	312	313	314	315	316	321	322	323	324	325	326	331	332	333	334	335	336	
concreto vibrado						21						21							21
concreto asfáltico	20	18	12	6	*		18	15	12	6	*		18	15	12	6	*		
concreto compactado					20						20							20	
grava cemento				18						18						20**			
suelo cemento			25	20	15				22**	15	15				22				
grava triturada	25	25					25	25						25					
grava natural		25	20			20		25				20							
subrasante	E1						E2						E3						

TS = tratamiento superficial mediante riegos con gravilla.

\* = TS o cuatro centímetros de mezcla asfáltica.

\*\* = Sólo con subrasante con superficie estabilizada.

Dimensiones en centímetros

Figura 2.25 Catálogo de secciones de pavimento para T4

Tránsito	T4																	
Sección núm.	411	412	413	414	415	416	421	422	423	424	425	426	431	432	433	434	435	436
concreto vibrado						20						20						20
concreto asfáltico	5	TS	8	6	*		5	TS	8	6	*		5	TS	8	6	*	
concreto compactado					20						20						20	
grava cemento				18						18**						18**		
suelo cemento			25	15					22**						22			
grava triturada	30	30					20	20					30	30				
grava natural	20	25	20		20	20	20	25			20							
subrasante	E1						E2						E3					

TS = tratamiento superficial mediante riegos con gravilla.

\* = TS o con cuatro centímetros de mezcla asfáltica.

\*\* = sólo con subrasante con superficie estabilizada.

Dimensiones en centímetros

## **2.2.6 Método del Instituto de Ingeniería de la UNAM**

El Instituto de Ingeniería publicó los informes números 325 (1974) y 444 (1981) en los que se presentaba un método de diseño para pavimentos flexibles, desarrollado a petición de la entonces Secretaría de Obras Públicas, actualmente Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Este método partió del análisis de datos experimentales obtenidos en tramos de prueba, en carreteras en servicio, en investigación teórica y en experimentación en laboratorio en la pista circular de pruebas del propio instituto, que han influido recientemente en sucesivos perfeccionamientos. Actualmente el método está preparado para ser manejado con la ayuda de un programa interactivo de cómputo, DISPAV-5 y se encuentra en la publicación número CI-8 de la serie de dicha institución, que data de 1999.<sup>13</sup> El programa interactivo de cómputo DISPAV-5 diseño de pavimentos analiza secciones estructurales hasta de cinco capas, e incorpora tanto el cálculo por deformación permanente, según el modelo elasto-plástico desarrollado, como el cálculo por fatiga empleando modelos elásticos de varias capas. Su fundamento es teórico-experimental, y para su aplicación se emplean conceptos y métodos de cálculo mecanicistas.

Se agrega un nuevo modelo desarrollado para diseñar pavimentos de carreteras de altas especificaciones, tomando en cuenta tanto la deformación permanente acumulada (rodera) como el agrietamiento a fatiga en las capas ligadas con asfalto. Por lo pronto no se considera la presencia de materiales estabilizados con cemento Portland, aunque sin embargo, se anuncia su incorporación en el corto plazo.

Para el diseño con deformación permanente es importante señalar que el método previene la deformación excesiva en las capas no estabilizadas con asfalto (base, sub-base, subrasante y terracería). Además, se considera que las mezclas asfálticas se han diseñado adecuadamente y que, por tanto, las deformaciones de las capas asfálticas son relativamente pequeñas.

Se reconoce que existe una alta dependencia entre las características mecánicas de las mezclas asfálticas, la temperatura y la frecuencia e intensidad de

---

<sup>13</sup> Corro Caballero, S. y G. Prado Ollervides, *Diseño estructural de pavimentos, incluyendo carreteras de altas especificaciones*. Instituto de Ingeniería, UNAM, 1999.

las solicitaciones del tránsito, lo que conduce a variaciones importantes en los módulos de elasticidad de las mezclas asfálticas durante la vida de servicio del pavimento, y en la práctica este es uno de los factores de diseño que requiere de experimentación y el buen juicio del proyectista para alcanzar un proyecto adecuado.

La prevención de este tipo de deformaciones en las capas asfálticas es de mucha importancia cuando las temperaturas son altas y los espesores son gruesos, sobre todo si el tránsito es de tipo pesado.

El método advierte sobre la conveniencia de tener suficiente información confiable sobre los insumos requeridos, ya que la confiabilidad de los resultados del cálculo depende de que los datos empleados sean representativos de las propiedades esperadas de los materiales en el lugar, durante la vida de servicio del pavimento.

El programa permite los siguientes procedimientos de cálculo:

1. Diseño del pavimento, a partir de un tránsito de proyecto y de las características mecánicas de materiales conocidos, lo que permite la determinación de los espesores de capa requeridos para el tránsito de proyecto.
2. Determinación de la vida previsible por deformación permanente y por agrietamiento debido a fatiga del sistema de capas analizado.

Las condiciones de diseño del método son las siguientes:

1. Diseño de pavimentos de altas especificaciones en los que se requiere conservar un nivel de servicio alto de la superficie de rodamiento, durante toda la vida de servicio. Al finalizar ésta, la deformación esperada será del orden de 1.2 centímetros, y se considera como el percentil 80 de la deformación máxima, por lo que se acepta un agrietamiento ligero o medio.
2. Diseño de pavimentos convencionales, en los cuales la deformación permanente esperada al término de la vida de servicio será de 2.5 centímetros, con agrietamiento medio o fuerte, por lo que se requiere efectuar un mantenimiento rutinario frecuente.

El método hace notar que el comportamiento del pavimento depende de manera significativa del control de calidad en la construcción y de un mantenimiento adecuado. En el caso de carpetas asfálticas cabe hacer notar que el diseño de la mezcla asfáltica es un elemento importante en el comportamiento, y que se requiere un diseño cuidadoso y una construcción adecuada para evitar la falla prematura.

En el caso de los caminos de altas especificaciones, las consideraciones anteriores tienen mayor relevancia, y es necesario elegir materiales de construcción de muy buena calidad, emplear un diseño correcto en las mezclas asfálticas y aplicar un control de calidad riguroso durante la construcción.

a) Tránsito de proyecto

El método proporciona la subrutina TRANSIT 5 para el cálculo del tránsito de proyecto requerido para el diseño por fatiga de las capas ligadas (daño superficial) y para el diseño por deformación permanente acumulada (daño profundo), en ambos casos referidos en ejes sencillos con llantas gemelas y peso estándar de 82 kN (8.2 t). En la tabla 2.28 se indican los coeficientes de distribución de tránsito para el carril de proyecto.

Tabla 2.28 Distribución del tránsito en el carril de proyecto

Número de carriles en ambas direcciones	Coefficiente de distribución en el carril de proyecto, en %
2	50%
4	40 - 50%
6	30 - 40%

Conocido el tránsito equivalente de proyecto, el programa lo clasifica en cuatro niveles, con el objeto de establecer espesores mínimos de capa, a partir de los valores indicados en la tabla 2.29.

Tabla 2.29 Niveles de tránsito equivalente en el carril de proyecto

Nivel del tránsito equivalente	Ejes equivalentes de 82 kN
I	$T \leq 10^6$
II	$10^6 < T \leq 10^7$
III	$10^7 < T \leq 5 \times 10^7$
IV	$5 \times 10^7 < T$

El programa permite determinar los coeficientes de daño a diferentes profundidades, desde 5 hasta 120 centímetros.

b) Capas consideradas

El programa DISPAV-5 está proyectado para analizar secciones estructurales con un máximo de cinco capas, las cuales pueden ser:

1. Carpeta asfáltica
2. Base granular, o estabilizada con asfalto
3. Sub-base granular
4. Subrasante
5. Terracería

El número mínimo de capas consideradas es dos, y una de ellas debe ser la terracería, por lo que se establece que la primera sea carpeta o base.

La capa de terracería se analiza como un medio semi-infinito, aspecto que hay que tomar en cuenta cuando se realiza el análisis de deflexiones de la sección estructural.

El método proporciona una estimación adecuada de las deformaciones unitarias por fatiga en las capas estabilizadas con asfalto, empleando el modelo elástico de cinco capas (CHEV4), con las adaptaciones realizadas en el Instituto de Ingeniería.

c) Valor relativo soporte crítico

El valor relativo soporte crítico es una de las variables más importantes, por lo que se debe poner mucho cuidado en su estimación, para manera que sea

representativo de las condiciones esperadas en el camino durante la vida de servicio del pavimento. Para recomendaciones sobre su elección, se sugiere consultar los informes 325 y 444 de la Series del Instituto de Ingeniería, de la UNAM.

Para lograr una mejor comprensión del comportamiento de las terracerías y demás capas a diseñar, se requiere efectuar pruebas de laboratorio confiables para cada material propuesto y disponible; pruebas con tres diferentes energías de compactación; esto es, baja (AASHTO estándar), energía de compactación intermedia, y alta energía (AASHTO modificada).

Si se conoce la humedad óptima y el porcentaje de compactación que implicará el proyecto, se indicará un rango de variación de la humedad de compactación respecto al óptimo.

De esta manera se encontrará una zona que indicará las condiciones de campo esperadas para la subrasante, y se determinará, en función de la humedad crítica esperada (la mayor del rango), el valor crítico de  $VRS_z$  de diseño, que corresponderá a dicha humedad.

Para obtener el  $VRS_z$  crítico de las capas restantes, esto es la sub-base y base, el método emplea la siguiente ecuación, en donde interviene un coeficiente de variación estimado,  $v$ , entre 0.2 y 0.3, que tomará en cuenta cambios posibles de material, procedimiento de construcción, etcétera.

$$VRS_z = \overline{VRS} (1-0.84v)$$

En donde  $\overline{VRS}$  es el valor promedio de valores obtenidos en el laboratorio.

En este punto el programa revisa los ( $VRS_z$ ), en relación con los valores máximos y mínimos permisibles para cada capa, comparando con el máximo permisible ( $VRS_{max}$ ), basado en consideraciones prácticas de proyecto (tabla 2.30). Siendo el  $VRS_z$  mayor, se toma el  $VRS_{max}$  como valor de proyecto ( $VRS_p$ ) para efectos de diseño por deformación permanente acumulada.

Los valores máximos de  $VRS_z$  se establecen para obtener espesores razonables desde el punto de vista constructivo, y por confiabilidad del diseño. A su vez los  $VRS_z$  mínimos se especifican para limitar la calidad mínima de la base de la terracería, según tabla 2.31.

Debe tenerse en cuenta que en el caso de la terracería, un valor relativo soporte ( $VRS_z$ ) muy bajo implica la necesidad de estudios geotécnicos especiales

Tabla 2.30  $VRS_{max}$  para todos los niveles de tránsito, ( $VRS_p$ )

Capa	$VRS_{max}$ , %
base	120%
subbase	30%
subrasante	20%
terracerías	20%

Tabla 2.31  $VRS_z$  mínimos, para todos los niveles de tránsito

Capa	$VRS_p$ mínimo permisible por proyecto, %
base	70
terracería	3

para diseñar la sección estructural del pavimento, lo cual evita problemas posteriores de mal comportamiento del pavimento.

d) Módulos elásticos de las capas no estabilizadas

Para el diseño por fatiga se requiere determinar las deformaciones unitarias críticas de tensión en la parte inferior de la carpeta, por lo que se necesita conocer el módulo de elasticidad de las capas no estabilizadas.

En el caso de que éste no se conozca, se presenta al usuario la opción de estimarlo a partir del  $VRS_z$  crítico esperado en el lugar (sin afectarlo por restricciones de valores mínimos o máximos), de acuerdo con el modelo desarrollado para el método:  $E = 130 VRS_z^{0.7}$

Las relaciones empíricas entre el módulo de rigidez y el  $VRS_z$  deben tomarse con precaución, ya que el usuario puede cambiar valores en el programa para tomar en cuenta su experiencia con los materiales específicos del proyecto.

e) Módulo de elasticidad de la carpeta

El modelo requiere contar con carpeta asfáltica para tránsitos medios y altos, pero es opcional para tránsito ligero.

También requiere de la carpeta asfáltica, que debe representar el comportamiento de dicha capa en condiciones de servicio durante la vida útil de la carretera. En este punto debe tomarse en cuenta que la temperatura y el tiempo de aplicación de las cargas tienen una influencia significativa en el valor del módulo.

El programa permite al usuario obtener de manera experimental el módulo, o bien estimarlo a partir de la composición volumétrica, características del asfalto, frecuencia de aplicación de carga y temperatura, mediante el programa MÓDULO-5, que presenta algoritmos desarrollados por la compañía Shell, el Instituto del Asfalto, M. W. Witczak y el Instituto del Transporte de Texas.

El programa MÓDULO -5 presenta al usuario una tabla con los módulos obtenidos por cada procedimiento, y queda en manos de éste decidir el valor adecuado, con base en su criterio y experiencia.

Al obtener el módulo de la capa asfáltica es necesario considerar con atención la temperatura de proyecto y la frecuencia de aplicación de la carga, la que depende de la velocidad de operación de los vehículos pesados y de la profundidad de la capa. El programa suministra sugerencias para frecuencias de aplicación para diferentes profundidades medias de capa y para la velocidad de operación normal de una carretera, del orden de 90 kilómetros por hora; en caso de velocidades menores, por ejemplo en carriles de ascenso para vehículos pesados, se debe hacer la corrección adecuada.

#### f) Relación de Poisson

El programa suministra valores promedio para cada capa y permite al usuario modificar esos valores en caso de contar con información confiable de ese parámetro para los materiales específicos que emplea.

#### g) Nivel de confianza del proyecto

Se refiere a la probabilidad de que la duración real del pavimento sea al menos igual a la de proyecto. Se sugiere el empleo de un nivel de 85%, pero el método permite al usuario el empleo de cualquier nivel entre 50 y 99%.

### 2.2.6.1 Diseño por deformación permanente en la rodada

Una vez conocido el tránsito equivalente, los  $VRS_z$  de las capas no estabilizadas, el módulo elástico de la carpeta, y el nivel de confianza del proyecto, se determinan los espesores requeridos para cada capa de la sección estructural, empleando los modelos matemáticos desarrollados para ese fin.

El espesor obtenido para cada capa se compara con el espesor mínimo especificado para el nivel de tránsito de proyecto establecido. Si el espesor es menor que el mínimo especificado, se toma dicho espesor mínimo como espesor de proyecto, y se disminuyen los espesores de las capas inferiores, con base en los coeficientes estructurales de esas capas.

Los espesores mínimos especificados para las capas de base y sub-base se fijan por consideraciones constructivas, fundamentadas en el comportamiento de carreteras en condiciones reales de servicio, ver tabla 2.32.

Tabla 2.32 Espesores mínimos de las capas de pavimento, en centímetros

Capa	Nivel de tránsito			
	I	II	III	IV
carpeta *	0	5	5	5
base *	15	15	15	15
sub-base *	15	15	15	15
subrasante **	20	30	30	30
subrasante ***	30	40	40	40

(\*) Aplicable a caminos normales y carreteras de altas especificaciones.

(\*\*) Aplicable a caminos normales.

(\*\*\*) Aplicable a carreteras de altas especificaciones.

Para el caso de tránsito equivalente, menos de un millón de ejes estándar, puede considerarse un tratamiento superficial sobre una base de buena calidad.

Para tránsitos mayores es conveniente colocar una carpeta de concreto asfáltico, o base asfáltica con un tratamiento superficial.

Si el usuario decide no continuar el análisis por fatiga por no tener carpeta asfáltica, sino simplemente un riego de sello. El programa finaliza con el diseño por deformación permanente acumulada, y le da oportunidad al usuario de imprimir el resultado.

### **2.2.6.2 Revisión del diseño por efectos de fatiga**

El programa revisa que la relación de módulos entre dos capas adyacentes no estabilizadas de la estructura propuesta en el diseño por deformación permanente, no sobrepase cierto límite para evitar la generación teórica de esfuerzos de tensión excesivos en la parte inferior de la capa superior, relación obtenida por la Compañía Shell:

$$K = 0.2h^{0.45}$$

Donde:

K es la relación de módulos admisible y

h es el espesor de la capa superior, en milímetros.

Si se excede la relación de módulos, el programa propone el ajuste recomendable en el valor de los módulos de rigidez; si el proyectista acepta la sugerencia se hace el ajuste, en caso contrario se continúa con los valores iniciales.

Con los datos anteriores se pasa al cálculo de la deformación unitaria de tensión en la carpeta, para ello se hace uso del programa de computadora CHEV4, desarrollado por la compañía Chevron y adaptado en el Instituto de Ingeniería, UNAM. (CHEV5), para cinco capas.

El valor calculado de la deformación unitaria de tensión en la carpeta, permite la obtención de la vida previsible por fatiga, empleando el modelo matemático de vida por fatiga, a partir del nivel de confianza elegido para el proyecto.

Finalmente la vida previsible obtenida se compara con el tránsito de proyecto y el resultado puede ser alguno de los siguientes casos:

a) La vida previsible es menor que el tránsito de proyecto.

El programa presenta cuatro opciones:

1. Cambiar las propiedades de las capas asfálticas. No se permite cambiar el número de capas, sólo cambiar el módulo de elasticidad de las capas asfálticas. Se recomienda que si se decide cambiar los materiales, el proyecto sea reiniciado desde el principio.
2. Aumentar el espesor de algunas capas. Se permite modificar el espesor de algunas capas del pavimento, como aumentar el espesor de carpeta y disminuir el espesor de alguna capa inferior, cuidando siempre los espesores mínimos.
3. Considerar la colocación de una base asfáltica. Se requiere introducir las características mecánicas de la nueva capa; como:
  - espesor propuesto para esta capa
  - módulo de elasticidad, conocido o estimarlo con el programa MÓDULO 5,
  - relación de Poisson.

Si una vez introducida la base asfáltica el número de capas del pavimento es mayor de cinco, se requiere eliminar una de las capas no asfálticas, para no rebasar el número máximo de capas aceptadas.

Después de haber ajustado el número de capas, en caso de ser necesario, el usuario tiene opción de modificar los espesores de las capas restantes, para tomar en cuenta los cambios realizados.

4. Finalmente, el programa vuelve a calcular la vida previsible por fatiga y por deformación para el nuevo sistema de capas y compara de nuevo con los tránsitos de proyecto.

b) La vida previsible está en un intervalo de +/-10% del tránsito de proyecto.

Se tiene ya un diseño que satisface los requerimientos para evitar la deformación excesiva o la falla por fatiga de manera prematura, o ambos casos. En caso de que alguno de los criterios de diseño se encuentre sobrado, es recomendable analizar diferentes alternativas de ajuste para buscar alguna solución más económica que siga siendo satisfactoria.

El programa ofrece la opción de imprimir el diseño actual antes de modificarlo, y presenta las mismas opciones consideradas en el punto anterior para modificar el diseño actual y hacer su verificación posterior.

- c) La vida previsible es mayor que el tránsito de proyecto. Si esto ocurre tanto en deformación como fatiga, considerando la tolerancia de 10%, se permite hacer ajuste en materiales o espesores, para llegar a un diseño más aceptable, o terminar la corrida del programa. Si elige hacer cambios en su proyecto, el programa permite las mismas opciones que en los casos anteriores. Después de haber hecho los ajustes deseados, se reinicia el cálculo de la vida previsible por fatiga y deformación con los nuevos datos. Al terminar estas iteraciones se termina el procedimiento de diseño. A manera de ejemplo, se presentan las figuras 2.26 y 2.27 que muestran un diagrama simplificado del método y un desplegado de resultados en pantalla.

En los párrafos anteriores se ha presentado una breve descripción de algunos de los métodos de diseño más empleados, representativos de diferentes criterios de análisis.

El método AASHTO, es representativo de un método basado en ecuaciones de regresión y el criterio de falla es la disminución, con el tiempo, de la calidad de rodamiento o índice de servicio. Los métodos del Instituto del Asfalto y del Instituto de Ingeniería de la UNAM, son de tipo mecanístico-empírico, y se basan en conceptos teórico-experimentales. Como criterios de falla consideran la deformación permanente acumulada y el agrietamiento por fatiga. Finalmente el método español corresponde a la categoría de catálogo de secciones estructurales definidas para diferentes niveles de tránsito y de resistencia de la subrasante, adecuadas para las condiciones regionales y experiencias locales.

Con el propósito de efectuar un diseño adecuado de un pavimento, se sugiere aplicar inicialmente los métodos del Instituto del Asfalto o, preferentemente, el del Instituto de Ingeniería, por considerar las condiciones de México, para obtener una estructura diseñada por deformación permanente y por

Figura 2.26 Diagrama simplificado del método del Instituto de Ingeniería, UNAM

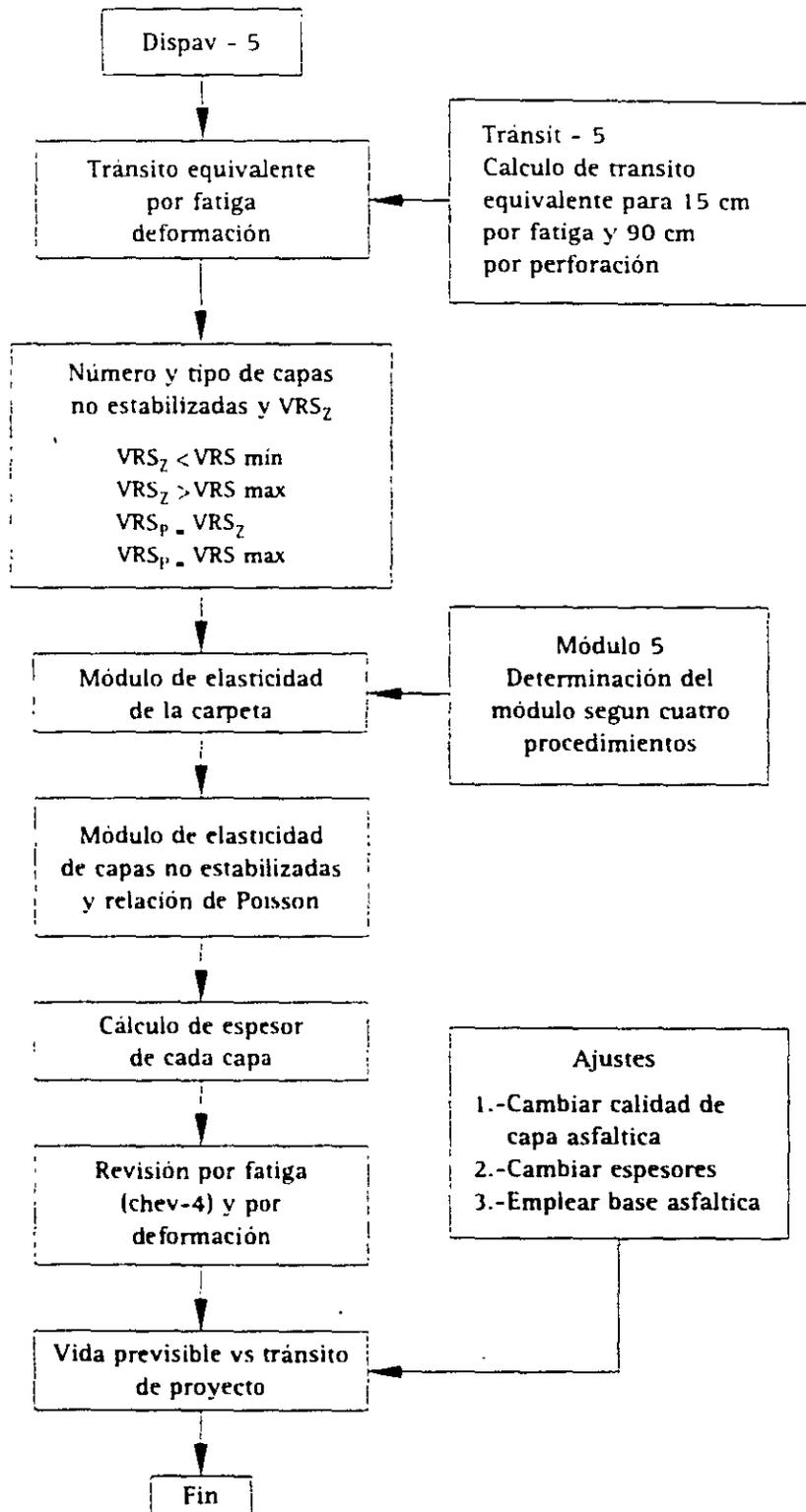


Figura 2.27 Despliegado de pantalla

DISPAV-5

DATOS Y RESULTADOS DEL DISEÑO

Camino de altas especificaciones. Nivel de confianza en el diseño : 85 %

Capa	H cm	VRSz %	E kg/cm <sup>2</sup>	V	Vida previsible	
					Def	Fatiga
Carpeta	17.0		30000	0.35		21.0
Base granular	20.0	100.0	3265	0.35	> 150	
Sub-base	15.0	40.0	1719	0.45	> 150	
Subrasante	50.0	20.0	1058	0.45	> 150	
Terraceria	Semi-inf	5.0	401	0.45		44.3

	Vida previsible	Tránsito proyecto
Deformación	44.3	36.4
Fatiga	21.0	29.6

El diseño no es adecuado.

Tiene usted cuatro opciones:

1. cambiar módulo de carpeta
2. cambiar espesores
3. emplear base asfáltica
4. salir del programa

Introduzca el número que corresponde a su opción:

fatiga, y finalmente revisar la calidad de rodamiento por el método AASHTO. El método de catálogo puede servir de guía, siempre que se tengan como referencia las estructuras propuestas, sobre todo para condiciones de tránsito pesado intenso, secciones para tránsito T0 y T1.<sup>14</sup>

### **2.2.7 Consideraciones adicionales**

El diseño de un pavimento requiere tomar en cuenta otros aspectos además del espesor y la disposición de las capas que integran su estructura, aspectos que, por otra parte, son igualmente importantes para el adecuado comportamiento del pavimento. Por lo tanto, el proyectista debe considerarlos e incluirlos en el proyecto, como recomendaciones, lineamientos, planos y especificaciones.

Estos aspectos son los siguientes: acotamientos, materiales, drenaje y subdrenaje, texturizado, rugosidad, resistencia al derrapamiento y objetivos y limitaciones.

#### **2.2.7.1 Acotamientos**

Tienen una gran importancia en el comportamiento de los pavimentos, pues además de su trascendencia como elementos de estacionamiento temporal para casos de emergencia, descanso y eventualmente tránsito de vehículos en caso de accidentes o reparaciones al camino, su presencia es necesaria para proteger el pavimento.

Por tales razones, en caso de prever su utilización como un carril adicional de circulación, deberán contar con un pavimento similar al de los carriles de circulación.

En caso contrario, el Instituto del Asfalto recomienda que su pavimento se diseñe para un tránsito equivalente al 20% del utilizado para el carril de diseño.

---

<sup>14</sup> Zárata Aquino, M., "Reflexiones acerca del diseño, construcción y control de calidad de los pavimentos flexibles", ponencia leída durante el Segundo Congreso Mexicano del Asfalto. México, 2001.

Por su parte, el método de catálogo español recomienda que cuando el acotamiento tenga una anchura igual o menor que 1.25 metros, su pavimento sea una prolongación del utilizado en el carril de diseño.

Si el ancho es mayor de 1.25 m, recomienda lo siguiente, de acuerdo con la categoría de tránsito.

Tránsito	Carpeta	Base de suelo cemento o	
		grava cemento	Base hidráulica
T0	6	18	-
T0	12	-	18
T1	6	15	-
T1	10	-	18
T2 a T4	pavimento similar al de la calzada		

### 2.2.7.2 Materiales

Ante la dificultad de determinar el comportamiento de los materiales bajo el efecto del agua, temperatura, fatiga y otros factores, en el que además interviene la inevitable variabilidad y la influencia de los procesos constructivos, se ha propiciado que los materiales para pavimentación sean estandarizados, disponiéndose normas que regulan las características principales que más intensamente inciden en su comportamiento, como son: la composición granulométrica, forma de las partículas, contenido de finos y su naturaleza, etcétera, de tal manera que los diferentes organismos involucrados emitan especificaciones para controlar las características de los materiales.

En general, organismos como la AASHTO y, en México, la SCT, emiten las especificaciones que el proyectista deberá considerar en el trabajo, incluyendo las características de calidad y de resistencia que, a su juicio, sean convenientes.

En los últimos años se nota una tendencia a utilizar con mayor intensidad materiales locales, marginales y subproductos industriales o reciclados,

así como nuevos, como son los modificadores asfálticos. Es necesario llevar a cabo ensayos especiales en estos materiales, para evaluar sus propiedades, en particular sobre la durabilidad y comportamiento a la fatiga.

El proyectista deberá ser cuidadoso en este sentido para obtener los resultados requeridos.

### **2.2.7.3 Drenaje y subdrenaje**

El agua es uno de los factores que más contribuyen al deterioro de los pavimentos, por lo que deberá concederse importancia a su rápido desalojo para evitar la concentración tanto en la superficie como en alguna de las capas que constituyen el pavimento, incluida la subrasante.

Para obtener un mejor comportamiento del pavimento, el proyectista debe reconocer que existen varias formas en que el agua puede entrar a la estructura del pavimento y a la capa subrasante, y debe, en consecuencia, tomar las medidas pertinentes para proponer sistemas de drenaje y subdrenaje que actúen con efectividad.

En relación con el drenaje superficial, cabe anotar que se deberán tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La pendiente transversal del pavimento tendrá que ser por lo menos de uno por ciento.
- No se deberán admitir depresiones en la superficie que pudieran provocar estancamientos de agua.
- El texturizado habrá de facilitar la expulsión rápida del agua de manera transversal.
- No deberán existir obstáculos que faciliten el encharcamiento del agua en los acotamientos.
- Las juntas en el pavimento tendrán que construirse en forma adecuada. De igual manera, no deberán permitirse agrietamientos en el pavimento que faciliten la filtración de agua a las capas inferiores.

Por lo que respecta al subdrenaje, deberán tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- Cuando sea necesario, y sobre todo en el caso de pavimentos con tránsito pesado intenso, en los que podría presentarse el fenómeno de bombeo, se considerará la presencia de capas de materiales permeables, incluyendo la sub-base, que permitan el flujo del agua hacia subdrenes longitudinales. Los tubos perforados deberán conectarse al exterior en forma adecuada.
- Podrá hacerse uso de materiales tales como geotextiles, geodrenes, geo-compuestos, u otros, es recomendable el asesoramiento del proveedor para obtener mejores resultados.

#### **2.2.7.4 Texturizado**

La textura superficial determina la rapidez con la que el agua puede escapar de entre la llanta y el pavimento, y también la rapidez con la que se escurre por la superficie durante la lluvia. El agua en el pavimento puede ocasionar una pérdida de contacto entre la llanta y su superficie, y provocar así la pérdida del control de la dirección del vehículo y, por ende, su deslizamiento. Este fenómeno se conoce como hidropneumático o acuapneumático y ocurre generalmente cuando se conduce un vehículo a gran velocidad bajo la lluvia, y se forma sobre la superficie de rodamiento una lámina de agua que alcanza un nivel crítico en función de la velocidad del vehículo.

Con el fin de minimizar o evitar la ocurrencia de este fenómeno, a los pavimentos se les debe proporcionar una textura superficial que debe ser compatible con el ambiente, el límite de velocidad de la carretera, la intensidad de tránsito, la topografía y las características geométricas de la vialidad.

Existen varias formas para proporcionar una textura adecuada a la superficie de los pavimentos, las más empleadas son las siguientes: carpetas de rodamiento con texturas gruesas y agregados no pulimentables, por mencionar algunos.

#### **2.2.7.5 Rugosidad**

Es el parámetro fundamental para calificar la calidad de rodamiento de un pavimento, tanto inicial como a lo largo del tiempo, y es el que define el comportamiento del pavimento, por lo que se trata de un concepto muy

importante, sobre todo cuando se involucra en un sistema de administración de pavimentos. Se asocia tanto a los aspectos de comodidad como de seguridad para el usuario. Se considera que se alcanzará la rugosidad o regularidad superficial deseada si se cumplen simultáneamente las siguientes condiciones:

1. Las irregularidades del pavimento, controladas con una regla móvil con una longitud de tres metros para carreteras, provistas de registrador gráfico, no deben ser superiores a tres milímetros en la dirección longitudinal y de seis milímetros en la dirección transversal.
2. La uniformidad superficial de un lote, medida por el índice de perfil, determinado con un perfilógrafo tipo California, no debe ser superior al límite indicado en la tabla 2.33, de acuerdo con el tipo de vialidad.

Tabla 2.33 Valores recomendados para el índice de perfil

Tipo de vialidad	Índice de perfil aceptable para una velocidad de operación, cm/km	
	≤ 75 kph	> 75 kph
Autopistas y carreteras de primer orden en tangentes y curvas de radio mayor que 457 metros	--	15.8
Autopistas y carreteras de primer orden en curvas con radio mayor que 259 metros pero menor que 457 metros	--	18.9
Rampas y lazos	47.3	47.3
Carreteras secundarias	47.3	18.9

Cuando las irregularidades exceden los tres milímetros, pero son menores que 13 milímetros, la superficie del pavimento puede corregirse por rebajado o fresado, cuidando solamente que no se produzca una superficie lisa. Si se excede este último valor, podrá corregirse la superficie con el procedimiento anterior, si es que se encuentra dentro de las tolerancias relativas al espesor

de la carpeta; de lo contrario deberá ser demolido y reemplazado el tramo considerado.

Por lo que respecta al parámetro “índice de perfil”, vale anotar que en diversas investigaciones se ha comprobado que existe una correlación con el índice de servicio actual (ISA), que se presenta en la tabla 2.34.

Tabla 2.34 Correlación entre el índice de perfil y el índice de servicio actual.

Índice de perfil, pulg/milla	Índice de servicio actual (ISA)
3	4.8
7	4.5
12	4.3

Por otra parte se ha encontrado que es muy importante alcanzar el mayor valor de índice de perfil inicial, no solamente desde el punto de vista de la comodidad del usuario, sino porque con ello se incrementa la vida útil del pavimento. Por ejemplo, la diferencia entre 4.8 y 4.3 inicial, índice de perfil de 5 a 18.9 cm/km, inicial, puede significar aproximadamente un 20% más de ejes acumulados de 8.2 toneladas.

Es conveniente señalar que los factores que concurren para obtener la calidad de rodamiento deseada en el proyecto, son los siguientes:

- Subrasante adecuada, bien construida y con características drenantes.
- Superficies firmes e indeformables para el movimiento del tránsito de construcción.
- Extremo cuidado en la instalación de las marcas de referencia para la extendidora.
- Concreto asfáltico uniforme y trabajable.
- Proceso constructivo uniforme, sin interrupciones.
- Control de la superficie terminada con perfilógrafo.
- Aplicación de incentivos al contratista para promover la obtención de calidad al nivel de excelencia.

# DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Fe de erratas

Página	Línea	Dice	Debe decir
6	7	AMMAC	AMAAC
18	23	puede definirse la forma como un sistema funciona [...]	puede definirse como un sistema que funciona [...]
29	17	por los tanto,	por lo tanto,
40	2	por lo que se ha impulsando el estudio [...]	por lo que se ha impulsado el estudio [...]
42	15	• es una propiedad mecánica [...]	• Es una propiedad mecánica [...]
43	Nota 1	[...] frost action and temperture [...]	[...] frost action and temperature [...]
44	30	secretaría de Comunicaciones y Transportes,	Secretaría de Comunicaciones y Transportes,
45	Nota 10	"Pavement Analysis and Design.	"Pavement Analysis and Design."
48	31	[...] deformaciones de tensión; en [...]	[...] deformaciones de tensión en [...]
50	25	Centro belga	Centro Belga
52	12	AASHTO	AASHO
52	13	AASHTO	AASHO
52	14	AASHTO	AASHO
52	15	Design of Rigid Pavement Structures	Design of Flexible Pavement Structures
52	18	Interim Guide for the Design of Rigid Pavement Structures	Interim Guide for the Design of Pavement Structures
52	21	Interim Guide for the Design of Rigid Pavement Structures	Interim Guide for the Design of Pavement Structures
53	6	AASHTO	AASHO
53	26	módulo de resiliencia, PSI	módulo de resiliencia en lb/pulg <sup>2</sup>
74	10	diseño del pavimentol	diseño del pavimento
86	Nota 11	K. Lexington, "Thickness Design, Asphalt Pavements for Highways and Streets", en Manual Series, núm. 1. Estados Unidos, Instituto del Asfalto, 1993.	"Thickness Design, Asphalt Pavements for Highways and Streets", en Manual Series, núm. 1. Estados Unidos, Instituto del Asfalto, Lexington, KY. 1993.
94	24	[...] construidas sobre granulares [...]	[...] construidas sobre bases granulares [...]
117	28	para manera que sea [...]	de manera que sea [...]
127	12	resistencia al derrapamientoy objetivos [...]	resistencia al derrapamiento, y objetivos [...]

# DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Fe de erratas

Página	Línea	Dice	Debe decir
6	7	AMMAC	AMAAC
18	23	puede definirse la forma como un sistema funciona [...]	puede definirse como un sistema que funciona [...]
29	17	por los tanto,	por lo tanto,
40	2	por lo que se ha impulsando el estudio [...]	por lo que se ha impulsado el estudio [...]
42	15	• es una propiedad mecánica [...]	• Es una propiedad mecánica [...]
43	Nota 1	[...] frost action and temperture [...]	[...] frost action and temperature [...]
44	30	secretaria de Comunicaciones y Transportes.	Secretaria de Comunicaciones y Transportes.
45	Nota 10	"Pavement Analysis and Design.	"Pavement Analysis and Design."
48	31	[...] deformaciones de tensión; en [...]	[...] deformaciones de tensión en [...]
50	25	Centro belga	Centro Belga
52	12	AASHTO	AASHO
52	13	AASHTO	AASHO
52	14	AASHTO	AASHO
52	15	Design of Rigid Pavement Structures	Design of Flexible Pavement Structures
52	18	Interim Guide for the Design of Rigid Pavement Structures	Interim Guide for the Design of Pavement Structures
52	21	Interim Guide for the Design of Rigid Pavement Structures	Interim Guide for the Design of Pavement Structures
53	6	AASHTO	AASHO
53	26	módulo de resiliencia, PSI	módulo de resiliencia en lb/pulg <sup>2</sup>
74	10	diseño del pavimentol	diseño del pavimento
86	Nota 11	K. Lexington, "Thickness Design, Asphalt Pavements for Highways and Streets", en Manual Series, núm. 1. Estados Unidos, Instituto del Asfalto, 1993.	"Thickness Design, Asphalt Pavements for Highways and Streets", en Manual Series, núm. 1. Estados Unidos, Instituto del Asfalto, Lexington, KY. 1993.
94	24	[...] construidas sobre granulares [...]	[...] construidas sobre bases granulares [...]
117	28	para manera que sea [...]	de manera que sea [...]
127	12	resistencia al derrapamientoy objetivos [...]	resistencia al derrapamiento, y objetivos [...]

- Equipo humano bien entrenado y consciente de su labor como grupo.
- Proyecto adecuado.

### 2.2.7.6 Resistencia al derrapamiento

Es un importante concepto que se relaciona con la seguridad del usuario y que depende de la textura alcanzada en la superficie del pavimento.

Se determinará la resistencia al derrapamiento con un dispositivo de medición continua y en condiciones de superficie mojada, del tipo Mu-meter o similar, debiendo cumplir con los valores indicados en la tabla 2.35.

Tabla 2.35 Valores recomendados de resistencia al derrapamiento en condiciones de superficie mojada

Tipo de vialidad	Velocidad de prueba, kph	Resistencia mínima al derrapamiento
Autopistas y carreteras de primer orden	95	0.60
	65	0.70
Normativa SCT	75	0.60

La resistencia al derrapamiento depende del estado del equipo, de la experiencia del personal, de la buena ejecución de los trabajos de acabado y texturizado, así como de la calidad de los agregados y de la dosificación de la mezcla. En caso de no cumplir con los valores antes recomendados, deberá procederse a aplicar una técnica de rebajado o fresado en el tramo a consideración.

### 2.2.7.7 Alcances del proyecto

Además del diseño de la estructura del pavimento, el proyecto deberá contener otros aspectos, que lo individualicen. Los aspectos antes citados son los siguientes, a manera enunciativa, pero no limitativa.

- a) Especificaciones de calidad, características y tipo de los materiales y productos utilizados. Las especificaciones deberán tener en cuenta los conceptos fundamentales que permitan cumplir con los atributos propios de los pavimentos. Deberán tener un carácter dinámico, pudiendo adecuarse a los cambios tecnológicos y a las necesidades prácticas detectadas mediante la evaluación periódica de los pavimentos y el seguimiento de su comportamiento.
- b) Bancos de materiales. Se deberá establecer el tratamiento adecuado para la utilización de los materiales, incluyendo el caso de materiales reciclados. Deberá vigilarse que los bancos propuestos dispongan de materiales con la calidad y volumen necesarios.
- c) Principales lineamientos constructivos. Se deben establecer los aspectos mínimos que deberán cumplirse, sin que ello limite al contratista de usar o proponer procedimientos que igualen o mejoren el nivel de calidad que se desea obtener, y sin liberarlo de su participación en la obra como el principal responsable de la calidad. Se indicará el tratamiento, manejo y utilización de los materiales de terracerías y de la superficie de apoyo del pavimento, espesores de las capas y grado de compactación, acabados, tolerancias, aspectos relevantes del control de calidad durante la ejecución de la obra, condiciones para la apertura al tránsito, sanciones y bonificaciones al contratista, etcétera. En casos especiales se indicará la conveniencia o necesidad de efectuar tramos de prueba.
- d) El proyecto contendrá además los planos y gráficas necesarias para su mejor comprensión, y mostrará los detalles que presenten las relaciones de los pavimentos con los diferentes elementos de la carretera.
- e) El proyecto debe incluir también las recomendaciones para el control de calidad durante la construcción, las limitaciones para la ejecución de los trabajos y finalmente la estrategia de mantenimiento para que el pavimento cumpla con sus funciones en el ciclo de vida previsto.

### **2.2.7.8 Objetivos y limitaciones**

Finalmente, el proyectista debe tomar en cuenta una serie de conceptos importantes para la realización del proyecto de un pavimento, los cuales se mencionan a continuación:

- a) El proyecto debe proponer un pavimento que proporcione las condiciones más económicas posibles, tomando en cuenta los costos de construcción, conservación y de operación.
- b) Deberá ser un pavimento que proporcione las máximas condiciones de seguridad y comodidad para el usuario, así como la adecuada capacidad estructural para soportar las cargas impuestas por el tránsito.
- c) Deberá presentar condiciones mínimas de deterioro físico producido por el tránsito y los factores ambientales.
- d) El pavimento deberá operar bajo mínimos niveles de ruido y tener una buena apariencia.

Algunos de estos aspectos pueden conducir a situaciones de conflicto, por lo que el proyectista debe definir y jerarquizar los objetivos, con base en la importancia del proyecto. Por lo anterior, este profesional deberá considerar en su análisis todas las estrategias o alternativas posibles, valorándolas desde los puntos de vista de sus requerimientos de conservación, predicción de su comportamiento, costos y beneficios asociados, y deberá juzgar también la cantidad y calidad de la información necesaria para la ejecución del proyecto. También será necesario que considere las limitaciones que en cada caso configuren un conjunto de restricciones, como la disponibilidad de recursos económicos, plazos de construcción, disponibilidad de materiales, capacidad de los contratistas en cuanto a equipos y experiencia.