



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA

TRABAJO DE TESIS:

**CRITERIOS PARA LA ELECCIÓN DE PAVIMENTO
RÍGIDO Y/O FLEXIBLE EN LA REHABILITACIÓN DE LA
AUTOPISTA DE CUOTA CHAMAPA – LA VENTA.**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
PRESENTA

JOSÉ GUADALUPE SILVA TORRES

DIRECTOR DE TESIS

M. I. GABRIEL MORENO PECERO

CIUDAD UNIVERSITARIA NOVIEMBRE DE 2006





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS:

◆ **M. I. GABRIEL MORENO PECERO POR SU APOYO, TIEMPO Y DEDICACIÓN EN LA ELABORACIÓN Y REVISIÓN DE ESTE TRABAJO DE TESIS**

◆ **A LOS SINODALES QUE ME APOYARON CON SUS OBSERVACIONES CORRECTAS Y OPORTUNAS**

◆ **A MI GLORIOSA FACULTAD DE INGENIERÍA**



TRABAJO DE TESIS

CRITERIOS PARA LA ELECCIÓN DE PAVIMENTO RÍGIDO Y/O FLEXIBLE EL LA REHABILITACIÓN DE LA AUTOPISTA CHAMAPA – LA VENTA.

ÍNDICE

<u>INTRODUCCIÓN GENERAL</u>	2
<u>CAPÍTULO I.- ANTECEDENTES</u>	5
I.1.- Situación de la Infraestructura en México.....	6
I.2.- Requerimiento de Infraestructura.....	16
I.3.- Requerimientos de Infraestructura carretera.....	20
I.4.- Autopista Chamapa – La Venta.....	24
<u>CAPÍTULO II.- PAVIMENTOS RÍGIDOS Y FLEXIBLES</u>	38
II.1.- Conceptos Básicos.....	39
II.2.- Generalidades del proceso de diseño.....	148
II.3.- Métodos de Diseño.....	161
II.4.- Métodos de Diseño en la Rehabilitación de la Autopista Chamapa – La Venta.....	224
<u>CAPÍTULO III.- EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN</u>	233
III.1.- Proyecto de rehabilitación de la Autopista Chamapa – La Venta.....	234
III.2.- Condiciones actuales de la autopista.....	244
III.3.- Alternativas de Pavimentación.....	257
III.4.- Análisis comparativo de las alternativas de pavimentación.....	266
III.5.- Elección de pavimento para el caso de la autopista.	295
<u>CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u> .	320
ANEXOS	333
GLOSARIO	361
BIBLIOGRAFÍA	365

INTRODUCCIÓN GENERAL

INTRODUCCIÓN GENERAL.

Este trabajo es mi primer acercamiento al conocimiento de los pavimentos y como tal requerirá mejoras y/o correcciones, y deberá adicionársele información relativa a los avances tecnológicos en todos los aspectos que se contemplan para la generación de vías terrestres. Básicamente es el primer intento por constituir una guía que sirva de orientación al profesional en los conceptos de pavimentos de concreto asfáltico y concreto hidráulico y su aplicación en el campo de las vías terrestres dentro del vasto campo de la ingeniería civil.

Así pues, el presente documento nace del interés por los pavimentos y la necesidad de comprender los conceptos generales de los mismos, que en corto plazo me sirvieron para familiarizarme con la obra de rehabilitación de la Autopista Chamapa – La Venta y a largo plazo me servirá de referencia en futuras obras. De esta manera, tuve la oportunidad de aplicar los conceptos aprendidos de pavimentos en un análisis comparativo que identifica las ventajas y beneficios de cada tipo de pavimento; dicho análisis servirá de referencia para justificar la aplicación de la mejor alternativa en base de criterios de Seguridad, Economía y Funcionalidad.

En general se presentan las descripciones de cada tipo de pavimento, su estructuración, las características de los materiales que los constituyen y sus aplicaciones típicas.

Este trabajo se basa en la evaluación estructural del pavimento de la autopista Chamapa – La Venta; dicha evaluación propuso 3 alternativas de rehabilitación. La primera y la segunda alternativas emplean una capa de rodadura de concreto asfáltico y la tercera alternativa constituye una aplicación típica del denominado whitetopping.

En la comparación de las alternativas y la selección de la más adecuada se recurrió a conocer su objetivo, funcionalidad y seguridad, durabilidad y economía, en base de los conceptos básicos de cada tipo de pavimento, identificando los criterios que determinen la conveniencia de aplicar una u otra opción. Así pues, se manifiestan los beneficios de cada tipo de pavimento, especialmente en lo que se refiere al costo de construcción y el mantenimiento que suponen.

En general la primera alternativa consiste en un corte de carpeta asfáltica deteriorada en aproximadamente 10 cm. y la posterior reposición 12 cm de espesor con concreto asfáltico normal y una sobrecarpeta de 3cm de espesor con alta adherencia y resistencia al desgaste.

La segunda alternativa se trata de un corte de 10cm de espesor de la carpeta deteriorada y dicho material se desperdicia. Luego se realiza un corte del espesor de carpeta asfáltica faltante y hasta llegar a nivel de base y subbase; los materiales de este segundo corte se recuperan y se estabilizan con cemento para conformar una nueva base del pavimento. Finalmente se procede con la colocación de una carpeta asfáltica nueva de 12cm de espesor de concreto asfáltico normal, cubierta por una

sobrecarpeta de alto rendimiento de 3cm de espesor como en el caso de la primera alternativa.

La tercer alternativa consiste en la aplicación típica del whitetopping (Capa de rodamiento elaborada con concreto hidráulico), previa reparación de los agrietamientos y baches más severos.

Es importante observar que tanto el pavimento rígido como las alternativas de pavimento flexible ofrecen diferente grado de seguridad, distintos requerimiento de tecnología y procesos constructivos, y sobre todo distintos resultados económicos.

Por ultimo, este trabajo trata generalidades de los métodos de diseño de pavimentos que más se emplean actualmente (AASHTO, PCA y Método del Instituto de Ingeniería de la UNAM) y las consideraciones de cada uno de ellos; presenta los beneficios del uso de modelos mecanístico-empíricos, así como también el proceso que se debe seguir para efectuar un diseño de pavimentos, plantea las características de los materiales empleados actualmente en la labor de pavimentación y hace énfasis en la importancia de los pavimentos en la infraestructura nacional actual en un sistema en desarrollo, que demanda cada vez mas y mejores recursos humanos con capacidad para el diseño, la construcción y operación de las nuevas obras viales

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

I.1.-
Situación de la
Infraestructura en
México

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se reflexiona sobre la situación que el país vive en lo correspondiente al transporte y a la necesidad de éste para el movimiento de materiales para el sector productivo.

Además se hace una breve descripción del papel cada transporte aéreo, naval, ferroviario y carretero en un sistema que tiende a ser integral y globalizado.

Se hace énfasis en la necesidad de generar inversiones de capital para crear un sistema de transporte que sea rápido, seguro y con menores costos de operación, buscando las ventajas de cada uno de los tipos de transporte y adecuándolas a las necesidades de la industria, del campo, de los centros urbanos y turísticos de México.

Por último se desarrolla información sobre el sector carretero, las redes existentes y sus necesidades de modernización y ampliación que actualmente se atienden con inversiones mixtas de capital privado y público mediante diversos esquemas de concesión.

I.1.- SITUACIÓN ACTUAL DE LA INFRAESTRUCTURA EN MÉXICO

I.1.1.- SITUACIÓN ACTUAL DEL TRANSPORTE.

La evolución económica del país plantea nuevos retos de modernización en los diferentes sectores comerciales; así pues, **la integración de México a la economía globalizada requiere de transformaciones internas que involucran la modernización de la infraestructura.**

Todas las actividades que inciden en el desarrollo de los países y en la rapidez con que se produce bienestar en los mismos, dependen de varios aspectos, entre ellos en forma implícita el transporte.

El transporte es una de las actividades prioritarias para la industria nacional por lo que su participación en mercados nacionales y extranjeros es cada vez mayor, lo que obliga a mejorar permanentemente su servicio para obtener la preferencia de un consumidor.

Actualmente la infraestructura del transporte en México, se ubica en un proceso de desarrollo que involucra la participación de la inversión privada en combinación con recursos federales. De hecho, las empresas más dinámicas están dando prioridad a alianzas estratégicas para reducir costos, y evitan entramparse en competencias tarifarias en el transporte.

Con este tipo de inversiones se pretende enlazar en forma rápida, segura, y con menores costos de operación, las principales zonas de producción industrial y agropecuaria, así como a los centros urbanos y turísticos más importantes del territorio nacional.

I.1.2.- DISTRIBUCIÓN ACTUAL DEL TRANSPORTE.

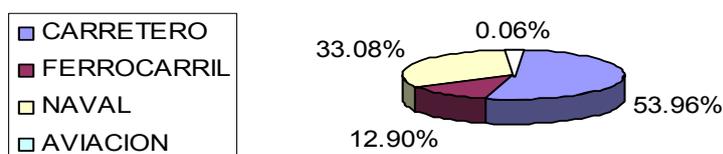
Los transportes (ferrocarril, barco, automóvil y aviación comercial) funcionan como **factores decisivos en la satisfacción de las necesidades del mundo contemporáneo.**

La infraestructura en México tiene **características técnicas como volumen de tránsito, operación, conservación, mantenimiento, etc. que se vuelven insostenibles** respecto a su capacidad y costo.

La coordinación en México de los distintos modos de transporte es deficiente. **La infraestructura y el equipo de transporte tienen características unimodales**, pues existe poca o nula organización en las cadenas de transporte para reducir costos y tiempos de maniobra.

Actualmente en México es necesaria **una modernización integral y con miras a complementar el transporte existente**, con las respectivas interrelaciones proyectadas a **largo plazo**. Los requerimientos de modernización y crecimiento económico del transporte demandan el incremento de la **capacidad, eficiencia y competitividad de la infraestructura.**

DISTRIBUCIÓN ACTUAL DEL TRANSPORTE



Gráfica 1. Distribución actual del transporte según datos del INEGI. (2004)

I.1.3.- EL SISTEMA FERROVIARIO

Este sistema cuenta actualmente con **tres líneas troncales principales** y da su servicio mediante una **extensión de 26 613 kilómetros. Cubre todos los estados del país, con excepción de Baja California Sur y Quintana Roo.**

Las líneas troncales o **principales son la Noroeste, la Pacífico Norte y la Sureste.** Actualmente el ferrocarril recupera la carga que por sus características debe ser transportada por este medio. **Se moderniza la red ferroviaria, haciéndola más rentable y orientada, principalmente, hacia el mercado de carga. Dicha modernización es impulsada por la privatización del sector,** la regulación de las relaciones entre concesionarios, entre prestadores de servicio y usuarios.

En términos de toneladas-kilómetro, los nuevos concesionarios movilizan el 98% del tráfico ferroviario y operan el 81% de las vías principales

Según datos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (**SCT**), **con la inversión privada se ha recuperado ligeramente el volumen de carga que se había perdido en años anteriores.** Se vislumbra la mejora continua y un incremento mayor de volúmenes. En los resúmenes que presenta esta institución, se manifiestan avances en los sistemas de control administrativo, la movilización proporcionalmente mayor de carga que de personas, la disminución de robos de mercancías, el incremento en la inversión para el mejoramiento de la infraestructura y la adquisición de nuevos y mejores equipos; así como el incremento de los ingresos y la reducción de los costos de operación.

Así mismo, con la “Reestructuración del Sistema Ferroviario Mexicano”, **se continúan los estudios para dotar a la Zona Metropolitana del Valle de México de un servicio de transporte ferroviario de pasajeros suburbano confiable, eficiente, moderno y de bajo impacto ambiental.** En este sentido, se han configurado tres corredores principales, Buenavista-Cuautitlán-Huehuetoca, Naucalpan - Ecatepec y Los Reyes-Aragón. Se ha considerado la importancia de utilizar la infraestructura existente en 240 km. de vías férreas y el derecho de vía que existe en estas zonas, manteniendo una coordinación con los gobiernos del Estado de México y del Distrito Federal.

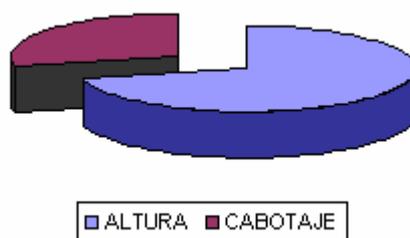


Figura 1. La red ferroviaria en México.

En lo que se refiere a la privatización, de acuerdo con la referencia 9, al mercado del transporte ferroviario no le devolverá los grandes volúmenes que se movilizaban cuando el ferrocarril constituyo su monopolio, sino que debe primeramente superar su deterioro y posteriormente aumentar su capacidad competitiva con en servicio de autotransporte. Así pues se tiene proyectado que con esta intervención se lograra pasar de 15% de participación en movilización de carga nacionalmente al 25% en el año 2025.

I.1.4.- EL TRANSPORTE MARÍTIMO

El transporte de mercancías por agua es el segundo modo de movilización en importancia en nuestro país, pues traslada alrededor de 33% del total de la carga (254.8 millones de toneladas anualmente). Sin embargo, este transporte atraviesa una severa crisis principalmente en cuanto a la distribución de la carga.



Gráfica 2. Distribución del transporte marítimo por tipo de tráfico.

Esta distribución se debe principalmente a la **baja oferta que existe de embarcaciones mexicanas que estén en condiciones de prestar un servicio competitivo** y por las restricciones que para la prestación del tráfico de cabotaje.

Actualmente se aplican **programas para el crecimiento de la flota mercante mexicana con estímulos económicos y la reserva de ciertos tráficos estratégicos para la marina nacional.**

Así pues el sector marítimo en México promueve el fortalecimiento de la flota mercante y con ello busca garantizar las condiciones competitivas propias de un mejor costo-país.

Como parte de la infraestructura marítima se ubica la correspondiente a sus puertos, donde se almacena y distribuye la carga de contenedores cada vez de mayor tonelaje. Así entonces, los requerimientos técnicos y económicos de los pavimentos en los puertos se vuelven relevantes por la necesidad creciente de manejar volúmenes considerables de carga.

En los puertos generalmente se usa el concreto hidráulico por las condiciones implícitas del ambiente de mar, es más resistente al desgaste por agentes climáticos y tolera, con los respectivos aditivos, las agresiones de humedad y calor.



Figura 2. Puertos más importantes de México.

I.1.5.- AEROPUERTOS

En cualquier país, la red aeroportuaria tiene gran importancia debido a que este transporte es rápido, seguro, y eficiente para el traslado de personas y mercancías de una parte a otra

A partir de la II Guerra Mundial este transporte recibió un gran impulso tecnológico con fines militares, el cual actualmente se aplica en la aviación comercial para el manejo de mayores volúmenes de carga y la rapidez de su traslado.

Así pues, hoy en día la Industria Aeronáutica produce aviones tan rápidos como la velocidad del sonido y en la aviación comercial se utilizan grandes naves para pasajeros y carga, condiciones que se muestran como exigencias para los pavimentos de los aeropuertos.

Conforme se da el incremento en la capacidad de carga de los aviones modernos, evoluciona la necesidad de crear infraestructura de pavimentos adecuada.

I.1.5.1- RED AEROPORTUARIA MEXICANA

El transporte aéreo ha tenido un gran crecimiento en los últimos 40 años en Latinoamérica, siendo Argentina, Brasil, Colombia, México y Venezuela los países con mayor número de kilómetros volados en líneas aéreas regulares.

Desde los años 80 México cambió su política proteccionista a una apertura al capital privado (nacional y extranjero), reduciendo o eliminado los subsidios y ofreciendo los servicios de transporte bajo criterios económicos de rentabilidad privada. En la década anterior, México se involucró más en el modelo neoliberal y privatizó: primero las aerolíneas (1988) y el autotransporte (1989), siguiendo los puertos (1993), después el ferrocarril (1996), más recientemente los aeropuertos (1998). **REF. *8**

En el proceso de globalización cada vez son más los productos transportados por el modo aéreo observándose que las aerolíneas internacionales de carga y de pasajeros cada día aumentan su capacidad. Consecuentemente, también junto con la modernización de los aeropuertos avanza la infraestructura de pavimentos para pistas y plataformas.



Figura 3. Aeropuertos de México.

I.1.6.- CARRETERAS

México cuenta con 342, 000 kilómetros de carreteras, básicos para el flujo y la distribución de bienes y servicios. 2006

En este sistema resaltan 14 corredores principales que entrelazan zonas de producción industrial y agropecuaria y las más importantes ciudades de la República.



Del total de caminos en México, **sólo 32.80% son carreteras pavimentadas, en tanto que 67.2%, son terracerías o caminos revestidos. REF. *3**

Según la referencia 3, el 50.8%, de la red libre a cargo de la SCT se encuentra en mal estado, lo que provoca un sobrecosto de operación a los usuarios de las carreteras por el mayor uso de combustibles, lubricantes, llantas, entre otros.

La extensión de las autopistas de cuota es de 6,429 kilómetros (las administradas por CAPUFE, por las concesionarias y por los gobiernos estatales). Sin embargo su uso se limita por el alto costo del peaje que constituye un problema adicional al transportista, que a veces opta por utilizar caminos donde la seguridad (por accidentes o delitos) no está garantizada.



Corredores del Sistema Carretero Nacional

Situación actual de los Corredores Carreteros

CORREDOR	Longitud	Longitud modernizada		Longitud pendiente por modernizar	
	KM	KM	%	KM	%
México - Nogales con ramal a Tijuana	3,074.5	2,127.5	69.2	947.0	30.8
México - Nuevo Laredo con ramal a Piedras Negras	1,734.9	1,537.0	88.6	197.9	11.4
Querétaro - Ciudad Juárez	1,755.2	1,474.2	84.0	281.0	16.0
Veracruz - Monterrey, con ramal a Matamoros	1,296.8	895.2	69.0	401.6	31.0
Puebla - Progreso	1,327.5	952.5	71.8	375.0	28.2
Mazatlán - Matamoros	1,241.0	983.0	72.0	348.0	28.0
Puebla - Oaxaca - Ciudad Hidalgo	1,007.0	565.0	56.1	442.0	43.9
Manzanillo - Tampico, con ramal a Lázaro Cárdenas y Ecuandureo	1,856.4	1,057.4	57.0	799.0	43.0
Circuito Transistmico	702.4	293.4	41.8	409.0	58.2
Acapulco - Tuxpan	831.9	688.4	82.8	143.5	17.2
Acapulco - Veracruz	851.0	687.0	80.7	164.0	19.3
Altiplano	602.0	50.0	8.3	552.0	91.7
Transpeninsular de Baja California	1,776.2	158.2	8.9	1,618.0	91.1
Peninsular de Yucatán	1,219.0	413.0	33.9	806.0	66.1

Figura 6. Corredores e información de modernización carretera
Publicación Técnica No. 233. Sanfandila, Qro., 2003. SCT

El desarrollo global de las economías, el futuro de la infraestructura en México apunta a la concesión. En los ferrocarriles, la aviación, y las carreteras, **la inversión del sector privado** es una oportunidad para que el país logre: incrementar su capacidad de transporte de carga, de bienes y servicios, el mejoramiento de la calidad de servicio y atención a clientes; eliminar los subsidios a la operación y aportaciones del estado para inversiones; alcanzar mayores inversiones en infraestructura y equipo, mejor eficiencia operativa; y el que disminuya la frecuencia de accidentes con miras al aumento general de la productividad.

I.2.- Requerimientos de Infraestructura

INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se mencionan los requerimientos de infraestructura en base de un panorama de crecimiento poblacional. Se hace énfasis en la necesidad de adecuar el sistema carretero para lograr mejorar las condiciones generales del transporte nacional, generando una eficaz y eficiente relación con las demás redes de transporte existentes.

I.2- REQUERIMIENTOS DE INFRAESTRUCTURA

A partir de la revolución industrial se manifestó que **el desarrollo de infraestructura está íntimamente ligado con el bienestar económico de la población de cualquier país.**

México para el año 2020 alcanzará los 120 000 000 de personas, que necesitan atención en diversos servicios y demandan, entre éstos, un servicio de calidad en transporte terrestre.

Actualmente la población en México está distribuida de tal manera que el 80% se localiza en la zona urbana; entre sus necesidades básicas figura la ubicación de espacios para la creación de nuevas industrias, vivienda y en ese sentido **se deberán incorporar 5600 hectáreas anuales por crecimiento demográfico, de las cuales 20 000 000 m² serán para vialidades. REF*1**

En atención a lo anterior, la infraestructura actual necesita **una modernización que complemente y unifique los modos de transporte, atendiendo específicamente las situaciones de cada uno de ellos, sus potencialidades y sus posibles formas de integración en el largo plazo.**

“Esta situación en la Ciudad de México se vuelve mas compleja cuando se prevé que para el año 2020, estará conurbana con Puebla, Pachuca, Toluca, Cuernavaca, San Juan del Río, Querétaro, Celaya, Salamanca, Irapuato, Silao, León” **REF*1**, debemos entonces **planear los requerimientos de infraestructura, dotándonos de los elementos de tecnología moderna, ampliando las redes de transporte y adoptando las innovaciones** como el autobús eléctrico, trenes de alta velocidad, avión supersónico, autopista inteligente, y aquellos que garanticen el flujo de carga y personas para la nueva ciudad.

Entre otros requerimientos deberán planearse las diversas relaciones entre las redes de transporte existentes, proyectarse adecuadamente otros sistemas de transporte, así como coordinar las relaciones entre los sistemas existentes como el metro, el tren ligero, los ferrocarriles suburbanos y los nuevos sistemas o ampliaciones de los mismos; todo ello con la finalidad de integrar un esquema de infraestructura que permita la fácil, segura y rápida circulación en la urbe.

Por último se menciona el apremio que existe en construir las nuevas carreteras que complementen el sistema actual con la aplicación de pavimentos rígidos y flexibles en la pavimentación.



Como parte de la red de infraestructura actual, se puede ubicar ahora a la autopista Chamapa - La Venta, que facilita el transporte entre el Distrito Federal y la ciudad de Toluca.

En este trabajo se plantea la necesidad de rehabilitar la autopista de cuota Chamapa - La Venta, haciendo referencia a los estudios de evaluación de las condiciones del pavimento viejo. Y en base a varias alternativas para pavimentar, se decide y da seguimiento al proceso constructivo del tipo de pavimento elegido.

I.2.1- LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS Y FLEXIBLES COMO PARTE DE LA INFRAESTRUCTURA EN MÉXICO

La infraestructura de pavimentos se proyecta ahora con exigencias mayores de resistencia, durabilidad y con soporte en un buen costo de construcción y conservación. La construcción de infraestructura de pavimentos con asfalto se ha visto favorecida porque México es aún un país productor de petróleo. Esta situación se aprovechó en varias décadas y fue hasta los años 90, cuando adquiere relevancia el uso de los pavimentos de concreto hidráulico.

Actualmente se tiene una tendencia a adoptar tecnologías favorables al concreto hidráulico, extendiendo el uso de este tipo de pavimento para la construcción y ampliación de carreteras, pues con ello se obtienen, en la mayoría de los casos, menores costos de conservación, ahorros en combustibles para vehículos pesados, el mejoramiento de las superficies de rodamiento y mayor seguridad.

En México se sigue usando mayormente el pavimento asfáltico, que tiene igual disponibilidad que el concreto hidráulico, pues ambos son materiales abundantes en nuestro país, y a su alrededor se ha desarrollado todo un parque de maquinaria y tecnologías que disponibles para seguir aprovechándolos. En estas condiciones, el proyectista y constructor de pavimentos debe beneficiarse de las ventajas de cada tecnología para ampliar la infraestructura carretera del país.

Entonces para que México desarrolle nuevas y mejores carreteras, seguras y más modernas, más resistentes y durables, con mejores superficies de rodamiento y que requieran, por su calidad, menores recursos para su conservación y mantenimiento debe siempre realizarse un análisis comparativo de estos pavimentos y decidir por la mejor opción.

Cabe aclarar que **la finalidad de este trabajo no es promover el uso del concreto hidráulico ni del concreto asfáltico, sino mostrar como evaluar las alternativas de pavimentación en base de parámetros objetivos, económicos y técnicamente definidos. Dicha evaluación se base en criterios de autoridades, proyectistas, constructores, fabricantes de mezcla y de equipo, investigadores, así como especialistas en conservación de carreteras.**

I.3.- Requerimientos de Infraestructura carretera

INTRODUCCIÓN

En esta parte se plantean los procedimientos que se aplican actualmente para satisfacer los requerimientos de infraestructura carretera con inversión mixta y los beneficios que se obtienen tanto para el Estado como para la inversión privada.

1.3.1.- EL SECTOR COMUNICACIONES

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes, **(SCT)**, **administra el desarrollo de la red carretera, la regulación del transporte y su ampliación y modernización, y se dedica a la conservación de caminos y autopistas.**

La infraestructura carretera consiste de **caminos, carreteras libres, de cuota y vialidades urbanas primarias y secundarias.** Esta infraestructura en la Ciudad de México se “complementa” con el sistema de transporte colectivo metro, las líneas férreas y aeropuertos y recientemente, en la ciudad de México, con el metrobus.

En general las obras y las acciones del sector carretero se orientan principalmente a la conservación y modernización, la ampliación y mejoramiento del servicio público de transporte. **Con esta finalidad la SCT realiza actividades como atender tareas de investigación, desarrollo tecnológico, asistencia técnica de alto nivel y normalización en materia de planificación, proyecto, construcción y explotación de las redes viales, incluyendo los aspectos de ingeniería de tráfico y seguridad de la circulación.**

1.3.2.- LA PRIVATIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA

México cuenta con una **amplia cobertura carretera con miras a lograr la modernización en los próximos 10 años;** en el impulso a ello se utilizan ahora **recursos federales y privados en combinación.**

En América Latina, especialmente en Argentina, Chile, México y Perú, se aplica la privatización de la infraestructura, lo cual la convierte en pivote de los programas de reforma económica.

Desde finales de la década de los ochenta y durante los noventa se ejecutó en México una política activa de privatización y siguiendo la misma tendencia de privatización de varias actividades económicas del país (teléfonos, electricidad, puertos, agua, carreteras), la infraestructura se ha abierto al capital privado. Este sector que por décadas había estado totalmente reservada al Estado, acepta la inversión de capital privado nacional y extranjero, mediante las diversas concesiones que se ofrecen para construir, operar, mantener y conservar cientos de kilómetros carreteros, durante periodos de 20 a 30 años.

El gobierno actual plantea y fomenta los programas de privatización generalizada con políticas y reformas económicas, que han fortalecido la privatización carretera y le han dado credibilidad y viabilidad a esta inversión. Con esta forma de “privatización” el estado se libera de la tarea de conservar o mejorar el nivel de servicio de la red vial existente con el uso exclusivo de recursos federales.

1.3.3.- ESQUEMAS DE INVERSIÓN CARRETERA EN MÉXICO.

Estos esquemas **son cambios estructurales manifestados en la apertura y regulación del capital privado**, que permite la entrada de nuevos prestadores de servicios; la diversificación de éstos y la ampliación de rutas. Con estas formas de inversión **se busca consolidar la infraestructura carretera, haciéndola más segura, eficiente, moderna y rentable, proporcionando un servicio de calidad que coadyuve a la integración regional.**

Estos esquemas se han aplicado en los últimos quince años. **Son diseñados por SCT y BANOBRAS para el desarrollo de infraestructura carretera con participación del sector privado mediante la mezcla de capital de riesgo privado, créditos bancarios y recursos federales y estatales** en proporciones determinadas con base en las características propias de cada proyecto. **Estas inversiones permitirán obtener una tasa de rentabilidad razonable para el capital privado y un uso más eficiente de los recursos públicos.**

Sus principales características son:

- Las concesiones **se otorgan mediante licitación pública**
- Se adjudican al participante con la propuesta técnica y financiera que cumple los requisitos establecidos en las bases del concurso y solicita el menor monto total de recursos públicos.
- El plazo de concesión es fijo, de 25 a 30 años, conforme a la Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal.
- Los proyectos ejecutivos y los estudios de impacto ambiental de las obras son entregados por la SCT a todos los licitantes.
- Los derechos de vía liberados son entregados por el gobierno al licitante ganador.
- El gobierno realiza una aportación inicial de recursos públicos a cada proyecto.

- El gobierno se compromete a efectuar una aportación subordinada, en caso necesario, para asegurar el pago de los créditos usados para la construcción de las obras.
- El gobierno establece las tarifas medias máximas a cobrar en la vía y establece las reglas para su actualización periódica según el comportamiento de la inflación, de manera que resulten acordes con la capacidad de pago de los usuarios
- En caso de que la inversión privada sea recuperada por las concesionarias antes de lo planeado, el excedente se compartirá, conforme a reglas previamente acordadas, entre el concesionario y BANOBRAS, en su calidad de proveedor de recursos públicos al proyecto.

De acuerdo con informes de la SCT cerca del 90% de las cargas se mueve por las carreteras nacionales, y de ello, junto con las potencialidades de inversión planteadas anteriormente para este sector, se deriva la importancia que tiene para el proyectista de pavimentos, el **conocimiento de los criterios de diseño y construcción de los mismos empleando distintos materiales.**

I.4.-
Autopista
Chamapa – La Venta

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se introduce al lector en el conocimiento de las características de la autopista Chamapa – La Venta, entre las cuales sobresalen: su topografía, su geología, el clima de la región, su ubicación geográfica, su desarrollo geométrico y los procedimientos empleados en su conservación y mantenimiento. Esta información resulta relevante cuando se definen los parámetros de diseño empleados en la rehabilitación y para dotar de cierto peso a los criterios de elección del tipo de pavimento.

I.4.- AUTOPISTA CHAMAPA – LA VENTA.

La administración de la autopista Chamapa - La Venta en el Estado de México corre a cargo de la “Concesionaria de Vías Troncales”

Con fecha del 21 de agosto de 1992, el gobierno del Estado de México, por conducto de la SCT, otorgó a favor de PACSA un título de concesión por 15 años para la operación, explotación, administración y conservación de su ramal Interlomas.

En noviembre de 1998 el gobierno modificó a solicitud de PACSA el plazo de la concesión de 15 a 25 años. Con lo cual la concesión concluye en 2017.

Con fecha de 11 de mayo de 2000, se celebró convenio de cesión onerosa de derechos y obligaciones entre **PACSA*1** y concesionaria Chamapa – La Venta S.A. de C. V., entonces PROMOTORA INBURSA S.A. de C. V. para la cesión de todos los derechos y obligaciones derivados de la concesión.

Actualmente, la administración cambia de razón social y se denomina: Promotora para Infraestructura para el Desarrollo de América Latina, PROMOTORA IDEAL, y queda a cargo de la Subdirección de Inversión en Autopistas y tiene bajo su responsabilidad la autopista Chamapa – La Venta.

***1.-** PACSA (Promotora y Administradora de Carreteras, S. A. de C. V.)

1.4.1.- DATOS GENERALES

TOPOGRAFÍA

La autopista se desarrolla en **lomerío fuerte y montaña** lo cual determina secciones de corte y terraplén.



Fotografía No. 1
La autopista atraviesa zonas con lomerío fuerte



Fotografía No. 2
Secciones de corte y terraplén.

GEOLOGÍA

La autopista Chamapa – La Venta se localiza en la **Provincia Fisiográfica del Altiplano Mexicano con formaciones del Terciario, constituidas por rocas ígneas extrusivas**, además formaciones de **suelos del Cuaternario, principalmente constituidos por depósitos de limos, arenas y arcillas. (Zona de bancos de explotación de arenas)**



Fotografía No. 3
Minas de las que se extrae tepetate, grava y arena



Fotografía No. 4
Zonas ya explotadas de las minas
se convierten en rellenos

CLIMA

Predomina el clima **templado subhúmedo C(w₂)(w) con lluvias en verano** y con un porcentaje de lluvia invernal menor de 5, según la clasificación de Köppen modificada por E. García. La temperatura media anual oscila en los 14 °C (frío) y la precipitación total anual es de 700 mm.



Fotografía No. 5
La lluvia constituyo un factor adverso durante el tendido de asfalto



Fotografía No. 6
Es una zona que presenta lluvias intensas en época de precipitaciones

DRENAJE

Cuenta con **obras de drenaje que se consideran suficientes** porque las obras **atraviesan el cuerpo principal de la autopista y desalojan los escurrimientos de un drenaje de tipo paralelo;** superficialmente los escurrimientos de la corona son encauzados por **bordillos, lavaderos y cunetas.**



Fotografía No. 7

Obsérvese la pendiente, la cuneta y el bordillo como medidas de drenaje superficial



Fotografía No. 8
Caja de captación



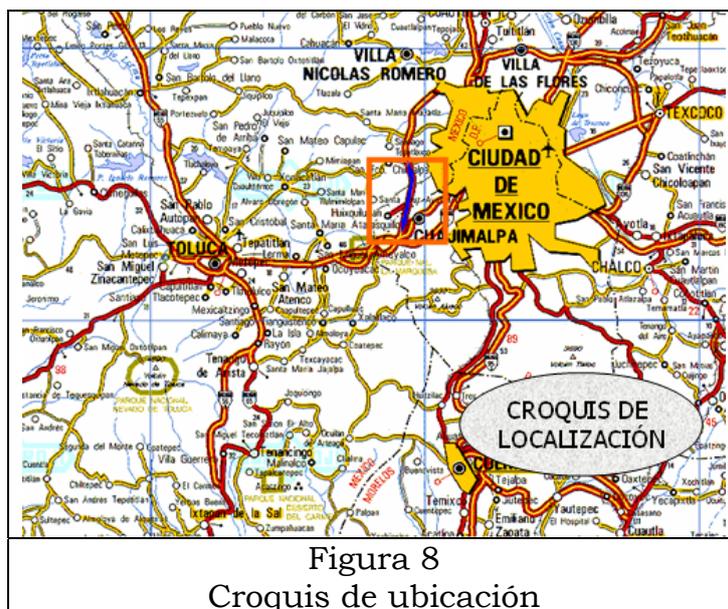
Fotografía No. 9
Escorrentía y cuneta

1.4.2.-DESCRIPCIÓN DEL TRAMO

UBICACIÓN

El tramo se localiza al **poniente de la Ciudad de México**; es **parte de la autopista Lechería – La Venta**, que constituye un anillo periférico de la zona conurbada de la ciudad de México, localizada al poniente de la misma.

Se conecta directamente en el lado sur con la autopista México-Toluca y al norte con la autopista de México-Querétaro.



1.4.3.- ANTECEDENTES DE CONSTRUCCIÓN

La construcción de la autopista se **concluyó en 1992**. Su construcción **permite un menor recorrido norte - sur por el lado poniente de la ciudad de México, en un tiempo menor que el que se empleaba antes de que existiera otra**

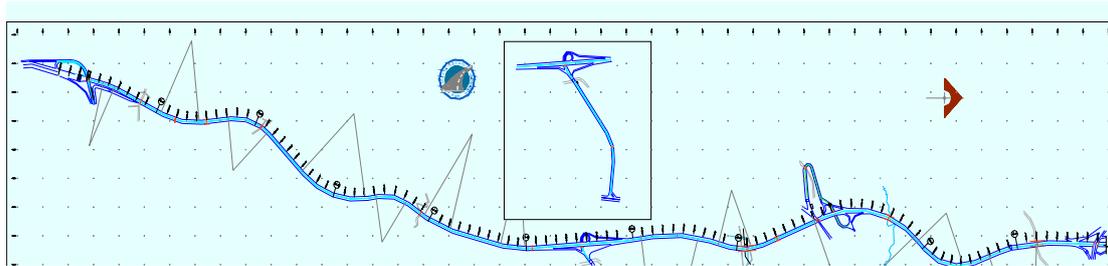


Figura 9
Planta de la autopista

Como ya se anotó, la topografía es de lomerío y debido a ello la autopista presenta cortes y terraplenes altos; además cuenta con varios **puentes de gran importancia.**



Fotografía No. 10
Existen zonas donde se realizó corte de hasta 25m.

Tiene varios Entronques: El de Naucalpan, el de Huixquilucan y el de Interlomas



Fotografía No. 11
Caseta de Chamapa
Ubicada en el entronque con Naucalpan



Fotografía No. 12
Caseta de Huixquilucan
Ubicada en el entronque con Huixquilucan



Fotografía No. 13
Caseta de Interlomas
Ubicada en el entronque con Interlomas



Fotografía No. 14
Caseta de La Venta

La siguiente fotografía se obtuvo con un programa denominado Google Earth, y en ella se observa la ubicación de la autopista, sus entronques, sus casetas, la topografía y la urbanización en donde se desarrolla.

Fotografía No. 14. Fuente: Google Earth

PUENTES DE IMPORTANCIA



Fotografía No. 15
Puente del Ahorcado. Km. 30+100



Fotografía No. 16
Puente del. Km. 31+200

1.4.4.- CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

- La autopista es del **tipo A4 (de altas especificaciones y cuatro carriles)**
- Construida con **pavimento flexible**
- Tiene **dos cuerpos** cuya separación al centro es con una barrera de concreto hidráulico (triblock)
- Tiene **dos carriles de circulación y acotamientos por sentido de circulación**
- **Anchos de carril 3.5 m**
- **Acotamiento exterior 2.5m**
- Fue diseñada para una **velocidad de proyecto de 110 km/h**
- Geométricamente está limitada por un derecho de vía escaso

1.4.5.- ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO:

- **Carpeta asfáltica de 22 cm.**
- **Base hidráulica de 18 cm.**
- **Sub-base hidráulica de 13 cm.**
- **Subrasante de espesor variable, con secciones en corte y terraplén de altura variable.**

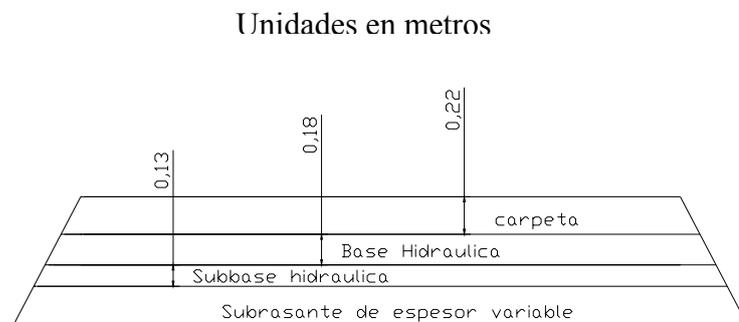


Figura 10. Estructura del pavimento.

1.4.6.- TRABAJOS DE CONSERVACIÓN

Básicamente han consistido en:

- Reparación de baches superficiales y profundos.
- Renivelaciones en la entrada y salida de puentes y en terraplenes inestables.
- Aplicación de riegos de sello.
- Aplicación de open graded.
- Colocación de sobrecarpeta asfáltica en algunos subtramos.
- Labores de mantenimiento normal (Barrido, pinturas, sustitución de señalamiento, traficonos, etc.).
- Remoción de material de deslaves de cortes.
- Limpieza de obras menores.
- Reposición de algunos elementos.

CAPITULO II.-
PAVIMENTOS RÍGIDOS
Y FLEXIBLES.

II.1.- Conceptos Básicos

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se definen conceptos básicos para entender la terminología empleada en pavimentación. Comprende conceptos generales sobre pavimentos, su estructura típica, su clasificación, los materiales empleados y los requisitos comunes para su diseño y construcción. En la clasificación de los pavimentos se describen las características de pavimentos flexibles y rígidos; pretendiendo identificar las ventajas de cada tipo de pavimento en función de las posibles aplicaciones de cada uno de ellos.

II.1.- CONCEPTOS BÁSICOS.

II.1.1.- ¿QUÉ ES UN PAVIMENTO?

Son los materiales colocados en una o varias capas superpuestas sobre el nivel de terracería y hasta la superficie de rodamiento. Su función es proporcionar una superficie uniforme para el rodamiento de cargas de tránsito, transmitiendo dichas cargas a la llamada terracería. Debe resistir el intemperismo y otros agentes perjudiciales y debe ajustarse a características específicas de geometría, textura y luminosidad de acuerdo al tránsito para el cual se diseña.

La vida útil del pavimento esta determinada en general por su resistencia a la carga cíclica de los vehículos y a la acción de factores ambientales, pudiéndose prolongar tomando las medidas adecuadas durante su construcción y las correspondientes a su mantenimiento rutinario y periódico.

En general las características que se deben tomar en cuenta cuando se proyecta y diseña un pavimento, son:

- La **resistencia a las cargas** para garantizar el buen rodamiento del tránsito **y evitar los deterioros.**
- El que soporte acciones de **intemperismo y agentes perjudiciales producto del derrame de sustancias corrosivas y combustibles.**
- El que tenga las características geométricas que dan funcionalidad al pavimento tales como: **anchura, trazo horizontal y vertical, pendientes y curvaturas permisibles.**
- El que garantice la **adherencia adecuada entre el neumático del vehículo y el pavimento aún en condiciones húmedas**, para que no exista el hidroplanéo.
- El asegurar una **adecuada visibilidad.**
- **El garantizar la calidad óptima de los recursos y métodos empleados en la construcción del pavimento nuevo**
- El aplicar un mantenimiento rutinario y periódico para garantizar las condiciones de rodamiento.

Respecto a la última característica mencionada, en el caso específico de este trabajo de tesis, resalta la importancia de definir las ventajas y desventajas de la aplicación de pavimento rígido o flexible como medida de mantenimiento mayor, atendiendo criterios definidos por las características tales como resistencia, configuración estructural, características de los materiales, serviciabilidad, seguridad y comodidad; **en esencia se toma en cuenta que la obra resulte: segura, económica, funcional y armónica con el medio ambiente.**

II.1.2.- EL PAVIMENTO Y SUS CIMIENTOS

La función principal del pavimento es transmitir los esfuerzos generados por las cargas vehiculares a las terracerías. La configuración estructural de estas capas depende básicamente del tipo de pavimento a implementar.

Así pues, se pueden presentar las siguientes configuraciones típicas para pavimentos rígidos y flexibles.



Figura 11.a
Elementos de un pavimento flexible

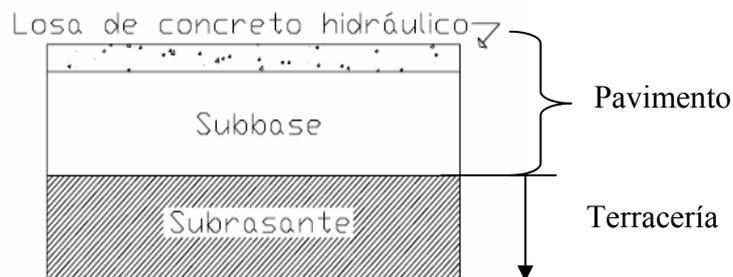


Figura 11.b
Elementos de un pavimento rígido

En ambos esquemas, las capas superiores se construyen con materiales con mayor capacidad de carga; Es así como las capas mas superficiales quedan expuestas a un esfuerzo mayor a resistir y transmitir.

Para entender el comportamiento del pavimento y su soporte, en la siguiente información se da una breve descripción de los elementos que constituyen estas capas; abundando posteriormente en la caracterización de los pavimentos en rígidos y flexibles

II.1.2.1.- LA CAPA DE RODAMIENTO.

Esta capa recibe directamente las cargas del tránsito para transmitir las a las inferiores generando una reducción de ellos por efecto de la resistencia de los materiales que las constituyen. Puede ser de materiales pétreos compactados, concreto asfáltico o concreto hidráulico, entre otros.

La capa de rodamiento es la parte del pavimento que **soportara las peores condiciones de intemperismo y otros agentes perjudiciales por estar directamente expuesta a ellos. Sus características principales son su espesor, el material que la conforma y las condiciones de acabado superficial (especialmente su textura).**

En general esta capa debe cumplir, independientemente de su material constituyente, con las siguientes características:

Resistencia a la fatiga ante las cargas vehiculares, soportando y transmitiendo estas cargas a capas inferiores.

Durabilidad, concepto que se afecta básicamente por las sollicitaciones de carga, clima, y las propiedades de los materiales empleados.

Resistencia al desgaste. Debe soportar el desgaste producido por los neumáticos y el clima, sin perder en exceso la adherencia del neumático a la superficie de rodamiento.

Impermeabilidad. Tener la impermeabilidad adecuada.

Seguridad y comodidad. Debe ser una capa segura y cómoda al transitar por ella (incluyendo que debe presentarse estabilidad y suficiente visibilidad durante la circulación sobre ella)

Obviamente las cualidades funcionales de esta capa dependen del acabado y los materiales utilizados en su construcción. En el campo de de pavimentación, el control de las mencionada cualidades superficiales se realiza con la denominada serviciabilidad.

II.1.2.1.1.- FUNCIONALIDAD (SERVICIABILIDAD)

Un factor importante que manifiesta las características requeridas por la superficie de rodamiento es **el concepto de serviciabilidad, la cual constituye la “habilidad” de la capa de rodamiento para proporcionar un servicio adecuado al tránsito y toma valores del 0.0 (intransitable) al 5.0 (excelente) que dependen fundamentalmente de la rugosidad de la superficie.** El valor que se recomienda para fines de diseño es de 4.5.

Los grados de serviciabilidad que se pueden lograr con asfalto o con concreto hidráulico están definidos en forma general por la textura de la superficie de rodadura; esta característica se puede controlar de acuerdo a la dosificación de la mezcla tendida, el material empleado en la elaboración de dicha mezcla y la facilidad de su tendido con personal y maquinaria aptos para esa labor.

Es de especial interés para el presente trabajo de tesis, el diferenciar la textura que se puede obtener con el uso de concreto hidráulico o de concreto asfáltico, sin embargo no es el único parámetro para poder evaluar las ventajas y desventajas entre pavimentos rígidos y flexibles. Existen otros factores que ayudan a determinar las ventajas del uso de un pavimento u otro, los cuales se encuentran implícitos en el material y la dosificación de la capa de rodadura y son:

- a) La **durabilidad**
- b) La **resistencia a la fatiga y las cargas dinámicas que soportan los materiales**
- c) La **adherencia del neumático - superficie de rodamiento y el desgaste de los neumáticos por tracción**
- d) La **impermeabilidad**
- e) Los **ruidos en el exterior y en el interior del vehículo**
- f) La **regularidad del tendido, la comodidad y estabilidad en marcha**
- h) Las **propiedades ópticas**

En gran medida la mayoría de estos factores se relacionan con la textura de diseño y la regularidad superficial del tendido y serán abordados con mayor profundidad posteriormente.

II.1.2.2.- BASE.

Es la capa colocada inmediatamente bajo la carpeta de rodamiento y debe resistir los esfuerzos que esta le transmite, reduciéndolos y uniformizándolos para transmitirlos a su vez a las capas inferiores. La base se construye de material friccionante y para mejorar su resistencia y el control de las deformación excesivas, puede dársele un mejoramiento o una estabilización con cal o cemento.

Otra función de la capa de base consiste el drenar el agua que se infiltre desde la carpeta e impide que llegue a la subrasante, evitando con esta última acción los cambios volumétricos asociados a la saturación de las capas inferiores.

La base se construye generalmente con materiales gruesos; en el caso que estos sean inertes, pueden provocar deformaciones transversales producto de las cargas de tránsito que reacomodan y compactan al material; en pavimentos flexibles dicho efecto se contrarresta dándole al material de base, además de la compactación correspondiente, un tratamiento o estabilización. **El tratamiento de una base consiste en agregar al material de la misma un cementante necesario para dar mejor sustentación.**

Respecto la configuración de los agregados en la capa de base, **no es estrictamente necesario que los granos tengan una forma semejante a la que marcan las fronteras de las zonas; es más relevante atender al material en su VRS (Valor Relativo de Soporte) y su plasticidad mínima.**

El espesor de la base tiene como objetivo reducir el correspondiente de la capa de rodamiento, el cual resulta más costoso. Se proyecta con las características de durabilidad mayores a las de la capa de sub-base se recomienda que sea de mínimo 12 a 15 cm. para carreteras con tránsito menor de 1000 vehículos pesados. REF*3

II.1.2.3.- SUB-BASE.

Es la capa que se coloca debajo de la base y transmite en forma reducida los esfuerzos a las capas de terracería. Funciona como una capa cuyo espesor y características pretenden reducir el volumen de base que se utiliza en el pavimento (no siempre se emplea en el pavimento) e impide que el agua de las terracerías ascienda por capilaridad. Además, en caso de pequeña infiltraciones y debido al paso continuo de carga vehicular, esta capa evita que el pavimento sea absorbido por la sub-rasante.

Las sub-bases **se construyen con materiales granulares de tamaño uniforme**. Se recomiendan su aplicación **en rutas de tránsito pesado** (aeropuertos grandes, carreteras y vialidades primarias). En carreteras con un **TDPA menor a 1000 vehículos pesados**, la **SCT recomienda usar sub-bases con un espesor mínimo de 10 cm. REF*3**

II.1.2.4.- TERRACERÍA

Es aquella estructura térrea que sirve de soporte al pavimento; sus elementos subyacen limitados por el nivel de subrasante. A las terracerías también se les conoce como capas de mejoramiento, capas subyacentes o capas de transición.

Los materiales usados en su construcción son de menor calidad que los del pavimento y **requieren de mayor compactación para poder transmitir las cargas al suelo natural sin que se deformen excesivamente o fallen por capacidad de carga.**

Respecto a las consideraciones de tránsito, **cuando se va a construir un camino que presente un TPDA** (Tránsito Promedio Diario Anual) **mayor a 5000 vehículos, se construye primero una capa conocida como subyacente** que se colocada bajo la sub-rasante, **y deberá tener un “espesor mínimo de 50 cm.”. REF. *3**

II.1.2.5.- MATERIALES PARA CONSTRUIR BASE, SUB-BASE Y TERRACERÍAS

En la construcción de pavimentos y sus cimientos, generalmente se emplean los materiales que se ubican sobre la misma ruta, ya sean producto de cortes, prestamos laterales y excavaciones cercanas al derecho de vía; es por ello que **resulta muy útil conocer el tipo de terreno en el que se va a extender la carretera, pues así se tiene mejor posibilidad para definir los mejores bancos de materiales.**

Como banco de explotación se puede recurrir a: **cauces de arroyos de tipo torrencial, partes cercanas al nacimiento de un río y cerros constituidos por rocas andesíticas, basálticas y calizas, formaciones de roca alterada, bancos arenosos estratificados, entre otros,** de acuerdo al tipo de material y la calidad solicitada para el mismo. En estos bancos de explotación **se procura que el material elegido sea homogéneo**, con lo cual se evita la variación excesiva de los espesores de las capas por efecto de la variación de la calidad de los materiales en tramos consecutivos.

Es frecuente que por consideraciones económicas, topográficas, geológicas u otras de igual importancia, los sitios de explotación no sean accesibles o no es suficiente su aprovechamiento, requiriéndose entonces aplicar un mejoramiento de los suelos de mala calidad mediante la estabilización con cal, cemento, asfalto o algún aditivo químico.

El uso de materiales para construcción de bases, sub-bases y terracerías sigue un proceso estricto de control de calidad, que consta de estudios y pruebas para la explotación de banco, el traslado del producto, su tratamiento y la colocación en obra. **Entre los materiales que se emplean comúnmente en bases y sub-bases y terracerías, son:**

- **Gravas-arenas de río.**
- **Gravas-arena de trituración.**
- **Gravas-arena de mina.**
- **Conglomerados con gran porcentaje de arenas y gravas.**
- **Suelos estabilizados con cemento, cal o asfalto.**

En el último caso se denomina a la capa tratada como suelo-cemento, suelo-cal o suelo asfalto respectivamente.

Se sugiere en general evitar el uso de tezontles pues estos materiales tienden a desmoronarse y pueden provocar deterioros por cambios volumétricos en el cuerpo del pavimento; **en caso de que sea necesario su empleo deberán mezclarse con algún tipo de material fino como los tepetates (60% tepetate y 40% tezontle). REF*3**

Respecto a las principales pruebas que se aplican a los materiales, para el control de su calidad están los ensayos del VRS, granulometría y los límites de Atterberg. **De acuerdo con la referencia 15, una buena base hidráulica tiene un VRS mayor del 100%, una graduación adecuada a las normas de calidad aplicables, el límite líquido menor de 30%, un índice plástico menor de 6% y contracción lineal menor de 2%. (REF*15).**

Actualmente se usan mezclas asfálticas como base de un pavimento (base negra) y forman fuertes capas inferiores cuya finalidad estructural permite absorber la mayor parte de las sollicitaciones de tránsito. El espesor de esta capa asfáltica se ajusta a consideraciones estructurales propias del asfalto y según su interrelación con las capas subyacentes. Cuando se usa la mezcla asfáltica como soporte en capas inferiores, se procura un diseño de mezclas abiertas que constituyen un esqueleto mineral resistente que trabaja básicamente por rozamiento interno de los agregados, como es el caso de la rehabilitación que trata este trabajo de tesis.

Ya descritas las capas típicas que integran un pavimento ahora resulta conveniente explicar las etapas que anteceden la construcción del pavimento así como al proceso mismo de construcción, incluyendo las características de los materiales empleados.

II.1.3.- ETAPAS PREVIAS A LA CONSTRUCCIÓN DEL PAVIMENTO DE CONCRETO

En el capítulo anterior se mencionaron los parámetros que se requiere medir para poder proyectar un pavimento en general. A continuación se hace mención y una breve descripción de los estudios para obtener dichos parámetros:

II.1.3.1.- ESTUDIOS DE TRÁNSITO.

Estos estudios buscan conocer las condiciones reales de tránsito de la vía. Además, con base en aforos de las posibles zonas de influencia, **se proyecta en ellos el tránsito de la puesta en operación y se determina una tasa de incremento anual** del parque automotor de la región. Dichos estudios también **determinan la atracción de tráfico de acuerdo a la zona de desarrollo de la vía carretera mediante encuestas, datos estadísticos de carreteras existentes y recorridos de vehículo flotante.**

II.1.3.2.- TRABAJOS TOPOGRÁFICOS.

En la construcción de pavimentos **es necesario conocer los datos de topografía exacta del terreno por el cual atravesará la vía de proyecto.** Esta disciplina se encarga de **definir las pendientes, la cantidad de cortes y rellenos** que se requieren para el proyecto, la necesidad de estructuras de drenaje, las obras complementarias y elementos adicionales. **Todo lo anterior incide fuertemente en el presupuesto de la vía y permite la toma de decisiones para disminuir costos, aumentar la eficiencia y mejorar las características técnicas del proyecto.** En general en la construcción del pavimento la topografía es fundamental para ubicar exactamente el trazo y los elementos conforme a proyecto y sirve de guía para el control de volúmenes y direcciones.

II.1.3.3.- TRAZO.

Con los datos de topografía que refieren la geometría del proyecto, se realiza el trazo de sus variables geométricas (curvas, pendientes y peraltes). En esta etapa se determina en gran parte las condiciones de comodidad que tendrá la vía; así por ejemplo, dependiendo de las condiciones naturales del terreno y de las especificaciones de la vía, se podrá definir la velocidad máxima de tránsito.

Conforme se desarrolla la obra y con asesoría de los especialistas en topografía, en el trazo geométrico se pueden tomar algunas decisiones que contribuyan con la economía del proyecto.

II.1.3.4.- ESTUDIOS DE SUELOS.

Con ellos se determinan las características geotécnicas de los materiales que conforman el terreno. Se determina su resistencia, sus condiciones de humedad, su plasticidad y otras características del suelo que inciden en el diseño, construcción y conservación del pavimento. Por ejemplo, si se encuentran suelos con mucho contenido orgánico deben ser retirados por completo porque no ofrecen una superficie de soporte adecuada para el pavimento. **Si se hallan materiales mal compactados o con baja resistencia deben ser compactados o tratados con cemento,** y si el terreno tiene alto índice de plasticidad, debe ser tratado con cal para evitar futuras deformaciones con los cambios de humedad.

II.1.3.5.- DISEÑO DEL PAVIMENTO.

En esta etapa **se emplean todas las variables obtenidas de los estudios anteriores y mediante métodos científicos y racionales se estiman las condiciones que garantizan, junto con una buena construcción y mantenimiento, que el pavimento perdure en el tiempo con óptimas condiciones de tránsito y intemperismo.**

La etapa de diseño **determina los espesores de las capas del pavimento y terracerías, así como los materiales que emplearan en su construcción.** En ella se emiten las especificaciones requeridas para el proceso constructivo. Las cuales deben ser ejecutadas al pie de la letra por el constructor, el cual puede proponer alternativas sustentadas y soportadas técnicamente para modificaciones del proceso o los materiales a usar.

II.1.4.- PAVIMENTOS NUEVOS

Para quien desea conocer el campo de los pavimentos resulta de interés y muy útil el comprender de manera general el proceso de construcción de este tipo de estructuras; a continuación se describen en forma simple el proceso de construcción de un pavimento.

Generalmente, los pavimentos nuevos se construyen con una capa subrasante, una capa de base y una carpeta asfáltica o una losa de concreto hidráulico. En pavimentos flexibles, es común que estos se soporten sobre una capa subrasante de por lo menos 20 cm. de espesor y que presenten una capa de base de 13 a 15 cm. de espesor y una carpeta asfáltica elaborada en planta y en caliente de 8 a 10 cm. de espesor, dependiendo de las características previstas del tránsito. REF*33

Es importante tener en cuenta que **los espesores mencionados son referencias para pavimentos nuevos, y deben considerarse como una guía para evaluaciones económicas y elaboración de programas de inversión, y no como una norma de construcción.** Sin embargo, en lo que sigue, se presenta una secuencia constructiva de pavimentos nuevos, con el único fin de contar con mayores elementos para la citada evaluación económica.

II.1.4.1.- CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS.

En la figura siguiente se presenta la secuencia constructiva de pavimentos nuevos, y a continuación se describe un proceso común:

- 1.- **Se abre una caja** del espesor requerido por el diseño. Posteriormente el material extraído se deposita en los bancos de desperdicio.
- 2.- **Posteriormente la superficie descubierta se escarifica y compacta** comúnmente en sus 20 cm superiores hasta alcanzar el 90% de su peso volumétrico seco máximo (PVSM), con respecto a la prueba Próctor Estándar.
- 3.- **Sobre el terreno natural debidamente escarificado y compactado, se construye la capa subrasante con el espesor requerido por proyecto,** generalmente se compacta en capas hasta alcanzar el 95% de su PVSM con respecto a la prueba Pórter Estándar. Para la formación de esta capa se debe utilizar material de banco, siempre y cuando su tamaño máximo no exceda cierto limite, que comúnmente es de 7.6 cm (3”).

4.- **Sobre la subrasante terminada, se construye una capa de base** comúnmente compactada al 100% de su PVSM con respecto a la prueba Pórtier Estándar. Se sugiere que para la formación de esta capa se utilice grava y arena seleccionada de banco.

5.- **Sobre la base terminada, superficialmente seca y barrida se aplica, con una petrolizadora, un riego de impregnación con emulsión asfáltica.**

6.- **Cuando la base ya esta impregnada, se aplica un riego de liga con emulsión asfáltica de rompimiento rápido en todo el ancho de la vialidad.**

7.- **Después de la aplicación del riego de liga, se construye una carpeta asfáltica del espesor fijado en el proyecto,** elaborada en planta y en caliente. **Esta carpeta se compacta** al 95% de su PVSM determinado en la prueba Marshall. El material pétreo requerido para su construcción varia en cuanto a su descripción granulométrica y generalmente se mezcla con cemento asfáltico del tipo AC-20, con una dosificación aproximada de 100 litros/m³ de material pétreo seco y suelto.

8.- **Después de construidas las carpetas, se aplican las pruebas de permeabilidad; si dicha permeabilidad resulta mayor de un 10 %,,** generalmente se aplica un riego de sello empleando material pétreo que limitara ese valor; el tipo de sello mas uso actualmente en pavimentos asfálticos es del tipo 3-A, elaborado con emulsión asfáltica de rompimiento rápido.

En el caso de construir un pavimento rígido, el procedimiento es casi el mismo; considerándose de la misma manera hasta la aplicación correspondiente de la carpeta de rodamiento elaborada con concreto hidráulico.

Para mejor comprensión del proceso constructivo de los pavimentos, se remite la figura 12.

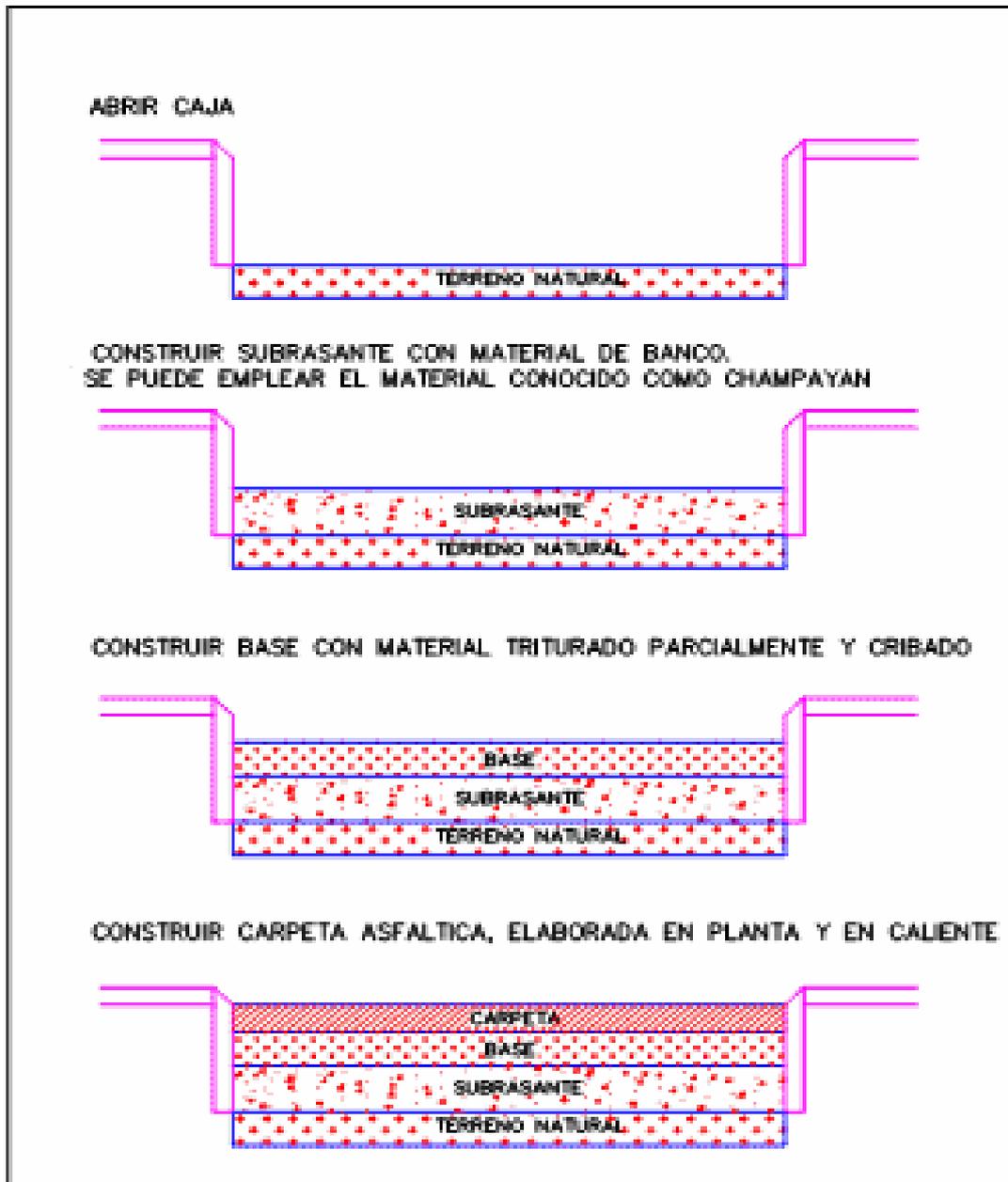


Figura 12. Secuencia constructiva para pavimentos nuevos

II.1.4.2.- COMPACTACIÓN

La compactación de pavimentos y terracerías es uno de los procesos más importantes para dotar a esta estructura de un comportamiento adecuado ante solicitaciones de trabajo.

Compactar un material es aplicar energía al mismo, para reducir el contenido de aire y acomodar las partículas sólidas; de esta manera se logra mejorar el comportamiento del material ante la aplicación cíclica de las cargas vehiculares.

Para evaluar la calidad de este procedimiento constructivo, antes de los años treinta se aplicaban pruebas (**resistencia, compresibilidad, permeabilidad, entre otras propiedades relevantes de los materiales**) cuya realización en laboratorios especializados, requiere **de procesos y tiempos de ejecución demasiado largos**. Actualmente, y gracias a los estudios realizados por Proctor, se logró **definir una solo prueba que mide la característica del suelo compactado y representará este proceso** con suficiente confiabilidad para ser un parámetro de control, de conciliación para fines de pago y de rápida determinación; dicha prueba es la determinación del **peso volumétrico**.

En general el proceso de compactación busca **proporcionar al pavimento y su soporte de un peso volumétrico adecuado, dotándole con ello un mejor comportamiento ante las cargas, pues se incrementa su resistencia y se disminuye significativamente el valor de la deformación ante las cargas vehiculares cuando el pavimento entra en servicio**. Dada la importancia de este proceso, es necesario conocer que los principales factores que afectan la efectividad de la compactación son:

- Naturaleza del material a compactar
- Tipo y peso del equipo de compactación
- Contenido de agua del material a compactar
- Espesor de la capa a compactar
- Número de pasadas y velocidad del equipo de compactación
- Longitud y ancho del tramo a compactar
- Condiciones climáticas dominantes

Existen otros factores que influyen en la compactación de los suelos pero cuyo efecto práctico es menos importante. En la REF*15 se mencionan y describen en un estudio especializado de compactación.

La compactación óptima para los materiales comúnmente tratados en pavimentación puede guiarse por las siguientes recomendaciones tomadas de la referencia 15:

Para compactar **limos** que tienen ya la humedad óptima se recomienda usar el siguiente equipo:

Rodillo pata de cabra.

Compactador neumático. Su acción en profundidad es mejor puesto que tiene mayor carga.

Pueden usarse **máquinas vibrantes**. Los suelos finos como el limo tienen un ángulo de rozamiento interno pequeño, al menos bajo esfuerzos rápidos, como el caso de la compactación. **Los limos no son, por lo tanto, el campo de aplicación ideal de máquinas vibratorias. No obstante pueden usarse con eficacia en el planchado final.**

Los rodillos de llantas lisas son poco eficaces en tales suelos. No obstante, se pueden utilizar, pero se necesita aplicar en tendidos de capas delgadas, pues la acción de los neumáticos con la profundidad es mínima.

Para su alisamiento en la superficie se forma una costra lo mas cerrada posible, para evitar la infiltración del agua. En este proceso se sugiere disponer de **pendientes transversales suficientes (>10%)** que hagan una evacuación eficaz del agua de lluvia. Se puede hacer **con un rodillo de llantas lisas o un cilindro vibrante. En esta tarea no son convenientes ni los rodillos pata de cabra ni el compactador de neumáticos.**

Respecto a la compactación de arcillas, se sabe que este proceso genera una estructura más densa, cuya nueva configuración compacta la vuelve inestables al absorber agua, de acuerdo son los estudios remitidos en la referencia 15, **la arcilla compacta incrementa su resistencia con este proceso, pero esta propiedad se pierde cuando el suelo, a expensas del potencial de succión adquirido al ser compactado, toma agua y se expande.** Bonenfant escribió que se deben **desechar todos los materiales arcillosos que presenten un índice de plasticidad superior a 25 o un límite líquido superior a 50%. REF*15**

Cuando se esta obligado al uso de materiales arcillosos se deben tomar precauciones respecto a su contenido de humedad y su variación de acuerdo al clima; siendo necesario un tratamiento o estabilización con cal y cemento. REF*15

Comúnmente para compactar una arcilla con el contenido óptimo de humedad, se pueden aplicar:

- **Rodillo pata de cabra. Concebido para compactar finos.**
- **Compactador neumático pesado.** Es apto y su elevado peso **permite aumentar la profundidad de la compactación.**
- Los **rodillos de llantas lisas** sirven **únicamente para el alisamiento.**
- **Las máquinas vibrantes casi no se aplican en estos materiales.**

Con frecuencia en el desarrollo de la carretera se ubican materiales poco aptos para la conformación de las capas terreas, y cuando no es posible su sustitución y/ o mejorados, se debe proceder con mucho cuidado en todo el proceso constructivo, especialmente en la compactación. En el caso de que el material disponible para construir las capas terreas sea creta, se recomienda lo siguiente:

a) **La creta se muestra como si fuera una roca; sin embargo su aspecto cambia totalmente cuando se emplea en la construcción de un terraplén, donde, bajo el efecto de la compactación con neumático, las cadenas, las orugas, o los camiones que circulan en la obra, se transforma en una pasta plástica.** Este efecto se debe a que el material esta **conformado por la acumulación de muchos microorganismos** ligados por cristales de calcita que establecen uniones poco numerosos y frágiles; por ello la creta **presenta una consistencia floja y con elevada porosidad.**

b) En terracería solo se emplea **la creta no calcárea y con la humedad optima correspondiente;** si la humedad natural fuera elevada pueden presentarse problemas de compactación. **Generalmente este caso se recurre al tratamiento con cemento y la adición de arena fina seca.**
REF*15

c) Cuando el material que se dispone para la elaboración de las capas terrea es arena, en su compactación se recomienda lo siguiente:

c.1) La arena posee originalmente **una estructura simple** y produce con su compactación otra estructura igual de simple, pero más densa. **Su acomodo se produce por pequeños colapsos; dicha configuración compacta es estable ante la absorción o pérdida de agua.** Su resistencia depende básicamente de la angulosidad de los granos y **su compactación creciente suele conducir a formaciones cada vez menos compresibles y más resistentes, aunque se encuentran propensos al fenómeno de sobre-compactación.** **REF*15**

c.2) **Frecuentemente en la compactación de arenas se aplican máquinas vibrantes. Cuando no se elige el equipo adecuado**

para compactar, las máquinas compactadoras destruyen el trabajo realizado por previas pasadas o el de las capas inferiores ya construidas.

c.3) Por lo antes descrito **es necesario conocer el comportamiento de las arenas ante la compactación**. Las arenas plásticas (SL) tienen comportamiento parecido a los suelos finos. Las arenas limpias, mal graduadas, (SP), son muy difíciles de compactar. Las arenas limpias, bien graduadas, (SW) son tan difíciles de compactar como las gravas limpias bien graduadas. (GW)

c.4) **Para compactar arenas limosas y arcillosas** es necesario considerar que existe muy poca diferencia entre una arena limosa que contiene el 49% de material fino inferior a 80 micras y un limo que contenga arena y con un 51% de material que pase dicho tamiz, y dado que estos dos materiales no se diferencian en nada, más que por la necesidad de clasificación, se puede decir que su comportamiento es muy parecido al de un suelo fino.

c.5) **En la compactación de arena limpia mal graduada no aplican las máquinas de llantas lisas y las partas de cabra**. Son más eficientes los compactadores neumáticos cuando la estabilidad es pequeña. En este material la vibración puede aplicarse como el método ideal. El problema del movimiento de maquinaria se resuelve dando primeramente una pasada sin vibración, resolviendo de esta manera el problema del gran roce interno. Lo cual facilitara el aplicar la compactación posterior.

Resumiendo sobre la naturaleza de los materiales en la compactación, se puede decir que este proceso busca asignar un peso específico máximo en el material de acuerdo con su contenido agua y aplicando determinada energía, para incrementar la resistencia de la capa compactada y minimizar las deformaciones durante el servicio del pavimento. Para mejor referencia de los equipos a utilizar en la compactación de diversos materiales se remite a la referencia REF*15 de la cual se tomaron las tablas 2 y 3 que se remiten en el anexo de los métodos de compactación.



II.1.4.2.1.- CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO.

El contenido de agua de un suelo influye decisivamente en la trabajabilidad del material y facilita o dificulta, según su magnitud, el proceso de compactación. Esta propiedad ayuda al acomodo de las partículas sólidas durante la compactación, pero también puede generar una ruptura o una configuración de partículas diferente a la planeada.

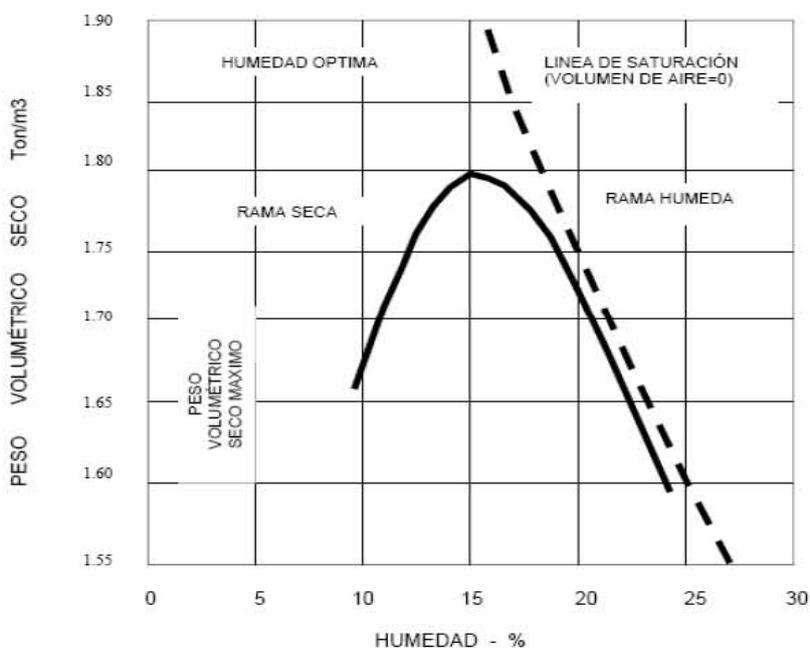
Este efecto se puede controlar variando el contenido de agua y el método de compactación. Proctor estudió la influencia ejercida por el contenido inicial de agua de suelo; observó que **a contenidos de humedad crecientes se obtenían mas altos pesos específicos secos y, por lo tanto, mejores compactaciones de suelo, pero que esa tendencia no se mantenía indefinidamente, sino que al pasar la humedad de un cierto valor, los pesos específicos secos obtenidos disminuían, resultando peores compactaciones en la muestra.**

Cuando el contenido de agua **en un suelo es bajo**, esta se aloja en forma capilar entre las partículas sólidas. Este fenómeno **produce que las presiones intersticiales, generadas por efecto de la compactación, sean mas fuertes en tanto mayor sea el contenido de finos en el suelo, lo cual hace difícil el acomodar las partículas individuales, dificultando igualmente la compactación** se dificulta. Por ello se alcanzan pesos volumétricos relativamente bajos. **Los efectos capilares se disipan gradualmente aplicando la misma energía de compactación a suelos con contenidos de agua crecientes.**

Cuando el contenido de agua alcanza valores que produzcan cantidades de agua libre que empiecen a ocupar en forma substancial los vacíos del suelo, la compactación comienza a dificultarse, pues el agua no puede desplazarse instantáneamente dentro del suelo y por ello comienza a absorber parte de la energía aplicada devolviéndola a expensas de su elasticidad en forma de **simple rebote**; este efecto será tanto más notable a medida que el contenido de agua crece.

En resumen, existe una humedad inicial denominada humedad optima, que produce el máximo peso específico seco que puede lograrse con este procedimiento de compactación y, por consiguiente, la mejor compactación del suelo. Los estudios de Proctor y Porter, establecieron la relación de la compactación por el peso volumétrico seco alcanzado, demostrando **la influencia del contenido de agua en la compactación del suelo.** La figura siguiente establece la relación entre el peso volumétrico seco del suelo compactado y el contenido de agua del mismo, cuando se emplea una cierta energía de compactación.

Esta gráfica es la curva de saturación del material compactado y **sirve para definir el grado de compactación adecuado, según la relación peso específico – humedad para una dada energía de compactación, necesaria para que todos los vacíos que dejan entre si las partículas sólidas estén llenos de agua.** Es así que con estos datos se formula la curva de saturación óptima.



Gráfica No. 3. Curva de compactación típica.
Fuente: REF*15

La curva de compactación presenta formas similares para diferentes modos de compactar.

Al contenido de agua con el que se obtiene un mejor acomodo de partículas, para una dada energía de compactación, se le denomina humedad óptima; al peso correspondiente se le llama peso específico máximo o peso volumétrico seco máximo.

Es así como el contenido de agua y el método de compactación elegido, determinan el peso volumétrico que se puede alcanzar en es proceso de compactado; la relación entre dichas variables es de especial interés porque de ella depende la capacidad de soporte que la estructura del pavimento o terracería puedan presentar en servicio.

II.1.4.2.2.- BENEFICIOS DE UNA ADECUADA COMPACTACIÓN.

En la construcción de pavimentos, un suelo se compacta porque dicho proceso **es benéfico para que la estructura soporte adecuadamente las cargas vehiculares. Entre los beneficios que se pueden lograr del proceso de compactación realizado en forma efectiva, están:**

- **Se disminuye la compresibilidad del suelo y controla la deformabilidad ante las solicitaciones de trabajo.**
- **Se incrementa la estabilidad volumétrica del suelo ante absorción o pérdida de agua y ante cambios volumétricos por temperatura:** Si hay vacíos, el agua puede penetrar en el suelo y llenar estos vacíos. El resultado sería el esponjamiento del suelo durante la estación de lluvias y la contracción del mismo durante la estación seca y que en general este efecto resulta dañino a la estructura. En general el proceso de compactación reduce la influencia negativa del agua mediante la disminución de la cantidad de huecos entre partículas sólidas de un suelo compactado. Otra de esas influencias es el efecto de las heladas, que congelan el agua atrapada en la estructura del pavimento, generando el cambio volumétrico del agua atrapada entre las partículas sólidas, lo que a la vez se manifiesta en un agrietamiento del pavimento.
- **Se aumenta la resistencia al esfuerzo cortante y por consiguiente aumenta la capacidad para soportar cargas:** El incremento de vacíos produce debilidad del suelo e incapacidad para soportar cargas pesadas con deformaciones mínimas. Estando apretadas todas las partículas sólidas, el suelo puede soportar cargas mayores sin grandes deformaciones.
- Se obtienen **adecuadas relaciones esfuerzo-deformación** que garanticen un balance conveniente en el comportamiento
- Se mejoran las siguientes características.
 - **Flexibilidad** (y derivada de ésta la poca susceptibilidad al agrietamiento)
 - **La permeabilidad** es reducida
 - **Incremento de la resistencia** de los suelos compactados **a la erosión**

En general, el pretender mejorar una de estas características generalmente se contrapone con el comportamiento de otra. Por ejemplo, en términos generales resulta que una compactación intensa produce un material más resistente, pero seguramente muy susceptible al agrietamiento o poco estable al absorber agua. De esta manera, si se compacta al suelo de más, se le hace adquirir características indeseables, y se dice que el suelo ha sido sobre-compactado.

Para optimizar las propiedades del suelo compactado, se llevar un proceso de planeación, que se proponga obtener un suelo resistente y con buen comportamiento en condiciones de servicio; dicha condición se logra considerando las circunstancias naturales del suelo, las futuras y el proceso mismo para convertirlo.

Los materiales que se emplean en la construcción de pavimentos comúnmente se sujetan tratamientos para proporcionarles un comportamiento adecuado durante la operación de la estructura, según especificaciones generales, dentro las cuales los requerimientos de compactación se mencionan siempre referidos al peso volumétrico seco que debe ser obtenido en la obra (expresado mediante el grado de compactación).

Así pues, compactar un material no solo se limita a lograr un peso volumétrico óptimo, sino que requiere la atención de propiedades del suelo como la plasticidad en suelos finos y la granulometría en gruesos principalmente.

Las especificaciones en compactación de pavimentos tratan de determinar las características ideales y factibles de este proceso, sin embargo, el criterio del ingeniero proyectista y de campo deberá ser capaz de distinguir aquellos casos en que la aplicación de unas especificaciones de construcción aún muy adecuadas, no baste para garantizar la calidad de la obra sin mayores impedimentos de carácter práctico.

II.1.4.2.3.- MÉTODOS DE COMPACTACIÓN

Para efectuar la compactación adecuada, ésta debe tener la respuesta a las preguntas básicas: ¿Qué equipo habrá de emplearse? y ¿Qué operaciones habrán de realizarse para obtener un suelo que se compacta dadas las propiedades mecánicas del proyecto y las factibles en obra?. El proceso de compactación deberá retroalimentarse por información realista, tomando en consideración los resultados a que pueda llegarse en el campo.

Para compactar un suelo existen varios métodos que se aplican de acuerdo al tipo de material con que se construya el pavimento o la terracería. En materiales gruesos como la arena y la grava, generalmente los métodos vibratorios son más eficientes, en tanto

que en suelos finos el procedimiento de carga estática y el de amasado resultan más ventajosos. En la práctica, debe distinguirse el equipo adecuado para compactar el suelo (plataformas vibratorias, rodillos lisos, neumáticos o patas de cabra).

Existen diversos modos de compactar materiales en el campo. Los utilizados actualmente se suelen clasificar en las siguientes categorías.

- Por amasado**
- Por presión**
- Por impacto**
- Por vibración**
- Por métodos mixtos**

Los tres primeros tipos de compactadores se presentan bajo la forma de rodillos que circulan sobre el terreno que se desea compactar. Los dos últimos en ocasiones aparecen también con técnicas de rodado; pero en otras desarrollan mecanismos diferentes.

A continuación se remiten **las tablas 2 y 3 (REF*15) que presentan indicaciones de elección de equipos de compactación usados en la práctica**, que son de carácter general y no excusan la consideración de las características especiales de cada obra.

Dichas tablas se remiten en el presente trabajo de tesis como anexos en la parte final del escrito.

II.1.4.2.4.- MÉTODOS DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO

Con el fin de controlar la construcción de pavimentos, en lo correspondiente a la compactación, este proceso debe probar cada capa compactada en un laboratorio. Los métodos de compactación reproducidos en laboratorio, se basan actualmente en la técnica debida R. R. Proctor. Esta prueba tiene varias modalidades: “la prueba Proctor estándar”, “la prueba Proctor modificada” y “la prueba Proctor de 15 golpes”, que se aplican de acuerdo con las solicitudes de las modernas estructuras.

Estos métodos compactan el suelo con condiciones variables:

Método Proctor	No.	Tamaño molde (cm)	Volumen molde (cm ³)	Pisón (kg)	Nº Capas	Altura caída (cm)	Nº Golpes	Energía compac. / volumen (kg*m/m ³)
ESTÁNDAR	1	11.64*10.16	943.33	2.49	3	30.48	25	60.500
ESTÁNDAR	2	11.64*15.24	2123.03	2.49	3	30.48	55	60.500
MODIFICADO	3	11.64*10.16	943.33	2.49	5	45.72	25	275.275
MODIFICADO	4	11.64*15.24	2123.03	2.49	5	45.72	55	275.275
15 GOLPES	5	11.64*10.16	943.33	2.49	3	30.48	15	36.400

Tabla 4. Especificaciones de pruebas de compactación en laboratorio

El propósito de un ensayo de compactación de laboratorio es determinar la correcta cantidad de agua a usar cuando se compacte el suelo en terreno y determinar el grado de compactación del suelo para el grado de humedad óptimo.

Los métodos 1 y 3 se emplean con suelos que tienen un alto porcentaje de partículas sólidas bajo la malla #4 = 4.76 mm. (Un buen criterio es aceptar 80% en peso como mínimo de éste tipo de partículas sólidas). Los métodos 2 y 4 se emplean en suelos con un porcentaje importante de partículas sólidas mayores a la apertura de la malla #4 y menores que $\frac{3}{4}$ de pulgada.

Con las pruebas antes mencionadas se controla la compactación de un pavimento o sus cimientos, y se verifica la resistencia adquirida por un acomodo específico de partículas en cada capa estructural. Cada configuración de partículas sólidas del pavimento proporcionara cierta resistencia al corte y a la tensión, la cual se mide con el VRS (Valor Relativo de Soporte).

II.1.5.- ¿QUÉ ES EL VRS?

El Valor Relativo de Soporte (VRS) es una de las propiedades que sirven para evaluar estructuralmente a los pavimentos. Este parámetro mide los esfuerzos cortantes que se presentan en el pavimento como los elementos mecánicos más significativos debido a la función y configuración de esta estructura. Es así que en el ámbito de la pavimentación se hace referencia constante a ensayos de penetración, los cuales miden directa o indirectamente la capacidad del material a las solicitaciones de una estructura vial; una de estas pruebas es precisamente la determinación del Valor Relativo de Soporte, también denominado Valor de Soporte California.

EL VRS representa un índice de resistencia al corte, un porcentaje de la carga necesaria para introducir un pistón estándar en un material determinado; dicho material de referencia es una caliza triturada.

II.1.5.1- PRUEBA DE VRS O PRUEBA C. B. R.

Esta prueba surgió en el Estado de California (EUA) y se aplica ampliamente en otros lugares porque en base de esta se utiliza un método de diseño sencillo para pavimentos.

La determinación del valor relativo de soporte se puede hacer mediante la prueba Porter Estándar. Se lleva a cabo sobre la fracción que pasa la malla número 25, elaborando un espécimen con la humedad óptima del material por estudiar, de acuerdo al procedimiento de compresión estática descrito en las especificaciones de pavimentación la SCT; dicho espécimen se somete a un periodo de

saturación, antes de efectuar la obtención del valor relativo de soporte, y como dato adicional se obtiene la expansión del espécimen originada por la saturación

Así pues, **el VRS se obtiene de una prueba de penetración en el cual un vástago de 7.62cm de diámetro (3 pulg) se hace penetrar en un espécimen de prueba del suelo a razón de 0.127 cm/min y se mide la carga aplicada para penetraciones a cada 0.25 cm (0.1pulg).** Empíricamente se ha obtenido una fórmula para determinar el VRS de una muestra:

$$\text{VRS} = (C_{2.54}/1360) \times 100$$

En la expresión anterior:

VRS es el valor relativo de soporte de la muestra, referido, en porcentaje, a la carga estándar de penetración de mil trescientos sesenta (1360) kilogramos.

$C_{2.54}$ (en kilogramos) es la carga correspondiente a la penetración de 2.54 centímetros (1 pulg).

En la prueba del VRS, este se determina como **la relación (en porcentaje) entre la presión necesaria para penetrar los primeros 0.25 cm. (0.1pulg) y la presión necesaria para tener la misma penetración en piedra triturada en la cual se tiene presiones de vástago para penetraciones indicadas en la tabla 5.**

Tabla 5. Registro de la prueba del VRS (Carga – Penetración)

Penetración		Presión del vástago	
Cm	pulg	Kg./cm ²	Lb/pulg ²
0.25	0.1	70	1000
0.5	0.2	105	1500
0.75	0.3	133	1900
1	0.4	161	2300
1.25	0.5	182	2600
Tomado de la Referencia 4			

Generalmente el VRS disminuye conforme el vástago penetra en la capa de prueba, pero si ocurriese que en el cálculo la penetración 0.5cm resulta mayor que el cálculo con la penetración 0.25, en tal caso se adopta como VRS el obtenido con la penetración 0.5cm. En esta prueba el espécimen en que se hace la prueba esta confinado en un molde de 15.2 cm (6pulg) de diámetro y de 20.3 cm (8pulg) de altura.

Los resultados de esta prueba se grafican en una curva cuyos ejes son la presión aplicada por cada evento y la penetración obtenida; esta curva es lineal para bajas penetraciones, y tiende a hacerse ligeramente curva con la concavidad hacia abajo, a penetraciones

mayores. En ocasiones la curva resulta con la concavidad hacia arriba, cuando esto ocurre, se debe a que el pistón no aplica la carga perpendicular a la superficie de la muestra, por lo cual se puede corregir de modo que la parte recta de gráfica se pronuncia, omitiendo la parte inicial curvada. Los valores así obtenidos se llaman VRS corregido.

En resumen, la prueba del VRS proporciona una medida de la capacidad del pavimento y terracerías para soportar el tránsito de diseño; además de la mencionada prueba, existen otras para medir la capacidad de soporte del suelo, como el caso de la prueba de la placa, cuya consideración es de vital importancia en la evaluación de los pavimentos y sus capas de cimiento.

II.1.6.- LA PRUEBA DE LA PLACA

La prueba de placa mide la capacidad de soporte de la capa subrasante, la base y el pavimento entero. Se usa tanto para pavimentos flexibles como para pavimentos rígidos. En general, la prueba consiste en aplicar cierta carga a una placa de acero circular y conforme de incrementa la carga, se registra la deformación correspondiente.

Las placas miden 30 pulgadas de diámetro o bien un área igual al contacto de la llanta. Para que no interfiera la deflexión de la placa, se colocan otras de diámetros decrecientes para rigidizar el dispositivo de carga la cual se genera con gatos hidráulicos.

Las deformaciones se miden en 4 puntos, opuestos perpendicularmente en la placa, los cuales se ligan con extensómetros a un puente que registra las deformaciones. El apoyo del puente se coloca lo suficientemente lejano para que las deflexiones del pavimento no interfieran y pueda éste considerarse fijo.

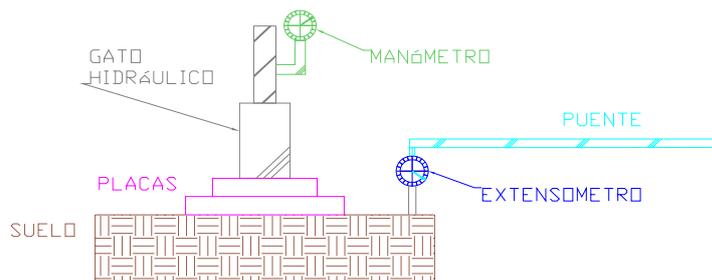


Figura 13. Dispositivo de la Prueba de Placa
(Estructura de reacción de la carga)

Con esta prueba se calcula el módulo de reacción de la capa en cuestión; dicho módulo es la presión que se transmite por medio de la placa para generar una deformación previamente definida.

$$K = P / \Delta \quad (P: \text{Presión FL}^{-2}; \Delta: \text{Longitud L})$$

El módulo de reacción así definido depende del diámetro de la placa usada, pues a presión constante, el asentamiento crece con el diámetro de la misma, por lo que si se fija un asentamiento dado, la presión necesaria para lograrlo será mayor cuanto mas pequeño sea el diámetro de la placa; por ello se usa una placa estándar de 30 pulgadas de diámetro, la cual se supone que es la que reproduce mejor el apoyo de las cargas reales por medio de los neumáticos.

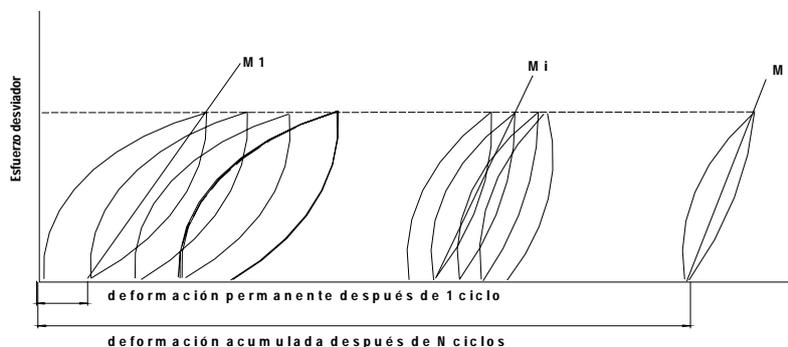
En las pruebas para obtener el módulo de reacción se aplica la carga por incrementos. Un nuevo incremento se coloca cuando la velocidad de deformación bajo el anterior sea del orden de 0.001 cm./ min. (0.002 pulg / min.) **El valor del módulo de reacción así obtenido se usa en las formulas de Westergaard del diseño de pavimentos rígidos. REF*4**

Para diversos contenidos de humedad, el módulo de reacción obtenido de esta prueba es diferente; por ello, ya sea en laboratorio o en campo se considera mejor trabajar la muestra con la humedad de saturación. y luego de corregir con la relación de resistencia a la compresión de dos pruebas aplicadas al suelo en condición natural y otra saturada.

II.1.7.- MÓDULO DE RESILIENCIA EN PAVIMENTOS

El Módulo de Resiliencia (MR) es otro índice estructural para pavimentos, el cual puede relacionarse con el Valor Relativo de Soporte (VRS). Este Módulo **representa un parámetro de la aplicación cíclica de cargas en un pavimento, la que genera en su estructura esfuerzos que lo deforman acumulativamente hasta producir su falla.** Los resultados de esta aplicación de cargas varían según su rigidez inicial, y pueden verse en la superficie de rodamiento en forma de agrietamientos y deformaciones. El pavimento ante estas sollicitaciones experimenta esfuerzos cíclicos de compresión σ_c y luego de tensión σ_t los cuales van provocando deformaciones que repercuten hasta la terracería.

Para visualizar el comportamiento del pavimento de acuerdo con su MR, se realizan pruebas de laboratorio que simulan las condiciones de tránsito, aplicando a una probeta del material en cuestión, ya sea de concreto asfáltico, hidráulico o algún material granular o cohesivo, una carga cíclica y se obtiene una curva esfuerzo-deformación como en la gráfica 5.



Gráfica 5. Curva esfuerzo-deformación (comportamiento mecánico de materiales sometidos a carga cíclica). FUENTE: REF*10

En la curva se puede observar que después aplicar un primer ciclo de carga y descarga, gradualmente la probeta se recupera casi totalmente, sin embargo persiste en ella una deformación permanente.

Ahora bien, si se aplica al material una serie de varios ciclos consecutivos de carga y descarga, un número (n), la deformación permanente por cada uno de dichos ciclos es cada vez menor hasta llegar al ciclo N, donde prácticamente se recupera toda la deformación. En este experimento se busca llevar al material desde una configuración inicial, sin deformación, hasta otra configuración deformada que acumula las deformaciones de todos los ciclos aplicados. **Como consideración práctica para el análisis de materiales usados en la elaboración de pavimentos, se les asigna un comportamiento elástico durante cada ciclo de carga y se le puede caracterizar entonces con el denominado módulo de resiliencia.**

El módulo de resiliencia (en forma análoga al módulo de Young) queda definido con la siguiente ecuación:

$$M_r = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\epsilon_r} = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Donde:

- σ_1 es el esfuerzo principal mayor
- σ_2 es el esfuerzo principal menor
- σ_d es el esfuerzo principal desviador
- ϵ_r es la deformación recuperable

En la prueba para **obtener el MR** se somete una **probeta del material a la aplicación de un gran número de ciclos**, que representan los niveles usuales de esfuerzos en pavimentos, **hasta alcanzar un estado perfectamente resiliente (cuando cualquier deformación adicional es recuperable)**. **El análisis de estos esfuerzos en pavimentos, se hace usualmente con la teoría de Burmister**, que supone las capas con un comportamiento elástico-lineal y utiliza los valores del módulo de resiliencia obtenidos a partir de ensayos triaxiales cíclicos en cada capa.

Actualmente, el módulo de resiliencia es un parámetro que caracteriza a los materiales en los métodos de diseño actuales: El método AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el método desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, entre otros.

II.1.7.1.- UTILIZACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA

Son varias las metodologías de análisis para pavimentos rígidos o flexibles que utilizan el módulo de resiliencia como un factor determinante de las propiedades de los materiales.

En general este índice se emplea en los métodos mecanicistas para caracterizar los materiales de construcción de los pavimentos, considerándosele como una medida de elasticidad del suelo y de las características no lineales de su comportamiento mecánico.

La relevancia del MR como parámetro de diseño en pavimentos la hace notar la guía AASHTO donde se plantea que el MR esta por sustituir al VRS como parámetro principal de los métodos de diseño, atribuyendo dicha situación a las siguientes consideraciones:

- 1) Es la propiedad necesaria para el análisis multicapa de pavimentos, y sirve para predecir distintos tipos de deterioros (agrietamiento, deformación permanente, rugosidad).
- 2) Se utiliza ya como parámetro de diseño y evaluación de pavimentos a nivel internacional.
- 3) Puede medirse sin pruebas destructiva usando deflectómetros de impacto y mediante procesos normalizados (ASSHTO t274) requiriendo de equipos triaxiales costosos.
- 4) Porque existen correlaciones de este módulo con otros parámetros entre ellos el valor relativo de soporte.

II.1.8.- TIPOS DE PAVIMENTOS.

Los pavimentos pueden clasificarse como **pavimentos rígidos, semirígidos y flexibles, atendiendo el concepto de rigidez y flexibilidad de mecánica de materiales**, que describen **la capacidad de la estructura para de recuperar su configuración inicial cuando se retira la carga a la cual han sido sometidos**,

En general, las funciones de ambos tipos de pavimento son las mismas, pero su comportamiento en servicio difiere mucho por las propiedades que les confiere el uso de cada material.

II.1.8.1.- PAVIMENTOS FLEXIBLES.

Los pavimentos flexibles son de **concreto asfáltico, una combinación de agregado (grava y arena) y asfalto mezclados a altas temperaturas en una planta de asfaltos**. Están constituidos por capas de materiales de **reducida cohesión** y de **baja rigidez a flexión** permitiendo la transmisión de mayores esfuerzos conforme es mayor la profundidad. Además tienen la flexibilidad para soportar los asentamientos diferenciales inferiores.

Otro de los aspectos que deben conocerse sobre pavimentos es su configuración estructural de acuerdo a su clasificación común de pavimentos rígidos y flexibles.

A continuación se presentan dos configuraciones típicas para estructurar un pavimento flexible.

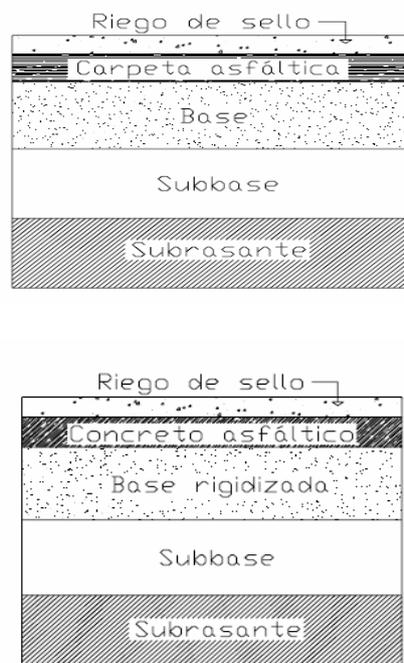


Fig. 11. Configuración típica de pavimentos flexibles

II.1.8.2.- PAVIMENTOS RÍGIDOS

El pavimento rígido se hace con losas de concreto hidráulico solo o con acero. Su costo inicial es más elevado que el flexible, pero su vida útil es más grande, abarca desde 20 a 40 años. El costo de su mantenimiento es menor.

Los pavimentos rígidos tienen como principal elemento estructural su losa de concreto de cemento Portland, que se apoya sobre la sub-base o directamente sobre la sub-rasante. La rigidez que le confiere el concreto hidráulico, permite reducir significativamente, en las capas inferiores el esfuerzo por acción de las cargas aplicadas en su superficie.

Los pavimentos rígidos son hechos de concreto, por lo cual **son tan durables como este material lo permite**. Tiene gran variedad de aplicación: se utilizan en caminos rurales, **pisos y plataformas** grandes, **pistas para la aviación** comercial, y una gran diversidad de obras.

La configuración típica de un pavimento rígido puede observarse en la siguiente figura, ya sea como pavimento nuevo o bien como medida de conservación (rehabilitación) de un pavimento flexible.

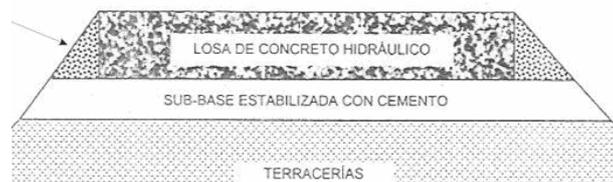


Fig. 12. Configuración típica de pavimentos rígidos



Fig. 13. Pavimentos rehabilitado con carpeta de concreto hidráulico

II.1.8.3.- LOS PAVIMENTOS SEMIRÍGIDOS.

Son aquellos formados por elementos rígidos y tienen comportamiento flexible, como es el caso de los pavimentos de adoquines.

II.1.9.- PAVIMENTOS FLEXIBLES.

Se denomina pavimento flexible a aquel cuya capa de rodamiento esta elaborada a partir de una mezcla asfáltica. Dicha mezcla se elabora a base de agregados pétreos y asfalto.

La mezcla asfáltica empleada en pavimentación también recibe el nombre de aglomerado o concreto asfáltico y se aplica generalmente en capas de rodamiento de **carreteras y aeropuertos. Este tipo de pavimentación es recomendable para capas de rodamiento con tránsito liviano y mediano, o bien para capas intermedias con tránsito mediano y pesado. REF*3**

En su elaboración de una mezcla asfáltica se emplean agregados gradados minerales que se cubren con una película continua de ligante o asfalto a temperaturas elevadas para darle una consistencia viscosa y poder así mezclarlo, extenderlo y compactarlo.

El concreto asfáltico puede ser elaborado en plantas fijas o móviles y se extiende con pavimentadoras especiales. Comúnmente la mezcla que se emplea para pavimentación se denomina **mezcla asfáltica en caliente porque se elabora a temperaturas mayores de 150°C y se coloca y compactada entre 130 y 150°C. Respecto al tendido este se procura que sea de un** espesor uniforme mediante la máquina pavimentadora, seguida de su inmediata compactación mediante rodillos.

La proporción de los elementos de una mezcla asfáltica es aproximadamente un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico.

El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

El asfalto es el material es viscoso, de color negro o castaño, y es un producto hecho con hidrocarburos y sus derivados, que se puede licuar al calentarse; puede ser producido por destilación al vacío o por extracción de solvente. Para la construcción de pavimentos flexibles se usan cementos asfálticos de penetración 60-70 (AC-20), y 85-100 (AC-10), que son los más comercializados. REF* 18

El comportamiento de las mezclas asfálticas en pavimentos depende básicamente del tipo de cargas, el tiempo de aplicación de éstas y de la temperatura de compactación y de trabajo. Y por ello su caracterización y propiedades tienen se vinculan a factores como **la temperatura y periodos de carga**, y en general al conocimiento de **la reología del material.**

Los pavimentos asfálticos presentan **propiedades implícitas a la naturaleza de sus materiales de origen y propiedades derivadas de su trabajo en conjunto, tales como: la fricción interna, el módulo de rigidez longitudinal y el módulo transversal, su estabilidad y la deformación.**

Generalmente este pavimento **se forma con una carpeta asfáltica, la base y de la sub-base. (Ver Figura 11).** Respecto a su diseño estos pavimentos deben cumplir con el espesor referido a la capacidad de carga requerida y de acuerdo a las propiedades del suelo de terracería. **Son más económicos en su construcción y tienen un periodo de vida de entre 10 y 15 años; sin embargo requieren mantenimiento continuo para cumplir con su vida útil,** pues las propiedades de deformación que le confiere el asfalto generan constantes deterioros cuando la terracería que le soporta no es adecuada o bien cuando las cargas de tránsito exceden a la de diseño.

II.1.9.1.- CARACTERÍSTICAS DE LAS CARPETAS ELABORADAS CON MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Para poder evaluar un pavimento flexible y con ello observar las ventajas y desventajas frente a los pavimentos rígidos, conviene ahora mencionar y describir en forma general algunas de las características que determinan el comportamiento de una mezcla asfáltica en pavimentación:

Seguridad
Resistencia al deslizamiento
Regularidad transversal
Visibilidad (marcas viales)
Comodidad
Regularidad longitudinal
Regularidad transversal-
Visibilidad
Ruido
Durabilidad
Capacidad soporte
Resistencia a la desintegración superficial
Medio ambiente
Ruido
Capacidad de ser reciclado
Textura superficial
Conductividad hidráulica

Propiedades mecánicas (en relación con el tráfico)
Resistencia a la fisuración por fatiga
Resistencia a las deformaciones plásticas permanentes
Módulo de rigidez
Resistencia a la pérdida de partículas sólidas
Durabilidad (en relación con el clima)
Resistencia al lavado por el agua
Resistencia a la fisuración térmica
Resistencia a la fisuración por reflexión
Resistencia al envejecimiento
Trabajabilidad
Compactabilidad
Resistencia a la segregación agregado grueso/fino
Resistencia a la segregación agregado/ligante

Tabla No.6. Características que determinan el comportamiento de una capa de rodamiento elaborado con una mezcla asfáltica

De las propiedades enunciadas solo algunas pueden compararse entre ambos tipos de pavimentos, pues la naturaleza del material empleado en su construcción, genera estructuraciones muy diferentes que confieren ventaja a una u otra opción. En la práctica los materiales asfálticos siguen aplicándose por ser económicos y por proporcionan superficies continuas y cómodas para la rodadura de los vehículos.

En general la mezcla asfáltica es relativamente poco durable, según la calidad de los agregados, la del asfalto y los finos de la mezcla, pues dichos elementos que integran la mezcla sufren una descomposición rápida ante factores climáticos severos como lluvia intensa y cambios bruscos de temperatura.

Respecto a su capacidad para drenar el agua producto de lluvias, una mezcla asfáltica puede regularla de acuerdo con la dosificación de finos y asfalto, procurando de esa manera llegar a la impermeabilidad o a la permeabilidad óptima.

Si estas mezclas no proporcionan **la textura adecuada**, se recurre a procedimientos ajenos a la propia mezcla para asegurar una operación con tránsito seguro.

Actualmente la mezcla asfáltica es muy conocida y cuenta con la ventaja de que los experimentos con carpetas asfálticas y el estudio del comportamiento reológico de las mezclas permiten una retroalimentación de datos en las fórmulas de diseño. Lo que a su vez facilita la aplicación de esta información a modelos adaptables incluso al clima de la región y las condiciones de velocidad de los vehículos.

II.1.9.2.- CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Según el parámetro de clasificación, pueden definir distintas mezclas:

a) Clasificación de las mezclas asfálticas por fracciones de agregado pétreo empleado.

Masilla asfáltica.	Polvo mineral más ligante.
Mortero asfáltico.	Agregado fino más masilla.
Concreto asfáltico.	Agregado grueso más mortero.
Macadam asfáltico.	Agregado grueso más ligante asfáltico.

b) Clasificación de las mezclas asfálticas por la temperatura de puesta en obra.

Mezclas asfálticas en caliente. Su elaboración y aplicación es a temperaturas elevadas.

Mezclas asfálticas en frío. Su elaboración y aplicación es a temperatura ambiente.

c) Clasificación de las mezclas asfálticas según la cantidad de vacíos.

Mezclas Cerradas.

Mezclas Semi-cerradas.

Mezclas Abiertas.

Mezclas Porosas o Drenantes.

d) Clasificación de las mezclas asfálticas por el tamaño máximo del agregado pétreo.

Mezclas Gruesas.

Mezclas Finas.

e) Clasificación de las mezclas asfálticas por la estructura del agregado pétreo.

Mezclas con esqueleto mineral.

Mezclas sin esqueleto mineral.

f) Clasificación de las mezclas asfálticas por la granulometría.

Mezclas continuas

Mezclas discontinuas

En resumen, la clasificación común de las mezclas asfálticas se puede realizar de acuerdo a diversos parámetros de diferenciación, y comúnmente se caracterizan como lo muestra la tabla siguiente:

Tabla No.8 Clasificación de mezclas asfálticas

Parámetro de Clasificación	Tipo de mezcla
Fracciones de agregado empleadas	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En Frio
	En Caliente
Huecos en la mezcla (h)	Cerradas ($h < 6\%$)
	Semicerradas ($6\% < h < 12\%$)
	Abiertas ($h > 12\%$)
	Porosas ($h > 20\%$)
Tamaño máximo del agregado (t máx)	Gruesas (t máx > 10 mm)
	Finas (t máx < 10 mm)
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

h%: porcentaje de vacíos

Para comprender mejor la terminología empleada anteriormente, en la siguiente parte del capítulo se presenta una breve descripción de cada tipo de mezcla, haciendo énfasis en su características principales.

II.1.9.2.1.- MASILLAS ASFÁLTICAS.

Las masillas son **mezclas con gran cantidad de polvo mineral y de ligante, de manera que si hay agregado grueso, este se haya disperso en la masilla formada por aquellos**; este tipo de mezcla no trabaja por rozamiento interno y **su resistencia se debe a la cohesión que proporciona la viscosidad de la masilla.**

Se dosifican con mucho asfalto para envolver la gran superficie específica de la materia mineral, lo cual la hace sensible a los cambios de temperatura; para disminuir dicha susceptibilidad térmica se emplean en su elaboración los asfaltos duros, cuidando la calidad del polvo mineral y mejorando el ligante con adiciones de fibras. Las masillas son **mezclas de gran calidad, pero su empleo solo se justifica en tableros de puentes** e incluso en aceras en climas fríos y húmedos.” REF* 18.

II.1.9.2.2.- MORTERO ASFÁLTICO.

Son mezclas con gran cantidad de materiales finos. Es una masilla que, además del polvo mineral que posee, se mezcla con un agregado fino formando una estructura más densa y con escasez de vacíos ocupados por aire. Es pues, un material fino que se dispersa en una masilla; dicha mezcla trabaja por cohesión con ligera resistencia debida a fricción entre partículas finas.

Su contenido de asfalto también la hace sensible a los cambios de temperatura, por lo cual se fabrican con asfaltos duros y adiciones de fibras. Se aplican también en tableros de los puentes y en las vías urbanas con clima frío.

II.1.9.2.3.- CONCRETO ASFÁLTICO.

Sobre este concepto se escribe en los capítulos siguientes. Por ahora conviene mencionar que es una mezcla de agregado grueso más mortero, en la cual el soporte estructural lo proporciona la resistencia del esqueleto mineral de gravas y arenas. En este concreto, la fase de mortero sirve como pasta para ligar los agregados gruesos, existiendo en esta estructura, en comparación con la de un mortero asfáltico, una mayor proporción para los vacíos ocupados por aire y agua. Su resistencia se debe mayormente al trabajo por fricción entre los agregados gruesos.

La dosificación del concreto asfáltico le hace menos sensible a los cambios de temperatura. Su aplicación general es en obras de pavimentación para carreteras y aeropuertos, ya sea como capa de rodamiento o como base negra justo debajo de la capa de rodamiento.

II.1.9.2.4.- MACADAM ASFÁLTICO.

Es una mezcla asfáltica de agregados de granulometría discontinua, que se obtiene extendiendo y compactando un agregado grueso cuyos huecos se rellenan con un agregado fino de mortero asfáltico y ligante. Según las especificaciones, existe Macadám M1, M2, M3 Y M4.

Otra de las clasificaciones que conviene destacar es la que hace referencia a la temperatura de elaboración y colocación en obra.

II.1.9.2.5.- MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.

Se fabrican con asfaltos a temperaturas elevadas (superiores a 150 grados centígrados). En esta mezcla se calienta tanto el asfalto (para fijar su viscosidad) como los agregados para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con estos últimos.

En la elaboración de mezclas en caliente, primero se eligen los tamaños de los agregados, después se calientan y secan para combinarlos en las proporciones adecuadas con la cantidad debida de asfalto caliente y finalmente los entrega a los vehículos transportados. La temperatura elevada debe conservarse para que esta mezcla pueda extenderse y compactarse adecuadamente en obra, por lo cual los camiones transportan el material protegiéndolo contra el contacto directo con el viento y su consecuente pérdida de calor.

II.1.9.2.5.1.- MATERIALES USADOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.

En estas mezclas el agregado que se usa es grava o combinaciones de grava y arena. Se extrae de rocas duras y resistentes, sin arcilla en forma de terrones, sin polvo adherido y libre de material orgánico.

La mezcla asfáltica en caliente mas empleada en México es denominada concreto asfáltico tipo III, cuya proporción de materiales consiste en: 20% de arena, 30 % polvillo, 23% arcilla y 27% piedra de agregado grueso.

Como agregado grueso es se emplea aquel que queda retenido en la malla No.8 (tamaño de malla). Generalmente se aplica no más de 5% de su peso, de trozos alargados o planos, y el porcentaje de desgaste (Ensayo de los Ángeles) no debe ser mayor de 50%. REF*15

El agregado fino es aquel que pasa la malla No.8 y queda retenido en la malla No. 200. Se constituye de arena o residuos de grava, en forma de granos limpios y duros.

El polvo mineral usado en estas mezclas es la fracción del agregado que pasa la malla No. 200. Y como agregado llenante se emplea un polvillo calcáreo o cemento Pórtland, o cualquier otro polvillo, no plástico.

En la mezcla asfáltica común se utilizan cementos asfálticos de penetración 60 – 70 (AC - 20) y 85 -100 (AC - 10). **REF*25**

Con estos materiales se dosifica una mezcla que, por características de su diseño, debe cumplir con los siguientes requisitos:

Estabilidad Marshall (en lb) 750 min.	Flujo 1/100" 5-18	% de Vacíos de la mezcla 3-10
--	---------------------------------------	---

Tabla No. 9. Fuente: REF*15

En estas mezcla **se recomienda que el agregado presente un valor equivalente de arena igual a o mayor de 35% y que la adherencia entre el agregado y el material asfáltico sea regular.**

II.1.9.2.6.- MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO.

Una mezcla asfáltica en frío es aquella cuya elaboración y puesta en obra se realiza a temperatura ambiente. Usualmente se aplican como carpeta de rodamiento en la **pavimentación de** carreteras secundarias, vialidades **con bajo volumen de tránsito**, donde circulan exclusivamente automóviles y también en reparaciones de conservación.

Estas mezclas son **almacenables por días e incluso semanas; su elaboración requiere de un bajo consumo de energía y procedimientos sencillos.** Son relativamente económicas, sobre todo en lugares donde no es redituable la instalación de una planta de mezclas asfálticas en caliente. Se pueden producir en una planta sin calentamiento previo de los materiales, extendiéndose y compactándose a temperatura ambiente. En cuanto a su conservación se procura retrasar su envejecimiento mediante aplicaciones de sello a base de lechadas asfálticas.

Las mezclas asfálticas en frío son trabajables durante periodos de semanas, pues el asfalto empleado tiene una viscosidad baja (se emplean emulsiones con asfalto fluidificado). Esto favorece la aplicación de la mezcla incluso después de haber sido almacenada por días, ya que solo una capa de espesor reducido se endurece relativamente rápido por la acción de la evaporación del fluidificante. **El proceso de aumento paulatino de la resistencia de estas mezclas se denomina maduración y consiste en la evaporación del agua procedente de la rotura de la emulsión con el consiguiente aumento de la cohesión de la mezcla.**

La dosificación de estas mezclas en frío cuantifican áridos gruesos, áridos finos, filler, emulsión asfáltica y agua. Se recomienda que los áridos gruesos sean solo provenientes de trituración, con un tamaño máximo entre **10 mm. y 20 mm.** **Con estos agregados se presenta la trabazón necesaria, y con el uso de arenas silíceas naturales se da trabajabilidad a la mezcla. Comúnmente el filler empleado en estas mezclas proviene de cemento o cal. La emulsión asfáltica utilizada varía según las características mineralógicas de los agregados. Generalmente se utilizan emulsiones aniónicas con áridos calcáreos y emulsiones catiónicas con áridos graníticos.**

Se recomienda su puesta en obra a temperaturas no inferiores a los 20 °C ni superiores a los 40 °C. Por ello generalmente se extiende por la mañana durante los meses de enero y febrero de máximas temperaturas.

II.1.9.2.7.- CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS SEGÚN LA CANTIDAD DE VACÍOS.

El control de vacíos busca eliminar las deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.**REF*4**

El porcentaje de vacíos de la capa asfáltica se regula con el proceso de compactación, el cual es de difícil control en obra, mas aun cuando se trabaja con mezclas **blandas o cuando el esqueleto mineral de la mezcla ofrece un alto rozamiento interno.**

En general, el volumen de vacíos se ve influenciado por las propiedades plásticas y el esqueleto estructural de la mezcla compactada, y de acuerdo con la cantidad de vacíos lograda en una mezclas asfáltica, esta puede clasificarse como serrada, semi-cerrada, densa y porosa

En las mezclas cerradas la proporción de vacíos es menor al 6%. La reducción de vacíos en el pavimento se facilita con la compactación del mismo, la cual hace que los agregados gruesos que se encuentran inicialmente dispersos en una especie de mortero, formen una estructura mas densa. Las mezclas cerradas a veces refieren problemas en este proceso de compactación y cuando esto ocurre se les denomina agrias.

En las mezclas Semi-cerradas o Semi-densas la proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %. En el caso de las mezclas abiertas la proporción de vacíos supera el 12%.

Las mezclas Porosas o drenantes presentan una proporción de vacíos es superior al 20 %. Se utilizan para construir superficies de rodamiento para vías de circulación rápida, en vías secundarias, en vías urbanas o en capas de base bajo los pavimentos de concreto hidráulico.

En la elaboración de mezclas porosas se usan asfaltos modificados en proporciones de aproximadamente 4.5 % de la masa de agregados pétreos, y con un 5 %, para asfaltos normales. Comúnmente se mezclan en caliente para tráficos de elevada intensidad; **se aplican en capas de rodamiento en espesores de 4 a 6 cm., con el objeto de que filtrar rápidamente el agua de lluvia.**

II.1.9.2.8.- MEZCLAS ASFÁLTICAS GRUESAS Y FINAS.

Otra de las clasificaciones de mezclas asfálticas se realiza **según el tamaño máximo del agregado pétreo** que se emplea en la mezcla, el cual determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla, que generalmente es del doble al triple del tamaño máximo. Este tipo de mezclas pueden ser mezclas gruesas, o finas.

Las mezclas gruesas presentan un tamaño máximo del agregado pétreo que excede los 10 mm. (3/8”).

Las mezclas finas son también llamadas microaglomerados o morteros asfálticos; están formados por agregados finos, polvo mineral y un ligante asfáltico. Su **T. M. A. (Tamaño Máximo de Agregado)** pétreo es menor de 10 mm., y se aplican en capas de pequeño espesor (menor a 3 cm.). Se emplean frecuentemente en zonas urbanas, porque se evitan problemas con la altura de los bordillos debido a que se extienden capas de pequeño espesor. Este tipo de mezclas puede producirse en caliente (llamadas lechadas asfálticas) o en frío.

Los microaglomerados pueden proporcionar texturas rugosas hechas con agregados pétreos de gran calidad y asfaltos modificados, para las vías de alta velocidad de circulación.

II.1.9.2.9.- MEZCLAS ASFÁLTICAS CON Y “SIN” ESQUELETO MINERAL

Los tipos de mezcla así clasificados son:

Mezclas con Esqueleto mineral. Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia se debe al rozamiento interno de los agregados, como en el caso de las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos (aunque también una parte de la resistencia de estos últimos se debe a la masilla).

Mezclas sin Esqueleto mineral. No poseen un esqueleto mineral muy resistente, pues su resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla.

II.1.9.2.10.- MEZCLAS ASFÁLTICAS SEGÚN SU GRANULOMETRÍA.

Esta clasificación se basa en la continuidad de la granulometría de los agregados empleados en la mezcla.

Mezclas Continuas. Cuentan con una cantidad distribuida y de diferentes tamaños de agregado pétreo.

Mezclas Discontinuas. Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo.

II.1.9.2.11.- MEZCLAS ASFÁLTICAS DE ALTO MÓDULO.

Generalmente la mezclas de alto módulo se aplican en capas de entre 8 y 15 cm. de espesor, en rehabilitaciones y construcción nueva de pavimentos para tráfico pesado de intensidad media o alta. **REF* 18.**

Estas mezclas se pueden elaborar en caliente y con asfaltos muy duros. A veces se usan asfaltos modificados (con 6 % de la masa de los agregados pétreos y el polvo mineral entre el 8% - 10%).

Cuando se elaboran en frío, esta mezcla puede alcanzar un elevado módulo de elasticidad (13,000 MPa a 20 grados centígrados) y una resistencia a la rotura relativamente elevada. (1 MPa = 102 ton/m²)

Esta mezcla puede emplearse como subestructura en una base, con la ventaja frente otras bases de gravacemento; dicha ventaja consiste en la minimización del agrietamiento debido a la retracción de los materiales de la base; además posee una mayor capacidad de absorción de tensiones y en general una mayor resistencia a la fatiga, permitiendo ahorrar espesor.

II.1.10.- DETERIOROS EN LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.

Cuando un pavimento presenta deterioros en su superficie, estos pueden acusar un comportamiento inadecuado y una mala calidad de las capas inferiores. Dicha calidad puede comprobarse con ensayos de laboratorio que midan la resistencia y verifiquen la calidad de sus materiales de las capas en cuestión. Ahora bien, cuando estas pruebas no demuestran una calidad suficiente de las capas inferiores, entonces los deterioros se clasifican como superficiales, es decir, que los deterioros se manifiestan y actúan solamente en la capa de rodamiento.

En el supuesto de que se presente el último caso descrito, la durabilidad de las capas inferiores se vería amenazada por la falla de la capa superior. Es entonces cuando se verifica que el estado del pavimento en conjunto depende fundamentalmente de la propia durabilidad en la capa de rodamiento.

Dicha durabilidad **es una propiedad que dota al pavimento de la resistencia al paso continuo de cargas vehiculare, a los cambios de temperatura y a los efectos de agua** y cuando es baja, se pone al pavimento en riesgo de sufrir más deterioros, incluyendo en estos la falla total de la capa de rodamiento.

Cuando se presentan los deterioros, estos afectan al pavimento en forma acumulativa y generalmente son causados por los siguientes factores:

- **Fórmula de trabajo deficiente en la formulación de la mezcla asfáltica**
- **El uso de materiales inadecuados en la mezcla asfáltica**
- **La existencia de procesos deficientes en elaboración de las mezclas.**
- **Uso de técnicas de construcción deficientes** (transporte, extensión y compactación).
- **Incremento del tráfico en magnitud y volumen generando un daño superior al proyectado.** (cargas por eje, presión de inflado de los neumáticos, intensidad)
- **Acciones graves de intemperismo** (lluvia, gradientes de temperatura)

Como puede observarse en la lista anterior, algunos deterioros se presentan por errores de diseño de la mezcla, por defectos en materiales empleados en su elaboración, por procedimientos constructivos defectuosos y por las condiciones de servicio del pavimento, entre otros.

Cuando se construye un pavimento flexible es frecuente que los deterioros se manifiesten en forma de una textura superficial inadecuada, una geometría irregular y un aspecto inseguro. Y cuando el pavimento entra en servicio y durante su vida útil debe aplicársele un mantenimiento adecuado a los **estudios que diagnostican el estado de deterioro en el que se encuentra el firme.**

Los deterioros también son muy diversos y a continuación se mencionan los más frecuentes del pavimento flexible, con la finalidad de comprender los términos que se emplean en la evaluación de la estructura del pavimento flexible de la autopista Chamapa – La Venta.

II.10.1.- SEGREGACIONES.

La segregación se manifiesta como la formación de grumos de las partículas minerales de la superficie del pavimento. Generalmente el agregado fino se separa de las partículas de mayor tamaño, lo que da lugar a una apariencia erosionada y rugosa al pavimento.

La segregación provoca incomodidad para los usuarios y el paso de sus vehículos por una superficie así deteriorada siempre incrementa el daño.

La segregación es un deterioro superficial que se manifiesta como la pérdida de una costra de la capa de rodamiento y se clasifica como:

1) La segregación transversal. Se manifiesta con una peculiar mancha en la superficie propia de un cambio de textura. Las causas de esta segregación son:

- Material segregado en la tolva de carga de las plantas.
- Empleo del material inicial que proviene del arranque de la planta. (Material mal dosificado o mezclado con bajo contenido de asfalto).
- Vaciado excesivo y mal manejo de las alas de las tolvas de las extendedoras.
- Juntas entre tendidos consecutivos.

2) Segregación aleatoria. Es una segregación que se presenta en toda la capa de rodamiento y en diferentes direcciones. Sus causas pueden ser:

- No disponer de acopios uniformes.
- Vertidos en los dosificadores en frío.
- Error en la carga del árido en los dosificadores en frío.
- Demasiadas operaciones de arrancado y parada en las plantas de tambor secador.
- Diferencias notables de nivel en la mezcla almacenada en el silo.
- Operaciones irregulares en la descarga de los camiones.
- Demanda descompensada de la extendidora

3) Segregación longitudinal. Esta segregación puede producirse en el centro o en los lados del tendido. Puede ser causada por defectos en los husillos o a una velocidad inadecuada de la extendidora.

En general, para prevenir la aparición de este deterioro se recomienda lo siguiente:

Durante la elaboración y aplicación de la mezcla

- No emplear asfaltos muy viscosos.
- Controlar la cantidad de ligante asfáltico de la mezcla.
- Emplear asfalto libre de cualquier sustancia que lo contamine
- Evitar el exceso de agua en la mezcla.
- No sobrecalentar el asfalto de la mezcla pues se genera un envejecimiento inmediato de esta sustancia.
- Verificar la compatibilidad del agregado con el asfalto, para garantizar una adecuada adhesión entre estos materiales.
- Verificar que en la granulometría de la mezcla exista suficiente cantidad de finos.
- Tender una mezcla en espesor no muy delgado cuando se emplean materiales gruesos.
- Evitar el enfriamiento de la mezcla previo a su tendido, pues tiende a formar grumos.
- Evitar que se compacte la mezcla a temperaturas bajas.

Durante el servicio del pavimento

- No deben aplicarse sobrecargas de tránsito que generen esfuerzos cortantes horizontales elevados.
- Evitar la entrada de agua en la capa de rodamiento; pues la presión en el agua creada por las sollicitaciones del tráfico puede causar la separación de las partículas minerales de la capa superficial. Este fenómeno ocurre inmediatamente después de la puesta en obra de la capa asfáltica, con malas condiciones climatológicas o compactación escasa.
- Evitar al máximo el vertido de carburantes de los vehículos que contaminan los ligantes asfálticos.

Desprendimientos durante el servicio de pavimento, que se atribuyen a la segregación temprana de una mezcla asfáltica.

	
Fotografía No. 17. Segregación longitudinal manifiesta en desprendimientos REF*18	Fotografía No. 18. Segregación transversal manifiesta en juntas de tendido REF* 18

II.10.2.- EXUDACIONES. (SUPERFICIES LISAS)

Una exudación es la **presencia de ligante libre o polvo mineral sobre la superficie del pavimento**. Por ello las capas ricas en asfalto pueden perder su textura y volverse deslizantes, especialmente en tiempo húmedo.

Las causas de las exudaciones son:

- Exceso de liga asfáltica.
- Escaso contenido de vacíos.
- Migración de los ligantes asfálticos de las capas inferiores debido a partes exudadas en las capas inferiores, dotaciones irregulares en los tratamientos de adherencia entre capas asfálticas y ligante asfáltico libre por mala adhesividad con los agregados pétreos.

Las exudaciones son un problema común en carreteras donde se tiende concreto asfáltico con exceso de ligante. Se manifiestan como manchas de asfalto y son en general un peligro para la circulación, pues constituyen superficies lisas donde disminuye significativamente la fricción con el neumático.



Fotografía No. 19. Exudaciones en pavimentos asfálticos. **REF*15.**

II.10.3.- PELADURA O DESENVUELTA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.

El exceso de agua, vapor y la combinación de agentes contaminantes en la mezcla asfáltica pueden generar el desprendimiento del ligante asfáltico que cubre al agregado pétreo; este fenómeno provoca una disminución de la adherencia entre partículas gruesas de la mezcla o finas de un mortero.

Cuando **se cae la capa de asfalto que cubre al agregado** y se recalienta la mezcla, se produce la concentración de ligante en algunos puntos, formándose una pasta parecida a la masilla muy plástica o viscosa. **Otros factores que producen el desprendimiento del asfalto que cubre las superficies minerales del agregado son:**

- **Agua interior** o exterior al agregado pétreo
- Los agregados gruesos con **altos contenidos de sílice**, son más sensibles a éste fenómeno que los calizos.
- Uso de **agregados sucios con polvo**, el cual no permite la adherencia adecuada entre el ligante y a las partículas del agregado.
- **Emulsificación:** El ligante sometido a la acción enérgica del tráfico, puede emulsionarse especialmente con agentes químicos o minerales presentes, tales como polvo arcilloso.
- **Alto contenido de vacíos en la mezcla**, que permiten el paso del agua y del vapor a través de ella. Este fenómeno puede agravarse si el drenaje de la capa del pavimento es insuficiente.
- Algunas **composiciones químicas de los ligantes.**



Fotografía 19. Desenvuelta de los agregados que deriva en desgrane de la capa de rodamiento. **REF*15**

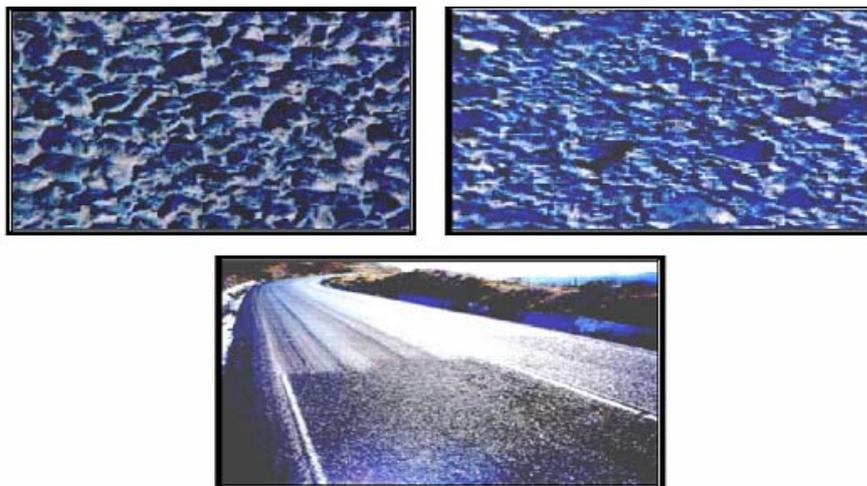
II.10.4.- TEXTURA SUPERFICIAL INADECUADA.

La **textura de la superficie de rodadura debe garantizar la funcionalidad y la seguridad de la rodadura vehicular.** A este respecto, en el medio de pavimentos, se ha convenido distinguir entre **texturas tipo**, de acuerdo a su profundidad media:

- 1) **Microtextura**, con profundidad media en círculo de arena de aproximadamente 0.4.
- 2) **Macrotextura**, con profundidad media en círculo de arena de aproximadamente 0.7.
- 3) **Megatextura.**
- 4) **Combinación posible de las anteriores texturas.**

Causas de una textura inadecuada:

- **Uso de materiales blandos que permiten el pulimento** por causa de la tracción neumático-pavimento.
- Aplicación de **granulometría con excesivos finos.**
- **Exceso de ligante en superficie.**
- **Segregaciones de la mezcla en el tendido, sin que se corrija antes de compactar.**
- **Contaminaciones de la superficie.**
- **Irregularidades reflejadas de la capa inferior.**



Fotografía 20. **Textura superficial inadecuada en pavimentos asfálticos.**

II.10.5.- AGRIETAMIENTOS.

Las grietas **son un mecanismo de falla por fatiga de una capa de pavimento. Cuando las capas inferiores a la superficie de rodamiento no han fallado y sin embargo existen grietas prematuras en la capa de rodamiento, éstas se asocian a un problema de diseño o de construcción de la mezcla asfáltica.**

Causas del agrietamiento:

- * **Existencia de grietas en la base o capas inferiores.** Las grietas comienzan en la parte inferior de las capas donde las tensiones son más altas, formándose una o dos grietas longitudinales próximas a las huellas de las ruedas y terminan con un estado generalizado de superficie agrietada.

- * **Aplicación de cargas superiores a las de diseño** cuando se pone en el servicio el pavimento; el efecto de esta sobrecarga es una grieta que inicial que comienza longitudinalmente al lado exterior de la huella de la rueda; esta grieta es seguida por otra paralela en el borde interior de la huella, y ambas son consecuencia de cargas excesivas a las de diseño, ya sea en magnitud o en número de aplicaciones, y debido al término de la vida útil del pavimento.

- * **Condiciones ambientales extremas y los cambios volumétricos asociadas a ellas**, que generalmente se denominan grietas térmicas (usualmente son transversales). Cuando las juntas no se compactan suficientemente y a temperatura adecuada, son el lugar donde se manifiestan las grietas longitudinales y transversales. En las juntas inadecuadas el agua penetra en el pavimento deteriorándolo.

- * Uso de **asfalto de alta viscosidad** que genera mezclas menos resistentes al **efecto acumulado de las flexiones.**

- * Aplicación de **tensiones mayores que la resistencia a la tensión de rotura de la mezcla.**

- * **Zonas de tensión por flexión excesiva, mayor a la de diseño**, por causa de la aplicación de las cargas cíclicas de tránsito.

Diversidad de grietas en pavimentos flexibles



Fotografía No. 21. Diversidad de grietas en pavimentos flexibles.
Fuente: **REF*18**

II.10.6.- DESGRANAMIENTOS

El desgranamiento es el desprendimiento de agregados de la mezcla asfáltica; forma inicialmente pequeños baches que se agravan con el paso constante de los vehículos. Muchas veces se presenta en la zona de acotamientos, donde el tendido de una mezcla se hace más delgado y la compactación del pavimento durante su proceso constructivo es menor.

Causas:

- **Segregación de la mezcla asfáltica durante su tendido.**
- **Baja compactación de la mezcla asfáltica, lo cual no permite lograr la cohesión adecuada del mismo, provoca alta permeabilidad y genera el envejecimiento del ligante asfáltico.**
- **En el caso de que se presente en un mortero asfáltico, la mala calidad de su agregado fino, polvo y ligante asfáltico, se traduce generalmente en una escasa resistencia cuando se ve expuesto al contacto con el agua; el mortero superficial puede desaparecer a causa de la abrasión.**
- **Es común que se presente en las huellas del paso vehicular en casos donde se aplicaron mezclas con bajo contenido de asfalto y éste es de mala calidad.**
- **Se presenta también inmediatamente después del tendido, durante el proceso de compactación, cuando la máquina de rodillos o neumáticos no tiene una temperatura óptima al contacto con la mezcla, y cuando no funcionan sus aspersores para regular la misma temperatura de contacto y por tanto no pueden evitar la adherencia de la mezcla en sus llantas o rodillos.**

II.10.7.- DEFORMACIONES PLÁSTICAS.

Generalmente son el resultado de un asentamiento diferencial de las capas inferiores; dichos asentamientos, junto con el efecto de las cargas horizontales de los vehículos, generan que el material de la capa de rodamiento presente flujo y se desplace. Este efecto es muy notorio en la unión de un pavimento rígido y un pavimento asfáltico tal como sucede en algunas losas de aproximación de los puentes.

Las deformaciones plásticas también están asociadas a la presencia de contaminaciones o a la excesiva cantidad de ligante en el tratamiento de adherencia de la superficie inferior. Estas deformaciones se presentan como variaciones permanentes del perfil superficial de la capa de mezcla asfáltica y son acumulativas. En pavimentación a estas deformaciones se les clasifican como sigue:

1) El arrollamiento. Se asocia a una baja estabilidad de las mezclas, y se manifiesta en una deformación plástica perpendicular al eje de la vía. Otra variedad de esta deformación son los arriñonamientos.

2) Las roderas. Se generan en la huella de las ruedas de los vehículos.

Roderas por insuficientes huecos en la mezcla. Forman una depresión cerca del centro de la carga aplicada y con elevaciones a cada lado de la depresión. Estas roderas pueden ser producidas por insuficientes huecos en la mezcla (menos del 3%); en cuyo caso, una sobrecompactación ocasiona que el ligante rellene los huecos entre las partículas.

Roderas por consolidación. Son depresiones cerca del centro de la carga aplicada sin el acompañamiento de las elevaciones laterales. Se producen generalmente por exceso de huecos y falta de estabilidad de la mezcla o de la base de soporte y terracerías.



Fotografía No. 22. Roderas, deformación típica de pavimentos flexibles. Fuente: **REF*18**

Entre las causas posibles de las deformaciones plásticas podemos mencionar las siguientes:

Contenido inadecuado de vacíos en las mezclas convencionales (**menos del 3%**). Excesivo contenido de vacíos (**mayor del 8%**) en las mezclas convencionales.

Baja viscosidad de los ligantes asfálticos.

Uso de un ligante más blando que el que estaba previsto.

Contaminación del ligante asfáltico con partículas de fuel no quemado.

Insuficiente estabilidad del material cuando se ha permitido el paso anticipado del tráfico.

Excesiva consolidación de las capas del firme bajo acción del tráfico.

Cuando el servicio del pavimento se excede en tiempo de aplicación de carga, la capa se deforma en forma permanente. Las mezclas bituminosas tienen respuestas más elásticas a las cargas de corta duración y menos elásticas a las cargas lentas. Por ésta razón, **las deformaciones plásticas se presentan sobre todo en las rampas y en otras zonas de tráfico lento.**

Mezclas con un bajo contenido de filler y existencia de partículas minerales redondeadas.

Degradaciones variadas del agregado pétreo.



Fotografía No. 23. Deformaciones plásticas de carácter permanente en pavimentos flexibles. Fuente: **REF*18**

II.11.- TRATAMIENTO SUPERFICIAL PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES.

El mantenimiento y conservación de una carretera debe aplicar las medidas adecuadas para solucionar los deterioros antes descritos; entre dichas medidas se encuentran los tratamientos superficiales, que constituyen una solución a los daños leves de una carpeta asfáltica, siendo estos no atribuibles totalmente a las condiciones de las capas que le subyacen, se pueden aplicar diversos tratamientos superficiales.

Los tratamientos superficiales tienen varias funciones:

- **Sirven de sello** de la superficie de rodamiento.
- **Protegen las superficies existentes deterioradas por el intemperismo, y les dan cierto aumento de resistencia.** Forman una superficie que **amortigua las condiciones atmosféricas con un bajo costo de pavimentación**
- **Proveen de una superficie resistente al deslizamiento.**
- **Sirven como capa intermedia que liga un revestimiento sobrepuesto al revestimiento previo.**
- **Pueden formar una cubierta temporal** para una nueva base granular que recibirá su cubierta final en forma inmediata

Existen varios tipos de tratamientos superficiales que se aplican en carpetas asfálticas de acuerdo al deterioro que se deba reparar. A continuación se describen algunos de ellos.

II.11.1.- TRATAMIENTO SIMPLE O MONOCAPA. Se aplica asfalto con una capa de agregado y sirve como protección de bases que deben abrirse al tráfico liviano; es pues un pavimento provisional mientras se construye la carpeta asfáltica definitiva.

II.11.2.- TRATAMIENTO SUPERFICIAL MÚLTIPLE. Consiste en **repetir dos o más veces el procedimiento constructivo de los tratamientos de una capa.** Generalmente se disminuye el tamaño del agregado a medida que la capa se construye.

El tratamiento superficial de doble riego es un ejemplo de esta aplicación, y se utiliza como pavimento provisional en carreteras para tráfico mediano o pesado que se construye por etapas. Las guías más detalladas para el uso y aplicación de varios tratamientos para superficie con asfalto, están dadas en Asphalt Surface, The Asphalt Institute Manual MS-13. REF*26

II.11.3.- RIEGOS (IMPREGNACIÓN – ADHERENCIA):

Forman una capa de adherencia mediante una aplicación de asfalto diluido. Se usa para ligar la superficie pavimentada y la nueva carpeta.

En una emulsión las partículas pequeñísimas de cemento asfáltico se encuentran suspendidas en agua, y deben de penetrar los vacíos de la superficie de la base granular. En la aplicación de esta capa de liga, el área de trabajo se debe limpiar y todo material suelto debe ser removido. Luego se coloca un riego denso de emulsión asfáltica, incluyendo los bordes (lados verticales). El riego ayuda a mantener la mezcla asfáltica en su sitio y da un sello impermeable entre el encarpetao y la capa inferior.

Esta capa de adherencia puede ser también de asfaltos líquidos (RC-70, RC-250), pero las emulsiones diluidas dan los mejores resultados. Esto se debe a que pueden diluirse para dejar luego un cubrimiento ligero y uniforme de asfalto residual. De hecho, comercialmente la emulsión se puede cuantificar por la proporción de asfalto residual que se riega en un metro cuadrado.

Excepcionalmente, en caso de requerirse el colocar una capa adicional sobre una carpeta recién hecha (dos o tres días después del primer tendido), la capa de adherencia puede ser omitida. La adherencia entre estas dos capas resulta de buena calidad.

Generalmente la emulsión se diluye en una cantidad igual de agua. El material diluido se aplica en las cantidades de 0.25 a 0.70 litros/m². La cantidad de emulsión depende de la naturaleza de la base granular y de las condiciones del tiempo, la granulometría del agregado, el tamaño de los vacíos, y la absorción del agregado todos los afectan.

El riego de la emulsión permite esparcir una película de asfalto residual delgada y uniforme cuando la emulsión rompa. Si queda expuesta esta liga a factores ambientales, ya sea polvo, agua, etc., la adherencia del próximo tendido no se efectuará adecuadamente.

El exceso de emulsión en una capa de adherencia puede crear un plano de deslizamiento entre las dos capas de pavimento, sobre todo cuando, por efectos del calor y la acción de las cargas, la emulsión se vuelve otra vez viscosa.

Después de aplicado el riego de adherencia, se permite que la emulsión rompa totalmente antes de colocar la capa siguiente.

Actualmente se cuenta con emulsiones de rompimiento rápido, sin embargo, cuando éstas se aplican como riego de taponamiento y el tráfico debe abrirse en poco tiempo, los vehículos deberán controlar su velocidad a 30Km/h, dado que el área recién regada del pavimento es muy resbaladiza y no se puede tener un manejo seguro si se permiten velocidades elevadas.

Cuando se aplican como riego de liga las emulsiones de rompimiento rápido, y para controlar el flujo de los camiones durante el proceso de tendido, sobre este riego generalmente se aplica una capa leve de mezcla asfáltica conocida como poréo, que evita el levantamiento de la liga por los neumáticos y evita el atoramiento de la pavimentadora.

Si una vez rota la emulsión, se encuentra un exceso de está en la superficie, se puede regar un poco de polvo de arena para absorber el material sobrante.

El riego de una emulsión en una superficie permite:

- Endurecer la superficie.
- Impermeabilizar la superficie de la base.
- Sellar los vacíos capilares.
- Adherir la base y la capa siguiente.
- Penetrar poco en la base tapando los huecos con asfalto residual

Los tipos de emulsiones diluidas más conocidas son SS-1, SS-1h, CSS-1 y CSS-1h. Comúnmente se utiliza de 0.45 a 1.35 litros/m² de emulsión: SS-1, SS-1h, CSS-1h.

II.1.8.7.4.- LECHADA ASFÁLTICA.

Es un sello para tratamiento superficial, que protege al pavimento contra la infiltración del agua superficial, y es empleado cuando las superficies están agrietadas o son porosas. A veces se utiliza como revestimientos antideslizante al pavimento gastado o para obtener una superficie de un color determinado.

II.11.5.- MEZCLA DE ARENA-ASFALTO.

Son pavimentos compuestos de agregado y cemento asfáltico mezclados en caliente. Los materiales asfálticos que se deben utilizar para la construcción de este tipo de pavimento son cementos asfálticos de penetración 60-70 y 80-100.

II.1.8.7.6.- MEZCLAS DENSAMENTE GRADADAS.

Como se menciona anteriormente, son mezclas que contienen cantidades de agregados en proporciones adecuadas de todos los tamaños, de grueso a fino, incluyendo filler, proporcionados de tal forma de obtener una mezcla densa con pocos vacíos.

Está dotada de una alta resistencia friccionante y reduce la posibilidad de trituración de las partículas sólidas en sus puntos de contacto. Su contenido de vacíos es bajo y por ello es poco permeable

II.1.12.- PAVIMENTOS RÍGIDOS

Es común encontrar definiciones de pavimento que indican que este es solo la capa superior del firme que soporta directamente las solicitaciones del tráfico; sin embargo, el término que en México es de uso común, que define al pavimento y que se desarrolla en esta tesis, comprende como elementos: la base, la sub-base y la capa de rodamiento, y no solo a esta última. Esta aclaración resulta oportuna para manifestar la coherencia con los términos desarrollados previamente para pavimentos asfálticos.

En la construcción de pavimentos rígidos la capa de rodamiento se realiza con concreto hidráulico; **esta capa es rígida y absorbe la mayoría de los esfuerzos horizontales y parte de los verticales; debido al hecho de estar en contacto directo con el tráfico, posee condiciones de funcionalidad (rodadura cómoda y segura) y estéticas (puesto que es la parte visible del firme).**

La capa de rodamiento de un pavimento rígido se constituye de losas de concreto hidráulico elaborado con cemento Pórtland (material cementante rígido que le da su característico color gris claro).



Fotografía No. 24.

Losa de concreto hidráulico recién colada en rehabilitación de autopista México-Querétaro.

Las losas por lo general no deben tener menos de 15 centímetros de espesor y requieren separaciones entre ellas para facilitar su comportamiento en conjunto; dichas separaciones se denominan juntas de dilatación y evitan los agrietamientos por cambios volumétricos asociados a la temperatura y humedad. En la fotografía No. 26, se aprecian las juntas longitudinales y transversales de las losas de rodamiento.

Las losas del pavimento rígido **pueden hacerse de concreto hidráulico solo o reforzado con acero. El costo de construcción de estas losas supera en mucho al correspondiente a implementar la pavimentación con concreto asfáltico; sin embargo su periodo de vida útil es mas grande, abarcando de 20 a 40 años, según el mantenimiento que se les aplique.**

Estructuralmente la losa de concreto hidráulico se **apoya sobre la sub-base o directamente sobre la sub-rasante**; esta losa posee la rigidez que le confiere en concreto hidráulico, y ello le permite reducir significativamente el esfuerzo en profundidad, por acción de las cargas aplicadas sobre su superficie.

Los pavimentos de concreto son tan durables como este material lo permite. Actualmente tienen gran variedad de aplicación: **se utilizan en caminos rurales, pisos y plataformas, grandes pistas para la aviación comercial, y una gran diversidad de obras.**

II.1.12.1- CONCRETO HIDRÁULICO EN PAVIMENTOS

En general **la elaboración de concreto hidráulico para pavimentos es relativamente fácil**, considerando que los componentes de la mezcla (cemento, agua, aire, agregados y aditivos) se pueden adaptar para producir las resistencias deseadas, y bastará con controlar la relación, reacción y contenido de agua y cemento. **Sin embargo, el control de estos materiales en obra debe estar estrictamente apegada a las especificaciones que rigen su dosificación, el traslado de la mezcla, su colocación, los procesos de texturizado y curado para asegurar la resistencia requerida**, ya que de lo contrario será necesario elaborar una cimentación mucho más fuerte que la normal.

La implementación de pavimentos rígidos debe corresponder con la necesidad de soporte de la vía proyectada, y según la misma, pueden aplicarse algunos de los procedimientos que se describen a continuación.

II.1.12.2- TIPOS DE PAVIMENTO RÍGIDO

En un pavimento rígido se pueden variar los elementos y procedimiento constructivos empleado para su elaboración, de acuerdo a las diversas solicitudes a las que será expuesto. Por ello, las técnicas de pavimentación son tan variadas y a continuación se describen las mas usadas.

Tabla 10. Tipos de pavimento rígido y sus aplicaciones

	TIPO DE PAVIMENTO	APLICACIONES	VENTAJAS
	Pavimento de concreto hidráulico	Vialidad urbana, Autopistas, Aeropistas	Mínimo deterioro, Larga vida útil, Poca o nula deformación en su superficie, Alta velocidad de construcción, Óptimo drenaje superficial, Mayor reflexión de la luz
	WHITETOPPING	Plataformas en terminales aéreas, rehabilitación de todo tipo de caminos	durable, mínimo mantenimiento, corrige perfil de la superficie, antes de asfalto, método de construcción relativamente sencillo
	CCR (Concreto Compactado con Rodillos)	Patios de maniobras, Accesos para maquinaria pesada, Caminos secundarios de gran carga vehicular a baja velocidad	Vida útil de 20 años o más, Luminosidad, Reduce desgaste de vehículos, Seguridad
	Pavimento estampado o texturizado	Residencias, Calles y vía pública, Estacionamientos, Centros comerciales, Hospitales, Escuelas, Hoteles	Facil aplicación, Variedad en texturas y colores, Durable, requiere de muy poco mantenimiento
	Suelo - Cemento	Caminos secundarios y Caminos rurales	Bajo costo de construcción, Aplicación rápida y sencilla, Durabilidad

Como termino intermedio entre la definición de pavimentos rígidos y flexibles, el concepto del pavimento semirígido describe a aquellos formados por materiales con relativa rigidez pero tienen comportamiento flexible, como es el caso de los pavimentos de adoquines.

II.1.12.3.- DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE PAVIMENTO RÍGIDO Y SUS APLICACIONES

II.1.12.3.1.- SUELO-CEMENTO

El suelo cemento es un tipo de pavimento rígido empleado comúnmente en caminos rurales o secundarios con bajo volumen de carga y de intensidad baja, en donde resulta costoso el implantar un pavimento de concreto asfáltico o uno de concreto hidráulico.

Este tipo de pavimento rígido recibe la denominación de suelo cemento por que constituir una estabilización del suelo con cal o cemento; el empleo estos materiales le da al suelo características semejantes a la de una mezcla pobre de concreto hidráulico.

La mezcla del suelo con un cementante pretende fundamentalmente dotar al suelo de mayor resistencia y propiedades distintas a las del suelo solo; su elaboración resulta muy económica y fácil. En general **presenta una larga vida útil, disminuyendo costos posteriores por bacheo y reparación.**

El cemento que se le agrega a al suelo esta en proporción del 10% **del peso del mismo. El cemento le aporta a la tierra un aumento de su resistencia y una reducción de la contracción.** El espesor y la dosificación del suelo-cemento se diseñan de acuerdo con las características originales del suelo, las propiedades que se desea que adquiera, el transito y el clima a los que estará sometido.

Respecto a su procedimiento constructivo, la mezcla se hace directamente en campo, se agregan el cemento y el agua, y se realiza la compactación adecuada para consolidar la capa de suelo-cemento. Posteriormente el pavimento se protege mediante una cubierta de hojas de plástico, a manera de membrana de curado.



Figura 12. La mezcla del suelo y el cemento se puede hacer manualmente como cualquier mezcla de concreto hidráulico.

II.1.12.3.2.- PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS (CCR).

Este tipo de pavimentos debe su nombre al método empleado en su construcción, con mezclas de baja humedad, utilizando equipos tradicionales como los rodillos lisos, neumáticos o vibrocompactadores. Es una forma fácil y rápida de construir pavimentos, aunque se logran superficies con un acabado deficiente, por lo que generalmente **se emplea en vías por donde se transita a baja velocidad. REF* 7:**

El concreto para la construcción del CCR **se produce en una planta concretera de acuerdo con una minuciosa dosificación de materiales y una rigurosa supervisión en el diseño de la mezcla y en el momento de colar.**



Fotografía No. 25.

El pavimento de concreto compactado con rodillos tiene su aplicación más común en patios de maniobras.

Se aplica generalmente en pavimentos donde la circulación de vehículos se realiza a bajas velocidades (patios de maniobras, estacionamientos, calles de fraccionamientos y similares)

Una vez colocada y nivelada la mezcla, según el espesor requerido por el diseño del pavimento, se procede a compactar el concreto mediante un rodillo vibratorio, dando de dos a tres pasadas y finalmente una más, pero con un rodillo sin vibrar. Este último paso proporcionará el acabado superficial del pavimento CCR.

II.1.12.3.3.- WHITETOPPING (CONCRETO SOBRE ASFALTO)

Se llama así a la construcción de una carpeta de concreto sobre un pavimento existente de asfalto. Este procedimiento constructivo generalmente se aplica como medida de conservación para aumentar la vida útil de los pavimentos flexibles en por lo menos 20 años más, permitiéndole además soportar mayores cargas. Su construcción requiere inicialmente reparar la superficie de asfalto y cuando ya se han corregido las irregularidades en el perfil de la superficie, se procede a construir la capa superpuesta de concreto.

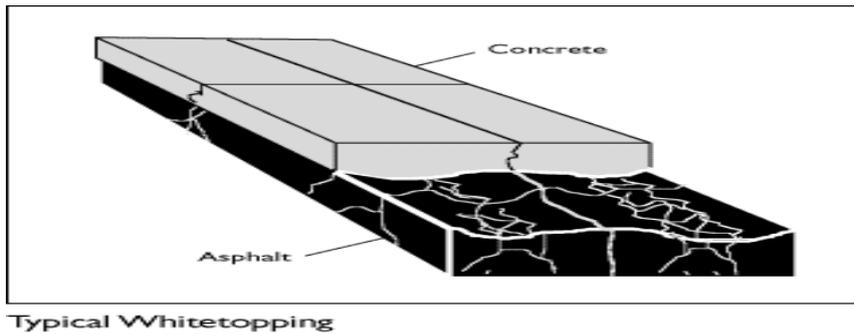


Figura 13. Configuración característica del whitetopping

Este pavimento resulta de mayor resistencia y durabilidad que un pavimento flexible, además de que el concreto mejorará las características del drenaje superficial al eliminar deformaciones inseguras (roderas y otras irregularidades típicas del pavimento de asfalto).



Fotografía No. 26. Losa de concreto y el pavimento flexible durante la construcción del whitetopping.

Este pavimento permite reducir los costos de mantenimiento; cuando se aplica en sobrecapas delgadas con espesor de concreto de 10 centímetros o menos, se llaman “Ultra thin whitetopping” y se adhieren al pavimento de asfalto para conformar una capa de desgaste que se caracteriza por tener juntas menos espaciadas.

II.1.12.3.4.- PAVIMENTOS DE CONCRETO POROSO

El concreto poroso se emplea para construir pavimentos con alto nivel de permeabilidad. En estos casos se usan bases también muy permeables y el objetivo es lograr que el pavimento sea **muy seguro por su rápida evacuación del agua** y por **mejorar el agarre de las llantas**, además **refleja mejor la luz** y absorbe el ruido generando mayor confort para los usuarios y vecinos de la vía.

II.1.12.3.5.- FAST TRACK

Es un pavimento de concreto que **gracias al empleo de aditivos y cementos de alta resistencia inicial, se puede abrir al tráfico en muy poco tiempo.** Se emplea principalmente en aeropuertos y vías importantes que no pueden permanecer cerradas por largo tiempo.

II.1.12.3.6.- PAVIMENTO DE CONCRETO ESTAMPADO

Es un pavimento común de concreto hidráulico, solo que este lleva un grabado en su superficie. Generalmente se aplica en la sustitución de pisos tradicionales que fueron construidos con piedras, adoquines o asfalto. **Se presenta modelado con diversas figuras, colores y texturas, y se aplica en vías públicas, centros comerciales, parques, condominios, escuelas, hoteles, industrias e incluso residencias.**

Aunque su construcción comúnmente emplea métodos de coloración y estampado, se asemeja bastante a la de un pavimento de concreto convencional, con la diferencia de que inmediatamente después del acabado, **se integra un colorante superficial que tiene también la función de endurecedor.** Posteriormente, **se aplica el desmoldante, que evita la adherencia entre los moldes y el concreto y sirve como membrana de curado.** La utilización del concreto en pisos **permite una variedad inmensa de colores y texturas**, así como tipos específicos según el uso para el que estén destinados.

II.1.12.4.- COMPONENTES DE UN PAVIMENTO RÍGIDO Y SUS CIMIENTOS.

La siguiente figura muestra la configuración típica de un pavimento rígido y sus cimientos.

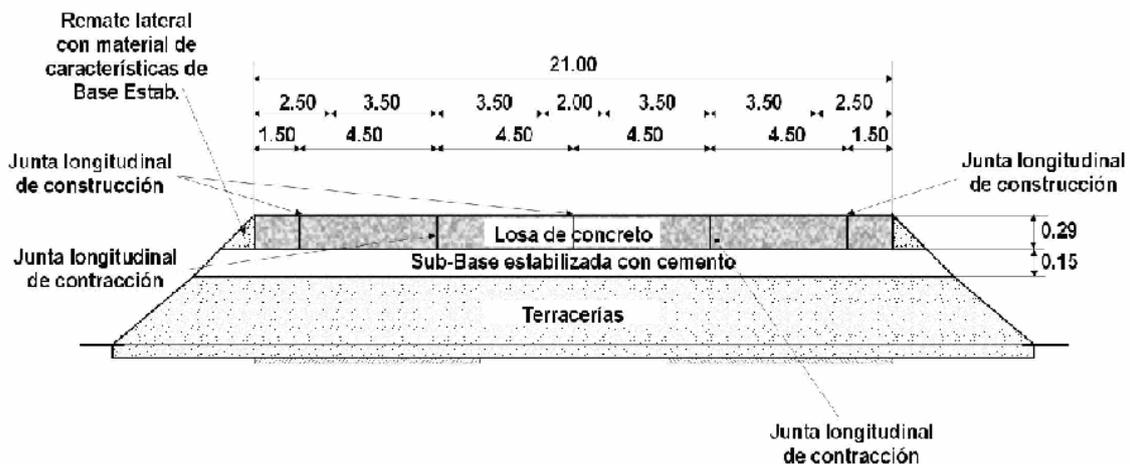


Figura 14. Sección tipo A4 de pavimento de concreto hidráulico.

La subrasante es el terreno sobre el cual se construye el pavimento y que le sirve como cimentación. Puede ser el **terreno natural acondicionado** a las especificaciones de la vía, o puede ser **terreno mejorado con compactación**, reemplazo de material o tratado con productos cementantes (suelo-cemento).

La base es la capa del pavimento situada debajo de la capa de rodamiento y encima de la sub-base (cuando esta última es necesaria) o bien sobre la subrasante. Su función resistente le confiere requerimientos de capacidad de soporte, debiendo absorber la mayor parte de los esfuerzos verticales mediante su rigidez. **Al igual que una base para pavimentos flexibles, debe resistir la deformación bajo las sollicitaciones repetidas del tráfico suelen corresponder a la intensidad del tráfico pesado.** La base **evita la socavación ocasionada por el agua (bombeo)**. En ocasiones el terreno tratado con cemento puede servir como base.

La selección del tipo de base **es una función de la economía**, pues **definir que tipo de material se usara en la base tiene una gran influencia en el espesor de la misma y por consiguiente, en el costo de la infraestructura del pavimento.**

En la construcción de la base de un pavimento rígido generalmente se emplean materiales producto de roca triturada, estabilizada con cemento, que permiten losas de concreto más delgadas y económicas que con el uso de bases granulares dispersas donde el CBR de la explanada es bajo.

Otros factores influyen en la correcta elección del material para la base, son el clima y los procedimientos constructivos. **Entre los diversos materiales que se usan para su construcción están: los materiales granulares tratados, bases de gravacemento y de concreto magro;** dichos materiales presentan en general una mayor uniformidad en sus características mecánicas.

La sub-base es la capa de firme situada sobre la explanada y debajo de la base. Esta capa puede no ser necesaria en el caso de explanadas granulares con elevada capacidad portante. Su función es proporcionar a la base un cimiento uniforme y constituir una plataforma de trabajo adecuada para su puesta en obra y posterior compactación. En muchos casos, sería deseable que cumplierse además una función drenante, en particular cuando las capas inferiores son poco permeables. En cualquier caso, suele ser una capa de transición necesaria, que se aplica sobre todo en grandes aeropuertos, carreteras y vialidades primarias

La decisión de emplear sub-base o no, depende de consideraciones de calidad y por consiguiente, del coste del material del pavimento. Una vez que los esfuerzos inducidos por el tráfico han sido atenuados por la base, podría entonces ser adecuado el uso de una sub-base de material de más baja calidad. Además, se podría obtener un ahorro en el coste, si el material de la explanada por si mismo pudiese ser mejorado por estabilización. El uso de una sub-base para pavimentos rígidos **puede ser justificado donde la explanada sea débil (teniendo un CBR menor del 5%) y donde las intensidades del tráfico o las cargas por rueda sean elevadas.**

La elección de los materiales de la sub-base está forzada por consideraciones económicas. Normalmente por consiguiente, **estos materiales son de inferior calidad a los usados en la capa de base. Los materiales adecuados** pueden ser:

- Agregados **naturales** o procedentes de trituración.
- **Gravas naturales** o machacadas.
- **Suelos seleccionados** o estabilizados con cemento.
- **Material de la explanada convenientemente estabilizado.**

En cualquier caso, los materiales mencionados deben **estar exentos de arcilla, marga u otras materias extrañas** y deben cumplir las condiciones especificadas por la obra de pavimentación y los reglamentos correspondientes de Obras de Carreteras y Puentes vigentes en la región.

Generalmente los materiales para construcción de la base y sub-base son granulares, permeables y de tamaño uniforme, cuya procedencia son bancos de **grava y arena** de la zona de desarrollo de la carretera. Sin embargo, **cuando el suelo de la región es del tipo arcilloso con pocos gruesos, puede recurrirse al proceso de estabilización con cemento y su mezcla con algunos materiales arenosos disponibles**, aunque sea en mínima proporción.

La estabilización de suelos es una aplicación típica para la construcción de un pavimento de concreto hidráulico, donde los materiales pétreos para la sub-base o base se mezclan con grava bien graduada y con cemento o cal. Las características comunes de los agregados empleados son las siguientes.

Tamaño máximo de partícula	38.1 mm (1 ½ pulg)
Porcentaje de finos que pasan la malla del No. 200	5 al 10% máximo
Límite líquido	25% máximo
Índice Plástico	6% máximo
Equivalente en arena	50% mínimo
Compactación AASHTO Modificada	100% mínimo de P.V.S.M.
Desgastes de los Ángeles V.R.S.	40% máximo 100% mínimo

Tabla 10. Características comunes de los materiales en mezcla para pavimento rígido

Respecto a cemento que puede usarse para la estabilización de los suelos arcillosos, se recomienda el cemento Portland de acuerdo con los requisitos de calidad de la Normatividad de la SCT.

En la estabilización **los materiales de la sub-base o base estabilizada, se mezclan en seco** con objeto de obtener un material uniforme. Después **se forma un camellón** que se abre **para depositar y distribuir el cemento Pórtland; posteriormente dicho camellón se cierra y se mezclan los materiales con el cemento hasta obtener una mezcla uniforme.** Para el mezclado se pueden utilizar varios equipos como las tolvas de mezclado o plantas estacionarias.

Una vez elaborada la mezcla de los materiales, esta se **extiende formando una sola capa del espesor y sección fijados en el proyecto, la cual se compacta comúnmente hasta alcanzar un grado mínimo del 100% respecto al PSVM obtenido en la prueba de control AASHTO Modificada.**

En el procedimiento de mezclado y extendido se debe suministrar la suficiente agua para hacer la mezcla trabajable, sin llegar a formar lodos. Y durante la compactación también se dan riegos de agua superficiales solo para compensar la pérdida de humedad por evaporación, propiciando con ello un adecuado curado.

II.1.12.4.4.- CAPA DE RODAMIENTO (LOSA DE CONCRETO HIDRÁULICO) DEL PAVIMENTO RIGIDO.

En un pavimento rígido la capa de rodamiento es una losa que que soporta directamente el tráfico. Como se mencionó anteriormente, se elabora **con concreto hidráulico** de cemento Pórtland; es una capa rígida y distribuye las cargas aminoradas uniformemente a la base y la subrasante.

La losa frecuentemente se construye reforzada con varillas, de acero cortas, con longitudes y diámetros definidos por el diseñador; dichas varilla pueden ser de anclaje o de transferencia de cargas; las de anclaje se usan **en juntas longitudinales y** su función es sencillamente mantener unidas las losas; las barras de transferencia se usan **en las juntas transversales** y su función es transmitir las cargas de una losa a otra.

II.1.12.4.4.1.- JUNTAS.

Son las **separaciones entre losas.** Las hay **longitudinales,** las cuales están **orientadas en el sentido de circulación** de los vehículos y las hay **transversales,** que son **perpendiculares a la circulación de los vehículos.** Se recomienda que estas juntas sean **aserradas (cortadas con disco)** y dependiendo del tráfico y del diseño, deben llevar pasadores.



Fotografía No. 27.
Conjunto de losas de concreto hidráulico que integran
la capa de rodamiento del pavimento rígido

II.1.12.4.4.2.- SELLO DE JUNTA.

Es un material que se coloca en la parte superior de la junta para garantizar que el agua no penetre a través de ella. Las características del material del sello son: elasticidad, resistencia a incrustaciones, resistencia a solventes, impermeabilidad y adherencia con el concreto. En la mayoría de los casos es necesario emplear una tirilla de respaldo para garantizar que el sello no quede más grueso de lo que sus fabricantes recomiendan y que se reduzca la cantidad del material de tal forma que se logre economía.

II.1.12.4.4.3.- BOMBEO.

Al pavimento se le integran varias obras de drenaje para evitar que el agua, producto de precipitaciones o derrames, ataque las capas granulares socavándolas. El bombeo constituye una de estas medidas para el rápido desalojo del agua de lluvia; con él se evacua dicha agua mediante el escurrimiento de la misma en la superficie de la capa de rodamiento. En general, el bombeo de un pavimento de concreto hidráulico consiste en una pendiente transversal que se le da a la capa de rodamiento para que desaoje rápidamente el agua producto de lluvia a la zona de acotamientos; esta pendiente frecuentemente se asigna en un 2 %

II.1.12.5.- MATERIALES COMPONENTES DEL CONCRETO HIDRÁULICO EN PAVIMENTACION.

El concreto hidráulico es una mezcla de cemento, agua y agregados inertes (en general grava y arena). Durante el proceso de mezclar los componentes del concreto, se introduce implícitamente un elemento más: el aire. En dicha mezcla al concreto común puede agregársele algún aditivo para mejorar algunas de sus propiedades en su estado fresco o endurecido.

La mezcla de concreto hidráulico se **trabaja en su forma “líquida-plástica”, una especie de masa plástica que es moldeable y compactable** con facilidad, que con el secado gradual al cabo de unas horas **se vuelve rígida y adquiere el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido;** es así como se convierte en el **material mecánicamente resistente** que es el concreto endurecido.

Actualmente el concreto hidráulico es un material de **uso estructural y popular para exteriores.** Las obras elaboradas con concreto adquieren **solidez y permanencia en estructuras** que sirven a nuestras necesidades diarias. En pavimentos el concreto hidráulico resulta muy eficiente y actualmente es una alternativa que complementa o sustituye el uso de concreto asfáltico.

II.1.12.5.1.- CEMENTOS

Los cementantes que se utilizan **para la fabricación de este concreto son hidráulicos**, es decir, **fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua**. No debe confundirse el término **cemento con el concepto de concreto, pues no son lo mismo; el cemento es uno de los ingredientes en la elaboración del concreto.**

Existen varios cementantes hidráulicos que se emplean en pavimentación; los las comunes son:

- Las **cales**
- **Cementos hidráulicos**
- Algunas **escorias**
- Ciertos **materiales con propiedades puzolánicas.**

Estos cementantes pueden utilizarse en forma individual o combinados. El concreto convencional que se utiliza para la capa de rodamiento se fabrica con la exclusión de las cales hidráulicas; estas generalmente se aplican en la estabilización de suelos arcillosos y arenas.

De la elección del cementante para el concreto hidráulico pueden definirse distintos comportamientos en su estado fresco y endurecido. **Las variables mas influidas por el tipo y contenido de cementante** son la cohesión y manejabilidad, la pérdida de revenimiento, el asentamiento y sangrado, el tiempo de fraguado, la adquisición de resistencia mecánica, la generación de calor endurecido, la resistencia al ataque de los sulfatos, la estabilidad dimensional (cambios volumétricos) y la estabilidad química (reacciones cemento-agregados)

II.1.12.5.1.1.- CEMENTO HIDRÁULICO.

Comercialmente y de acuerdo con la proporción de clinker y otros elementos que contenga un cemento, se fabrican **tres clases de cementos hidráulicos para la elaboración de concreto:**

- 1) Los cementos Pórtland o **Pórtland simples. Se producen moliendo solamente el clinker y el yeso sin componentes cementantes adicionales.**
- 2) Los cementos **Pórtland mezclados. Se producen moliendo el clinker y el yeso con otro cementante, ya sea este una escoria o una puzolana.**
- 3) **Los cementos expansivos.** Se obtienen añadiendo al clinker otros componentes de carácter sulfatado, cálcico y aluminoso.

Es factible incorporar aditivos durante la molienda del clinker, siendo de uso frecuente los auxiliares de molienda y los inclusores de aire.

II.1.12.5.1.2.- EL CEMENTO PÓRTLAND.

El cemento Pórtland **tiene sus primeros usos desde los inicios de 1800** y su nombre lo recibe porque el concreto ya curado es del mismo color que una piedra caliza que se obtiene cerca de **Pórtland, Inglaterra.**

En México los cementos para concreto hidráulico se elaboran a base de clinker Pórtland, en cuya elaboración se usan materiales calizos y arcillosos que aportan principalmente **cal y sílice, y accesoriamente óxido de hierro y alúmina.** Dichos **materiales se trituran, dosifican, muelen y mezclan** íntimamente hasta su completa homogeneización, **ya sea en seco o en húmedo.** Esta mezcla, en forma de **polvo o de lodo,** se introduce en hornos rotatorios que lo **calcinan a temperaturas del orden de 1400 °C,** hasta que alcanza un **estado de fusión incipiente (estado en el cual el material se aglutina en fragmentos menores a 6 cm,** cuya forma se regulariza por efecto de la rotación del horno). A este material fragmentado, resultante de la calcinación, se le denomina **clinker Pórtland.**

La clasificación oficial del cemento Pórtland, según las características físicas y químicas diferentes, es la siguiente:

Tipo	Característica	Ajuste principal
I	Sin características especiales	Sin ajustes específicos en este aspecto
II	Moderados calor de hidratación y resistencia a los sulfatos	Moderado C3A
III	Alta resistencia rápida	Alto C3S
IV	Bajo calor de hidratación	Alto C2S, moderado C3A
V	Alta resistencia a los sulfatos	Bajo C3A

En la elaboración de losas para pavimentos rígidos se recurre frecuentemente al Cemento Pórtland simple, por su fácil elaboración, disponibilidad y precio. Este cemento se clasifica como **tipo I, normal o CPO (Cemento Pórtland Ordinario),** el cual debe cumplir con lo establecido para este tipo de cemento en la norma N·CMT·2·02·001/02, Calidad del Cemento Pórtland, de la Normativa para la Infraestructura del Transporte de la Secretaría. **Eventualmente se utiliza el cemento tipo CPP (Cemento Pórtland Puzolánico) por condiciones especiales durante la obra.**

II.1.12.5.2.- AGREGADOS DEL CONCRETO HIDRÁULICO

En una mezcla de concreto hidráulico convencional, **los agregados suelen representar entre 60 y 75 % aproximadamente del volumen absoluto de todos los componentes**; esto se hace por la notable influencia que las características y propiedades de los agregados ejercen en las del correspondiente concreto, **constituyendo el esqueleto resistente** de este último.

Entre los aspectos influidos en el concreto fresco y endurecido por el agregado empleado en su elaboración se pueden mencionar la manejabilidad y la resistencia mecánica.

Los agregados del concreto hidráulico para pavimentos en México deben cumplir con especificaciones establecidas por la SCT según la norma N·CMT·2·02·002/02 (Calidad de Agregados Pétreos para Concreto Hidráulico).

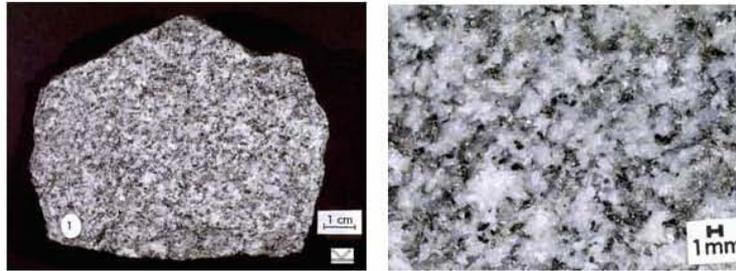
Generalmente el agregado grueso es producto de trituración y su origen puede ser diverso según la disponibilidad de bancos de materiales de la zona. Su diverso origen influye en el comportamiento del pavimento; en la mezcla para pavimentos rígidos, se pueden usar rocas ígneas, sedimentarias e incluso metamórficas.

Las rocas ígneas de uso común en estas mezclas son tanto intrusitas como extrusivas; vale la pena recordar que las rocas intrusitas son aquellas cuyo origen es el enfriamiento lento que ocurre inmediatamente debajo de la superficie terrestre.

No todas las rocas ígneas se pueden emplear como agregados para elaborar concreto hidráulico, por lo cual **se eligen aquellas con propiedades adecuadas como una alta densidad, la facilidad de trituración y las formas resultantes (granular, bacilar, compacta, cristalina, vítrea, sacaroidea) y una gran durabilidad y dureza.** Con dichas propiedades, **las rocas que comúnmente se usan para elaborar gravas y arenas en concretos hidráulicos son la diorita, el granito y la sienita.**

A continuación da una breve descripción de las características de las rocas más empleadas como agregados en la construcción de pavimentos.

GRANITO. Es una roca plutónica con cuarzo, plagioclasa y feldespatos alcalinos como componentes claros. Con el se elaboran gravas para conformar bases y para emplearlos como agregados en el concreto hidráulico.



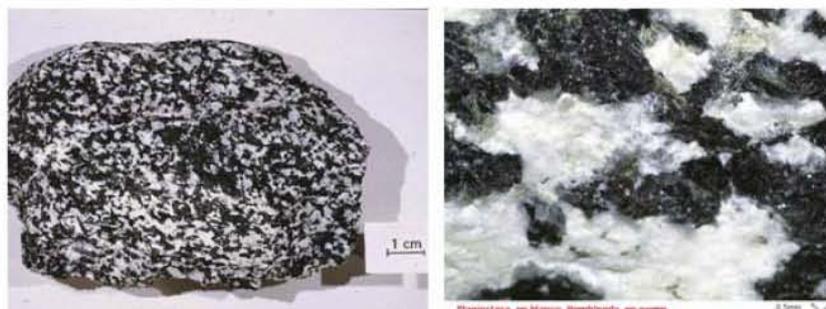
Fotografía No. 28a y 28b. GRANITO

DIORITA. La diorita aparece generalmente de color "blanco-negro" o es levemente gris - verde. Como componente clara se encuentra casi solo plagioclasa. Presenta cuarzo y los feldespatos alcalinos en no más de 5%. Los máficos más comunes son hornblenda verde, biotita y titanita. La diorita se tritura para generar gravas graduadas y para emplearlas en la elaboración de concretos.



Fotografía No. 29a y 29b. DIORITA

SIENITA. Tiene una textura equigranular, de grano mediano hasta grano grueso. Su color en general es rosado hasta gris. La componente más común es el feldespato alcalino, y hasta 35% la plagioclasa. El cuarzo no es tan predominante. Además se encuentra biotita, hornblenda y augita.



Fotografía No. 30a y 30b. SIENITA.

En la construcción de pavimentos también se recurre al empleo de rocas extrusivas, que son aquellas que se producen por el enfriamiento rápido del material que es expulsado en las erupciones volcánicas (derrames lávicos y eventos piroclásticos). Entre ellas destacan la andesita, la riolita, la dasita y el basalto, que se emplean en la elaboración de bases, sub-bases y concreto hidráulico en forma de gravas y arenas

La ANDESITA se compone principalmente de plagioclasa, hornblenda, biotita y augita. Frecuentemente muestra una textura porfídica con fenocristales de plagioclasa. La matriz es densa y microcristalina de color negro, gris, gris-verdoso, rojizo-café. Es una roca volcánica de composición similar a la diorita. Las plagioclasas son muy abundantes (>90%) y son de tipo sódico.

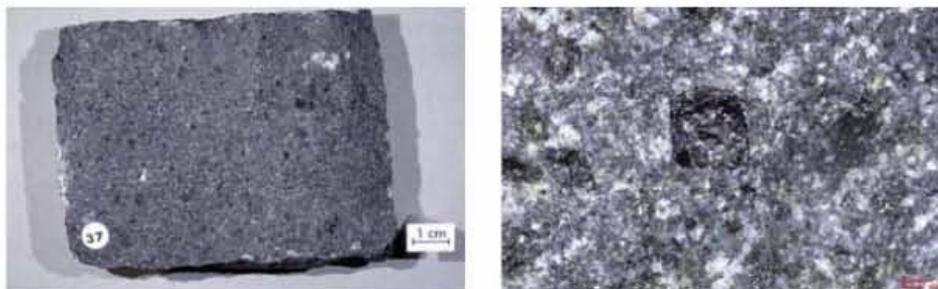


Fotografía No. 31a y 31b. ANDESITA.

El BASALTO es una roca volcánica de composición similar al gabro.



Fotografía No. 32a y 32b. Basalto con Microfenocristales de augita



Fotografía No. 33a y 33b Basalto Porfirico

La RIOLITA es una roca volcánica de composición similar al granito. El feldespato alcalino es más abundante que las plagioclasas. Al aumentar las plagioclasas se pasa a una riodacita y al disminuir el cuarzo se convierte en una traquita. Si se dan las dos circunstancias anteriores se entra en el dominio de las latitas.



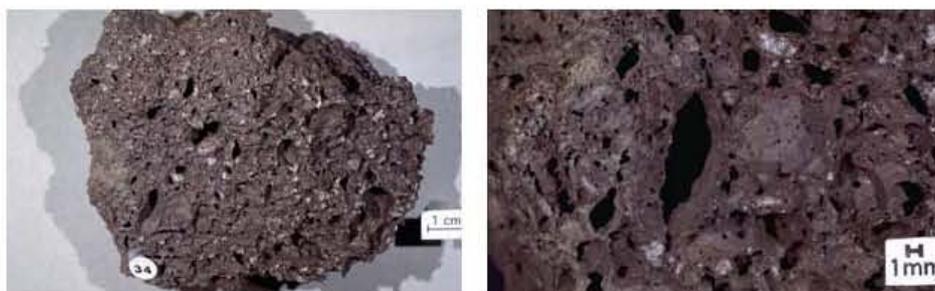
Fotografía No. 34a y 34b. RIOLITA.

La DACITA es una roca volcánica de composición similar a la tonalita. Las plagioclasas son muy abundantes (>90%).



Fotografía No. 35a y 35b. DACITA.

La TOBA es un material detrítico expulsado por las chimeneas volcánicas, transportado al aire y luego depositado en la superficie del terreno.



Fotografía No. 36a y 36b. DACITA.

En la elaboración de concreto hidráulico es común el uso de agregados de origen sedimentario, los cuales son el resultado del proceso de transporte, depósito y eventual litificación; estas rocas son las generadas sobre la corteza terrestre, como consecuencia del intemperismo y erosión de otras rocas; la erosión es generada básicamente por el agua de lluvias y escurrimientos, y en general el ambiente atmosférico. Los agregados de origen sedimentario se emplean de acuerdo a su tamaño, redondez o angularidad y grado de compactación, como **gravas, arenas, limos y arcillas**.

Las rocas que actualmente se emplean como agregados para elaborar concreto hidráulico están las areniscas, la arcosa, la grawaca, etc.

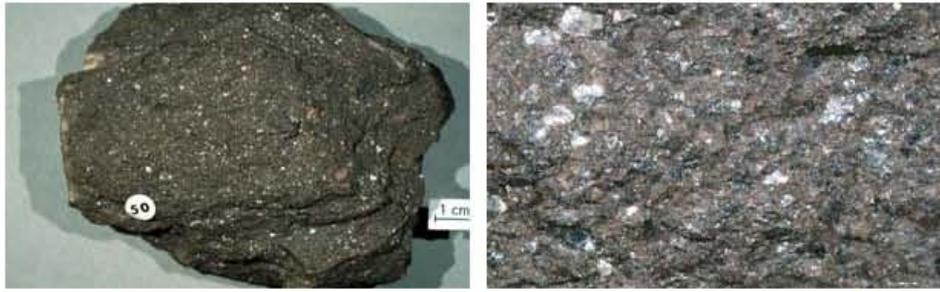
Las ARENISCAS son rocas sedimentarias constituidas por **clastos de tamaño de arena (2-0,02mm)** y una matriz que los engloba. Sus clastos son **redondos de tamaño de arena gruesa y predomina el cuarzo**. Generalmente se encuentra en **ambiente fluvial, playa y duna (eólica)**.

La **CUARZOARENITA** es una variedad de arenisca dura con **más de un 95% de cuarzo**. El ejemplar de las fotografías es una arenisca roja con clastos de cuarzo (subredondeados) en **una matriz también de cuarzo**. La superficie de los clastos está recubierta de una fina película de compuestos de hierro.



Fotografía No. 37a y 37b. CUARZOARENITA.

La ARCOSA es una arenisca con **menos del 15% de matriz, menos del 25% de cuarzo, menos del 25% de feldespatos y menos de un 75% de fragmentos rocosos**. El ejemplar muestra clastos angulosos de cuarzo, feldespatos y fragmentos de rocas (granito, cuarcita y esquistos). La matriz es limosa con cuarzo y presentes algunos granos detríticos de magnetita.



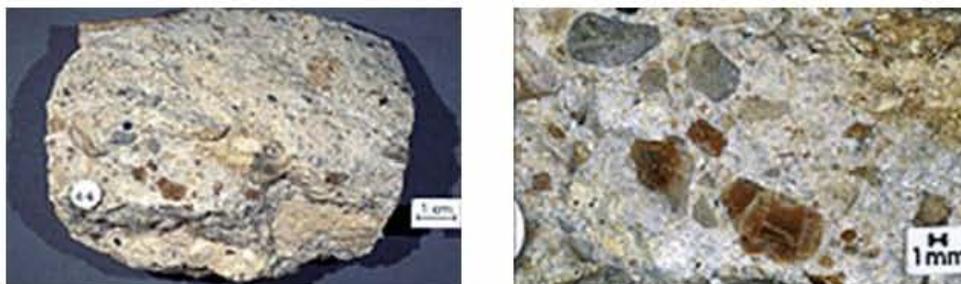
Fotografía No. 38a y 38b. ARCOSA.

La **GRAUWACA** es una arenisca con más del 15% de matriz. El ejemplar muestra clastos angulosos de cuarzo, feldespatos y pocos fragmentos de rocas (granito, cuarcita y gnesis). La **matriz** está **constituida por clorita, cuarzo, magnetita y pirita**.



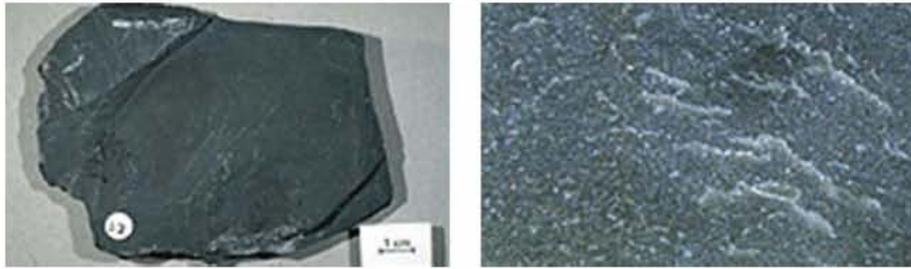
Fotografía No. 39a y 39b. GRAUWACA.

Los CONGLOMERADOS son otro tipo de roca sedimentaria que se usa en construcción de pavimentos. Dicha roca en estrato natural esta constituida **por clastos de gran tamaño (grava mayor de 2mm)** y una matriz (o cemento) que los engloba. **Generalmente se encuentra en ambientes de río y costa oceánica**



Fotografía No. 40a y 40b. CONGLOMERADOS.

Las ARCILLITAS son rocas sedimentarias constituidas por un tamaño de partícula correspondiente a la arcilla (<2micras).



Fotografía No. 41a y 41b. ARCILLITAS.

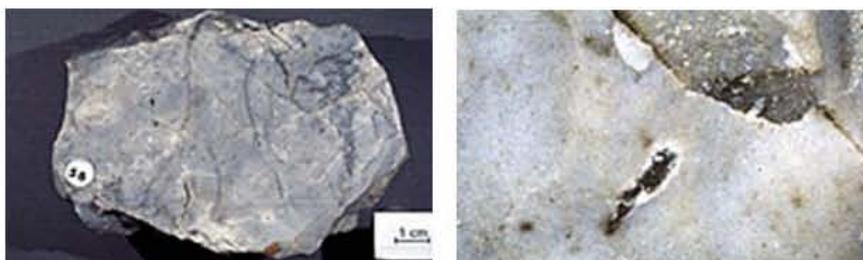
Otro tipo de roca sedimentaria usada en la construcción de pavimentos rígidos es la denominada “roca de sedimentación química”, también llamada roca de precipitación, que se forma por precipitación de los productos disueltos de la erosión. Dichos productos disueltos son los que no se captan para la formación de nuevos **minerales**, y son transportados por ríos hacia los lagos o hacia el mar. La precipitación puede producirse por la influencia de seres vivos. Se constituyen básicamente de carbonatos de calcita (caliza), aragonita y dolomita (dolomía)

Las CALIZAS son rocas sedimentarias de carbonato cálcico (calcita), generalmente de origen químico. **Con frecuencia contienen restos de fósiles y a veces con oolitos.** En función del tamaño de los cristales se define la esparita (mayor de 5 micras) y micrita (menor de 5 micras).



Fotografía No. 42a y 42b. CALIZAS.

Las rocas CALCEDÓNICAS (silex) son rocas silíceas sedimentarias constituidas por calcedonia (silex).



Fotografía No. 43a y 43b. SILEX.

Otras rocas sedimentarias que pueden emplearse para la elaboración de concreto hidráulico son las que se presentan en la siguiente tabla, donde además se define su origen de fragmentación por efecto del distinto modo de actuar de las fuerzas y eventos de la naturaleza.

ORIGEN DE LA FRAGMENTACIÓN Y PRODUCTOS GENERADO POR LA DESINTEGRACIÓN DE LA ROCA	
ORIGEN DE LA FRAGMENTACIÓN	PRODUCTO RESULTANTE
Acción erosiva de las aguas pluviales, combinada con la erosión hidráulica y mecánica producida por el acarreo de fragmentos a lo largo del curso de las corrientes de agua superficiales.	Aluviones: cantos rodados, gravas arenas, limos y arcillas en depósitos fluviales y lacustres.
Acción expansiva del agua al congelarse, combinada con la erosión mecánica producida por el arrastre de fragmentos por medio de la nieve y el hielo en el cauce de los glaciares	Morrenas: bloques, cantos rodados gravas, arenas, limos y arcillas depósitos glaciales.
Acción erosiva del agua de mar, combinada con la erosión mecánica producida por el arrastre y acarreo de fragmentos por medio del oleaje, las mareas y las corrientes marinas.	Depósitos marinos: gravas, arenas limos y arcillas, depositados a lo largo de las costas, formando playas.
Acción desintegrante debida al diastrofismo y al intemperismo, combinada con la erosión mecánica producida por el transporte de fragmentos por medio del viento.	Depósitos eólicos: arenas finas, limos y arcillas, que se depositan y acumulan formando dunas.
Fragmentación de la masa de roca fundida (magma) por efecto de las fuerzas que se generan en las erupciones volcánicas.	Depósitos piroclásticos: grandes fragmentos, bombas y bloques, cenizas volcánicas, que se depositan en las zonas de influencia de los volcanes, de acuerdo con la magnitud de las erupciones.
Tabla No 11. Fuente: REF*21. Informe de laboratorio concreto, madera y bloques.	

En México los depósitos fluviales y lacustres constituyen la fuente más común de agregados naturales, excepto en las regiones donde no existen corrientes superficiales, como ocurre en la Península de Yucatán y en las zonas desérticas y semidesérticas del norte y noroeste de la República. Estos agregados resultan especialmente útiles para la construcción de obras que los tienen disponibles a distancias razonables. Sus características granulométricas y de limpieza varían de un depósito a otro, e incluso dentro de un mismo depósito, mediante una acertada selección y un procesamiento adecuado, casi siempre es posible ponerlos en condiciones apropiadas para su utilización en el concreto.

II.1.12.5.2.3.- ALGUNAS PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS A CONSIDERAR PARA LA ELABORACIÓN DE CONCRETO HIDRAULICO.

En general el agregado constituye el mayor porcentaje de constitución del concreto hidráulico, por ello de sus características depende el comportamiento de la mezcla en estado fresco y endurecido. La siguiente relación muestra alguna de las propiedades del concreto hidráulico del pavimento que dependen fundamentalmente de las características del agregado empleado.

CARACTERISTICAS DE LOS AGREGADOS.	CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO INFLUENCIADAS POR LAS PROPIAS DEL AGREGADO
Granulometría	Economía
Limpieza	Durabilidad
Densidad	Manejabilidad
Sanidad	Peso unitario
Absorción	Resistencia mecánica
Porosidad	Módulo de elasticidad
Forma de partículas	Cambios volumétricos
Textura superficial	Permeabilidad
Tamaño máximo	Resistencia al desgaste
Reactividad con los Alcalis	Requerimiento de agua
Módulo de elasticidad	Sangrado
Resistencia a la abrasión	Contracción plástica
Resistencia mecánica	Pérdida de revenimiento
Partículas friables y terrones de arcilla	
Coeficiente de expansión térmica	

Tabla 12. Características del concreto influenciadas por las propias del agregado

La norma que en México especifica la calidad del material pétreo empleado en elaboración de concreto hidráulico para pavimentación es N·CMT·2·02·002/02 (Calidad de Agregados Pétreos para Concreto Hidráulico de la Normativa para la Infraestructura SCT).

A continuación se describe brevemente algunas de las características del agregado que deben considerarse para prever el comportamiento del concreto. En base a la norma mencionada en el párrafo anterior y según los conceptos revisados para la investigación de esta tesis, se describen a continuación de forma breve las características que debe presentar preferentemente el agregado para el concreto hidráulico de pavimentos.

CALIDAD FÍSICA. La calidad física del agregado es la aptitud estructural del mismo para soportar las cargas; en general esta determinada por las características de las rocas de origen y los aspectos externos de sus fragmentos. **Entre dichas características físicas que contribuyen a definir la calidad intrínseca de las rocas destacan su peso específico, sanidad, porosidad y absorción, resistencia mecánica, resistencia a la abrasión, módulo de elasticidad y propiedades térmicas.**

Peso específico. Este se puede definir como un parámetro para identificar la calidad del concreto. Su valor sirve para relacionarlo con el comportamiento resultante de la mezcla en estado fresco y en su estado endurecido. Con el peso específico también se mide **la solidez del material con que se elabora el concreto y se relaciona con la formación de un esqueleto resistente a las cargas con el concreto endurecido.**

El peso volumétrico del concreto común **es variable de acuerdo con la densidad de los agregados y puede estimarse entre 2200 y 2550 Kg/m³**, como promedio, lo cual lo coloca entre los materiales de construcción pesados en relación con la intensidad de carga que soporta, especialmente cuando trabaja a flexión.

Los agregados de peso normal son los que proceden de la desintegración, por causas naturales o medios artificiales, de rocas con peso específico entre 2.4 y 2.8, aproximadamente. Cuando se utilizan en elaboración de concretos, estos en estado fresco, presentan pesos volumétricos entre 2200 y 2550 kg./m³.

POROSIDAD. El peso específico a su vez se ve influido por la porosidad y la absorción del agregado empleado. La porosidad del agregado es la relación de su volumen de vacíos entre su volumen total, incluyendo los vacíos, y se expresa como porcentaje en volumen. Todas las rocas que constituyen los agregados de peso normal son porosas en mayor o menor grado, pero algunas poseen un sistema de poros que incluye numerosos vacíos relativamente grandes (visibles al microscopio), que en su mayoría se hallan interconectados, y que las hace permeables, y en la mezcla de concreto genera una demanda adicional de agua, pudiendo retardar o evitar la hidratación de los demás componentes.

SANIDAD DEL AGREGADO. Especialmente en agregados, la sanidad se define como su aptitud para soportar la acción agresiva a que se exponga el concreto que los contiene, especialmente al intemperismo. Dicha propiedad funciona como un índice del desempeño predecible en el concreto, ya que es la condición de un sólido que se halla libre de grietas, defectos y fisuras; por lo anteriormente dicho, existe una estrecha relación entre la sanidad de los agregados y la durabilidad del concreto ante las sollicitaciones en un pavimento.

RESISTENCIA MECÁNICA DEL AGREGADO. Otra de las propiedades más importante del agregado para elaborar concreto hidráulico es su resistencia mecánica. En el concreto las partículas de los agregados permanecen dispersas en la pasta de cemento y de este modo no se produce cabal contacto permanente entre ellas. En general, la resistencia mecánica del concreto endurecido a compresión depende más de la resistencia de la pasta de cemento y de su adherencia con los agregados, que de la resistencia propia de los agregados solos. Sin embargo, cuando se trata del concreto de muy alta resistencia, con valores superiores a los 500 kg./cm², o del concreto compactado con rodillo (CCR) en que si se produce contacto entre las partículas de los agregados, la resistencia mecánica de éstos adquiere mayor influencia en la del concreto.

RESISTENCIA DEL AGREGADO A LA ABRASIÓN. En pavimentos resulta de especial interés la resistencia del agregado a la abrasión, la cual es una de las principales sollicitaciones a la que debe responder la capa de rodamiento. La resistencia de los agregados a sufrir desgaste, rotura o desintegración de partículas por efecto de la abrasión, suele considerarse como un índice de su calidad en pavimentos, y en particular de su capacidad para producir concretos durables en condiciones de servicio de estas estructuras donde intervienen acciones de carácter abrasivo. Es un buen parámetro para verificar la aptitud para soportar sin daño las acciones de abrasión que frecuentemente recibe en especial un agregado grueso en un pavimento.

CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DEL AGREGADO. Estas limitan la extensión de las losas de concreto hidráulico en pavimentos rígidos, pues de ellas depende la expansión y contracción volumétrica durante el transcurso del día. La propiedad térmica más relevante en estructuras sujetas a cambios significativos de temperatura es **el coeficiente de expansión térmica lineal**, que se define como el cambio de dimensión por unidad de longitud, que ocurre por cada grado de variación en la temperatura, y que se expresa de ordinario en millonésima/°C.

TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO. Respecto al tamaño máximo de los agregados, se puede mencionar que es una propiedad que se debe controlar para determinar la manejabilidad de la mezcla, el espesor que se pueda lograr y la resistencia del concreto endurecido. Un concreto convencional se elabora con mezclas de consistencia plástica, cuyo tamaño de partículas se define razonablemente uniforme, para que las características y propiedades del concreto resulten dentro de un marco de variación predecible por la experiencia.

La adecuada uniformidad en la granulometría de los agregados se controla por fracciones que se dosifican individualmente, optando por la mejor proporción técnica, económica y prácticamente factible.

En lo correspondiente a la limpieza del agregado, se debe procurar que, tanto las gravas o las arenas empleadas en la elaboración del concreto hidráulico, estén libre de contaminantes, los cuales son materiales cuya presencia es inconveniente por los efectos adversos que producen en el concreto. Entre dichos materiales contaminantes, **los más comunes son los finos indeseables (limo y arcilla), la materia orgánica, el carbón y el lignito, las partículas ligeras y los terrones de arcilla y otras partículas desmenuzables.** En la práctica siempre es necesario tolerarlas en proporciones suficientemente reducidas para que sus efectos nocivos resulten poco significativos.

El **limo es el material granular fino** cuyas partículas tienen tamaños normalmente comprendidos **entre 2 y 60 micras aproximadamente**, en tanto que la **arcilla** corresponde al material más fino, integrado por **partículas que son menores de 2 micras y que sí posee propiedades plásticas.**

La **materia orgánica** suele hallarse principalmente en **forma de humus**, fragmentos de **raíces y plantas, y trozos de madera.** Generalmente estos materiales aparecen en la arena, e **interfieren en el proceso normal de hidratación del cemento, afectando la resistencia y durabilidad del concreto.**

Otras partículas inconvenientes de las que debe librarse el agregado del concreto hidráulico son aquellas de formación suave y desmenuzable, como los terrones de arcilla y los fragmentos de rocas alteradas, las partículas ligeras como las de carbón y lignito y las de rocas muy porosas y débiles.

Respecto a la contaminación de agregado por sales inorgánicas, es conveniente limpiar el agregado de los sulfatos y los cloruros que contaminan los agregados de origen natural de procedencia marina. Estas sales en el concreto modifican su comportamiento haciéndolo susceptible a agrietamientos durante el fraguado o bien cuando el concreto seco se vuelve a humedecer.

Además de la conveniencia de describir las propiedades y características deseables de los agregados para concreto hidráulico, ahora resulta de interés la forma en que estos pueden emplearse en la construcción de pavimentos, ya sea en forma de gravas y arenas o bien referidos como agregados gruesos y agregados finos.

II.1.12.5.2.4.1.- AGREGADO FINO

En general el agregado pétreo de una mezcla para concreto hidráulico se puede emplear en grado fino o grueso; la composición granulométrica de la arena se acostumbra analizar mediante su separación fracciones, cribándola a través de mallas normalizadas cuya medida mínima es igual a 0.150 mm. De esta manera, para asegurar una razonable continuidad en la granulometría de la arena, las especificaciones de agregados para concreto requieren que en cada fracción exista una proporción de partículas comprendida dentro de ciertos límites establecidos empíricamente. Para concreto hidráulico la arena de diámetro de grano = 2 - 0,02 mm puede ser producto de la arenisca transportada por vientos fuertes o por corrientes moderados como aquellos de ríos. La arena en cuestión permite obtener concreto de las características y propiedades requeridas a costo razonable.

II.1.12.5.2.4.2.- AGREGADO GRUESO

En la elaboración de mezclas de concreto hidráulico para pavimentos es deseable que el agregado grueso posea **continuidad de tamaños en su composición granulométrica**, por sus efectos sobre la manejabilidad del concreto fresco, aunque estos no son tan notables como los que produce la arena.

Para analizar la composición granulométrica de la grava en conjunto, **se le criba por mallas cuyas aberturas se seleccionan de acuerdo con el intervalo dimensional dado por su tamaño máximo**, buscando dividir este intervalo en suficientes fracciones que permitan juzgar su

distribución de tamaño a fin de compararla con los límites granulométricos que le sean aplicables.

Para la utilización de la grava en la elaboración del concreto, se acostumbra subdividirla en fracciones que se manejan y dosifican individualmente en proporciones adecuadas para integrar la curva granulométrica requerida en la grava total. En pavimentación frecuentemente se recurre al uso de **grava procedente de ríos fluyentes con alta velocidad en las montañas o las altas orillas en una playa rocosa.**

Respecto al tamaño del agregado para concreto hidráulico, generalmente se especifica bajo cierto límite para evitar problemas de elaboración manejo y colocación de la mezcla en estado fresco.

Hasta ahora se ha descrito las cualidades deseadas del cemento y del agregado para concreto hidráulico; pero no debe olvidarse que la mezcla y su comportamiento en estado fresco y endurecido también depende de otro elemento importante como o lo es el agua, que en general debe presentar las propiedades que a continuación se describen.

II.1.12.5.3.- AGUA PARA CONCRETO

El agua en el concreto hidráulico sirve como **ingrediente** en su elaboración y como **medio de curado** de las estructuras recién construidas. En ambas aplicaciones las características del agua tienen efectos de diferente importancia sobre el concreto y se sugiere que ambas aplicaciones tengan la misma fuente de origen de agua, admitiendo en algunos casos solo la variación de su temperatura.

Básicamente la función del agua consiste en hidratar la mezcla propiciando que las partículas sólidas reaccionen químicamente y con ello se generen las condiciones adecuadas para el endurecimiento del concreto y para maximizar su durabilidad.

Generalmente el agua en un concreto convencional el agua **suele representar entre 10 y 25 por ciento del volumen del concreto recién mezclado.** Dicha agua de mezclado debe estar **libre de cualquier sustancia dañina**, debiéndose garantizar que sea **potable con una previa verificación**; pues hay ocasiones en que esta se aplican aguas que aunque son **potables, poseen citratos o con pequeñas cantidades de azúcares**, que pueden hacerlas inadecuadas para la fabricación de concreto.

Respecto a los requisitos de calidad del agua de mezclado para concreto, estos no tienen ninguna relación obligada con el aspecto bacteriológico (como es el caso de las aguas potables), sino que **básicamente se refieren a sus características físico-químicas y sus efectos en el comportamiento y las propiedades del concreto. En**

México el empleo de agua para la elaboración del concreto de pavimentación se sujeta a lo establecido en la norma N·CMT·2·02·003/02, Calidad del Agua para Concreto Hidráulico de la Normativa para la Infraestructura del Transporte de la Secretaría,; pero en general no se tiene un consenso definitivo en las limitaciones a las substancias e impurezas frecuentes, como sales inorgánicas (cloruros, sulfatos), sólidos en suspensión, materia orgánica, dióxido de carbono disuelto, etc. Sin embargo, si la hay en la no tolerancia de substancias que son completamente dañinas, como grasas, aceites, azúcares y ácidos.

En la práctica de la elaboración de concreto hidráulico, se procura que el agua de mezclado o de curado para concreto sea clara y no presente sabor dulce, amargo o salobre. Si el agua no procede de una fuente de suministro de agua potable, se puede juzgar su aptitud como agua para concreto mediante los requisitos físico-químicos contenidos en la Norma Oficial Mexicana NOM C-122(46), recomendados especialmente para aguas que no son potables.

Los efectos del agua de mezclado de calidad inadecuada **pueden producir en el concreto modificaciones del tiempo de fraguado y las resistencias iniciales, alteraciones de la resistencia posterior (a 28 días o más) y la corrosión del acero de refuerzo.** La prevención de estos efectos se debe realizar con el **análisis químico del agua antes de emplearla**, verificando que **no contenga cantidades excedidas de sulfatos, álcalis, cloruros y dióxido de carbono disuelto**, principalmente.

En general durante la construcción de pavimentos se solicita la mezcla de concreto ya elaborada; sin embargo, cuando se procede con la elaboraciones el sitio, debe observarse con detenimiento la calidad de las fuentes de suministro de agua para elaborar el concreto; ya sean estas fuentes pozos, manantiales corrientes superficiales (arroyos y ríos), almacenamientos naturales (lagos o lagunas) y almacenamientos creados artificialmente (vasos de presas), debe verificarse invariablemente su calidad antes de emplearla.

II.1.12.5.4.- ADITIVOS PARA CONCRETO HIDRÁULICO EN LOSAS DE PAVIMENTOS.

Dado que los **componentes básicos del concreto** hidráulico son el **cemento, el agua, el aire y los agregados, cualquier otro ingrediente que se incluya en su elaboración puede ser considerado**, literalmente hablando, como **un aditivo**.

Según el Comité ACI 116, **un aditivo es un material distinto del agua, los agregados, el cemento hidráulico y las fibras de refuerzo, que se utiliza como ingrediente del mortero o del concreto, y que se añade a la revoltura inmediatamente antes o durante el mezclado.**

Complementando la definición anterior, cabe añadir que **los aditivos para concreto se utilizan con el propósito de modificar favorablemente el comportamiento del concreto** en estado fresco, y/o inducir o mejorar determinadas propiedades deseables en el concreto endurecido.

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

Algunos de estos factores son relativos a la composición del concreto y a las prácticas constructivas, siendo **susceptibles de ajuste y adaptación**, en tanto los que corresponden al medio ambiente y a las condiciones de exposición y servicio, por lo general son **factores fuera del control del usuario**.

Entonces, para mejorar el comportamiento y las propiedades del concreto se dispone de dos recursos:

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

El uso de aditivos generalmente se reserva para cuando no se pueden lograr los efectos requeridos con las condiciones de elaboración de un concreto normal. Es decir, **su uso es como complemento y no como un sustituto de otras medidas primordiales, tales como el uso de un cemento apropiado, una mezcla de concreto bien diseñada, o prácticas constructivas satisfactorias**.

Los aditivos, los agentes inclusores de aire y los líquidos y materiales laminares para el curado en México se rigen por lo indicado en el 4.01.02.004 de las Normas de Calidad de los Materiales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

II.1.12.6.- CONCRETO FRESCO EN PAVIMENTACIÓN

El concreto convencional en **estado fresco** es un **conjunto de fragmentos de roca (definidos como agregados) dispersos en una matriz viscosa constituida por una pasta de cemento de consistencia plástica**, esta matriz plástica permite **muy poco o ningún contacto entre las partículas de los agregados**, característica que tiende a permanecer en el concreto ya endurecido.

Una mezcla en estado fresco debe ser fácil de trabajar (transportar, vaciarse, compactarse), y debe ofrecer las propiedades planeadas de acabado y tiempo de secado, y resistencia requerida por el pavimento.

II.1.12.6.1.- FRAGUADO DEL CONCRETO

Cuando el cemento y el agua entran en contacto se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la muestra. Dentro de este proceso general de endurecimiento se presenta un estado en el que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad, volviéndose difícil de manejar, tal estado corresponde al **fraguado inicial**. El fraguado **debe permitir el mezclado, transporte y colocación en las condiciones del trabajo en obra.**

Al continuar el proceso de fraguado gradual de la mezcla, se presenta un estado en el que la consistencia mencionada alcanza un estado apreciable endurecimiento; es entonces cuando sucede el fraguado final.

En general el tiempo de fraguado de una mezcla de concreto hidráulico es el lapso necesario para que pase de un estado fluido a un estado sólido. El fraguado inicial ocurre dentro de los primeros 45 minutos, y el tiempo de fraguado final se estima en aproximadamente 10 hrs. en un concreto normal.

En obras de pavimentación se procura tener disponible la vía de tránsito en el menor tiempo posible, para lo cual el fraguado del concreto **se puede acelerar con cementos que contengan hidróxido de calcio, hidróxido sódico, carbonato sódico, etc.**

II.1.12.6.2.- LA TRABAJABILIDAD DEL CONCRETO FRESCO

La trabajabilidad es una medición de qué tan fácil resulta colocar, manejar y compactar el concreto. Este parámetro se juzga con base en la medida del revenimiento. La muestra y la prueba deben realizarse de acuerdo con la norma NMX C-156 "Determinación del revenimiento del concreto fresco.

II.1.12.6.2.3- PESO UNITARIO DEL CONCRETO FRESCO

Cuando se requiera conocer el peso unitario del concreto por razones de algún convenio, éste debe ser medido de acuerdo con la norma NMX C-162 "Determinación del peso unitario, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico". El volumen del concreto representado por la muestra debe ser considerado como satisfactorio si el cálculo arrojado, realizado con el valor del peso unitario determinado, brinda un valor con una aproximación del $\pm 2\%$.

II.1.12.6.2.4- TEMPERATURA DEL CONCRETO FRESCO

Como parámetro para control de calidad para una mezcla de concreto fresco se puede especificar la temperatura dentro de ciertos límites y debe ser medida a través de una muestra representativa obtenida de acuerdo con la norma NMX C-161 "Muestreo del concreto fresco". Este requisito por parte del productor podrá establecerse mediante previo convenio especial.

La determinación de la temperatura del concreto en estado fresco se realiza cuando las condiciones ambientales y de exposición de los acopios de los agregados hacen suponer casos extremos, alta o baja temperatura. **Para temperaturas del concreto superiores a los 30°C, se manifiesta una aceleración de los procesos de fraguado. Además, aumentan los riesgos de fisuración plástica del concreto (sobre todo si hay baja humedad relativa y viento),** y se deben extremar las precauciones en el curado temprano. En general, no se debería proseguir la colocación del concreto si la temperatura del mismo superase los 35°C. **La alta temperatura también provoca una disminución del asentamiento (la mezcla es más seca), y favorece la evaporación de agua de la mezcla. Esto lleva, en general, a la adición ulterior de agua, lo que debe evitarse.**

II.1.12.6.2.5- CONTENIDO DE AIRE EN MEZCLAS FRESCAS

La determinación del contenido de aire en mezclas frescas **es indispensable cuando se emplean aditivos incorporadores por razones de durabilidad (congelamiento y deshielo).** Aunque el control periódico del peso de la unidad de volumen sirve para detectar variaciones en el contenido de aire **(el P.U.V. aumenta cuando disminuye el porcentaje de aire),** generalmente se controla uno de cada tres camiones por otro método, para obtener datos cuantitativos.

II.1.12.7. - CONCRETO ENDURECIDO.

El comportamiento mecánico del concreto endurecido y su durabilidad son los parámetros fundamentales que determinan la calidad del concreto para pavimentación; dichas propiedades dependen básicamente de:

1.- Las características, composición y propiedades de la pasta de cemento, o matriz cementante, **endurecida**.

2.- La selección de un cementante apropiado y el uso de una **relación agua/cemento conveniente**. Además de la posibilidad de emplear un **aditivo**, para asegurar la calidad de la pasta cementante.

3.- La calidad propia de los agregados. Las propiedades mecánicas de la estructura que se construye de concreto dependen de las propiedades mecánicas de sus componentes, por lo cual los agregados que constituyen cerca del 75 % de una mezcla de concreto, no deben representar un punto débil en el comportamiento del concreto y en su capacidad para resistir adecuadamente y por largo tiempo los efectos consecuentes de las condiciones de exposición y servicio a que esté sometido.

4.- La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto. Esto depende de factores como las características físicas y químicas del cementante, la composición mineralógica y petrográfica de las rocas que constituyen los agregados, y la forma, tamaño máximo y textura superficial de éstos.

En general, la elaboración de concreto deseado requiere que este desarrolle su capacidad como material de construcción para responder adecuadamente a las acciones resultantes de las condiciones en que debe prestar servicio. De la elección adecuada de los ingredientes, así como del proceso de mezcla, vaciado, curado y mantenimiento, dependen las propiedades resistentes (cargas de servicio e intemperismo) y la apariencia del concreto endurecido (condiciones de deformación).

II.1.12.7.1. - ENDURECIMIENTO DEL CONCRETO.

El endurecimiento del concreto se generaliza con el propio de la pasta formada por el cemento y el agua, entre los cuales **se desarrolla una reacción química que produce una especie de gel** a medida que se hidratan los componentes del cemento. La reacción de hidratación del cemento es **lenta y con la evaporación del agua de este proceso se produce el efecto de pérdida de resistencia, por ello debe mantenerse húmedo el concreto recién colado, curándolo cuando menos 14 días cuando se utilizo cemento tipo I y 7 días cuando se utilice cemento tipo III**. La evaporación del agua se evita

también cubriendo el concreto recién colado inmediatamente después de descimbrado; se usa una película de parafina o bien otros productos comerciales de igual finalidad.

El profesor Duff Abrams del instituto Lewis de Chicago, expreso la ley de endurecimiento del concreto por medio de una formula que ligaba el volumen de agua de hidratación con el volumen de cemento empleado. Considerando que el volumen de cemento varia notablemente con la compactación, se ha preferido expresar la ley de Abrams en función de la relación agua-cemento en peso.

La mención de la Ley de Abrams es: “Para mezclas plásticas y usando agregados sanos y limpios, la resistencia y otras cualidades importantes del concreto, dependen de la cantidad de agua que se use en la mezcla, por saco de cemento empleado”. **Analíticamente. La ley de Abrams para cementos tipo I es:**

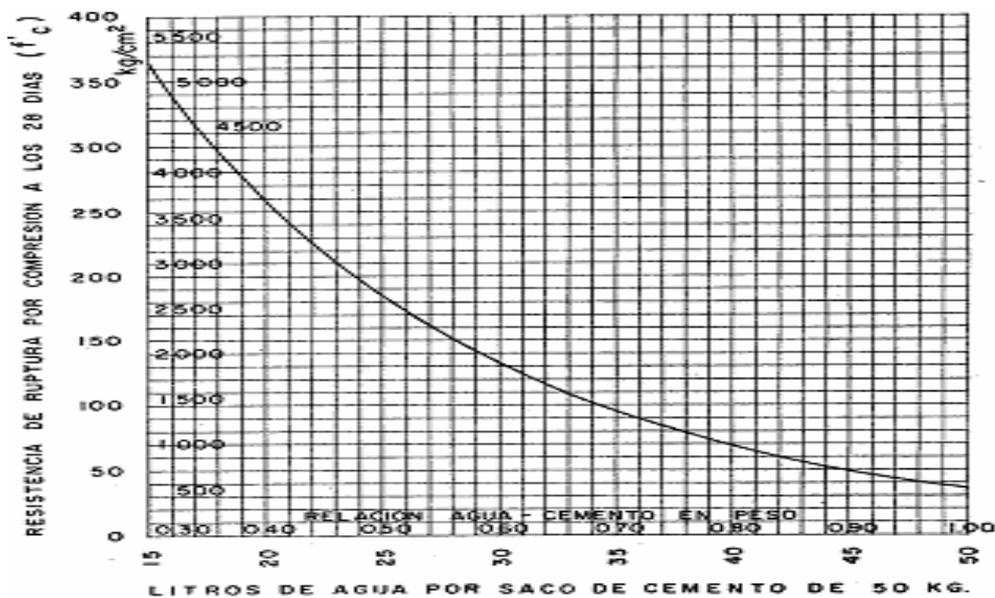
$$f`c = \frac{985}{27^x}$$

En la cual:

$f`c$ = resistencia a la compresión a los 28 días de una probeta de 15cm de diámetro por 30cm de altura.

X: es la relación de agua-cemento en peso.

Tabulando esta función y realizando la gráfica correspondiente, se obtiene la siguiente figura.



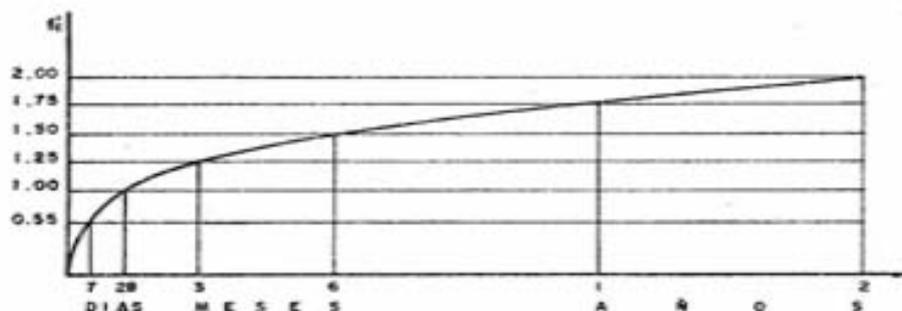
Gráfica No. 6. Ley de Abrams
Fuente: REF*18

El conocimiento del comportamiento del concreto hidráulico es muy amplio en la actualidad y de acuerdo al mismo se sabe que su endurecimiento le proporciona mayor resistencia conforme avanza el tiempo de haber sido elaborado. La combinación del cemento con el agua de la mezcla logra hidratar a los 30 días en las mejores condiciones del laboratorio, sólo un poco más del 80% del cemento empleado. En el transcurso del tiempo, el cemento continúa su proceso de hidratación tomando el agua necesaria del ambiente atmosférico, formando su propio endurecimiento y adquiriendo valores más elevados de la fatiga de ruptura.

Los concretos fabricados con cemento de Alta Resistencia Rápida, alcanzan a los 7 días la resistencia correspondiente a los 28 días del cemento Tipo I, pero a los dos años ambas resistencias son prácticamente iguales. El empleo de cemento aluminoso se caracteriza por su rápido endurecimiento y su elevada resistencia a las 24 horas. Esto hace que su empleo nos economice madera y tiempo de entrega de las obras.

La gráfica siguiente se ha formado con valores medios obtenidos de la ruptura a la compresión de cilindros de 15 cm. de diámetro por 30 cm. de altura, fabricados y curados de acuerdo con la especificación A.S.T.M. C-192-49.

Cuando se efectúa la ruptura del cilindro a los 28 días de colado, la fatiga correspondiente a esa ruptura se representa por f_c y constituye el valor base al cual se refieren las especificaciones.



Gráfica No. 7. **Endurecimiento del concreto con la edad.**
Fuente: REF*18.

Este endurecimiento del concreto con la edad se mide con la prueba de compresión. La resistencia a compresión es una medida de la capacidad del concreto para resistir cargas que tienden a aplastarlo; en pavimentación la sollicitación más importante la constituyen el cortante en el concreto y la tensión de la fibra mas inferior de la capa de rodamiento.

La prueba de compresión se hace en un laboratorio; la única actividad en obra es hacer un cilindro de concreto para la prueba de compresión.

En esta prueba la resistencia se mide en Kg./cm² o en megapascales (MPa) y comúnmente se especifica como una resistencia característica del concreto medido a los 28 días después del mezclado.

Además de las características fundamentales de los materiales que se emplean en la elaboración del concreto hidráulico, ahora conviene hacer énfasis en el proceso constructivo para pavimentos rígidos.

II.1.12.9.- CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO

La construcción de pavimentos rígidos sigue especificaciones similares a las empleadas para pavimentos flexibles, dado que su función en general es la misma. Sin embargo, el proceso de construcción de ambos es diferente y continuación se hará notar con la descripción de lo correspondiente a pavimentos rígidos.

En pavimentos rígidos **se puede o no usar refuerzo de acuerdo a las solicitudes a las que sea sometido**; en ambos casos deben observarse cuidadosamente algunos requisitos técnicos que permitirán lograr una estructura óptima en función de las necesidades particulares. En general la construcción de pavimentos se aplica con el siguiente procedimiento:

1. PREPARACIÓN DEL TERRENO NATURAL, SUBRASANTE, BASE Y SUB-BASE.

Primeramente el terreno natural se despeja de obstáculos para la maniobra de los equipos de movimientos de tierras, debiendo eliminar la cobertura vegetal y el material necesario hasta alcanzar la cota de proyecto. Después se procede con la conformación de terracerías, cuyo control de calidad se recomienda sea asesorado por un laboratorio calificado en la materia, mediante la aplicación de revisiones periódicas de la superficie con los estándares de supervisión, referentes al valor relativo de soporte (VRS) y al espesor y grado de compactación de los suelos. En general, la preparación del terreno de apoyo de un pavimento rígido básicamente es un proceso semejante al aplicado en pavimentación con concreto asfáltico y consiste en las siguientes etapas:

* **Tras el uniformado del terreno** en zonas donde se tengan cambios bruscos en sentido horizontal del tipo de suelo, **se abre la caja del espesor requerido por diseño**, debiendo depositar el material extraído en los bancos de desperdicio que fije la residencia.

* **La superficie descubierta se escarifica y compacta en 20 cm superiores, hasta alcanzar el 90% de su peso volumétrico seco máximo (PVSM)**, con respecto a la Prueba Próctor Estándar. Esta compactación de los suelos garantiza un apoyo uniforme y estable para el pavimento.

* **Sobre el terreno natural debidamente escarificado y compactado, se construye la capa subrasante con el espesor requerido por proyecto**, generalmente se compacta en varias capas hasta alcanzar el **95% de su PVSM** con respecto a la Prueba Pórtter Estándar. En la construcción de esta capa se utiliza material de banco, del cual se especifica **su tamaño máximo**, que comúnmente no excede los **7.6 cm (3")**.

* **Sobre la subrasante terminada, se construye una capa de base compactada al 100% de su PVSM con respecto a la Prueba Pórtter Estándar.** En la elaboración de esta capa **se sugiere el empleo de grava y arena seleccionada de banco.**

Es importante indicar que una falla en los niveles de sub-base constituye un problema con consecuencias severas económicamente, pues el costo de volumen faltante de sub-base se debe compensar con concreto, y este último generalmente cuesta de 5 a 10 veces más que el volumen a compensar de sub-base, y en caso de una reducción del volumen de concreto, se construye en detrimento de la calidad estructural del pavimento.

Frecuentemente los pavimentos rígidos se configuran con una capa subrasante, una capa de base y una losa de concreto hidráulico. La capa subrasante tiene cuando menos 25 cm. de espesor, la base se realiza de 15 a 18 cm. de espesor y la carpeta de concreto hidráulico de aproximadamente 15cm. de espesor, dependiendo de las características previstas del tránsito. Los espesores mencionados para pavimentos nuevos, deben tomarse solo como una guía para evaluaciones económicas y elaboración de programas de inversión, y no como una norma de construcción, ya que ésta deberá los estudios particulares de la obra.

2. CIMBRADO

La cimbra es el conjunto de elementos y procesos que facilitan el moldeado del concreto en estado semilíquido-plástico. En pavimentación como en otras obras, la cimbra generalmente **se construye de madera. Debe cimbrarse cuidando que se coloque siguiendo el alineamiento y los niveles indicados por la brigada de topografía.** Una vez terminado el proceso, es preciso revisar nuevamente los niveles de la cimbra con un topógrafo especializado.

En el caso de pavimentos reforzados, previo a la cimbra se coloca el acero reforzado que puede ser **de alta o baja resistencia**, características que dependerán de las dimensiones y la resistencia que se requieran.

En la práctica se aplican dos técnicas de cimbrado: la pavimentación con cimbra deslizante y la pavimentación con cimbra fija. La primera técnica es relativamente nueva y beneficia la calidad y cantidad de la construcción de pavimentos de concreto. Algunas recomendaciones generales para el cimbrado de pavimentos rígidos, son:

- Deben construirse suficientemente fuertes y rígidas para soportar la carga de los equipos de tendido, vibrado y acabado. Comúnmente se usan piezas de 3m de largo, con la base de 0.75m de altura, pero nunca menor de 20cm, la lamina que se emplea varia de $\frac{1}{4}$ a $\frac{5}{16}$ de pulgada, dependiendo de la carga que van a soportar. Estos elementos deben ser fáciles de alinear para quedar perfectamente unidas entre si. Se puede fijar la sub-base con no menos de 3 pijas por elemento.
- Se debe tener en cuenta que la sub-base sobre la que se colocaran las piezas de la cimbra esté perfectamente compactada y nivelada. La preparación de dicha sub-base debe estar lo suficientemente adelantada para no interferir las operaciones de esta con el colado de las losas. Se deben compactar las zonas donde la sub-base haya sido removida por efecto de la colocación de las piezas de cimbra.
- Los elementos de cimbra no deben desviarse más de (1/4") de su línea de proyecto en cualquier punto.
- Las piezas de cimbrado deberán estar perfectamente limpias antes de iniciar el colado.

3. TENDIDO DEL CONCRETO HIDRÁULICO.

Para el tendido del concreto se deberá **humedecer la superficie que recibirá la mezcla**, con el fin de evitar que el suelo absorba agua del concreto. **Posteriormente, el material deberá esparcirse por todo lo ancho del pavimento.** Cuando el concreto se vierta sobre la base, este no deberá dejarse caer de una altura mayor a los 60 cm., para evitar la disgregación de la mezcla y un tendido no homogéneo.

4. COMPACTACIÓN Y VIBRADO.

Una vez colocado el concreto, se procede a elaborar **el vibrado y perfilado**, que consiste en acomodar las orillas pegadas a la cimbra, mediante el uso de un vibrador manual. Posteriormente, **deberán verificarse** el espesor del tendido con la ayuda de un escantillón que. Por último, **se pasará la regla vibratoria que dará el acabado final al pavimento.**

Un concreto mal vibrado y mal compactado no resulta homogéneo y por tanto no es apto para pavimentación. Su estructura presenta poros que provocan una disminución de su resistencia y durabilidad, por lo que siempre debe compactarse adecuadamente. La compactación se verifica con la extracción de probetas del pavimento, evaluando su densidad aparente y observando la ausencia de oquedades y segregación de los agregados. Respecto a la vibración, se recomienda que sea de alta frecuencia, lo cual mitiga la contracción por secado mediante un acomodo adecuado de partículas de la mezcla.

5. EL TEXTURIZADO.

La regularidad superficial del pavimento determina el grado de comodidad del servicio de la vía un usuario, y se relaciona con las velocidades de desplazamiento que estas vías permiten.

Debido a su alta importancia, la regularidad superficial de la capa de rodamiento elaborada con concreto hidráulico, **se controla mediante la terminación del concreto en estado fresco**, para poder definir la lisura o rugosidad que se pretende.

El texturizado deberá efectuarse con una maquina terminadora cuyas operaciones consisten simplemente en una operación de alisado y suavizado. Previo a su aplicación, dicha maquina requiere la eliminación de puntos altos o rellenar zonas debido a una deficiente nivelación de la superficie.

El terminado también puede hacerse es forma manual, sin embargo esta operación suelen tener gran dificultad para la obtención de superficies satisfactorias.

El paso de la maquina terminadora debe demorarse lo más posible para permitir que ocurra la mayor parte del asentamiento inicial del concreto que texturiza. Se sugiere que la regla lleve una onda de concreto a lo largo de su mitad delantera. Cualquier pérdida repentina de la onda indica un punto bajo, pues representa una insuficiencia de material, debiendo entonces detener la máquina y distribuir la mezcla de concreto sobre el lugar bajo y texturizar nuevamente. **Este proceso es importante porque la lisura que se consigue debe mantenerse a lo largo de la vida útil del pavimento. Se recomienda controlar periódicamente el proceso de texturizado con una regla maestra que haga notar los hundimientos y bordos que se producen durante el tendido, y que no permiten producir una superficie adecuada.** Este control generalmente se aplica con una regla de 3 metros; las zonas que presentan diferencias superiores a los límites admisibles pueden rebajarse con herramientas esmeriladora, ya en estado endurecido, es preferible evitar estas tareas correctivas.

En la construcción de carpetas de concreto hidráulico se emplean **maquinas pavimentadoras que son capaces de dejar un acabado tal que se minimiza el acabado manual.** En es acabado, comúnmente se emplean **rastras de texturizado, que son alfombras de pasto sintético para definir la textura necesaria para la resistencia a la fricción especificada.**

En la fricción entre neumático y pavimento se genera ruido que resulta molesto para el usuario, por lo cual el proceso de texturizado pretende minimizar este ruido mediante el uso de patrones de texturizado. Entonces, para minimizar dicho ruido, el peine con el que se realiza el texturizado tiene un patrón de separación entre cerdas (en mm.) como el mostrado en la figura siguiente

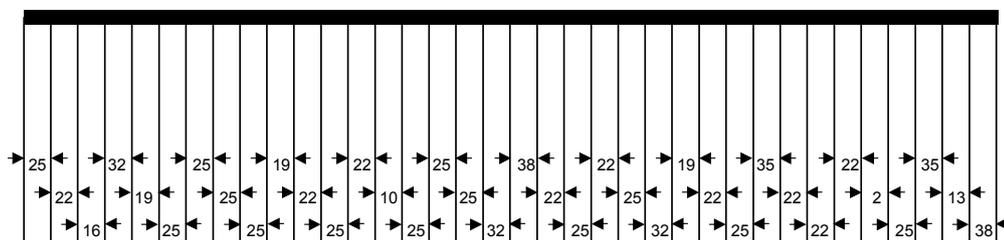


Figura 23. Patrón de separación en mm. entre las cerdas del peine de texturizado. (Esta secuencia de rayado se repite para formar el patrón de texturizado)

6. CURADO DEL CONCRETO.

El curado se realiza en seguida del texturizado y **consiste en complementar el proceso de hidratación del cemento de la mezcla.** Con el curado se inducen las condiciones de temperatura y humedad óptimas para la capa de rodamiento para **generar una ganancia de resistencia paulatina.**

Para la hidratación del concreto se emplea un aspersor manual y el complemento para curar el pavimento se puede hacer aplicando una membrana impermeable que evita (o retarda fuertemente) la evaporación de agua en la estructura. Dicha membrana generalmente es de dos tipos: en base a parafina y en base a resinas, siendo estas últimas más eficientes pero más costosas; en ambos casos, es frecuente que se aplique un pigmento blanco que indica la elevación de temperatura del pavimento y así se puede llevar un control visual del curado.

En el proceso del curado **debe asegurarse que el concreto no se seque en forma prematura, pues ello produce la fisuración por contracción plástica, condición frecuente en ambientes de viento seco y clima cálido.**

Del proceso de curado se deriva la durabilidad del pavimento y una disminución de la tendencia a la fisuración. Cuando el concreto ya endurece y la superficie de rodamiento se seca, esta adquiere cierta resistencia a la tensión; sin embargo se presentan comúnmente pequeñas grietas en las juntas. **En general la correcta colocación, compactación y curado del concreto permitirá que la resistencia efectiva de la estructura se comporte en forma similar potencial requerido por las especificaciones.**

7. JUNTAS.

El corte de juntas se realiza con cortadoras especiales que cuentan con discos de diamante y elaboran incisiones en el concreto de forma transversal y longitudinal. **En las juntas generalmente se coloca un material sellante elástico, resistente a los efectos de combustibles y aceites automotrices, con buena adherencia con el concreto; este sellante permite las dilataciones y contracciones que se presenten en las losas, sin agrietarse o despegarse.** Se elabora a base de silicón o poliuretano, que se solidifica a temperatura ambiente.

Para garantizar el adecuado comportamiento de las juntas de pavimentos rígidos, se les da mantenimiento continuo que consiste en la limpieza mediante la inyección de agua a presión sobre las incisiones; posteriormente se secan los bordes con aire, se coloca un agente sellador dentro de la junta y una cintilla de respaldo.

Una vez construido el pavimento y como parte del control de calidad del mismo, deben aplicarse pruebas de laboratorio que avalen los materiales y los procedimientos empleados en obra. A continuación se mencionan algunos aspectos relevantes de este control

II.1.12.10.- CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO ENDURECIDO.

Este control es responsable de verificar que el pavimento cumpla con las características de especificaciones preestablecidas, referentes tanto para los materiales como para los procesos de construcción.

Cuando finalmente el concreto ha endurecido debe presentar las propiedades y características para las que fue diseñado (resistencia, durabilidad, baja deformabilidad y economía).

La resistencia y la durabilidad del pavimento, cuando ya endureció el concreto, se encuentran íntimamente asociadas, por lo cual su control se realiza con una prueba en común, que es la evaluación de la resistencia del concreto endurecido.

La resistencia a los esfuerzos mecánicos representa la calidad del concreto. El resultado de un ensayo de resistencia se obtiene del promedio de todos los resultados de las pruebas aplicadas a las probetas procedentes del mismo tendido, curados el mismo tiempo y con igual.

En general la resistencia que comúnmente se usa para tipificar el concreto en pavimentos rígidos es la resistencia efectiva, la cual se presenta en material de la estructura y no es igual a la resistencia potencial debido a las diferentes condiciones de forma, curado, compactación, efectos de segregación, tensiones laterales, etc. Para este caso se extraen núcleos de la estructura y se ensayan según normas vigentes.

La calidad del concreto se evalúa mediante el ensayo a la compresión y con la prueba de tracción indirecta o flexotensión. El ensayo a la compresión ha sido descrito anteriormente y permite determinar la resistencia efectiva del concreto del pavimento en testigos extraídos del pavimento, sometiéndolos a la compresión o tensión indirecta en condiciones de saturación.

Generalmente el control de la calidad del concreto se realiza a través de la resistencia potencial, resultante de la evaluación de probetas cilíndricas de 150 mm. de diámetro y 300 mm. de altura para determinar la resistencia a la compresión se determina si la mezcla cumple con la especificación del contrato.

Los resultados obtenidos a corta edad (7 días), pueden adoptarse medidas correctivas sin necesidad de esperar los 28 días usuales. En el ámbito de pavimentación esta prueba sirve de herramienta eficaz para el autocontrol.

En lo que corresponde al ensayo de flexotensión, este sirve para medir dicha resistencia; para esta prueba se moldean probetas prismáticas en moldes metálicos de 150 x 150 x 550 mm. Su compactación y el curado son idénticos a los descritos para las probetas cilíndricas. **Una vez completo el curado, se rompe la viga por flexión simple con las cargas aplicadas en el tercio medio.** Es importante evitar el secado superficial de las vigas del ensayo pues esto induce la formación de pequeñas fisuras que alteran los resultados obtenidos.

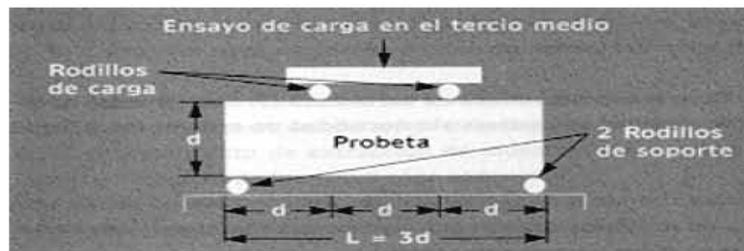


Figura. No. 24.
Esquema del ensayo de flexotensión

Al igual que el caso de la compresión de probetas cilíndricas, este ensayo suele ser exigido por las especificaciones. Es conveniente su realización periódica como mecanismo de autocontrol, dado que el diseño estructural del pavimento se fundamenta en los valores de flexotensión. **En algunos casos, puede reemplazarse por la evaluación indirecta de la resistencia a la tracción por el método de compresión diametral.** En este caso, no es necesario el moldeo de vigas prismáticas dado que se emplean los mismos cilindros que en el caso de compresión.

La medida de control de resistencia de la capa de rodamiento es la prueba de compresión de testigos extraídos y evalúa la calidad del concreto colocado y las operaciones de compactación y curado del proceso constructivo.

Los testigos tienen 15 cm. de diámetro y abarcan todo el espesor del pavimento. Estas muestras se recortan en su parte inferior para ajustar la muestra al espesor efectivamente colocado según especificaciones y comúnmente se les recorta la cara inferior con sierra diamantada refrigerada por agua. **Se recomienda saturar dichos testigos** durante las 48 horas previas a la ejecución del ensayo, para evaluar las peores condiciones de humedad en que puede encontrarse la capa rígida; además se sugiere que los **testigos sean probados con mínimo 14 días y antes de los 26 días de edad.** En estas condiciones se evaluar

correctamente el curado real de la estructura. La saturación es con una mezcla de **agua y cal**, se extraen de pileta y se acondiciona (**encabezan**) para lograr el paralelismo de las caras y su perpendicularidad con respecto al eje del testigo. Una vez encabezados, se debe medir su altura y su diámetro para **calcular la relación de esbeltez (altura/diámetro)**.

Aplicado el ensayo, el valor obtenido debe corregirse multiplicando por un factor que depende justamente de la relación de esbeltez, de acuerdo con los valores indicados en la norma o reglamento de aplicación. **Estos valores corregidos son los que permiten adoptar las decisiones sobre la aceptación de la resistencia del pavimento o la aplicación de multas.**

II.1.13.- DESVENTAJAS DEL PAVIMENTO RÍGIDO

En el pavimento rígido los daños posibles suelen atribuirse a la calidad del concreto, **lo cual generalmente se relaciona con** una deficiente construcción de las terrecerías o con los malos procedimientos de manejo y colocación, **por ello durante su construcción es necesario aplicar** una adecuada supervisión y control de calidad.

En estos pavimentos **la durabilidad del concreto utilizado se puede ver afectada severamente en zonas de congelamiento, cuando se presenta este afectado de forma anticipada, es decir, mientras ocurre el fraguado.** El factor de intemperismo más destructivo es la congelación y el deshielo mientras el concreto se encuentra húmedo, particularmente cuando se encuentra con la presencia de agentes químicos descongelantes. El deterioro provocado por el congelamiento del agua afecta la pasta y la consecuente unión de las partículas del agregado.

II.1.13.1.- DETERIOROS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Algunos deterioros de los pavimentos con capa de rodamiento de concreto se manifiestan a simple vista como el agrietamiento; otros requieren el muestro y pruebas de laboratorio para reconocerlos, identificar sus causas y saber así cómo prevenirlos y repararlos. En general las fallas de un pavimento, incluidas las propias de la carpeta de rodamiento, no solamente se deben a una mala construcción; también pueden tener origen en un mal diseño, en un uso inadecuado de la vía o en un mantenimiento deficiente.

Asimismo los deterioros en la capa de rodamiento rígida obedecen a la naturaleza de algunos materiales empleados en su elaboración, los cuales no son capaces de resistir por sí solos y requieren de algunos procedimientos o cuidados adicionales para poder soportar mejor las condiciones reales del tráfico y del medio donde son construidos.

A continuación se describen algunos de los deterioros comunes en los pavimentos rígidos.

II.1.13.1.1- FALSO FRAGUADO. Se presenta en las losas de concreto hidráulico durante el tendido de la capa de rodamiento; dicho defecto es el endurecimiento prematuro de la mezcla de concreto, y de no ser tratado adecuadamente, generará deterioros cuando el pavimento entre en servicio. Este fenómeno es consecuencia del endurecimiento inicial de la pasta o del concreto que se presenta en los primeros cinco minutos después del mezclado. Generalmente se puede eliminar por un continuo mezclado o por remezclado y puede pasar inadvertido en obras donde se surte el concreto por medio de camiones mezcladores, o cuando el concreto es mezclado en una planta central y es agitado camino a la obra.

II.1.13.1.2.- SEGREGACIÓN. Es la inconsistencia de la mezcla que se presenta cuando se forma grumos o bien no hay adherencia entre, la pasta y el agregado grueso. Se manifiesta como un desgrane de la mezcla y en la superficie de un tendido deficiente se observa demasiado agregado grueso. **Se recomienda realizar siempre una mezcla uniforme de concreto, y al colar, compactar, y dar el acabado, mantener el concreto uniformemente húmedo.** También es recomendable aplicar un recubrimiento superficial.

II.1.13.1.3.- VARIACIÓN DE COLOR. Otro defecto que se manifiesta en el concreto fresco es la variación de color; un cambio de los efectos de luz y sombra en la superficie de la capa de rodamiento. Generalmente es **síntoma de variaciones en el curado, efectuado en forma dispareja; y otras veces indica que el cemento no ha sido homogéneamente mezclado.** Una losa con estas características presentara comportamientos diferentes e incluso deficientes a lo largo de la misma.

II.1.13.1.4.- AGRIETAMIENTO FINO. El agrietamiento fino es un deterioro que se manifiesta como una red de grietas finas en la superficie de concreto, que frecuentemente se debe a la **contracción de la superficie en condiciones de secado rápido,** existencia de baja humedad de la mezcla y la exposición a elevadas temperaturas climáticas. **Este agrietamiento no se asocia con el debilitamiento de la losa; para evitar lo se recomienda dar un acabado que cure el concreto correctamente,** que evite la pérdida excesiva de humedad. Puede aplicarse un recubrimiento superficial con algún sellador sobrepuesto para cubrir y/o minimizar el efecto de las grietas. **También se recomienda no olvidar humedecer la sub-base y la cimbra,** sin dejar excesiva agua alrededor; cubrir la capa de rodamiento para **mantener todos los materiales fuera de la acción directa del sol y los agregados húmedos;** por puede usar un aditivo "Retardador de fraguado".

Generalmente este tipo de fisuras (tipo malla) son muy finas y afectan solo la superficie de la capa de rodamiento; son grietas mayores en sentido longitudinal, interconectadas por grietas finas aleatorias. Se asocian al mal curado, al exceso de amasado y/o alisado de la superficie o por efecto térmico la elaboración del concreto. Su reparación puede ser una sustitución de espesor parcial o con parches asfálticos según el grado de severidad. (Consultar referencia REF*21)



Fotografía 44. Grietas capilares. REF*21

II.1.13.1.5.- ACABADO DEFECTUOSO. En una obra de pavimentación **el polvo es un contaminante para la superficie del concreto.** Frecuentemente **contamina el acabado de la capa de rodamiento recién colada,** el cual **absorbe el agua de sangrado y se adhiere al pavimento.** Se recomienda remover el agua de sangrado y dar el acabado final, cubriendo posteriormente la superficie para evitar su contaminación. De este defecto y su atención adecuada, se evitara tener superficies con excesiva tendencia a la abrasión ocasionada por la tracción sobre el polvo de cemento que fragua en el tendido.

Para evitar la aplicación excesiva de polvo de cemento puede usarse un endurecedor de superficie y si ésta muestra significativos trastornos de desgaste es esencial remover todo el material suelto por medio de esmerilado o de raspado de la superficie hasta encontrar una base sana y luego aplicar una capa firme apropiada.

Cuando se pavimenta y se presenta lluvia, la superficie se deslava en varias secciones o bien manifiesta **pequeñas abolladuras.** Debe entonces **planearse el tendido durante épocas cuando se prevea que no lloverá,** sin embargo, dado que las condiciones del clima no son controlables, y si se diera el caso de una lluvia mientras el concreto está fraguando, **el pavimento debe cubrirse para evitar los daños mencionados, sin permitir que el agua de lluvia corra a través de la superficie.** Se sugiere también que, cuando exista posibilidad de una lluvia, se opta por no pavimentar.

II.1.13.1.6.- LAS AMPOLLAS. Son otro tipo de deterioro que se presenta durante la construcción de la capa de rodamiento. **Son huecos bajo la superficie de concreto, llenos de aire o de agua de sangrado.** Se generan cuando la superficie de concreto fresco es sellada atrapando grandes burbujas de aire o agua de sangrado por debajo de la superficie.

Este fenómeno se presenta particularmente en losas gruesas o en días calientes y con viento, cuando la superficie está propensa a un secado rápido. Se recomienda que inmediatamente después del colado, se realice un buen vibrado que desaloje las burbujas de aire que pudieran quedar; además se sugiere desalojar el agua de sangrado que queda en la superficie del pavimento.

II.1.13.1.7.- ASTILLAMIENTO. Es un deterioro manifestado como un rompimiento de los bordes de las juntas, por efecto de **cargas pesadas o impacto con objetos duros.** Generalmente la losa se astilla o se rompe por la entrada de objetos duros, por ejemplo piedras en las juntas, o bien porque **el concreto se expande y se contrae, pudiendo agrietar y romper los bordes débiles.**

Este fenómeno también se denomina desportillamiento y se controla si la compactación se aplica correctamente la base y terracerías a nivel de las juntas. **Se sugiere** que las áreas astilladas se raspen, cincelen o esmerilen hasta encontrar concreto sano y entonces **eliminar el concreto viejo,** para que posteriormente se vuelva a **llenar el área con concreto nuevo o mortero de reparación.**

II.1.13.1.8.- GRIETAS POR SERVICIO. Un deterioro común en losas de concreto hidráulico es la aparición de grietas por servicio. **Los pavimentos rígidos no pueden extenderse en forma continua en una longitud considerable, pues por efectos de cambio volumétrico las losas sufren tensiones y compresiones que las agrietarían en todo su desarrollo. Las juntas son el método más efectivo para controlar agrietamientos.**

El agrietamiento por servicio se clasifica en agrietamiento de esquina, agrietamiento longitudinal y agrietamiento transversal.

II.1.13.1.9.- GRIETA DE ESQUINA. La grieta de esquina es la que **se origina en un trozo de losa de forma triangular,** al interceptar las juntas transversal y longitudinal y que forma un ángulo de aproximadamente 50° con la dirección del tránsito. La longitud de los lados del triángulo varía entre 300 mm y la mitad del ancho de la losa. **REF*37.**

La grieta de esquina se asocia con la falta de apoyo de la losa en la parte afectada, o con el efecto de sobrecarga en las esquinas y la deficiente transmisión de las carga en las juntas. Su severidad depende del área afectada y de la presencia de escalonamiento.

La reparación de este deterioro consiste generalmente en el sellado de las grietas en el caso menos severo o bien la reconstrucción de una franja de la losa, en todo su espesor, en el caso de peores condiciones de severidad.

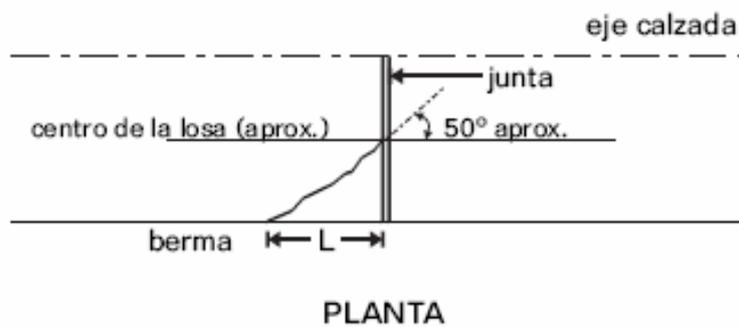


Fig. 26. Representación de grieta triangular



Fotografías 45 y 46. Juntas saltadas

II.1.13.1.10.- GRIETAS LONGITUDINALES. Se denominan grietas longitudinales porque **su dirección es predominantemente paralela al eje de la calzada** y su longitud esta determinada por ilimites entre la mitad de la longitud de la losa y la longitud completa.

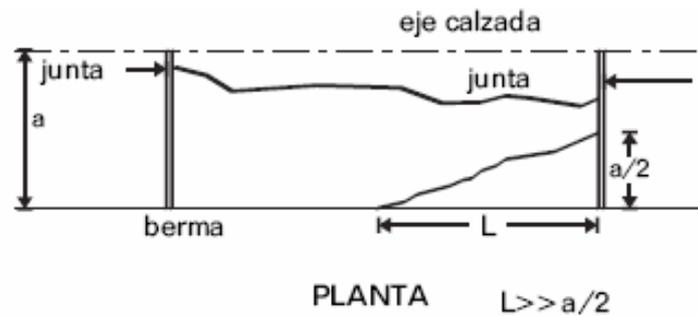


Fig. 27. Representación de grietas longitudinales

Su severidad se clasifica de acuerdo al ancho de la grieta: cuando esta es menor de 3mm se considera severidad baja; cuando esta entre 3mm y 10mm, con saltaduras de hasta 50mm o escalonamiento de menos de 15mm, se determina la severidad media; y cuando la grieta tiene un ancho mayor a los 10 mm. y saltaduras de mas de 50mm o escalonamiento de mas de 15mm, se determina la severidad alta.

El mantenimiento para la reparación de este tipo de grietas, consiste en el sellado de la grieta o hasta la reconstrucción de la losa en todo su espesor del área afectada.



Fotografías 47 y 48. Juntas saltadas

II.1.13.1.11.- GRIETAS TRANSVERSALES. Grietas perpendiculares al eje de calzada; se presentan cuando la losa tiene una longitud excesiva o un espesor insuficiente; generalmente son causadas por el alabeo de la retracción térmica. Su severidad se clasifica según el ancho de la grieta: cuando es menor de 3mm se considera de intensidad baja, entre 3mm a 6mm de intensidad media y mayor a 6mm de intensidad alta.

Se recomienda solucionar este deterioro con el sellado de la grieta o hasta la reparación de todo el espesor.

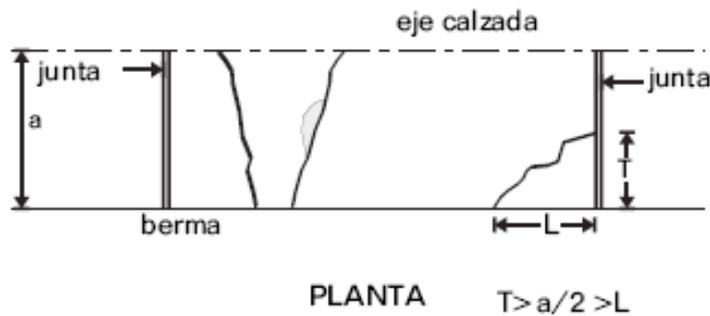


Fig. 28. Representación de grietas transversal

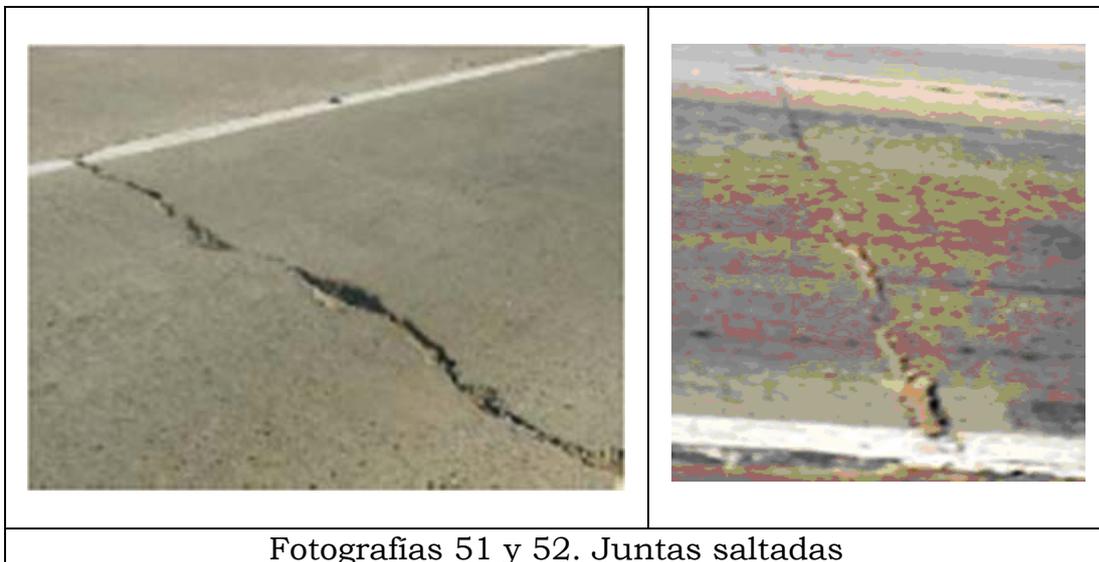


Para mitigar la extensión de estas grietas, la losa contiene juntas convenientemente espaciadas que alivian la contracción por secado y por temperatura. Estas juntas de control se ranuran, o se aserran en banquetas, calzadas, pisos y pavimentos, de modo que las grietas ocurran en esas juntas y no aleatoriamente. Las juntas de control permiten movimientos en el plano de una losa o de un muro. Se desarrollan aproximadamente a un cuarto del espesor del concreto. Las juntas de control pueden alinear con las juntas de construcción, que son las que se generan en los lugares donde ha concluido la jornada de trabajo y separan áreas de concreto colocado en distintos momentos.

II.1.13.1.12.- Deterioros en las juntas. En lo correspondiente a los deterioros en juntas, generalmente se manifiestan con mayor incidencia los problemas de juntas saltadas este deterioro consiste en la desintegración de las aristas de la junta, cuyos trozos se ven perdidos por efecto de las acciones de tránsito intensas. **Este defecto se debe generalmente al exceso de pulimento durante la construcción del pavimento, o bien por la penetración en la junta de partículas sólidas incompresibles que afectan el trabajo de la misma ante cambios volumétricos.** Los niveles de severidad de este deterioro pueden llegar a ser muy altos cuando la longitud afectada de la junta es del más de 150mm y existe pérdida considerable de material.



Fig. 29. Representación de juntas saltadas

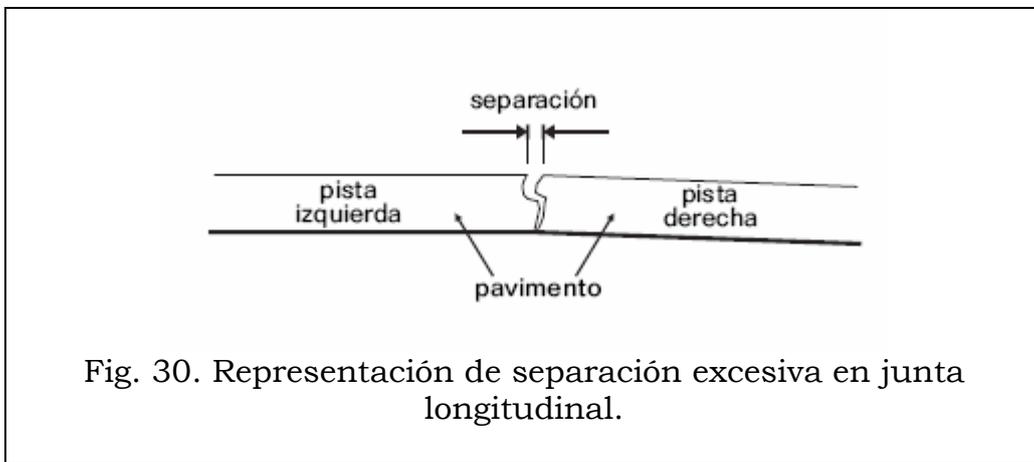


Fotografías 51 y 52. Juntas saltadas

Su reparación frecuentemente consiste en reponer el espesor parcialmente mediante procesos constructivos muy especializados.

Otro deterioro manifiesto en las juntas es aquella separación de losas longitudinalmente, se observa como una abertura excesiva en la junta longitudinal que separa las losas; dicho deterioro se asocia con la carencia de barras de amarre entre losas adyacentes o bien con asentamiento diferenciales a nivel de subrasante entre dichas losas. Su severidad varía de acuerdo con la amplitud de separación entre las losas; pero como parámetro máximo de severidad alta se puede indicar una apertura de 20 mm.

La abertura excesiva en la junta longitudinal generalmente se repara con el sellado de las posibles grietas en el caso menos severo, o bien con la reconstrucción de la losa, para colocar barras de amarre, reconfigurar y recomprimir adecuadamente la subrasante, cuando se trata del caso más severo.



Una vez descritos las características más importantes de los pavimentos rígidos y flexibles, resulta conveniente familiarizar al lector con el diseño de ambos tipo de pavimentos para comprender mejor su comportamiento.

II.2.- Generalidades del proceso de diseño

INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se ha tenido el conocimiento de los procedimientos y las técnicas que se emplean actualmente para determinar las características de los materiales que constituyen al pavimento, la terracería en que éste se apoyara, así como lo correspondiente a factores de tránsito y otros mas; con todos estos conceptos esto, el profesional de la ingeniería puede ahora adentrarse en el diseño de los pavimentos, entendiendo las técnicas empleadas actualmente y avaladas por la experiencia vivida. Además en los capítulos precedentes, se ha intentado generar alguna idea en aspectos que en el futuro deberán tener mayor estudio dado que su impacto en el comportamiento del pavimento.

En el que se desarrolla a continuación se describe en forma general el diseño de los pavimentos, mencionando los conceptos de diseño mecanicista y las razones por las cuales este tipo de diseño tiende a sustituir a los métodos empíricos.

También se definen algunos términos comunes que se manejan en el diseño de pavimentos y que constituyen parte de la nomenclatura muy requerida para el proyecto de una rehabilitación.

Por ultimo en este capítulo también se anotan algunos de los programas de cómputo reconocidos como herramientas para diseñar pavimentos y que requieren la definición de parámetros descritos en este y los capítulos anteriores.

II.2.1.- GENERALIDADES DE DISEÑO

El pavimento debe ser elaborado para garantizar una capa de rodamiento segura, confortable, incluso estética, optimizando y equilibrando las propiedades que se contraponen para lograr estos fines. En el proceso del diseño se determinan las características y propiedades de las capas del pavimento, sus espesores, así como sus procedimientos constructivos y las condiciones para que la estructura preste servicio adecuado en su periodo de vida útil.

El diseñador **tomará en cuenta las características del terreno de cimentación, las cargas y los efectos climáticos; apoyándose en criterios de seguridad, funcionalidad, economía y armonía, que involucren las características estructurales, funcionales, su proceso constructivo y la evolución del comportamiento del pavimento después de construido.** Respecto a los criterios económicos, éstos deben **tomar en cuenta el costo inicial del pavimento y además el de operación.**

II.2.2.- CRITERIOS DE DISEÑO

El diseño es un proceso en donde se involucran las variables obtenidas del estudio del suelo, del tránsito, de la topografía y del trazo geométrico de la vía, y con el conocimiento de ellas se aplican los métodos teóricos y empíricos que garantizan, junto con una buena construcción y mantenimiento, que el pavimento sea durable y con óptimas condiciones de tránsito.

En el diseño de pavimentos se determinan los espesores de las capas y los materiales con que se van a construir los mismos. Respecto a los procesos constructivos que se definen, es obligación del constructor darles seguimiento, y/o proponer alternativas con el debido soporte técnico y económico.

El diseño de pavimentos se hace en base del **análisis por:**

Fatiga: El análisis por fatiga se basa en el control de agrietamiento.

Erosión: El análisis por erosión se basa en el control de la erosión del terreno de soporte y bombeo.

Generalmente en el análisis de pavimentos las cargas de ejes sencillos son más severas en el análisis por fatiga, y las cargas en ejes tandem son más severas en el análisis por erosión. **REF*17**

II.2.3.- DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS

La consideración de varios **factores**, además de **la carga y el uso de los pavimentos**, hacen difícil el tener diseños de carreteras y caminos completamente eficientes. Entre estos factores pueden mencionarse la incertidumbre asociada al comportamiento mecánico de los **materiales** y la dificultad de predecir adecuadamente dicho **comportamiento a largo plazo de la estructura**, su **envejecimiento** y las **fallas por fatiga o deformación**.

Actualmente el incremento en las cargas vehiculares y el aumento del uso de camiones pesados para transportar grandes volúmenes de carga, genera la principal causa de falla del pavimento. Así pues, las características de la infraestructura moderna deben **atender mejores estándares de durabilidad, seguridad, funcionalidad, mantenimiento mínimo y máxima economía, entre otros.**

II.2.4.- DISEÑO MECANÍSTICO-EMPÍRICO

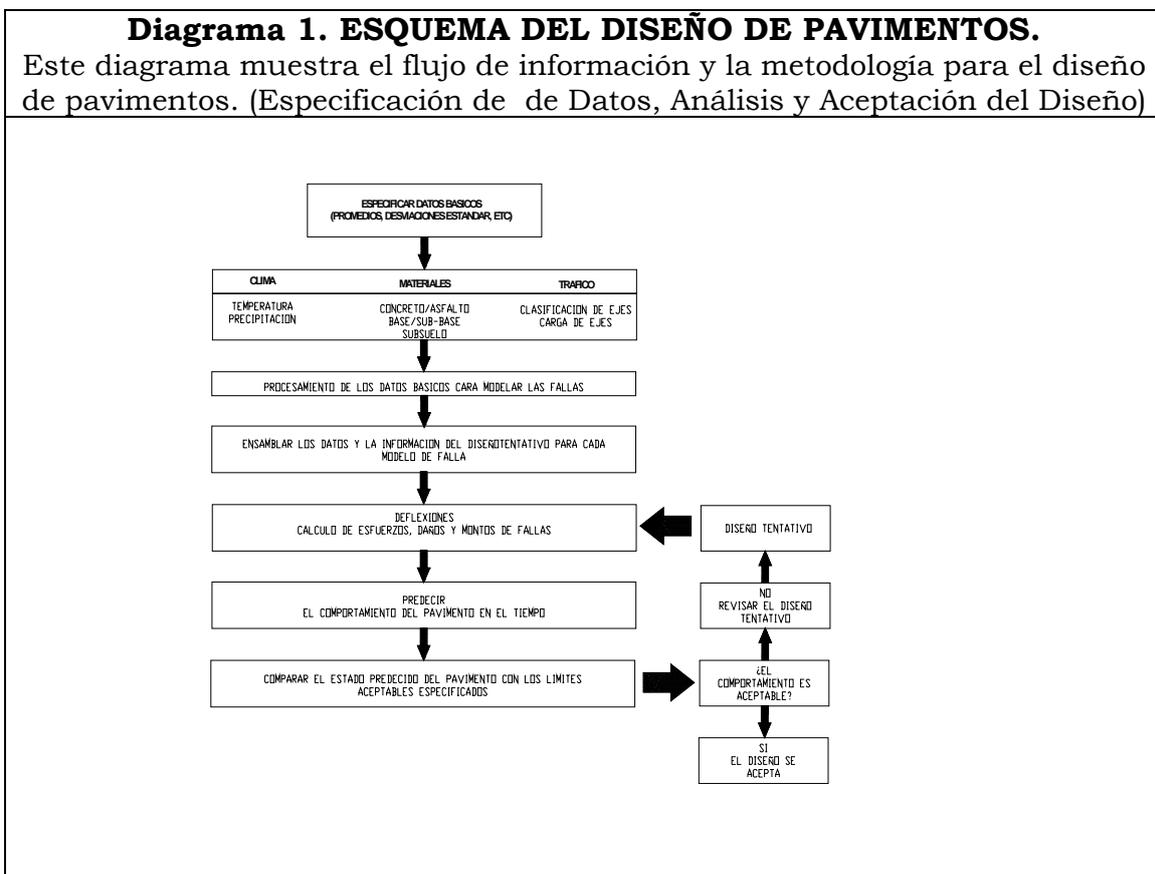
Hoy en día el diseño de pavimentos se vuelve más efectivo con la **utilización de modelos avanzados**. La aplicación de estos modelos

mejora el análisis del impacto de cada uno de los factores que intervienen en la vida del pavimento, como pueden ser distintas cantidades de tráfico o diferentes tipos de materiales (asfalto en pavimentos flexibles y concreto hidráulico para pavimentos rígidos), el efecto del tiempo (envejecimiento) y la temperatura (variaciones durante el día y la noche y durante el verano y el invierno), entre otros.

Otra ventaja de dichos modelos, es que pueden ser recalibrados y validados continuamente con la adquisición de mayores y más detallados datos durante su vida útil, sirviendo así como una herramienta para la optimización de recursos económicos y técnicos.

En el uso de estos modelos se basa el método Mecanístico - empírico, el cual busca la mejor posición entre los aspectos teóricos y el análisis directo del comportamiento de un pavimento.

A continuación se presenta el esquema del método mecanístico - empírico que se emplea comúnmente para diseñar pavimentos; en este procedimiento resalta la retroalimentación con información del comportamiento predecible del pavimento durante su servicio y la consideración de las medidas de conservación aplicadas a la estructura cuando esta ya existe y se pretende rehabilitar.



Proceso de diseño de pavimentos con el método mecanístico - empírico.

REF*13

II.2.4.2.- VARIABLES DE DISEÑO

En el ámbito de pavimentos, se tiene la tendencia al diseño con **datos que incluyen el tráfico, los materiales empleados (asfalto, concreto y suelos), el clima de la localidad respectiva, el grado de confianza del diseñador, entre otros. Este grado de detalle que se obtiene para el diseño se considera según la magnitud de los costos de construcción y rehabilitación de los pavimentos**, por ejemplo, de acuerdo con la **Referencia 3**: “anualmente en EE.UU., en temas relacionados al transporte (puentes, seguridad, diseño y construcción), invierte cerca de **US\$ 12.4 billones, utilizados en reconstrucción, ampliación y rehabilitación de caminos**”.

Actualmente se considera un gran número de variables para evaluar el comportamiento de un pavimento, pues el monto de cada intervención en la infraestructura debe justificarse en términos de los requerimientos del pavimento.

II.2.4.3.- ESPECIFICACIÓN DE DATOS

Generalmente, como dato de entrada en los métodos de diseño, se requiere de una **propuesta o modelo tentativo, con la designación de los materiales a ser utilizados, el tráfico esperado y el clima de la región.**

En esta etapa se observa **la incertidumbre asociada con cada variable indicada**, lo cual servirá para el desarrollo de la confiabilidad asociada con el diseño de la estructura.

En general en lo correspondiente a los materiales, estos se definen en base a los requerimientos del pavimento; respecto a los datos de tráfico estos se extraen de los estudios de tránsito preliminares y su proyección a futuro; y en lo que toca al clima, éste se define con los datos más representativos de la región (temperatura y precipitación).

II.2.4.3.1.- CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

El diseño actual de pavimentos emplea modelos reológicos que predicen su comportamiento durante su servicio, mediante la especificación de características conocidas de carga y deformación del material.

Para determinar los diversos datos de entrada, el diseñador debe estar familiarizado con las formas de clasificación de materiales más comunes y con los métodos de estimación de esfuerzos y deformaciones ante las cargas-tipo de carreteras. Como apoyo del diseñador, actualmente se cuenta con programas de cómputo que simulan el comportamiento de pavimentos, y requieren igualmente la caracterización de los posibles materiales de construcción para su

corrida. Con estos programas se busca que el usuario adquiera una mejor noción del comportamiento de dichos pavimentos, mediante visualizaciones y cálculos debidamente justificados.

En lo correspondiente a la definición de los materiales como dato de entrada en el método de diseño y para familiarizar al lector de este trabajo con los términos empleados en materiales para pavimentación, se hará mención de los mas usados, su nomenclatura reconocida actualmente en México y las posibles pruebas desarrolladas para su aplicación en capas del pavimento y terracerías.

II.2.4.3.1.1.- NOMENCLATURA Y CARACTERIZACION DE MATERIALES REPRESENTATIVOS DE UN PAVIMENTO.

Algunos ejemplos de la **caracterización de los materiales** utilizados en la construcción de los pavimentos son:

- Mezclas Asfálticas de Gradación Densa (**Hot Mix Asphalt Concrete – HMA**)
- Materiales de Gradación Abierta tratados con asfalto (**ATPB**)
- Mezclas Asfálticas Frías (**CMA**)
- Concreto de Cemento Pórtland (**PCC**)
- Materiales Estabilizados con Cemento (**CTB, CSB, CTPB**)
- Base/Subbase Granulares no Estabilizados (**AB, GAB, CA**)
- **Subsuelos**
- **Roca Madre**

En el anterior se han descrito mas a detalle cada uno de los conceptos mencionados arriba, siendo la intención ahora solo referirlos como parte importante para el diseño.

Respecto al tamaño del agregado pétreo, en México se utiliza recurrentemente la clasificación que la SCT hace de los materiales gruesos. Así entonces, se llama roca a toda formación que tenga un diámetro mayor de 2m.

FRG	$f < 2.00 > 0.75$ m
FRM	$f < 0.75 > 0.20$ m
FRCH	$f < 0.20 > 0.075$ m que es el f de la malla # 3
FRG	= Fragmento de roca grande.
FRM	= Fragmento de roca mediana.
FRCH	= Fragmento de roca chica.

Todo lo que pase la malla de 3" se considera como un suelo

Otras formas de caracterización de los materiales es identificarlos por su VRS y su MR, ya definidos en el anterior, **así como por su granulometría, su proporcionamiento, sus procedimientos constructivos**, etc.

En el caso de terracerías se recurre frecuentemente a la siguiente clasificación:

TIPOS DE SUELO	NOMBRES TÍPICOS
GW	Gravas bien graduadas, y mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.
GP	Gravas mal graduadas, y mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.
GM	Gravas limosas, mezcladas de grava, arena y limo.
GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.
SW	Arenas bien graduadas, arenas con gravas con poco o nada de finos.
SP	Arenas mal graduadas y arenas con grava con poco o nada de finos.
SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.
SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcillas.
ML	Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, limos arcillosos o arenosos ligeramente plásticos.
CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas limosas, arcillas pobres.
OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.
MH	Limos inorgánicos, limos micáceos y diatomáceos, limos elásticos.
CH	Arcilla inorgánica de alta plasticidad, arcillas francas.
OH	Arcilla orgánicas de media alta plasticidad.
PT	Turba y otros suelos altamente orgánicos

Tabla 13. Clasificación recurrente de los materiales empleados en pavimentos

Esta clasificación se deriva del sistema SUCS (Sistema Unificado para la Clasificación de Suelos), que se emplea en geotécnica para definir los parámetros y tipificar un suelo, de tal manera que se adopta la terminología para aceptar o rechazar cierto material especificado.

También en el anterior capítulo se hizo referencia a la granulometría y clasificación de los agregados empleados en cada caso (tanto para el concreto hidráulico como para el concreto asfáltico)

II.2.4.3.1.2.- PRUEBAS COMUNES SOBRE LOS MATERIALES PARA LAS CAPAS DEL PAVIMENTO Y TERRACERÍAS.

El material para la construcción de pavimentos y terracerías se extrae de uno o varios bancos, se selecciona en base a revisiones y clasificaciones de campo y laboratorio, que determinan su aptitud para emplearse en la obra específica.

Generalmente a los materiales se les aplican **3 tipos de ensayos**: una para **clasificar el suelo y validar el material en su calidad**, otra para llevar un control en **la obra** y una más para comprobar sus propiedades **como parte de la determinación del espesor de las diferentes capas del pavimento**.

Así pues, tanto a los materiales de las terracerías como a los del pavimento se les aplica diversas pruebas, entre las cuales destacan:

TERRAPLEN.

- Clasificación granulométrica
- Contenido de agua
- Límites de Atterberg
- Control. Peso volumétrico seco máximo y grado de compactación

SUB-RASANTE.

- Clasificación granulométrica
- Contenido de agua
- Límites de Atterberg.
- Diseño. VRS y Módulo de Reacción con la prueba de la placa
- Control. Peso volumétrico seco máximo y grado de compactación.

BASE Y SUB-BASE.

- Clasificación granulométrica
- Humedad
- Límites de Atterberg
- Diseño. VRS y Módulo de Reacción con la prueba de la placa
- Control. Valor cementante, índice de durabilidad, PVSM (Peso Volumétrico Seco Máximo), GC (Grado de Compactación), equivalente de arena, expansión y adherencia con asfalto.

CARPETA ASFÁLTICA.

En la capa de rodamiento las pruebas que comúnmente se aplican son:

- Clasificación granulométrica
- Humedad
- Límites de Atterberg
- Control. Adherencia con asfalto, equivalente de arena, intemperismo, forma de las partículas sólidas, desgaste, densidad y absorción. Todas las pruebas que se realizan a los asfaltos.
- Diseño. Prueba Marshall, Prueba del estabilómetro HVEEM y Prueba de compresión simple.

CARPETA DE CONCRETO HIDRÁULICO

- Resistencia a la compresión
- Resistencia a la flexión
- Resistencia a la abrasión
- Impermeabilidad
- Temperatura
- Revenimiento
- Peso volumétrico
- Contenido de aire

II.2.4.3.2.- DETERMINACIÓN DEL TRÁNSITO DE DISEÑO

En esta etapa **se determinan los valores de tránsito esperado**. Se conocen el **TDPA (Transito Diario Promedio Anual)**, la **composición vehicular** y el **número de repeticiones esperadas por eje durante el periodo de diseño**. **TDPA es la nomenclatura del Tránsito Promedio Diario Anual que se estima según los aforos del estudio de tránsito para el proyecto**. En la explicación del método ASSHTO, dentro del siguiente, se define la **tipología de vehículos autorizados por la S.C.T.** para circular por las vialidades nacionales; mientras tanto, es conveniente definir que dentro del procedimiento de diseño y, con base en estos datos, **se determina el trafico de diseño según el número de repeticiones esperadas durante la vida de servicio del pavimento para cada tipo y peso de eje**.

II.2.4.3.3.- DATOS CLIMÁTICOS

Dadas las condiciones del desarrollo de una carretera en diversos tipos de geología, topografía y clima, es necesario considerar la influencia de cada uno de estos factores; en lo que corresponde al **factor clima**, se **predicen y simulan sus características** a las cuales estará expuesto el pavimento. En los manuales y modelos de diseño de pavimentos aún no se considera del todo este aspecto, y **frecuentemente se opta por considerar el agua y la temperatura como los datos más representativos de un modelo climático**.

La importancia de considerar el factor climático en pavimentación es la influencia del mismo en las propiedades de los materiales constitutivos del pavimento. El modulo de resiliencia y las demás propiedades del pavimento varían durante todo el año de acuerdo a la temperatura de cada estación, así como durante el día y la noche. **Los nuevos modelos incluyen la influencia de la temperatura desde su distribución espacial y temporal (modelos de transferencia de calor)**, así como la **distribución de la humedad en los niveles de la estructura y la estimación de las infiltraciones (modelos de drenaje)** para predecir el grado de saturación de las terracerías.

Es así que la simulación de los diversos factores que afectan al pavimento emplea modelos cada vez más especializados, de los cuales uno de los más interesantes es el modelo de las posibles fallas ante sollicitaciones diversas.

II.2.4.4.- PROCESO DE DATOS PARA MODELO DE FALLAS

En esta etapa de diseño se realiza un análisis de los efectos de cargas, clima y sustancias agresivas que puedan dañar al pavimento. Así pues, con las sollicitaciones conocidas y modeladas las posibles fallas, se pueden modificar las características de los materiales y determinar los procesos a los cuales pueden someterse para mejorar su comportamiento. REF*13

Esta fase de diseño predice el comportamiento estructural del pavimento durante su servicio. Se realiza un análisis de los cimientos del pavimento, se determina la fuerza y la elasticidad del cimiento, se evalúan cambios del volumen, congelamiento y calentamiento y se revisan las posibles mejoras en la calidad del subsuelo y drenaje en la estructura.

Para el caso del análisis de cimientos en el proyecto de rehabilitación también **se realiza la evaluación del subsuelo, y la parte más importante de este análisis son las fallas que ocurren en las capas existentes y las causas de éstas.** Es recomendable **hacer una tabla con el tipo de falla y la ubicación de la misma, que servirá para saber la frecuencia de los deterioros, indagar sus causas y proponer soluciones óptimas.** La elasticidad del pavimento existente es evaluada usando **pruebas de deflexión y procedimiento de cálculo inverso (back-calculation).**

II.2.4.4.1- MODELOS FÍSICO - MATEMÁTICOS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS.

Aplicando modelos de mecánica-empírica (basados en las leyes y propiedades físicas de los diversos materiales y su calibración con datos medidos en el campo), se obtienen los resultados que proveen al ingeniero de predicciones de comportamiento del pavimento. Dichas predicciones incluyen la presencia de deformaciones permanentes (fisuras o agrietamientos por fatiga y por cambios en temperatura) y el grado de daños superficiales en el pavimento descrito con el International Roughness Index (IRI).

II.2.4.4.2- MODELOS REOLÓGICOS

Según lo anterior, **el programa para la simulación de pavimentos requiere de datos de entrada diversos; por lo cual una de las tareas del diseñador de pavimentos es estar familiarizado con los métodos de estimación de esfuerzos y deformaciones y con el manejo adecuado de las cargas tipo que se utilizan en el proyecto de carreteras.**

La aplicación de estos programas busca que el diseñador adquiera una mejor noción del comportamiento de dichos pavimentos, con ayuda de visualizaciones y los cálculos justificados.

II.2.4.4.3- MODELOS CLIMÁTICOS

Dada la naturaleza de una carretera, es necesario predecir y simular la distribución de la humedad en los niveles de la estructura y estimar la infiltración (modelos de drenaje) para predecir el grado de saturación de las terracerías.

El **Modelo Integral Climatológico** (Integral Climate Model – ICM) de la Federal Highway Administration (FHWA) puede usarse para desarrollar variables climáticas en el análisis de de los cimientos y sus materiales, incluyendo factores para temperatura y humedad.

II.2.4.5.- SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y RÍGIDOS.

Existen programas computacionales (software) que permiten el uso completo de los modelos mecanísticos - empíricos; dichos modelos pueden calibrarse usando la base de datos del Proyecto de Comportamiento a Largo Plazo (LTPP). Estos datos cubren un gran rango de variables de materiales, tipos de subsuelos, climas y tráfico. El sistema puede incluir factores de calibración regional que apliquen a las condiciones típicas de una ciudad y/o región.

Algunos de los programas de computación más utilizados en el estudio del comportamiento de pavimentos son los siguientes:

PROGRAMA	NO. DE CAPAS MÁXIMO	CONDICIÓN DE CONTINUIDAD EN LA INTERFASE	CONSIDERACIONES PROBABILÍSTICAS	FUENTE DE PROGRAMA
WESLEA	10	TOTAL, SIN FRICCIÓN	NO	CUERPO DE INGENIEROS DE ESTADOS UNIDOS
BISAR	10	TOTAL, SIN FRICCIÓN	NO	COMPAÑÍA SHELL INGLATERRA

PROGRAMA	NO. DE CAPAS MÁXIMO	CONDICIÓN DE CONTINUIDAD EN LA INTERFASE	CONSIDERACIONES PROBABILÍSTICAS	FUENTE DE PROGRAMA
CHEV	5	TOTAL	NO	COMPAÑÍA CHEVRON
ELSYM 5	5	TOTAL SIN FRICCIÓN	NO	UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA
PDMAP	5	TOTAL	SI	NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (PROYECTO 1-10B)
VESYS	5	TOTAL	SI	FHWA-US-DOT
CHEVIT	5	TOTAL	SI	CUERPO DE INGENIEROS, ESTADOS UNIDOS
CIRCLY	5	TOTAL, SIN FRICCIÓN	NO	SISTEMAS MINCAB, AUSTRIA

II.2.4.6.- DISEÑO TENTATIVO PARA CADA FALLA

De las características necesarias para resistir cada tipo de falla se obtiene un diseño tentativo, siendo necesaria la compatibilidad de propiedades que en conjunto garanticen el comportamiento óptimo para el cual se proyecta el pavimento.

Con el análisis de las posibles fallas como: deformaciones, agrietamientos, cambios térmicos, texturas, etc., se pueden establecer límites y especificaciones para definir un pavimento base y con el comenzar el proceso iterativo hasta obtener un diseño que cumpla con los requerimientos deseados.

Para definir un diseño tentativo se debe tener claro las características necesarias del pavimento, pudiéndose recurrir a reglamentos y a experiencias anteriores.

II.2.4.6.1.- CÁLCULO DE ESFUERZOS, DAÑOS Y FALLAS

Para este paso se utilizan varios métodos de diseño que requieren datos específicos cada uno de ellos.

Una lista de los posibles métodos a utilizar y que son los más comunes se muestra en el siguiente.

Además, conforme se aborden los diversos métodos se definen las teorías específicas que se utilizan para el cálculo de los esfuerzos y sus efectos.

Comúnmente, para el análisis de esfuerzos se utiliza la teoría de Burmister, que es una variación de la teoría de Boussinesq para el cálculo de esfuerzos en una masa de suelo.

Después de calcular los esfuerzos y deformaciones del pavimento, se debe realizar una evaluación que indique si los deterioros posibles que resultan de las simulaciones y cálculos previos, son admisibles o requieren de otra calidad en materiales, una nueva configuración estructural o la modificación de los procedimientos constructivos a emplear.

II.2.4.7.- EVALUACIÓN DEL DISEÑO

Comúnmente en el proyecto de pavimentación se realiza un análisis comparativo entre las propuestas factibles de diseño y ciertos límites especificados por reglamentos; de esta comparación surge la propuesta definitiva.

En general la fase de evaluación del diseño determina **cuales características se deben modificar en caso de que el diseño no cumpla con indicado en los reglamentos y no tenga las propiedades deseadas, o bien se afinan los detalles en caso de que el pavimento cumpla con dichos límites.**

II.2.4.8.- ANÁLISIS Y ACEPTACIÓN DEL DISEÑO

Para analizar el diseño preliminar, se inicia un **proceso iterativo**, donde se hace **ingresar el espesor del pavimento y las acciones a tomar para rehabilitar pavimentos** (por ejemplo el remover 5 cm. del pavimento existente), así como las características de la estructura vial. Con esta información **se realiza un análisis de la estructura a través del tiempo usando la respuesta del pavimento y los modelos de comportamiento.**

Con el análisis **se obtienen la densidad de fallas (deformación permanente, agrietamiento por fatiga y cambios térmicos, y suavidad del pavimento) presentes en los pavimentos en el lapso de tiempo especificado. Después en base a los límites establecidos por los reglamentos de tránsito, se comparan éstos con las predicciones y se realizan nuevas iteraciones hasta obtener un diseño que cumpla con las expectativas deseadas.**

Mediante este proceso iterativo y dada la diversidad de soluciones que pueden aplicarse en un sistema de pavimento, se pueden obtener varias alternativas aceptables. Entonces, se evalúan estas alternativas usando un análisis de ingeniería de costos a largo plazo.

Finalizado el proceso de diseño se procede a realizar pruebas para verificar el comportamiento de la mezcla ya sea asfáltica o de concreto hidráulico.

II.3.- Métodos de Diseño

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen en forma general algunos de los métodos más conocidos para el diseño de pavimentos rígidos y flexibles. En el caso del diseño de pavimento flexibles se describen el Método de la American Association of State Highway Officials (AASHTO), y el método del Instituto de ingeniería de la UNAM. Para el diseño de pavimentos rígidos se describe el método ASSHTO y el de la Portland Cement Association (Método PCA).

En la práctica existen otros métodos populares para el diseño de pavimentos rígidos y flexibles, tales como el Método de la U. S. ARMY, el Método CBR, el Método Kansas, etc, (consultar **anexo 2.1** y las referencias **REF*29, REF*22, REF*20, REF* 4, REF*1**) los cuales son de interés general para el profesionista de pavimentos, y algunos de ellos están siendo sustituidos gradualmente por los métodos más modernos que involucran una mayor cantidad de parámetros de comportamiento de un pavimento.

En general este capítulo pretende dar a conocer los principales parámetros y datos que solicitan los métodos de diseño de pavimentos, así como los procedimientos comunes para determinar los espesores de las capas de esta estructura, tanto de capa asfáltica como de concreto hidráulico.

II.3.1.- MÉTODOS DE DISEÑO

Los procedimientos de diseño empleados actualmente van desde los empíricos, que relacionan el espesor de las capas con algunas propiedades de los materiales que las constituyen y con su sistema de apoyo, hasta el análisis matemático sumamente detallado que involucra la naturaleza compleja de los materiales y del medio ambiente en que se usarán. Los métodos más sencillos predominan en cuanto a su utilización debido en parte a la dificultad que implica obtener datos confiables para las evaluaciones más complejas. Generalmente se clasifican en:

a) Métodos de base teórica. Estos métodos se basan en diversas teorías de distribución de esfuerzos y se aplican en forma práctica para diseño pavimentos de aeropistas y carreteras.

b) Métodos semiempíricos. Aplican las teorías desarrolladas hasta la fecha para predecir el comportamiento del pavimento; dichas teorías se modifican conforme se obtienen los resultados de experimentos de laboratorio. Los métodos Mc Leod, Hveem y el del CBR están dentro de este grupo

c) **Métodos empíricos.** Se fundamentan en la observación y la experiencia. La agencia federal de aviación de los estados unidos desarrolló un método de este tipo.

Actualmente el proceso de diseño de pavimentos deja atrás los métodos empíricos, usados en la actual Guía de Diseño del AASHTO de 1993 y sus predecesores, para empezar a usar modelos que a su vez están basados en modelos mecánicos y en correlaciones con las propiedades fundamentales de los materiales.

Así pues, hoy en día se emplea el diseño de pavimentos con métodos mecánico – empíricos para calcular la respuesta estructural del pavimento y predecir los deterioros que pueden ocurrir en la vida útil del mismo. Los esquemas de predicción del comportamiento se corrigen continuamente con las evaluaciones del pavimento en servicio. Un método Mecánico - empírico considera esfuerzos, deformaciones, temperatura y tiempo, utilizando el método del elemento finito con programas de computación.

El diseño mecánico-empírico se basa en simulaciones y predicciones realizadas con modelos que **analizan el impacto de cada uno de los agentes que intervienen en la vida útil del pavimento.** Con dichos modelos se pueden evaluar **distintas cantidades de tráfico, o distintos tipos de materiales en pavimentos flexibles (asfalto) y rígidos (concreto), los efectos climáticos por temperatura y humedad y su envejecimiento respectivo.** Estos modelos pueden ser **recalibrados y validados continuamente** con la adquisición de mayores y más detallados datos **del comportamiento del pavimento en servicio.**

Para familiarizar al lector con los diversos métodos de diseño de pavimentos se describen a continuación los más empleados y populares que se han aceptado internacionalmente.

II.3.2.- MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.

En general los métodos de diseño determinan los espesores de las diferentes capas que integran al pavimento; los mas empleados buscan controlar plenamente los factores que intervienen en la construcción de estas estructuras y su comportamiento ante sollicitaciones de servicio e intemperismo; sin embargo siguen existiendo en ellos la incertidumbre asociada a cada parámetro que emplean. Para minimizar esta incertidumbre en la práctica se aplican especificaciones estrictas para los materiales y el proceso constructivo a utilizar. En pavimentos flexibles los métodos de diseño más empleados se describen a continuación.

II.3.2.1.- MÉTODO AASHTO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES

En la actualidad se utilizan internacionalmente los métodos aprobados por la AASHTO para el diseño de pavimentos. A continuación se describe el método aplicado en pavimentos flexibles.

En pavimentos flexibles, este método presenta procedimientos con ecuaciones de regresión, resultado de los ensayos en tramos de prueba. Dicho método se clasifica como **mecanicista** porque toma como parámetros fundamentales al **módulo de resiliencia y las propiedades elásticas de los materiales.**

Este método de diseño de pavimentos flexibles **determina el número estructural SN para que el pavimento pueda soportar las determinadas cargas mediante la siguiente expresión:**

$$\log_{10} W_{18} = Z_R * S_0 + 9.36 \log_{10}(SN+1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10} M_R - 8.07 \quad \dots \text{ Ec. II.3.2.4.1}$$

En donde:

W_{18} : Es el número admisible de ejes equivalentes de 18000lb. (92ton)

Z_R : Es la desviación normal estándar.

S_0 : Es la desviación estándar integral.

SN : Es el número estructural del pavimento.

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 m_3$$

ΔPSI : Diferencia entre los índices de servicio inicial y terminal.

$$P_0 - P_t$$

P_0 : Índice de servicio inicial.

P_t : Índice de servicio terminal.

M_R : Módulo de resiliencia, PSI.

m_2, m_3 : Coeficientes de drenaje.

a_1, a_2, a_3 : Coeficientes de capas representativos de la carpeta, base y sub-base.

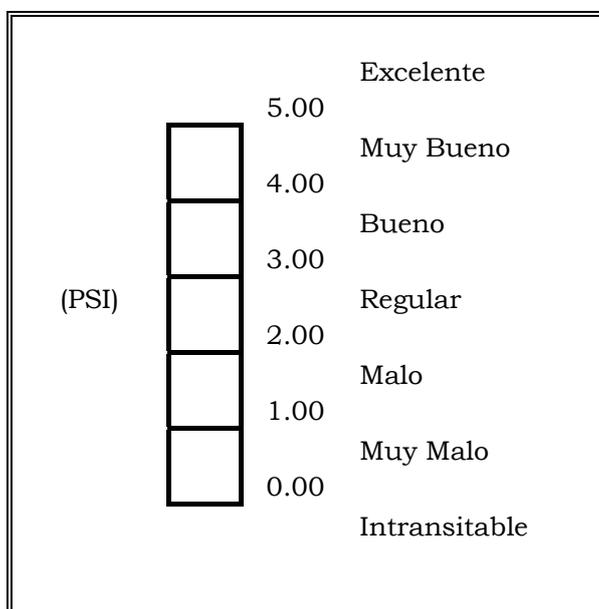
D_1, D_2, D_3 : Espesor de las capas de carpeta, base y sub-base en pulgadas.

II.3.2.1.1.- FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA ECUACIÓN.

II.3.2.1.1.A) SERVICIABILIDAD (FUNCIONALIDAD)

De acuerdo con la ASSHTO, la serviciabilidad o funcionalidad se define como la **habilidad para proporcionar un servicio adecuado al tránsito que lo usa. Adopta valores del 0.0 al 5.0 y representa diferentes niveles de servicio que dependen fundamentalmente de la rugosidad de la superficie.**

El índice de servicio actual (PSI, Present Serviabiability Index) define el nivel de calidad de la carpeta para una evaluación actual. Los niveles de 0.00 y 5.00 son extremos y casi nunca son alcanzados.



***Escala del índice de servicio actual (ISA)
o en sus siglas en inglés (PSI)***

El índice de servicio actual, P_0 , representa la condición del pavimento inmediatamente después de su construcción o rehabilitación. En la construcción actual y bajo el control y supervisión pertinentes, pueden lograrse índices de hasta 4.7 y 4.8. Se recomienda lograr un índice inicial de 4.5 que se usa para fines de diseño.

El índice de servicio terminal, P_t , se asigna al estado en el cual se prevé que el pavimento requiere algún tipo de rehabilitación para iniciar un nuevo ciclo de vida. Esto es, se relaciona con el tipo de carretera o elemento. En la siguiente tabla (Tabla 17) se muestran valores típicos que el proyectista de pavimentos puede usar para cada tipo de vialidad.

Tabla 17. Valores típicos del 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

La diferencia entre el índice de servicio inicial y el final sirve para identificar el periodo en el cual la carretera esta en condiciones de servicio, es decir, determina su ciclo de vida.

Entre los **factores que contribuyen a reducir el índice** de servicio están el **tránsito**, las **condiciones ambientales**, las condiciones de **drenaje**, etc.; por lo tanto, cada factor lleva implícito un porcentaje de la reducción total de las condiciones de servicio.

Para las condiciones ambientales, el ΔPSI_{SW-FH} se expresa en un valor entre 0.0 y 0.7. En el cálculo de la pérdida de servicio se usa la expresión:

$$\Delta PSI = \Delta PSI_{TR} + \Delta PSI_{SW-FH}$$

Donde:

ΔPSI_{TR} Es la reducción debida al tránsito

ΔPSI Es la pérdida de índice total en el ciclo de vida considerado.

ΔPSI_{SW-FH} Es la pérdida de índice de servicio debida a factores ambientales

II.3.2.1.1.B) TRÁNSITO, W18

En este método la acción del tránsito se representa con **la transformación del número de vehículos (de distintos pesos y distintas configuraciones) al número de ejes sencillos de 82KN ó 8.17ton**, que han de circular durante la vida útil de la estructura. Para ello se facilitan las **tablas de conversión que involucran** el efecto de otros factores como el **tipo de pavimento** (flexible o rígido), **tipo de eje** (sencillo, tándem, tridem), **magnitud de la carga en el eje**, el índice de **servicio final** y, en el caso de pavimento rígidos, el **espesor** de la losa del pavimento.

El número de ejes acumulados equivalentes de 82 KN depende de las características del tránsito que circulará en la vida útil del pavimento, las cargas correspondientes a cada tipo de eje y la tasa de crecimiento prevista. El método ASSHTO aconseja usar la siguiente expresión para determinar el **tránsito equivalente**:

$$W_{18} = D_D * D_L * w_{18}$$

Donde:

W_{18} : Es el tránsito acumulado en el primer año, en ejes acumulados sencillos, de 82KN (18000 lb), en el carril de diseño.

D_D : **Es el factor de distribución direccional, 50% en general.**

w_{18} : **Ejes acumulados equivalentes en ambas direcciones**

D_L : Es el **factor de distribución por carril**

La distribución del tránsito de manera transversal, se considera de acuerdo al número de carriles de la vialidad; a continuación se remiten algunos factores en la tabla 18.

Tabla 18. Factor de distribución por carril	
Número de carriles en cada dirección	Porcentaje del número de ejes equivalentes en el carril de diseño.
1	100
2	80-100
3	60-80
4	50-75

Cuando ya se conoce los ejes equivalentes acumulados en el primer año, se deberá calcular el correspondiente para todo el periodo de vida del pavimento, recurriendo a una tasa de crecimiento anual.

II.3.2.1.1.C) TIPOLOGÍA DE VEHÍCULOS.

Cada tipo de vehículo produce distinto grado de deterioro al circular sobre el pavimento, por ello el tránsito se clasifica como se observa en la tabla 25; a continuación se presentan los tipos de vehículos a considerar para el diseño de pavimentos.

Tabla 25. TIPOLOGÍA DE VEHÍCULOS AUTORIZADOS POR LA S.C.T. PARA CIRCULAR POR LAS VIALIDADES NACIONALES						
VEHÍCULO	DESIGNACIÓN	PESO POR EJE, TONELADA				
		1	2	3	4	5
Automóvil	A2	1	1			
Camión ligero con capacidad de carga hasta de 3 toneladas	A2	1.7	3.8			
Autobús de dos ejes	B2	5.5	10			
Autobús de 3 ejes	B3	5.5	14.0 D			
Autobús de 4 ejes	B4	7.0 D	14.0 D			
Camión de 2 ejes	C2	5.5	10			
Camión de 3 ejes	C3	5.5	18.0 - D			
Camión de 4 ejes	C4	5.5	22.5 - T			
Tractor de 2 ejes con un semirremolque de un eje	T2-S1	5.5	10	10		
Tractor de 2 ejes con un semirremolque de dos ejes	T2-S2	5.5	10	18.0-D		
Tractor de 3 ejes con un semirremolque de dos ejes	T3-S2	5.5	18.0 - D	18.0-D		
Tractor de 3 ejes con un semirremolque de tres ejes	T3-S3	5.5	18.0 - D	22.5 - T		

**Tabla 25. (CONTINUACIÓN) TIPOLOGÍA DE VEHÍCULOS
AUTORIZADOS POR LA S.C.T. PARA CIRCULAR POR LAS
VIALIDADES NACIONALES**

VEHÍCULO	DESIGNACIÓN	PESO POR EJE, TONELADA				
Camión de 2 ejes con remolque de dos ejes	C2-R2	5.5	10	10	10	
Camión de 3 ejes con remolque de dos ejes	C3-R2	5.5	18.0-D	10	10	
Camión de 3 ejes con remolque de tres ejes	C3-R3	5.5	18.0-D	10	18.0-D	
Tractor de 2 ejes con un semirremolque de un eje y remolque de dos ejes	T2-S1-R2	5.5	10	10	10	
Tractor de 2 ejes con un semirremolque de dos ejes y remolque de dos ejes	T2-S2-R2	5.5	10	18.0-D	10	10
Tractor de 3 ejes con un semirremolque de un eje y remolque de dos ejes	T3-S1-R2	5.5	18.0 - D	10	10	10
Tractor de 3 ejes con un semirremolque de dos ejes y remolque de dos ejes	T3-S2-R2	5.5	18.0 - D	18.0-D	10	10
Tractor de 3 ejes con un semirremolque de dos ejes y remolque de tres ejes	T3-S2-R3	5.5	18	18	10	10
Tractor de 3 ejes con un semirremolque de dos ejes y remolque de cuatro ejes	T3-S2-R4	5.5	18	18	18	18
D = Eje doble o tándem						
T = Eje triple o tridem						

II.3.2.1.1. D) PERIODO O CICLO DE PROYECTO.

Los periodos de diseño que se emplean en estructuras viales abarcan de 10 a 20 años, tiempo en el cual se alcanza el Índice Terminal de Servicio del Pavimento lo cual indica el término de su vida útil.

En el diseño de pavimentos el periodo de vida del pavimento es el tiempo que determina el número de ejes equivalentes acumulados que se admitirán durante su servicio. Y para determinar estos periodos se sugiere el uso de la siguiente tabla.

TABLA 26. PERIODOS O CICLOS DE PROYECTO DE ACUERDO CON EL TIPO DE VIALIDAD	
TIPO DE VIALIDAD	PERIODO DE PROYECTO
Urbana, con elevado nivel de tránsito	30-50
<u>Principal, con elevado nivel de tránsito</u>	<u>20-50</u>
Secundaria, con bajo nivel de tránsito	15-25

II.3.2.1.1.E) VOLUMEN DE TRÁNSITO Y SU TASA DE CRECIMIENTO.

Para el diseño del pavimento, el Método AASHTO considera el número de vehículos y su tasa de crecimiento anual; para su determinación, el proyectista puede recurrir a información de vialidades semejantes y a la información estadística que guarda la S. C. T.

El crecimiento del volumen vehicular puede estimarse con los datos del apéndice “D” de la Guía AASHTO de referencia. En dicha guía se usan factores de incremento de tránsito para diversas tasas de crecimiento de 0 a 10 y para periodos de análisis de 1 a 35 años. Con los factores propuestos y su multiplicación por el tránsito inicial, se obtiene el volumen de vehículos para el periodo de análisis.

II.3.2.1.1.F) COEFICIENTE DE DRENAJE.

La presencia de agua en los pavimentos puede saturar las capas de terracería y reducir su resistencia, con lo cual se genera la susceptibilidad a su deterioro. Cuando el agua fluye por las capas de base y sub-base, se presenta generalmente la expulsión de las partículas sólidas finas de los materiales granulares a través de grietas y juntas; este fenómeno provoca envejecimiento de carpetas, inestabilidad y agrietamientos por cambios volumétricos por variación de humedad y, en climas fríos, congelación y deshielo.

Ante este tipo de solicitudes el método de diseño **incorpora un coeficiente m_i que toma en consideración el buen o mal drenaje del pavimento.**

Tabla 27. Valores recomendados para el coeficiente de drenaje en 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	1.4-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.2
Buena	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.8
Mala	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.6
Muy mala	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.4

Cuando las condiciones de drenaje no afectan al pavimento, m_1 toma el valor unitario.

Si es menor que 1 (uno), el espesor requerido debe incrementarse, y para valores mayores de 1(uno), el espesor decrecerá.

Condición de Drenaje	Lapso 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

Tabla 28. Condiciones de drenaje para alcanzar el 50% de saturación

II.3.2.1.1.G) CONFIABILIDAD (R, ZR, So)

En la ecuación de diseño de este método la confiabilidad determina la **probabilidad de que el pavimento cumpla con la vida de diseño específico**. La experiencia en pavimentación demuestra que la curva de servicio del mismo describe una pérdida progresiva en varias de sus propiedades, hasta alcanzar su índice terminal. En esta situación, la **ASSHTO presenta una curva de comportamiento con un nivel de confianza R de 50%**. Es decir, que se considera que la probabilidad de que el pavimento cumpla su vida de diseño es del 50%. **Para valores mayores se recomiendan para vialidades sujetas a uso intenso y con mayores exigencias de un mantenimiento mínimo.**

Tabla 29. Niveles de confianza sugeridos para diferentes tipos de vialidades y carreteras.		
Tipo de vialidad	nivel de confianza	
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

El valor de confianza es el área de la distribución normal de serviciabilidad a la derecha del nivel de confianza elegido. La distancia entre el valor medio, equivalente a un valor de confianza de 50% y el correspondiente al nivel de confianza elegido para el caso en particular, es igual al producto:

$$ZR * So.$$

Donde:

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

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

Determinar **el valor So** se requiere conocer la desviación estándar para cada parámetro involucrado, teniendo en cuenta las condiciones locales; **se ha determinado un valor entre 0.3 y 0.4, que considera el error relativo de la predicción de tránsito.**

El parámetro **ZR** depende del nivel de confianza elegido y se obtiene estadísticamente de tablas. Algunos valores prácticos de ZR se presentan en base de los niveles de confianza recomendados anteriormente.

Tabla 30. Relación entre el nivel de confianza y la desviación normal estándar, ZR		
Nivel de confianza, R	Desviación normal estándar	ZR*So
50	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	-3.09	-1.082

II.3.2.1.1.H) MÓDULO DE RESILIENCIA (Mr)

Este parámetro **ha sustituido al valor de VRS y el valor R (módulo de reacción del estabilómetro de Hveen)**, como principal índice para diseño. Se obtiene con la especificación T-274 de la AASHTO y es una medida de la elasticidad del suelo.

Las razones para tomarlo como característica principal del pavimento, son:

- 1.- Es la propiedad que **indica el comportamiento del material y se usa en análisis de sistemas multicapa para predecir la rugosidad, agrietamientos, roderas, etc.**
- 2.- Se emplea **internacionalmente en la evaluación de pavimentos flexibles.**
- 3.- Su valor se obtiene de **pruebas no destructivas** en forma directa en el lugar de trabajo.
- 4.- **Se han determinado correlaciones razonables con el valor relativo de soporte VRS y el valor de R**, con las siguientes expresiones:

$$MR (\text{psi})^{*eq} = 1500 \times VRS$$

$$MR (\text{psi})^{*eq} = 1000 + 555 \times R$$

- 5.- **Las expresiones correspondientes a suelos finos o granulares cubren una amplia gama de materiales de terreno natural o terracerías de soporte para pavimento.**

Para su aplicación a suelos arcillosos y expansivos con muy bajo VRS habrá que tomar precauciones en la aplicación de las expresiones y hacer el análisis correspondiente.

*eq: 1 psi = 0.070307 Kg/cm²

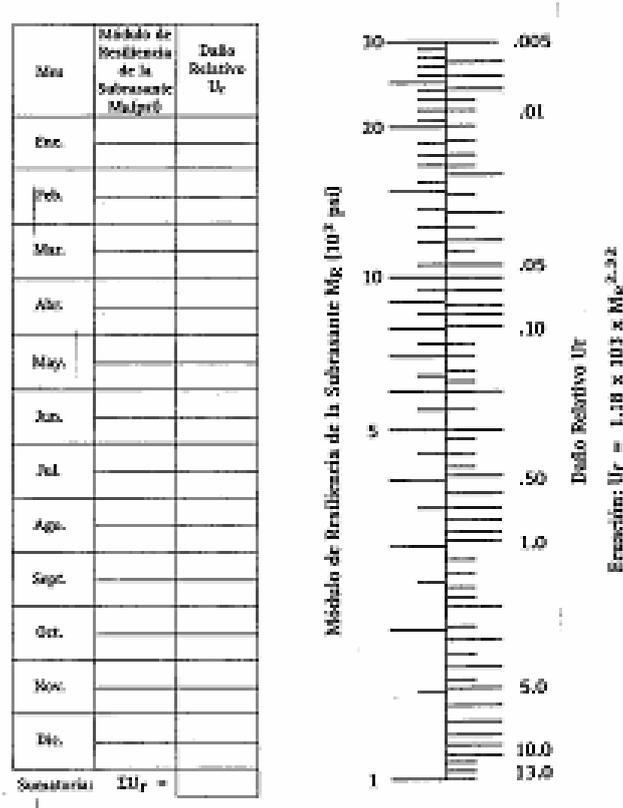
Dada la importancia del MR como parámetro de diseño y de evaluación de pavimentos, es necesario determinar su valor con las siguientes recomendaciones:

- 1.- **Cumplir con la compactación y densidad relativa de proyecto**, pues de esto se deriva el valor de MR.
- 2.- **En el caso de suelos expansivos se debe controlar estrictamente su contenido de humedad en límites razonables que no modifiquen adversamente su comportamiento**; se sugiere adoptar las medidas de **drenaje y sub-drenaje** necesarias o incluso recurrir al mejoramiento del suelo empleando la estabilización con algún cementante, con la adición de nuevos agregados o el empleo de geotextiles.
- 3.- Se pondrá **especial atención en aquellas zonas del pavimento sometidas a gran cantidad de escurrimiento por lluvias** y en aquellas donde haya colindancias con cuerpos de agua, contemplando obras especiales de sub-drenaje, capas drenantes, filtros, tuberías de drenaje adicionales y canales, etc.
- 4.- En suelos heterogéneos se sugiere aplicar un **tratamiento con escarificación, mezclado y recompactación**, atendiendo adecuadamente las zonas de cortes y rellenos.
- 5.- En general **cuando se trabaje con suelos cuyo contenido de materia orgánica es alto y sean en extremo deformables**, estos deben **sustituirse por materiales adecuados**, o bien deben ser tratados con **técnicas de preconsolidación**.
- 6.- **Cuando se trabaje sobre suelo de comportamiento cohesivo, el cual retiene mucho tiempo la humedad y no se puede compactar adecuadamente, se puede mezclar con materiales granulares, con arena o material seco, que faciliten el secado general de la mezcla y modulen su humedad**. También se puede colocar una capa subrasante con material adecuado para que sirva ésta como cimiento para la estructura del pavimento.

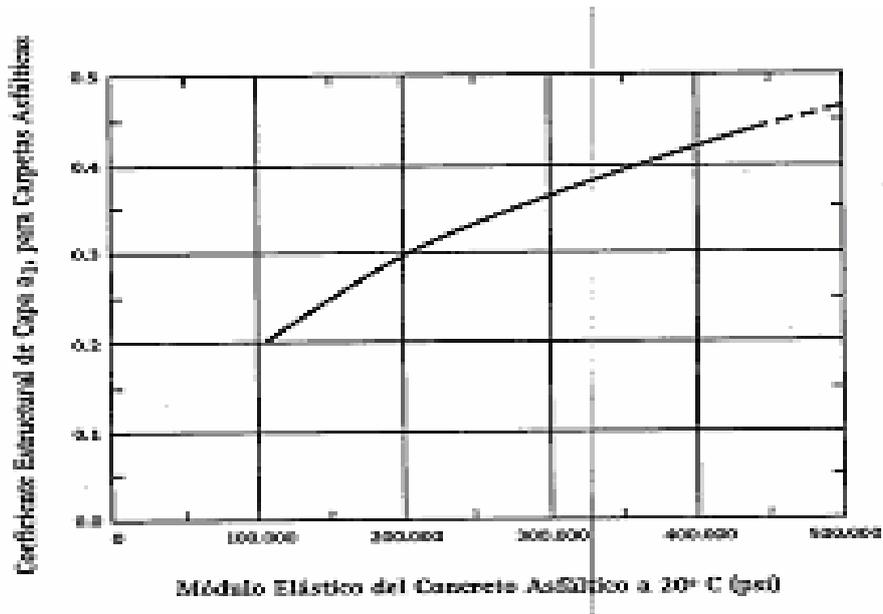
La determinación del MR ha llegado a un alto grado de especificación, donde su valor depende de los efectos climáticos estacionales a lo largo del año y se puede obtener un MR para cada contenido de humedad estacional. En general el valor del MR se obtiene utilizando algún equipo para medición de deflexiones sobre carreteras en servicio durante varias estaciones del año.

II.3.2.1.1.I) COEFICIENTE DE CAPA (ai)

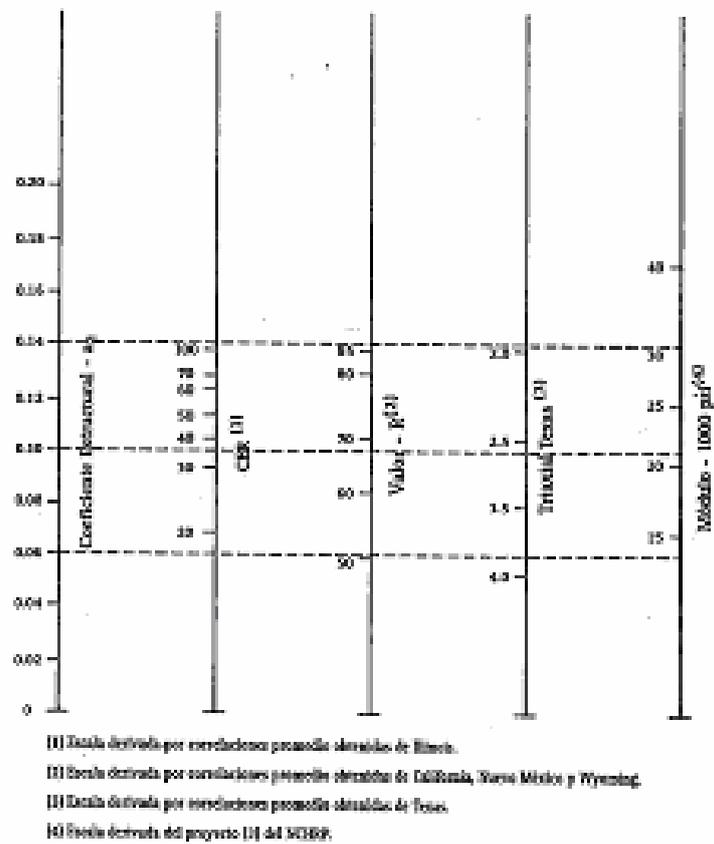
El método AASHTO para diseño de pavimentos flexibles ofrece gráficas para determinar los factores de capa, de acuerdo al valor del MR en los distintos materiales empleados para carpeta, base y sub-base. Dichos coeficientes de capa presentan el comportamiento mostrado en las Gráficas 21-26



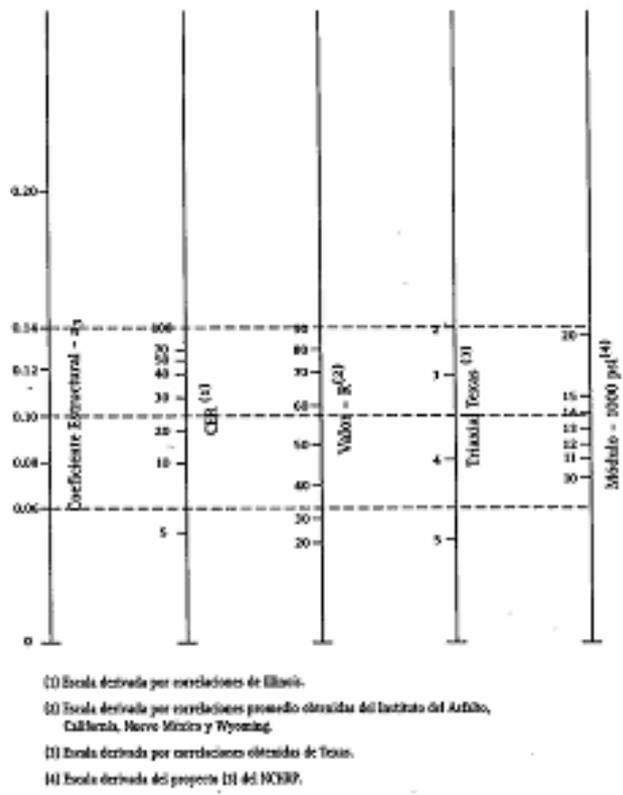
Gráfica 21. Gráfica con el formato para calcular el **módulo de resiliencia efectivo de la subrasante del pavimento flexible**.



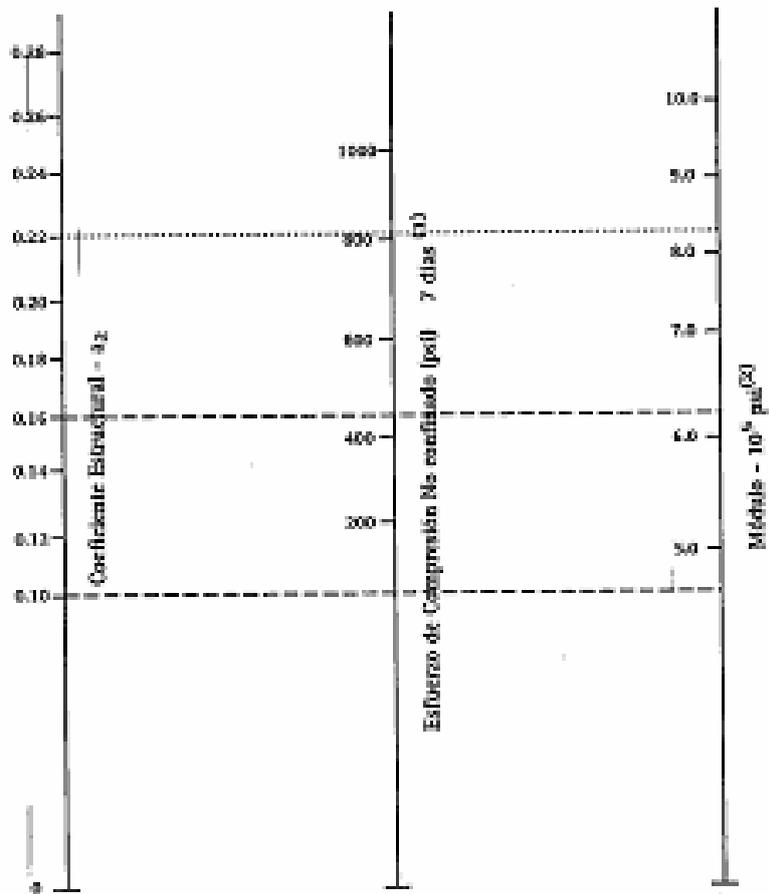
Gráfica 22. Variación del **coeficiente estructural de capa (a1)** en **función del módulo elástico del concreto asfáltico.**



Gráfica 23. Variación de los **coeficientes de capa (a2), en bases granulares.**



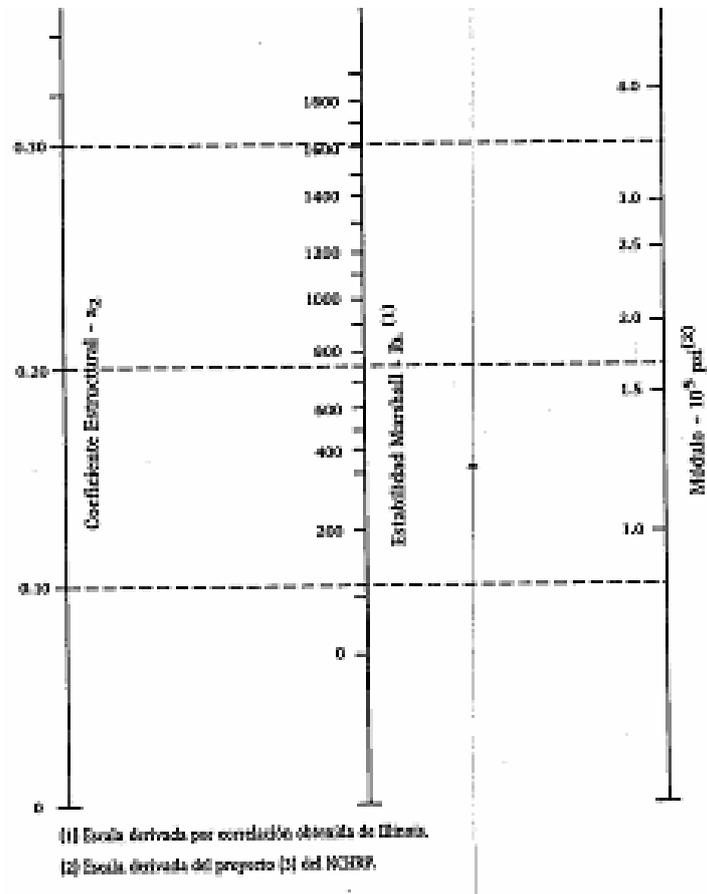
Gráfica 24. Variación de los **coeficientes de capa (a3), en sub-bases granulares.**



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

(2) Escala derivada del proyecto (1) de MICHIGAN.

Gráfica 25. Variación de los **coeficientes de capa (a_2)**, en bases estabilizadas con cemento Portland



Gráfica 26. Variación de los **coeficientes de capa (a_2)** en bases **estabilizadas con asfalto.**

II.3.2.1.2.- PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON EL MÉTODO AASHTO

1.- **Se utiliza el nomograma de la figura 40, asignando los valores convenientes del nivel de confianza, R, y a la desviación estándar, So** (Tabla. 29). El nivel de confianza varia de acuerdo al tipo de vialidad (Tabla 30), y el valor de So debe determinarse experimentalmente en función de la variabilidad observada en los materiales y de la calidad de la construcción, lo cual requiere un seguimiento constante; por eso, **en caso de no contar con experiencia local, puede tomarse un valor de 0.45. (REF*1).**

2.- **A continuación deberá aplicarse 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 de tránsito, por ejemplo aumentando el número de carriles. **Para elegir los factores de equivalencia, deberá considerarse el valor terminal del índice de servicio tomando en cuenta Pt y, a partir de un número estructural adecuado, en función del espesor esperado del pavimento, o considerando un valor de 5 si no se puede estimar y repetir el proceso si el número estructural obtenido implica una diferencia de espesor de 2.5 cm. en relación con el valor estimado.**

Para la obtención de los factores de equivalencia se recomienda usar las tablas de 19, 20, 21 para Pt de 2.0 y las tablas 22, 23, 24 para Pt de 2.5, todas disponibles en la referencia REF*1. Su identificación queda como sigue:

Tablas 19, 20, 21. Factores de equivalencia para cargas por ejes sencillos, tándem y ejes triples, todos con el Pt de 2.0

Tablas 22, 23, 24. Factores de equivalencia para cargas por ejes sencillos, tándem y ejes triples, todos con el Pt de 4.5

3.- Enseguida **se utilizará el módulo de resiliencia de la capa de apoyo del pavimento para determinar el valor del SN**, considerando además el decremento de serviciabilidad y teniendo en cuenta el valor Terminal de diseño y un valor inicial, de acuerdo a la calidad de la construcción. **Es conveniente que el valor inicial sea lo mayor posible, para cumplir satisfactoriamente con la vida de diseño.**

La figura 40 presenta en forma gráfica el procedimiento recomendado.

4.- **Finalmente se procede 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 40.

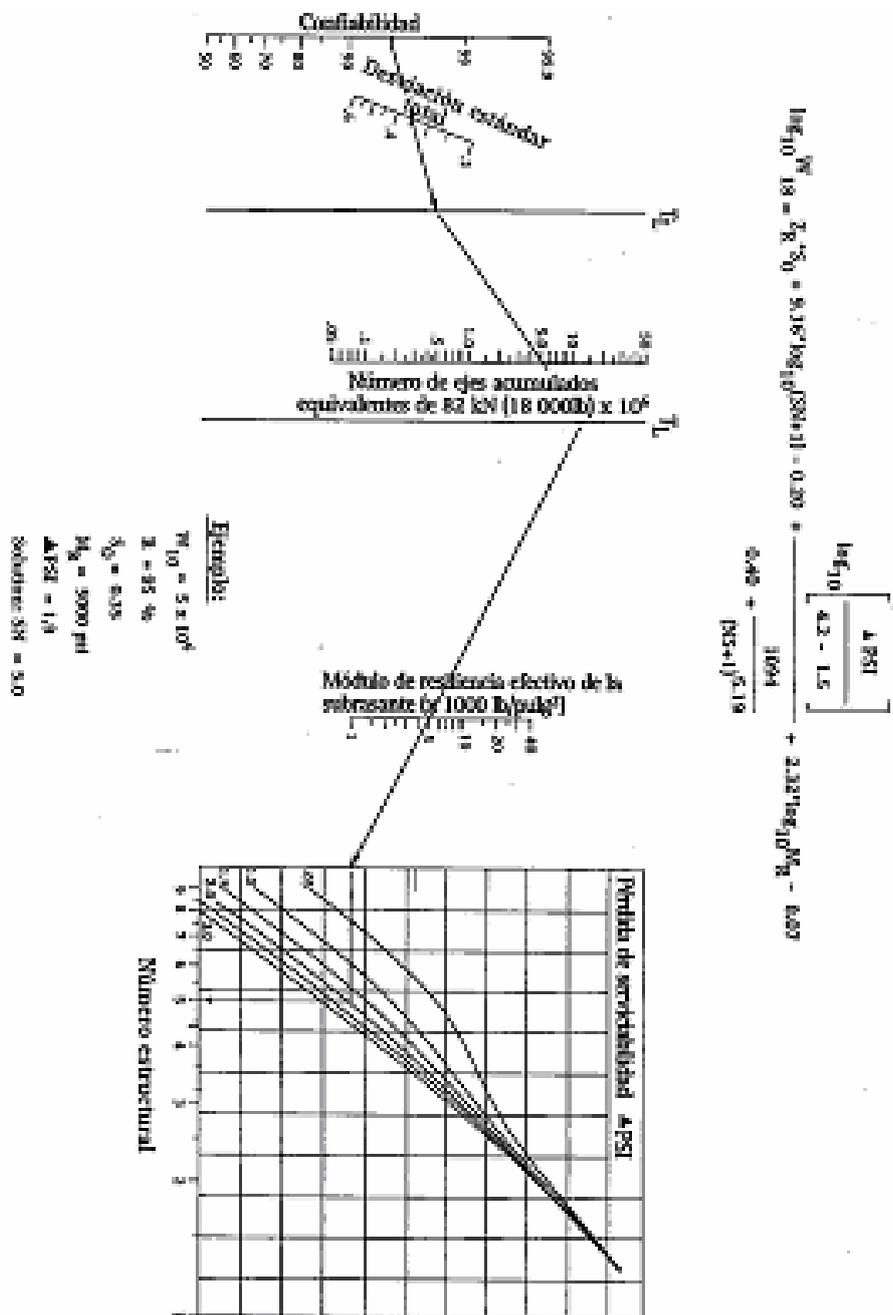
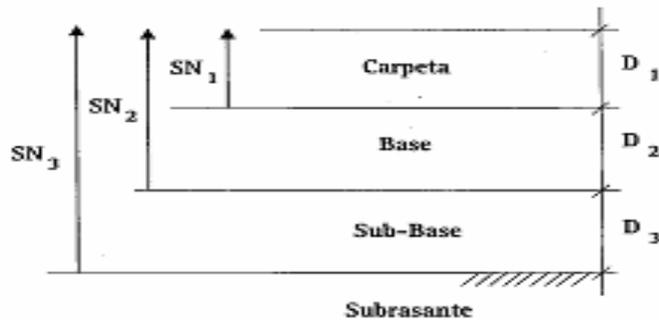


Figura 40. Nomograma para el diseño de pavimentos flexibles del método AASHTO



$$D^*_{1} \geq \frac{SN_{1}}{a_{1}}$$

$$SN^*_{1} = a_{1} D_{1} \geq SN_{1}$$

$$D^*_{2} \geq \frac{SN_{2} - SN^*_{1}}{a_{2} m_{2}}$$

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

$$D^*_{3} \geq \frac{SN_{3} - (SN^*_{1} + SN^*_{2})}{a_{3} m_{3}}$$

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

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

Figura 41. Procedimiento para encontrar el espesor de las capas

Este método de diseño hace algunas sugerencias sobre los espesores mínimos a utilizar para carpeta asfáltica y base granular de acuerdo al tránsito expresado con el número de ejes equivalente; dichas sugerencias se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 31. Espesor mínimo en cm.		
Tránsito acumulado equivalente	Concreto Asfáltico	Base Granular
< 5000	2.5 (1)	10
5000-150 000	5	10
150 000-500 000	6.5	10
500000-2 000 000	7.5	15
2 000 000-7 000 000	9	15
> 7 000 000	10	15

(1) o tratamiento superficial

II.3.2.2.- MÉTODO DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM.

Este es un método para diseño de pavimentos flexibles, respaldado por experimentos sobre tramos de prueba en carreteras en servicio, investigación teórica y experimentos de laboratorio.

Se publicó por el Instituto de Ingeniería (UNAM) en su artículo no. 444 en 1981; dicho artículo presenta la metodología de trabajo respecto a la utilización de gráficos, nomogramas y ecuaciones de diseño (REF*21)

Los perfeccionamientos del método han llevado a utilizarlo mediante un programa de cómputo conocido como dispav-5 que data desde 1999. Actualmente el método está preparado para ser manejado con la ayuda de gráficas o calculadoras programables.

El método de diseño posee características tales como:

- a) Análisis de secciones de 5 capas.
- b) Cálculo de deformación permanente mediante la aplicación de un modelo elástico-plástico.
- c) Cálculo de fatiga en las capas analizadas.
- d) Consta de conceptos teóricos de pavimentos.
- e) Se basa en tramos de prueba experimentales y pruebas de laboratorio
- f) Posee conceptos mecanicistas (refieren propiedades de los materiales con los que se elabora el pavimento y la influencia de estos en el comportamiento de la estructura en servicio).
- g) En el análisis toma en cuenta deformación permanente, agrietamiento y fatiga.
- h) Relaciona las propiedades mecanicistas de la mezcla con la temperatura, frecuencia e intensidad de la carga y las variaciones en módulo de elasticidad durante el servicio del pavimento.
- i) Se puede aplicar a carreteras de altas especificaciones.
- j) Para su aplicación se supone que la carpeta asfáltica está bien diseñada.
- k) Su utilización requiere de experimentación y buen juicio del proyectista.

II.3.2.2.1.- DATOS DE ENTRADA

El método requiere de datos de entrada como:

- Tipo de carretera
- Número de carriles
- Vida de proyecto
- Tránsito diario promedio anual (TDPA)
- Tasa de crecimiento
- Variables adicionales sobre características del terreno y materiales
- Clima
- Nivel freático
- Precipitación pluvial

II.3.2.2.2.- PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

1.- A partir del tránsito de proyecto y de las características mecánicas de materiales conocidos se **determina el espesor de la capa de proyecto.**

2.- Posteriormente **se determinación la vida previsible por deformaciones permanentes y agrietamientos por fatiga del sistema de capas analizado**

II.3.2.2.3.- CONDICIONES DE DISEÑO

1.- **Se emplea para el diseño de pavimentos de altas especificaciones** con necesidad de conservar un nivel de servicio alto de superficie de rodamiento en su vida de servicio.

2.- **La deformación permanente que indica el final de la vida útil del pavimento es de 1.2cm**, la cual se considera como el percentil 80 de la deformación máxima, aceptando entonces un agrietamiento de ligero a medio.

3.- **En pavimentos convencionales, la deformación que indica el fin de su vida útil es de 2.5cm con agrietamiento medio a fuerte, requiriendo considerable mantenimiento rutinario.**

Este método recalca la importancia de la calidad del proceso constructivo y su mantenimiento adecuado del pavimento para que esta estructura sea resistente, segura y cómoda para el usuario.

II.3.2.2.4.- PARÁMETROS EN EL MÉTODO DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA

II.3.2.2.4.1.- TRÁNSITO DE PROYECTO

Primero se procesan los datos de del tránsito como el TDPA inicial, su tasa de crecimiento en porcentaje anual y la composición vehicular detallada, que consideran todo tipo de vehiculo utilizado en México.

Mediante el uso de una subrutina llamada transit 5, se puede calcular el tránsito de proyecto, con el cual se diseña cada capa del pavimento por fatiga y deformación permanente acumulada; para ambos casos **se usan ejes sencillos con llantas gemelas y peso estándar de 82kn (8.2ton). Como paso intermedio se calculan los coeficientes de daño a diferentes profundidades, desde 5 hasta 120cm.**

En el análisis del tránsito equivalente se calcula el tránsito acumulado (ΣL), para el cual el método requiere de los coeficientes de daño a diferentes profundidades de la estructura del pavimento. En este ultimo procedimiento se usan las tablas del método de diseño del Instituto de Ingeniería, reporte No. 444 o **con la ecuación general 16 REF*21.**

$$\log d_i = \frac{\log \sigma_{z_i} - \log \sigma_{z(eq)}}{\log A} = \frac{\log (pF_{z_i}) - \log (5.8F_z)}{\log A}$$

Ecuación. 16. REF *21

Donde:

- di = Coeficiente de daño equivalente en la capa i.
- oz = Esfuerzo a la profundidad z, en Kg/cm².
- p = Peso del eje, en Kg.
- Fz = Coeficiente de influencia de Boussinesq a la profundidad z.
- A = Constante experimental.
- z = Profundidad en cm.
- 5.8 = Presión de contacto de la llanta en Kg/cm².

Así pues, se calculan los coeficientes de daño para la carpeta y base a una profundidad Z=0cm con la expresión. Esta misma expresión es usa para calcular los coeficientes de daño en el resto de la estructura con la profundidad Z=30cm. Ambos cálculos se realizan para cada vehículo tanto en condiciones de carga reglamentada como vacíos.

Ya determinados los coeficientes de daño para todos y cada uno de los vehículos vacíos y cargados a las profundidades $Z = 0$ y $Z = 30$, se multiplican por la composición del tránsito en porcentaje, obteniéndose así el número de ejes equivalentes para cada vehículo y para cada profundidad. Al efectuar la sumatoria de tales valores en el carril de proyecto por el coeficiente de acumulación del tránsito C_T (Ecuación 17) **REF*21** y por el valor de TDPA inicial, se obtendrá el tránsito equivalente acumulado ΣL para las capas de carpeta y base, y sub-base y terracerías respectivamente (Figura 50).

$$C_T = 365 \sum_{j=1}^n (1+r)^{j-1} = 365 \left[\frac{(1+r)^n - 1}{r} \right] \dots \text{Ecuación 17}$$

Donde: C_T = Coeficiente de acumulación del tránsito; n = Años de servicio; r = Tasa de crecimiento anual.

Figura 50. Formato para el cálculo del tránsito equivalente acumulado (ΣL).

CARRETERA: _____		HOJA: /					
TIPO DE VEHICULO	COMPOSICION DEL TRANSITO ①	COEFICIENTE DE DISTRIBUCION DE VEHICULOS CARGADOS O VACIOS ②	COMPOSICION DEL TRANSITO CARGADOS O VACIOS ③ = ① x ②	COEFICIENTES DE DAÑO		NUMERO DE EJES SENCILLOS EQUIVALENTES DE 8.2 ton	
				CARPETA Y BASE Z* ④	SUB-BASE Y TERRACERIAS Z* ⑤	CARPETA Y BASE ⑥ = ③ x ④	SUB-BASE Y TERRACERIAS ⑦ = ③ x ⑤
		CARGADOS					
		VACIOS					
		CARGADOS					
		VACIOS					
		CARGADOS					
		VACIOS					
		CARGADOS					
		VACIOS					
		CARGADOS					
		VACIOS					
		CARGADOS					
		VACIOS					
SUMAS	1.000	_____	1.000	EJES EQUIVALENTES PARA TRANSITO UNITARIO ⑧			
COEFICIENTE DE ACUMULACION DEL TRANSITO, $C_T = \left[\frac{(1+r)^n - 1}{r} \right] 365$				TDPA INICIAL EN EL CARRIL DE PROYECTO ⑨			
n = AÑOS DE SERVICIO = _____				C _T ⑩			
T = TASA DE CRECIMIENTO ANUAL DEL TRANSITO = _____ %				ΣL ⑪ = ⑧ x ⑨ x ⑩			
TOPA = TRANSITO DIARIO MEDIO ANUAL = _____				CD CARRIL PROYECTO = _____			

Como ayudas para el diseñador, en la tabla siguiente se indican los coeficientes de distribución de tránsito para el carril de proyecto.

Tabla 53. Distribución del tránsito en el carril de proyecto	
Número de carriles en ambas direcciones	Coefficiente de distribución en el carril de proyecto
2	50%
4	40-50%
6	30-40%

El tránsito equivalente de proyecto se clasifica en cuatro niveles y con ello se establecen espesores mínimos de capa según la tabla siguiente:

Tabla 54. Niveles de tránsito equivalente en el carril de proyecto	
Nivel de tránsito equivalente	Ejes equivalentes de 82kN
I	$T \leq 10^6$
II	$10^6 < T \leq 10^7$
III	$10^7 < T \leq 5 \times 10^7$
IV	$5 \times 10^7 < T$

II.3.2.2.4.2.- TIPO Y NÚMERO DE CAPAS CONSIDERADAS

Este programa analiza **5 secciones estructurales**:

- 1.- Carpeta Asfáltica**
- 2.- Base granular**
- 3.- Sub-base granular**
- 4.- Subrasante**
- 5.- Terracería**

Dos capas son el número mínimo de secciones que pueden ser consideradas; una de ellas debe ser la terracería, por lo cual la otra debe ser la carpeta o base.

Cuando se analizan las deflexiones de la sección estructural, la terracería se analiza es considerada como un medio semi-infinito.

Este método en general 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 REF*1.

II.3.2.2.4.3.- VALOR RELATIVO DE SOPORTE CRÍTICO.

El VRS es una variable importante para el método y debe ser cuidadosamente estimada, para que sea representativa de las condiciones esperadas en el camino en servicio. Se recomienda que en su elección se consulten los informes 325 y 444 de las series del instituto de ingeniería, de la UNAM. **REF*1**

Es un parámetro que indicara el comportamiento de las terracerías y demás capas a diseñar y se obtiene de pruebas de laboratorio para cada material propuesto. Las pruebas se aplican con tres diferentes energías de compactación: baja (AASHTO estándar), intermedia y alta (AASHTO modificada).

El proceso de compactación debe ser controlado en base del rango de humedad óptima y el grado de compactación requerido de proyecto.

Para la sub-rasante se requiere que en campo se calcule la humedad crítica esperada y el valor soporte crítico VRS_z correspondiente. En las demás capas, base y sub-base, el VRS_z se calcula con la siguiente expresión, donde interviene un coeficiente de variación estimado cuyo valor es de 0.2 a 0.3 y que considera cambios posibles de material, procedimiento de construcción, etc.

$$VRS_z = VRS_{prom} \times (1 - .84v)$$

Con VRS_{prom} = valor promedio de las medidas de laboratorio del VRS
Este valor de VRS_z se compara en el programa con los valores máximos y mínimos permisibles para cada capa. (Ver tablas 55 y 56)

Tabla 55. VRS_{max} para todos los niveles de tránsito	
Capa	VRS_{max} %
Base	120%
Sub-base	30%
Sub-rasante	20%
Terracerías	20%

Tabla 56. VRS_{min} para todos los niveles de tránsito	
Capa	VRS_{max} %
Base	70%
Terracerías	3%

En caso de VRS muy bajos en terracerías, se deben realizar estudios geotécnicos especiales que propongan alternativas de tratamiento para mejorar el comportamiento del pavimento.

II.3.2.2.4.4.- MÓDULOS ELÁSTICOS DE CAPAS NO ESTABILIZADAS

En el diseño por fatiga se requiere determinar el valor de máxima tensión en la fibra inferior de la carpeta, por ello se determinan primeramente los módulos de elasticidad de las capas no estabilizadas. Si no se conocen estos valores, es posible su estimación a partir del VRS_z crítico esperado del lugar:

$$E = 130 \times VRS_z^{0.7}$$

Estas relaciones deben tomarse con precaución, pues son empíricas y pueden ser modificadas por la experiencia del diseñador.

II.3.2.2.4.5.- MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DE LA CARPETA.

El valor del módulo de elasticidad de una carpeta asfáltica se determina según el tránsito para el cual se diseño la mezcla; puede ser para tránsito medio alto y ligero y este valor debe ser apto para las condiciones de servicio del pavimento, incluyendo la influencia de temperatura y el tiempo de aplicación de las cargas.

En el programa DISPAV, el usuario debe ingresar el valor del módulo obtenido en forma experimental, o bien puede estimarse a partir de la composición volumétrica, características el asfalto, frecuencia de aplicación de las cargas y temperatura. Esta estimación se realiza con el programa MÓDULO-5, que es la aplicación de un algoritmo desarrollado por la compañía Shell, el instituto de asfalto, M. W. Witczak y el Instituto de Transporte de Texas. **REF*1**

El programa MÓDULO-5 presenta una tabla de módulos obtenidos para cada procedimiento, dejando a criterio del diseñador la elección del más adecuado. Además presenta sugerencias de frecuencias de aplicación de cargas a diferentes profundidades, lo cual considera velocidades de operación normales en una carretera del orden de 90 km/hr. En carriles de velocidad baja y tránsito pesado se deba hacer la corrección correspondiente. **REF*1**

II.3.2.2.4.6.- RELACIÓN DE POISSON.

El programa permite al usuario aplicar las diferentes relaciones de Poisson para cada material empleado en las capas del pavimento.

II.3.2.2.4.7.- NIVEL DE CONFIANZA DEL PROYECTO.

El nivel de confianza es la probabilidad de que la vida útil del pavimento sea menor o igual a la de proyecto. Se sugiere un 85%, sin embargo pueden aplicarse desde 50% hasta 99%

II.3.2.2.5.- 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 determinaran 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 57

Tabla 57. Espesores mínimos de las capas de pavimentos, en cm.

CAPA	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				

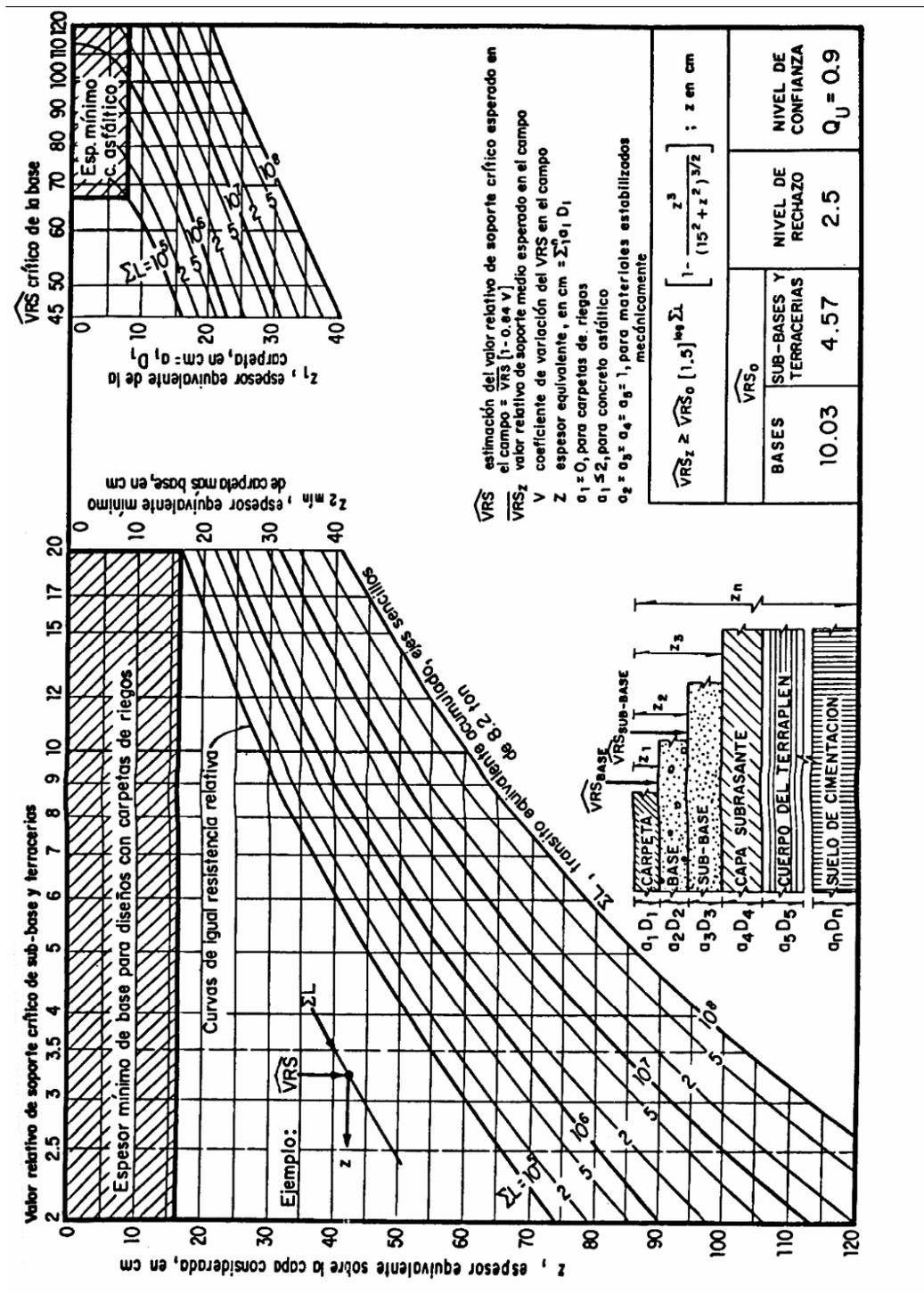
Para el caso de tránsito equivalente menos de un millón de ejes estándar, puede considerarse un tratamiento superficial sobre una base de buena calidad. Para tránsitos mayores es conveniente colocar una carpeta de concreto asfáltico, o base asfáltica con un tratamiento superficial.

II.3.2.2.6.- ESPEORES DE DISEÑO

El procedimiento para obtener los espesores de diseño de la sección estructural del pavimento flexible, incluye varios nomogramas que están en función del nivel de confianza que se elija, el Valor Relativo de Soporte Crítico de cada capa y el tránsito equivalente acumulado en ejes sencillos de 8.2 ton en el carril de proyecto.

Para complementar la información proporcionada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, sobre los coeficientes de daño, se puede consultar la información proporcionada por el Instituto Mexicano del Transporte en su Publicación Técnica No. 5, donde se trata con detalle el Análisis de los Coeficientes de Daño Unitarios correspondientes a los vehículos de carga autorizados en la Red Nacional de Carreteras Mexicanas. En dicho trabajo se analizan 15 diferentes vehículos de carga, proporcionando sus coeficientes de daño desde una profundidad de $Z = 0$, $Z = 15$, $Z = 30$, $Z = 60$, $Z = 80$, $Z = 100$ y hasta llegar a $Z = 120$ cm, para ver el daño en las capas inferiores de la sección estructural de un pavimento flexible, llegando hasta el cuerpo del terraplén. Además se reporta el coeficiente de daño “unitario” ponderado por carga útil, lo que auxiliará al proyectista para determinar el daño preciso en cualquier profundidad y para cualquier valor de carga; esto es, vacío, parcialmente cargado y cargado totalmente con la máxima carga legal permitida y aún los casos de vehículos con sobrecarga.
REF*22

GRÁFICA 20. GRÁFICA PARA DISEÑO ESTRUCTURAL DE CARRETERAS CON PAVIMENTO FLEXIBLE.



Nota: a₁D₁ = carpeta, D₁ espesor en cm, a₁ coeficiente equivalencia
 a₂D₂ = base, D₂ espesor en cm, a₂ coeficiente equivalencia
 a_nD_n = capa n, D_n espesor en cm, a_n coeficiente equivalencia

II.3.2.2.7.- REVISIÓN DEL DISEÑO POR EFECTOS DE FATIGA.

En la aplicación del método con el programa DISPAV-5, este último revisa la relación de módulos entre dos capas adyacentes no estabilizadas de la estructura propuesta, verificando que no sobrepase cierto límite; con ello se evita la generación teórica de esfuerzos de tensión excesivos en la parte inferior de la capa de rodamiento. REF*1.

La relación obtenida por la compañía Shell es:

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

Donde:

K = es la relación de módulos admisible y

H = espesor de la capa superior (mm.)

Cuando se excede esta relación de módulos, el programa propone un ajuste a los módulos de rigidez.

Con los módulos se calcula la deformación unitaria de tensión de la carpeta, para ello se hace uso del programa CHEV4, desarrollado por la compañía Chevron y adaptado en el instituto de Ingeniería de la UNAM (CHEV5), para 5 capas.

Con el valor calculado de la deformación unitaria de tensión en la carpeta, se determina la vida previsible por fatiga, empleando un modelo matemático, a partir del nivel de confianza elegido para el proyecto.

Por último se compara la vida previsible obtenida con el tránsito de proyecto y el resultado puede ser:

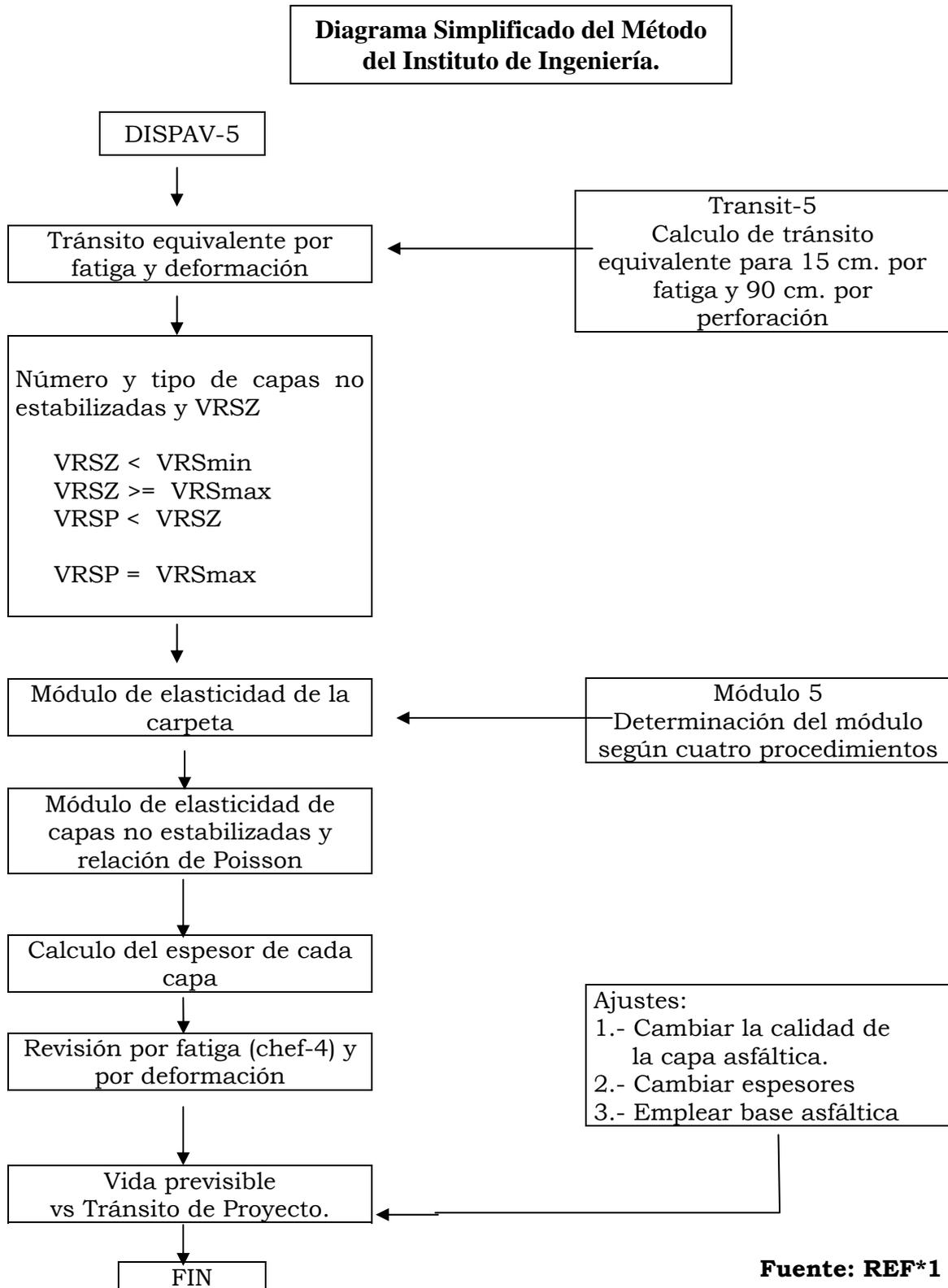
a) La vida previsible es menor que el tránsito de proyecto.

Dado que no se cubre con las necesidades de proyecto, se opta por cambiar las propiedades de las capas asfálticas; cambiar las propiedades de los demás materiales; aumentar el espesor de alguna de las capas, siempre respetando los espesores mínimos; o considerar la colocación de una base asfáltica. En este último caso, 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.

b) **Si la vida previsible esta dentro de un intervalo de (+/-) 10% del tránsito de proyecto,** se posee ya un diseño que satisface los requerimientos para evitar la deformación excesiva o la falla por fatiga de manera prematura, o ambos casos. En el mejor de los casos conviene que el diseño se encuentre sobrado, y se recomienda analizar diferentes alternativas de ajuste para buscar alguna solución más económica que siga siendo satisfactoria.

c) **Cuando la vida previsible es mayor que el tránsito de proyecto,** tanto la deformación como fatiga, están dentro del rango adecuado de resistencia y funcionalidad, pero se realiza un ajuste a los materiales o espesores, para llegar a un diseño mas aceptable.

En la figura siguiente (fig. 52) se remite el diagrama que ilustra la forma en que funciona el método del instituto de Ingeniería.



II.3.2.2.8.- CONSIDERACIONES ADICIONALES

Este método toma en cuenta define otras consideraciones adicionales al espesor y la configuración del pavimento, tales como las especificaciones de los materiales, el diseño de los acotamientos, la proyección del drenaje y subdrenaje, el texturizado y la rugosidad para asegurar la resistencia la derrapamiento, entre otras.

II.3.2.2.8.1.- ACOTAMIENTOS.

Los acotamientos son las franjas de pavimentos para estacionamiento temporal en caso de emergencia, descanso y eventualmente tránsito de vehículos en caso de accidentes o reparaciones al camino. En el caso de contar con ellos como un carril adicional, se deberán tener iguales propiedades a las presentes en un carril común de circulación. En caso contrario, el Instituto de Asfalto recomienda que su pavimento sea diseñado para un tránsito equivalente de 2% del utilizado en el carril de diseño.

El método de catalogo español, recomienda para acotamientos de anchura menor de 1.25m, su pavimento se considere y se diseñe como una extensión del carril de diseño. Para ancho de acotamiento mayor de 1.25m. se recomiendan las siguientes características:

Tabla 58. Diseño de acotamientos según el catalogo español. REF*22

Tipo de 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 circulación normal		

II.3.2.2.8.2.- MATERIALES

El comportamiento ante el agua, la temperatura y fatiga de los materiales de un pavimento resulta muy complejo; la incertidumbre asociada a cada una de estos factores incide de forma negativa en el diseño de pavimento; por ello, en este proceso se trata predecir la vida útil de pavimento, aplicando estrictos criterios que rigen la calidad de los materiales y el proceso constructivo del pavimento. En los materiales este control se presenta en especificaciones de granulometría, de la forma de partículas, contenido de finos, origen de los materiales, etc.

Los organismos como la ASSHTO 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. Además, en general es necesario realizar ensayos sobre la durabilidad y comportamiento a la fatiga.

II.3.2.2.8.3.- DRENAJE Y SUB-DRENAJE.

El agua y su flujo en pavimento es un factor de deterioro que se controla con sistemas eficientes de drenaje; estos sistemas deben permitir el rápido desalojo del agua para evitar la concentración tanto en cualquiera de las capas del pavimento, incluida la sub-rasante.

El drenaje superficial del pavimento debe cumplir con las siguientes funciones:

Pendiente transversal del por lo menos 1%

No se admiten depresiones en la superficie que puedan provocar encharcamientos.

El texturizado deberá facilitar la labor de desalojo de agua.

No se debe presentar encharcamiento en los acotamientos.

Las juntas deben construirse adecuadamente para no generar encharcamientos.

En lo referente al sub-drenaje:

Para pavimentos de tránsito pesado, en caso de que sea necesario, deben considerarse capas permeables para evitar el fenómeno de bombeo.

Pueden emplearse geotextiles, geodrenes, con la asesoría pertinente de un especialista en obras de drenaje.

II.3.2.2.8.4.- TEXTURIZADO

La textura se diseña para el rápido desalojo de agua; en la superficie de rodamiento se presenta el escurrimiento de agua de las lluvias, y en caso de de texturas que concentren el agua en la superficie, puede presentarse el efecto de hidroplanéo para autos que circulan a altas velocidades, siendo este fenómeno un deslizamiento ocasionado por la formación de una película de agua entre los neumáticos y la superficie de rodamiento. Con la finalidad de eliminar evitar la ocurrencia del fenómeno, a los pavimentos se les dota de una textura adecuada al ambiente de la zona carretera y según la velocidad de diseño de esta última.

La textura adecuada de la superficie de rodamiento generalmente se logra con la aplicación de carpetas de rodamiento con texturas gruesas y agregados no pulimentables.

II.3.2.2.8.5.- RUGOSIDAD.

Este parámetro sirve para evaluar la calidad del rodamiento. SE asocia con la comodidad del usuario y la seguridad del mismo. Una rugosidad adecuada al pavimento, tiene como características:

Las irregularidades del pavimento que se controlan con una regla móvil de 3(m.) de longitud y provista de un registrador gráfico, no deben ser mayores de 3(mm.) en dirección longitudinal y 6(mm.) en dirección transversal. La uniformidad superficial de un lote, media por el índice de perfil, determinado con un perfilógrafo tipo California, no debe ser superior al límite indicado en la tabla 59, de acuerdo con el tipo de vialidad.

Tabla 59. Valores recomendados para el índice de perfil		
Tipo de Vialidad.	Índice de Perfil aceptable para una velocidad de operación, cm./Km.	
	<= 75Km./hr.	> 75Km./hr
Autopistas y carreteras de primer orden en tangentes y curvas de radio mayor a 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	47.3	47.3
Carreteras secundarias	47.3	47.3

Cuando las irregularidades exceden los 3mm., pero son menores a 13mm, la superficie del pavimento puede corregirse por rebajado o fresado, cuidando solamente que no se produzca una superficie una superficie lisa.

Por lo que respecta al índice de perfil, este se correlaciona con el índice actual de servicio (ISA) según la tabla siguiente:

Tabla 60. 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	4.8
12	4.3
FUENTE: REF*1	

En esta correlación, la referencia **REF*1** menciona un ejemplo útil para comprender como se relacionan estos parámetros: **La diferencia entre 4.8 y 4.3 ISA, indica una diferencia de 5 a 18.9 cm./Km.,** lo que significaría aproximadamente un 20% mas de ejes acumulados de 8.2 ton.

II.3.2.2.8.6.- RESISTENCIA AL DERRAMAMIENTO.

Este parámetro indica la seguridad del usuario y depende de la textura de la superficie de rodamiento. Se mide en condiciones de superficie mojada con un dispositivo de medición continua. Este aparato es del tipo Mu-meter o similar. Generalmente se debe apegar a las siguientes especificaciones:

Tabla 61. Valores recomendados de resistencia al derrapamiento en condiciones de superficie mojada.		
Tipo de vialidad	Velocidad de Prueba (Km./hr)	Resistencia mínima al derrapamiento.
Autopista y carreteras de primer orden	95, 65	0.60, 0.70
Normativa SCT	75	0.60

Fuente: REF*21

Esta resistencia al derrapamiento depende directamente de la textura, la cual se define a su vez en función del diseño de la mezcla (materiales), el proceso constructivo (básicamente tendido y compactación) y las condiciones de operación del pavimento.

Cuando no se cumple con las condiciones de derrapamiento especificadas, se debe rebajar o fresar el pavimento para definir la textura adecuada, o bien puede aplicarse un tratamiento superficial, siendo esta última solución más costosa.

De esta manera se concluye con la descripción del método del instituto de ingeniería para el diseño de pavimentos flexibles, y ahora es conveniente abordar los métodos de diseño de pavimentos rígidos.

II.3.3.-MÉTODO ASSHTO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO.

Este método con aplicación a l diseño de pavimentos rígidos está respaldado por la siguiente cronología:

En 1961 se publicó la primer guía AASHTO para diseño de pavimentos rígidos y flexibles

En 1972 se realizó la primera revisión y se publicó la guía AASHTO para diseño de estructura de pavimento

En 1986 se publica la revisión de esta guía.

En 1993 se realiza la revisión del diseño de sobrecarpetas de pavimento.

En 1998 se publica un modo alternativo para el diseño de pavimentos.

(1983-1993) La fórmula general a la que se llegó para diseño de pavimentos rígidos fue:

$$\log_{10} W_{18} = Z_R * S_0 + 7.35 \log_{10} (D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 * pt) * \log_{10} \left[\frac{S'_c * Cd * (D^{0.75} - 1.132)}{215.3 * J * \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{(Ec/k)^{0.25}} \right]} \right]$$

II.3.3.1.- PROCEDIMIENTO DE DISEÑO AASHTO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS

Consiste en suponer un espesor de pavimento y realizar tanteos de resistencia de las capas propuestas. Con el espesor supuesto se calcula el número de ejes equivalentes que soporta en un periodo dado y se evalúan los factores adicionales de diseño. Cuando se cumpla el equilibrio de la ecuación, el espesor supuesto será el adecuado para el problema; en caso contrario se hacen tanteos tomando como valor de pivote el resultado anterior del espesor; el método converge rápidamente.

Es importante hacer notar que en el diseño de pavimentos el acero de refuerzo prácticamente no aumenta su capacidad de soporte, pues el pavimento se apoya en toda la superficie de la base y en su servicio no admite deformaciones que puedan hacer trabajar el acero de refuerzo.

El diseño de pavimentos rígidos con esta ecuación requiere **el conocimiento de cada una de las variables que intervienen**, de las cuales se hará una breve descripción, pues algunas ya han sido tratadas con anterioridad.

II.3.3.2 VARIABLES DE DISEÑO.

Las variables de diseño que se consideran en este método son:

- 1.- Espesor**
- 2.- Serviciabilidad**
- 3.- Tránsito**
- 4.- Transferencia de carga**
- 5.- Propiedades del concreto**
- 6.- Resistencia de la Sub-rasante**
- 7.- Drenaje**
- 8.- Confiabilidad**

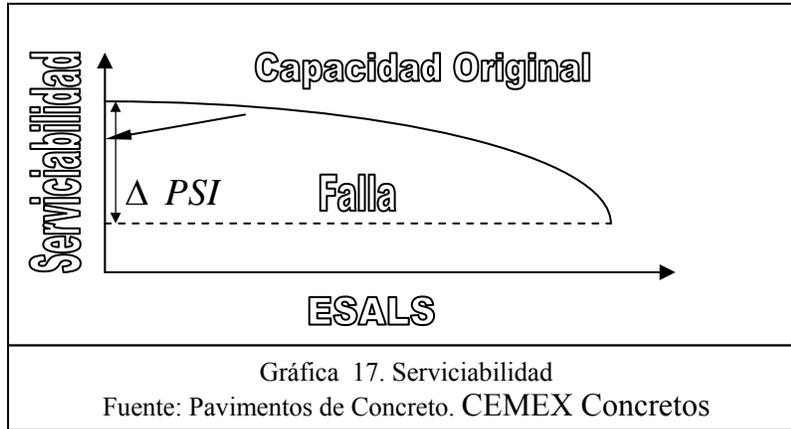
II.3.3.2.1.- ESPESOR

Es la **variable a determinar** y esta interrelacionada con todas las demás variables de diseño

II.3.3.2.2.- SERVICIABILIDAD O FUNCIONALIDAD

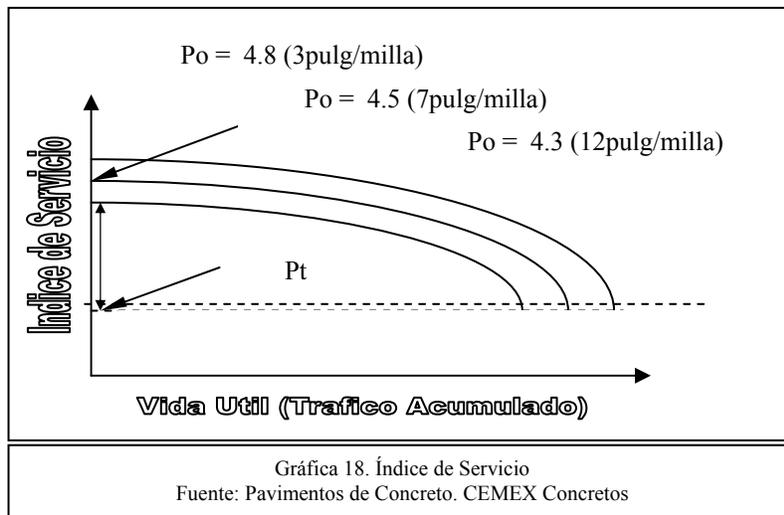
Se define como **la facilidad para circular sobre el pavimento y se describió anteriormente.** Este parámetro varía de acuerdo al índice de perfil, el índice de rugosidad internacional, coeficiente de fricción, distancias de frenado y la visibilidad.

En el procedimiento de diseño se **predice el tiempo de pérdida de serviciabilidad, ΔPSI** para varios niveles de tránsito y cargas de ejes. Así pues, **un pavimento con un alto el ΔPSI tendrá mayor capacidad de carga antes de fallar.**



Para pavimentos de concreto la serviciabilidad inicial se representa como P_0 , y de acuerdo a los procedimiento constructivos empleados, la AASHTO propone no rebasar el valor de 4.5; en el caso del asfalto se sugiere usar un valor inicial de 4.2.

Es importante hacer notar que **en tanto mejor se construya un pavimento, mayor será su vida útil**, pues según estudios de CEMEX, estas curvas de serviciabilidad se comportan de manera paralela como se ve en la siguiente figura.



La serviciabilidad final (P_t) se fija según el grado de servicio que el diseñador estime adecuado para señalar el fin de la vida útil del pavimento.

II.3.3.2.3.- TRÁNSITO.

Predecir el tráfico de una carretera involucra gran incertidumbre, sin embargo se debe determinar lo más próxima posible para designar el tráfico de diseño del pavimento.

El método ASSTHO relaciona la vida útil del pavimento con el número de repeticiones de carga que deberá soportar el pavimento. El parámetro que considera el tránsito es **el número de ejes equivalentes, el cual se determina transformando primeramente los ejes de pesos normales de los vehículos que circularan por el pavimento, en ejes sencillo equivalentes de 18 kips (8.2 ton) también conocidos como ESAL`s.**

Inicialmente se selecciona un carril de diseño, el cual deberá ser el que mejor represente las **condiciones críticas de servicio**. En esta consideración, se hace un análisis de fatiga del pavimento de concreto; dicho análisis determinara la **vida útil del pavimento en base del número de repeticiones de carga a las que puede estar sometido antes de fallar.**

Generalmente la vida útil mínima a la que se debe diseñar un pavimento rígido es de 20 años, llegando incluso a diseñarse para 40 años, siempre y cuando se prevean las medidas de conservación adecuadas en forma oportuna.

La determinación de las repeticiones de carga se fundamenta en el **incremento anual del tránsito** (relacionado con **el desarrollo social y económico de la región** donde se ubicara el pavimento), con el **tráfico atraído y con la capacidad de tráfico de la vía proyectada**; generalmente varia entre valores del 3% y el 5%.

El tráfico que se presenta en un pavimento puede proyectarse para determinado periodo de servicio, como:

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

Donde:

Tvu: es el tráfico durante la vida útil del pavimento

Tpa: es el tráfico durante el primer año

FCT: es el factor de crecimiento del tráfico, que depende del crecimiento anual y de la vida útil.

II.3.3.2.3.1.- TASA DE CRECIMIENTO ANUAL

Respecto al crecimiento de la flota vehicular, como ya se menciona anteriormente, **depende de factores** tales como el desarrollo económico-social, la capacidad de aforo, etc.; **se ha observado que el incremento del tránsito es normal hasta que llega a un punto en que se mantiene sin crecer**, es decir, que el incremento del tránsito se hace cada vez más lento conforme se congestiona la vía.

Esta forma de incremento vehicular se determina con una tasa de crecimiento equivalente, que toma en cuenta las variaciones del tráfico durante su vida útil.

Algunos valores típicos de la tasa de crecimiento son:

CASO	TASA DE CRECIMIENTO
Crecimiento normal	1 a 3
Vías completamente saturadas	0 a 1
Con tráfico inducido	4 a 5
Alto crecimiento	mayor de 5

Tabla 32. Valores comunes de tasas de crecimiento
Fuente: Pavimentos de Concreto. CEMEX

II.3.3.2.3.2.- FACTOR DE CRECIMIENTO DEL TRÁFICO

Este factor toma en cuenta el número de **años de vida útil más un cierto número de años adicionales por crecimiento propio de la vía.**

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

Donde:

g = Tasa de Crecimiento

n = Años de vida útil

II.3.3.2.3.3.- FACTOR DE SENTIDO

Del total de tráfico que se estima para el diseño del pavimento se deberá determinar el correspondiente a cada sentido de circulación, recurriendo entonces al factor de sentido.

Un sentido de circulación	1.0
Doble sentido de circulación	2.0

II.3.3.2.3.4.- FACTOR DE CARRIL

Es un coeficiente que permite estimar un porcentaje de tráfico que circula por el carril de diseño. En una vía de un solo carril obviamente será 100% el tráfico que pasa por el carril de diseño; en una vía con dos carriles en el sentido de diseño, dependiendo del tipo de camino (carretero o urbano), y de que tan saturada este la vía, **puede ser que sobre el carril de diseño circule un 50% a 80% del tráfico en ese sentido.**

Valores recomendados por la AASHTO

Número de carriles	Factor De Carril
1	1.00
2	0.80 a 1.00
3	0.60 a 0.80
4	0.50 a 0.75

TABLA 34. FACTORES DE CARRIL

II.3.3.2.3.5.- FACTOR DE EQUIVALENCIA DEL TRÁNSITO

Las fórmulas que permiten **transformar el número de ejes de pesos normales a ejes equivalentes** dependen del espesor del pavimento, de la carga del eje, del tipo de eje y de la serviciabilidad final que se pretende para el pavimento.

$$Fec = - \frac{W_{t18}}{W_{tx}}$$

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

$$G_t = \text{Log} \frac{4.5 - Pt}{4.5 - 1.5}$$

$$\beta_x = 1 + \frac{3.63(L_x + L_2)^{5.20}}{(D + 1)^{8.45} (L_2)^{3.52}}$$

En donde:

W_{t18} = Número de aplicaciones de carga equivalente al final del tiempo t

W_{tx} = Número de aplicaciones de carga definida al final del tiempo t

L_x = Carga del eje en kips

L_2 = Código de eje cargado

$L_2 = 1$ para eje sencillo

$L_2 = 2$ para eje tándem

$L_2 = 3$ para eje tridem

$G_t = f(Pt)$

β_{18} = Valor de β_x cuando $L_x = 18$ y $L_2 = 1$

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

Respecto al uso del pavimento **es importante determinar lo mas exactamente posible el número y tipo de vehículos que circularan por el pavimento, pues cada tráfico genera diferente daño, siendo obviamente mas severo el daño que genera el tráfico pesado; por ejemplo, el daño de una sola aplicación de carga de un camión semi-remolque de 36 ton, equivale al daño que producen 9523 repeticiones de carga de un vehiculo tipo automóvil. REF*18**

También se debe **definir con la mayor certeza el peso de los ejes de los vehículos que circularan por el pavimento diseñado, con lo cual se pueden considerar sobrecargas menores, disminuyendo su efecto de daño y su crecimiento de orden exponencial.**

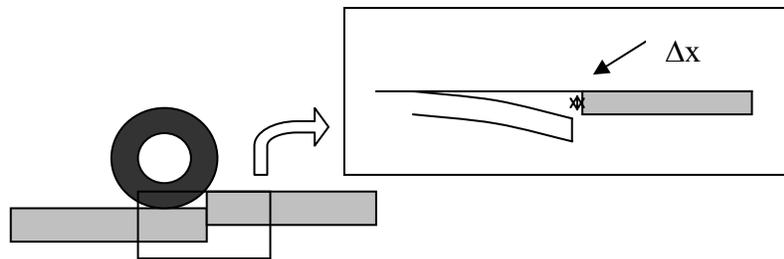
II.3.3.2.4.- TRANSFERENCIA DE CARGA

Es la capacidad de la capa de rodamiento para transmitir fuerzas cortantes con sus losas adyacentes, con la finalidad de minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura del pavimento.

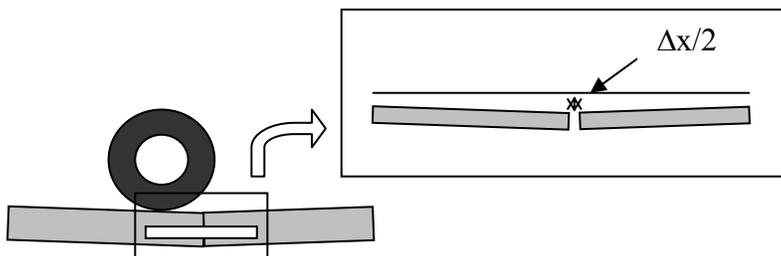
El método AASHTO considera la transferencia mediante el factor de transferencia de cargas **J**. La efectividad de la transferencia de carga entre losas adyacentes depende de varios factores:

1. Cantidad de Tráfico
2. Utilización de pasa juntas
3. Soporte Lateral de Losas

Una manera de transmitir la carga de una losa a otra es mediante la utilización de pasajuntas; esta es la manera que más conveniente para lograr la efectiva transferencia de carga; las investigaciones de la referencia 18 recomiendan utilizar **pasajuntas cuando el tráfico pesado sea mayor al 25% del tráfico total y cuando el número de ejes equivalentes de diseño sea mayor de 5.0 millones de ESAL'S**



Junta 0% efectiva: La carga la soporta solo una losa

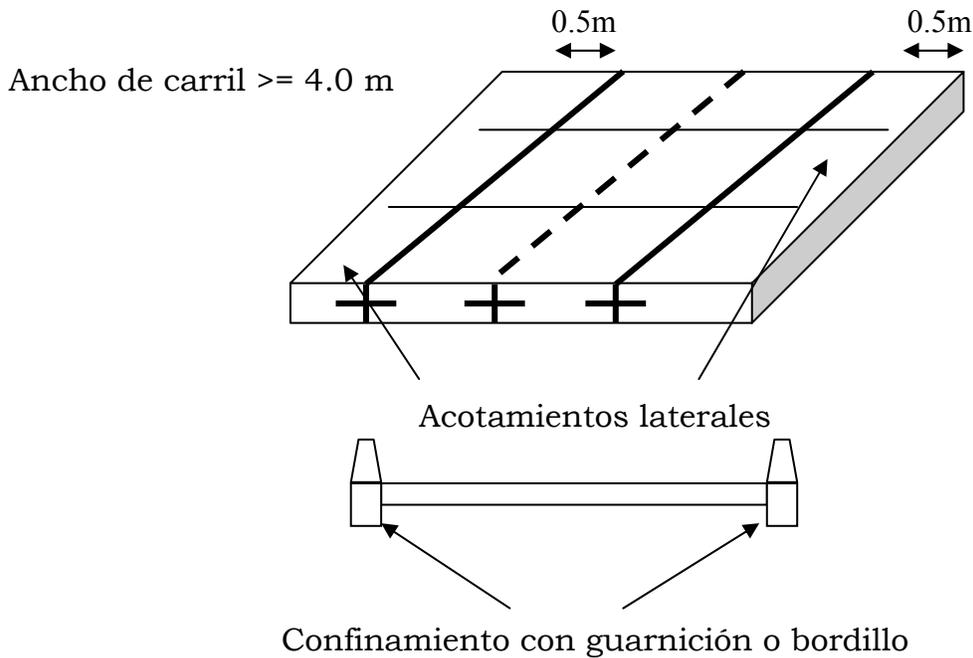


Junta 100% efectiva: La carga la soportan ambas losas

Figura No. 44 Esquema de pasajunta efectivo y defectuosos para pavimentos rígidos.

Una segunda forma de transmitir las cargas del pavimento al suelo es mediante el confinamiento con soporte lateral; este contribuye a reducir los esfuerzos máximos que se generan en el concreto por efecto de las cargas. Un pavimento de concreto puede considerarse lateralmente soportado cuando tenga alguna de las siguientes características en su sección:

Figura 45. Características de pavimento soportado lateralmente



Otra forma de transmitir las cargas entre las losas contiguas de un pavimento rígido es mediante pasajuntas. Estas son barras de acero redondas y lisas con $f_y = 4200$ Km./cm², a las cuales no se debe adherírseles el concreto con la finalidad de permitir el libre movimiento de las losas longitudinalmente, pero si se debe transferir verticalmente cierta proporción de la carga aplicada en una losa a la adyacente. Se colocan perfectamente alineadas a la mitad del espesor de la losa. **El diámetro, longitud y separación de la pasajuntas esta determinado principalmente por el espesor de la losa.**

Tabla 35. Recomendaciones prácticas para la sección de la barra.
Sección de la barra pasajuntas

Espesor de la losa	Diámetro	Longitud	Separación
cm.	cm.	cm.	cm.
13 a 15	19	41	30
15 a 20	25	46	30
20 a 30	32	46	30
30 a 43	38	51	38
43 a 50	45	56	46

Fuente: Pavimentos de concreto. CEMEX

II.3.3.2.5.- PROPIEDADES DEL CONCRETO

En el diseño de pavimentos rígidos se busca optimizar especialmente las propiedades del concreto que mejoren su comportamiento y amplíen su vida útil, entre las cuales pueden mencionarse:

- a) Resistencia a la tensión por flexión (S^c) o módulo de ruptura (MR)**
- b) Módulo de elasticidad del concreto (E_c)**

II.3.3.2.5.1- MÓDULO DE RUPTURA (MR)

El módulo de ruptura se mide mediante ensayos con vigas de concreto aplicándoles cargas en los tercio medios de su claro de apoyo. La prueba esta normalizada por la ASTM C78. Esta prueba se describe en el de conceptos básicos en lo referente a pavimentos rígidos. También se puede aplicar una prueba con la carga aplicada al centro de la viga, y se obtienen resultados diferentes de resistencia a la flexión (aproximadamente 15 a 20% mayores) pero no son los que se consideran en el método ASSHTO para el diseño.

Los valores aceptados para el módulo de ruptura varían desde los 41 Kg/cm² (583psi) hasta los 50 Kg/cm² (711psi) a los 28 días dependiendo del uso que vayan a tener. En la siguiente tabla se muestran algunos valores recomendados, que deben ser respaldados por la experiencia del diseñador.

Tabla 36. MÓDULO DE RUPTURA RECOMENDADO		
Tipo de pavimento	MR recomendado	
	Kg/cm²	Psi
Autopistas	48	682.7
Carreteras	48	682.7
Zonas industriales	45	640.1
Urbanas principales	45	640.1
Urbanas secundarias	42	597.4

Fuente: Pavimentos de concreto. CEMEX

II.3.3.2.5.2.- MÓDULO DE RUPTURA PROMEDIO

La metodología de diseño AASHTO permite usar la resistencia a la flexión promedio, obtenida de los ensayos a flexión de testigos elaborados con las mezclas de diseño. En todos los casos se recomienda emplear concreto premezclado en planta.

MR promedio = MR especificado + Zr x (Desviación estándar del MR)

Tabla 37. Valores típicos de la desviación estándar		
concreto premezclado	6 a 12 %	9.0%
Mezclado central	5 a 10%	7.5%

II.3.3.2.5.3.- MÓDULO DE ELASTICIDAD

Este módulo se relaciona con el módulo de ruptura y se obtiene con la prueba ASTM C469. **Existen varios criterios con los que se puede estimar el módulo de elasticidad a partir del de ruptura;** los criterios más empleados son:

$$E_c = 6750 * MR \dots I$$

$$E_c = 26454 * MR \ni 0.77 \dots II$$

Nota: Estas ecuaciones se emplean con unidades inglesas

II.3.3.2.6.- RESISTENCIA DE LA SUBRASANTE

La resistencia de la subrasante es otro parámetro requerido por la ecuación del diseño AASHTO para pavimentos rígidos, se mide con el módulo de reacción K, obtenido directamente con la prueba de placa y en general determina la capacidad portante que tiene el terreno natural en donde se soportara el cuerpo del pavimento. Para distintos valores de K a lo largo del tramo de diseño, el método AASHTO recomienda usar razonablemente el promedio de los módulos K para el diseño estructural.

II.3.3.2.6.1.- ESTIMACIONES Y CORRELACIONES DE K

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

CORRELACIÓN DE K Y EL VRS				
Tipo de suelo	SUCS	Densidad seca	CBR	K*
Grava	GW, GP	125 a 140	60 a 80	300 a 450
		120 a 130	35 a 60	300 a 400
Arena gruesa	SW	110 a 130	20 a 40	200 a 400
Arena fina	SP	105 a 120	15 a 25	150 a 300
Suelos de material granular con alto contenido de finos				
Grava – limosa	GM	130 a 145	40 a 80	300 a 500
Grava – areno – limosa				
Grava – arcillosa	GC	120 a 135	20 a 40	300 a 400
Grava – areno – arcillosa				
Arena – arcillosa	SC	105 a 130	10 a 20	150 a 350
Suelos de material fino**				
Limo		90 a 105	4 a 8	25 a 165
Limo – arenoso				
Limo – gravoso	ML, OL	100 a 125	5 a 15	40 a 220
Limo mal graduado	MH	80 a 100	4 a 8	25 a 190
Arcilla plástica	CL	100 a 125	5 a 15	25 a 255
Arcilla medianamente plástica	CL, OL	95 a 125	4 a 15	25 a 215
Arcilla altamente plástica				
Arcilla altamente plástica	CH, OH	80 a 110	3 a 5	40 a 220
* Estos rangos de K aplican para estratos heterogéneos de por lo menos 3 metros de espesor. Si un estrato de suelo de menos de 3 m existe sobre un suelo mas blando, el valor de K corresponde al del suelo blando inferior y se podrá considerar el incremento de K debido al estrato superior. Si por el contrario existiera un estrato de roca, el valor de K deberá ser ajustado				
** El Valor de K de los suelos finos depende en gran medida de grado de saturación por lo cual se recomienda hacer una correlación por este efecto.				
Tabla 38. Fuente: Pavimentos de Concreto CEMEX				

II.3.3.2.7.- DRENAJE

En este método también se considera la influencia del drenaje sobre el pavimento, pues dicho parámetro afecta directamente la durabilidad y el comportamiento de toda la estructura.

Cuando el agua penetra en la estructura del pavimento y queda atrapada en sus diversas capas, pueden presentarse los siguientes efectos nocivos:

Reducción de la resistencia de materiales granulares sin asfalto

Reducción de la resistencia de la subrasante

Expulsión de finos (Bombeo)

Levantamientos diferenciales de suelos expansivos

Expansión por congelamiento

En bases estabilizadas con cemento o relleno fluido se ve menos afección causada por el agua.

En general se debe evitar la presencia del agua en la estructura del soporte, pues puede provocar un daño estructural severo, dado su flujo o bien por efecto de cambios volumétricos de expansión y contracción del materia humedecido. Algunos aspectos de atención para drenaje adecuado son:

Mantener selladas perfectamente las juntas del pavimento.

Sellar las juntas entre el pavimento y el acotamiento, así como con la cuneta.

Usar cunetas, bordillos, lavaderos, contracunetas, subdrenajes, etc., para **desalojar el agua.**

Construir drenajes pluviales o aprovechar los existentes.

Para fines de diseño los valores aceptables para el coeficiente de drenaje deberán estar dentro del rango de 1.0 a 1.10

II.3.3.2.8.- CONFIABILIDAD

Algunos factores estadísticos que influyen en la certeza al estimar el comportamiento del pavimento y su vida útil, son:

- a) Confiabilidad
- b) Desviación Estándar

La confiabilidad es la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación. Por ejemplo, si se considera una confiabilidad del 80% se pierde un 20% de posibilidad de que las losas del pavimento alcancen en el fin de su vida útil, es decir hay 20% menos probabilidad de lograra un valor de serviciabilidad distinto al estimado como serviciabilidad de diseño del pavimento.

Clasificación funcional	Urbano	Rural
Autopistas	85-99%	80-99%
Carreteras principales	80-90%	75-99%
Colectoras	80-95%	75-95%
Locales	50-80%	50-80%

La confiabilidad es en cierta medida un factor de seguridad y de acuerdo con la referencia 18, se puede determinar con un porcentaje de la tabla 40, según el tipo de vialidad de proyecto.

Tabla 40. (%) de confiabilidad

Tipo de Pavimento	Confiabilidad
Autopistas	95%
Carreteras	80%
Rurales	70%
Zonas Industriales	65%
Urbanas principales	60%
Urbanas secundarias	50%

La confiabilidad puede correlacionarse con un factor de seguridad según la desviación estándar “So”, mediante el uso de la siguiente expresión:

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

Donde:

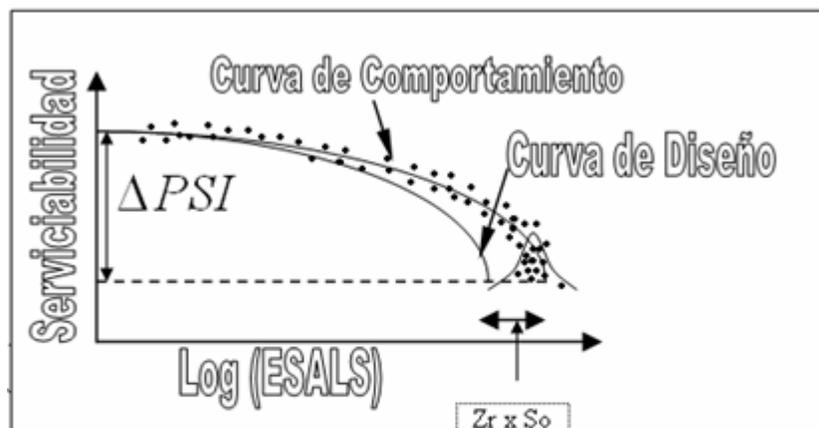
Z_r = desviación normal estándar para “R”,

S_o = desviación estándar

Algunos valores recomendados por la referencia 18 se observan en la tabla 40, y en la figura 46 se muestra la relación entre los parámetros S_o y Z_r.

Desviación Estándar (S _o)	Confiabilidad					
	50%	60%	70%	80%	90%	95%
0.30	1	1.19	1.44	1.79	2.42	3.12
0.35	1	1.23	1.53	1.97	2.81	3.76
0.39	1	1.26	1.60	2.13	3.16	4.38
0.40	1	1.26	1.62	2.17	3.26	4.55

Tabla 41. Factor de Seguridad AASHTO
Fuente: Pavimentos de Concreto
CEMEX



Grafica 19. Grafica de Serviciabilidad y diseño

Fuente: Pavimentos de Concreto. CEMEX Concretos

II.3.4.1.- MÉTODO PCA*1.

Este método se denomina PCA porque fue elaborado por la Portland Cement Association para el diseño de pavimentos rígidos y en general toma en consideración los siguientes factores:

II.3.4.1.1.- FACTORES DE DISEÑO

II.3.4.1.1.A) LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO EN PAVIMENTOS

Las cargas de tránsito en un pavimento generan esfuerzos de compresión y de flexión, lo cual resulta de gran importancia para el diseño de espesores de la estructura.

Un pavimento con losas rígidas de concreto hidráulico presenta una alta **resistencia a compresión; sin embargo su relación entre los esfuerzos aplicados a flexión y la resistencia del concreto a esta sollicitación, generalmente excede el 50%**. Es por ello que **esta relación se emplea para la determinación de espesores, y la sirve de parámetro para el control del agrietamiento** en el análisis por fatiga del pavimento.

La resistencia a la flexión se determina con pruebas del módulo de ruptura aplicadas en vigas de 3 x 6 x 30 pulgadas. Y las condiciones de carga y apoyo en esta prueba pueden ser tres:

- Viga cargada en cantiliver
- Viga simplemente apoyada con carga aplicada por mitad.
- Viga simplemente apoyada con carga aplicada en tres puntos.

Con los primeros dos métodos de prueba se obtiene la resistencia en un solo punto de la viga; **el último método proporciona la resistencia del tercio medio de la viga de prueba.** El valor determinado por el último método (**con la prueba ASTM*2 C78**) es el que se emplea el diseño de espesores con el diseño PCA.

La prueba de la viga simplemente apoyada en sus extremos, con carga aplicada en 3 puntos, se puede aplicar en elementos con 7, 14, 28 y 90 días de haber sido elaborados; los elementos probados a los 7 y 14 días se usan para indicar si el pavimento está listo o no para abrirse al tránsito; los resultados en elementos de 28 días de edad se usan para el diseño de espesores de las losas de carreteras; mientras los correspondientes a la prueba de los 90 días, se usan en el diseño de aeropistas.

*1 PCA (Portland Cement Association)

*2 ASTM (American Society of Testing and Materials)

La resistencia que adquiere el concreto con el paso del tiempo también incrementa el valor del MR (Módulo de ruptura) en las vigas curadas tanto en laboratorio o en campo. **Existen en este método de diseño varias gráficas y nomogramas que solicitan el valor del MR a los 28 días, el cual varía entre 41 Kg/cm² (mínimo recomendado) y 51 Kg/cm² (máximo recomendado).** REF*18

II.3.4.1.1.B) TERRENO O BASE DE APOYO.

El segundo factor necesario para emplear el método PCA de diseño de pavimentos rígidos es la resistencia de la base y la sub-base. Esta capacidad varía de acuerdo al valor del módulo de reacción de la sub-rasante de Westergaard (k); dicho valor es el de la carga aplicada a una área (plato circular de 30" de diámetro), dividido por la deformación que provoca dicha carga. Los valores de k se expresan en libras por pulgada cuadrada (en libra por pulgada cuadrada). Este parámetro se obtiene con la prueba de la placa, la cual se desarrolla en el II.1 de conceptos básico y está regulada por especificaciones de la ASTM D1195 y D1196.

Como alternativa a la realización de la prueba de la placa, existen correlaciones con otra prueba más simple y menos costosa, como lo es la del VRS. En general esta forma de estimación del módulo de reacción es suficiente para los requerimientos del método de diseño PCA.

Tabla 42. K suelo-subbase (pci)				
K suelo (pci)	Espesor de la sub-base			
	4"	6"	9"	12"
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Incremento del valor del módulo de reacción según el espesor de una base granular. Pavimentos de concreto CEMEX.

Tabla 43. K suelo-sub-base (pci)				
K suelo (pci)	Espesor de la sub-base			
	4"	6"	9"	10"
50	170	230	310	110
100	280	400	520	190
200	470	640	830	320

Incremento del valor del módulo de reacción según el espesor de una base granular cementada. Pavimentos de concreto CEMEX.

II.3.4.1.1.C) PERIODO DE DISEÑO

Dada la dificultad de predecir el tránsito a largo plazo, el periodo de diseño **comúnmente aplicado en pavimentos es de 20 años. Este periodo determina cuantos años estará en servicio el pavimento y por ende cuantos vehículos pasaran por él. De ahí se desprende la importancia de dicho periodo en la determinación del espesor del pavimento.**

II.3.4.1.1.D) NÚMERO DE REPETICIONES ESPERADAS DE CADA EJE.

Las características de los vehículos que se recaban en el estudio de tránsito se emplean para conocer el número de repeticiones esperadas durante el periodo de diseño. Los factores de tránsito que involucra el método son:

- EL TDPA (Tránsito Diario Promedio Anual)**
- El % de cada tipo de eje**
- El factor de sentido**
- El factor de carril**
- El periodo de diseño**

El número de repeticiones esperadas se determina como:

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

Donde:

- TDPA es el Tránsito Diario Promedio Anual**
- %Te es el % del TDPA para cada tipo de eje**
- FS es el Factor de sentido**
- Fc es el factor de carril**
- Pd es el Periodo de diseño**
- FCA es el factor de crecimiento anual.**
- 365 son los días del año**

II.3.4.1.1.E) TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO ANUAL

El TDPA puede obtenerse de aforos especializados o por medio de algún organismo con experiencia en transporte; es importante que la información de tránsito especifique su composición respecto al tipo de vehículos y los pesos de los ejes que van a circular sobre el pavimento.

En el método de diseño del PCA se recomienda tomar en cuenta únicamente el tráfico pesado; el tráfico ligero como los automóviles, se desprecia, lo cual solo es valido cuando dicho trafico ligero es poco en volumen y a criterio del diseñador del pavimento no influye significativamente en el espesor de la estructura.

II.3.4.1.1.F) FACTOR DE CRECIMIENTO ANUAL FCA

Este factor requiere del periodo de diseño y la tasa de crecimiento anual. Se calcula empleando la tabla 1.3, para periodos de 20 a 40 años. Este factor se define con la siguiente expresión:

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

Donde:

FC = Factor de Carril de Crecimiento Anual

n = Vida útil del pavimento en años

g = Tasa de Crecimiento Anual

Los factores de los cuales depende la tasa de crecimiento anual son:

El tráfico Atraído o desviado. Es un incremento debido a la rehabilitación de algún camino existente.

Crecimiento normal de tráfico. Es el crecimiento normal del número de vehículos

Tráfico generado. Es el número de vehículos que no circularían por la vía si la nueva obra no se hubiese construido.

Tráfico por desarrollo. El incremento debido a cambios en el uso de suelo al construir la nueva obra.

Tasa de crecimiento anual del tráfico %	Factor de crecimiento anual para 20 años	Factor de proyección anual para 40 años
1.0	1.1	1.2
1.5	1.2	1.3
2.0	1.2	1.5
2.5	1.3	1.6
3.0	1.3	1.8
3.5	1.4	2.0
4.0	1.5	2.2
4.5	1.6	2.4
5.0	1.6	2.7
5.5	1.7	2.9
6.0	1.8	3.2

Los factores combinados provocan tasas de crecimiento anual de 2 a 6%. Estas tasas corresponden según la tabla 44 a factores de tráfico de 1.2 a 1.8, diseñando a 20 años.

II.3.4.1.1.G) FACTOR DE SENTIDO

Se emplea para diferenciar las vialidades de un sentido de las de doble sentido; de esta manera se tienen un factor de 0.5 para vialidades de doble sentido y de 1.0 par aun solo sentido.

En vialidades de doble sentido es común asumir que el tránsito (en sus diferentes tipos y pesos) viaja en igual proporción para cada sentido; sin embargo el factor de sentido de carril no es el mismo porque generalmente se ve afectado por la proporción de camiones que viajan cargados en un sentido y regresan vacíos en el otro sentido. Es por ello que debe hacerse un ajuste a dicho factor considerándolo mayor en el sentido con trafico mas intenso en volumen y tonelaje.

II.3.4.1.1.H) FACTOR DE CARRIL

Este factor toma en cuenta el número de carriles por sentido. Su valor sirve para **indicar que el porcentaje de vehículos que circulan por el carril de la derecha es mayor**. La PCA recomienda usar la **Figura 46** donde este factor se determina según el número de carriles por sentido, la dirección del tráfico y el TDPA de en un solo sentido.

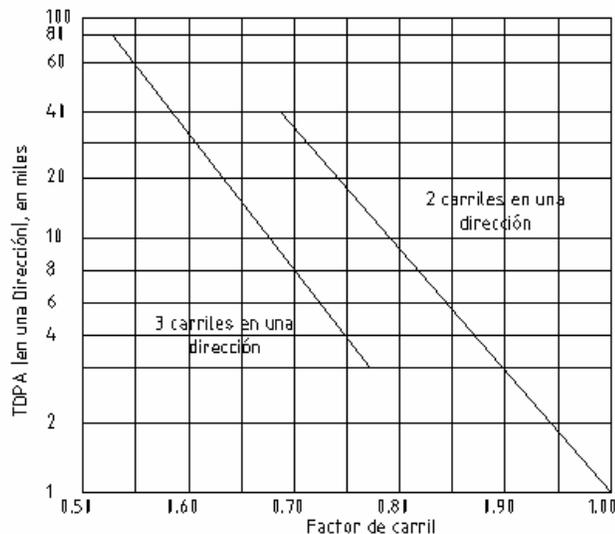


Figura 46. Factor de carril
Fuente: Pavimentos de concreto CEMEX.

II.3.4.1.1.I) FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA

Cuando ya esta se conoce la clasificación vehicular por ejes y el número de repeticiones esperadas de cada tipo y peso de los mismos, se aplica un factor de carga que incrementa dicha magnitud con fines de seguridad. **Los factores de seguridad recomendados son:**

Factor	Vialidad
1.3	Para casos con altos volúmenes de tráfico pesado y cero mantenimiento
1.2	Para autopistas o vialidades de varios carriles en donde se presentara un flujo ininterrumpido de tráfico de altos volúmenes de tráfico pesado.
1.1	para autopistas y vialidades urbanas con volúmenes moderados de tráfico pesado
1.0	En caminos y calles secundarias con muy poco tráfico pesado.

Tabla 45. Proporción de vehículos circulando por el carril de baja velocidad en una vialidad de 2 o 3 carriles. CEMEX CONCRETOS

II.3.4.1.2.- PROCEDIMIENTO DE DISEÑO:

El diseño de espesor se calcula por tanteos con ayuda del “formato de diseño de espesores por el método PCA” que se presenta en la tabla 46.

Primero se ingresan los datos de entrada de la **tabla 46**, los datos de la columna 2 son las cargas por eje multiplicadas por el factor de seguridad de carga.

Posteriormente se realiza un análisis por fatiga que consiste en el empleo de las tablas y figuras para pavimentos con o sin pasajuntas, solo con la variante de considerar o no apoyo lateral. Para el caso sin apoyo lateral se usa la **tabla 47** y la **figura 47**. Para el caso de contar con apoyo lateral se utiliza la **tabla 48** y la **figura 47**

En la tabla 46 se introduce el valor del esfuerzo equivalente en las celdas 8, 11, 14, del formato de diseño de espesores. Estos valores se obtienen de las tablas apropiadas de factores de esfuerzos equivalentes (tablas **tabla 47 y 48**), dependiendo del espesor inicial y del valor K. (Espesor: 9.5” (24.13CM), k: 130 psi, tipo de eje: sencillo, se interpola y se obtiene esfuerzo equivalente = 206)

CÁLCULO DEL ESPESOR DEL PAVIMENTO

PROYECTO: PASAJUNTAS SI / NO
 ESPESOR INICIAL: 9,5 IN APOYO LATERAL SI / NO
 MÓDULO DE REACCIÓN (K) DE LA SUBRASANTE: 130 PCI PERIODO DE DISEÑO (AÑOS) 20
 MÓDULO DE RUPTURA, MR: 650 PCI COMENTARIOS 4" DE BASE
 FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA LSF: 1,2 CEMENTADA

CARGA DEL EJE KIPS	MULTIPLICADA POR LSF	REPETICIONES ESPERADAS	ANÁLISIS POR FATIGA		ANÁLISIS POR EROSIÓN	
			REPETICIONES PERMISIBLES	% DE FATIGA	REPETICIONES PERMISIBLES	% DE FATIGA
1	2	3	4	5	6	7
8	ESFUERZO EQUIVALENTE		206	10	FACTOR DE EROSIÓN	2,59
9	FACTOR DE ESFUERZO		0,317			

EJES SENCILLOS

30	36	6310	27000	23,4	1500000	0,4
28	33,6	14690	77000	19,1	2200000	0,7
26	31,2	30140	230000	13,1	3500000	0,9
24	28,8	64410	1200000	5,4	5900000	1,1
22	26,4	106900	ILIMITADO	0	11000000	1
20	24	235800	ILIMITADO	0	23000000	1
18	21,6	301200	ILIMITADO	0	64000000	0,5
16	19,2	422500	ILIMITADO	0	ILIMITADO	0
14	16,8	586900	ILIMITADO	0	ILIMITADO	0
12	14,4	1837000	ILIMITADO	0	ILIMITADO	0
11	ESFUERZO EQUIVALENTE		192	13	FACTOR DE EROSIÓN	2,79
12	FACTOR DE RELACIÓN DE ESFUERZO		0,295			

EJES TANDEM

52	62,4	21230	1100000	1,9	920000	0,4
48	57,6	42870	ILIMITADO	0	1500000	0,7
44	52,8	124900	ILIMITADO	0	2500000	0,9
40	48	372900	ILIMITADO	0	4600000	1,1
36	43,2	885800	ILIMITADO	0	9500000	1
32	38,4	930100	ILIMITADO	0	24000000	1
28	33,6	1656000	ILIMITADO	0	95000000	0,5
24	28,8	984900	ILIMITADO	0	ILIMITADO	0
20	24	1227000	ILIMITADO	0	ILIMITADO	0
16	19,2	1356000	ILIMITADO	0	ILIMITADO	0
14	ESFUERZO EQUIVALENTE		147	13	FACTOR DE EROSIÓN	2,95
15	FACTOR DE RELACIÓN DE ESFUERZO		0,226			

EJES TRIDEM

54/3=18	21,6	250000	ILIMITADO	0	2600000	9,6	
				TOTAL	62,9	TOTAL	48,3

FORMATO PARA EL DISEÑO DE ESPESORES POR EL MÉTODO PCA
 CEMEX CONCRETOS

Tabla 46. Cálculo del espesor del pavimento

Posteriormente se dividen los valores de esfuerzo equivalente entre el módulo de ruptura del concreto, ubicando así la relación de esfuerzos, una por cada tipo de eje (sencillo, tándem, tridem). ($206/650=0.317$). Estos valores se ingresan en el formato de diseño de espesores (**tabla 46**) en las celdas 9, 12 y 15.

Llenar la columna 4 “repeticiones permisibles” obtenidas en la **figura 47**. (Con la carga de ejes sencillo: 36, y con la relación de esfuerzo: 3.17, se unen con una línea en el nomograma y se interseca la línea de repeticiones permisibles: 1, 500, 000).

Después se obtiene el % de fatiga de cada eje. El % de fatiga se anota en la columna 5 y se obtiene dividiendo las repeticiones esperadas (columna 3) entre las repeticiones permisibles (columna 4) por 100; esto se hace para

cada eje y por último se suman todos los porcentajes de daño por fatiga para obtener el porcentaje total de daño por fatiga.

En lo que respecta al análisis por erosión que se realiza en este método, se sigue el siguiente procedimiento:

o Para pavimentos sin apoyo lateral:

Si el pavimento tiene pasajuntas, se emplea la **tabla 49** y **figura 48**. En los pavimentos en que la transferencia de carga se realiza exclusivamente mediante la trabazón de los agregados se utiliza la **tabla 50** y la **figura 48**.

o Para pavimentos con apoyo lateral

Para pavimentos con pasajuntas o con refuerzo continuo, emplear la **Tabla 51** y **figura 49**. En los pavimentos en que la transferencia de carga se realiza exclusivamente mediante la trabazón de los agregados, use la **Tabla 52** y la **figura 49**

En general se puede describir el procedimiento para ambos casos como sigue:

En las celdas 10, 13 y 16 del formato de diseño de espesores, se anotan los factores de erosión obtenidos de las tablas adecuadas. (Tablas **49 a 52**).

Se calculan las repeticiones permisibles con ayuda de la figura **48** y la figura **49**; se registran en la columna 6 del formato de diseño de espesores.

Se calcula el porcentaje de daño por erosión (columna 7) para cada eje, dividiendo las repeticiones esperadas (columna 3) entre las repeticiones permitidas (columna 6) y multiplicando el resultado por 100, para posteriormente totalizar el daño por erosión.

Al emplear las gráficas, no es necesaria una exacta interpolación de las repeticiones permisibles. Si la línea de intersección corre por encima de la parte superior de la gráfica, se considera que las repeticiones de carga permisibles son ilimitadas.

Nota: Para el empleo de las tablas 47, 48, 49, 50, 51 y 52, y de las figuras 49, 48, y 49 se recomienda consultar el **anexo 2.4** o revisar la referencia 18

Tabla 47. Esfuerzo equivalente para pavimentos sin apoyo lateral.

Tabla 48. Esfuerzo equivalente para pavimentos con apoyo lateral.

Tabla 49. Factores de erosión para pavimentos con pasajuntas y sin apoyo lateral

Tabla 50. Factores de erosión para pavimentos sin pasajuntas y sin apoyo lateral

Tabla 51. Factores de erosión para pavimentos con pasajuntas y con apoyo lateral.

Tabla 52. Factores de erosión para pavimentos sin pasajuntas y con apoyo lateral.

Figura 47. Análisis de fatiga (Repeticiones permisibles basadas en el factor de relación de esfuerzo, con o sin apoyo lateral). CEMEX CONCRETOS

Figura 48. Análisis de erosión (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión, sin apoyo lateral). CEMEX CONCRETOS

Figura 49. Análisis de erosión (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión, con apoyo lateral). CEMEX CONCRETOS

II.4.-
Métodos de Diseño en la
Rehabilitación de la
Autopista Chamapa – La
Venta

INTRODUCCIÓN

En forma general este capítulo contiene los parámetros de diseño que se emplearon específicamente para cada una de las alternativas de rehabilitación propuestas en el estudio de evaluación de la autopista. La información de cada método empleado se presenta en forma resumida, ya que los procedimientos de diseño respectivos se basan en los conceptos presentados en capítulos anteriores.

Cada alternativa emplea diferente método de diseño, incluso para una sola de ellas puede analizarse con varios procedimientos. En general en ambos casos de diseño, tanto para pavimentos rígidos como flexibles, el procedimiento de diseño es el mismo: a partir de un análisis de tránsito y con su periodo respectivo de diseño, se proyecta el TDPA, se calcula el número de ejes equivalentes para dicho periodo y con los datos obtenidos de la evaluación del pavimento se obtiene la vida remanente de la estructura actual. En este capítulo se hace énfasis en la necesidad de rehabilitación a partir de la diferencia del TDPA estimado en rehabilitaciones anteriores y los datos reales de aforo del 2004.

En el caso de la alternativa flexible se determina el refuerzo que en términos de una sobrecarpeta asfáltica con los métodos de retrocálculo con el software *ELMOD*, el empleo del Método del Instituto del Asfalto y el Método AASHTO, para después comparar los refuerzos propuestos y decidir cual se adoptara como medida de rehabilitación.

En el caso del pavimento rígido, también se determinan los módulos de elasticidad con el software *ELMOD* y se determina la vida remanente en años que el pavimento puede presentar. Finalmente en esta alternativa se propone una rehabilitación con concreto hidráulico a partir del empleo del método AASHTO para diseño de pavimentos rígidos, posteriormente se indican las especificaciones relativas a su procedimiento constructivo.

II.4.1.- ANÁLISIS DEL DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

Respecto a las consideraciones sobre el tránsito para el diseño de las alternativas de pavimentación a continuación se mencionan los aspectos más relevantes para este proceso.

II.4.1.A.- DATOS HISTÓRICOS DEL TRÁNSITO

Para el análisis de tránsito se emplearon datos de conteos que lleva la concesionaria en el tramo, en sus plazas de cobro ubicadas estratégicamente y que se mencionan en el I. Los aforos vehiculares son del año 1992 (año en que fue puesta en operación) hasta el 2004, y en

general se presentan como valores en orden creciente, que denotan un aumento del TDPA en toda **la composición vehicular registrada**.

Con el análisis de esta información se observa **una tendencia de incremento del flujo vehicular a futuro**. Cuando se presentó originalmente este proyecto (2004) en la utopista se consideraba un tránsito diario promedio anual (TDPA) mayor de **20,114** vehículos y según la tendencia de los años anteriores, la tasa de crecimiento calculada superaba el 10%. Para el caso de la composición vehicular **se observa también un incremento del paso de vehículos pesados** por el tramo, en la tabla siguiente se presentan en resumen los datos e información relativa a la configuración del tránsito en los tramos estudiados.

Tabla 80. Composición vehicular y TDPA en los tramos estudiados

Tramo Km. a Km.	Composición vehicular, %			TDPA para el año 2004
	A	B	C	
27+200 – 37+600	90.30	6.47	3.23	20,114*

* **TDPA cuantificado hasta octubre** y que pudiera aumentar, derivado de las tendencias que existen en los meses de noviembre y diciembre.

Como referencia al año 2000, cuando se hizo un estudio similar para esta autopista, se consideró un TDPA de 12,514 vehículos para el diseño del pavimento, con una tendencia de crecimiento lineal que para el 2004 pronosticó 16,395 vehículos; esta expectativa fue superada fácilmente con un aforo real actual de 20,114 vehículos, cifra que representa en verdad un **22.7% de aumento en el volumen de vehículos esperados para el 2004**; a continuación se presentan los valores de TDPA reales y los que en expectativa se esperaban según una tendencia de crecimiento lineal.

Año	2000	2001	2002	2003	2004
PRONOSTICO DE TDPA, EN EL AÑO 2000, (# VEHÍCULOS)	12,514	13,796	14,663	15,529	16,395
TDPA REAL. (# VEHÍCULOS)	13,011	14,648	16,343	18,079	20,114
INCREMENTO DE AFORO REAL ENTRE LO PRONOSTICADO, (%)	4.0	6.2	11.5	16.4	22.7

En la tabla anterior puede verificarse el incremento sustancial en el aforo principalmente los últimos tres años, lo cual es la causa principal del **proceso acelerado de fatiga del pavimento, que disminuye las expectativas del cumplimiento de su vida útil**.

II.4.1.B.- CALCULO DEL NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES A 18,000 LB (8.16 TON) ESAL

Partiendo de la proyección del TDPA para el año 2004 y la composición vehicular y del desglose por tipo de eje y peso, se calculó el número de ejes equivalentes a 18,000 libras (8.16 Ton) ESAL del tramo, tomando en consideración una tasa de crecimiento de cinco por ciento (5%) y un periodo de diseño de 15 años, obteniéndose como resultado del análisis en el periodo para ambos sentidos de circulación, los resultados que se presentan en la tabla 81; además se calculó el ESAL para el carril de diseño (carril de baja velocidad).

Tabla 81. *Resumen de datos de tránsito considerados*

TDPA	COMPOSICIÓN, %			No. DE EJES EQUIVALENTES A 18,000 lb (8.16 ton)
	A	B	C	Carril de diseño
20,114	90.30	6.47	3.23	20'636,388

Cabe mencionar que como consecuencia del incremento sustancial en el aforo vehicular mencionado en el inciso interior, se calculó el número de ejes equivalentes reales generados entre el año 2000 y 2004, tomando en consideración también la variación de la composición vehicular de cada año.

II.4.1.C.- ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO CON DIVERSOS MÉTODOS

En el proyecto del pavimento flexible se realizaron varios análisis para verificar su adecuada estructura y comportamiento. A continuación se anotan dichos análisis.

II.4.1.C.1.- RETROCÁLCULO CON EL SOFTWARE ELMOD

A partir de los resultados de la exploración geotécnica, las deflexiones medidas en el tramo y el análisis de tránsito traducido a número de ejes equivalentes ESAL para el carril de diseño y el carril de alta velocidad, se aplicó el programa de computo ELMOD (Evaluation of Layer Moduli and Overlay Desing) para determinar los módulos de elasticidad de las diferentes capas que forman el pavimento y la capa subrasante, para los diferentes subtramos homogéneos en que se dividió el

tramo; dicho análisis determinó además de los módulos de elasticidad en cada estación de prueba, la vida remanente que se estima acusa el pavimento y el refuerzo que en términos de una sobrecarpeta asfáltica, pudiera requerirse, para las solicitaciones de carga en el periodo de diseño.

Del análisis de capacidad estructural realizado se tiene la información siguiente:

Tabla 82. Promedio general de los módulos de elasticidad		
Carpeta asfáltica	E1 = 2,359 MPa	(24. 06 x 10³ Kg/cm²)
Base hidráulica	E2 = 476 MPa	(4. 86 x 10³ Kg/cm²)
Sub-base hidráulica	E3 = 253 MPa	(2. 58 x 10³ Kg/cm²)
Subrasante	E4 = 124 Mpa	(1. 27 x 10³ Kg/cm²)

Los valores presentados en la tabla anterior se reportan dentro de los rangos típicos medidos en el laboratorio, los cuales son comúnmente:

3,500 MPa para el concreto asfáltico a 21 °C
35 a 750 MPa para materiales granulares

Con las premisas de tránsito establecidas se estimó que la vida remanente para el pavimento en el periodo de diseño establecido es corta para el carril de baja velocidad, que de continuar con su servicio presentaría una falla de tipo funcional generada a partir de la capa de sub-base y subrasante, requiriéndose de un refuerzo adicional para el pavimento.

El estudio de evaluación del pavimento indicó que, según los resultados de laboratorio, **los materiales de base, sub-base y subrasante son de una baja calidad y que la presencia de un mayor contenido de finos plásticos en esas capas puede contribuir a generar una deformación permanente del pavimento.**

En lo referente al refuerzo del pavimento, se indicó que es necesario en el carril de baja velocidad y en mayor magnitud en los tramos del km 27 al km 31, del km 33 al 34 y del km 36 a 38, siendo menor el refuerzo en el resto del tramo.

II.4.1.C.2.- MÉTODO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO

Este método emplea las deflexiones obtenidas con el deflectómetro de impactos HWD, siguiendo el procedimiento de valuar la deflexión característica para un subtramo homogéneo, la cual es considerada como la deflexión promedio más dos veces la desviación estándar. Con estos datos **se determinó la vida útil esperada en número de ejes equivalentes (ESAL) y años**, además **se determinó el espesor de refuerzo requerido en términos de una sobrecarpeta asfáltica**. El procedimiento de cálculo sigue la metodología propuesta en el Manual No. 10, "Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation", **obteniéndose los resultados con gran similitud a los obtenidos con el método ELMOD, en cuanto a la magnitud que se requiere de un espesor de refuerzo en términos de una sobrecarpeta asfáltica.**

Este análisis muestra que la deflexión característica varía entre 17.78 y 72.56×10^{-3} pulg (0,0451612 y 0,1843024 cm) para el carril de baja velocidad; respecto a la vida útil esperada, se distinguen dos tramos en los cuales la vida útil mayor que 10 años.

II.4.1.C.3.- MÉTODO DE LA AASHTO

Este método **se basa en los módulos de elasticidad reales (E_i) de cada una de las capas que integran la estructura** del pavimento, determinados por el programa ELMOD para cada subtramo homogéneo en que se dividieron los dos tramos estudiados.

**E_1 representa el módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica,
 E_2 el módulo de elasticidad de la base hidráulica,
 E_3 el módulo de elasticidad de la sub-base hidráulica y
 E_4 el módulo de elasticidad de la capa subrasante.**

Los módulos de elasticidad de cada capa permitieron determinar los coeficientes estructurales, a_i , correspondientes y en consecuencia obtener el número estructural actual, (SN actual) del pavimento existente, a través de fórmula:

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2 + a_3D_3$$

Donde: a_i es el coeficiente estructural de la capa en cuestión
 D_i es el espesor de la capa, expresado en pulgadas

Por otro lado, partiendo del módulo de elasticidad de la capa subrasante, E_4 y el número de ejes equivalentes del carril y cuerpo en cuestión, es posible determinar el número estructural requerido (SN_{req}) para el período de diseño. La diferencia entre SN_{req} y SN_{actual} , indicará la necesidad si es el caso, de colocar una capa de refuerzo sobre el pavimento actual para soportar el tránsito futuro.

De los resultados del cálculo antes descrito se obtuvo el número estructural SN para cada subtramo homogéneo, observándose igualmente como en las otros metodologías de diseño de pavimentos, el emplear refuerzo como elemento de rehabilitación.

II.4.1.D.- ANÁLISIS COMPARATIVO DE REFUERZO

De los análisis anteriores se observa que existen varios tramos en los cuales el refuerzo es mínimo, mientras que en otros los refuerzos requeridos son importantes. En la tabla 83 se presenta un resumen del análisis por las tres metodologías, indicándose además el espesor de refuerzo propuesto.

Se hace notar que la vida útil estimada según los diferentes métodos de revisión utilizados, se refieren a la estructura del pavimento en su conjunto, sin embargo, puede ocurrir que alguna de las capas de la estructura, como pudiera ser la carpeta asfáltica, tuviera una vida útil más corta.

Tabla 83. Espesores necesarios de refuerzo, según los métodos de análisis considerado y el espesor propuesto.

Cuerpo	Carril	Tramo	Espesor de refuerzo, cm			
			ELMOD	AASHTO	I. DE A.	PROPUESTO
D E R E C H O	Baja	27+200 a 28+000	17.5	5.1	23.0	15
		28+000 a 28+900	6.2	3.6	6.0	10
		28+900 a 31+100	13.7	15.4	10.5	22
		31+100 a 33+000	10.5	4.7	4.0	15
		33+000 a 34+100	21.0	15.6	14.5	22
		34+100 a 36+000	5.5	3.7	4.5	10
		36+000 a 37+600	12.2	9.1	9.5	7

En lo que corresponde al diseño del pavimento para la opción rígida, se presentara a continuación con los parámetros en dicha alternativa:

II.4.2.- DISEÑO DE LA ALTERNATIVA DE PAVIMENTO RÍGIDO

II.4.2.A.- TRANSITO

TDPA = 20114 VEHICULOS EN AMBOS SENTIDOS

TASA DE CRECIMIENTO ANUAL: 10.50 % ANUAL

COMPOSICIÓN VEHICULAR:	
A2	90.03%
B2	6.47%
C2	1.00%
C3	1.00%
T3-S2	0.50%
T3-S3	0.50%
T3-S2	0.23%

II.4.2.B.- DISEÑO

Para el diseño de esta alternativa se empleo el método ASSHTO con la siguiente ecuación:

$$\log_{10} W_{18} = Z_R * S_0 + 7.35 \log_{10} (D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 * pt) * \log_{10} \left[\frac{S_c * Cd * (D^{0.75} - 1.132)}{215.3 * J * \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{(Ec/k)^{0.25}} \right]} \right]$$

Definición de parámetros:

W_{18} : Ejes equivalentes de 18000libras (8.16ton) acumulados en el periodo de análisis.

Z_R : Desviación estándar normal.

S_0 : Distribución de probabilidad.

D : Espesor de la losa del pavimento (in).

ΔPSI : Perdida entre el índice de servicio inicial y final.

S_C : Módulo de ruptura del concreto.

J : Coeficiente de transferencia del concreto.

Cd : Coeficiente de drenaje.

E_c : Módulo de elasticidad del concreto.

k : Módulo de reacción efectivo de la subbase.

En esta ecuación la incógnita es el espesor de la losa del pavimento y las variables consideradas en el diseño son:

W_{t18}	86, 615, 989 ejes equivalentes
Z_R	Valor correspondiente a la confiabilidad del 90%
S_0	0.39
P_o	4.5
P_t	2.5
S_c	682.71 psi (1psi = 63.27 x 10 ⁻³ Kg/cm ²)
J	2.7
Cd	1.1
E_c	4, 000, 000 psi
k	700 pci

Para efectuar los cálculos y obtener el espesor de la losa, se utilizo un programa de cómputo editado por Cementos Mexicanos (SISTEMA PAVIMENTOS DE CONCRETO)

Resultados del programa:

Capa	Espesor (cm.)
Losa de concreto hidráulico	28cm
Sub-base estabilizada con cemento	15cm

Una vez revisado el diseño de la alternativa del pavimento rígido y del flexible, resulta conveniente analizar su proceso constructivo implícito para comprender mejor su comportamiento para el periodo de diseño correspondiente, lo cual se hace en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO III.- EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN

III.1.-
Proyecto de
rehabilitación de la
Autopista Chamapa – La
Venta.

III.1.- PROYECTO DE REHABILITACIÓN DE LA AUTOPISTA CHAMAPA - LA VENTA.

El proyecto de rehabilitación al que se refiere el presenta trabajo de tesis se planeó para ambos cuerpos que integran la obra vial en toda su longitud. Esta rehabilitación se fundamenta en una evaluación de las condiciones que guardaba la estructura del pavimento en el cuerpo derecho de la Autopista Chamapa – La Venta; en dicha evaluación se plantearon varias alternativas de rehabilitación del pavimento, **con el objetivo de mejorar sus condiciones de servicio, dado que se trata de una autopista de cuota.**

El proyecto propuso rehabilitar los tramos del Km. 27+200 al Km. 29+300, del lado derecho y Km. 32+500 a 38+000 del lado izquierdo; sin embargo, dado que las condiciones de deterioro son menos severas en el cuerpo izquierdo y no ameritan aún dicha inversión, se optó por rehabilitar solo el cuerpo derecho, pues presentó un estado de deterioro más severo. A continuación se remiten los aspectos más importantes del proyecto de rehabilitación para poder evaluar las alternativas de solución al deterioro del mencionado cuerpo de la autopista Chamapa – La Venta.

III.1.1.- ANTECEDENTES

La autopista citada se encuentra al poniente de la Ciudad de México, en las cercanías de la Sierra de las Cruces y se desarrolla en **topografía de lomerío fuerte y montaña, y por ello presenta cortes de hasta 30 m de altura y terraplenes de magnitud importante,** así como puentes y diversos entronques que ya fueron señalados en el 1. Esta autopista **fue construida hace 10 años y consta de dos sentidos de circulación, con separador central constituido por de piezas precoladas.**

Respecto a la geología se puede anotar que los materiales locales son de origen volcánico, tales como tobas con diferentes grados de alteración y cementación, así como piroclásticos y depósitos de aluvión y arena pumítica.

El clima de la zona se clasifica como de tipo templado subhúmedo, con lluvias en verano C (w_2), temperatura media anual de 14°C y precipitación media anual de 700 mm.

Es importante señalar que la autopista ha sido mantenida con colocaciones de sobrecarpetas y tratamientos superficiales como los riegos de sello; sin embargo el comportamiento del pavimento se consideró poco satisfactorio, requiriéndose la evaluación para determinar los trabajos de rehabilitación que se requieran para adecuar el pavimento para un horizonte de servicio de ocho años.

III.1.2.- ESTUDIOS EFECTUADOS PARA RESPALDAR LA REHABILITACIÓN

La **evaluación del pavimento** se realizó en los tramos antes mencionados y consistió en los siguientes conceptos:

- **Levantamiento topográfico de los dos carriles** considerados en el sentido de circulación establecido.
- **Levantamiento visual de daños** superficiales del pavimento.
- **Medición de deflexiones** con un deflectómetro de caída libre, producidas por el efecto de un impacto, utilizando el dispositivo (FWD) Dynatest 8081, mediante los cuales es posible determinar los módulos elásticos de los materiales.

Sobre los resultados obtenidos de dichos estudios se puede resumir que las mediciones de deflexiones en el pavimento se efectuaron utilizando una carga equivalente a (8.17ton), simulando el efecto del paso de un **vehículo cargado**. Con el dispositivo (FWD) se pudieron determinar las **dimensiones y forma de la cuenca de deflexiones**; conocidas éstas y empleando un programa de computación especial, **se determinaron los módulos elásticos de las diferentes capas del pavimento**, incluyendo la capa subrasante; **se logró también identificar la capa débil**, **efectuar el pronóstico de vida remanente** y **finalmente definir el espesor de una sobrecarpeta de concreto asfáltico como refuerzo del pavimento para el horizonte analizado**.

Las deflexiones medidas se muestran en la figura siguiente.

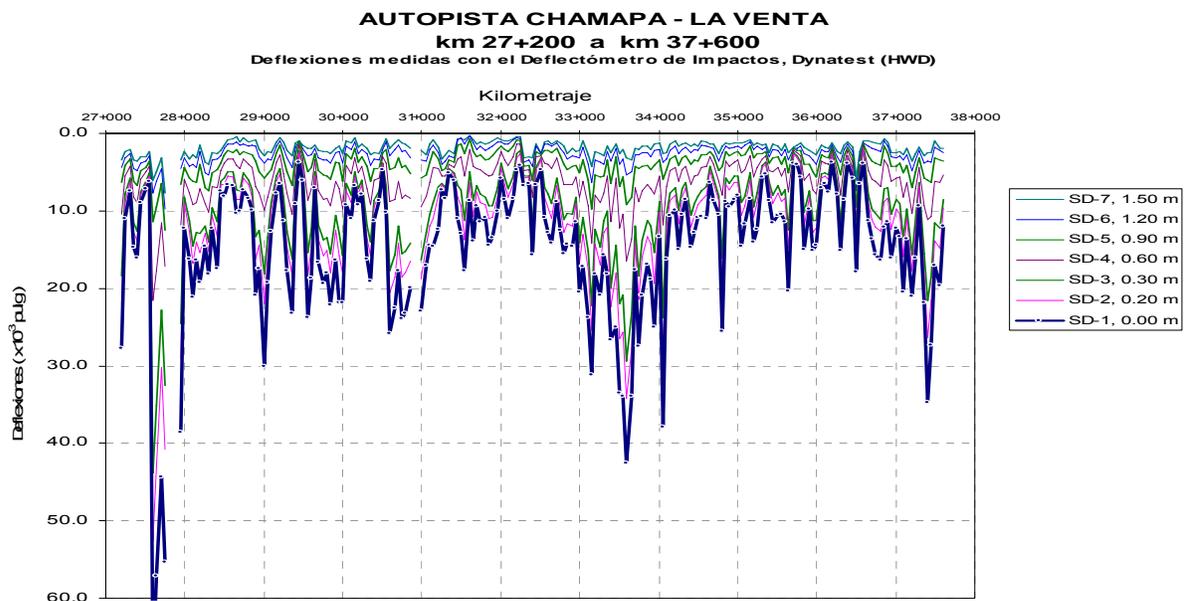


Figura 50. Registro de deflexiones

III.1.3.- CONSIDERACIONES PARA LA EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO EN DETERIORO Y PROPUESTA DE REFUERZO

El estudio de evaluación del pavimento presenta un análisis del tránsito actual y futuro y un análisis de información de la estructura del pavimento y del tipo de materiales del mismo.

Respecto a las consideraciones del tránsito que se hicieron en dicha evaluación, se indica que el **TDPA actual (2005) presenta una tasa de crecimiento anual del 5%**, referida al incremento de vehículos pesados, por ser los que afectan severamente al pavimento. En dicho análisis se **obtuvo un total de 12514 vehículos por día para el año 2005**, de los cuales el **88.97% son automóviles y el 11.03% son vehículos pesados**. Así pues, **para un horizonte de 8 años, el tránsito en ambos cuerpos es de 8.150 x 10⁶ ejes acumulados equivalentes de 82 kN (8.17ton)**.

En lo referente a la estructura y tipo de los pavimentos, **se efectuaron seis calas para medir los espesores y se tomaron muestras de los materiales para ser sometidos a ensayos de laboratorio para determinar sus propiedades índice**. Dichas calas mostraron que **la carpeta de concreto asfáltico tiene un espesor medio de 22.0 cm. La base hidráulica tiene un espesor medio de 17 cm**, con variaciones entre 11 y 20 cm y está **constituida por gravas limosas GM, y arcillosas GC, con un contenido de finos del orden de 15% y equivalente de arena de 27% en promedio, con límite líquido de 29% e índice plástico de 9.1%, en promedio**, valores que indican que estos materiales no cumplen con los requerimientos establecidos para este tipo de pavimento. **La sub-base de 21 cm. está constituida por gravas y arenas arcillosas, GC y SC, cuyo contenido de finos es del orden de 20% y el equivalente de arena de 24%**, como valores promedio; estos materiales son poco apropiados para el tipo de pavimento de que se trata. De las observaciones anteriores se define que el pavimento tiene un espesor medio de 51 cm.

La capa subrasante está elaborada con arenas y gravas arcillosas, SC y GC. Su equivalente de arena es de 21%, el límite líquido de 30% e índice plástico de 10%, en promedio, lo cual lo identifica como un material razonablemente aceptable para este tipo de pavimento

En la figura 51 se presenta un corte promedio de la estructura del pavimento antes de ser rehabilitado y en la figura 52 se presenta el perfil de dicha estructura a lo largo del tramo en estudio.

En la figura siguiente se presenta la estructura del pavimento detectada.

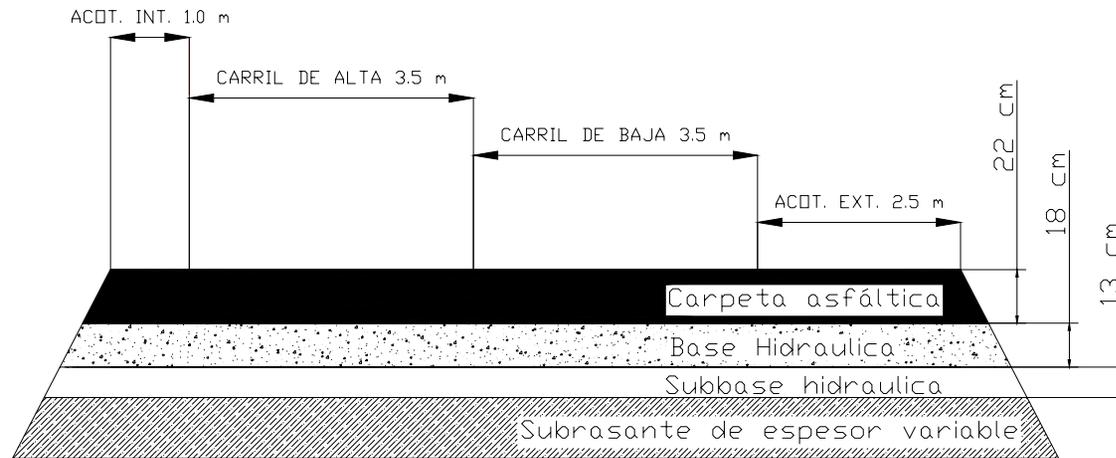


Figura 51. Estructura del pavimento detectada en su evaluación.

Esesores de las capas del pavimento según el estudio de evaluación

CALA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13												
KM	27+580	28+097	28+600	29+070	29+200	29+600	30+200	30+500	31+080	32+000	32+140	32+500	33+000	33+500	34+000	34+500	34+800	35+000	35+500	35+800	36+000	36+620	37+050	37+200	37+450
CARPETA	23	20	30	25	25	25	26	28	18	18	17	21	22	20	24	26	19	18	25	23	21	46	23	24	16
BASE	40	46	48	43	44	41	43	46	41	36	42	41	43	31	44	32	32	41	45	36	40	59	39	44	38
SUBBASE	62	55	60	60	54	60	62	55	56	46	56	61	53	42	54	46	45	54	60	52	50	69	54	55	56

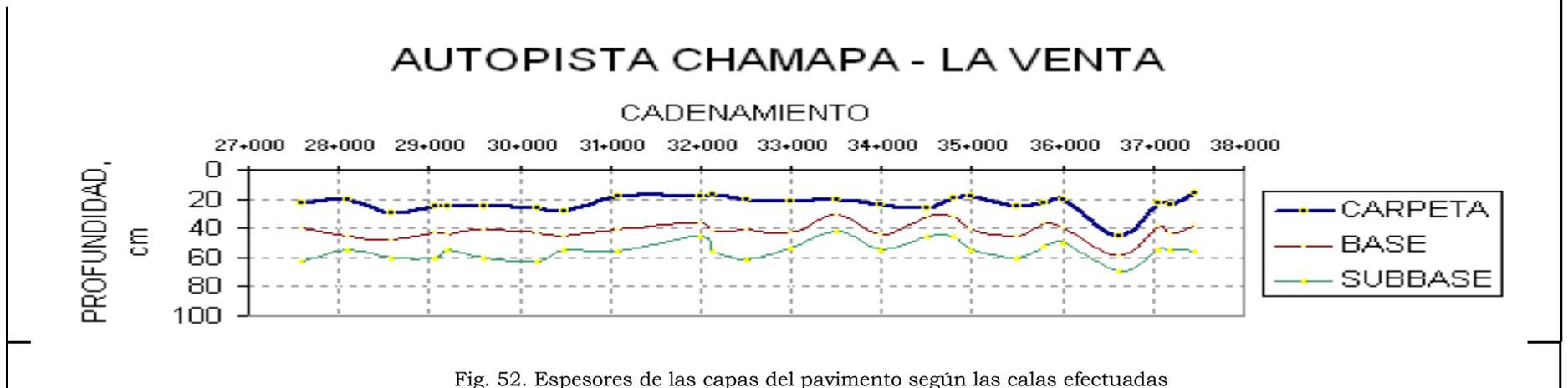


Fig. 52. Esesores de las capas del pavimento según las calas efectuadas

III.1.4.- ANÁLISIS DEL PAVIMENTO

El estudio de evaluación del pavimento comprende las actividades que se anotan a continuación, algunas de las cuales ya se han referido anteriormente y serán tratadas en sus aspectos más relevantes conforme sea necesario emplearlos en este trabajo de tesis:

- Levantamiento topográfico del cuerpo derecho de la autopista, abarcando los carriles de circulación y el acotamiento, ligando además la rasante que define la orilla adyacente del cuerpo izquierdo.
- Levantamiento visual de los daños superficiales del pavimento.
- Exploración directa, para obtener muestras de materiales de las capas que integran la estructura del pavimento.
- Determinación en el laboratorio de las características físicas de los materiales extraídos de la exploración.
- Medición de deflexiones con el deflectómetro de impactos Dynatest, para medir la capacidad de respuesta estructural del pavimento.
- Información de los materiales y respuesta del pavimento, que son datos necesarios para proponer opciones de rehabilitación del pavimento
- Proyecto ejecutivo para la rehabilitación del pavimento

De los datos más relevante de esta evaluación se deben citar las características del pavimento antes de la rehabilitación para identificar los deterioros que se presentan y determinar las condiciones de servicio.

Así pues, para comprender el grado de deterioro del cuerpo rehabilitado, se puede ver en la figura 50 el perfil de deflexiones medidas en el pavimento, observándose una gran variabilidad que define varias zonas en donde las condiciones son uniformes en cuanto a requerimientos de un refuerzo a base de una sobrecarpeta. Se observa que hay **zonas en las que las deflexiones son del orden de 10×10^{-3} pulgadas (0.25 mm) y en otras alcanzan valores de 40 y 50×10^{-3} pulgadas, (1.01 y 1.27 mm), definiéndose de esta manera un criterio para especificar los espesores de rehabilitación por subtramos homogéneos.**

Estas deflexiones son importantes en el estudio porque con ellas se calcularon los módulos elásticos de los materiales que constituyen el pavimento y posteriormente se determinó la vida remanente de la estructura para las condiciones de tránsito a futuro ya mencionadas. En general, con este proceso se define la vida remanente del pavimento y con ello la necesidad de cada subtramo en términos de una aplicación de una sobrecarpeta de concreto asfáltico.

La Tabla 72 resume las recomendaciones en cuanto al refuerzo requerido para cada subtramo de la autopista.

Tabla 72.

Espesor de sobrecarpeta requerida para un horizonte de **ocho años**

Cuerpo	Tramo, km a km	Espesor de carpeta, cm
Derecho	27+200 – 28+000	5
	28+000 – 28+900	10
	28+900 – 31+100	10
	31+100 – 33+000	5
	33+000 – 34+100	10
	34+100 – 36+000	5
	36+000 – 37+600	10

Como se puede apreciar, el espesor de refuerzo varía entre 5 y 10 cm, existiendo además subtramos que por el momento no requerían de dicho refuerzo y los cuales no aparecen en la tabla anterior.

Es de apreciar que las capas de refuerzo corresponden propiamente al carril de baja velocidad, el cual presenta la peores condiciones de deterioro por ser el carril por donde circulan los vehículos más pesados; sin embargo, por razones prácticas, geométricas y constructivas, la sobrecarpeta debe extenderse hasta el carril de alta velocidad, e inclusive debe abarcar el espacio bajo la barrera separadora.

En tales circunstancias se **propuso que en ambos carriles se colocara un concreto asfáltico AC-20, normal con el propósito de hacer racional el proyecto.**

Finalmente, con objeto de proporcionar una textura, aspecto y protección uniforme a los dos tramos, se propuso una carpeta delgada de 2.5 cm de espesor, con granulometría abierta, elaborada con cemento asfáltico mezclado con hule molido, para proporcionarle mejores características y durabilidad.

III.1.5.- PROPUESTA DE BANCOS DE MATERIALES PARA LA REHABILITACIÓN

Como parte del estudio se investigaron los bancos de materiales para surtir los agregados requeridos para elaborar el concreto asfáltico. Los bancos investigados fueron los siguientes:

* Banco Ejido San Francisco Chimalpa. Autopista Chamapa – La Venta, km 27+300, 200 m derecha. Este banco produce material cribado de un yacimiento de aluvión, que no es apto para carpeta asfáltica, pues en la prueba de Desgaste los Ángeles da un valor de 50% y una absorción mayor que 10%. No cuenta con planta de asfalto.

* Banco San Juan y Planta de Asfalto “Concretos Asfálticos Pirámide, S. A.” Autopista Chamapa – La Venta, Km. 9+800, 400 m derecha. Este banco explota un yacimiento de roca volcánica, procesada mediante trituración total y cribado. Contando además con planta para producir concreto asfáltico. El material tiene buenas características, como desgaste Los Ángeles de 14% y equivalente de arena de 40 a 50%.

En el estudio de evaluación del pavimento se opta por elegir el último banco para proveer los materiales necesarios para la obra.

III.1.4.4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DEL PAVIMENTO

De lo expuesto en la evaluación del pavimento se puede obtener la siguiente información relevante para el presente trabajo de tesis.

a) **El pavimento en los tramos estudiados mostró zonas con deficiencias de tipo estructural principalmente, manifestada por agrietamientos de tipo piel de cocodrilo en zonas aisladas y pequeñas deformaciones permanentes en forma de roderas, sin embargo se consideró la posibilidad de que algunos deterioros superficiales se encuentren ocultos por tratamientos en dicha superficie más o menos recientes.**

b) **La evaluación estructural efectuada en base de los resultados del deflectómetro FWD Dynatest, indicó que los espesores de refuerzo requeridos se compensan con sobrecarpetas de concreto asfáltico de 5 a 10 cm de espesor, en el carril de baja velocidad, existiendo subtramos que se puede no requerir de refuerzo para el horizonte de 8 años, como se indica en la tabla 84.**

- c) **Por razones geométricas y constructivas no es posible reforzar únicamente el carril de baja velocidad, que es el más ocupado por el tránsito pesado, debiendo extenderse la sobrecarpeta sobre el carril de alta velocidad. Por otra parte considerando precisamente que el carril de baja velocidad es el más solicitado, se propuso que la sobrecarpeta correspondiente se construya con cemento asfáltico modificado con un polímero del tipo SBS-411, en el carril de alta se utilizará este mismo material, por razones constructivas y económicas.**
- d) **Se dispuso como medida de seguridad que las sobrecarpetas construidas tuvieran rampas de inicio y fin de 10 y 20 m, respectivamente para las sobrecarpetas de 5 y 10 cm.**
- e) **En esta rehabilitación se propuso también construir, en toda la longitud y ancho de los carriles de los tramos afectados, una sobrecarpeta delgada con granulometría abierta, de 2.5 cm de espesor, que proporcionará la textura adecuada para el rodamiento de los vehículos, protegiendo las carpetas asfálticas existentes y proporcionara uniformidad visual y de rodamiento al tramo rehabilitado.**
- f) **El estudio recomendó efectuar evaluaciones del pavimento unas dos veces al año, con objeto de efectuar un seguimiento de su comportamiento, detectar problemas con anticipación, constituir la experiencia de la Operadora y mantener al pavimento dentro del nivel de calidad establecido.**

III.2.-
Condiciones Actuales de
la Autopista Chamapa-
La Venta (2005)

INTRODUCCIÓN

El presente debe considerarse como una extensión del anterior, pues con él se pretende recalcar las condiciones de deterioro en que se encontraba la autopista antes de la rehabilitación. Con los antecedentes del proyecto planteados en el anterior, ahora se presentan y revisan los resultados obtenidos del estudio de evaluación del pavimento.

La información que presenta este pone de manifiesto la incidencia de irregularidades en la superficie de la carpeta asfáltica tales como asentamientos, ondulaciones, roderas, grietas diversas, baches, llorado de asfalto, desgranamiento de carpeta, reparaciones defectuosas, etc. La consideración del grado y del tipo de estos deterioros permite diferenciar los tramos con semejantes condiciones y con ello se determinan las medidas de rehabilitación a implementar para cada uno de ellos.

También se dan a conocer los resultados de las pruebas de laboratorio que se aplicaron a los materiales del pavimento, por subtramos y capas, y el resultado de su comparación con los criterios mínimos de pavimentación que la SCT exige.

Por último este presenta una revisión de los datos empleados para el diseño del pavimento para la rehabilitación y las propuestas de espesores para restaurar su capacidad estructural.

III.2.1.- CONDICIONES ACTUALES DE LA AUTOPISTA (ESTADO SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO)

Para verificar el estado superficial del pavimento se realizó una inspección visual a lo largo de los 10.4 km. que corresponden a la longitud del tramo por rehabilitar, con el objeto de calificar los daños más notables observados en cada carril del cuerpo derecho, pues este lado es el que presentaba mayor incidencia de deterioros; dicha inspección se realizó con la metodología de CAPUFE (Caminos y Puentes Federales), la cual se menciona en el "MANUAL PARA CALIFICAR LAS CONDICIONES DE SERVICIO EN CAMINOS DE CUOTA" y cuya escala **para evaluar el daño o deterioro va de (NED) no existe deterioro, (L) leve, (M) medio y (S) deterioro severo.**

De acuerdo con el porcentaje de incidencia del deterioro en un área, este puede definirse como un solo tipo de daño o una combinación de ellos. Al final del proceso de recopilación de deterioros **se hace una ponderación de calificaciones, dando como resultado una escala de calificación del elemento que va de (0) pésimo a (5) excelente y con los siguientes niveles intermedios:**

Tabla 74. Evaluación del estado del pavimento según CAPUFE

CALIFICACIÓN	ESTADO DEL ELEMENTO
0	PESIMO
0.1 - 1.0	MUY MALO
1.1 - 2.0	MALO
2.1 - 3.0	REGULAR
3.1 - 4.0	BUENO
4.1 - 5.0	MUY BUENO
5.0	EXCELENTE

En el caso en estudio, se anotaron los resultados en la tabla 75; en ella se presenta la calificación **del deterioro superficial observada en el tramo;** se hace notar mediante colores la calificación; **de 1 a 2 se presenta el deterioro en mal estado con color rojo, de 2 a 3 con amarillo en el caso de regular estado y para el buen estado superficial, la calificación de 3 a 5, en blanco**

*1 condiciones de deterioro previo a la rehabilitación, de acuerdo al estudio de evaluación del pavimento.

En general el carril de baja velocidad del cuerpo derecho presento la mayor cantidad de deterioros respecto al carril de alta, donde fue menos frecuente la incidencia de daños superficiales.

TABLA 75. DETERIOROS

CARRIL	CONCEPTO	KILOMETRAJE										
		27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
ALTA	ASENTAMIENTOS											
	ONDULACIONES											
	RODERAS	REGULAR										
	GRIETAS		REGULAR	REGULAR						REGULAR	REGULAR	
	PIEL DE COCODRILO	REGULAR									REGULAR	
	MAPEO											
	CALAVERAS Y BACHES											
	LLORADO											
	DESGRANAMIENTO DE CARPETA		REGULAR	REGULAR								
	REPARACIONES											
	RIEGO DE SELLO											
	BAJA	ASENTAMIENTOS										
ONDULACIONES												
RODERAS		REGULAR	REGULAR					REGULAR	REGULAR	REGULAR	REGULAR	
GRIETAS		REGULAR	REGULAR							REGULAR	REGULAR	
PIEL DE COCODRILO												
MAPEO												
CALAVERAS Y BACHES		REGULAR										
LLORADO												
DESGRANAMIENTO DE CARPETA												
REPARACIONES												
RIEGO DE SELLO										REGULAR		
ACOT. EXT	ANCHO											
	HOMBROS CAIDOS		REGULAR	REGULAR	REGULAR							
	LLORADO											
	DESGRANAMIENTO DE CARPETA								REGULAR	REGULAR		
	RIEGO DE SELLO	MALO		MALO								

	BUENO
REGULAR	REGULAR
MALO	MALO

En gran parte del tramo estudiado se destaca en primer lugar **de incidencia la formación de roderas en el carril de baja velocidad, con magnitudes que van de 0.2 a 1.1 cm. en promedio, y valores máximos que llegan hasta los 2.0 cm. En el subtramo del Km. 32 al Km. 35 de dicho cuerpo las roderas son más frecuentes;** en la **tabla 76** se presenta un listado de la magnitud de las roderas medidas y en las fotografías que le suceden se observan algunos ejemplos de este deterioro. A continuación se remite la tabla 76 que da informe de las roderas del tramo estudiado y de su magnitud.

Tabla 76. RODERAS

ESTACIÓN	CARRIL	RODERA	DEFORMACIÓN cm	DEFORMACIÓN cm / km	
				PROMEDIO	MÀXIMA
27+200	BAJA	RODERA	1.0	0.49	1.6
28+000	BAJA	RODERA	0.0		
28+100	BAJA	RODERA	0.0	0.45	0.9
29+000	BAJA	RODERA	0.8		
29+100	BAJA	RODERA	0.1	0.20	0.5
30+000	BAJA	RODERA	0.1		
30+100	BAJA	RODERA	0.0	0.17	0.8
31+000	BAJA	RODERA	0.0		
31+100	BAJA	RODERA	0.0	0.63	1.1
32+000	BAJA	RODERA	1.1		
33+100	BAJA	RODERA	0.6	1.00	2.0
34+000	BAJA	RODERA	0.5		
34+100	BAJA	RODERA	1.2	1.06	1.9
35+000	BAJA	RODERA	1.3		
35+100	BAJA	RODERA	1.3	0.93	1.6
36+000	BAJA	RODERA	0.7		
36+100	BAJA	RODERA	0.9	0.96	1.3
37+000	BAJA	RODERA	1.0		
37+100	BAJA	RODERA	0.9	0.65	1.6
37+600	BAJA	RODERA	0.1		

En segundo lugar en importancia, se presenta el agrietamiento tipo piel de cocodrilo, que igualmente es más visible entre el Km. 27+200 al 28+000, del Km. 32+000 al Km. 34+000 y a lo largo del Km. 36+000; así en estos subtramos también son visibles algunos agrietamientos longitudinales con un daño que puede considerarse de intensidad media.

Siguiendo en orden de importancia, los **defectos en el riego de sello** ocupan la siguiente posición, ya que se observa desprendimiento del agregado o formando bloques y en algunos sitios presenta superficies lisas o desgranamiento.

Las evidencias de **reparaciones efectuadas en tramos aislados, renivelaciones y baches**, se localizan entre el Km. 27 a 28, así como del Km. 32 a 34 y en todo el Km. 36, se pueden considerar estos **subtramos con daño leve**. A continuación se remiten algunas fotografías de los deterioros antes descritos.

	
<p>Grietas longitudinales en Km. 28+600, en carril de baja circulación del cuerpo derecho</p>	<p>Riego de sello defectuoso y grietas longitudinales en Km. 29+000, en carril de baja circulación del cuerpo derecho</p>
	
<p>Grietas longitudinales en Km. 28+800 en carril de alta circulación del cuerpo derecho</p>	
	
<p>Bacheo y grietas tipo piel de cocodrilo en Km. 27+700, en la incorporación a la Autopista Chamapa - La Venta</p>	

En el caso de los acotamientos, el deterioro que se presento con mayor frecuencia fue el de hombros caídos; menos frecuente fueron los **defectos en el riego de sello** por su falta de agregado y la presencia de superficies lisas. El defecto que ocupó el segundo lugar fue la **presencia del desgranamiento de la carpeta asfáltica y el llorado del asfalto**, lo cual no representan un defecto mayor.

Es importante hacer notar que esta inspección del estado aparente de la superficie de rodamiento no por si sola suficiente para determinar las medidas a aplicar en un trabajo de rehabilitación, por lo cual los estudios de este tipo se apoyan en mediciones de deflexiones con la viga Benkelman y otros equipos modernos, y en resultado de pruebas de laboratorio para verificar la capacidad estructural del pavimento y sus requerimientos en términos de sobrecarpeta. A continuaciones anotan los mencionados resultados.

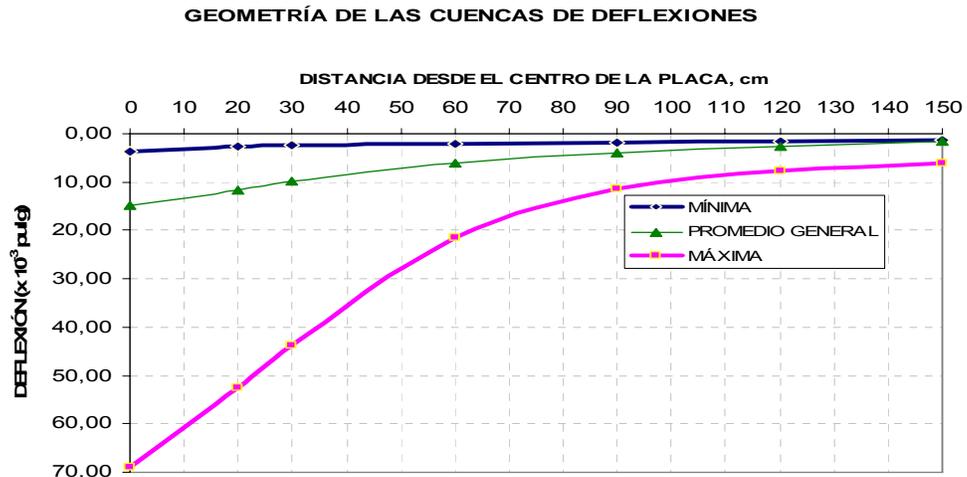
III.2.2- MEDICIÓN DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL.

La medición de deflexiones en el pavimento se hizo utilizando el Deflectómetro de Impactos Dynatest HWD, el cual simula el efecto repentino del paso de un vehículo sobre el pavimento; con este dispositivo es posible determinar las dimensiones y forma de la cuenca de deflexión (ver fig. 53) producida por una carga equivalente a un eje sencillo (4.1 ton).

Adicionalmente **con el programa de computo ELMOD** (Evaluation of Layer Moduli and Overlay Desing) alimentado con los datos de la medición de deflexiones, así como con los datos de tránsito traducidos a número de ejes equivalentes (ESAL), los espesores y el tipo de material que constituyen las capas del pavimento, **es posible determinar los módulos de elasticidad de las diferentes capas.** Con dicho programa también **se identifica la capa del pavimento que es mas débil, de acuerdo a al magnitud del Modulo de elasticidad, y en base de ello hacer el pronóstico de vida remanente del pavimento en conjunto. Con estos resultados se puede también determinar las medidas a tomar para rehabilitar el pavimento con una sobrecarpeta de concreto asfáltico.**

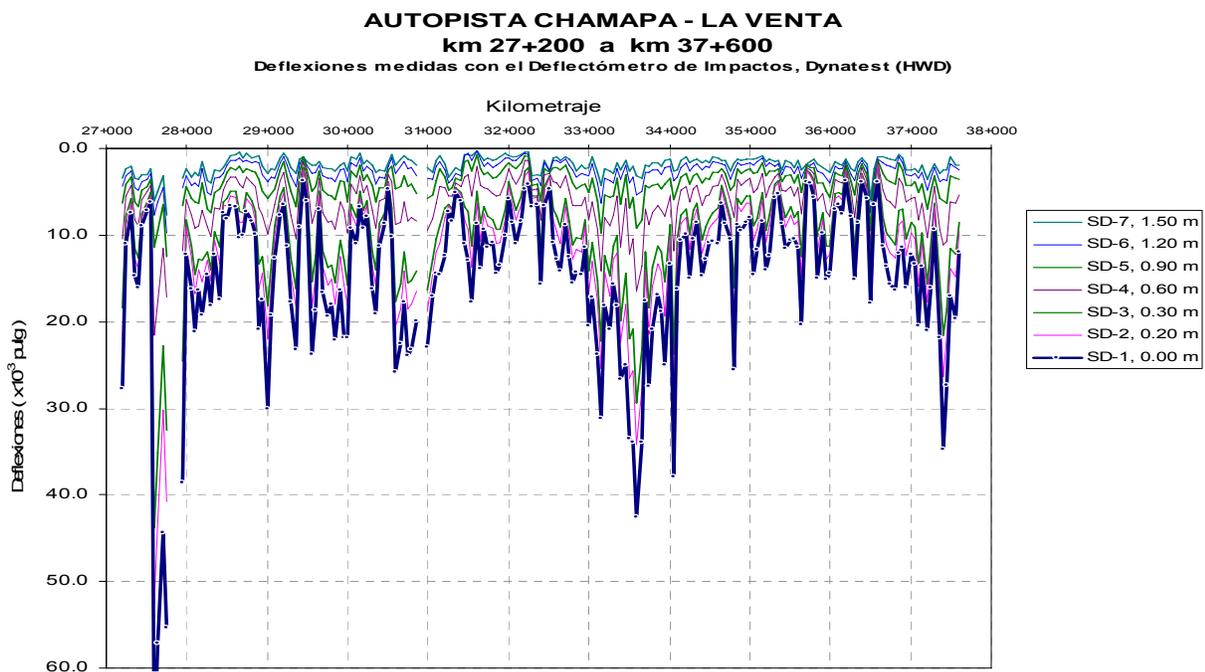
En la figura 53, se puede observar la forma y dimensiones de la cuenca de deflexiones producto de la respuesta del pavimento ante el efecto de una carga; dicha figura representa las cuencas mínima, promedio y máxima registradas a lo largo de los 10.4 km.

Figura 53



La medición de deflexiones se realizó a lo largo de los 10.4 Km de la Autopista, en su cuerpo derecho a cada 50 m sobre la rodada externa del carril de baja velocidad. Los resultados de las deflexiones medidas en los siete sensores de deflexiones con que cuenta el equipo (SD1, SD2 ... SD7), se presentan en la tabla 77, indicándose además el cadenamiento y magnitud de la carga impuesta en cada estación; en la fig.54 se tiene el perfil de deflexiones que representa gráficamente la variación de la respuesta del pavimento a lo largo del subtramo.

Figura 50. Perfil de deflexiones



La magnitud de las deflexiones extremas medidas, fueron obtenidas en los carriles de baja velocidad de ambos cuerpos, con valores de 3.76 y 69.02 x 10⁻³ pulg., (0,0095504 y 0,1753108 cm.) como mínima y máxima respectivamente, con valores promedio por subtramos homogéneos que van de 10 a 28 x 10⁻³ pulg. (0,0254 cm. a 0,07112 cm.). De la revisión de dichos resultados del deflectómetro, se analizaron las sus magnitudes máximas y sus promedio para zonificar y dividir el tramo en subtramos homogéneos para proceder posteriormente a un análisis más detallado.

Tabla 78. Resumen de deflexiones medidas a lo largo de los 10.4 Km. de la Autopista expresadas en x 10⁻³ pulg.

CUERPO	CARRIL	KM A KM	MÁXIMA	MÍNIMA	PROMEDIO	DESV. ESTÁNDAR
DERECHO	BAJA	27+200 a 28+000	69.02	6.24	27.98	22.29
		28+000 a 28+900	21.16	6.61	12.34	4.76
		28+900 a 31+100	30.07	3.76	15.67	6.77
		31+100 a 33+000	17.77	4.15	10.50	3.64
		33+000 a 34+100	42.60	13.27	24.13	8.01
		34+100 a 36+000	25.57	3.91	10.85	4.23
		36+000 a 37+600	34.70	3.76	13.39	7.00

De acuerdo con los niveles de deflexiones medidos en los sitios de prueba, se puede concluir que los niveles de deflexiones alcanzados no son tan altos en general, sin embargo se observan tres zonas: al inicio entre el Km. 27+500 al 28+000, a la mitad del tramo del Km. 33+000 al 34+000 y hacia el final, del Km. 37+000 al 37+600, donde se incrementa notablemente las deflexiones. (Ver figura 54)

III.2.3- EXPLORACIÓN DIRECTA Y MUESTREO

Continuando con los datos relevantes del estudio de evaluación en cuanto a la condición estructural del pavimento de la autopista, se puede mencionar que la **exploración directa y el muestreo se hicieron mediante trece (13) calas o sondeos**, distribuidos estratégicamente en el cuerpo derecho y carril de baja velocidad, **a fin de conocer el espesor acumulado de capas asfálticas**. Para obtener muestras de la carpeta asfáltica, **se utilizó una extractora de núcleos con broca de diamante de seis pulgadas (15cm) de diámetro; el resto de la exploración se llevo a cabo con herramienta manual la cual permitió realizar un muestreo continuo de los materiales de la base, sub-base y subrasante; todas las muestras de los sondeos fueron enviadas al laboratorio de GEOSOL para su análisis y determinación de sus propiedades físicas**.

En general, la estructura de pavimento observada en los sondeos presenta poca variación y está constituida por una carpeta asfáltica, una base hidráulica y una sub-base; el pavimento se desplata sobre una subrasante de espesor variable. (Ver figura 51)

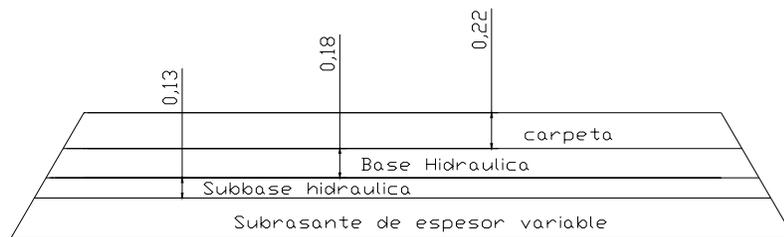


Figura 51. Estructura del pavimento detectada en su evaluación. (Acot. En metros)

La capa de concreto asfáltico. Presentaba espesores promedio de **22cm**; singularmente se observó un caso en donde se han acumulado hasta 46 cm de carpeta, producto de nivelaciones por asentamientos. (Cercanías del Km. 33+000)

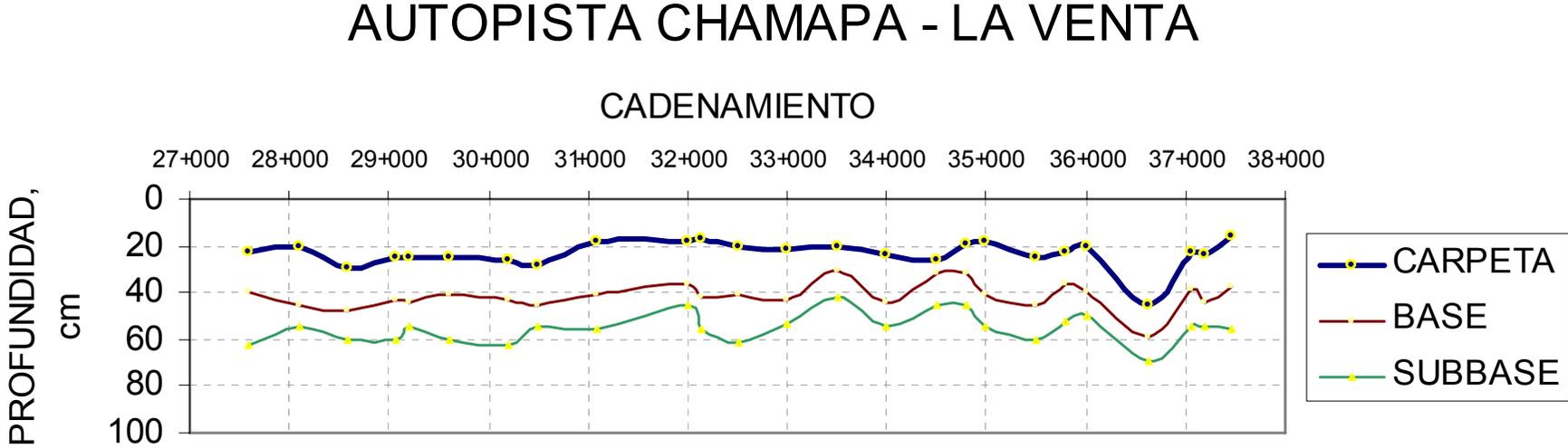
La base hidráulica. Mostró espesores entre 6 y 26 cm y promedio de **18cm**; se constituye mayormente de **grava con finos arcillosos (GC)**.

La sub-base. Presenta valores en el espesor que van de 6 a 19 cm, con un promedio de **13cm**, constituida principalmente por **arena o grava con finos arcillosos (SC), (GC) y algunos casos limosos (SM)**

Subrasante. Capa de espesor variable constituida por arenas y gravas con finos arcillosos o limosos (SC), (SM), (GC) y (ML).

En forma general, los resultados de laboratorio de las muestras obtenidas se indican en la tabla 79 y en la fig.55 se presenta el perfil estratigráfico del pavimento de cada carril y cuerpo de circulación de la autopista estudiada.

Figura.52. Perfil estratigráfico de las secciones



III.2.4- RESULTADO DE LOS ENSAYES DE LABORATORIO

De los resultados en ensayos de laboratorio, se puede mencionar que **de cada una de las muestras extraídas de los sondeos se realizó un análisis, para determinar sus características físicas** y por ende su calidad respecto a las normas que marca la SCT y/o lo recomendado por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT). **Para evaluar la calidad de los materiales se presenta una tabla comparativa (Tabla 79) de las propiedades más importantes que se deben calificar para cada capa** y de acuerdo a los rangos máximos establecidos en la normativa vigente, considerando que la calidad debe ser deseable para este tipo de vialidades.

En la mencionada tabla 79 se presentan los valores promedio obtenidos de las propiedades de los materiales, para los subtramos homogéneos considerados y para cada una de las capas que integran la estructura del pavimento.

Tabla 79. Valores promedio de las propiedades del pavimento, por subtramos y capas (%)

Cuerpo Km a km	BASE				SUBBASE				SUBRASANTE		
	F 10	LL 25	IP 6	EA 50	F 15	LL 25	IP 6	EA 40	F 25	LL 30	IP 10
DERECHO											
27+200 a 28+000	16.1	29.5	8.8	24.5	17.6	28.5	9.3	40.5	25.9	29.4	9.9
28+000 a 28+900	14.9	29.7	9.6	38.1	17.8	28.2	9.5	33.3	30.9	29.6	7.7
28+900 a 31+100	12.5	27.7	10.4	30.1	17.9	28.4	10.3	27.2	32.4	27.1	9.1
31+100 a 33+000	16.0	22.5	10.0	39.5	19.1	23.7	9.4	22.2	16.1	21.6	8.1
33+000 a 34+100	13.1	24.7	7.1	27.5	16.0	22.6	5.7	33.3	59.3	43.5	16.5
34+100 a 36+000	14.0	28.0	9.6	22.3	16.1	28.5	9.4	16.8	19.3	28.1	9.3
36+000 a 37+600	11.5	24.7	7.6	35.4	15.8	23.0	6.7	27.9	44.4	36.0	12.4

Simbología de la tabla:

F: Porcentaje de finos con tamaño menor de 0.074mm para cada capa y cuyo valor máximo debe ser el indicado.

LL: Límite líquido para cada capa y cuyo valor máximo debe ser el indicado.

IP: Índice plástico obtenido para cada capa y cuyo valor máximo debe ser el indicado.

EA: Equivalente de arena obtenido para cada capa y cuyo valor mínimo debe ser el indicado.

Los valores sombreados son valores promedio que no cumplen los límites establecidos en la normativa.

Se puede observar en la tabla anterior que los valores reportados por el laboratorio para cada una de las propiedades de los materiales utilizados en las diferentes capas del pavimento, no cumplen en general con la normativa de la SCT.

La capa de base hidráulica presenta valores altos de plasticidad y muy bajos en el equivalente de arena, inclusive menor para el considerado en calidad adecuada, así también el contenido de finos, rebasa los límites establecidos, considerándose por lo tanto que ésta capa es de mala calidad en general.

La sub-base tampoco cumple para calidad deseable en las propiedades de plasticidad, ya que estos valores superan los límites establecidos; el contenido de arena igualmente no cumple los valores necesarios recomendables.

La capa subrasante no cumple con algunas propiedades de calidad deseable en los materiales utilizados, ya que en algunos casos se excede el contenido de finos y al mismo tiempo presentan plasticidades altas en algunos subtramos.

III.3.- Alternativas de Pavimentación

III.3.- ALTERNATIVAS DE PAVIMENTO EN LA REHABILITACIÓN

En el estudio de evaluación de la autopista se proponen tres alternativas para la pavimentación en la rehabilitación, la cuales se describirán a continuación:

III.3.1.- ALTERNATIVA 1

Esta alternativa consiste primeramente en efectuar un **corte en frío con una perfiladora o Rotomill, eliminando 10 cm de espesor actual de la carpeta asfáltica** y desperdiciándolo. Dicho corte se propuesto para el ancho de ambos carriles, sin considerarse para los acotamiento interno y externo.

Posteriormente se efectúan los trabajos de barrido de la superficie, sellado de grietas, bacheo superficial y profundo, para enseguida aplicar un riego de liga y la colocación posterior de una carpeta de concreto asfáltico de espesor variable en toda la longitud y en todo el ancho de la corona.

Esta alternativa se propuso para con ella mejorar las condiciones particulares del carril de baja velocidad, teniendo que colocar una sobrecarpeta asfáltica con un espesor máximo de 12 cm., que por razones geométricas se extendería al carril de alta velocidad y acotamientos, evitando con ello la formación de escalones y aun cuando dicho acotamientos no requieran ser reforzados. Adicionalmente se planteó la construcción de una carpeta asfáltica delgada (3cm de espesor) para proporcionar la textura, regularidad superficial y condiciones de drenaje adecuadas para el rodamiento en la autopista. Además se recomienda realizar la construcción de bordillos y canalización hacia los lavaderos existentes, como consecuencia de haber elevado el nivel de la rasante en estos subtramos.

La estrategia de conservación implícita de esta alternativa es la aplicación de tratamientos superficiales en plazos aproximados de cinco años y reparaciones a la carpeta en un plazo de siete a ocho años consistente en fresado y reposición de carpeta en un espesor de 5 cm.

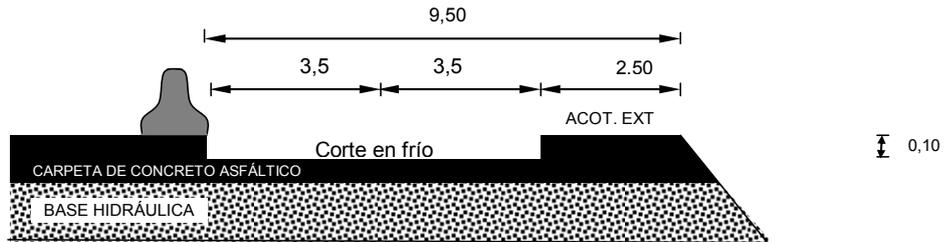
En la figura 56 se presentan las secciones del procedimiento constructivo a implementar con esta alternativa para rehabilitar el tramo en cuestión; **en la tabla 84 se muestra el número estructural para la rehabilitación, considerando los espesores prácticos de sobrecarpeta para los diferentes subtramos homogéneos definidos.**

Del análisis de la tabla 84 se puede concluir que en general el carril de alta velocidad no requiere un refuerzo aun; sin embargo, la acción propuesta se extiende a todo el ancho de los dos carriles y acotamiento por razones geométricas y constructivas.

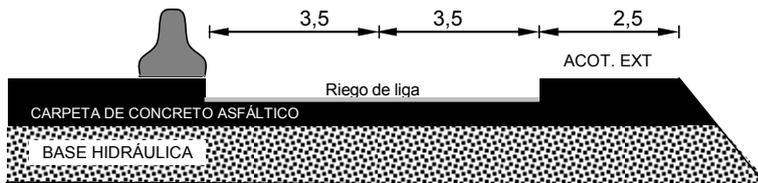
Figura 56. Procedimiento Constructivo de la alternativa 1

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

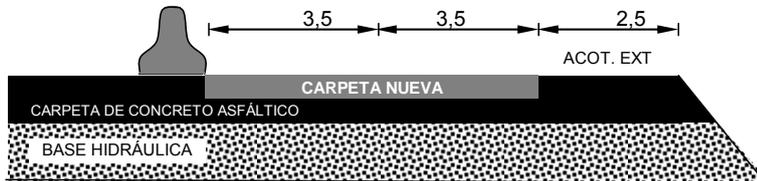
1. Corte en frío, carga y desperdicio de 10 cm de la carpeta actual, formando una caja



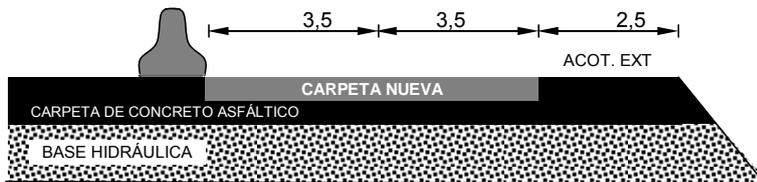
2. Riego de liga



3. Reposición con una carpeta nueva de 10 cm de espesor, compactada al 95% de su PSVM Marshall



3. Riego de liga sobre la carpeta nueva de 10 cm de espesor



4. Colocación de sobrecarpeta nueva de 5 a 12 cm de espesor, compactada al 95% de su PSVM Marshall, según Tabla espesor de sobrecarpeta

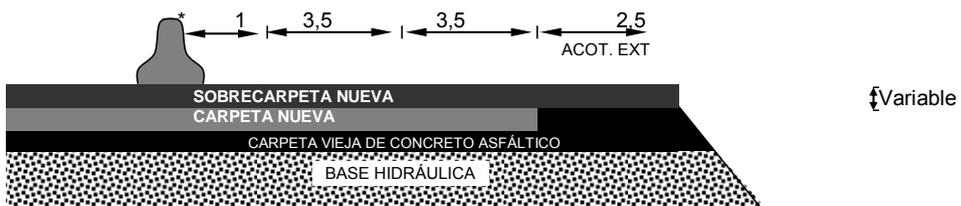


Tabla 84. Cálculo del número estructural y espesor final de carpeta, ALTERNATIVA 1

CUERPO	CARRIL	TRAMO HOMOGENEO	a1	SNreq	SN act = SN3	SN3 - SN ₁₀	SN1*	SN faltante	ESPESOR FALTANTE, cm	ESPESOR DE SOBRECARPETA, cm
DERECHO (A)	BAJA	27+200 a 28+000	0,29	4,92	4,04	2,89	1,73	0,29	1,7	5,0
		28+000 a 28+900	0,28	4,61	3,98	2,86	1,73	0,01	0,1	0,0
		28+900 a 31+100	0,27	6,07	3,40	2,32	1,73	2,02	11,6	12,0
		31+100 a 33+000	0,35	5,07	4,25	2,89	1,73	0,45	2,6	5,0
		33+000 a 34+100	0,25	5,70	3,00	2,01	1,73	1,96	11,3	12,0
		34+100 a 36+000	0,31	4,61	3,97	2,74	1,73	0,14	0,8	0,0
		36+000 a 37+600	0,28	5,02	3,44	2,33	1,73	0,96	5,5	7,0

SN3 - SN₁₀ Número estructural del pavimento sobrante, al cortar la carpeta actual solo 10 cm

SN1* Número estructural de la reposición de la carpeta actual por un nueva de 12 cm de espesor

El espesor de sobrecarpeta es aquel que se necesita para completar el número estructural requerido.

III.3.2.- ALTERNATIVA 2

En primer lugar se efectúa un corte en frío con máquina Rotomill en un espesor de 10 cm. desperdiciando este producto y perfilando la superficie para mejorar la rasante tanto transversal como longitudinalmente. El corte propuesto comprende el área de ambos carriles de circulación y el acotamiento externo.

Posteriormente el espesor restante de carpeta y parte de la base hidráulica hasta una profundidad de 30 cm., se somete a un proceso de recuperación, elaborando con este material una capa de 30 cm. de espesor con la adición de cemento Pórtland en una proporción aproximada de 6% en peso. De esta manera la segunda alternativa constituye una base estabilizada. Es importante resaltar que esta opción aprovecha los materiales de la carpeta asfáltica junto con los de la base hidráulica evitando parcialmente el desperdicio de la carpeta.

Después de construir una nueva base se pretende restituir la capa de rodamiento con concreto asfáltico en dos capas: la primera con fines estructurales y de 12 cm. de espesor, en tanto la segunda capa de concreto asfáltico será delgada (3 cm. de espesor) para definir textura y la rugosidad superficial y drenaje adecuados para el tránsito.

Ahora bien, considerando que la base actual presenta mala calidad en sus materiales de construcción, se verifica que esta alternativa es una solución que estructuralmente hablando mejoraría sustancialmente las características del pavimento. A este respecto, en la tabla 85 se presenta el cálculo del número estructural para cada subtramo y en la figura 57, se presenta esquemáticamente su proceso constructivo.

En este esquema de rehabilitación, **la estrategia de conservación es consiste en tratamientos superficiales a plazos de cinco años y reparaciones a la carpeta en plazos de 7 a 8 años consistente en fresado y reposición de carpeta en un espesor de 5 cm.**

Figura 57. Procedimiento Constructivo de la alternativa 2

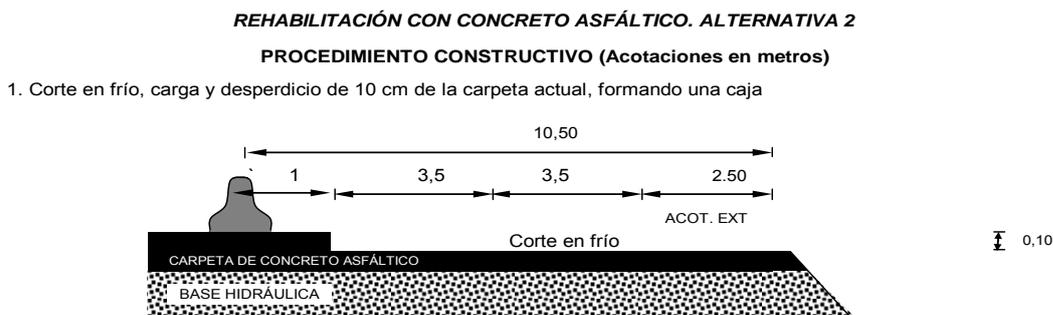
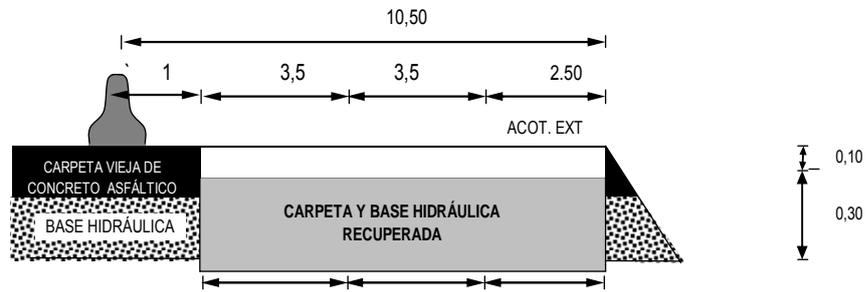
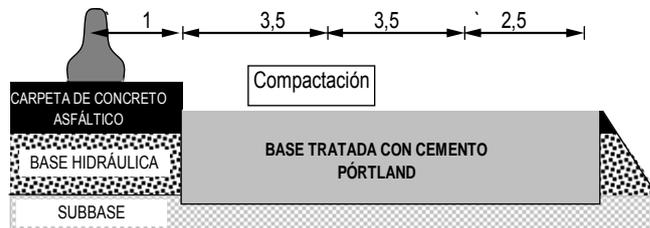


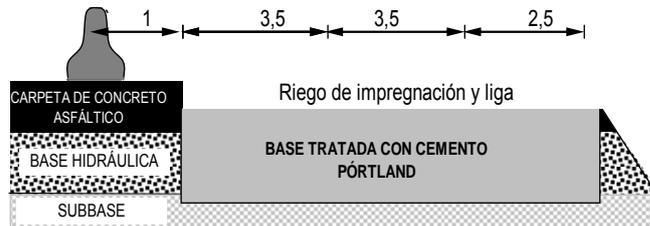
Figura 57. Procedimiento Constructivo de la alternativa 2 (Continuación)



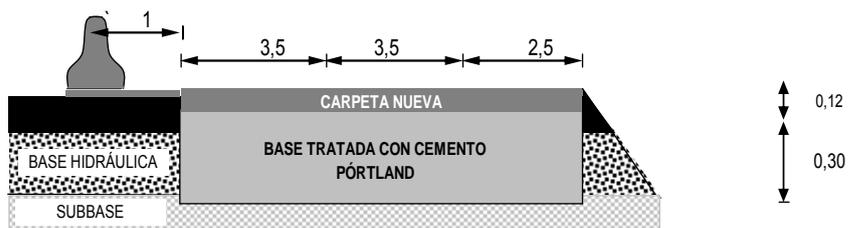
3. Compactación de la base tratada con cemento con la humedad óptima y al 100% del PVM AASHTO Modificada



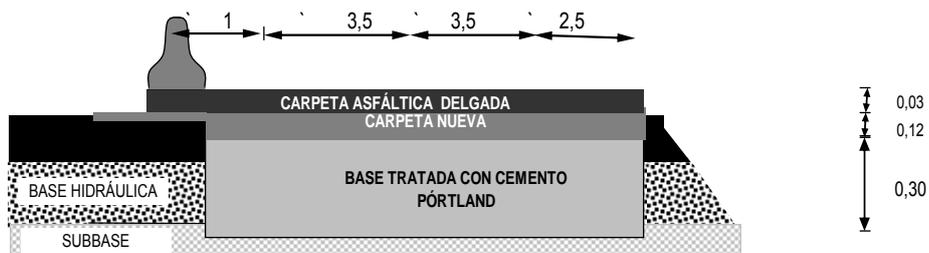
4. Riego de impregnación y liga



5. Colocación de carpeta nueva de 12 cm de espesor, compactada al 95% de su PVSM Marshall



6. Colocación de sobrecarpeta de 3 cm de espesor, compactada al 95% de su PVSM Marshall



Acotaciones en (m)

Tabla 85. Cálculo del número estructural y espesor final de carpeta, ALTERNATIVA 2

CUERPO	CARRIL	TRAMO HOMOGENEO	a2	a3	D1	D2	D3	D1+2	Dr	Drt
DERECHO (A)	BAJA	27+200 a 28+000	0.08	0.10	23.0	17.0	22.0	40.00	0.00	22.00
		28+000 a 28+900	0.09	0.11	25.0	22.0	10.7	47.00	7.00	3.70
		28+900 a 31+100	0.04	0.09	24.5	18.5	14.8	43.00	3.00	11.80
		31+100 a 33+000	0.10	0.09	19.5	28.8	13.5	48.30	8.30	5.20
		33+000 a 34+100	0.12	0.13	20.0	15.5	6.0	35.50	-4.50	10.50
		34+100 a 36+000	0.11	0.11	22.0	15.7	13.5	37.70	-2.30	15.80
		36+000 a 37+600	0.07	0.09	22.0	17.8	13.5	39.80	-0.20	13.70

SN_{remanente} Número estructural del pavimento sobrante, debajo de la propuesta de rehabilitación

SN1* Número estructural de la propuesta de rehabilitación con recuperación parcial de la carpeta y base en 30 cm, tratada con cemento y 12cm de carpe
El espesor de carpeta es aquel que se necesita para completar el número estructural requerido.

III.3.3.- ALTERNATIVA 3

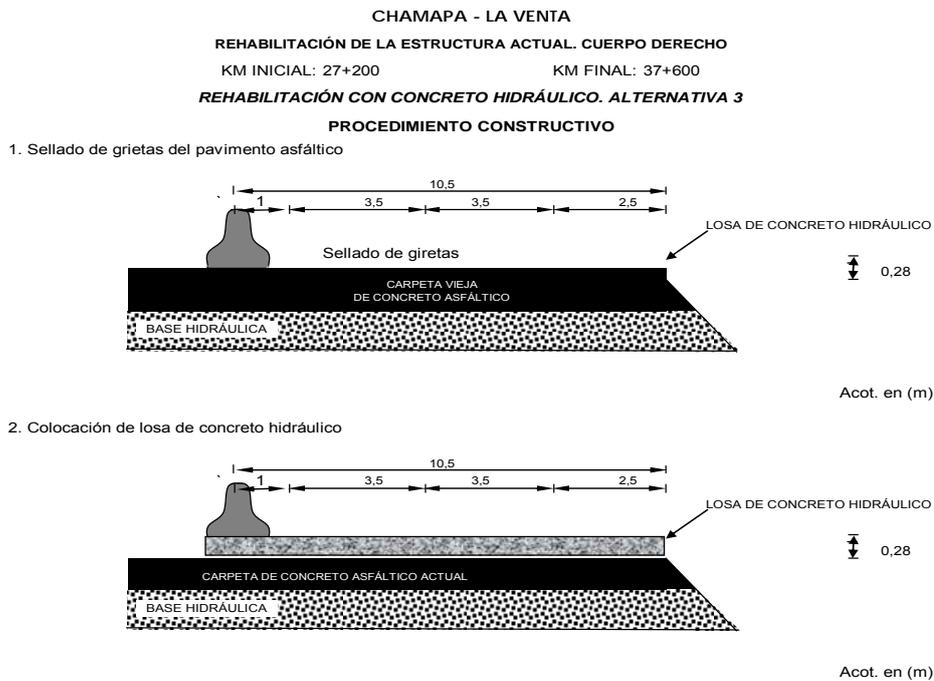
En esta alternativa primeramente se **efectúan los trabajos de sellado de grietas, bacheo superficial y profundo, para enseguida aplicar un riego de liga y la colocación posterior de una carpeta de concreto hidráulico de espesor constante.**

Adicionalmente en esta alternativa también se proyectó la construcción de bordillos y canalización hacia los lavaderos existentes, como consecuencia de haber elevado el nivel de la rasante en estos subtramos.

La estrategia de conservación implícita de esta alternativa consiste en la reparación de grietas y desportillamiento, así como en la reposición de sellos en plazos aproximados de 7 años. También consiste en la reparación y reposición de losas y en caso mayor se requiere del fresado de losas, tal vez a los 14 y 28 años de vida útil.

En la figura 58 se presentan las secciones típicas consideradas dentro de los cadenamientos y en **la tabla 87 se presenta los espesores prácticos de sobrecarpeta para los diferentes subtramos homogéneos definidos.**

Figura 58. Procedimiento Constructivo de la alternativa 3



Durante el proceso constructivo de esta alternativa se debe tener cuidado en la nivelación de la capeta de concreto hidráulico e tal manera que no refleje los deterioros de la asfáltica que le sirve de sustento. Así pues, se debe ser cuidadoso también en la definición de la textura de la capa de concreto hidráulico, siendo necesario primeramente nivelar la rasante.

El diseño ya descrito inicialmente de esta alternativa sugiere aplicar la capa de concreto hidráulico en 28cm. A lo largo de toda la longitud y ancho de la corona, incluyendo la capa debajo de la barrera central y la zona de acotamientos.

III.4.-

Análisis comparativo de las alternativas de pavimentación

INTRODUCCIÓN.

Ya descritas cada una de las alternativas para la rehabilitación de la autopista Chamapa - La Venta, se pueden comparar mediante criterios de economía, seguridad, funcionalidad y armonía con el entorno, siendo evaluados con parámetros como la resistencia, durabilidad, textura superficial, tiempo y facilidad de rehabilitación, deformabilidad y susceptibilidad al deterioro (mantenimiento), ruido, luminosidad, economía, costo de construcción y costo de mantenimiento.

Los criterios de comparación se fundamentan en las investigaciones revisadas y en la opinión de profesionales en pavimentos y se anotan para emplearlos en la confrontación de los tipos de pavimento (rígido y flexible), poniendo como ejemplo de aplicación la rehabilitación referida de la autopista Chamapa- La Venta.

Este capítulo busca recalcar que la elección de una de las alternativas de pavimento planteada en el capítulo III.3, debe estar sustentada por principios técnicos, empíricos y otros parámetros que garanticen una vía de tránsito segura, durable y factible en términos económicos. Así mismo, este trabajo de tesis pretende orientar al lector en conceptos básicos de pavimentos y familiarizarlo con los términos más empleados en el ámbito de la pavimentación, generando con ello las bases para poder diferenciar y decidir entre la aplicación de pavimentos rígidos o de pavimentos flexibles, poniendo como ejemplo el análisis de pavimentos en la rehabilitación de la autopista Chamapa - La Venta. En el caso particular de la autopista, se describen las características más relevantes de la misma y se hace referencia a los estudios de evaluación correspondientes a la rehabilitación. También, al final de esta lectura, se conocerán las características relevantes de tránsito para evaluar las cargas en pavimentos, las propiedades deseables de diversos materiales requeridos en su construcción, así como información básica de pavimentos asfálticos y de concreto hidráulico, para poder decidir a favor de las mejores y más rentables alternativas, en base de criterios de resistencia, funcionalidad y economía.

III.4.1.- CONSIDERACIONES GENERALES

Es conveniente mencionar que en el proyecto, el diseño y la construcción de una vía terrestre, tanto la utilización de pavimentos de concreto hidráulico (rígidos) como la de los de concreto asfáltico (flexibles) puede satisfacer los requerimientos y exigencias técnicas, de costo y de calidad de la obra; sin embargo es necesario e indispensable considerar las ventajas entre unos y otros dentro de las mismas condiciones de una obra, de acuerdo a los conceptos teóricos que se posean sobre el comportamiento de cada uno de ellos y en base a la experiencia adquirida en obras de la misma índole.

También cabe mencionar que las consideraciones de análisis y diseño empleadas como parámetro para el diseño de las tres alternativas de pavimento no son iguales (especialmente las condiciones de tráfico y el periodo de operación); además de que cada diseño aplicado del pavimento determina estructuras diferentes, en gran medida porque cada alternativa emplea materiales diferentes, procesos constructivos especializados y congruentes con cada tipo de pavimento.

III.4.2.- CRITERIOS PARA COMPARAR LAS ALTERNATIVAS DE PAVIMENTO.

Para la evaluación de estos criterios se recurre a los conceptos básicos descritos para pavimentos flexibles y rígidos, tratando en forma general los beneficios de cada tipo de pavimento. Refiriendo también a los capítulos anteriores, fue necesario describir las propiedades fundamentales de los materiales para la construcción de estos pavimentos, pues **básicamente de la elección del material y atendiendo las ventajas de su uso, se realiza técnicamente la selección del tipo de pavimento adecuado para aplicarse en la rehabilitación.**

Respecto a las consideraciones económicas para evaluar la conveniencia del empleo de uno u otro pavimento, debe aclararse que no basta con tomar en cuenta solo el costo de construcción de la estructura, sino que deberán considerarse además los costos del mantenimiento de cada tipo de rehabilitación para el periodo de operación de la obra. Es importante que este trabajo de tesis se considere vea como un caso típico de aplicación de estos criterios para decidir entre las posibles alternativas de pavimentos (flexibles o rígidos).

Finalmente conviene indicar que en la investigación de trabajos diversos sobre los pavimentos, **abundan los documentos tendenciosos, con manifestación plena por el uso del concreto hidráulico y otros por el uso del concreto asfáltico y por ello es importante saber identificar objetivamente ambos materiales en base de las condiciones específicas en que conviene cada aplicación, con el conocimiento y consideración de los conceptos básicos de cada una de las alternativas y desde luego el pleno entendimiento del problema a resolver.** Así pues, los criterios mencionados se basan en estándares de calidad sobre las características de la obra a realizar:

1.- SEGURIDAD

- A) RESISTENCIA**
- B) DURABILIDAD**
- C) TEXTURA SUPERFICIAL**

2.- FUNCIONALIDAD

- A) TIEMPO Y FACILIDAD DE REHABILITACIÓN**
- B) DEFORMABILIDAD y SUSCEPTIBILIDAD AL DETERIORO (MANTENIMIENTO)**
- D) RUIDO**
- E) LUMINOSIDAD**

3.- ECONOMÍA

- A) COSTO DE CONSTRUCCIÓN**
- B) COSTO DE MANTENIMIENTO**
- C) RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN**

A continuación se describen en forma general los criterios que se emplearon para la elección de la alternativa de rehabilitación de la autopista Chamapa - La Venta.

III.4.2.1.- SEGURIDAD

La seguridad del pavimento depende fundamentalmente de su resistencia al tráfico y a las condiciones de intemperismo a las que se verá sometido. Esta característica del pavimento puede considerarse como un criterio para favorecer a alguna de las alternativas de pavimento. Su análisis se realiza **de acuerdo a la capacidad estructural de terracerías y pavimento, y también de acuerdo con las condiciones superficiales del pavimento.**

En general la dificultad de medir este parámetro y garantizar que una alternativa es más segura que otra radica en que cada opción de pavimento presenta diferentes parámetros de resistencia y durabilidad que generan condiciones particulares para su configuración estructural. Incluso cada alternativa de pavimentación emplea distintas características de diseño, entre ellas la elección del material de la capa de rodamiento; tal es el caso presentado en la fase de proyecto del TDPA, en donde se emplean tasas de crecimiento y periodos de servicio diferentes. **De esta manera, se observa que las consideraciones de diseño de cada alternativa no son las mismas; pero para fines prácticos de este trabajo, se considera que la implantación de cualquiera de ellas ofrece un grado óptimo de seguridad inicial, dentro de las condiciones implícitas de los materiales que involucran. Y aunque no son del todo comparables estos parámetros, si lo son la resistencia y la durabilidad que se presentan en determinado periodo de servicio.**

III.4.2.1.1.- RESISTENCIA Y DURABILIDAD

En este trabajo la resistencia se define en función del número de ejes equivalente que es capaz de soportar la estructura en servicio antes de requerir una reconstrucción.

La durabilidad va implícita en el periodo de diseño de cada alternativa y depende básicamente de las propiedades de los materiales empleados en la construcción de cada una de ellas.

La resistencia y la durabilidad **dependen fundamentalmente del tráfico y del intemperismo** que se prevén ocurran en la autopista a rehabilitar. Con respecto al tráfico actual en la autopista Chamapa – La Venta se verifica que es intenso y, según los antecedentes de aforo, la tasa de crecimiento es mucho mayor que el promedio (10% contra la media de 4%). Estas **condiciones de carga tan intensas (con tendencia de mayor crecimiento en cargas pesadas) favorecen la utilización de la segunda y tercer alternativas de rehabilitación (capítulo III.3).**

En general, para un mismo periodo de diseño e idéntico número de ejes equivalentes, la estructura del pavimento rígido presenta una mayor resistencia al tránsito y al intemperismo que la de pavimento asfáltico, debido a la resistencia a la compresión y el alto módulo de elasticidad del concreto hidráulico endurecido. En el caso de las alternativas que usan carpeta asfáltica, conforme esté en servicio el pavimento, debido a la susceptibilidad de este material a sufrir deformaciones permanentes y transmitir casi completamente la carga a los estratos inferiores, se deberá tener en cuenta que éstas continuarán deformándose rápidamente, lo cual redundará en la disminución de la vida útil del encarpetao asfáltico que se coloca sobre ellos.)Frecuentemente por efecto de deterioro, las alternativas de pavimento flexible requieren de tratamientos superficiales y reencarpetaos en periodos de 5 a 7 años como máximo, con los cuales se recupera el grado de seguridad perdido anteriormente por el envejecimiento rápido del concreto asfáltico en servicio).

La primera alternativa (sobrecarpeta de pavimento flexible) no considera el criterio de la estabilización de las capas de base y subbase; la segunda alternativa si aplica dicha estabilización, y considera que dichas capas se mejorarán en cuanto al cumplimiento con la normativa de la SCT respecto a su límite plástico, límite líquido, equivalente de arena, contenido de finos y su VRS respectivo.

En general, del análisis de la capacidad y propiedades de las capas térreas y a pesar que el estudio de evaluación declara que estas capas son de calidad inadecuada, se verifica que las medidas de granulometría, límite líquido, contenido de finos y el índice plástico, si bien no cumplen con la normativa SCT, su valor no difiere en exceso de los parámetros que dicha normatividad sugiere para obras viales tipo I (Ver capítulo II.1). Por ello se considera que la calidad de estos parámetros es tolerable con respecto a las siguientes magnitudes.

	% finos máx.	Limite Líquido máx.	Índice plástico %	Equivalente de arena min.
Subrasante	35%	40%	20% máx.	---
Subbase	15%	30%	6%	30%
Base	15%	30%	6%	50%
Capa asfáltica	4% máx.	--	--	60%

Nota: Las obras viales tipo I son caminos cuyo tránsito en número de ejes equivalentes de 8.2 ton acumulado en un periodo de 10 años, este comprendido entre 10, 000, 000.00 y 50, 000, 000.00. Consultar manual de calidad de los materiales en secciones estructurales de pavimentos carreteros. SCT

En el caso de la tercer alternativa, ésta no mejora las capas de base y subbase afectadas por asentamientos excesivos y pasa por alto la minimización de las condiciones de deterioro más severas a nivel de base y sùbase; sin embargo esta alternativa de rehabilitación uniformiza la distribución de esfuerzos mediante la capa rígida superior.

Con estas observaciones respecto al mejoramiento de las capas de base y subbase, **la segunda alternativa se ve favorecida al promover un mejoramiento en las capas inferiores del pavimento, con lo cual garantiza una menor susceptibilidad a la deformación a nivel de base y sub-base.**

Siguiendo con el análisis de la información relevante de las alternativas de rehabilitación para poder elegir alguna de estas aplicaciones, es útil ahora revisar **la estructuración que plantea cada opción.**

El diseño del pavimento rígido se realizó para un periodo de servicio que se estima en 18 años, durante los cuales habrá de soportar los 86, 615, 989.00 ejes equivalentes (Capítulo II.4) con la siguiente configuración estructural:

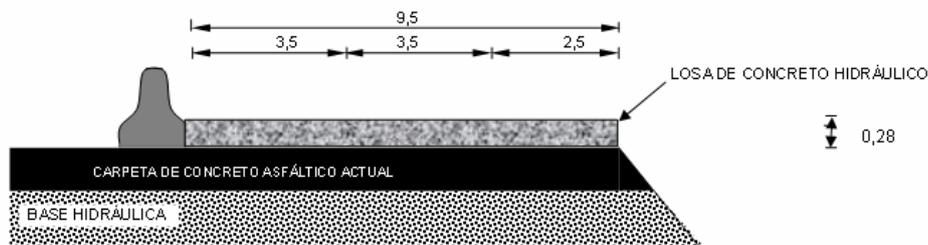


Fig. 59. Alternativa rígida. Soporta mayor número de ejes equivalentes con condiciones más severas de diseño.

En lo correspondiente a **la primera y a la segunda alternativas de pavimentación (aplicación de pavimento flexible), se estima que tendrán un periodo de servicio de 15 años**, con un mantenimiento mayor consistente en sobre - encarpetados. Durante dicho periodo **se estima que el pavimento habrá de soportar el paso de los 20, 636, 388.00 ejes equivalentes.** (Capítulo II.4)

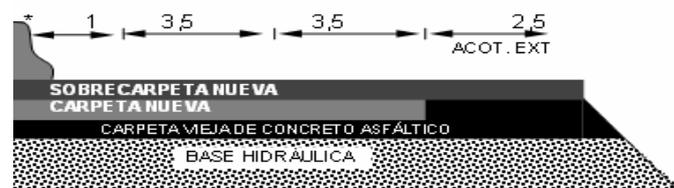


Fig. 60. Primera alternativa de pavimento flexible

Comparando la alternativa de pavimento rígido con la primera alternativa de pavimento flexible se nota que, para periodos de servicio de 18 años en el primer caso y 15 años en el segundo caso, existe una gran ventaja en la aplicación del whitetopping en cuanto a resistencia y durabilidad. En general, de acuerdo al diseño de cada alternativa de pavimento (capítulo II.4), se observa que la opción de pavimento rígido soporta un **número de ejes equivalentes mucho mayor que la capacidad de la estructura flexible. La diferencia en cuanto al número de ejes equivalentes las tres alternativas de rehabilitación, favorece la opción rígida aún cuando ésta se diseñó empleando una tasa de incremento vehicular también mayor en comparación con la correspondiente del pavimento flexible; en la revisión del diseño de pavimentación se observa que las tasas de incremento vehicular entre dichas alternativas difieren en por lo menos el doble, considerando que en el pavimento flexible se empleó una tasa conservadora de 5% anual mientras para el pavimento rígido se utilizó un incremento anual vehicular de 10.5%. (Capítulo II.4).** A este respecto y de acuerdo con la tendencia de crecimiento vehicular más probable en la autopista, se consideró que la tasa de crecimiento de 10.5% es una medida poco factible de conservarse durante el periodo de los 18 años, pues este crecimiento saturaría rápidamente la capacidad de servicio de la autopista, a pesar de las medidas de ampliación de carriles en casetas y gasas vehiculares que se proyectan a futuro. De esta manera **la alternativa conlleva un mayor grado de seguridad y muestra una mayor durabilidad, aún en condiciones de carga más severas,; sin embargo, no se puede negar que la tasa de crecimiento vehicular para la cual se diseñó (10.5%), convierte dicha alternativa, por efecto de esta comparación, en una opción muy sobrada para la expectativas de crecimiento vehicular esperadas.**

Continuando el análisis ahora con respecto a la capacidad de absorber deformación de las capas de base y subbase del pavimento deteriorado, se verificó que la primera alternativa no evitará que los asentamientos asociados a deterioros en dichas capas sigan acumulándose cuando vuelva al servicio la autopista, y en general esta **aplicación es un paliativo pobre del debilitamiento de las capas de base y subbase en tanto no se les aplique a éstas un proceso de mejoramiento que les dote de una mayor resistencia para soportar la intensidad del tráfico actual y futuro. (Ver capítulo III.3)** En cambio la segunda alternativa es una solución más apta para controlar el deterioro de las capas de base, sub-base y terracerías pues, mediante el mejoramiento éstas, mitigará los asentamientos diferenciales, producto de la mala calidad de los materiales existentes. En lo que corresponde a la tercer alternativa (implemento de pavimento rígido) tampoco mejora dichas capas, pero se confía en que el deterioro de la calidad los materiales no se incremente significativamente, pues estarán protegidos por una capa muy rígida que uniformizará los esfuerzos producto de las cargas.

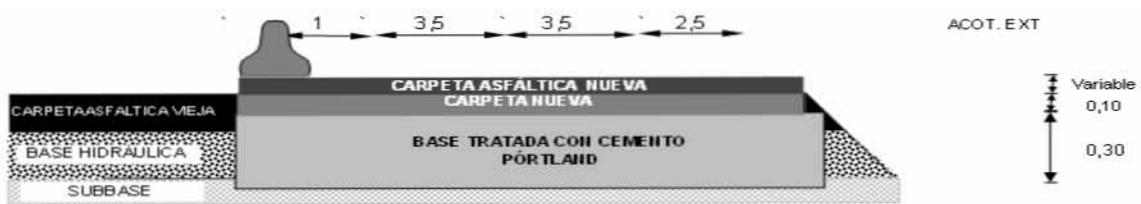


Fig. 61. Segunda alternativa de pavimento flexible. La mejor opción para controlar los asentamientos

La durabilidad de un pavimento es un parámetro de resistencia del mismo a las solicitaciones que afectan su capacidad de soporte en forma acumulativa, lo cual genera un envejecimiento de los materiales y el deterioro implícito de cargas de tránsito y factores ambientales. En este panorama la noción de seguridad varía con el tiempo de servicio y las medidas de mantenimiento que se apliquen en su superficie. Ya tratado el tema del tránsito y sus efectos en la durabilidad, se tiene que atender la condición de intemperismo.

El intemperismo es la otra solicitación más significativa que actúa sobre los pavimento deteriorándolo. Sus efectos, al igual que los del tránsito se manifiestan en una disminución de la durabilidad del pavimento y más específicamente sobre la carpeta de rodamiento que es la capa más expuesta. Así pues, haciendo un rápido análisis del pavimento propuesto por cada alternativa de pavimentación se verificó que la opción rígida manifiesta más durabilidad, pues la capa de concreto hidráulico tiene menor susceptibilidad al deterioro que el concreto asfáltico, ya que este último presenta un rápido envejecimiento que se agrava con el servicio intenso de la autopista.

En general en pavimentos asfálticos el propio asfalto es el material que se oxida rápidamente y por tanto deja de funcionar adecuadamente como un cementante para ligar los agregados de la capa de rodamiento. Este defecto genera desgranamientos, grietas, roderas, baches, etc.

El desgaste superficial de los agregados también es un factor a considerar en la durabilidad de estos pavimentos. Sin embargo este punto está implícito en la textura y rugosidad de la capa de rodamiento. A este respecto se recomienda no emplear agregados calcáreos, que son susceptibles de desgaste rápido ante el contacto repetido y el derrapamiento de los neumáticos. En general, la resistencia al desgaste de los agregados no influye significativamente en la comparación de un pavimento flexible con uno rígido, pues aunque el material de agregado pétreo empleado en una carpeta asfáltica sea de muy buena calidad, el asfalto constituye el elemento débil de la mezcla que la hace poco durable.

Cabe destacar que en las investigaciones sobre concreto asfáltico se realizan nuevas modificaciones a las propiedades de los asfaltos para hacerlos más durables en condiciones de carga repetitiva y ambientales, como en el caso del denominado **Stone Mastic Asphalt (SMA)**, para generar una expectativa de servicio de hasta un 40% extra con respecto a un concreto asfáltico normal.

En general se puede concluir que la durabilidad de un pavimento rígido es mucho mayor que la de un pavimento con capa de rodadura hecha de asfalto y su empleo se ve favorecido por requerir de menos intervenciones de reparación en comparación con el pavimento flexible.

III.4.2.1.2.- TEXTURA SUPERFICIAL

Cuando los trabajos de construcción de las capas de base, sub-base y subrasante se realizan de acuerdo con lo especificado como la calidad óptima, entonces se puede esperar que el comportamiento de un pavimento en operación sea igual al previsto en la etapa de diseño. De esta manera, **la seguridad de un pavimento depende mayormente de las condiciones en la que se encuentre la capa de rodamiento, sin pasar por alto que se debe contar con el soporte necesario de las capas inferiores. La textura es una de las propiedades de la capa de rodamiento que le confiere seguridad de circulación al pavimento.**

En las alternativas de concreto asfáltico la textura se controla comúnmente con temperaturas adecuadas de tendido y compactación, con la consistencia de la mezcla, con el equipo de compactación y su número de pasadas y con el rastrilleo en detalle de zonas irregularmente tendidas. Este proceso se ve favorecido por la facilidad de manejo de la mezcla tendida en temperaturas de 110 a 150 grados centígrados) y por a consistencia que brinda el asfalto a estas temperaturas.

En la alternativa de concreto hidráulico, la capa de rodamiento recibe su textura con un rayado superficial con determinadas especificaciones (Ver capítulo II.1) y requiere de un estricto control de calidad cuando se imprime la superficie del pavimento. En general se considera que este proceso es menos sencillo y rápido que la generación de la textura en el concreto asfáltico.

En una capa de rodamiento, además de procurar la mejor adherencia neumático – pavimento, se busca que permita el rápido desalojo de agua ante las precipitaciones pluviales de la zona. Respecto a la capacidad de drenaje superficial del pavimento, este factor se auxilia de las pendientes longitudinales y transversales de la capa superficial; adicionalmente éste drenaje constituye parte del sistema general de drenaje superficial con elemento como obras de laterales (cunetas y bordillos).

En general las condiciones de drenaje de la capa de rodamiento quedan supeditadas a la textura del material tendido y comúnmente se acepta que el material que ofrece mejores condiciones de desalojo del agua es el concreto hidráulico, a pesar de que su proceso de texturizado es más elaborado.

III.4.2.1.3.- FRICCIÓN.

La fricción de la superficie de rodamiento se determina de acuerdo al acabado del pavimento. Sirve de parámetro para evaluar la seguridad de circulación sobre el pavimento y presenta su valor crítico (más desfavorable) cuando el pavimento esta mojado.

Existen diversos métodos para medir la fricción, y en ellos se emplean equipos muy especializados. Para consultar los diversos equipos con que se realizan las pruebas de fricción en un pavimento se recomienda consultar la referencia 37.

Comúnmente la fricción se mide en forma indirecta al determinar la textura del pavimento con ayuda de técnicas como el cono de arena. En general su valor depende de factores como:

- Acciones ambientales (intemperismo)
- Factores inherentes a la carretera (geometría y propiedades de los materiales de construcción de la capa de rodamiento)
- Características de conducción del vehículo (velocidad y estado de las llantas)

También es frecuente que las pruebas para fricción se realizan con vehículos y equipos especiales que miden la resistencia a la fricción para varias velocidades de circulación en la superficie del pavimento mojado.

Igual que otras características superficiales, **los niveles de fricción de un pavimento varían con el tiempo como consecuencia del pulido de la superficie por la acción de las llantas de los vehículos. Este efecto erosivo de las sollicitaciones vehiculares e intemperismo es diferente para los dos tipos de pavimentos; siendo más notorio en la superficie del pavimento flexible, debido al efecto de adherencia limitado que presenta el agregado de una mezcla asfáltica.** La resistencia a la erosión también depende de la calidad del agregado a emplear en la capa de rodamiento; por ejemplo en caso de utilizar agregados calizos la erosión se incrementa más rápido en comparación con el uso de agregados volcánicos. En el caso de las alternativas de rehabilitación de la Autopista Chamapa – La Venta, los agregados a emplear son de origen volcánico. **Específicamente los agregados para elaborar concreto asfáltico serán elegidos en una planta proveedora, y en caso de los de concreto hidráulico los agregados**

se obtendrán de la misma zona minera por la cual se desarrolla la autopista, con la ventaja de contar con varias plantas de elaboración de concreto hidráulico muy cercanas al tramo a rehabilitar.



Entre las diversas formas de medir la fricción en pavimentos, destaca su medición empleando una correlación con el coeficiente de fricción físico; Con la prueba se puede determinar la resistencia al deslizamiento y en general consiste en medir la pérdida de energía del péndulo cuyas características corresponde a ciertas especificaciones; esta provisto en su extremo de una zapata de caucho. La pérdida de energía se mide por el ángulo suplementario de la oscilación del péndulo. (Ver capítulo II.1)

Los valores de referencia que sirven para evaluar un pavimento se obtuvieron de experiencias europeas para pavimentos mojados y para pavimentos secos:

Pavimento \ Vehículo	C2, C3, C4	B1, B2	T2-S2, T3-S2	T3-S2-R2, T3-S2-R4
Rígido	0.50	0.45	0.45	0.50
Flexible	0.50	0.50	0.45	0.45
Poroso	0.45	0.45	0.40	0.40
Lechadas	0.50	0.55	0.55	0.45
Sellos	0.50	0.45	0.45	0.40

Tabla No. 88. Límites permisibles del **coeficiente de fricción para pavimento mojado**. REF*38

Pavimento \ Vehículo	C2, C3, C4	B1, B2	T2-S2, T3-S2	T3-S2-R2, T3-S2-R4
Rígido	0.80	0.85	0.80	0.80
Flexible	0.80	0.85	0.85	0.85
Poroso	0.75	0.85	0.85	0.85
Lechadas	0.80	0.90	0.80	0.85
Sellos	0.85	0.90	0.75	0.80

Tabla No. 89. Límites permisibles del **coeficiente de fricción para pavimento seco**. REF*38

En el sistema de evaluación de pavimentos de la SCT se recomienda usar en carreteras mexicanas un valor del coeficiente de fricción de 0.8

para pavimentos rígidos y de 0.5 para pavimentos flexible. **En general el carreteras mexicanas el sistema de evaluación de pavimentos de la SCT adopta el valor de 0.5 como nivel de cumplimiento o no de la seguridad del pavimento (condición crítica)**

En la aplicación de esta prueba para pavimentos flexibles se registra también la temperatura de la capa de rodamiento. La referencia (REF*38) indica necesaria la evaluación del coeficiente de fricción anualmente para garantizar un mantenimiento oportuno de la textura del pavimento.

II.4.2.1.3.1.- ACCIONES MÁS COMUNES PARA MEJORAR EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

En México, y como medida de mejoramiento del coeficiente de fricción, en carreteras federales, se aplica el riego de sello a base de granzón y emulsión de liga, y en el caso de autopistas de altas especificaciones con altas velocidades de operación, se sugiere aplicar el tratamiento con (Lechada Asfáltica) Slurry Seal, para garantizar mejor adherencia y poco o nulo desprendimiento de agregado. En pavimentos rígidos de concreto hidráulico se recomienda el ranurado transversal, con base en un estriado mecánico en frío, de 0.5cm de ancho y 0.5cm de profundidad, con espaciamiento de 10cm (entre franjas) para lograr un eficiente drenaje superficial y disminuir la acumulación de la lámina de agua que pueda provocar acuaplanéo. (Revisar Capitulo II.1 y la referencia III.4.2.1.3.2)

En el caso de las alternativas de pavimento analizadas para la rehabilitación, las que corresponden a pavimento flexible controlan el drenaje superficial con la capa delgada de concreto asfáltico (3cm de espesor), garantizando un coeficiente de fricción de 0.60-0.65 y un drenaje de 0.10% (método de prueba AASHTO T305), con lo cual se minimizan las condiciones de acuaplanéo. Sin embargo, esta capa no resulta tan durable en su condición de textura en comparación con el caso del concreto hidráulico.

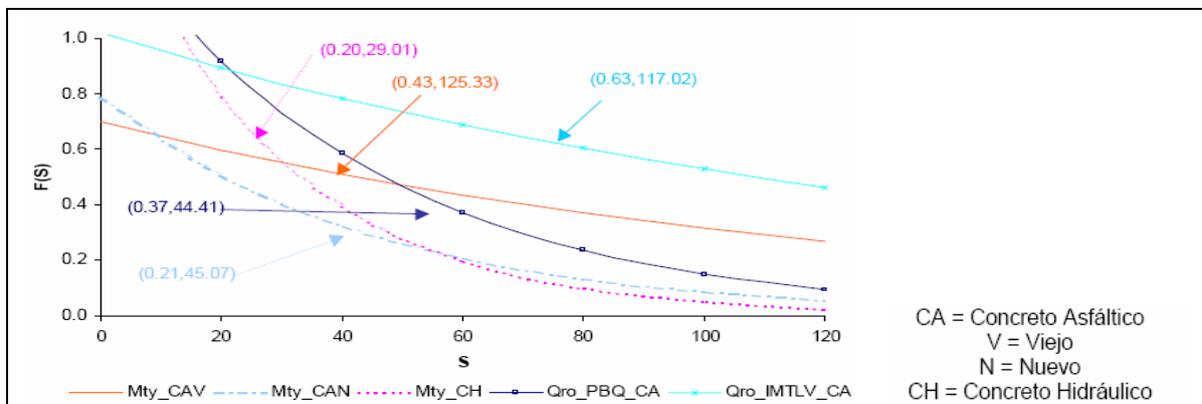


Figura 63. Coeficientes de fricción para pavimentos de concreto hidráulico y asfáltico en servicio. REF*44.



Qro_PBQ_CA



Qro_IMTLV_CA



Mty_CAN



Mty_CAV



Mty_CH

Fotografías para relacionar el valor del **IFI** con la textura de la carpeta de rodamiento. REF*44:

III.4.2.1.3.2.- HIDROPLANÉO

Cuando un auto circula sobre el pavimento mojado a altas velocidades, puede entonces presentarse el fenómeno de hidroplanéo. Este fenómeno se mitiga controlando la impermeabilidad y la lámina de escurrimiento superficial que se presenta en el pavimento durante las precipitaciones. **El hidroplanéo también se denomina acuaplanéo y es un fenómeno que se relaciona directamente con la textura de la capa de rodamiento del pavimento y puede establecerse como criterio de seguridad para el usuario de la autopista.**

En pavimentos flexibles el hidroplanéo se presenta mayormente en capas de rodamiento cuya textura es cerrada y con macrotextura mala que no permite el rápido desalojo de agua. Para el caso de la rehabilitación, en la primera alternativa de pavimento, se tiene una capa de rodamiento flexible cuyo comportamiento respecto al drenaje superficial se prevé que será el de una mezcla común de textura abierta y en general garantiza un rápido desalojo de las lluvias intensas de la zona. **Con la primera alternativa se asegura la impermeabilidad a capas inferiores mediante el riego de impregnación entre la base asfáltica gruesa y la capa asfáltica de refuerzo;** además, para asegurar las condiciones de impermeabilidad, se aplicará en su superficie un riego de taponamiento contra las posibles infiltraciones, de manera que contribuya a la adherencia entre el neumático y el pavimento. La segunda alternativa tiene iguales condiciones respecto al drenaje superficial. La tercer alternativa, que considera una capa de rodamiento de concreto hidráulico y especifica un acabado que igualmente garantiza el desalojo oportuno y eficiente del agua producto de la lluvia.

Comúnmente en los pavimentos rígidos, el rayado de textura que se le aplica al concreto hidráulico presenta un patrón como el mostrado en la figura 23 del capítulo II.1, con el cual también se garantiza el rápido desalojo de agua; sin embargo debe observarse que para el cumplimiento de esta función, el rayado de textura del pavimento rígido debe conservarse limpio durante el servicio de la estructura, pues el taponamiento de estas líneas de textura genera un escurrimiento de agua diferente al previsto, el cual puede generar hidroplanéo. Esta última anotación resulta de interés porque la zona de desarrollo de la autopista se dedica mayormente a la explotación minera, lo cual genera una actividad intensa de mantenimiento por graneo natural y del producido por los camiones transportistas de las minas. **En general, respecto a las condiciones climáticas cabe recalcar que las alternativas de pavimento flexible requieren necesariamente de mantenimiento continuo para asegurar la seguridad de la capa de rodamiento, lo cual será en el caso del concreto hidráulico propuesto en la tercer alternativa.**

Cabe destacar que ambos tipos de pavimento pueden garantizar el rápido desalojo del agua superficial, ya sea con el aumento del bombeo o bien con la afirmación de determinada textura.

Como conclusión del análisis de las consideraciones de tráfico y clima que actúan sobre la autopista, se puede resumir que la alternativa rígida se ve favorecida por constituir una solución ante el incremento en volumen de tránsito pesado y transporte de pasajeros que se proyecta para el servicio de la autopista, aunque no deja de considerarse una solución muy conservadora.

Finalmente debe mencionarse que una forma de prevenir accidentes por hidroplanéo la constituyen las limitaciones de velocidad impuestas por la autopista mediante señalamiento restrictivo. A este respecto los accidentes de que se tiene registro, y que son generados por acuaplanéo, son todos atribuibles al exceso de velocidad y la falta de precaución del conductor.

III.4.2.2.- FUNCIONALIDAD

En este trabajo de tesis el parámetro de funcionalidad se define de acuerdo a las condiciones de comodidad de circulación en la autopista, que dependen mayormente de la capacidad de deformación de la estructura y de las condiciones de acabado de la capa de rodamiento. (Ver capítulo II.1). Es así que la medida de la funcionalidad depende fundamentalmente de las características de deformación y durabilidad de la estructura.

El análisis de funcionalidad de las tres alternativas de rehabilitación dio gran relevancia a la que propone el mejoramiento de las capas terreas, pues con esta medida, se minimizan los asentamientos excesivos que presentaba la base según los resultados de laboratorio. De esta forma la alternativa flexible también soluciona el problema de reflejar en igual magnitud los asentamientos de las capas de cimentación en la capa de rodamiento.

Como se vio anteriormente, los grados de serviciabilidad que se pueden lograr con asfalto o con concreto hidráulico están definidos a la textura de la superficie de rodadura; esta característica se puede controlar con la dosificación de la mezcla tendida, el material empleado en la elaboración de dicha mezcla y la facilidad de su tendido con personal y maquinaria aptos para esa labor. En general definir la textura de la capa de rodamiento es más fácil y rápido en concreto asfáltico, pero esta se ve también rápidamente deteriorada por la poca durabilidad de este material, por lo cual requiere de constantes tratamientos superficiales.

En los temas siguientes se definen algunos de los factores que sirven para determinar la funcionalidad de un pavimento.

Entre los factores que determinan el grado de comodidad y seguridad del pavimento esta el denominado IRI (Índice de Rugosidad Internacional), el cual es una calificación del pavimento para brindar servicio, toman o en cuanta las deformaciones verticales acumuladas a lo largo de un kilómetro.

III.4.2.2.1.- IRI.

Es el Índice Internacional de Rugosidad que se obtiene a partir de la acumulación de desplazamiento relativo entre masas de carrocería y la suspensión del modelo cuando el vehículo circula por el perfil del camino en estudio. Este sistema analiza la deformación del pavimento por un kilómetro de longitud. Constituye un indicador importante de la carretera y se recomienda emplearlo como valor límite.

País	Autopista Libre	Carretera Nacional	Autopista de cuota
Bélgica	2.5	3.5	2.0
España	2.5	3.0	2.5
Francia	2.0	2.8	2.0
Portugal	2.2	3.5	2.0
Italia	2.0	3.0	2.0

Tabla No. 90. Límites permisibles del IRI (m/Km.). REF*44

Algunas recomendaciones para la elección del IRI en función del TDPA se dan en la siguiente figura:

Figura 63. Condición del pavimento según el IRI. REF*44

Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA)	Índice Internacional de Rugosidad, IRI (m/km)						
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	> 12
0 - 4 999	<i>Muy bueno</i>		<i>Bueno</i>				
5 000 - 9 999			<i>Regular</i>		<i>Malo</i>		
10 000 - 19 999					<i>Muy malo</i>		
> 20 000					<i>Muy malo</i>		

La siguiente figura presenta valores del IRI de acuerdo a la velocidad de proyecto de la vialidad y es producto de la experiencia internacional en caminos para regular este criterio.

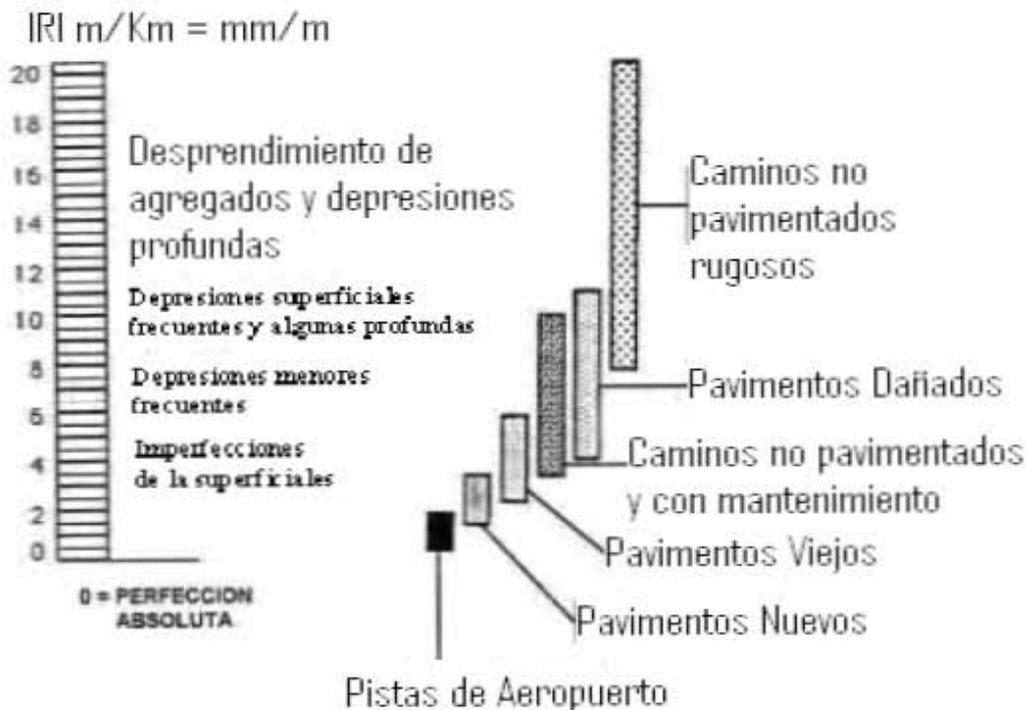


Fig. 64. Valores del IRI. REF*44

Las causas de estas deformaciones son principalmente:

Procedimiento constructivo.

Daño por circulación vehicular

Daño por la circulación vehicular y los efectos climáticos

En general las capas del pavimento suelen sufrir asentamientos que se reflejan superficialmente y pueden deberse a la calidad de los materiales y a las cargas de circulación, y con el IRI se puede referir esta deformación al perfil longitudinal del tramo evaluado. Los equipos y métodos para medir el perfil son diversos:

- Regla estándar de 3 a 9m (que refieren la irregularidad respecto del punto medio de la misma apoyada en el pavimento).
- Perfilógrafo (de 3 a 7m). Mediante un sistema gráfico computarizado determina las irregularidades de punto medio del perfilógrafo.
- Analizador dinámico del perfil longitudinal (equipo francés); Analizador de regularidad superficial (equipo español); Mays Rider Meter (equipo americano). Estos equipo se caracterizan pr desplazarse a velocidades de operación de la vialidad (20-80 m/hr)

III.4.2.2.2.- CONSERVACIÓN Y SUSCEPTIBILIDAD AL DETERIORO

La presencia de deterioros frecuentemente es un factor de incomodidad para el usuario de una obra vial y puede constituir un riesgo de accidentes. La diversidad de los deterioros es múltiple en caso de los pavimentos de concreto asfáltico y varios de ellos no se presentan en el pavimento de concreto rígido.

En general la deformación de un pavimento se manifiesta como un efecto acumulativo mucho más notorio en el pavimento flexible, dada su capacidad de aceptar deformaciones plásticas sin que se presente una falla por resistencia. Ahora bien, si se considera un periodo de servicio de 5 a 6 años, para el cual ya han circulado determinado número de ejes equivalentes, las opciones de pavimento de concreto asfáltico ya habrían cumplido con su periodo de servicio, siendo necesario para su conservación el recibir mantenimiento mayor, o en el caso menos severo, requerirían de un tratamiento superficial para ampliar la vida útil del pavimento completo. En cuanto al comportamiento de los pavimentos rígidos en el periodo de los 5 a 6 años, se prevé que la alternativa rígida solo experimentará deformaciones mínimas debidas mayormente al asentamiento de las capas terreas que le soportan, por lo cual su condición de servicio en cuando a la deformación permisible, presenta poca variación con respecto a sus características originales.

Comúnmente, en este esquema empírico, para el periodo de 6 años la susceptibilidad del concreto asfáltico al deterioro se manifiesta en deformaciones permanentes, grietas diversas, desprendimiento y baches, mientras que el pavimento rígido sólo manifiesta deterioro de juntas y algunos desportillamientos de menor importancia. La figura siguiente presenta la vida útil de un pavimento flexible, que se ve limitada por la durabilidad y el rápido envejecimiento del concreto asfáltico; además se observa como se eleva la curva de servicio cuando se aplica algún tratamiento superficial.

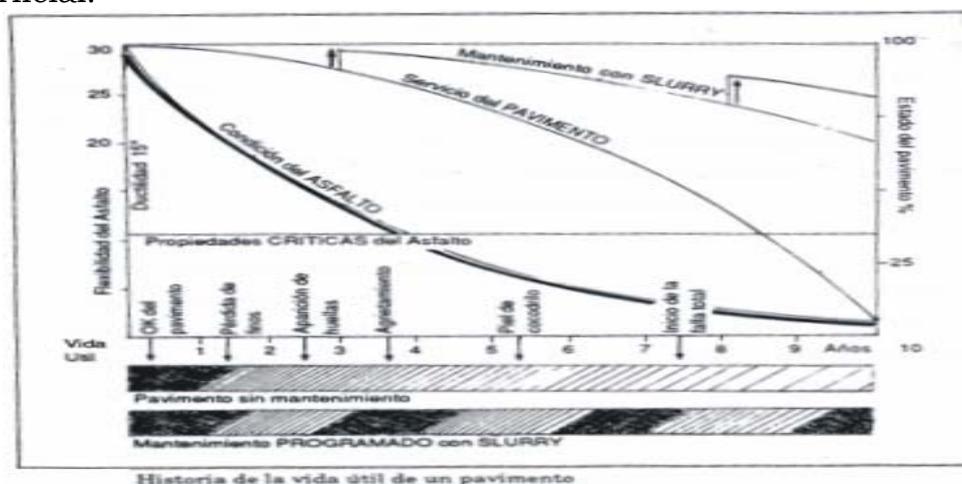


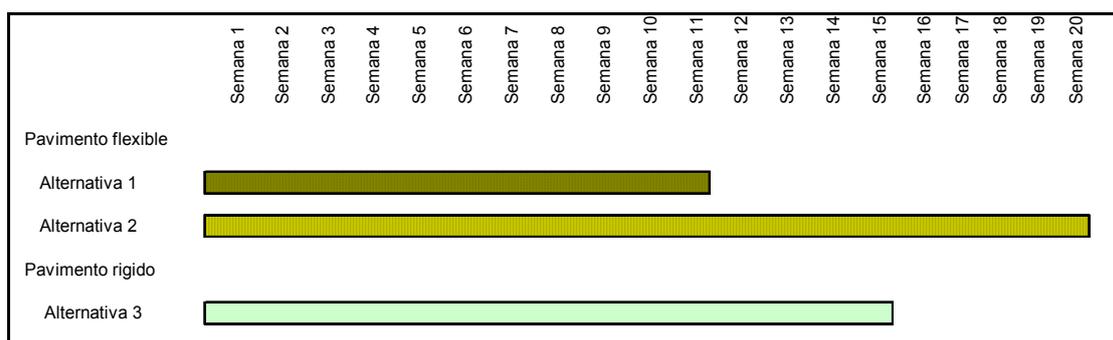
Figura 65. Ampliación de vida útil de un pavimento flexible con tratamiento superficial

III.4.2.2.3.- TIEMPO Y FACILIDAD DE REHABILITACIÓN

El tiempo y la facilidad del proceso de rehabilitación que plantean las alternativas de pavimento, son aspectos que influyen directamente en la calidad de la construcción. En general esta calidad es el aspecto más importante para que cualquier opción garantice un camino que opere adecuadamente durante su vida útil. Para realizar una construcción de alta calidad se requiere de la supervisión de los trabajos por parte del constructor y por parte de la operadora de la autopista, ambas controlando el proceso constructivo en cuanto a la calidad de los materiales y la efectividad de procesos empleados.

La optimización del tiempo y la efectividad de la construcción deben basarse en una logística general de todo el proceso constructivo, que va desde la disposición de la mezcla en planta, su transporte, su puesta en obra, el tendido, compactado y puesta en servicio. En general, en cuanto al tiempo de pavimentación requerido por cada alternativa de pavimentación, se considera que este parámetro es de vital importancia, pues representa el periodo que afecta la comodidad del usuario de la autopista, por lo cual se preferirá la alternativa que pone en servicio la autopista en el menor tiempo posible. En esta consideración, el proceso de construcción del pavimento de con concreto asfáltico, y más específicamente la primera alternativa, resulta más fácil y se efectúa rápidamente en comparación con la rehabilitación con concreto hidráulico.

El tiempo estimado para rehabilitar la autopista con cada procedimiento se observa en la siguiente tabla:



Nota: Los trabajos buscan interrumpir lo menos posible el flujo vehicular en horas pico. Originalmente se planeó trabajar en horarios de 21:00 hrs. a 6:00 hrs., sin embargo se optó por disponer de luz solar para verificar los trabajos más adecuadamente y minimizando el riesgo de algún accidente para los usuarios de la autopista y los trabajadores.

En la rehabilitación, por atención al criterio de tener una apertura rápida al tránsito, la primera alternativa de rehabilitación recibe cierta preferencia para su aplicación. Y aunque en el pavimento rígido el tiempo de rehabilitación se puede reducir significativamente, siempre y cuando se emplee una moderna tecnología desarrollada que promueve el mejoramiento de las propiedades de la mezcla de concreto hidráulico con aditivos. **El empleo de estos productos puede hacer que el pavimento se ponga en servicio en pocas horas, sin embargo el uso de estas tecnologías, en el caso que se analiza, no queda contemplado dentro del presupuesto de rehabilitación,** puesto que su aplicación eleva significativamente el costo de la obra.

III.4.2.2.4.- RUIDO.

Este efecto incide en la comodidad del usuario cuando circula sobre el pavimento. Los ruidos pueden ser en el exterior e interior del vehículo.

En general los niveles de ruido causan incomodidad y molestia al usuario, lo cual depende del tipo de carpeta con respecto a la generación de ruido y los niveles del coeficiente de deslizamiento entre llanta y pavimento. En este tema se han realizado diversos estudios en Dinamarca y Holanda sobre el ruido del vehículo cuando circula en el pavimento, verificandose que dicho efecto es menos perceptible en mezclas asfálticas porosas; por lo cual actualmente con el diseño de estas mezclas pueden atenuarse los ruidos generados por el tránsito. Dicho estudio comprobó que el ruido es más intenso en superficies asfálticas desgastadas y en base de un sistema de rodamiento, constituido de dos capas con agregados, pequeños superficialmente (5 a 8 mm) y agregados gruesos en la base (16 a 22 mm), y para velocidades de 50Km/hr, 70Km/hr y 110Km/hr, demuestra que su implementación mejora relación costo – beneficio.

Actualmente es común que en los pavimentos flexibles el efecto del ruido se controle mejorando las condiciones de macrotextura de los agregados en la mezcla. **La macrotextura de un carpeta asfáltica, cuando la mezcla es porosa, llega a disminuir sensiblemente el nivel de ruido, no solo en del contacto rueda /pavimento sino el debido al motor, por absorción acústica. REF*33. Estos ruidos en pavimentos rígidos son de menor intensidad, lo cual se ve favorecido por el patrón de textura que se asigna a la superficie de rodamiento y porque el campo de nivel sonoro para el ruido es menor que en pavimentos de concreto asfáltico y adoquines. REF*32**

III.4.2.2.5.- LUMINOSIDAD

En carpetas de concreto asfáltico la característica de macrotextura mejora la visibilidad y propiedades ópticas del rodamiento al reducir las proyecciones de agua cuando está lloviendo, pues evita una reflexión difusa que no permita la mejor visibilidad de las marcas viales. **REF*33.**

Respecto al pavimento rígido, debido al color propio de la mezcla de concreto hidráulico, color gris claro, refleja mejor la luz generando mayor seguridad para los usuarios al proporcionar mayor visibilidad en la noche. En general su aplicación puede manifestarse en los costos de iluminación, los cuales pueden reducir hasta un 20% en lámparas en la vía con sus respectivos consumos de energía. **REF*7**

III.4.2.3.- ECONOMÍA.

En estos términos vale la pena mencionar que el costo de cualquiera de las alternativas no debe limitarse al costo inicial de construcción, sino que incluye al del mantenimiento correspondiente.

En el presente trabajo se realiza una evaluación económica de cada alternativa, de tal manera que se analizan ambos costos (inversión inicial y mantenimiento) con el paso del tiempo y estimando un posible comportamiento de la estructura en base a la experiencia y el conocimiento de los materiales empleados por cada método.

III.4.2.3.1.- ANÁLISIS ECONOMICO COMPARATIVO

Como ya se mencionó anteriormente **la rehabilitación de la Autopista Chamapa - La Venta se implementa como medida de mantenimiento mayor a los 12 años de construida la estructura**, ya que en ese lapso solo había recibido mantenimiento rutinario con bacheos y renivelaciones. Además, **cabe recalcar que este trabajo de tesis se basa en el estudio de evaluación de la estructura del pavimento, de cuyo análisis se proponen tres alternativas de rehabilitación (Ver capítulo III.3):**

Pavimento flexible 1

Pavimento flexible 2 con mejoramiento de las capas terreas.

Pavimento rígido tipo whitetopping

En la evaluación económica que a continuación se desarrolla, se considera un periodo de 30 años, se calculan los volúmenes de materiales de construcción y el costo inicial y final a valor presente.

III.4.2.3.2.- COSTO DE CONSTRUCCIÓN

En la evaluación económica se calcularon los volúmenes requeridos para la construcción de las estructuras de pavimentos, como se presenta a continuación y posteriormente se obtuvieron los costos para cada alternativa considerada. Los importes se presentan expresados en el catálogo de conceptos, cantidades de obra y precios unitarios respectivos.

En general la alternativa con capa de rodamiento de concreto hidráulico es una buena solución de rehabilitación, sin embargo en su empleo en esta autopista se considera una medida de reconstrucción completa del tramo estudiado, lo cual habrá de reflejarse en términos económicos en forma importante.

EVALUACIÓN ECONÓMICA. REHABILITACIÓN DE LA ESTRUCTURA ACTUAL DE L CUERPO DERECHO DE LA AUTOPISTA CHAMAPA – LA VENTA.

VOLÚMENES DE OBRA PARA LA ALTERNATIVA 1

ESPEJOR DE SOBRECARPETA

TRAMO		LONGITUD	ESPEJOR DE SOBRECARPETA REQUERIDO (cm)	ESPEJOR DE PROPUESTO (cm)
DE	A	(m)		
27+200	28+000	800	5,0	12,0
28+000	28+900	900	0,0	12,0
28+900	31+100	2200	12,0	12,0
31+100	33+000	1900	5,0	12,0
33+000	34+100	1100	12,0	12,0
34+100	36+000	1900	0,0	12,0
36+000	37+600	1600	7,0	12,0

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD
■ Corte en frío en 10 cm, extracción y desperdicio de la carpeta asfáltica actual, P.U.O.T.	m ³	7.280,0
■ Emulsión asfáltica de rompimiento medio empleada en riegos de liga de carpeta y Open Graded a razón de 1,2 lts/m ² , P.U.O.T.	lt	205.920,0
■ Carpeta de concreto asfáltico elaborada en planta, en caliente con cemento asfáltico AC-20 tamaño máximo de 19 mm y compactada al 95% del PVM Marshall, con espesor de 12 cm, P.U.O.T.	m ³	9.672,0
■ Carpeta asfáltica delgada de graduación abierta (OPEN GRADED) de 3cm de espesor compacto elaborada en planta, en caliente, con cemento asfáltico AC-20, P.U.OT.	m ³	2.652,0
■ Riego de sello en acotamientos y zonas de parada, con petreos de granulometría tipo 3E, P.U.O.T	m ²	26.000,0

**REHABILITACIÓN DE LA ESTRUCTURA ACTUAL DEL
CUERPO DERECHO DE LA AUTOPISTA CHAMAPA – LA VENTA.**

COSTO TOTAL DE LOS TRABAJOS DE LA ALTERNATIVA 1

INCISO	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (P.U.O.T.)	IMPORTE
	PAVIMENTOS				
	Corte en frío en 10 cm, extracción y desperdicio de la carpeta asfáltica actual, P.U.O.T.	m3	7.280,0	\$159,40	\$1.160.432,00
	Emulsión asfáltica de rompimiento medio empleada en riegos de liga de carpeta y Open Graded a razón de 1,2 lts/m2, P.U.O.T.	lt	205.920,00	\$4,72	\$972.969,30
	Carpeta de concreto asfáltico elaborada en planta, en caliente con cemento asfáltico AC-20 tamaño máximo de 19 mm y compactada al 95% del PVM Marshall, con espesor de 12 cm, P.U.O.T.	m3	9.672,00	\$964,50	\$9.328.644,00
	Carpeta asfáltica delgada de graduación abierta (OPEN GRADED) de 3cm de espesor compacto elaborada en planta, en caliente, con cemento asfáltico AC-20, P.U.OT.	m3	2.652,0	\$1.150,01	\$3.049.827,12
	Riego de sello en acotamientos y zonas de parada, con petreos de granulometría tipo 3E, P.U.O.T	m2	26.000,00	\$15,00	\$390.000,00

IMPORTE TOTAL \$ 14.901.872,41

EVALUACIÓN ECONÓMICA.
REHABILITACIÓN DE LA ESTRUCTURA ACTUAL DE L CUERPO
DERECHO DE LA AUTOPISTA CHAMAPA – LA VENTA.

VOLÚMENES DE OBRA PARA LA ALTERNATIVA 2

ESPESOR DE SOBRECARPETA

TRAMO		LONGITUD	ESPESOR DE SOBRECARPETA
DE	A	(m)	(cm)
27+200	28+000	800	5,0
28+000	28+900	900	5,0
28+900	31+100	2200	10,0
31+100	33+000	1900	5,0
33+000	34+100	1100	12,0
34+100	36+000	1900	5,0
36+000	37+600	1600	5,0

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD
Corte en frío en 10 cm, extracción y desperdicio de la carpeta asfáltica actual, P.U.O.T.	m3	10.920,0
Recuperación de base y sub-base hidráulica en 30cm de esp. para formar una base estabilizada con cemento Portland y compactada al 100% de su PVSM ASSHTO Modificada, P.U.O.T.	m3	32.760,0
Suministro de cemento Pórtland en 4% de su peso para formar una base estabilizada, incluye: suministro, acarreo, almacenamiento y aplicación, P.U.O.T	kg	3.144.960,0
Riego de impregnación con emulsión asfáltica de rompimiento medio a razon de 0,6lts/m2 para adherir de la base tratada con cemento Portland, P.U.O.T.	lt	65.520,0
Emulsión asfáltica de rompimiento medio empleada en riegos de liga de carpeta y Open Graded a razon de 1,2 lts/m2, P.U.O.T.	lt	262.080,0
Carpeta Asfáltica con espesor de 12cm de acuerdo al proyecto elaborada en planta estacionaria con cemento asfáltico AC-20 modificado con polimero de tipo I N.CMT.4.05.002/01, tamaño máximo de 19 mm y compactada al 95% del peso volumetrico maximo Marshall , incluye elaboracion, acarreo, almacenamiento y aplicación, P.U.O.T	m3	13.104,0
Suministro de cemento asfáltico AC-20 empleado en la elaboración de carpeta de 12 cm de espesor, incluye: suministro, acarreo, almacenamiento, calentamiento y aplicación, P.U.O.T.	kg	1.729.728,0
Carpeta asfáltica delgada de graduación abierta (OPEN GRADED) elaborada en planta, en caliente, con cemento asfáltico AC-20, P.U.O.T.	m3	3.276,0
Riego de sello en acotamientos y zonas de parada, con petreos de granulometría tipo 3E, P.U.O.T	m2	26.000,0

**REHABILITACIÓN DE LA ESTRUCTURA ACTUAL DEL CUERPO
DERECHO DE LA AUTOPISTA CHAMAPA – LA VENTA.**

COSTO TOTAL DE LOS TRABAJOS DE LA ALTERNATIVA 2

COSTO TOTAL DE LOS TRABAJOS.					
INCISO	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (P.U.O.T.)	IMPORTE
	PAVIMENTOS				
	Corte en frío en 10 cm, extracción y desperdicio de la carpeta asfáltica actual, P.U.O.T.	m3	10.920,0	\$159,40	\$1.740.648,00
	Recuperación de base y sub-base hidráulica en 30cm de esp. para formar una base estabilizada con cemento Portland y compactada al 100% de su PVSM ASSHTO Modificada, P.U.O.T.	m3	32.760,0	\$115,35	\$3.778.866,00
	Suministro de cemento Pórtland en 4% de su peso para formar una base estabilizada, incluye: suministro, acarreo, almacenamiento y aplicación, P.U.O.T	kg	3.144.960,0	\$2,02	\$6.352.819,20
	Riego de impregnación con emulsión asfáltica de rompimiento medio a razon de 0,6lts/m2 para adherir de la base tratada con cemento Portland, P.U.O.T.	lt	65.520,0	\$4,02	\$263.143,97
	Emulsión asfáltica de rompimiento medio empleada en riegos de liga de carpeta y Open Graded a razon de 1,2 lts/m2, P.U.O.T.	lt	262.080,0	\$4,72	\$1.238.324,56
	Carpeta Asfáltica con espesor de 12cm de acuerdo al proyecto elaborada en planta estacionaria con cemento asfáltico AC-20 modificado con polimero de tipo I N.CMT.4.05.002/01, tamaño máximo de 19 mm y compactada al 95% del peso volumetrico maximo Marshall, incluye elaboracion, acarreo, almacenamiento y aplicación, P.U.O.T	m3	13.104,0	\$892,16	\$11.690.897,40
	Suministro de cemento asfáltico AC-20 empleado en la elaboración de carpeta de 12 cm de espesor, incluye: suministro, acarreo, almacenamiento, calentamiento y aplicación, P.U.O.T.	kg	1.729.728,0	\$2,15	\$3.718.915,20
	Carpeta asfáltica delgada de graduación abierta (OPEN GRADED) elaborada en planta, en caliente, con cemento asfáltico AC-20, P.U.O.T.	m3	3.276,0	\$1.150,01	\$3.767.433,50
	Riego de sello en acotamientos y zonas de parada, con petreos de granulometría tipo 3E, P.U.O.T	m2	26.000,0	\$15,00	\$390.000,00

IMPORTE TOTAL \$ 32.941.047,82

VOLÚMENES DE OBRA PARA LA ALTERNATIVA 3

CHAMAPA - LA VENTA REHABILITACIÓN DE LA ESTRUCTURA ACTUAL. CUERPO DERECHO KM INICIAL: 27+200 KM FINAL: 37+600 REHABILITACIÓN CON CONCRETO ASFÁLTICO. (ALTERNATIVA 1) VOLUMENES DE OBRA		
	CONCEPTO	
■	Emulsión asfáltica de rompimiento rapido empleada en el calefateo de grietas del pavimenta asfáltico actual	lit 494.0
■	Losa de concreto hidráulico de 0.29 m de espesor, con módulo de ruptura a la flexión de 48 kg/cm2, medido a los 28 días.	m3 31,668.0

REHABILITACIÓN DE LA ESTRUCTURA ACTUAL DEL CUERPO DERECHO DE LA AUTOPISTA CHAMAPA – LA VENTA.

COSTO TOTAL DE LOS TRABAJOS DE LA ALTERNATIVA 3

CHAMAPA - LA VENTA REHABILITACIÓN CON CONCRETO ASFÁLTICO. ALTERNATIVA 1 COSTO TOTAL DE LOS TRABAJOS.					
INCISO	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (P.U.O.T.)	IMPORTE
	PAVIMENTOS				
	Emulsión asfáltica de rompimiento rapido empleada en el calefateo de grietas del pavimenta asfáltico actual	lit	494.0	\$4.73	\$2,336.62
	Losa de concreto hidráulico simple con resistencia al módulo de ruptura de 48 kg/cm2 :	m3	31,668.0	\$1,006.08	\$31,860,465.44

IMPORTE TOTAL \$ 31,862,802.06

III.4.2.3.3.- COSTO DE CONSERVACIÓN

Conforme se alcanza la vida útil de un pavimento se presentan diversos deterioros, causados principalmente por la acción del tránsito, el clima y muy frecuentemente por la calidad de materiales con los que se construyó.

Los trabajos de conservación se aplican para reparar los deterioros del pavimento y con ello mantener en buen estado tanto la superficie de rodamiento con la capacidad estructural para la que fué diseñado, minimizando los sobrecostos de operación en los que incurriría el transporte al transitar por carreteras en mal estado. **En este caso la rehabilitación del pavimento es considerada una medida de conservación periódica, cuyo objetivo es proteger la estructura del pavimento y mejorar la superficie de rodamiento.**

En el caso del pavimento flexible se proponen actividades de conservación como es el caso del riego de sello, sobrecarpetas, renivelaciones aisladas, recuperación del pavimento y tratamientos superficiales.

En el caso de las alternativas de concreto flexible, en cuanto a mantenimiento se refiere, se pueden diferenciar por la intensidad de tratamientos que se les aplican. **Estos tratamientos se aplican de acuerdo a la experiencia en mantenimiento que la concesionaria tiene y en base a los estudios de evaluación que verifican el estado actual del pavimento. En general se atiende la vida de servicio del pavimento y las condiciones de tránsito proyectado y el clima de la región.**

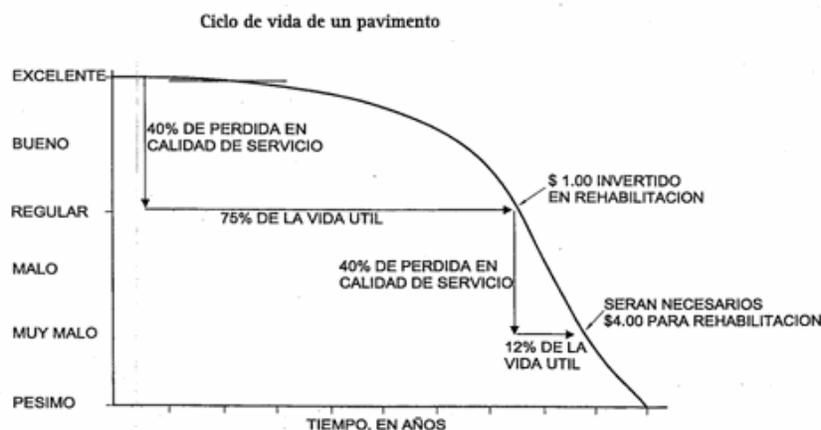


Fig. 66. Ciclo de vida de un pavimento.

En general los trabajos que se aplicarán al pavimento flexible y los costos por su implementación son los siguientes:

COSTO DE LOS TRABAJOS DE CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

TRABAJOS DE CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO.					
PAVIMENTO FLEXIBLE.					
	Longitud	10400	m		
	Corona	9,50	m		
1.- Bacheo.					
		1% anual			
	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P. U.	COSTO
	Carpeta asfáltica.*	m3	197,60	1401,70	276.976,18
	Cemento A.C.20.	kg			
	Aditivo.	lt			
	Excavación.	m3			
	Recompactación de superficie.	m3			
	Relleno con material de base hca.	m3			
	Riego de impregnación.	lt			
	* El costo de la carpeta incluye los de todos los demás conceptos.				
				Subtotal \$	276.976,18
2.- Carpeta de renivelación.					
		0,04	m.		
	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P. U.	COSTO
	Carpeta asfáltica.*	m3	3.952,00	1.401,70	5.539.523,65
	Rallado de superficie.	m2	98.800,00	23,82	2.353.416,00
	Barrido de superficie.	ha			
	Cemento A.C.20.	kg			
	Aditivo.	lt			
	Riego liga.	lt			
	* El costo de carpeta incluye los de todos los demás conceptos.				
				Subtotal \$	7.892.939,65
3.- Sobrecarpeta.					
		0,10	m		
	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P. U.	COSTO
	Carpeta asfáltica	m3	9.880,00	1.401,70	13.848.809,12
	Rallado de superficie	m2	98.800,00	23,82	2.353.416,00
	Barrido de superficie	ha			
	Cemento A.C.20	kg			
	Aditivo	lt			
	Riego liga	lt			
				Subtotal \$	16.202.225,12
4.- Reconstrucción					
(Escarificado de 0.10 m de espesor y carpeta de 0.17 cm de espesor)					
	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P. U.	COSTO
	Escarificado de carpeta	m3	9.880,00	95,00	938.600,00
	Base asfáltica	m3	0,00	740,00	0,00
	Carpeta de concreto asfáltico	m3	17.246,84	1.401,70	24.174.918,53
	Capa de rodadura de 3 cm de espesor	m3	2.964,00	1.401,70	4.154.642,74
				Subtotal \$	29.268.161,27

En lo correspondiente al pavimento cuya capa es de concreto hidráulico se proponen las siguientes actividades:

COSTO DE LOS TRABAJOS DE CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL PAVIMENTO RÍGIDO

TRABAJOS DE CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO. PAVIMENTO RÍGIDO

Longitud	<u>10400</u>	m
Corona	<u>9.50</u>	m
Juntas Transversales a	<u>4.50</u>	m
Juntas Longitudinales	<u>3</u>	
Losas en carriles de circulación.	<u>4622</u>	
Espesor de losa	<u>0.29</u>	m

1.- Reposición de sellos. a los 7, 14, 21 y 28 años	50%			
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P. U.	COSTO
Limpieza y sellado.*	m	26,577.78	3.95	104,982.22
Sello.	lt	2.07	43.06	89.26
Tirilla de respaldo.	m	26,577.78	0.70	18,604.44
			Subtotal \$	123,675.92
2.- Reposición de losas.	3.0000%			
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P. U.	COSTO
Demolición y limpieza.	m2	2,808.00	46.53	130,656.24
Colado de losa.	m3	814.32	1,000.00	814,320.00
			Subtotal \$	944,976.24
3.- Fresado de losas en carriles de circulación. a los 14 y 28 años				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P. U.	COSTO
Fresado con maquinaria.	m2	72,800.00	1.50	109,200.00
			Subtotal \$	109,200.00
4.- Reparación de grietas y desportillamientos.	1%	de la longitud de juntas.		
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P. U.	COSTO
Aserrado y limpieza.	m	265.78	650.00	172,755.56
Sellado.	lt	0.02073067	110.00	2.28
			Subtotal \$	172,757.84

Tanto para la alternativa de concreto hidráulico, como para la de concreto asfáltico, cada intervención de conservación implica un costo, que depende de la magnitud de la acción implementada. **Para el cálculo de los costos de conservación mayor durante un periodo de servicio de 30 años en cada alternativa se sugiere aplicar los siguientes** procedimientos de manera periódica.

ANÁLISIS DE COSTOS DE CONSERVACIÓN PARA UN PERIODO DE 20 AÑOS

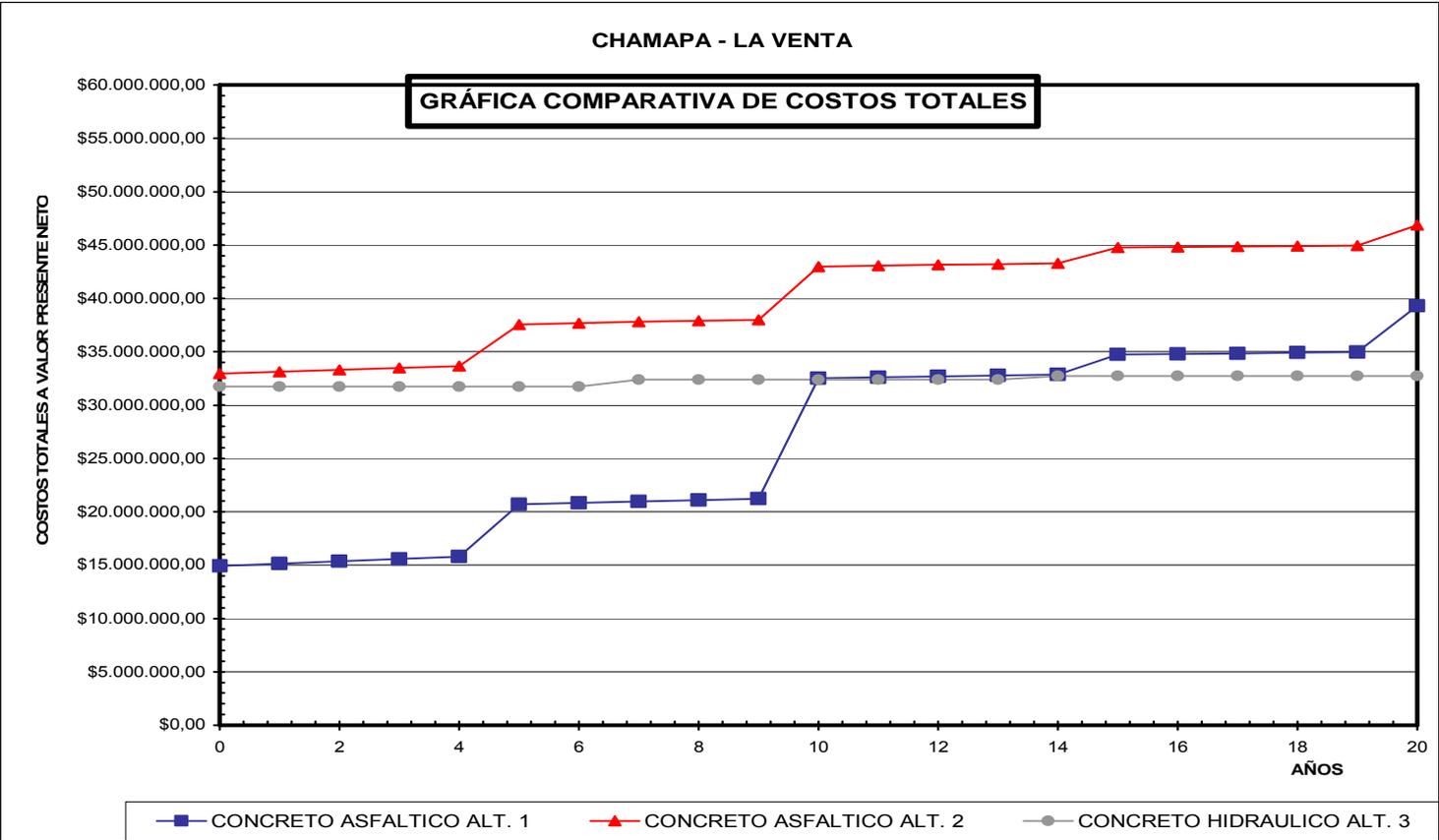
AÑO	CONCEPTO	CONCRETO ASFALTICO ALT. 1		CONCRETO ASFALTICO ALT. 2		CONCRETO HIDRAULICO ALT. 3	
		Precio Actual	Valor Presente	Precio Actual	Valor Presente	Precio Actual	Valor Presente
1	Bacheo.	\$276.976,18	\$251.796,53	\$221.580,95	\$201.437,22		
2	Bacheo.	\$276.976,18	\$228.905,94	\$221.580,95	\$183.124,75		
3	Bacheo.	\$276.976,18	\$208.096,31	\$221.580,95	\$166.477,04		
4	Bacheo.	\$276.976,18	\$189.178,46	\$221.580,95	\$151.342,77		
5	Bacheo.						
5	Carpeta de renivelación.	\$7.892.939,65	\$4.900.894,53	\$6.314.351,72	\$3.920.715,62		
6	Bacheo.	\$276.976,18	\$156.345,83	\$221.580,95	\$125.076,67		
7	Bacheo.	\$276.976,18	\$142.132,58	\$221.580,95	\$113.706,06		
7	Reposición de sellos.					\$123.675,92	\$63.465,30
7	Reposición de losas.					\$944.976,24	\$484.922,23
7	Reparación de grietas y desportillamientos.					\$172.757,84	\$88.652,09
8	Bacheo.	\$276.976,18	\$129.211,43	\$221.580,95	\$103.369,15		
9	Bacheo.	\$276.976,18	\$117.464,94	\$221.580,95	\$93.971,95		
10	Bacheo.						
10	Reconstrucción	\$29.268.161,27	\$11.284.143,17				
10	Sobrecarpeta.			\$12.961.780,10	\$4.997.327,34		
11	Bacheo.	\$276.976,18	\$97.078,46	\$221.580,95	\$77.662,77		
12	Bacheo.	\$276.976,18	\$88.253,15	\$221.580,95	\$70.602,52		
13	Bacheo.	\$276.976,18	\$80.230,13	\$221.580,95	\$64.184,11		
14	Bacheo.	\$276.976,18	\$72.936,49	\$221.580,95	\$58.349,19		
14	Reposición de sellos.					\$123.675,92	\$32.567,74
14	Reposición de losas.					\$944.976,24	\$248.841,78
14	Reparación de grietas y desportillamientos.					\$172.757,84	\$45.492,54
14	Fresado de losas en carriles de circulación.					\$109.200,00	\$28.755,77
15	Bacheo.	\$276.976,18		\$221.580,95			
15	Carpeta de renivelación.	\$7.892.939,65	\$1.889.507,00	\$6.314.351,72	\$1.511.605,60		
16	Bacheo.	\$276.976,18	\$60.278,09	\$221.580,95	\$48.222,47		
17	Bacheo.	\$276.976,18	\$54.798,26	\$221.580,95	\$43.838,61		
18	Bacheo.	\$276.976,18	\$49.816,60	\$221.580,95	\$39.853,28		
19	Bacheo.	\$276.976,18	\$45.287,82	\$221.580,95	\$36.230,26		
20	Bacheo.						
20	Reconstrucción	\$29.268.161,27	\$4.350.525,68				
20	Sobrecarpeta.			\$12.961.780,10	\$1.926.686,02		
	Costo de Conservación	\$79.030.796,93	\$24.396.881,39	\$42.319.139,71	\$13.933.783,38	\$2.592.020,00	\$992.697,44
	Costo de Construcción		\$14.901.872,41		\$32.941.047,82		\$31.744.435,70
	Costo Total (por kilómetro)		\$39.298.753,80		\$46.874.831,21		\$32.737.133,14
	Rescate		100%		100%		100%
	Valor de rescate		\$2.215.068,38		\$4.896.476,86		\$4.718.608,09
	Costo final		\$37.083.685,42		\$41.978.354,35		\$28.018.525,05

Para entender mejor la diferenciar el costo de las tres alternativas, se graficaran sus costos respectivos de acuerdo con la siguiente tabla:

DATOS DE LA GRÁFICA DE COSTO DE REHABILITACIÓN

Alternativa	CONCRETO HIDRAULICO ALT. 3	CONCRETO ASFALTICO ALT. 1	CONCRETO ASFALTICO ALT. 2
Año			
0	\$31.744.435,70	\$14.901.872,41	\$ 32.941.047,82
1	\$31.744.435,70	\$15.153.668,94	\$33.142.485,05
2	\$31.744.435,70	\$15.382.574,88	\$33.325.609,80
3	\$31.744.435,70	\$15.590.671,18	\$33.492.086,84
4	\$31.744.435,70	\$15.779.849,64	\$33.643.429,61
5	\$31.744.435,70	\$20.680.744,17	\$37.564.145,23
6	\$31.744.435,70	\$20.837.090,00	\$37.689.221,90
7	\$32.381.475,32	\$20.979.222,58	\$37.802.927,96
8	\$32.381.475,32	\$21.108.434,01	\$37.906.297,11
9	\$32.381.475,32	\$21.225.898,95	\$38.000.269,06
10	\$32.381.475,32	\$32.510.042,12	\$42.997.596,39
11	\$32.381.475,32	\$32.607.120,59	\$43.075.259,16
12	\$32.381.475,32	\$32.695.373,73	\$43.145.861,68
13	\$32.381.475,32	\$32.775.603,87	\$43.210.045,79
14	\$32.737.133,14	\$32.848.540,35	\$43.268.394,98
15	\$32.737.133,14	\$34.738.047,35	\$44.780.000,57
16	\$32.737.133,14	\$34.798.325,44	\$44.828.223,04
17	\$32.737.133,14	\$34.853.123,70	\$44.872.061,65
18	\$32.737.133,14	\$34.902.940,30	\$44.911.914,93
19	\$32.737.133,14	\$34.948.228,12	\$44.948.145,19
20	\$32.737.133,14	\$39.298.753,80	\$46.874.831,21

En esta gráfica se representan los costos totales de implementar las alternativas de pavimento e incluyen los costos derivados del mantenimiento de las mismas durante el periodo de 30 años.



III.5.- Elección de pavimento para el caso de la autopista

III.5.1.- INTRODUCCIÓN

Del análisis comparativo anterior pueden resumirse las siguientes conclusiones para poder elegir la aplicación del tipo de pavimento que mejor cumpla con los requerimientos de rehabilitación:

III.5.1.1.- ECONOMÍA.

La primera opción requiere una menor inversión inicial, pero conforme el pavimento esta en servicio, requerirá de otras aplicaciones en forma de renivelaciones y tratamientos superficiales de mantenimiento, que incrementaran el costo total por adoptar esta medida de rehabilitación. En general el costo del mantenimiento de esta alterativa respecto a su costo inicial es del orden de una vez y media, dada la vida útil del concreto asfáltico y el no atender las capas inferiores del pavimento.

Respecto a la comparación de la primera alternativa de pavimento con respecto a las otras dos alternativas a valor presente se observa que su costo de mantenimiento es 1.75 veces más que la segunda alternativa y casi 20 veces la inversión de conservación requerida para la opción del whitetopping.

La alternativa que propone el mejoramiento de las capas terreas representa un elevado costo de inversión para su construcción, pero su mantenimiento se limita a tratamientos superficiales que servirán para alargar la vida útil de la capa de rodamiento y mejorar las condiciones de funcionalidad de la capa de rodamiento. Su costo de mantenimiento respecto a su costo de construcción es del orden del 50%. **En general el costo de la segunda alternativa la ubica como una medida de reconstrucción de la autopista, fuera del presupuesto destinado a la rehabilitación; siempre se consideró poco viable esta alternativa, aun cuando se propuso el criterio de mejorar las capas terreas sólo en aquellas zonas que se consideren críticas. Tampoco se optó por esta solución debido a que el tiempo y los procedimientos requeridos reducen las expectativas de calidad de los trabajos al laborar en condiciones lluviosas.**

La tercer alternativa (la aplicación del whitetopping) también amerita una inversión inicial mayor a la correspondiente a la segunda alternativa, lo cual la hace no viable. Este criterio se determino por no disponer inmediatamente del dinero para rehabilitar la autopista con este procedimiento, a *pesar de que a largo plazo el análisis de costos la favorece porque el concreto hidráulico requiere menor intervención de mantenimiento.* *Así pues, debido a su alto costo de construcción, ésta alternativa no se construirá.*

III.5.1.2.- SEGURIDAD.

Todas las alternativas son una solución segura en la medida que resistan las cargas intensas de tránsito y las acciones del clima de la región. En general los efectos de estas sollicitaciones se manifiestan disminuyendo la durabilidad del pavimento y se ven como deterioros superficiales o en las capas inferiores a la de rodamiento.

En este sentido, **en las alternativas de pavimento flexible, la resistencia de los materiales con los cuales se construye el pavimento implica un deterioro rápido en forma de baches y deformaciones permanentes, que disminuyen la seguridad de circulación en tanto no sean atendidos** adecuadamente con el mantenimiento que les corresponde.

En general la segunda alternativa es un procedimiento que optimiza las propiedades de las capas terreas del pavimento, pero se considera este mejoramiento debe solo realizarse parcialmente y en aquellas zonas donde el estudio de evaluación demuestre las condiciones más críticas para dichas capas (en los subtramos 28+900-31+100; 33+000-34+100; 36+000-38+000).

La alternativa de whitetopping en general es más durable y presenta un nivel de servicio menos fluctuante y más seguro debido a la resistencia propia del concreto hidráulico.

III.5.1.3.- FUNCIONALIDAD.

En el caso de **la primera alternativa, su funcionalidad se ve afectada por el envejecimiento rápido del asfalto y las constantes intervenciones por mantenimiento, por lo cual esta alternativa de rehabilitación tiene un carácter de tratamiento superficial** y en tanto no atienda el mejoramiento de las capas inferiores deberá ser aplicado periódicamente en función de la vida útil del concreto asfáltico en servicio.

A diferencia con **la segunda alternativa, esta se vera menos afectada en su funcionalidad, pues se reducirán las deformaciones permanentes de capas inferiores, que se reflejan necesariamente en la capa de rodamiento.** En general, por emplear la estabilización de las capas terreas, el mantenimiento de la capa de rodamiento será menos intenso y solo debido al envejecimiento del concreto asfáltico que constituye esta capa. Así pues, con respecto a las **condiciones de carga tan intensas de la autopista, se favorece funcionalmente la utilización de la segunda alternativa de pavimentación, ya que promueve la recuperación de la base para homogenizar las condiciones del tramo y**

minimizar las deflexiones a nivel de base y sus manifestaciones en la capa de rodamiento.

En el caso de una carretera existente, dentro de la funcionalidad del pavimento se encuentra la afectación a la comodidad de viaje de los usuarios actuales, por lo cual el procedimiento empleado en la rehabilitación debe garantizar una rápida puesta en marcha del pavimento restaurado o nuevo. Es así que el periodo de rehabilitación es un parámetro es de gran importancia, pues afecta directamente la comodidad, seguridad y tiempo de recorrido de todo usuario de la autopista. **En general el tiempo de pavimentación favorece la aplicación de las sobrecapas de concreto asfáltico,** pues es la de más fácil aplicación, seguida por la alternativa de concreto hidráulico y al final la que mejora las capas terreas. La relación de tiempos de pavimentación es de 1:1.8:1.36 (alternativa 1: alternativa 2: alternativa 3)

En general y aunque el periodo de rehabilitación pueda modificarse de acuerdo a los recursos humanos y técnicos que se empleen por cada método de rehabilitación, se considera que las segunda y tercer alternativa son ya de por si elevadas económicamente hablando, como para acelerar su aplicación con estas mediadas.

Otro parámetro que queda dentro del criterio de funcionalidad, es la susceptibilidad al deterioro, donde el pavimento flexible presenta una desventaja comparándolo con el pavimento rígido, debido al rápido envejecimiento del concreto asfáltico ante las mismas acciones de carga y clima. Así pues el pavimento flexible presenta mayor deterioro al poseer un ciclo de vida menor. Con estas observaciones el pavimento rígido se ve favorecido en su aplicación, seguido de la posible aplicación de la alternativa de pavimento flexible con mejoramiento en las capas terreas; ambas alternativas ofrecen una menor susceptibilidad a la deformación a nivel de base y sub-base.

Respecto a las condiciones de drenaje de la capa de rodamiento, estas quedan supeditadas a la textura del material tendido. En este aspecto se considero que el material que ofrece mejores condiciones de desalojo del agua es el concreto hidráulico, a pesar de que su proceso de texturizado es más elaborado.

En el caso de las alternativas analizadas, las que corresponden a pavimento flexible se ven favorecidas por la existencia de una carpeta delgada de 3cm de espesor que favorece el drenaje superficial y minimiza las condiciones de acuaplanéo.

El efecto del ruido es otro parámetro que en el caso de la tercera opción es menor, lo cual se ve favorecido por el patrón de textura que se asigna a la superficie de rodamiento y porque el campo de nivel sonoro para el ruido es menor que en pavimentos de concreto asfáltico y adoquines. **REF*32**

Respecto a la luminosidad del pavimento, la tercera opción se ve favorecida debido al color propio de la mezcla de concreto hidráulico, color gris claro, refleja mejor la luz generando mayor seguridad para los usuarios al proporcionar mayor visibilidad en la noche. REF*7

En general y tras el análisis comparativo de las alternativas de pavimento se verifica que la disponibilidad de recursos económicos limita tanto la segunda como la tercera alternativas de rehabilitación (Ver capítulo III.3), por lo cual, siendo el criterio de economía el de mayor relevancia y considerando que el periodo de lluvias complicaría más la aplicación de los procesos de rehabilitación, se decide aplicar la primera alternativa de pavimento, que consiste en la construcción de una carpeta de asfáltico cubierta posteriormente por una capa más delgada del mismo material pero con características que permiten definir una mejor textura, drenaje y regularidad superficial de la capa de rodamiento.

III.5.2.- ELECCIÓN DE PAVIMENTO RÍGIDO O FLEXIBLE EN LA REHABILITACIÓN DE LA AUTOPISTA CHAMAPA – LA VENTA.

Tras realizar un análisis de los datos del proyecto y del procedimiento constructivo, empleando los mismos valores de calidad de las diferentes capas del pavimento, así como los mismos valores de ejes acumulados ESALS, se calculó una nueva estructuración del pavimento:

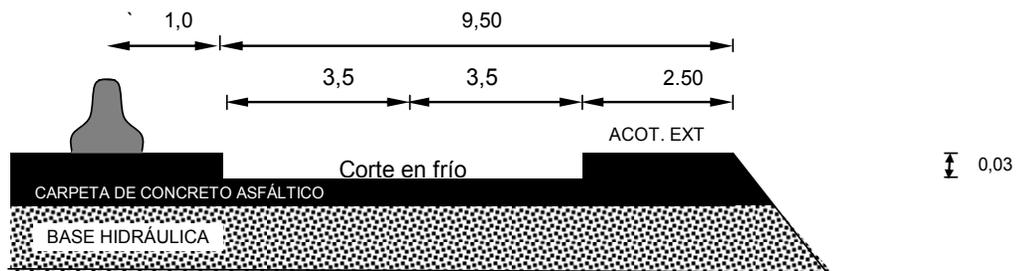
1.- Para los subtramos 1, 2, 4, 6 y 7 propone fresar 3cm de espesor en promedio en la capa de rodamiento deteriorada, en ambos carriles de circulación, para luego colocar una carpeta de concreto asfáltico con 7cm de espesor en ambos carriles del cuerpo derecho; en la zona de acotamientos se sugiere renivelar con el espesor suficiente que se requiera y posteriormente construir sobre los carriles de circulación una carpeta asfáltica de alto rendimiento del tipo CASAA, con asfalto modificado y 3cm de espesor.

Figura 65. Procedimiento constructivo del pavimento mediante la primera alternativa (subtramos 1, 2, 4, 6 y 7)

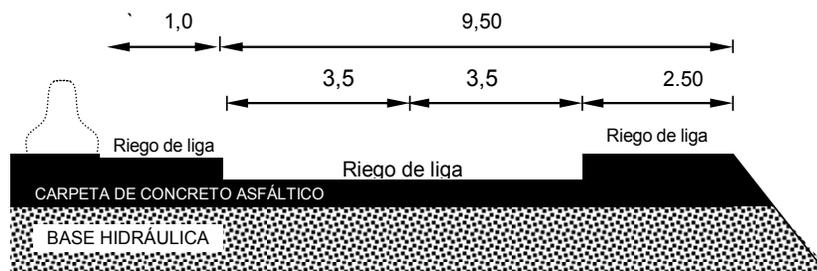
REHABILITACIÓN CON CONCRETO ASFÁLTICO. MODIFICACIÓN DE LA ALTERNATIVA 1

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO (acotaciones en metros)

1. Corte en frío, carga y desperdicio de 3 cm de la carpeta actual, formando una caja



2. Riego de liga



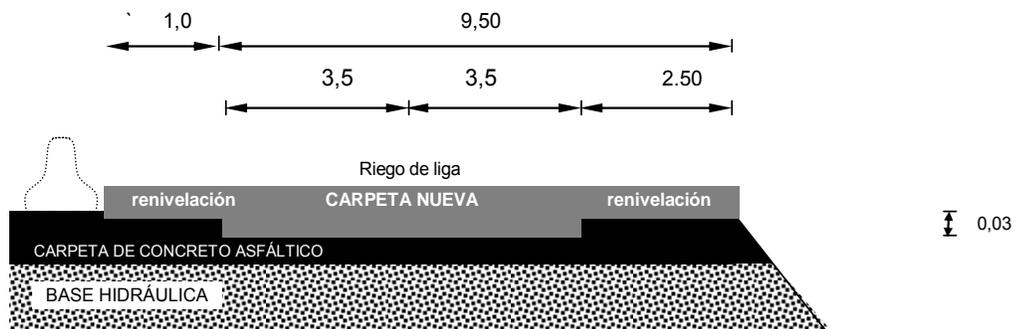
3.- Reposición de carpeta de concreto asfáltico con 7cm de espesor en ambos carriles del cuerpo derecho; en la zona de acotamientos se sugiere renivelar con el espesor aproximado de 4 cm



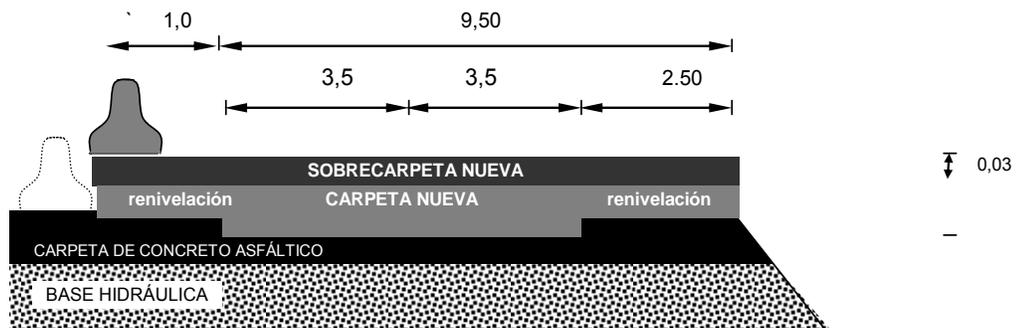
Figura 65. (Continuación)



4,- Riego de liga para adherencia de la sobrecarpeta de 3 cm de espesor



5,- Sobrecarpeta de 3 cm de espesor

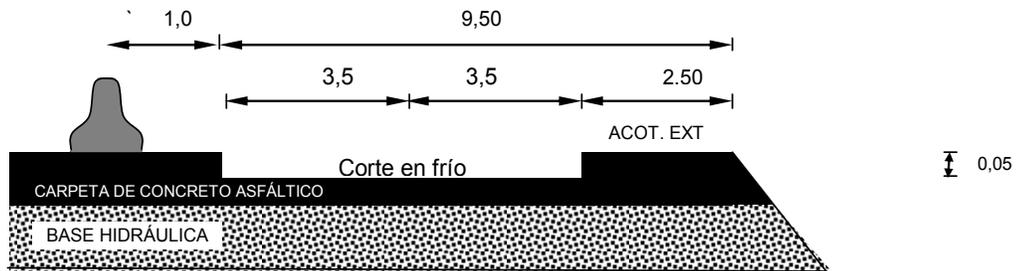


2.- Para los subtramos indicados con los números 3 y 5 se propone fresar 5cm de la capa de rodamiento deteriorada, en ambos carriles de circulación; luego se aplicara una carpeta asfáltica de 12cm con concreto asfáltico; en la zona de acotamiento se construirá una capa de de concreto asfáltico con espesor suficiente para renivelar y obtener la sección de construcción. Posteriormente construir una carpeta asfáltica del tipo CASAA sobre los carriles de circulación, con asfalto modificado y un espesor de 3 cm. como el que se indico en el punto 1.

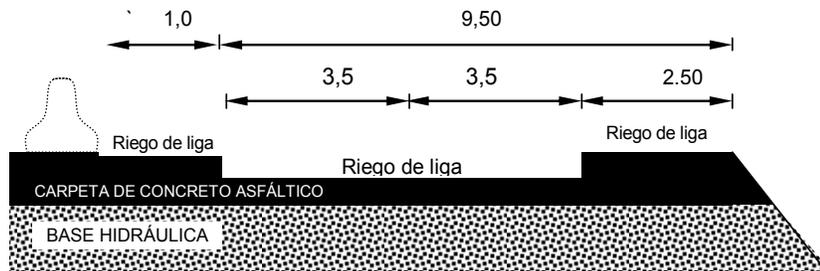
REHABILITACIÓN CON CONCRETO ASFÁLTICO. MODIFICACIÓN DE LA ALTERNATIVA 1

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO (acotaciones en metros)

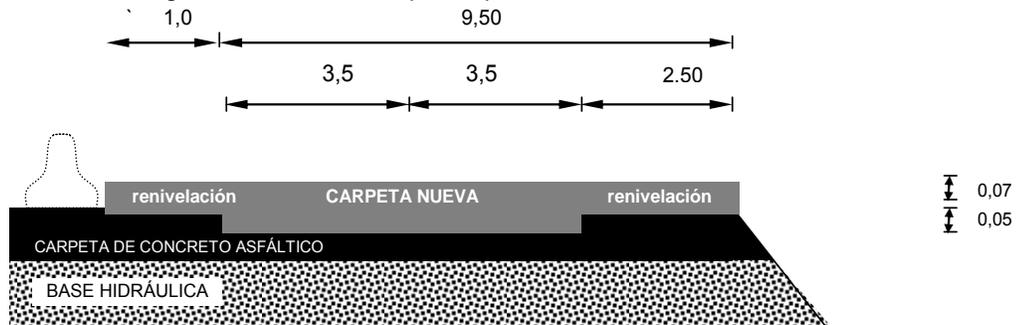
1. Corte en frío, carga y desperdicio de 5 cm de la carpeta actual, formando una caja



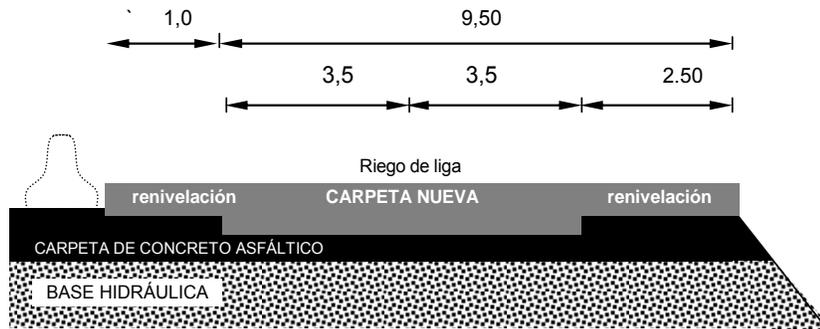
2. Riego de liga



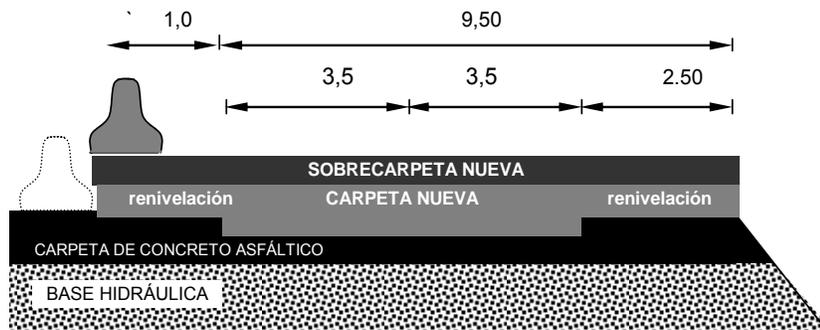
3.- Reposición de carpeta de concreto asfáltico con 12cm de espesor en ambos carriles del cuerpo derecho; en la zona de acotamientos se sugiere renivelar con el espesor aproximado de 7 cm



4.- Riego de liga para adherencia de la sobrecarpeta de 3 cm de espesor



5.- Sobrecarpeta de 3 cm de espesor



Con el procedimiento constructivo indicado anteriormente se considera que el pavimento una vez rehabilitado tendrá un comportamiento adecuado para las condiciones y periodo previsto.

Cálculo del número estructural y espesores de refuerzo propuestos.

Número	Tramo-Homogéneo	Sn req	Snact	SN3-Snfres	SN1*	SV rehaz	SN dif
1	27+200 a 28+000	4,92	4,04	3,7	1,9	5,6	-0,68
2	28+000 a 28+900	4,61	3,98	3,65	1,9	5,55	-0,94
3	28+900 a 31+100	6,07	3,4	2,86	2,82	5,68	0,39
4	31+100 a 33+000	5,07	4,25	3,84	1,9	5,74	-0,67
5	33+000 a 34+100	5,7	3	2,5	2,82	5,32	0,38
6	34+100 a 36+000	4,61	3,97	3,6	1,9	5,5	-0,89
7	36+000 a 37+600	5,02	3,44	3,11	1,9	5,01	0,01

SN3 –Sufres

Número estructural del pavimento después de fresar la carpeta actual en los subtramos 1,2,4,7 y 7 en 3cm y en los subtramos 3 y 5 en 5 cm.

SN1*

Número estructural del refuerzo propuesto para los subtramos 1, 2, 4, 6 y 7, consistente en fresado de 3cm, carpeta asfáltica de 7,0 cm. y 3cm de carpeta de desgaste tipo CASAA.

SN1**

Número estructural del refuerzo propuesto para los subtramos 3 y 5, consistente en fresado de 5cm, carpeta asfáltica de 12cm y 3 cm. de una carpeta de desgaste tipo CASAA

SN rehab

Número estructural después de realizar la rehabilitación propuesta

**PRESUPUESTO DEL PROCEDIMIENTO ELEGIDO PARA REHABILITAR
EL CUERPO DERECHO DE LA AUTOPISTA CHAMAPA – LA VENTA**

REHABILITACIÓN CON CONCRETO ASFÁLTICO. COSTO TOTAL DE LOS TRABAJOS.					
INCISO	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (P.U.O.T.)	IMPORTE
	PAVIMENTOS				
	Corte en frío en 3 y 5cm de profundidad, extracción y desperdicio de la carpeta asfáltica actual, P.U.O.T.	m3	2.646,0	\$159,40	\$421.772,40
	Emulsión asfáltica de rompimiento medio empleada en riegos de liga de carpeta a razon de 1,2 lts/m2, P.U.O.T.	lt	131.040,00	\$4,72	\$619.162,28
	Carpeta de concreto asfáltico elaborada en planta, en caliente con cemento asfáltico AC-20 tamaño máximo de 19 mm y compactada al 95% del PVM Marshall, con espesor de 7 y 12 cm, P.U.O.T.	m3	8.053,50	\$964,50	\$7.767.600,75
	Emulsión asfáltica de rompimiento medio empleada en riegos de liga de carpeta SMA a razon de 0,75 lts/m2, P.U.O.T.	lt	81.900,0	\$6,75	\$552.825,00
	Carpeta asfáltica delgada de graduación abierta (SMA) de 3cm de espesor compacto elaborada en planta, en caliente, con cemento asfáltico AC-20, P.U.OT.	m3	3.276,0	\$1.468,00	\$4.809.168,00
	Riego de taponamiento con emulsión asfáltica de rompimiento rápido RR-2K incluye polimeros, aplicada a	lts	54.600,00	\$3,30	\$180.180,00

IMPORTE TOTAL \$ 14.350.708,43

III.5.3.- ESPECIFICACIÓN PARTICULAR

Sistema de sellado y carpeta delgada superficial altamente adherida

- a. Contenido. Esta especificación particular contiene las características de la calidad que deberá considerarse para la ejecución del sistema de sellado y carpeta asfáltica superficial altamente adherida (CASAA) que sea parte constitutiva de la sección del pavimento.
- b. Definición. El sistema a de sellado y carpeta asfáltica superficial altamente adherida tiene dos objetivos principales :
 - 1.- Proporcionar una superficie de rodamiento de la más alta calidad en términos de confort y seguridad para el usuario.
 - 2.- Servir como tratamiento de conservación preventivo, al garantizar una impermeabilización (sellado) total de la carpeta asfáltica inferior protegiendo de una degradación acelerada la totalidad de la estructura del pavimento.

El concepto CASAA consiste en el uso de una membrana extremadamente homogénea de emulsión de asfalto modificado con polímero, que es el elemento que garantiza la impermeabilización y la alta adherencia, seguida inmediatamente de una carpeta delgada de concreto asfáltico elaborado en caliente de alto nivel de servicio y durabilidad.

El procedimiento de aplicación deberá asegurar la homogeneidad de la membrana asfáltica polimerizada y una inmediata aplicación del concreto asfáltico, con la finalidad de obtener los beneficios anteriormente descritos y maximizar la durabilidad del tratamiento, ya que de esta forma se generaría una alta adherencia (liga) con la capa del pavimento. La capa de concreto asfáltico deberá tener un espesor de 3cm con la composición granulométrica que se indica mas adelante y diseñarse bajo el concepto de “Alta Fricción Interna” o SMA (Stone Mastic Asphalt)

III.5.4.- REQUISITOS DE CALIDAD.

A) AGREGADO GRUESO

El agregado grueso (material pétreo retenido en la malla 4) deberá ser de un banco aprobado por la dependencia y que típicamente se utilice para las superficies de alto desempeño, debiendo cumplir este con las especificaciones que se muestran en la tabla 1.

Los agregados gruesos, tales como la grava triturada de piedra caliza, de basalto, dolomía, andesita, granito, escoria u otros materiales similares, o mezclas de dos o más de estos materiales, se consideraran como potenciales.

Cuando el agregado grueso para estas mezclas pertenezcan a más de una fuente, o a más de un banco, deberán mezclarse proporcionalmente hasta obtener una mezcla homogénea, misma que para su utilización deberá ser aprobada por la dependencia.

Tabla 1. Propiedades del agregado grueso		
Pruebas	Método	Especificación
Perdida por Abrasión "Los Ángeles"	AASHTO T 96-94	35% max
Intemperismo acelerado	AASHTO T 104-94	18% max
Sulfato de Magnesio		12% max
Sulfato de Sodio		
Índice de partículas planas y alargadas , @3:1	AASHTO D4791	25% max
Partículas trituradas, una sola cara	AASHTO D5821	95% min.
Partículas trituradas, dos o más caras	AASHTO D5821	85% min.
Pérdida por Abrasión "Micro Deval"	AASHTO TP58-99	18% max
Todas las pruebas deberán ser desarrolladas por un laboratorio autorizado y reconocido previamente por la dependencia.		

B) AGREGADO FINO

El agregado fino (material que pasa la malla no. 49 constituirá parte del “MASTIC ASPHALT” y deberán porvenir de un banco aprobado por la dependencia y cumplir con las especificaciones marcadas en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del agregado fino		
Pruebas	Método	Especificación
Equivalente de arena	AASHTO T 176-86	60% mín.
Azul de Metileno (en material que pasa la malla 200)	AASHTO TP 57-99	10% max
Contenido de Vacíos (en muestra sin compactar)	AASHTO T 304-96	40% mín.
Todas las pruebas deberán ser desarrolladas por un laboratorio autorizado y reconocido previamente por la dependencia.		

Filler (llenante) mineral

El filler mineral podrá ser utilizado como una opción para alcanzar los requerimientos de granulometría

Cal hidratada, ceniza volante, cemento portland tipo 1, polvo de trituración, finos extraídos del “Baghouse”, pueden ser aceptables como filler.

Ese filler mineral deberá cumplir con las especificaciones que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Propiedades del Filler Mineral
Graduación típica aceptable
100% para la malla Num. 30
75-100% pasa la malla num. 200
Todas las pruebas deberán ser desarrolladas por un laboratorio autorizado y reconocido previamente por la dependencia.

No se permitirá el uso de material reciclado como parte constitutiva del concreto asfáltico

D. CEMENTO ASFÁLTICO

El asfalto modificado con polímero que se utilice en la elaboración del concreto asfáltico, deberá cumplir con las especificaciones Super Pave para un tipo PG70-28 y las mostradas en la tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones del Cemento Asfáltico.		
Pruebas	Método	Min./Max
Estabilidad de la Red de Polímero	AASHTO PP-5	---/10%
Separación de polímero	Anillo-Bola	---/2°C
Recuperación Elástica a 10 ° C	ASTM D6084	65%/---
Todas las pruebas deberán ser desarrolladas por un laboratorio autorizado y reconocido previamente por la dependencia.		

E. MEMBRANA ASFÁLTICA POLIMERIZADA

La emulsión para garantizar una impermeabilización completa y proporcionar una alta adherencia entre la sección del pavimento y el sistema CASAA, deberá ser de asfalto modificado con polímero, y deberá cumplir con las especificaciones marcadas en la tabla 5.

Tabla 5. Especificaciones de la emulsión de Asfalto modificado con Polímero			
Prueba en la emulsión	Método	Min.	Max
Viscosidad, Sybolt Furol @ 25°C, s	AASHTO T59	20	100
Estabilidad al almacenaje (Asentamiento a 24 hrs.), %	AASHTO T59		1
Retenido en la malla No. 20	AASHTO T59		0,05
Residuo de la destilación (1), %	AASHTO T59	63	
Demulsibilidad, %	AASHTO T59	60	
Pruebas en el residuo de la destilación			
Penetración @25°C	AASHTO T49	60	150
Recuperación Elástica, %	AASHTO T301	60	
(1) AASHTO T59 con modificaciones para incluir una temperatura máxima de 204 °C+-12 °C la cual será sostenida por un periodo de 15 minutos.			

F. DISEÑO DE LA MEZCLA.

El diseño de la mezcla asfáltica tendrá que satisfacer lo que en el presente apartado se especifica y dentro de los límites listados en la tabla 6 para una mezcla tipo “B”

El espesor de la película deberá ser de 9 micrones como mínimo cuando se calcula utilizando el Contenido de Asfalto Efectivo considerando el área superficial del agregado. Los factores para la determinación del área superficial serán conforme se especifica en el Manual del instituto americano del Asfalto MS-2 “Métodos para el Diseño de Mezclas para Concreto Asfáltico y otros tipos de Mezclas en Caliente”.

La mezcla deberá presentar un drene de 0.10% de acuerdo al método de prueba AASHTO T305. La prueba de drene deberá ser corrida con el contenido óptimo de asfalto mas 0.5% y una temperatura de 3 ° C., por arriba de la máxima de mezclado.

El concreto asfáltico deberá presentar un comportamiento de resistencia a esfuerzos de tensión de tal forma de tener una resistencia mínima de 80% conforme al método de prueba AASHTO T283. Los especímenes para esta prueba deberán ser de 4 pulgadas de diámetro y compactados de acuerdo a ASSHTO TP-4 con 100 giros. Un ciclo de congelamiento deberá ser aplicado antes de realizar la prueba. Las temperaturas de mezcla y compactación deberán ser las recomendadas por el proveedor del producto asfáltico conforme a la viscosidad rotacional generada.

Tabla 6. Especificaciones de la Mezcla	
Límites Granulométricos (Compactación en peso)	TIPO B
Tamaño Máximo Nominal	95mm (3/8")
Abertura o No. De malla (ASTM)	% que pasa
190 mm (3/4")	
158 mm (5/8")	
127 mm (1/2")	100
95 mm (3/8")	85 a 100
No. 4	28 a 38
No. 8	25 a 32
No. 16	15 a 23
No. 30	10 a 18
No. 50	8 a 13
No. 100	6 a 10
No. 200 (8)	4 a 7
Contenido de Asfalto en peso (Rango de referencia)	4,8 - 5,6 %
Todas las pruebas deberán ser desarrolladas por un laboratorio aprobado por la dependencia	

G. CONSTRUCCIÓN

Clima

No se permitirá aplicación sobre el pavimento cuya superficie se encuentre mojada. La temperatura de la superficie del pavimento, así como la temperatura ambiental no deberán ser menores a 10 grados centígrados en el momento de la aplicación. Una superficie humedecida en el pavimento es aceptable para la aplicación si se encuentra libre de agua estancada y si se esperan condiciones ambientales favorables.

Equipo

La maquina pavimentadota – terminadora será aprobada por la dependencia considerando que:

Deberá tener la capacidad de ser autopropulsada, deberá estar especialmente diseñada y construida para aplicar el sistema CASAA.

La pavimentadota deberá tener depósito – tolva de recepción y banda para evitar segregación, tanque de almacenamiento de emulsión asfáltica, sistema medidor por volumen de la emulsión de asfalto modificado con polímero, barra de espréas con sistema de calentamiento (de longitud variable), y placa vibrocompactadora.

Asimismo, este equipo deberá ser capaz de rociar la membrana de emulsión asfáltica modificada con polímero, aplicando la capa de mezcla en caliente y nivelando la superficie en una misma acción y forma sincronizada.

Este equipo deberá tener la capacidad de aplicar la mezcla en caliente y la membrana de emulsión de asfalto modificado con polímero, a una velocidad controlada de 9 a 28 metros por minuto; con la garantía de que ninguna rueda u otra parte de la maquina pavimentadota o de cualquier otro elemento externo entrara en contacto con la membrana de emulsión antes de que la mezcla en caliente de concreto asfáltico sea aplicada.

La aplicación se realizará desde e centro de la corona, realizando un ajuste vertical por medio de sus extensiones para alcanzar el perfil deseado en el pavimento.

Preparación de la superficie.

La preparación de la superficie será determinada por la dependencia, y se deberá realizar previamente a la aplicación del sistema CASSA. En caso necesario, la superficie deberá ser renivelada y bachada.

Aplicación

La membrana de emulsión de asfalto modificado con polímero sin diluir deberá ser rociada por la barra del equipo a una temperatura de 50 a 75 grados centígrados, o conforme la recomendación del proveedor del producto asfáltico.

El sistema esparcidor deberá trabajar en forma precisa, con monitoreo continuo de dosificación y proveyendo una aplicación uniforme en todo lo ancho del pavimento.

La dosificación de la membrana asfáltica sin diluir será considerada en el orden de los 0.70 hasta los 1.5 lts/m². Los ajustes de campo en dosificación de la membrana de emulsión modificada con polímero, deberán ser aprobados por la dependencia y se podrá considerar la prueba de permeabilidad como referencia.

El concreto asfáltico de mezcla en caliente deberá ser aplicado a una temperatura entre 140-165 grados centígrados y deberá ser colocado inmediatamente después de haberse aplicado la membrana de emulsión de asfalto modificado con polímero sobre toda la superficie de aplicación.

Compactación (Acomodo)

Consiste en un mínimo de dos pasadas con un rodillo de tambor metálico liso con un peso mínimo de 10 ton, antes de que la temperatura del material baje a más de 100 grados centígrados, debiéndose evitar que los equipos de compactación se estacionen sobre el concreto asfáltico recién colocado.

La compactación deberá desarrollarse inmediatamente después de la aplicación de la capa asfáltica, mediante la utilización de un compactador que se encuentre en buen estado y en buenas condiciones de operación, el cual deberá estar equipado con un sistema de rocío por agua para prevenir la adherencia entre la mezcla recién extendida y el tambor del equipo. El equipo de compactación deberá operarse en el modo estático, ya que una excesiva compactación podría causar la disgregación del material o un no adecuado perfil.

La capa asfáltica de rodamiento no deberá ser abierta al tráfico si no se ha completado el proceso de compactación y si el material no se encuentra por debajo de los 85 grados centígrados.

CONTROL DE CALIDAD

Lotes y sublotes. Un lote estará conformado por 1300 ton. Estos lotes podrán ser a su vez divididos en sublotes siempre y cuando no excedan las 350 ton. Los sublotes podrán ser incorporados a la producción del día siguiente para integrar un nuevo y completo lote, siempre y cuando la infraestructura de la planta permita que la mezcla asfáltica no presente segregación ni pérdida de temperatura.

Las siguientes medidas deberán ser consideradas por el contratista para mantener la uniformidad y control de calidad.

El contratista será responsable de obtener las muestras para el aseguramiento y control de calidad.

Previamente a la producción., la dependencia determinara el método utilizado por el contratista para la obtención del equipo de las muestras representadas; asimismo, el contratista será responsable de la obtención del equipo y de su correspondiente calibración. La dosificación de la membrana de Emulsión deberá ser verificada, dividiendo el volumen aplicado entre el área total aplicada.

Un mínimo de tres muestras por lote deberán ser analizadas para verificar el contenido de asfalto y la granulometría antes de continuar con la producción del siguiente lote. Si el promedio de los resultados obtenidos en estas tres muestras sufren una desviación importante contra lo propuesto en el diseño, excediendo la tolerancia establecidas en la tabla 7, la producción deberá ser detenida. El contratista deberá identificar la causa y documentar en detalle que acción correctiva se tomará.

El diseño de la mezcla ya aprobado por la dependencia solo podrá ajustarse si en su revisión, los requerimientos de la obra no coinciden con los especificados en el proyecto.

La primera muestra de la mezcla asfáltica tomada después de que la planta de mezcla en caliente inicie sus actividades deberá ser tomada entre la carga tercera y la quinta de producción.

La primera muestra de mezcla asfáltica deberá ser tomada directamente de la planta de mezcla caliente, ya sea desde la banda transportadora o tomada del camión de transporte antes de salir de la planta.

Para verificaciones de campo, los límites generales de diseño mostrados en la tabla 6 podrán ser utilizados cuando el diseño de la mezcla se encuentra dentro de las tolerancias establecidas en la tabla 7.

Tabla 7. Límites de tolerancia para Control de Calidad			
Tamaño Máximo Nominal en función del tipo de mezcla	No. 4 (TIPO A)	95 mm (3/8") (TIPO B)	127 mm (1/2") (TIPO C)
Abertura o Numero de malla (ASTM)	Tolerancia %	Tolerancia %	Tolerancia %
190 mm (3/4")	-	-	-
127 mm (1/2")	-	-	±5
95 mm (3/8")	-	±5	-
No. 4	±5	±4	±4
No. 8	±4	±4	±4
No. 16	±4	-	-
No, 200	±2	±2	±2
Contenido de Asfalto	±0,5	±0,5	±0,5
Todas las pruebas deberán ser desarrolladas por un laboratorio autorizado y reconocido previamente por la dependencia.			

Aceptación de la mezcla.

El contratista será responsable del seguimiento y control de calidad, y la dependencia en forma directa o a través de una empresa supervisora realizara la verificación de calidad, por medio de muestreos y ensaye de materiales.

Las pruebas de verificación de calidad de la mezcla serán realizadas en un laboratorio de campo, debiendo completarse en un tiempo razonable. Los procedimientos, tanto de muestreo como los de ensaye deberán ser los mismos utilizados por la empresa Contratista.

Un mínimo de tres muestras por lote deberán ser ensayadas para determinar el contenido de asfalto, la granulometría antes de producir el siguiente lote.

La aceptación de la mezcla para la carpeta, de acuerdo a su contenido de asfalto y a su granulometría para cada lote, podrá ser determinada por la dependencia de acuerdo al método de muestreo que sea indicado por la misma. La dependencia podrá seleccionar aleatoriamente la ubicación de donde se extraerá la muestra en cada sub lote de mezcla. Los resultados obtenidos en los sublotes, de cada lote deberán ser promediados y deberán estar dentro de los límites de tolerancia del diseño de la mezcla, mostrados en la tabla 7. Si a juicio de la dependencia es necesario remover las partes defectuosas, el contratista deberá removerlas y reemplazarlas corriendo a cargo del contratista los costos involucrados, hasta alcanzar los requerimientos marcados en esta especificación particular.

IV.- Conclusiones y recomendaciones

IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Generalmente, tanto en la construcción de pavimentos nuevos como en la rehabilitación de pavimentos flexibles, es necesario **elegir entre la aplicación de pavimentos de concreto hidráulico o asfáltico, considerando las ventajas y beneficios de cada tipo de estructura;** para este fin, es necesario hacer una evaluación de los parámetros de seguridad, funcionalidad y economía más importantes de cada aplicación, conociéndose cuál de ellas es más favorable en determinado tiempo de servicio. En la práctica se evalúan los efectos de las solicitaciones de tránsito y clima principalmente y, junto con un análisis económico de la construcción y gastos por operación, se puede determinar la viabilidad de cada opción. **En este panorama y dado que la inversión económica por construcción es muy importante, frecuentemente se recurre al uso de concreto asfáltico porque presenta menor costo inicial de construcción; sin embargo, no se debe perder la perspectiva del análisis económico, el cual generalmente favorece a largo plazo la aplicación de pavimentos de concreto hidráulico.**

Frecuentemente en la distinción de ambos tipos de pavimento, se emplean criterios que son resultado del empirismo, es decir que significan el aporte de las experiencias de profesionales en el campo de pavimentación, y con ellos se decide cual opción de pavimentación es la óptima para resolver el problema particular. En el ámbito de los pavimentos, **la elección de aplicar un tipo de pavimento u otro debe respaldarse por los conceptos teóricos del comportamiento de cada estructura, por la experiencia sobre casos similares, por la evaluación estructural y visual de los pavimentos y por el análisis económico de cada opción.**

Actualmente, en México, los pavimentos de concreto hidráulico son de poca aplicación en comparación con el uso de los pavimento de concreto asfáltico; esto se debe a la fácil disposición del asfalto en un país productor de petróleo; sin embargo, las tendencias nuevas favorecen el empleo de pavimentos rígidos, ya que la infraestructura vial se enfrenta a fuertes requerimientos de durabilidad, producto del incremento de magnitud y volumen del tránsito en general; además de que su construcción constituye una reducción de costos de operación del pavimento rígido en los correspondiente a su mantenimiento.

A continuación se presentan las conclusiones de la elección de pavimentos rígidos y flexibles, tomadas a partir de criterios generales que cualquier obra de ingeniería debe cumplir, formulados en base al empirismo de las personas encargadas del proyecto y ejecución del mismo, las investigaciones de referencia empleadas por la tesis, y en base de la viabilidad económica de cada opción de pavimento.

En el caso de una rehabilitación cuyas propuestas de pavimentación son de capa de rodamiento de concreto hidráulico o asfáltico, será necesario:

- **En primer lugar debe verificarse el objetivo de la rehabilitación,** pues con ella pueden adoptarse medidas de tratamiento superficial o hasta la reconstrucción del pavimento. **En general, las tendencias de uso del pavimento rígido se presentan mayormente para obras de modernización carretera, donde el TDPA es por lo menos de 10,000 vehículos con miras al incremento del volumen de carga pesada, con la finalidad de mejorar la vía vehicular, dotarlo de una mayor vida útil y reducir los gastos de conservación.**

Cuando el objetivo de la obra sea un leve tratamiento superficial se puede recurrir al uso de concreto asfáltico y actualmente se aplica esta medida en obras de longitud corta en donde el tránsito proyectado es de carga ligera y con un TDPA máximo de 5000 vehículos y donde el incremento proyectado es menor a las tasas anuales promedio del 4%. REF*31. Estas condiciones se cumplen generalmente en caminos rurales y vías secundarias estatales y federales, siendo necesario verificar su comportamiento durante el tiempo de servicio para adoptar las medidas correctas de mantenimiento, incluyendo su posible sustitución por pavimento de concreto hidráulico cuando los supuestos anteriores se vean rebasados y dicha sustitución sea factible económicamente.

- En general un buen administrador de pavimentos además de procurar la seguridad óptima para que el usuario circule sobre la superficie debidamente mantenida, comprueba que el dinero se gaste convenientemente; **sería absurdo proporcionar una delgada superficie con buena resistencia al derrapamiento para restaurar la seguridad, sin antes verificar la condición estructural, ya que el pavimento existente pudiese ser inadecuado para resistir las cargas pronosticadas del tránsito.** De esta manera, podría requerirse una sobrecarpeta gruesa o aún una reconstrucción, en lugar de sólo una simple capa para restaurar la fricción, a menos que ésta sea parte de un mejoramiento planeado por etapas. Así pues, para adoptar la mejor medida de rehabilitación es conveniente realizar las siguientes actividades:

Para adoptar la rehabilitación más conveniente es necesario **verificar el estado superficial del pavimento dañado mediante una inspección visual que califique los deterioros**, asignándoles un grado de serviciabilidad. Dicha evaluación incluye una revisión de la calidad de servicio de la superficie, la densidad de daños sobre la misma y la resistencia al derrapamiento. Con todas estas medidas se puede indicar posteriormente la necesidad de mantenimiento o rehabilitación.

Otra herramienta para poder elegir que tipo de pavimento se puede aplicar en la rehabilitación es la evaluación estructural de la estructura deteriorada; dicha evaluación debe comprender el reporte de los deterioros, los resultados de la medición de deflexiones, la obtención de los módulos de elasticidad de las capas de pavimento y subrasante y la determinación de la vida remanente y el refuerzo requerido para un periodo definido.

También se debe realizar la exploración directa (Medidas espesores las capas del pavimento y la determinación de las propiedades geotécnicas de los materiales constitutivos). Con estos datos y su análisis se verifica la calidad de los materiales de la estructura existente y con respecto a la normativa vigente de la SCT.

Con la información de la inspección superficial, la evaluación estructural y la exploración directa del pavimento deteriorado, se puede evaluar la importancia de las actividades de rehabilitación. Comúnmente los resultados de esta evaluación se traducen en términos de una sobrecarpeta de concreto asfáltico para restaurar las condiciones de servicio del pavimento.

- En cuanto a las medidas de rehabilitación debe tenerse en cuenta que cada alternativa de solución se fundamenta en métodos de diseño distintos, pero que a grandes rasgos establece un grado adecuado de seguridad y funcionalidad, **se puede entonces restaurar el pavimento, debiendo justificarse no solo en términos económicos, sino en términos de los criterios de seguridad y funcionalidad**. Estos criterios se fundamentan en soportar adecuadamente las cargas por tránsito pesado, por sus características de resistencia y baja deformación, y en cuanto a los criterios de seguridad y de funcionalidad, estos son solamente comparables entre las alternativa de igual naturaleza y dependen fundamentalmente de las condiciones de diseño y los procesos constructivos que se empleen. En esta última consideración, donde las condiciones de diseño son iguales y aunque las soluciones

constructivas sean diferentes, se pueden comparar las alternativas en función de la pérdida de serviciabilidad inicial conforme sea el comportamiento de la estructura en determinado periodo de análisis.

Otro punto importante para poder decidir entre la rehabilitación con uno u otro tipo de pavimento es el criterio de facilidad de construcción y el tiempo requerido por ella, donde los métodos tradicionales de pavimentación asfáltica son ventajosos y resultan de especial beneficio cuando la medida de rehabilitación debe aplicarse sin que los recursos humanos y técnicos que demandan, incrementen significativamente el costo total de cada aplicación.

Cabe mencionar que en la pavimentación, al igual que en cualquier obra civil, la calidad en la construcción es el aspecto más importante para que un camino opere adecuadamente durante toda su vida útil.

En general la elección entre pavimentos rígidos y flexibles depende básicamente de la elección de los materiales de construcción, y en atención a su ciclo de servicio y su comportamiento en cierto periodo. Comúnmente la opción de emplear concreto hidráulico resulta viable teniendo en cuenta:

OBJETIVO DE LA OBRA. Se sugiere la aplicación de pavimentos rígidos en aquellos proyectos de modernización en donde el tránsito haya rebasado aquellas proyecciones de diseño originales, con la finalidad de mejorar la operación de la carretera, dotarla de una mayor vida útil y reducir los gastos de conservación.

INTENSIDAD Y VOLUMEN DE TRÁNSITO. Se opta por aplicar pavimento rígido en aquellas carreteras con volúmenes grandes de tránsito y porcentaje alto de vehículos pesados.

TOPOGRAFÍA. Generalmente se opta por aplicar concreto hidráulico en zonas con topografía sensiblemente plana o con lomerío suave

SUELO DE SOPORTE. Se sugiere aplicar pavimentos de concreto hidráulico en zonas en donde el suelo no sea blando, pues las deformaciones del mismo terreno natural y las de las capas inferiores del pavimento pueden reflejarse en su superficie en forma de agrietamientos severos, pudiéndose presentar el fenómeno de bombeo de finos. (Capítulo II.1)

TIEMPO DE PAVIMENTACIÓN. Aunque en una rehabilitación con pavimento flexible el tiempo de pavimentación es menor que en empleado en pavimentos rígidos, debido a que el concreto asfáltico se maneja fácilmente y alcanza rápidamente su resistencia para soportar el tránsito (casi inmediatamente después de haber sido compactado). En pavimentos rígidos, actualmente existen varios aditivos acelerantes de fraguado que permiten obtener un concreto resistente en poco tiempo, minimizando el lapso de pavimentación, pudiéndose colocar y endurecer en pocas horas. Debe tenerse en cuenta que el uso de estos aditivos en concreto hidráulico incrementa notablemente el costo de construcción del pavimento.

Actualmente, de acuerdo con las tendencias del país, las empresas constructoras mexicanas tienden a adquirir equipos de alto rendimiento para la pavimentación con losas de concreto hidráulico, lo que ha facilitado el proceso constructivo de losas de rodamiento con este material. **REF*16.**

ESTRUCTURA DE SOPORTE. Dada la rigidez que alcanza el concreto hidráulico de la capa de rodamiento, se logra que la estructura térrea de soporte demande un espesor menor que la correspondiente a un pavimento flexible.

Comúnmente la capa de soporte para un pavimento de concreto hidráulico se construye de material granular o de suelo-cemento. Ocasionalmente se mejora con cemento la subrasante. Es práctica actual se construyen capas de rodamiento rígida no menores de 10 centímetros de espesor. **REF*16**

En el caso del whitetopping se cuenta con la ventaja de tender la capa de rodamiento sobre la capa de rodamiento asfáltico existente. Para este procedimiento se debe verificar para el potencial falla por servicio de las capas inferiores y garantizar su adecuada calidad cuando se coloque el concreto hidráulico; en caso de que la base o la sub-base demuestren una calidad inadecuada para soportar tanto la capa flexible como la rígida, se sugiere recurrir a su mejoramiento con cal, cemento, arenas y gravas.

TIEMPO DE APERTURA AL TRÁNSITO. El proceso constructivo del pavimento con concreto asfáltico o concreto hidráulico plantean diferentes periodos de apertura al tránsito vehicular. Es común encontrar en pavimentación que un proceso de rehabilitación obstruya temporalmente el tránsito vehicular mientras se trabaja. Sin embargo, actualmente se cuenta con tecnología que reduce el lapso de esta interrupción. Dicha tecnología consiste en la utilización de los pavimentos rígidos de apertura rápida; estos requieren de un colado bien planeado, con concreto de fraguado rápido y cimbra deslizante a todo lo ancho de la vialidad, lo que agiliza el proceso constructivo. En estacionamientos se ha logrado limitar a sólo 24 horas el impedimento para que los usuarios transiten con sus automóviles. REF*16

En una rehabilitación con pavimento flexible el periodo de pavimentación es bastante menor que en pavimentos rígidos, esto se logra por la facilidad con que el concreto asfáltico se maneja y alcanza rápidamente su resistencia para soportar el tránsito casi inmediatamente después de haber sido compactado. En pavimentos rígidos, actualmente existen varios aditivos acelerantes de fraguado que permiten obtener un concreto resistente en poco tiempo, minimizando el lapso de pavimentación, pudiéndose colocar y fraguar en pocas horas.

RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

Debido a la resistencia a la abrasión y deformación del concreto hidráulico, un pavimento rígido posee una capacidad alta contra el desgaste producto del paso vehicular; este desgaste será menos severos en tanto mayor sea la resistencia del material cementante (pasta de cemento Pórtland), pues se impide el fácil desprendimiento de los agregados de la superficie.

RESISTENCIA AL DETERIORO.

Las losas de concreto de un pavimento rígido ofrecen mayor resistencia a las presiones de arranque, frenado y circulación de vehículos automotores, lo cual proporciona una susceptibilidad mínima a la deformación y en general al deterioro de la capa de rodamiento. Las losas de los pavimentos rígidos en servicio no presentan deterioros en forma de pliegues, ondulaciones, ahuellamientos, como en el caso de de la superficie de rodamiento de los pavimentos flexibles.

De los posibles daños que pudiera sufrir un pavimento con capa de rodamiento rígida, casi todos suelen atribuirse a la calidad del concreto; con menos frecuencia se deben a una deficiente aplicación de las terracerías o a los malos procedimientos de manejo y colocación del concreto. **En general un pavimento de concreto hidráulico con bases bien construidas y que mantiene buenas condiciones de uso, presenta menos deterioro con el paso del tiempo que uno flexible, ya que por la misma naturaleza del material resiste mejor las cargas y la acción del clima y de agentes químicos, solventes de los combustibles y lubricantes.**

FACILIDAD DE MANTENIMIENTO

Los pavimentos rígidos se deterioran poco y presentan mínimas deformaciones de la superficie, por lo que **requirieren de inversiones relativamente bajas en su mantenimiento.** Estas operaciones de mantenimiento frecuentemente **consisten en el calafateo de las grietas que se llegaran a presentar, la reparación parcial de algunas losas y la reposición del material bituminoso en juntas de expansión o construcción que lo hayan perdido.**

En general, el mantenimiento a las losas de concreto hidráulico del pavimento, **resulta sencillo por las mínimas deformaciones ocasionas por el paso de vehículos o por filtraciones de combustibles derramados en su superficie.** Casi todos los deterioros del pavimento rígido resultan más fáciles de reparar, siempre y cuando sean de limitada extensión y poco frecuentes en un tramo carretero, en cuyo caso siempre es necesario, como máxima medida de corrección, la sustitución de la losa o el espesor parcial de la misma.

TEXTURA

La textura lograda con el concreto hidráulico se asocia con un menor riesgo vehicular a la colisión al presentar operativamente un menor desgaste de mecanismos del vehículo. Igualmente y en comparación con un pavimento flexible no se incurre en menos sobreconsumo de combustible durante las continuas esperas y arrancadas ocasionadas por daños o reparaciones en la vía.

Una capa de concreto hidráulico ofrece menor distancia de frenado para los vehículos, pues la textura que se le da a la capa de rodamiento de un pavimento rígido constituye un factor de seguridad más controlable que con pavimentos de asfalto. Por ejemplo, un vehículo que viaja a 96 Km./hr, requiere para detenerse al haber accionado los frenos, aproximadamente 10 metros, mientras que en pavimento con ahuellamientos necesita hasta 40 metros más. REF*7. En general el texturizado se realiza fácilmente con una arpillera cuyas líneas de penetración varían entre 3 y 6 mm.

DURABILIDAD (MAYOR VIDA ÚTIL)

La carpeta de un pavimento rígido ofrece mayor resistencia a los esfuerzos generados por el tránsito y la acción del medio ambiente. Empíricamente se ha comprobado que la mayoría de los pavimentos rígidos tienen una duración mínima de 20 años y pueden estar periodos grandes de servicio sin hacerle intervenciones o reparaciones importantes. En general estos pavimentos presentan una vida útil de 20 a 50 años, y en Estados Unidos e Inglaterra han existido casos excepcionales de superficies que datan de más de 70 años y aún se hallan en buen estado, incluso sin haber recibido mantenimiento (REF*6); su larga duración se atribuye a que están bien construidos y no se encuentran sujetos a las deformaciones continuas que ocasiona el paso de vehículos, así como a la mínima filtración de combustibles derramados en su superficie.

ÍNDICE DE SERVICIO DURANTE SU VIDA ÚTIL.

El índice de servicio se refiere al grado de comodidad de los usuarios que transitan sobre el pavimento. Con una buena construcción y un buen manejo de juntas entre las losas de concreto, el índice de servicio es alto y se mantiene por mucho tiempo ya que no se presentan deformaciones que incomoden al usuario. En comparación con un pavimento flexible, éste presenta un mayor deterioro y sus reparaciones inciden en incomodidades para la circulación, lo cual reduce el índice de servicio de la carretera.

COSTOS DE OPERACIÓN DE UN VEHÍCULO

Aunque el deterioro vehicular provocado por el rodamiento es casi imperceptible, es acumulativo y más notorio para el usuario que circula en pavimentos deteriorados y con continuas reparaciones.

En general, el concreto hidráulico ofrece un periodo más amplio entre intervenciones por reparación y guarda por más tiempo sus condiciones óptimas de servicio, con leves daños y deformaciones, lo cual ayuda a preservar el buen estado de los vehículos.

DRENAJE.

El drenaje puede regularse con texturas abiertas en pavimentos flexibles; en pavimento de concreto hidráulico puede diseñarse éste con concreto poroso, un concreto sin finos que permite fácilmente el flujo de agua a través de sí mismo. Los pavimentos de concreto hidráulico generalmente cuentan con el adecuado drenaje superficial gracias a su textura controlada, presentándose menos incidencia de hidroplanéo de los vehículos y aumentando la seguridad del usuario.

DIFUSIÓN DE LA LUZ

Debido al color propio de la mezcla de concreto hidráulico, color gris claro, la capa de rodamiento del pavimento rígido refleja mejor la luz generando mayor seguridad para los usuarios al proporcionar mayor visibilidad en la noche. Adicionalmente, los costos de iluminación se pueden reducir ya que se requiere hasta un 30% menos de lámparas en la vía con sus respectivos consumos de energía. REF*7

RUIDO.

Por lo que respecta al ruido y coeficiente de deslizamiento, estudios de los campos de nivel sonoro y del coeficiente de deslizamiento para diferentes tipos de carpetas, incluyendo adoquines y losas de concreto hidráulico, indican que el concreto hidráulico genera menos ruido que el pavimento flexible.

En este aspecto, tanto el ruido como la fricción llegan a presentar situaciones de conflicto, pero se opta por asegurar la adherencia entre neumático y pavimento, aunque esta medida de seguridad conlleve cierta incomodidad en cuanto a ruido se refiera.

En general el ruido se mide en varios niveles que causan incomodidad y molestia al usuario, destacando el comportamiento de cada tipo de carpeta con respecto a la generación de ruido y los niveles del coeficiente de deslizamiento entre llanta y pavimento.

Con los conocimientos básicos de los tipos de pavimentos y su posible aplicación en la rehabilitación, se realiza una comparación de las ventajas y desventajas de ambos tipos de pavimento.

ALGUNAS CONSIDERACIONES DE ORDEN ECONÓMICO

Cuando un proyecto de infraestructura sugiere de pavimentar con concreto hidráulico o con concreto asfáltico, resulta conveniente analizar estas alternativas considerando los costos de conservación, mediante un análisis de costo-beneficio, para **determinar la alternativa más económica y conveniente con los recursos disponibles, sin olvidar el objeto de la obra y los beneficios que proporcionará a la sociedad en general.**

En el caso de la rehabilitación de la autopista Chamapa - La Venta, en el análisis económico se observa que la construcción de la primera alternativa requiere una inversión menor respecto al costo inicial de construcción, pero en lo que toca al costo de conservación el pavimento rígido requiere solo del 5 % al 7% de lo que se ocuparía para la conservación en las otras dos alternativas (capa de rodamiento de concreto asfáltico).

Frecuentemente en el análisis de estos pavimentos se tiende a evaluar el costo integral de la estructura, que consiste tanto del costo inicial como el del mantenimiento para su servicio adecuado. En este panorama se puede mencionar que **existe una diferencia de hasta 44% en promedio a favor de la opción de concreto hidráulico, siendo la opción más económica en el largo plazo.**

Las diferencias a favor del pavimento rígido se presentan entre el año 5 y el 6, justo cuando el concreto asfáltico requiere de intervenciones de mantenimiento mayor para elevar el índice de servicio de la autopista. Y en forma periódica se manifiesta el mayor costo de conservación del pavimento flexible respecto al correspondiente del pavimento de concreto hidráulico.

Respecto a la alternativa 1 (pavimento asfáltico) puede anotarse que en su año 11 dicha opción iguala su monto de inversión con el correspondiente a implementar un pavimento rígido.

Con respecto a la segunda alternativa se observa que la diferencia significativa comienza a partir del año 4, donde el pavimento flexible incrementa notoriamente su costo; dicha diferencia en el año 20 de servicio registra una variación de hasta \$ 7, 000, 000.00 superior a lo requerido por la opción rígida.

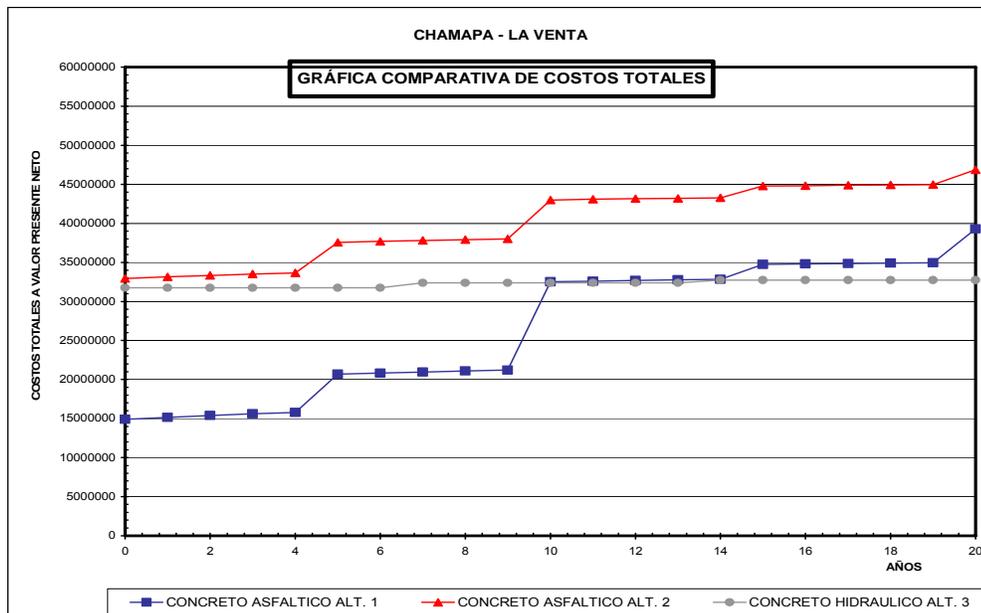
Finalmente cabe aclarar que el objetivo de la rehabilitación impide implementar la alternativa 2 (de concreto asfáltico que mejora las condiciones de las capas de base y sub-base) porque constituye una medida de reconstrucción y requiere de una inversión inicial que sobrepasa los recursos destinados para la intervención programada.

Respecto a la opción rígida, esta no se implementa por idénticas razones a las descritas antes para la opción 2 (de concreto asfáltico), aceptando que operativamente el mantenimiento continuo de un pavimento asfáltico obstruye el tránsito y cambia las condiciones de comodidad del usuario. Sobre esta última consideración, los trabajos de mantenimiento que se originan son menores que el de las otras dos alternativas.

CONSIDERACIONES DEL ANÁLISIS ECONÓMICO

La construcción de la primera alternativa es más económica respecto al costo inicial. Su costo de conservación se incrementa grandemente en comparación con la alternativa rígida

La inversión inicial de la opción rígida es más costosa; sin embargo el costo correspondiente a su mantenimiento es del orden 5 % al 7% de la inversión inicial requerida para construirla. Las diferencias a favor del pavimento rígido se presentan a partir del año 4, en comparación con la alternativa 1 y cuando se compara con la alternativa 2 no se presenta una intersección de curvas porque el costo de implementar la tercera es menor que el de la segunda.



Operativamente los pavimentos rígidos y flexibles requieren de diferentes tipos de mantenimiento, y cada una de esas intervenciones representa obstruir el tránsito y modificar las condiciones de comodidad del usuario de la autopista. A este respecto, los trabajos de mantenimiento que se originan de implementar la tercer alternativa son menores que el de implementar cualquiera de las otras dos opciones de pavimento. Por ello el uso de pavimento rígido es más recomendable.

Del análisis de cada uno de los parámetros definidos, los profesionales de la ingeniería aplicada en pavimentos, se van formando una opinión y el ponderarlas permite elegir entre el empleo de un pavimento asfáltico o un pavimento de concreto hidráulico. En el caso en estudio, en general se da mayor importancia a la minimización de la inversión inicial (derivada del costo de construcción) y al tiempo de implementación pues se requiere trabajar en temporada de lluvias.

Cabe destacar que a la fecha en México se tienen en operación o en construcción un total de 2,267 km-carril de pavimentos rígidos (año 2000), y que en la atención al programa de los ejes troncales de 1998 al año 2000, que contempló trabajar en casi 4,000 km de caminos que requirieron reforzar su estructura o su alineamiento, al menos la mitad de ellos fueron de concreto hidráulico. Por ello y debido a las necesidades crecientes de infraestructura, se necesita identificar las medidas óptimas que favorezcan el desarrollo del país, sin caer en adopción de medidas mediocres que beneficien solo al operador de la autopista en detrimento de la calidad de servicio a largo plazo.

Además en México se ha logrado acumular en el campo de los pavimentos de concreto hidráulico en aeropuertos y puertos, una experiencia profesional de varias obras, que en general presentan un comportamiento ampliamente satisfactorio puesto que, con algunas variantes, los costos de mantenimiento y rehabilitación han resultado razonablemente moderados e incluso de muy baja cuantía. REF*16. Puede anotarse que el panorama de aplicación de los pavimentos rígidos se amplía a utilizarlos en vías urbanas en las principales ciudades del país ya sea con o sin acero de refuerzo,

En general, se recomienda renovar y adecuar las carreteras para recibir las nuevas cargas e intensidades de tránsito y ofrecer caminos con mejores características tanto geométricas como estructurales empleando ventajosamente la alternativa del sobrecarpetao de concreto hidráulico (whitetopping) y planificar adecuadamente el mantenimiento, de manera que cumpla las expectativas de vida de servicio.

Anexos

ANEXO 1. COMPACTACIÓN

TABLA 2
ELECCIÓN DE EQUIPOS DE COMPACTACIÓN

	SÍMBOLO SUCS	MATERIAL	TRAMPER	TRAMPER	PATA DE CABRA	PATA DE CABRA	LISO VIBRATORIO	LISO VIBRATORIO	PATA DE CABRA,	PATA DE CABRA,	NEUMÁTICO	NEUMÁTICO
			AUTOPROPULSADO	REMOLCADO	AUTOPROPULSADO	REMOLCADO	PEQUEÑO	PESADO	VIBRATORIO, PEQUEÑO	VIBRATORIO, PESADO	LIGARO	PESADO
BASE		GRANULAR LIMPIO					1	1			3	2
		GRANULAR CON POCOS FINOS	2	2			1	1	2	2		2
SUB-BASE		ROCA	2	2				1		2		
	GW,GP,SW	ARENA, GRAVA					1	1	2	2		2
CUERPO DEL TERRAPLÉN	SP	ARENA UNIFORMA					1	1	2	2		3
	SM, GM	ARENAS O GRAVAS LIMOSAS	1	1	4	4	3	3	2	2		2
	ML, MH	LIMOS	1	1	2	2			3	3		2
	GC, SC	ARENAS O GRAVAS ARCILLOSAS	1	1	2	2			3	3		2
	CH, CL	ARCILLAS	1	1	2	2					3	3

El número acotado para el suelo y el tipo de compactación es la cantidad de pasadas que comúnmente se le aplica al pavimento o la terracería, según corresponda.

TABLA NO. 3. (FUENTE: REF*15). Esta tabla remite las propiedades y usos comunes aplicados en campo relacionados con el equipo de compactación más recomendable.

CARACTERÍSTICAS DE UTILIZACIÓN DE LOS SUELOS, AGRUPADOS SEGÚN SUCS.

Símbolo	Características De compactabilidad	Peso vo Lumétrico seco máx. típico (proctor estándar) ton/m ³ .	Compresibilidad y Expansión	Permeabilidad y características de drenaje	Características como material de terrapién	Características como subrasante	Características como base	Características como Pavimento provisional	
								C/revestimiento o ligero	C/tratamiento asfáltico
GW	Buenas. Rodillos lisos vibratorios. Rodillo neumático. Respuesta perceptible al bandedo con tractor.	1.9 a 2.1	Prácticamente nula	Permeable Muy buenas	Muy estable	Excelente	Muy buena	Regular a mala	Excelente
GP	Buenas. Rodillos lisos vibratorios. Rodillo neumático perceptible al bandedo con tractor	1.8 a 2.0	Prácticamente nula	Permeable Muy buenas	Estable	Buena a excelente	Regular	Pobre	Regular
GM	Buenas. Rodillos neumáticos o pata de cabra ligeros	1.9 a 2.2	Ligera	Semipermeable Drenaje pobre	Estable	Buena a excelente	Regular a mala	Pobre	Regular a pobre
GC	Buenas o regulares rodillos neumáticos o pata de cabra	1.8 a 2.1	Ligera	Impermeable Mal drenaje	Estable	Buena	Regular a buena	Excelente	Excelente
SW	Buenas rodillos neumáticos o vibratorios	1.7 a 2.0	Prácticamente nula	Permeable Buen drenaje	Muy estable	Buena	Regular a mala	Regular a mala	Buena
SP	Buenas rodillos neumáticos o vibratorios	1.6 a 1.9	Prácticamente nula	Impermeable buen drenaje	Razonablemente Estable en estado compacto	Regular a buena	Mala	Mala	Regular a mala
SM	Buenas rodillos neumáticos o pata de cabra	1.7 a 2.0	Ligera	Impermeable Mal drenaje	Razonablemente En estado compacto	Regular a buena	Mala	Mala	Regular a mala
SC	Buenas o regulares rodillos neumáticos o pata de cabra	1.6 a 2.0	Ligera a media	Impermeable Mal drenaje	Razonablemente estable	Regular a buena	Regular a mala	Excelente	Excelente

TABLA NO. 3

(CONTINUACION)

Símbolo	Características De compactabilidad	Peso vo Lumétrico seco máx. típico (proctor estandar) ton/m3.	Compresibilidad y Expansión	Permeabilidad y características de drenaje	Características como material de terrapién	Características como subrasante	Características como base	Características como Pavimento provisional	
								C/revestimiento o ligero	C/tratamiento asfáltico
ML	Buenas a malas. Rodillos neumáticos o pata de cabra	1.5 a 1.9	Ligera a media	Impermeable mal drenaje	Mala estabilidad Si no esta muy compacto	Regular a mala	No debe usarse	Mala	Mala
CL	Regulares a buenas. Rodillos pata de cabra o neumáticos	1.5 a 1.9	Media	Impermeable no drena	Buena	Regular a mala	No debe usarse	Mala	Mala
OL	Regulares a malas. Rodillos pata de cabra o neumáticos	1.3 a 1.6	Media a alta	Impermeable mal drenaje	Inestable debe Evitarse su uso	Mala	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse
MH	Regulares a malas. Rodillos pata de cabra o neumáticos	1.1 a 1.6	Alta	Impermeable Mal drenaje	Inestable debe de Evitarse su uso	Mala	No debe usarse	Muy mala	Muy mala
CH	Regulares a malas. Rodillos pata de cabra	1.3 a 1.7	Muy alta	Impermeable no drena	Regular Vigílese la expansión	Mala o muy mala	No debe usarse	Muy mala	No debe usarse
OH	Regulares a malas. Rodillos pata de cabra	1.0 a 1.6	Alta	Impermeable No drena	Inestable Debe evitarse Su uso	Muy mala	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse
Pt	No debe usarse		Mal alta	Regular o mal drenaje	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse

ANEXO 2. OTROS MÉTODOS DE DISEÑO

ANEXO 2.1 (MÉTODO U. S. ARMY)

El método de la armada de los Estados Unidos de América (**MÉTODO U. S. ARMY**) tiene mayor uso en el diseño de aeropistas y es una aplicación práctica de la Teoría de Burmister y el empleo de la prueba de la placa.

Para diseñar pavimento flexibles con este método, primeramente se debe hacer una prueba de placa en la subrasante por utilizar, se mide la presión requerida para que una placa de 30" (76,2cm) de diámetro genere una deformación de 0.2" (0,508cm).

Considerando que la subrasante es semi-infinita, se aplica la Teoría de Boussinesq:

$$\Delta = 1.18 * \frac{pr}{E_2}$$

Δ = Deformación de la placa rígida sobre la subrasante (según Boussinesq), en centímetros.

p = Presión aplicada a la placa en Kg./cm²

r = Radio de la placa en centímetros

E_2 = Módulo de elasticidad de la Subrasante, en Kg./cm²

En esta expresión se conocen todos los términos al efectuar la prueba **excepto** E_2 que, por lo tanto, **puede calcularse**. Posteriormente se construye una plataforma de 5 x 5m. de 15cm de espesor mínimo (aproximadamente 6") con el material que se disponga para realizar la futura base del pavimento. Se realiza otra prueba de placa sobre dicha capa y se aplica la fórmula:

$$\Delta = 1.18 * F * \frac{pr}{E_2}$$

Pudiendo calcular **F**, acotando la deformación Δ al valor 0.508cm. Con este valor de **F** se calcula la relación **E2/E1** de la Figura 30, de donde **puede calcularse el valor de E1: módulo de elasticidad de la base.**

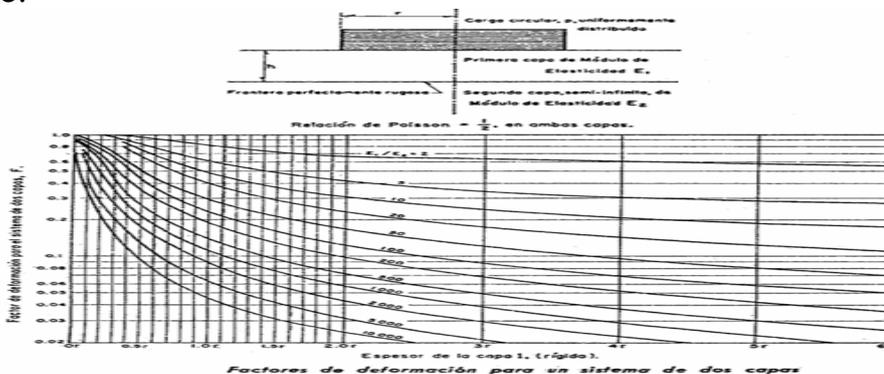


Figura 31. Fuente: REF*22.

Ahora con los datos reales de la llanta de diseño, cuya carga y presión de inflado, P_i , se suponen conocidas, es posible calcular el área y el radio de la huella de la llanta. Y aplicando la fórmula:

$$\Delta = 1.5 * F * \frac{Pr}{E_2}$$

Δ = Deformación de la placa rígida sobre la subrasante (según Boussinesq), en centímetros.

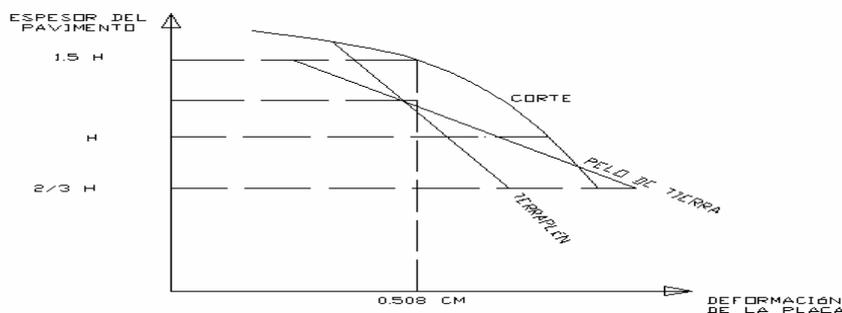
p = Presión aplicada a la placa en Kg./cm²

r = Radio de la placa en centímetros

E_2 = Módulo de elasticidad de la Subrasante, en Kg./cm²

es posible calcular el nuevo valor de F, correspondiente a la placa flexible real, trabajando de nuevo con una deformación Δ acotada a 0.2" (0.508 cm). **Con este valor de F y la gráfica de la Figura 31, usando la relación E_2/E_1 ya calculada, puede obtenerse el espesor de la base, necesario para satisfacer las ecuaciones de Burmister**, con las deformaciones dentro del valor que se ha venido utilizando de 0.2" (0.508cm), en función del radio de la llanta real; como éste ya se conoce, se tiene en definitiva un espesor de la base del pavimento, H.

Se recomienda que este espesor H se compruebe mediante la construcción de una plataforma de unos 5 x 5 m con un espesor de 2/3 H, H y 1.5 H donde se pueda practicar una prueba de placa; en dicha prueba se aplica una carga cíclica en la base de referencia mediante una placa metálica de radio igual al de la llanta real de diseño, ya obtenido anteriormente y con una presión aplicada igual a la de inflado de la llanta de diseño. En general esta prueba consiste en medir la deflexión de la placa en cada caso. En estas condiciones se obtienen nueve valores de la deformación, con los cuales se construye una gráfica análoga a la mostrada en la [gráfica 15](#), donde **el espesor promedio corresponde a la deformación acotada a 0.508 cm. es el proyecto para el pavimento, teniendo en cuenta que parte del valor obtenido es espesor de la carpeta.**



Gráfica 9. Gráfica para encontrar el espesor de proyecto de un pavimento con el método de la Armada de Estados Unidos

ANEXO 2.2.- MÉTODO CBR

Este método se basa en la prueba del Valor Relativo de Soporte o CBR, ya descrita anteriormente. Probablemente es el más popular en el mundo, aunque no el mejor. Se emplea para aeropistas y carreteras. En base a la observación del comportamiento de pavimentos construidos durante más de 20 años y en correlaciones de tal comportamiento con el valor VRS exhibido por las diferentes capas de tales pavimentos, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EUA, llegó a la siguiente expresión para determinar el espesor de un pavimento en aeropistas.

$$e = \sqrt{P \left(\frac{1}{8.1 * (VRS)} \right) - \frac{1}{\rho\pi}}$$

Donde:

e = espesor de pavimento para proteger la subrasante (pulgadas)

p = carga de la rueda de diseño (libras)

VRS = Valor Relativo de Soporte de la subrasante

ρ = presión de inflado de la rueda de diseño en lb/in²

La expresión sólo es válida para valores del VRS menores que 10% o 12%, que es el intervalo de VRS de subrasante común en la práctica.

Para valores de CBR mayores de 12%, la fórmula anterior no representa a dichas curvas, por lo cual se recurre a ellas en cada caso particular. En atención a esta necesidad se sugiere consultar el anexo X-b de la REF*22, donde se han recopilado las curvas que cubren las condiciones mas comunes También aparecen en el anexo las curvas válidas para el diseño de carreteras, para las que no se ha desarrollado ninguna fórmula representativa que haya alcanzado difusión. Por otra parte ha de señalarse que, tanto para aeropuertos como en carreteras, existen especificaciones muy particulares y locales sobre los espesores mínimos de base y carpeta a usar; en el anexo X-b figuran también algunas referencias a dichos valores.

Este método está limitado por no considerar ciertas normas mínimas de calidad, ni las características mecánicas del propio material protector. Otra objeción es que los criterios empíricos, basados en experiencias de pavimentos pesados resultan peligrosos para aplicar en un campo tan cambiante como lo es la tecnología de los pavimentos, pues los criterios que se pueden aplicar a ciertas cargas, no pueden extrapolarse a cargas de mayor magnitud como ocurre actualmente.

ANEXO 2.3.- MÉTODO KANSAS.

SE emplea fundamentalmente para el diseño de pavimento de carreteras y se basa en la teoría de Boussinesq, la cual propone que la deformación a una profundidad z bajo el centro de un círculo uniformemente cargado, es:

$$\Delta = \frac{pr}{E} C \dots\dots\dots\text{II.3.3}$$

Donde:

Δ : Deformación

p : Presión de contacto del círculo cargado.

r : Radio del círculo

C : Es una función de z que vale:

$$C = \left(\frac{3}{2}\right) \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{z}{r}\right]^2}} \dots\dots\dots\text{II.3.4}$$

Sustituyendo la ecuación anterior por su equivalente en términos de la carga total de la rueda de diseño, se despeja z , igualándola al **espesor del pavimento** se obtiene:

$$z = e = \sqrt{\left(\frac{3P}{2\pi E\Delta}\right)^2 - r^2} \dots\dots\dots\text{II.3.5}$$

Δ es la deformación bajo la carga P de la rueda de diseño. En la fórmula II.3.3 **se supone que el espesor e no contribuye a esa deformación**; así Δ es producido únicamente desde ese nivel hacia abajo, según la teoría de Boussinesq. **La ecuación II.3.5 es la fórmula que usa el método de Kansas**; con ella puede calcularse un espesor del pavimento sobre la subrasante tal que, según la teoría de Boussinesq, al aplicar a dicho pavimento una carga P , la deformación bajo la llanta no sobrepase el valor Δ que se use en la fórmula II.3.5.

El método de Kansas se basa también en los resultados de la prueba triaxial del mismo nombre; para dicha prueba se reproducen las condiciones de humedad más desfavorables en la vida útil del pavimento a base de la saturación del espécimen; en general esta hipótesis es **en exceso conservadora, por lo que se introduce un coeficiente corrector n , cuyo valor es función de la precipitación pluvial en la zona de construcción.**

La tabla 15 remite algunos valores que pueden tomarse en cuenta para el coeficiente corrector por efecto de lluvia.

Coeficiente de saturación (n)	Precipitación pluvial promedio anual (cm.)
0.5	38-50
0.6	51-63
0.7	63-76
0.8	77-89
0.9	90-101
1.0	102-127

Tabla 15. Fuente: REF*22.

Respecto a la consideración del tránsito, este método introduce un **factor de intensidad** m , que supone que la máxima carga por rueda es de 4100Kg (9000lb); también se asume que el porcentaje de vehículos de diferentes pesos es el mismo siempre, es decir, que la distribución del tránsito es prácticamente constante. Sobre estas hipótesis el **coeficiente** m queda dado como se ve en la tabla 16 en función de del volumen total de tránsito del camino.

Coeficiente de Tránsito m	Vehículos por día en el camino
$\frac{1}{2}$	40-400
$\frac{2}{3}$	401-800
$\frac{5}{6}$	801-1200
1	1201-1800
$\frac{7}{6}$	1801-2700
$\frac{9}{6}$	2701-4000
$\frac{10}{6}$	4001-6000
$\frac{11}{6}$	90001-13500
2	135001-20000

Tabla 16. Fuente: REF*22.

Ya con estos coeficientes la fórmula II.3.5 se modifica para dar lugar a la siguiente **fórmula práctica del diseño**:

$$e = \left[\sqrt{\left(\frac{3Pmn}{2\pi E\Delta} \right)^2 - r^2} \right] \left[\sqrt[3]{\frac{E}{E_c}} \right] \quad \text{Ecuación II.3.6}$$

Donde:

E : Módulo de deformación de la subrasante

E_c : Módulo de deformación de la carpeta suponiendo como primera aproximación, que todo el pavimento protector sobre la subrasante estará formado por ese material.

El factor $\sqrt[3]{\frac{E}{E_c}}$ se propuso con base en la teoría de factores de rigidez en losas y se verificó considerando el desplazamiento vertical elástico debido a una carga concentrada en un sistema de dos capas.

Los módulos E y E_c se determinarán sometiendo a los materiales correspondientes a la prueba triaxial de Kansas

En resumen la secuencia del método consiste en primer lugar en **considerar que todo el pavimento estará formado por una capa única de material de carpeta asfáltica. Posteriormente se sustituirá parte de su espesor por un espesor equivalente de material granular de la base y, por último, parte de este espesor de base podrá aún sustituirse por un espesor equivalente de sub-base, de inferior calidad.**

La deformación Δ es acotada ahora al valor 0.25cm. (0.1”) y r se refiere al radio del área de contacto de la llanta de diseño. Con estos datos, la fórmula II.3.6 da el espesor del pavimento requerido para proteger la subrasante.

Ahora suponiendo un espesor t_c de una carpeta cuyo módulo de deformación resulte ser E_c , el espesor de base de módulo E_b correspondiente puede calcularse con la fórmula:

$$e_b = (e - e_c) \sqrt[3]{\frac{E}{E_c}} \quad \text{Ecuación II.3.7}$$

Donde:

e : Espesor del pavimento, calculado con la expresión III.3.6

e_c : Espesor supuesto de carpeta

Supóngase ahora que se desea usar un cierto espesor de base e_b de módulo de deformación E_b y el resto de una sub-base de inferior calidad, con módulo de deformación E_{sb} . El espesor equivalente de ésta puede encontrarse con el criterio mostrado por la Ecuación II.3.7

$$e_{sb} = (e_b - e'_b) \sqrt[3]{\frac{E_b}{E_{sb}}}$$

Donde:

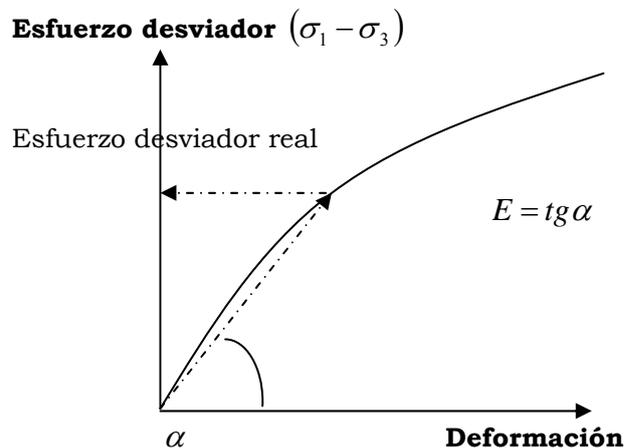
e_{sb} : Espesor requerido de sub-base

e_b : Espesor de base calculado con la fórmula 10-11

e'_b : Espesor parcial de base que se desea colocar

El problema del método generalmente está en la correcta determinación de los módulos de deformación de los materiales en la prueba triaxial. Un criterio sería obtener la curva esfuerzo-deformación en la prueba y determinar el módulo para el esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) real que vaya a obrar en el pavimento. La gráfica 16 muestra gráficamente este criterio.

Las autoridades en pavimentación del Estado de Kansas elaboraron las curvas esfuerzo desviador - módulo de deformación para diferentes valores de m, que permiten calcular fácilmente los espesores, una vez que se dispone de los datos de la prueba triaxial de Kansas, realizada en los diferentes materiales con que se cuenta para construir el pavimento. (n: coeficiente corrector por efecto de lluvia; m: un factor de intensidad)



Gráfica 16. Criterio para obtener el módulo de deformación en la prueba de Kansas. **REF*22.**

ANEXO 2.4.-

TABLAS Y FIGURAS PARA EL EMPLEO DEL MÉTODO PCA. REF*18

Tabla 47. Esfuerzo equivalente para pavimentos sin apoyo lateral.

Tabla 48. Esfuerzo equivalente para pavimentos con apoyo lateral.

Tabla 49. Factores de erosión para pavimentos con pasajuntas y sin apoyo lateral

Tabla 50. Factores de erosión para pavimentos sin pasajuntas y sin apoyo lateral

Tabla 51. Factores de erosión para pavimentos con pasajuntas y con apoyo lateral.

Tabla 52. Factores de erosión para pavimentos sin pasajuntas y con apoyo lateral.

Figura 47. Análisis de fatiga (Repeticiones permisibles basadas en el factor de relación de esfuerzo, con o sin apoyo lateral). CEMEX CONCRETOS

Figura 48. Análisis de erosión (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión, sin apoyo lateral). CEMEX CONCRETOS.

Figura 49. Análisis de erosión (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión, con apoyo lateral). CEMEX CONCRETOS.

TABLA 47.
Esfuerzo equivalente para pavimentos sin apoyo lateral.

Esfuerzo equivalente para pavimentos sin apoyo lateral																					
Espesor de Losa	K de la Subrasante																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	sencillo	tándem	tridem	sencillo	Tándem	Tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	Sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem
4.00	825	679	510	726	585	456	671	542	437	634	516	428	584	486	419	523	457	414	484	443	412
4.50	699	586	439	616	500	380	571	460	359	540	435	349	498	406	339	488	378	331	417	363	328
5.00	602	516	387	531	436	328	493	399	305	467	376	293	432	349	282	390	321	272	363	307	269
5.50	526	461	347	464	387	290	431	353	266	409	331	253	379	305	240	343	278	230	320	264	226
6.00	465	416	315	411	348	261	382	316	237	362	296	223	336	271	209	304	246	198	285	232	193
6.50	417	380	289	367	317	238	341	286	214	314	267	201	300	244	186	273	220	173	256	207	168
7.00	375	349	267	331	290	219	307	262	196	292	244	183	272	222	153	246	199	154	231	186	148
7.50	340	323	247	300	268	203	279	241	181	265	224	168	246	203	141	224	181	139	210	169	132
8.00	311	300	230	274	249	189	255	223	168	242	208	156	225	188	131	205	167	126	192	155	120
8.50	285	281	215	252	232	177	234	208	158	222	193	145	206	174	122	188	154	116	177	143	109
9.00	264	264	200	232	218	166	216	195	148	205	181	136	190	163	115	174	144	108	163	133	101
9.50	245	248	187	215	205	157	200	183	140	190	170	129	176	153	115	161	134	101	151	124	93
10.00	228	235	174	200	193	148	186	173	132	177	160	122	164	144	108	150	126	95	141	117	87
10.50	213	222	163	187	183	140	174	164	125	165	151	115	153	136	103	140	119	89	132	110	82
11.00	200	211	153	175	174	132	163	155	119	154	143	110	144	129	98	131	113	85	123	104	78
11.50	188	201	142	165	165	125	153	148	113	145	136	104	135	122	93	123	107	80	116	98	74
12.00	177	192	133	155	158	119	144	141	108	137	130	100	127	116	89	116	102	77	109	93	70
12.50	168	183	123	147	151	113	136	135	103	129	124	95	120	111	85	109	97	73	103	89	67
13.00	159	176	114	139	144	107	129	129	98	122	119	91	113	106	81	103	93	70	97	85	64
13.50	152	168	105	132	138	101	122	123	93	116	114	87	107	102	78	98	89	67	92	81	64
14.00	144	162	97	125	133	96	116	118	89	110	109	83	102	98	75	93	85	65	88	78	59

Tomado de Pavimentos de Concreto. CEMEX Concretos.
Tabla 1.5

TABLA 48.
Esfuerzo equivalente para pavimentos con apoyo lateral.

Esfuerzo equivalente para pavimentos con apoyo lateral																					
Espesor de Losa	K de la Subrasante pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	sencillo	Tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem
4.00	640	534	431	559	468	392	517	439	377	489	422	369	452	403	362	409	388	360	383	384	359
4.50	547	461	365	479	400	328	444	371	313	421	356	305	390	338	297	355	322	292	333	316	291
5.00	475	404	317	417	349	281	387	323	266	367	308	258	341	290	250	311	274	244	294	267	242
5.50	418	360	279	368	309	246	342	285	231	324	271	223	302	254	214	276	238	208	261	231	206
6.00	372	325	249	327	277	218	304	255	204	289	241	96	270	225	187	247	210	180	134	203	178
6.50	334	295	225	294	251	196	274	230	183	260	218	173	243	203	166	223	188	159	212	180	156
7.00	302	270	204	266	230	178	248	210	165	236	198	158	220	184	149	203	170	142	192	162	138
7.50	275	250	187	243	211	162	226	193	151	215	182	143	201	168	135	185	155	127	176	148	124
8.00	252	232	172	222	196	149	207	179	138	197	168	131	185	155	123	170	142	116	162	135	112
8.50	232	216	159	205	182	138	191	166	128	182	156	121	170	144	113	157	131	106	150	125	102
9.00	215	202	147	190	171	128	177	155	119	169	146	112	158	134	105	146	122	98	139	116	94
9.50	200	190	134	176	160	120	164	146	111	157	137	105	147	126	98	136	114	91	129	108	87
10.00	186	179	127	164	151	112	153	137	104	146	129	98	137	118	91	127	107	84	121	101	81
10.50	174	170	119	154	143	105	144	130	97	137	121	92	128	111	86	119	101	79	113	95	76
11.00	164	161	111	144	135	99	135	123	92	129	115	87	120	105	81	112	95	74	106	90	71
11.50	154	153	104	136	128	93	127	117	86	121	109	82	113	100	76	105	90	70	100	85	67
12.00	145	146	97	128	122	88	120	111	82	114	104	78	107	95	72	99	86	66	95	81	63
12.50	137	139	91	121	117	83	113	106	78	108	99	74	101	91	68	94	82	63	90	77	60
13.00	130	133	85	115	112	79	107	101	74	102	95	70	96	86	65	89	78	60	85	73	57
13.50	124	124	80	109	107	75	102	97	70	97	91	67	91	83	62	85	74	57	81	70	54
14.00	118	122	75	104	103	71	97	93	67	93	87	63	87	79	59	81	71	54	77	67	51

Tomado de Pavimentos de Concreto. CEMEX Concretos.
Tabla 1.6

TABLA 49.

Factores de erosión para pavimentos con pasajuntas y sin apoyo lateral

Espesor de Losa	K de la Subrasante pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	Tridem
4.00	3.74	3.83	3.89	3.73	3.79	3.82	3.72	3.75	3.75	3.71	3.73	3.7	3.7	3.7	3.61	3.68	3.67	3.53
4.50	3.59	3.7	3.78	3.57	3.65	3.69	3.56	3.61	3.62	3.55	3.58	3.57	3.54	3.55	3.5	3.52	3.53	3.44
5.00	3.45	3.58	3.68	3.43	3.52	3.58	3.42	3.48	3.5	3.41	3.45	3.46	3.4	3.42	3.4	3.38	3.4	3.34
5.50	3.33	3.47	3.59	3.31	3.41	3.49	3.29	3.36	3.4	3.28	3.33	3.36	3.27	3.3	3.3	3.26	3.28	3.25
6.00	3.22	3.38	3.51	3.19	3.31	3.4	3.18	3.26	3.31	3.17	3.23	3.26	3.15	3.2	3.21	3.14	3.17	3.16
6.50	3.11	3.29	3.44	3.09	3.22	3.33	3.07	3.16	3.23	3.06	3.13	3.18	3.05	3.1	3.12	3.03	3.07	3.08
7.00	3.02	3.21	3.37	2.99	3.14	3.26	2.97	3.08	3.16	2.96	3.05	3.1	2.95	3.01	3.04	2.94	2.98	3
7.50	2.93	3.14	3.31	2.71	3.06	3.2	2.88	3	3.09	2.87	2.97	3.03	2.86	2.93	2.97	2.84	2.9	2.93
8.00	2.85	3.07	3.26	2.82	2.99	3.14	2.8	2.93	3.03	2.79	2.89	2.97	2.77	2.85	2.9	2.76	2.82	2.96
8.50	2.77	3.01	3.2	2.74	2.93	3.09	2.72	2.86	2.97	2.71	2.82	2.91	2.69	2.78	2.84	2.68	2.75	2.79
9.00	2.7	2.96	3.15	2.67	2.87	3.04	2.65	2.8	2.92	2.63	2.76	2.86	2.62	2.71	2.78	2.61	2.68	2.73
9.50	2.63	2.9	3.11	2.6	2.81	2.99	2.58	2.74	2.87	2.56	2.7	2.81	2.55	2.65	2.73	2.54	2.62	2.68
10.00	2.56	2.85	3.06	2.54	2.76	2.94	2.51	2.68	2.83	2.5	2.64	2.76	2.48	2.59	2.68	2.47	2.56	2.63
10.50	2.5	2.81	3.02	2.47	2.71	2.9	2.45	2.63	2.78	2.44	2.59	2.72	2.42	2.54	2.64	2.41	2.51	2.58
11.00	2.44	2.76	2.98	2.42	2.67	2.86	2.39	2.58	2.74	2.38	2.54	2.68	2.36	2.49	2.59	2.35	2.45	2.54
11.50	2.38	2.72	2.94	2.36	2.62	2.82	2.33	2.54	2.7	2.32	2.49	2.64	2.3	2.44	2.55	2.29	2.4	2.5
12.00	2.33	2.68	2.91	2.3	2.58	2.79	2.28	2.49	2.67	2.26	2.44	2.6	2.25	2.39	2.51	2.23	2.36	2.46
12.50	2.28	2.64	2.87	2.25	2.54	2.75	2.23	2.45	2.63	2.21	2.4	2.56	2.19	2.35	2.48	2.18	2.31	2.42
13.00	2.23	2.61	2.84	2.2	2.5	2.72	2.18	2.41	2.6	2.16	2.36	2.53	2.14	2.3	2.44	2.13	2.27	2.39
13.50	2.18	2.57	2.81	2.15	2.47	2.68	2.13	2.37	2.56	2.11	2.32	2.49	2.09	2.26	2.41	2.08	2.23	2.35
14.00	2.13	2.54	2.78	2.11	2.43	2.65	2.08	2.34	2.53	2.07	2.29	2.46	2.05	2.23	2.38	2.03	2.19	2.32

Tomado de Pavimentos de Concreto. CEMEX Concretos. Tabla 1.7

TABLA 50.

Factores de erosión para pavimentos sin pasajuntas y sin apoyo lateral

Espesor de Losa	K de la Subrasante pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	Tridem
4.00	3.94	4.03	4.06	3.91	3.95	3.97	3.88	3.89	3.88	3.86	3.86	3.82	3.82	3.83	3.74	3.77	3.8	3.67
4.50	3.79	3.97	3.95	3.76	3.82	3.85	3.73	3.75	3.76	3.71	3.72	3.7	3.68	3.68	3.63	3.64	3.65	3.56
5.00	3.66	3.91	3.85	3.63	3.72	3.75	3.6	3.64	3.66	3.58	3.6	3.6	3.55	3.55	3.52	3.52	3.52	3.46
5.50	3.54	3.72	3.76	3.51	3.62	3.66	3.48	3.53	3.56	3.46	3.49	3.51	3.43	3.44	3.43	3.41	3.4	3.37
6.00	3.44	3.64	3.68	3.4	3.53	3.58	3.37	3.44	3.48	3.35	3.4	3.42	3.32	3.34	3.35	3.3	3.3	3.29
6.50	3.34	3.56	3.61	3.3	3.46	3.5	3.26	3.36	3.4	3.25	3.31	3.34	3.22	3.25	3.27	3.2	3.21	3.21
7.00	3.26	3.49	3.54	3.21	3.39	3.43	3.17	3.29	3.33	3.15	3.24	3.27	3.13	3.17	3.2	3.11	3.13	3.14
7.50	3.18	3.43	3.48	3.13	3.32	3.37	3.09	3.22	3.26	3.07	3.17	3.2	3.04	3.1	3.13	3.02	3.06	3.08
8.00	3.11	3.37	3.42	3.05	3.26	3.31	3.01	3.16	3.2	2.99	3.1	3.14	2.96	3.03	3.07	2.94	2.99	3.01
8.50	3.04	3.32	3.37	2.98	3.21	3.25	2.93	3.1	3.15	2.91	3.04	3.09	2.88	2.97	3.01	2.87	2.93	2.96
9.00	2.98	3.27	3.32	2.91	3.16	3.2	2.86	3.05	3.09	2.84	2.99	3.03	2.81	2.92	2.95	2.79	2.87	2.9
9.50	2.92	3.22	3.27	2.85	3.11	3.15	2.8	3	3.04	2.77	2.94	2.98	2.75	2.86	2.9	2.73	2.81	2.85
10.00	2.86	3.18	3.22	2.79	3.06	3.11	2.74	2.95	3	2.71	2.89	2.93	2.68	2.81	2.85	2.66	2.76	2.8
10.50	2.81	3.14	3.18	2.74	3.02	3.06	2.68	2.91	2.95	2.65	2.84	2.89	2.62	2.76	2.81	2.6	2.72	2.76
11.00	2.77	3.1	3.14	2.69	2.98	3.02	2.63	2.86	2.91	2.6	2.8	2.84	2.57	2.72	2.77	2.54	2.67	2.71
11.50	2.72	3.06	3.1	2.64	2.94	2.98	2.58	2.82	2.87	2.55	2.76	2.8	2.51	2.68	2.72	2.49	2.63	2.67
12.00	2.68	3.03	3.07	2.6	2.9	2.95	2.53	2.78	2.83	2.5	2.72	2.76	2.46	2.64	2.68	2.44	2.59	2.63
12.50	2.64	2.99	3.03	2.55	2.87	2.91	2.48	2.75	2.79	2.45	2.68	2.73	2.41	2.6	2.65	2.39	2.55	2.59
13.00	2.6	2.96	3	2.51	2.83	2.88	2.44	2.7	2.76	2.4	2.65	2.69	2.36	2.56	2.61	2.34	2.51	2.56
13.50	2.56	2.93	2.97	2.47	2.8	2.84	2.4	2.68	2.73	2.36	2.61	2.66	2.32	2.53	2.58	2.3	2.48	2.52
14.00	2.53	2.9	2.94	2.44	2.77	2.81	2.36	2.65	2.69	2.32	2.58	2.63	2.28	2.5	2.54	2.25	2.44	2.49

Tomado de Pavimentos de Concreto. CEMEX Concretos. Tabla 1.8

TABLA 51.

Factores de erosión para pavimentos con pasajuntas y con apoyo lateral.

Espesor de Losa	K de la Subrasante pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	Tridem
4.00	3,28	3,3	3,33	3,24	3,2	3,2	3,21	3,13	3,13	3,19	3,1	3,1	3,15	3,09	3,05	3,12	3,08	3
4.50	3,13	3,19	3,24	3,09	3,08	3,1	3,06	3	2,99	3,04	2,96	2,95	3,01	2,93	2,91	2,98	2,91	2,87
5.00	3,01	3,09	3,16	2,97	2,98	3,01	2,93	2,89	2,89	2,9	2,84	2,83	2,87	2,79	2,79	2,85	2,77	2,75
5.50	2,9	3,01	3,09	2,85	2,89	2,94	2,81	2,79	2,8	2,79	2,74	2,74	2,76	2,68	2,67	2,73	2,65	2,64
6.00	2,79	2,93	3,03	2,75	2,82	2,87	2,7	2,71	2,73	2,68	2,65	2,76	2,65	2,58	2,58	2,62	2,54	2,54
6.50	2,7	2,86	2,97	2,65	2,75	2,82	2,61	2,63	2,67	2,58	2,57	2,59	2,55	2,5	2,5	2,52	2,45	2,45
7.00	2,61	2,79	2,82	2,56	2,68	2,76	2,52	2,56	2,61	2,49	2,5	2,56	2,46	2,42	2,43	2,43	2,38	2,37
7.50	2,53	2,73	2,87	2,48	2,62	2,72	2,44	2,5	2,56	2,41	2,44	2,47	2,38	2,36	2,37	2,35	2,31	2,31
8.00	2,46	2,68	2,83	2,41	2,56	2,67	2,36	2,44	2,51	2,33	2,38	2,42	2,3	2,3	2,32	2,27	2,24	2,25
8.50	2,39	2,62	2,79	2,34	2,51	2,63	2,29	2,39	2,47	2,26	2,32	2,38	2,22	2,24	2,27	2,2	2,18	2,2
9.00	2,32	2,57	2,75	2,27	2,46	2,59	2,22	2,34	2,43	2,19	2,27	2,34	2,16	2,19	2,23	2,13	2,13	2,15
9.50	2,26	2,52	2,71	2,21	2,41	2,55	2,16	2,29	2,39	2,13	2,22	2,3	2,09	2,14	2,18	2,07	2,08	2,11
10.00	2,2	2,47	2,67	2,15	2,36	2,51	2,1	2,25	2,35	2,07	2,18	2,26	2,03	2,09	2,15	2,01	2,03	2,07
10.50	2,15	2,43	2,64	2,09	2,32	2,48	2,04	2,2	2,32	2,01	2,14	2,23	1,97	2,05	2,11	1,95	1,99	2,04
11.00	2,1	2,39	2,6	2,04	2,28	2,45	1,99	2,16	2,29	1,95	2,09	2,2	1,92	2,01	2,08	1,89	1,95	2
11.50	2,05	2,35	2,57	1,99	2,24	2,42	1,93	2,12	2,26	1,9	2,05	2,16	1,87	1,97	2,05	1,84	1,91	1,97
12.00	2	2,31	2,54	1,94	2,2	2,39	1,88	2,09	2,23	1,85	2,02	2,13	1,82	1,93	2,02	1,79	1,87	1,94
12.50	1,95	2,27	2,51	1,89	2,16	2,36	1,84	2,05	2,2	1,81	1,98	2,11	1,77	1,89	1,9	1,74	1,84	1,91
13.00	1,91	2,23	2,48	1,85	2,13	2,33	1,79	2,04	2,17	1,76	1,95	2,08	1,72	1,86	1,96	1,7	1,8	1,88
13.50	1,86	2,2	2,46	1,81	2,09	2,3	1,75	1,98	2,14	1,72	1,91	2,05	1,68	1,83	1,93	1,65	1,77	1,86
14.00	1,82	2,17	2,43	1,76	2,06	2,28	1,71	1,95	2,12	1,67	1,88	2,03	1,64	1,8	1,91	1,61	1,74	1,83

Tomado de Pavimentos de Concreto. CEMEX Concretos. Tabla 1.9

TABLA 52.

Factores de erosión para pavimentos sin pasajuntas y con apoyo lateral.

Espesor de Losa pulgadas	K de la Subrasante pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem	sencillo	tándem	tridem
4.00	3,46	3,49	3,5	3,42	3,39	3,38	3,38	3,32	3,3	3,36	3,29	3,25	3,32	3,26	3,21	3,28	3,24	3,16
4.50	3,32	3,39	3,4	3,28	3,28	3,28	3,24	3,19	3,18	3,22	3,16	3,13	3,19	3,12	3,08	3,15	3,09	3,04
5.00	3,2	3,3	3,32	3,16	3,18	3,19	3,12	3,09	3,08	3,1	3,05	3,03	3,07	3	2,97	3,04	2,97	2,93
5.50	3,1	3,22	3,26	3,05	3,1	3,11	3,01	3	3	2,99	2,95	2,94	2,96	2,9	2,87	2,93	2,86	2,83
6.00	3	3,15	3,2	2,95	3,02	3,05	2,9	2,92	2,92	2,88	2,87	2,86	2,86	2,81	2,79	2,83	2,77	2,74
6.50	2,91	3,08	3,41	2,86	2,96	2,99	2,81	2,85	2,86	2,79	2,79	2,79	2,76	2,73	2,72	2,74	2,68	2,67
7.00	2,83	3,02	3,09	2,77	2,9	2,94	2,73	2,78	2,8	2,7	2,72	2,73	2,68	2,66	2,65	2,65	2,61	2
7.50	2,76	2,97	3,05	2,7	2,84	2,89	2,65	2,72	2,75	2,62	2,66	2,67	2,6	2,59	2,59	2,57	2,54	2,54
8.00	2,69	2,92	3,01	2,6	2,79	2,84	2,57	2,67	2,7	2,55	2,61	2,62	2,52	2,53	2,54	2,5	2,48	2,48
8.50	2,63	2,88	2,97	2,56	2,74	2,8	2,51	2,62	2,65	2,48	2,55	2,58	2,45	2,48	2,49	2,43	2,43	2,43
9.00	2,57	2,83	2,94	2,5	2,7	2,77	2,44	2,57	2,61	2,42	2,51	2,53	2,39	2,43	2,44	2,36	2,38	2,38
9.50	2,51	2,79	2,91	2,44	2,65	2,73	2,38	2,53	2,58	2,36	2,46	2,49	2,33	2,38	2,4	2,3	2,33	2,34
10.00	2,46	2,75	2,88	2,39	2,61	2,7	2,33	2,49	2,54	2,3	2,51	2,46	2,27	2,34	2,36	2,24	2,28	2,29
10.50	2,41	2,72	2,85	2,33	2,58	2,67	2,27	2,45	2,51	2,24	2,38	2,42	2,21	2,3	2,32	2,19	2,24	2,26
11.00	2,36	2,68	2,83	2,28	2,54	2,65	2,22	2,41	2,48	2,19	2,34	2,39	2,16	2,26	2,29	2,14	2,2	2,22
11.50	2,32	2,65	2,8	2,24	2,51	2,62	2,17	2,37	2,54	2,14	2,31	2,36	2,11	2,22	2,26	2,09	2,16	2,19
12.00	2,28	2,62	2,78	2,19	2,48	2,59	2,13	2,34	2,45	2,1	2,27	2,33	2,06	2,19	2,23	2,01	2,13	2,16
12.50	2,24	2,59	2,76	2,15	2,45	2,57	2,09	2,31	2,4	2,05	2,24	2,31	2,02	2,15	2,2	1,99	2,1	2,13
13.00	2,2	2,56	2,74	2,11	2,42	2,55	2,04	2,28	2,38	2,01	2,21	2,28	1,98	2,15	2,17	1,95	2,06	2,1
13.50	2,16	2,53	2,72	2,08	2,39	2,53	2	2,25	2,35	1,97	2,18	2,26	1,93	2,09	2,15	1,91	2,03	2,07
14.00	2,13	2,51	2,7	2,04	2,36	2,51	1,97	2,23	2,33	1,93	2,15	2,24	1,89	2,06	2,12	1,87	2	2,05

Tomado de Pavimentos de Concreto. CEMEX Concretos. Tabla 1.10

FIGURA 47
Análisis de fatiga (Repeticiones permisibles basadas en el factor de relación de esfuerzo, con o sin apoyo lateral). CEMEX CONCRETOS

FIGURA 48.
Análisis de erosión (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión, sin apoyo lateral). CEMEX CONCRETOS

FIGURA 49.
Análisis de erosión (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión, con apoyo lateral). CEMEX CONCRETOS

ANEXO 3.-

Tamaños Típicos de Tamices

Designación de Tamices para Agregados Gruesos		Designación de Tamices para Agregados Finos	
Sistema Métrico	Designación AASHTO	Sistema Métrico	Designación AASHTO
63 mm	2 ½" (pulgadas)	2.36mm	No. 8
50mm	2" (pulgadas)	2.00mm	No. 10
37.5mm	1 ½" (pulgadas)	1.18mm	No. 16
25.0mm	1" (pulgadas)	0.60mm	No. 30
19.0mm	¾" (pulgadas)	0.42mm	No. 40
12.5mm	½" (pulgadas)	0.30mm	No. 50
9.5mm	3/8" (pulgadas)	0.15mm	No. 100
4.75mm	No. 4	0.075mm	No. 200

ANEXO 4.-

FOTOGRAFÍAS DE LA REHABILITACIÓN

	
<p>Labor de topografía para definir los espesores de corte de carpeta asfáltica deteriorada</p>	<p>Corte del espesor definido (variable de 5 a 10 cm)</p>
	
<p>Corte y carga de material fresado</p>	<p>Limpieza de superficie rayada o fresada</p>



Barrido de superficie fresada



Carga de material de fresado



Riego de Impregnación sobre la superficie fresada



Poréo sobre el riego de impregnación



Carga de concreto asfáltico a la pavimentadora (Finisher)



Temperatura de tendido del concreto asfáltico de la Base Negra (130-150°C)

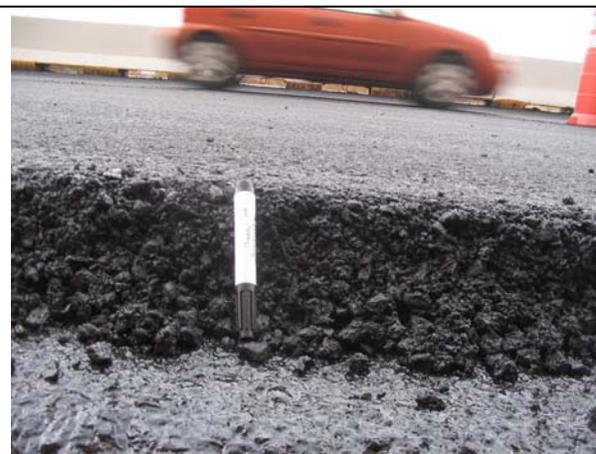


Rastrilléo del concreto asfáltico tendido de la base negra



Compactación de la base negra con la maquina de rodillos

Compactación de la base negra con la maquina de neumáticos



Concreto asfáltico de la base negra

Espesor promedio del tendido de la base negra



Prueba de Permeabilidad de la base negra



Riego de liga para la adherencia de la base negra y la microcarpeta



Tendido y rastrilleo de microcarpeta (3cm de espesor)



Rastrilléo para regular la regularidad del tendido de la microcarpeta



Compactacion de Microcarpeta



Pruebas de permeabilidad para definir la razón del riego de taponamiento para impermeabilizar la microcarpeta



Apariencia de la microcarpeta antes de colocar el riego de taponamiento

Riego de taponamiento



Rompimiento del riego de taponamiento

Apariencia de la superficie con el riego de taponamiento cuando ya rompió la emulsión



Clasificación de la textura de la capa de rodamiento con el método del círculo de arena.



Prueba del péndulo británico par medir el coeficiente de fricción de la capa asfáltica



Pavimento rehabilitado y puesto en servicio

GLOSARIO

AGREGADO: Un material granular duro de composición mineralógica como la arena, la grava, triturada, usado para ser mezclado en diferentes tamaños.

AGREGADO GRUESO: Material retenido por el tamiz de 2.36 mm (No. 8)

AGREGADO FINO: Material que pasa el tamiz de 2.36mm (No. 8)

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials, o sea Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte.

ASTM: American Society for Testing Materials, o sea Asociación Americana para el Ensayo de Materiales

BACHEO: Operación específica de conservación cuyo objeto es la eliminación de un bache.

CARRIL DE PROYECTO: Carril por el que en una calzada circula el mayor número de vehículos pesados.

COEFICIENTE DE EQUIVALENCIA: Cociente entre los espesores de dos capas de diferente naturaleza que se supone que aportan la misma capacidad estructural.

CONCESIONARIO: Persona física o moral a la que se le adjudique la concesión para la construcción, operación y explotación de la infraestructura carretera.

CUNETETA: Pequeño canal que se utiliza para drenar agua por los costados del camino.

DETERIORO: Alteración producida en la superficie de un pavimento, detectable visualmente y producida por un defecto de construcción o por la acción del tráfico, del agua o de las acciones climáticas.

ESAL: Equivalent Standard Axle Loads, o sea Cargas Equivalentes de Ejes Sencillos estándar de 8.2 toneladas

ESTADO DE LA CARRETERA: La condición en que se encuentra la carretera. La terminología recomendada consiste de:

ESTADO MUY BUENO: Una condición equivalente a la que es atribuible a una carretera inmediatamente después de su construcción original.

ESTADO BUENO: Una condición que corresponde a una carretera recién abierta al tránsito con poco desgaste que requerirá mantenimiento rutinario en el futuro próximo.

ESTADO REGULAR: Una condición equivalente a la que es atribuible a una carretera con poca deterioración pero que requiere mantenimiento rutinario en forma inmediata.

ESTADO MALO: Una condición deteriorada que requiere obras de rehabilitación para restaurar la carretera a una condición de muy buena.

ESTADO MUY MALO: Una condición pésima que requiere la reconstrucción integral de la carretera para restaurarla a una condición de muy buena.

FRESADO: Levantamiento de los materiales del pavimento en una cierta profundidad mediante una fresadora, es decir, mediante un equipo provisto de un tambor de picas.

FUNCIONALIDAD: Cualidad que debe cumplir un camino para proporcionar un buen servicio.

HOMBRO: Las áreas de la carretera, contiguas y paralelas a la carpeta o superficie de rodadura, que sirven de confinamiento a la capa de base y de zona de estacionamiento accidental de vehículos.

INFRAESTRUCTURA.- Conjunto de obras que prestan un servicio a la comunidad.

IRI: International Roughness Index, o sea el Índice Internacional de Rugosidad

INSPECCIÓN VISUAL: Reconocimiento de un pavimento llevado a cabo por un técnico experto destinado a identificar los posibles deterioros del pavimento y los elementos del entorno que puedan influir en el estado del firme.

LEVANTAMIENTO: Mediciones hechas en campo para poder determinar un plano ó croquis de los puentes.

OPERADOR: Persona física o moral contratada por el concesionario para realizar las funciones de operación y / o explotación de la infraestructura carretera concesionada

PCA: Portland Cement Association, o sea la Asociación de Cemento Portland

PERÍODO DE SERVICIO: Período de tiempo considerado para el proyecto y dimensionamiento de la rehabilitación estructural de un firme.

PESO VEHICULAR: Peso de un vehículo o combinación vehicular con accesorios, en condiciones de operación, sin carga.

POLVO MINERAL: Fracciones de agregado fino que pasan el tamiz de 0.075 mm (No. 200.)

RASANTE: Proyección del eje de la corona de una carretera sobre un eje vertical.

RECONSTRUCCIÓN: Trabajo mayor de rehabilitación de una carretera en mal estado, para restablecer sus condiciones físicas a un mejor nivel de servicio, al que fue construida anteriormente.

REHABILITACIÓN: Ejecución de las actividades constructivas necesarias para restablecer las condiciones físicas de la carretera a su situación como fue construida originalmente.

RELLENO MINERAL: Fracciones de agregado fino que pasan el tamiz de 0.60mm.

REMOLQUE: Vehículo con eje delantero y trasero no dotado de medios de propulsión y destinado a ser jalado por un vehículo automotor, o acoplado a un semirremolque.

RUGOSIDAD: La desviación vertical del perfil de un pavimento de su forma tal como fue diseñado y que resulta en incomodidades en el manejo del vehículo. Por lo general, la rugosidad se mide para fines de mantenimiento vial por medio de IRI.

SELLADO DE GRIETAS: Actuación de conservación localizada en las grietas para impedir el paso del agua a través de ellas y limitar en la medida de lo posible los movimientos de sus bordes.

SEMIRREMOLQUE: Vehículo sin eje delantero, destinado a ser acoplado a un tractocamión de manera que sea jalado y parte de su peso sea soportado por éste.

TDPA: Tránsito Diario Promedio Anual

TRAMO HOMOGÉNEO: Segmento de carretera que tiene idéntica sección estructural del firme (naturaleza y espesor de las capas), realizada en el mismo o los mismos años, y sobre el que circula un tráfico pesado de la misma categoría.

TRÁNSITO O TRÁFICO: Circulación de personas y vehículos por calles, carreteras, etc.

TRACTOCAMIÓN: Vehículo automotor destinado a soportar y jalar semirremolques y remolques.

TRACTOCAMIÓN ARTICULADO: Vehículo destinado al transporte de carga, constituido por un tractocamión y un semirremolque, acoplados por mecanismos de articulación.

TRACTOCAMIÓN DOBLEMENTE ARTICULADO: Vehículo destinado al transporte de carga, constituido por un tractocamión, un semirremolque y un remolque, acoplados por mecanismos de articulación.

VEHÍCULO PESADO: Se incluyen en esta denominación los camiones de carga útil superior a 3 t, de más de 4 ruedas y sin remolque; los camiones con uno o varios remolques; los vehículos articulados y los vehículos especiales; y los vehículos dedicados al transporte de personas con más de 9 plazas.

VIDA RESIDUAL: Período de tiempo que le queda de vida útil a un pavimento o a alguna de sus capas.

VIDA ÚTIL: Período de tiempo en el que el pavimento (o la capa del pavimento considerada) no presenta una degradación estructural generalizada.

REFERENCIAS:

REF*1.- DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES. PRIMERA PARTE. ING. MANUEL ZÁRATE AQUINO. ASOCIACIÓN MEXICANA DE ASFALTO. PP.135. MÉXICO, AGOSTO DE 2003

REF*2.- PRIMER FORO INTERAMERICANO PARA LA PROMOCIÓN Y EL DESARROLLO DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO.

REF*3.- DIAGNÓSTICO GENERAL SOBRE LA PLATAFORMA LOGÍSTICA DE TRANSPORTE DE CARGA EN MÉXICO. CARLOS MARTNER PEYRELONGUE, JOSÉ ARTURO PÉREZ SÁNCHEZ, ALFONSO HERRERA GARCÍA. PUBLICACIÓN TÉCNICA NO. 233, SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. SANFANDILA, QRO., 2003

REF* 4: DISEÑO DE PAVIMENTOS. CAPÍTULO 4. ALEJANDRO PADILLA RODRÍGUEZ.

REF*5: ESTADO DE RESULTADOS 2006. SUBDIRECCIÓN DE INVERSIÓN EN AUTOPISTAS. PROMOTORA INBURSA S. A. DE C. V. (SE AGRADECE LA DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN A LA ADMINISTRACIÓN DE LA AUTOPISTA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTE DOCUMENTO)

REF* 6: CEMEX REVISTA OCTUBRE 2005

REF* 7: GENERALIDADES DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO. NOTAS TÉCNICAS PARA CONSTRUCCIÓN. BOLETÍN N° 18 - MAYO DE 2002. INFORMACIÓN RECOPIADA Y ADAPTADA POR EL INGENIERO ROBERTH ALEJANDRO QUINTERO RODRÍGUEZ, COORDINADOR DEL SERVICIO TÉCNICO DE DICENTE LTDA. Y CEMENTOS DEL VALLE S.A.

REF*8: “LA REESTRUCTURACIÓN DE LA RED AEROPORTUARIA NACIONAL”, PREPARADA POR EL M. EN I. ÓSCAR A RICO GALEANA, DE LA COORDINACIÓN OPERATIVA.

REF*9: “REVISTA IC. INGENIERÍA CIVIL. CICM. NUM. 404 / AÑO LIII/DICIEMBRE 2002. ARTICULO: FERROCARRIL. PERSPECTIVA AL AÑO 2025.

REF*10: MODULUS FOR AASHTO GUIDE FLEXIBLE PAVEMENT DESIGN. ([HTTP://WWW.GEOCITIES.COM/TECHNICS/SOILSRR3.HTM](http://www.geocities.com/technics/soilsrr3.htm))

REF *11: [HTTP://WWW.ANTP.ORG.MX/REV/NOVABRIL03/SAT.HTML](http://www.antp.org.mx/rev/novabril03/sat.html)

REF*12: [HTTP://WWW.EDOMEXICO.GOB.MX/NEWWEB/ARCHIVO%20GENERAL /CONTEXTO/REPORTAJE/COMUNICACIONES.HTM](http://www.edomexico.gob.mx/newweb/archivo%20general/contexto/reportaje/comunicaciones.htm)

REF*13: [HTTP://WWW.GEOCITIES.COM/TECHNICS/SOILSRR3.HTM](http://www.geocities.com/technics/soilsrr3.htm)

REF*14: [HTTP://WWW.CDDHCU.GOB.MX/BIBLIOT/PUBLICA/INVEYANA /ECONYCOM/AEREO.HTM#2](http://www.cddhcu.gob.mx/bibliot/publica/inveyana/econycom/aereo.htm#2)

REF*15: MANUAL DE CALIDAD. COMPILACION DE INVESTIGACIONES SOBRE MANTENIMIENTO VIAL. ING. CARLOS ESQUIVEL TORRES.

REF*16: DEFECTOS EN EL CONCRETO JULIO 2005 14. EDITADO POR EL INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO

REF*17: CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA CIVIL. IQUITOS. OCTUBRE 2003. "INFORME SOBRE LA NUEVA GUIA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y RÍGIDOS DEL 2002, QUE CORRESPONDE AL PROYECTO I-37 A DE LA NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (NCHRP).

REF*18: CONCRETO. DISEÑO PLÁSTICO. TEORÍA ELÁSTICA. SEGUNDA EDICIÓN. CORREGIDA Y AUMENTADA. EDITORIAL PATRIA. ING. MARCO AURELIO TORRES H. MÉXICO D. F: 1968

REF*19: M5.2. CATÁLOGO DE DETERIOROS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS. COLECCIÓN DE DOCUMENTOS. VOLUMEN N° 12. 2002. CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA

REF*20: AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRCUTURES. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. 1986

REF*21: INFORME DE LABORATORIO CONCRETO, MADERA Y BLOQUES

REF*22. MECÁNICA DE SUELOS. TOMO II. JUÁREZ BADILLO EULALIO; RICO RODRÍGUEZ ALFONSO. 3ª. EDICIÓN. 1992.

REF*23: CAPÍTULO 3. MEZCLAS ASFÁLTICAS. ALEJANDRO PADILLA RODRÍGUEZ. 40. (PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES ART. 542 Y 543 PG-3.)

REF*24: ESTUDIO DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO DE LA AUTOPISTA CHAMAPA – LA VENTA. GEOSOL S. A. DE C. V. 2005.

REF*25: EMULSIONES ASFÁLTICAS. 4^a. EDICIÓN. EDITORIAL ALFAOMEGA. MÉXICO D. F. 1998. GUSTAVO RIVERA E.

REF*26: **ASPHALT SURFACE, THE ASPHALT INSTITUTE MANUAL MS-13.**

REF*27: CUADERNOS DIDÁCTICOS AÑO 1 NÚMERO 2 CATEDRA DEL CEMENTO CEMEX. 2004. REVISTA EL MUNDO DEL CEMENTO

REF*29: PRINCIPLES OF PAVEMENT DESIGN, SECOND EDITION, JOHN WILEY & SONS. INC. E. J. YODER AND M. W. WITCZAK

REF*30: MANUAL DE CALIDAD DE LOS MATERIALES EN SECCIONES ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS CARRETEROS. DOCUMENTO TECNICO NO. 1. SAFANDILA, QRO. 1990. SCT. IMT. ALFONSO RICO RODRÍGUEZ. JUAN MANUEL OROZCO Y OROZCO. RODOLFO TELLEZ GUTIERREZ. ALFREDO PEREZ GARCIA.

REF*32: RELACIÓN ENTRE RUIDO Y TEXTURA EN PAVIMENTOS CON DESGASTE EN CURSO. INSTITUTO NACIONAL SUECO DE INVESTIGACIONES DE TRANSPORTE Y CARRETERA: JERZY EJSMONT. LIBRO: LLANTA / CAMINO – RUIDO

REF*33: ARTÍCULO CARACTERISTICAS SUPERFICIALES DE LOS PAVIMENTOS ASFALTICOS. M. ZARATE A. GEOSOL, S.A. de C. V.

REF*34: INFLUENCIA DE LA SUCCIÓN EN LOS CAMBIOS VOLUMÉTRICOS DE UN SUELO COMPACTADO. PUBLICACIÓN TÉCNICA NO. 239. SANFANDILA, QRO, 2004.

REF*35: ESTUDIO Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA MEZCLA STONE MASTIC ASPHALT (SMA) MEDIANTE UN TRAMO DE PRUEBA. ROSA ZÚÑIGA CALDERÓN. ING. EJEC. QUÍMICO. JEFE SUBUNIDAD QUÍMICA Y ASFALTO. LABORATORIO NACIONAL DE VIALIDAD. (CHILE). MARCELO ÁVILA MOENNE CONSTRUCTOR CIVIL (MEMORISTA) UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO.

REF*37: EL INDICE DE FRICCIÓN INTERNACIONAL. FRANCISCO ACHÚTEGUI V., RAMÓN CRESPO R. REVISTA RUTA (IFI). MADRID, ESPAÑA, MARZO-ABRIL 1996.

REF*38: CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE FRICCIÓN INTERNACIONAL EN CARRETERAS DE MÉXICO. SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. DIANA BERENICE LÓPEZ VALDÉS. PAUL GARNICA ANGUAS. PUBLICACIÓN TÉCNICA NO.170. SANFANDILA, QRO. 2002

REF*39: INFORME IPRF-01-G-002-1 MEJORES PRÁCTICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO CON CEMENTO PÓRTLAND (PAVIMENTO RÍGIDO PARA AEROPUERTOS). INVESTIGADORES PRINCIPALES. DR. STARR D. KOHN, P.E., SOIL AND MATERIALS ENGINEERS, INC., DR. SHIRAZ TAYABJI, P.E., CONSTRUCTION TECHNOLOGY LABORATORIES, INC. OFICINA DE GESTIÓN DE PROGRAMAS 1010 MASSACHUSETTS AVENUE, N.W. SUITE 200 WASHINGTON, DC 20001 ABRIL DE 2003

REF*40: ARTÍCULO SOBRE DEFECTOS EN EL CONCRETO. CAPITULO 14. CONCEPTOS BÁSICOS DEL CONCRETO. IMCYC. (INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO). JULIO 2005.

REF*41: CAPITULO 5. MANTENIMIENTO VIAL. ESTUDIO INTEGRAL DE VIALIDAD Y TRANSPORTE URBANO DE LA ZONA CONURBADA DE TAMPICO, MADERO Y ALTAMIRA, TAMPS. 2ª ETAPA. SEDESOL

REF*42: EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DE RESISTENCIA EN CONCRETOS ASFÁLTICOS POR CONTACTOS DE SUSTANCIAS AGRESIVAS. PAUL GARNICA ANGUAS, ALFONSO ALVAREZ MANILL ACEVES, FRANCISCO JAVIER BÁEZ ANDRADE. PUBLICACIÓN TÉCNICA NO. 171. SANFANDILA, QRO, 2001

REF*43: ASOCIACIÓN MEXICANA DEL ASFALTO A.C. SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. CURSOS TÉCNICOS REGIONALES DE ACTUALIZACIÓN SOBRE “TRATAMIENTOS ASFÁLTICOS PARA PAVIMENTACIÓN” MORTEROS ASFÁLTICOS Y MICROCAPETAS EN FRÍO. ING IGNACIO CREMADES I. SURFAX S.A.

REF*44: RESUMEN DEL DOCUMENTO: ALGUNOS ASPECTOS DE LAS MEDICIONES DE FRICCIÓN EN CARRETERAS MEXICANAS. PAUL GARNICA ANGUAS, RICARDO SOLORIO MURILLO. INVESTIGADORES, INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE.