



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ACATLÁN

MEJORAMIENTO DE PAVIMENTOS
FLEXIBLES EN CARRETERAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ VERA

ASESOR: ING. MANUEL ZÁRATE AQUINO

ACATLÁN ESTADO DE MÉXICO, MAYO 2005



m. 345082



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



NO SE ENCUENTRA EN
LA BIBLIOTECA CENTRAL





DEDICATORIAS ...

“La batalla de la vida no siempre la gana el hombre más fuerte, o el más ligero, porque tarde o temprano, el hombre que gana, es aquel que cree poder hacerlo”



A DIOS:

En la vida hay una etapa muy importante en la que la mentalidad del ser humano es decisiva para afrontar el destino propio. GRACIAS por guiarme por el camino correcto... GRACIAS A DIOS.



A MI PAPA

La persona que no busca un bien propio sino más bien la plenitud, la superación y el esfuerzo que dedica a sus hijos contra cualquier adversidad, siempre está con ellos, GRACIAS por estar siempre conmigo, de todo corazón siempre te lo voy a agradecer y además siempre estaremos juntos, que tu esfuerzo se vea recompensado y reflejado en éste trabajo... GRACIAS PAPÀ.



A MI MAMÀ:

La calidad humana está basada en el talento, la delicadeza y la ternura de la Mujer, en el momento de dedicar el tiempo a sus hijos, valoramos su tiempo, su esfuerzo y lo más importante el amor y el empeño que me brindaste para realizarme profesionalmente... GRACIAS MAMÀ.



A MIS HERMANOS:

El apoyo mutuo de todos nos hace cada vez más fuertes sentimental y moralmente, en las buenas y en las malas estamos juntos... GRACIAS por estar conmigo.



A MI FAMILIA:

La base para plantearme una meta real y alcanzable solo depende de mi familia, de su responsabilidad, de su educación y preocupación por sus hijos, el bienestar y la superación propia de cada uno, el mejor regalo que me pudieron haber brindado es su apoyo incondicional...GRACIAS A TODOS.



A MI ASESOR:

Hoy en día la virtud del ser humano no solo implica el desarrollo de tus facultades intelectuales, sino que además, algo que solo una persona como usted lo hace notar, su motivación y preocupación por impulsarme al término de éste trabajo, de igual manera, GRACIAS por enseñarme y llevarme al camino correcto de la superación profesional...GRACIAS Ing. Manuel Zárate Aquino



A LA UNAM:

La máxima casa de estudios que brinda las puertas abiertas a las personas que por sí solas y por tener siempre en la mente de que el conocimiento siempre es la herramienta para sobresalir en la vida, GRACIAS por brindarme un espacio y un profesor para la realización de éste esfuerzo...GRACIAS.



A LA F.E.S. ACATLAN:

El tener siempre como respaldo para un propósito y una meta solo se logra instruyéndote gracias a la Facultad, no obstante, GRACIAS a la FES ACATLAN por tomar lo bueno durante 5 años de estancia en la que uno abre la puerta del conocimiento para abordar al desarrollo profesional...GRACIAS.



A MIS COMPAÑEROS DE TRABAJO:

El preguntar sobre las inquietudes de la persona propia hace de ellas la valoración moral, GRACIAS a ustedes, Sr. Efrén Hernández por apoyarme en la conclusión de éste trabajo, Sr. Zenón **Resendis** por orientarme sobre mi desarrollo profesional, Sra. Tere y a todos en general por impulsarme para la conclusión de éste trabajo...GRACIAS.



A MIS AMIGOS:

Para la obtención por lograr una meta es sobresaliente el apoyo de un AMIGO que no solo te brinda su amistad sino su comprensión, el preocuparse por ti, el saber en que te puede ayudar y lo más importante que está siempre contigo, GRACIAS a Pedro Sánchez, por brindarme su apoyo incondicional, a todos mis compañeros de clase...GRACIAS.



A TODA LA GENTE QUE DE ALGUNA MANERA ME IMPULSO A LA CONCLUSIÓN DE ÉSTE TRABAJO

GRACIAS a todos ustedes que de manera directa o indirectamente me apoyaron para la conclusión de éste trabajo...GRACIAS.

MEJORAMIENTO

DE

PAVIMENTOS FLEXIBLES

EN CARRETERAS

CONTENIDO

“MEJORAMIENTO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES EN CARRETERAS”

CONTENIDO

	Página
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES SOBRE PAVIMENTOS FLEXIBLES	01
1.1 Introducción	01
1.1.1 Importancia de la conservación	02
1.2 Pavimento	02
1.2.1 Tipología	02
1.3 Propiedades de la carpeta asfáltica	04
1.4 Características físico-químicas de los asfaltos	07
1.4.1 Adherencia	11
1.4.2 Viscosidad	12
1.4.3 Cohesión	13
1.5 Comportamiento del asfalto	14
1.5.1 Susceptibilidad térmica	14
1.5.2 Envejecimiento atmosférico	15
1.5.3 Reología	17
1.6 Tipología del asfalto	18
1.6.1 Cemento asfáltico	18
1.6.2 Emulsión asfáltica	20
1.6.3 Asfaltos rebajados	24
1.7 Aditivos utilizados para mezcla asfáltica	26
1.7.1 Polímeros	27
1.7.2 Hule molido	31
1.8 Pruebas de laboratorio	34
1.8.1 En cementos asfálticos	34
1.8.1.1 Peso específico	34
1.8.1.2 Punto de inflamación	34
1.8.1.3 Penetración a 25°C	35
1.8.1.4 Ductilidad	37
1.8.1.5 Viscosidad dinámica	38
1.8.1.6 Viscosidad cinemática	43
1.8.1.7 Viscosidad Saybolt - Furol	46
1.8.1.8 Pérdida por calentamiento	46
1.8.1.9 Tecnología SHRP	47

1.8.2	Emulsiones asfálticas	49
1.8.2.1	Carga eléctrica de la partícula	49
1.8.2.2	Potencial de hidrógeno (PH)	50
1.8.2.3	Demusibilidad	51
1.8.2.4	Miscibilidad con cemento Pórtland	51
1.8.2.5	Cubrimiento del agregado pétreo en húmedo	52
1.8.2.6	Residuo por destilación	53
1.8.2.7	Asentamiento (sedimentación) en 5 días	55
1.9	Materiales pétreos	56
1.9.1	Características de los suelos	56
1.9.2	Módulos de elasticidad	56
1.9.3	Calidad de los materiales pétreos para carpetas	58
1.9.4	Materiales para base	62
1.9.5	Materiales para sub - base	63
1.9.6	Materiales para capa subrasante	64
1.10	Tipología de carpetas asfálticas	66
1.10.1	Riegos	66
1.10.2	Lechadas	67
1.10.3	Morteros	68
1.10.4	Carpetas en frío	69
1.10.5	Carpetas en caliente	72
CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE		76
2.1	Introducción	76
2.2	Deterioros	76
2.2.1	Tipos y causas de deterioros	77
2.2.2	Falla funcional	78
2.2.3	Falla estructural	78
2.2.4	Fallas en la carpeta	79
2.2.5	Falla en la base	80
2.2.6	Falla en la sub-base	81
2.2.7	Falla en la capa subrasante	81
2.3	Evaluación de las condiciones estructurales del pavimento	81
2.4	Análisis de las distintas capas del pavimento	82
2.4.1	Diagnóstico	84
2.4.2	Repercusiones funcionales y estructurales	101
2.4.3	Repercusiones económicas	101
2.4.4	Pruebas no destructivas	104
2.4.5	Pruebas destructivas	105

2.5	Evaluación de las características superficiales del pavimento flexible	107
2.5.1	Rugosidad	107
2.5.2	Fricción	111
2.5.3	Ruido	114
2.5.4	Drenabilidad	118
2.5.5	Luminosidad	121
2.5.6	Deformabilidad	123
2.5.7	Uniformidad	127
CAPÍTULO 3. CONSERVACIÓN Y MEJORAMIENTO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE		128
3.1	Introducción	128
3.2	Conservación rutinaria, preventiva y correctiva	128
3.3	Tratamiento superficial	129
3.3.1	Carpetas de riegos sin agregados	131
3.3.1.1	Riegos de impregnación	131
3.3.1.2	Riegos de liga	132
3.3.2	Riegos con agregados	133
3.3.2.1	Riego simple	133
3.3.2.2	Riego doble	135
3.3.2.3	Riego triple	135
3.3.3	Mezclas drenantes	136
3.4	Bacheo	138
3.5	Renivelación de la carpeta	145
3.6	Refuerzo mediante sobrecarpetas	145
3.7	Reconstrucción de carpetas	150
3.8	Tratamiento mediante capas gruesas con carpetas asfálticas de granulometría densa	153
3.9	Recuperación y reciclado	162
3.10	Sobrecarpeta de concreto hidráulico (White Topping)	166
3.11	Estabilización ó mejoramiento del material granular	170
3.11.1	Estabilización física	170
3.11.1.1	Mezclas de suelos	170
3.11.2	Estabilización química	176
3.11.2.1	Cal	176
3.11.2.2	Cemento Pórtland	177
3.11.2.3	Productos asfálticos	177
3.11.2.4	Cloruro de sodio	179
3.11.3	Estabilización mecánica	180
3.11.3.1	Compactación	180
3.11.3.1.1	Compactación de suelos	180
3.11.3.1.2	Compactación de la carpeta asfáltica	189

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE	198
4.1 Introducción	198
4.2 Costos	198
4.2.1 Costo inicial	198
4.2.2 Costo de conservación	199
4.2.3 Costo de operación	200
4.2.4 Costo de rescate	201
4.3 Elaboración del proyecto	201
4.3.1 Planos	204
4.3.2 Especificaciones	205
4.3.3 Proyección del tránsito	205
4.3.4 Bancos de materiales	211
4.3.5 Señalamiento horizontal y vertical	220
4.3.6 Derecho de vía	222
4.3.7 Control de calidad	227
4.3.8 Estrategias de mantenimiento	228
4.4 Evaluación de proyectos	229
4.4.1 Evaluación técnica del proyecto	230
4.4.2 Evaluación financiera del proyecto	231
4.4.3 Evaluación económica del proyecto	232
4.5 Técnicas de evaluación económica	233
4.6 Criterios de selección de técnicas	238
4.7 Sistemas de administración de pavimentos	242
4.7.1 Sistema "Pavement Evaluator"	246
4.7.2 Sistema "CAPUFE"	247
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	251
Anexos	262

INTRODUCTION

INTRODUCCIÓN GENERAL

La ciudad de México cuenta con una superficie carretera aproximadamente de 720 km², donde se realizan 29.5 millones de viajes de personas por día, de los cuales el 16.3% se efectúa a través del transporte concesionado (esto equivale a un 10.5 y 14.2 millones de viajes de personas por día, respectivamente). Estos índices significan un tránsito intenso sobre la red vial y como consecuencia un desgaste acelerado de los pavimentos flexibles. Para conservar ésta red vial de manera funcional a lo largo del tiempo, se realizan una serie de procesos como el bacheo, aplicación de morteros asfálticos, colocación de sobre carpetas asfálticas, losas delgadas de concreto: “Whitetooping”, etc. Se estima que para la conservación de la red carretera, se destina aproximadamente el 2.5% de su valor, cifra que se considera insuficiente al compararla con la que otros países destinan para el mismo objetivo.

El desarrollo de la red carretera ha cobrado renovado ímpetu desde aproximadamente 1985. Las Juntas Locales de Caminos de los gobiernos de los estados han aplicado o reforzado diversos sistemas de cooperación con la población local de modo que se extendieron los caminos vecinales. El estado actual y futuro de la tecnología de los pavimentos asfálticos se enfrenta a grandes retos debido a que se están presentando nuevas condiciones y necesidades, derivadas de las características impuestas por los escenarios sociales, económicos y tecnológicos en que se desarrolla la vida moderna y, por lo tanto, la necesidad primordial para:

- 1) *Conservar y rehabilitar* de manera eficiente la red carretera.
- 2) *Incrementar* la longitud de dicha red, así como el número de carriles.
- 3) *Modernizar* el ámbito global del sistema de transporte carretero.

Es de suma importancia saber que el 55% de la red carretera presenta una antigüedad mayor de 20 años. Como es lógico suponer que se construyeron en primer lugar los caminos de mayor importancia para el país, y que hoy en día continúan siendo las más importantes; la situación actual de la red carretera es por tanto:

• Carreteras de cuota	6,000 km
• Carreteras federales	45,000 km
• Carreteras estatales	65,000 km
• Carreteras rurales y brechas	<u>234,000 km</u>
TOTAL=	350,000 km

La estructura de los pavimentos de la red se ha desarrollado en torno a la tecnología de los pavimentos flexibles, principalmente, como en muchos otros países, con carpetas de concreto asfáltico con espesores en el orden de los 10 cm. Las capas de base y subbase están constituidas por materiales granulares, en ocasiones sometidos a trituración total y suelos finos, estabilizados mecánicamente por compactación. Recientemente se hacen esfuerzos por introducir materiales estabilizados con cemento Pórtland, siendo un poco más frecuente el empleo de bases asfálticas en el caso de carreteras muy importantes.

Hay dos razones principales del porqué el pavimento asfáltico había sido la solución única seguida por el país en su red carretera: la primera, que México, con abundante petróleo era y es un importante productor de asfalto y el modelo económico nacional era proclive a proporcionar ese asfalto a precios subsidiados, de manera que los pavimentos asfálticos resultaban de 2 a 2.5 veces más baratos en su inversión inicial que los de concreto hidráulico, perfectamente compatible con los requerimientos. Fue así que en los nuevos proyectos, se empezó a estudiar el

costo completo del ciclo de vida de los pavimentos que contempla costos de construcción, conservación rutinaria, reconstrucción periódica y además, los costos de operación y del transporte para llevar a cabo esos trabajos.

La infraestructura vial, constituye la base sobre la cual se apoyan tanto la actividad económica como la social del país y que de ella dependen y se benefician numerosas actividades y servicios, como la educación, la salud, la producción de todo tipo de bienes y el comercio, principalmente.

La importancia que ha tenido el mantenimiento de las carreteras construidas con pavimentos flexibles, se debe principalmente a los cambios que han sufrido los vehículos de motor en sus dimensiones, peso y velocidad de operación; al volumen de tránsito, a la disponibilidad y fabricación de mejores materiales de construcción y su utilización racional; al mejor conocimiento de los elementos que forman el camino y a la función que desempeñan dentro de un todo y a la facilidad para su estudio tanto en el laboratorio, como en su análisis con el empleo de computadoras electrónicas; a la aparición de nuevos métodos de análisis y diseño, así como al desarrollo acelerado de quipos, procedimientos y materiales para la construcción cada vez más eficientes.

Desde el momento en que una carretera es abierta a la circulación se ve sometida a una serie de factores que modifican y deterioran sus características iniciales. Éste deterioro comienza con la aplicación de las cargas del tránsito, que si bien se ha diseñado para soportarlas, constituyen el primer paso del desgaste de un camino. Los agentes climáticos, los cuales se encuentran presentes durante las 24 horas del día, independientemente de que exista tránsito o no, hacen que su eficiencia para repartir las cargas, su resistencia y los parámetros estructurales, se vean disminuidos, dando origen a los agrietamientos y baches, generalmente.

El mantenimiento es imprescindible para evitar la pérdida de la inversión realizada. Por otra parte, en el caso de las carreteras, las cantidades invertidas en conservación son recuperadas y multiplicadas a través de la disminución de los costos de transporte. Además, una adecuada conservación facilita la circulación de vehículos y mejora la seguridad de los usuarios. Al proyectar un pavimento, debe elegirse la sección que presente una combinación óptima de técnicas y costos. Debe empezarse por estudiar las condiciones en que se encuentra el pavimento, efectuar un diagnóstico de su comportamiento futuro y generar varias soluciones comparables, teniendo en cuenta todos los materiales disponibles, realizando a continuación un análisis económico para determinar cuál es la solución más satisfactoria.

El mejoramiento es un factor muy importante para cualquier obra civil y consiste en todas aquellas acciones que tienen como finalidad el conservar las características físicas y de servicio de las obras. En el caso de los pavimentos, el mantenimiento es significativamente importante, dadas las características de diseño y de servicio para las que son diseñados. Es una actividad esencial para poder cumplir con la vida útil para la cual son diseñados y se pueda mantener el nivel de servicio proyectado, ya que la parte que más sufre deterioros es la superficie de rodamiento por ser el elemento que se encuentra expuesto y mayormente afectado por todos los factores antes mencionados.

En el primer capítulo se presenta una reseña general de los pavimentos flexibles, como pruebas de laboratorio efectuadas tanto a los cementos asfálticos como a las emulsiones asfálticas, el comportamiento físico-químico de los asfaltos, la clasificación de los tipos de pavimentos, así como de sus características. Se plantean algunos criterios para la selección de materiales para la conformación de la capa subrasante y construcción de la sub-base, base y carpeta asfáltica.

Para el segundo capítulo se describen las causas de deterioro, como por ejemplo las cargas impuestas por el tránsito, las condiciones climatológicas y las características de los materiales, las fallas en las distintas capas del pavimento asfáltico. Se atiende la parte de la valoración de las cualidades existentes tratando la evaluación de los pavimentos flexibles, en el aspecto de funcionalidad y su situación estructural, considerando la evaluación destructiva y la no destructiva del pavimento, así como de su evaluación superficial para el diagnóstico y estudio de los pavimentos.

En el capítulo tercero se mencionan las consideraciones y las técnicas de conservación y el mantenimiento de las carreteras, la rehabilitación superficial y estructural del pavimento y los tratamientos que se siguen para su mantenimiento, estabilización de los materiales pétreos para su mejor empleo en las capas del pavimento.

Considerando la importancia de los pavimentos flexibles, no solo por su funcionalidad, sino por el monto de la inversión inicial requerida, y sobre todo, por el correspondiente costo de conservación, se integra en el capítulo cuarto la aplicación de técnicas racionales en la planeación y diseño de diversas obras, así como el empleo de políticas adecuadas de financiamiento y administración de los recursos económicos. El establecimiento de tales políticas de financiamiento y administración, está íntimamente relacionado con el tipo de pavimento, y que estos aspectos constituyen uno de los factores determinantes en los requerimientos de su conservación y rehabilitación.

El mantenimiento de la red carretera requiere de una planeación adecuada. Actualmente se cuenta con herramientas que permiten llevar acabo ésta etapa, las que se denominan de gestión o administración de pavimentos. El sistema de gestión o administración de pavimentos es un proceso de obtención de la información necesaria para la selección de alternativas de planeación, organización y presupuestación en la conservación, para nuestro caso, de los pavimentos flexibles.

Finalmente en el capítulo quinto englobamos las conclusiones y recomendaciones generales de lo anteriormente expuesto.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES SOBRE PAVIMENTOS FLEXIBLES

OBJETIVO PARTICULAR:

Se debe tener el pleno conocimiento de las características estructurales del pavimento, las propiedades de los asfaltos para mejorar su comportamiento, la adecuada selección de los materiales pétreos para las capas de base, sub-base y capa subrasante.

- 1.1 INTRODUCCIÓN
 - 1.1.1 *IMPORTANCIA DE LA CONSERVACIÓN*
- 1.2 PAVIMENTO
 - 1.2.1 *TIPOLOGÍA*
- 1.3 PROPIEDADES DE LA CARPETA ASFÁLTICA
- 1.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS ASFALTOS
 - 1.4.1 *ADHERENCIA*
 - 1.4.2 *VISCOSIDAD*
 - 1.4.3 *COHESIÓN*
- 1.5 COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO
 - 1.5.1 *SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA*
 - 1.5.2 *ENVEJECIMIENTO ATMOSFÉRICO*
 - 1.5.3 *REOLOGÍA*
- 1.6 TIPOLOGÍA DEL ASFALTO
 - 1.6.1 *CEMENTO ASFÁLTICO*
 - 1.6.2 *EMULSIÓN ASFÁLTICA*
 - 1.6.3 *ASFALTOS REBAJADOS*
- 1.7 ADITIVOS UTILIZADOS PARA MEZCLA ASFÁLTICA
 - 1.7.1 *POLÍMEROS*
 - 1.7.2 *HULE MOLIDO*
- 1.8 PRUEBAS DE LABORATORIO
 - 1.8.1 *EN CEMENTOS ASFÁLTICOS*
 - 1.8.1.1 *PESO ESPECÍFICO*
 - 1.8.1.2 *PUNTO DE INFLAMACIÓN*
 - 1.8.1.3 *PENETRACIÓN A 25 °C*
 - 1.8.1.4 *DUCTILIDAD*
 - 1.8.1.5 *VISCOSIDAD DINÁMICA*
 - 1.8.1.6 *VISCOSIDAD CINEMÁTICA*
 - 1.8.1.7 *VISCOSIDAD SAYBOLT - FUROL*
 - 1.8.1.8 *PÉRDIDA POR CALENTAMIENTO*
 - 1.8.1.9 *TECNOLOGÍA SHRP*
 - 1.8.2 *EMULSIONES ASFÁLTICAS*
 - 1.8.2.1 *CARGA ELÉCTRICA DE LA PARTÍCULA*
 - 1.8.2.2 *POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)*
 - 1.8.2.3 *DEMUSIBILIDAD*
 - 1.8.2.4 *MISCIBILIDAD CON CEMENTO PORTLAND*
 - 1.8.2.5 *CUBRIMIENTO DEL AGREGADO PÉTREO EN HÚMEDO*
 - 1.8.2.6 *RESIDUO POR DESTILACIÓN*
 - 1.8.2.7 *ASENTAMIENTO (sedimentación) EN 5 DÍAS*
- 1.9 MATERIALES PÉTREOS
 - 1.9.1 *CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS*
 - 1.9.2 *MÓDULOS DE ELASTICIDAD*
 - 1.9.3 *CALIDAD DE LOS MATERIALES PÉTREOS PARA CARPETAS*
 - 1.9.4 *MATERIALES PARA BASE*
 - 1.9.5 *MATERIALES PARA SUB - BASE*
 - 1.9.6 *MATERIALES PARA CAPA SUBRASANTE*
- 1.10 TIPOLOGÍA DE CARPETAS ASFÁLTICAS
 - 1.10.1 *RIEGOS*
 - 1.10.2 *LECHADAS*
 - 1.10.3 *MORTEROS*
 - 1.10.4 *CARPETAS EN FRÍO*
 - 1.10.5 *CARPETAS EN CALIENTE*

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES SOBRE PAVIMENTOS FLEXIBLES.*1.1 INTRODUCCIÓN*

La magnitud de la vida de servicio de un pavimento asfáltico, puede preverse antes de tomar en cuenta el mantenimiento, ya sea en mayor o menor grado. Además existen muchos factores que deben ser considerados en el proyecto de un pavimento con el fin de definir el tipo de mantenimiento requerido, entre los que se encuentran:

- El apego a las especificaciones de diseño originalmente establecidas para la construcción del pavimento en sí.
- La elaboración de la mezcla de diseño.
- La operación de la planta en caliente.
- La compactación.
- Las condiciones climatológicas durante la construcción.
- La sanidad, calidad y homogeneidad de los bancos de agregados.

La rehabilitación de un pavimento resulta muy costosa, razón por la que, la evaluación de un pavimento debe proporcionar un conocimiento completo y actualizado del estado que guardan la estructura y la superficie de rodamiento, a fin de poder aplicar las medidas necesarias para prolongar su vida útil y fijar prioridades de obra.

Los estudios de evaluación no sólo son aplicables a tramos carreteros con pavimentos en mal estado; evaluaciones periódicas en tramos en condiciones aceptables, permitirán determinar cuando resulta conveniente realizar trabajos de conservación rutinarios en previsión de daños mayores, lográndose con esto una mejor aplicación de los recursos disponibles.

El mantenimiento de una carretera consiste en una serie de operaciones que tienen por objeto mantener en buen estado el sistema estructural que compone dicho camino, en beneficio del usuario, para que al transitarlo se sienta cómodo y seguro, sin riesgos que sean inherentes al camino, así como para evitar que sea destruido y deteriorado por el constante tránsito de vehículos y por los agentes del intemperismo.

La reconstrucción tiene por objeto, en la mayoría de los casos, modificando en ocasiones, las condiciones geométricas o estructurales, reparar la carretera que ha sido usada después de varios años de construida, en los que se han registrado incrementos en cuanto al número de vehículos y cargas de los mismos. Por los deterioros que sufre el camino debido a éstas causas, los trabajos de conservación normal resultan insuficientes para mantenerlo en buenas condiciones y los desperfectos aumentan considerablemente, es entonces cuando hay que decidirse por su reconstrucción en aquellos tramos que lo ameriten.

Es importante hacer notar que algunas veces los daños que sufre el pavimento no se deben a que haya sido mal construido, sino que por el uso a que ha estado expuesto por un tiempo más o menos largo, el cual fue previsto durante la etapa de diseño, pero que por el aumento de las cargas de tránsito y los fenómenos climatológicos, las especificaciones con las que fue diseñado y construido resulten insuficientes e inadecuadas para la función a la que fue prevista.

Ha habido adelantos tecnológicos bastante importantes en cuanto a Ingeniería se refiere, y esto ha traído como consecuencia que países como el nuestro vayan definiendo su futuro de manera prometedora.

1.1.1 *IMPORTANCIA DE LA CONSERVACIÓN*

La conservación en las carreteras viene siendo la mejor inversión posible, ya que una conservación adecuada no sólo garantiza la inversión inicial de construcción, sino que disminuye el costo de explotación y alarga la vida tanto del camino como de los vehículos que lo usan.

El programa de conservación es generalmente rutinario y debe tender a ejecutarse en forma de ciclos, estudiando para formularlos los intervalos de periodicidad adecuados a la intensidad del tránsito para algunas obras, como sellado de grietas, bacheos, etc.

Las reconstrucciones y modernizaciones son motivo de constantes estudios para definir las soluciones más apropiadas, seleccionando los tramos que deben tener preferencia en su reconstrucción por su importancia y para evitar molestias al tránsito.

La *Dirección General de Conservación*, dependiente de la SCT, asume las labores de conservación y su finalidad será la de mantener la carretera en buenas condiciones de transitabilidad y seguridad para el usuario, realizando una serie de operaciones en las partes que componen la carretera, tales como: superficie de rodamiento, base, sub-base, capa subrasante, obras de drenaje, acotamientos, etc., teniendo que realizar las mejoras que se consideren necesarias en un tiempo estipulado.

1.2 *PAVIMENTO*

Es importante mencionar que los pavimentos de carreteras están constituidos por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales y de espesor variable según el tránsito, formadas por diferentes calidades de materiales adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas, se apoyan en la *capa subrasante* o el terreno natural, según sea el caso, obtenida por el movimiento de tierras y que han de soportar las cargas de tránsito durante un período largo, de varios años (estipulado en proyecto), sin deterioros que afecten la seguridad y la comodidad de los usuarios o a la propia integridad estructural del pavimento.

De tal forma, puede definirse como *Pavimento* a la parte de la carretera o vía formada por un conjunto de capas de materiales seleccionados comprendidas entre el nivel superior de las terracerías y la superficie de rodamiento que tienen la función de recibir en forma directa las cargas del tránsito y distribuir las a las capas inferiores y además, proporcionar a la superficie de rodamiento cualidades como una operación rápida, cómoda y segura. En otras palabras, el pavimento es la superestructura de la obra vial, que hace posible el tránsito expedito de los vehículos con la comodidad, seguridad y economía previstos en el proyecto y durante todo el período de diseño.

1.2.1 *TIPOLOGÍA*

El pavimento rígido se compone de losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial relativamente más elevado que el *pavimento flexible*, su período de vida varía entre 20 y 40 años; el mantenimiento que requiere es mínimo y sólo se efectúa (comúnmente) en las juntas de las losas como sellado; con la estructuración siguiente. (ver Fig. 1.1).

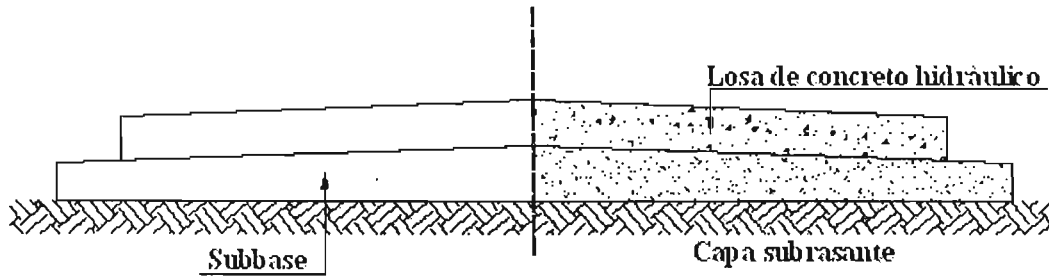


FIGURA 1.1 Conformación típica de un pavimento de concreto hidráulico.

El *pavimento flexible* está formado por una serie de capas, constituidas por materiales con resistencia decreciente con la profundidad, de modo análogo a la disminución de la presión transmitida desde la superficie. La *carpeta asfáltica* es la parte superior del pavimento, soporta directamente las solicitaciones del tránsito y aporta las características funcionales de la carretera. Está compuesto principalmente de una *carpeta asfáltica*, de la *base*, de la *sub-base*, apoyadas y construidas sobre la *capa subrasante* y del cuerpo del terraplén, como se muestra en la Fig. 1.2. Generalmente se diseña para un período de vida de entre 10 y 15 años, pero tienen la desventaja de requerir mantenimiento constante para cumplir con su vida útil.

De ordinario, los *pavimentos asfálticos* para trabajo pesado tienen una carpeta con un espesor de 10.0 cm. o más, y contribuye considerablemente a la resistencia y poder portante de la estructura del pavimento en conjunto, ya que el incremento de resistencia es proporcional al incremento en espesor del pavimento asfáltico.

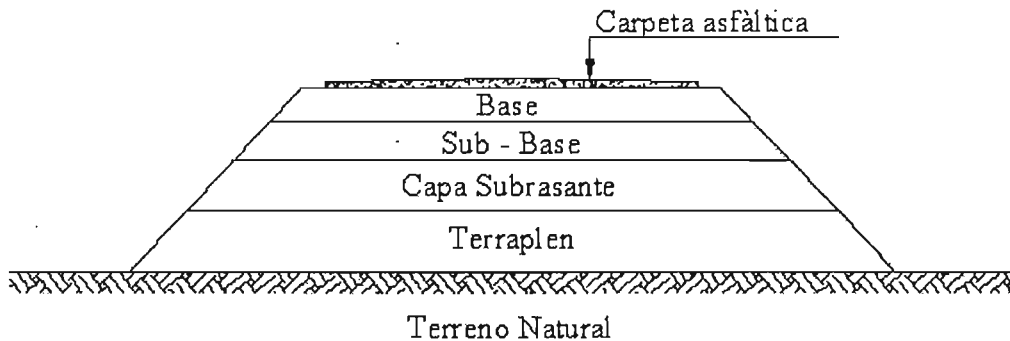


FIGURA 1.2 Conformación típica de un pavimento flexible.

Independientemente del espesor y tipo de pavimento asfáltico, la carga se transmite a través de los agregados pétreos, y el asfalto sirve como agente aglutinante que fija a los agregados en las posiciones adecuadas para transmitir las cargas aplicadas a las capas inferiores, donde se disipan finalmente.⁽¹⁾

Las exigencias de los usuarios de las carreteras construidas con *pavimentos flexibles*, van aumentando en forma continua; se requiere por tanto, que las carreteras existentes sean conservadas, modernizadas y ampliadas, con objeto de impulsar el desarrollo económico de México. Una buena planeación y un buen dimensionamiento sobre la inversión en los *pavimentos flexibles*, se traduce en un excelente incremento en el desarrollo económico.

Para el caso de los *pavimentos flexibles*, que constituyen una de las infraestructuras más importantes y más usadas en México, llegando a alcanzar un porcentaje de hasta el 93 % de los tipos de pavimentos usados, dada su función generadora de insumos y servicios, su participación en la cadena productiva y por ser factor básico en el crecimiento de otras ramas productivas, es importante evaluarlos y analizarlos; en adelante enfocaremos el tema a los *pavimentos flexibles* para incrementar la productividad y competitividad económica del país en la infraestructura vial correspondiente.

Los *pavimentos flexibles* se diseñan y construyen de tal manera que las cargas que sobre ellos se apliquen, no provoquen deformaciones permanentes y perjudiciales en la capa subrasante sobre la cual están colocados, y a la vez, se impida la formación de grietas en la estructura del mismo y el desplazamiento de partículas por la acción del tránsito. De ahí que el espesor de los pavimentos flexibles sea determinante para que estos puedan soportar y distribuir las cargas de los vehículos en general.

El tipo y espesor de una *carpeta asfáltica* se elige de acuerdo al volumen de tránsito que va a circular por ese camino, tomando en cuenta los datos de la tabla 1:

Intensidad del tránsito pesado en un sólo sentido	Tipo de carpeta
Mayor de 2000 vehi/día	Mezcla en planta de 7.5cm de espesor mínimo.
1000 a 2000	Mezcla en planta con un espesor mínimo de 5 cm.
500 a 1000	Mezcla en el lugar o planta de 5 cm. como mínimo.
Menos de 500	Tratamiento superficial simple o múltiple.

TABLA 1. Espesor de la carpeta en función al tránsito. ⁽¹⁾

1.3 PROPIEDADES DE LA CARPETA ASFÁLTICA

Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de los *pavimentos asfálticos*. Estas incluyen la *estabilidad*, la *durabilidad*, la *impermeabilidad*, la *flexibilidad*, la *resistencia a la fatiga* y la *resistencia al deslizamiento*.

- **Estabilidad**

La *estabilidad* de la carpeta asfáltica es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y planicidad bajo cargas repetidas; un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación), y otros deterioros que indiquen situaciones críticas de la carpeta.

Los requisitos de *estabilidad* sólo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido, expuesto a fallas por fatiga.

La *estabilidad* de la carpeta depende de la fricción y la cohesión interna. La *fricción interna* en la partículas del agregado (fricción entre partículas), está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. La *cohesión* resulta de la capacidad ligante del asfalto. En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas del agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la *estabilidad de la carpeta*.

La *cohesión* aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del asfalto disminuye. Adicionalmente, y hasta cierto nivel, los incrementos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en la pérdida de fricción entre las partículas. Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en el pavimento. La tabla 2 muestra varias de estas causas y efectos:

Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla.	Ondulaciones, ahuellamiento y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla.	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente durante un cierto tiempo, dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas superficies trituradas.	Ahuellamiento y canalización.

TABLA 2. Causas y efectos de estabilidad baja en el pavimento. ⁽²⁾

- **Durabilidad**

La *durabilidad* de una carpeta asfáltica es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

Generalmente, la *durabilidad* de una carpeta puede ser mejorada de tres formas. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

La mayor cantidad posible de asfalto aumenta la *durabilidad* porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como la hacen las películas delgadas. En consecuencia, el asfalto retiene, por más tiempo, sus características originales. Además, el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Por supuesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos.

Una graduación densa de agregado firme, duro y resistente a la separación, contribuye a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas del agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la carpeta. Un agregado sano y duro, resiste la acción del agua y el tránsito, los cuales impiden separar la película de asfalto de las partículas del agregado.

Existen muchas causas y efectos asociados con una poca *durabilidad* del pavimento. La tabla 3 presenta una lista de algunas de estas causas y efectos:

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto.	Endurecimiento rápido de asfalto y desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación.	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración.
Agregados susceptibles al agua (hidrofilicos).	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado o desintegrado.

TABLA 3. Causas y efectos de una poca durabilidad del pavimento. ⁽²⁾

- **Impermeabilidad**

La *impermeabilidad* de una carpeta asfáltica es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de ella. Ésta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es más importante que su cantidad. El *grado de impermeabilidad* está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

En la tabla 4 se citan ciertas causas y efectos relacionados con valores bajos de *impermeabilidad* para pavimentos asfálticos de graduación densa:

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto.	Las películas delgadas de asfalto causarán, tempranamente un envejecimiento y una desintegración de la mezcla.
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño.	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla.
Compactación inadecuada.	Alto contenido de vacíos en el pavimento, lo cual conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad en las capas inferiores.

TABLA 4. Causas y efectos de una carpeta demasiado permeable. ⁽²⁾

- **Flexibilidad**

La *flexibilidad* es la capacidad de una carpeta asfáltica para acomodarse, sin que se agriete por movimientos y asentamientos graduales de la *capa subrasante*. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las *capas subrasantes* se asientan (bajo cargas), o se expanden (por expansión del suelo).

Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos.

- **Resistencia a la fatiga**

La *resistencia a la fatiga* de una carpeta es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas del tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto), y la viscosidad del asfalto tiene un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento (el período de tiempo durante el cual el pavimento en servicio, es adecuadamente resistente a la fatiga), disminuye. Así mismo, un pavimento con un bajo contenido de asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

Las características de resistencia y espesor de un pavimento y la capacidad de soporte de la *capa subrasante*, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del

agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre las *capas subrasantes* resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre las *capas subrasantes* débiles.

La tabla 5 presenta una lista de las causas y efectos que conducen a una mala resistencia a la fatiga:

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto.	Agrietamiento por fatiga.
Vacios altos de diseño.	Envejecimiento temprano de asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de compactación.	Envejecimiento temprano de asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Espesor insuficiente del pavimento.	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.

TABLA 5. Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga del pavimento. ⁽²⁾

- **Resistencia al deslizamiento**

La *resistencia al deslizamiento* es la cualidad de la *carpeta asfáltica* de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada. Para obtener una buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo). La resistencia al desplazamiento se mide en el terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento y a una velocidad de 65 km/hr (40 millas/hr), generalmente. ⁽²⁾

Una superficie áspera y rugosa del pavimento tendrá una resistencia mayor al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera en una mezcla de graduación abierta y con un tamaño máximo de 9.5 mm. (3/8"), a 12.7 mm. (1/2"). Además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el pulimento, bajo el tránsito. Los agregados *calcáreos* son más susceptibles al pulimento que los agregados *silíceos*. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie), presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento. La tabla 6 presenta una lista de las causas y los efectos con una mala resistencia al deslizamiento:

Causas	Efectos
Exceso de asfalto.	Exudación, poca resistencia al deslizamiento.
Agregado mal graduado o con mala textura.	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo.
Agregado pulido en la mezcla.	Poca resistencia al deslizamiento.

TABLA 6. Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento de la carpeta. ⁽²⁾

1.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS ASFALTOS

Podemos definir al *asfalto* como un material de color oscuro con cualidades aglutinantes, compuesto esencialmente por hidrocarburos, casi en su totalidad soluble en bisulfuro de carbono, sólido o semisólido a las temperaturas ambientales ordinarias y que se licua gradualmente al

calentarse. Cuando se refina el petróleo para separar las fracciones volátiles, el sedimento que queda, es el asfalto. Está constituido principalmente por:

- 1) *Asfaltenos*. Responsables de las características de dureza y de color de los asfaltos.
- 2) *Maltenos* (resinas y aceites), confiere características de manejabilidad.
 - a) *Resinas*, le proporcionan sus propiedades cementantes o aglutinantes.
 - b) *Aceites*, proporcionan la consistencia adecuada para hacerlas trabajables.

En seguida se ilustra los diferentes tipos de moléculas asfálticas:

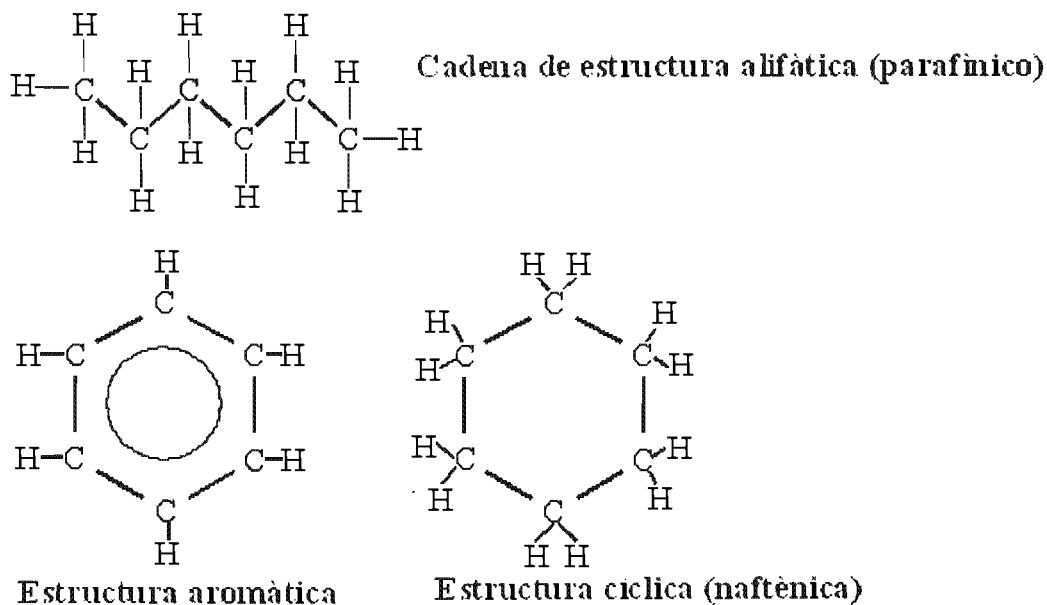


FIGURA 1.3 Estructura alifática, aromática y cíclica del asfalto. ⁽⁵⁾

FUENTE: *Primer Ciclo de Seminario sobre Pavimentos Flexibles*. Grupo Tribasa. México. Febrero.1997.

La proporción de *asfaltenos* y *maltenos* en el asfalto puede variar debido a un sin número de factores, incluyendo altas temperaturas, exposición a la luz y oxígeno, y el espesor de la película de asfalto en las partículas de agregado, entre otros. Las reacciones y cambios que pueden ocurrir incluyen: evaporación de los compuestos más volátiles, oxidación (combinación de moléculas de hidrocarburo con moléculas de oxígeno), polimerización (combinación de dos o más moléculas para formar una sola molécula más pesada), y otros cambios químicos que pueden afectar considerablemente las propiedades del asfalto. La acción del intemperismo produce cambios en la estructura interna del asfalto, haciendo que con el tiempo los aceites se transformen en resinas y éstas, a su vez, en *asfaltenos*, lo cual hace aumentar la dureza del asfalto al incrementarse la proporción de los *asfaltenos*.

Tanto la composición como las propiedades de ambas fracciones, *asfaltenos* y *maltenos*, tienen una marcada relación con el comportamiento y propiedades de los asfaltos. Dependiendo del grado de aromaticidad de los *maltenos* y de la concentración de los *asfaltenos*, la estructura de los asfaltos puede ser del tipo *sol* (movimiento libre de las micelas), o del tipo *gel* (estructura micelar empaquetada), siendo éste estado coloidal del sistema el que condiciona el comportamiento reológico del asfalto.

- **Estructura tipo sol**

Son los que tienen una menor proporción de *asfaltenos* y *resinas*, que se encuentran agrupados en cadenas perfectamente dispersas en el medio aceitoso formado por los *maltenos*. Poseen un comportamiento reológico fundamentalmente *newtoniano*, muy frágiles a bajas temperaturas, y además, una gran susceptibilidad a las variaciones de temperatura. Son poco apropiados para soportar las sollicitaciones que originan las deformaciones plásticas cuando se utilizan como ligante de una mezcla asfáltica.

- **Estructura tipo gel**

Tienen una mayor proporción de *asfaltenos* y *resinas*, que se disponen formando una estructura reticular muy compleja, dejando unos espacios libres, en los que se encuentran los *maltenos*. La estructura de éste tipo de asfaltos es similar a una “esponja” formada por los *asfaltenos* y las *resinas*, ocupando los poros la fracción de los *maltenos*. El comportamiento reológico es mucho más complejo que en el caso de los asfaltos tipo *sol*, aproximándose al de un sólido viscoelástico no lineal. Es, por lo tanto, menos susceptible a la temperatura y más adecuado para soportar las sollicitaciones que producen las deformaciones plásticas.

Para el Ingeniero, el asfalto, es de particular interés porque es un material fuertemente cementante, altamente adhesivo, impermeable y muy durable. Es una sustancia termoplástica, que imparte flexibilidad controlable a las mezclas de agregados minerales con los cuales se combina. Es además muy resistente a la acción de los álcalis, ácidos y sales. Puede ser licuado aplicándole calor, disolviéndolo en derivados del petróleo de distinta volatilidad o bien, emulsificándolo en agua.

Resulta prácticamente imposible conocer las propiedades y comportamiento de un asfalto basándose sólo en la valoración de los distintos componentes elementales que lo forman, debido a que su número es muy grande y no es posible aislar cada uno de ellos; sin embargo, aunque pudieran aislarse, no conoceríamos sus propiedades con suficiente exactitud, ya que en el comportamiento del asfalto no sólo la composición química juega el papel principal, sino la constitución físico-química del complejo coloidal que lo constituye.

Debido a que existe un gran número de ensayos para caracterizar a los asfaltos, se procedió a agruparlos en función de la propiedad que pretenden evaluar. Dichas propiedades pueden clasificarse en:

- *Propiedades químicas*, relativas a su composición y estructura coloidal.
- *Propiedades físicas* o propiedades relativas al estado del asfalto.
- *Propiedades mecánicas*, relativas a su comportamiento frente a tensiones o deformaciones.
- Adhesividad, relativa a la adhesión del asfalto con el agregado pétreo en presencia de agua.

a) Propiedades químicas

El asfalto tiene propiedades químicas únicas que lo hacen muy versátil como material de construcción de carreteras. En la siguiente tabla se muestran los ensayos de caracterización, generalmente utilizados para valorar las *propiedades químicas* del asfalto.

Tabla 7. Propiedad química y ensayos de caracterización para el asfalto.

Propiedad		Ensayo de caracterización
Química	Composición	Solubilidad
		Destilación
		Exudación
		Combustión
		Calcinación
		Fraccionamiento
		Análisis químico
	Estructura	Determinación de constantes físicas
		Espectroscopia ultravioleta e infrarroja
		Microscopia electrónica
		Magnetoquímica

Fuente: *Curso Técnico regional: Calidad y Comportamiento de Mezclas Asfálticas*.
Dirección General de Servicios Técnicos. SCT. Culiacán, Sinaloa. Septiembre, 2002.

La composición química es ciertamente uno de los medios más usados y más precisos para identificar las propiedades de cualquier sustancia. Sin embargo, existen varias razones por las cuales la química no ha llegado a ser parte de los sistemas de clasificación del asfalto:

- Los ensayos existentes para analizar la composición química requieren de equipos sofisticados y pericia técnica que no está disponible en la mayoría de los laboratorios donde se hacen las pruebas de asfaltos.
- La relación entre la composición química del asfalto y su comportamiento en la estructura del pavimento es todavía incierta.

El estudio de la naturaleza química del asfalto, presenta grandes dificultades por la complejidad de su composición. Ésta complejidad se debe al gran número de compuestos presentes, que por ser, en general, de alto peso molecular y con sustituciones de átomos de carbono por azufre, nitrógeno y oxígeno, hace posible la existencia de muchos isómeros (sustancias de igual composición química pero con diferentes propiedades).

b) Propiedades másicas

Se denominan *propiedades másicas* aquellas referentes a mezclas de diferentes asfaltos o a la variación del mismo por efecto, fundamentalmente, de la temperatura. Entre ellas se encuentran:

- Densidad.
- Viscosidad.
- Consistencia.
- Susceptibilidad Térmica.

Estas propiedades se describen en la sección 1.8 (*Pruebas de laboratorio*).

c) Propiedades mecánicas

Las *propiedades mecánicas* de los asfaltos dependen de la temperatura a la que se encuentran y del tiempo durante el que están sometidos a una determinada sollicitación. Por ello, al variar la temperatura o el tiempo de sollicitación, un mismo asfalto presenta características semejantes a las de un cuerpo elástico, viscoelástico o viscoso. ⁽³⁾

Las pruebas que se efectúan a los asfaltos, como en el caso de cualquier otro material, son un medio eficaz para conocer sus propiedades y tratar de predecir su comportamiento cuando se utilizan en un determinado trabajo. Las *propiedades mecánicas* que se evalúan en los asfaltos son:

- Ductilidad.
- Fragilidad.
- Cohesión.
- Tenacidad y resistencia.
- Rigidez.
- Adhesividad.
- Durabilidad.

NOTA: Dichas propiedades se enumeran en las secciones posteriores a éste capítulo.

1.4.1 ADHERENCIA

Es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado pétreo de la mezcla de pavimentación. La adherencia de dos cuerpos, resulta de sus energías de superficie y se debe a un fenómeno de absorción generalmente. En el caso del asfalto, la intensidad de la absorción, depende de la absorción selectiva de las resinas del asfalto, que son las que establecen la unión entre la superficie del material sólido y la masa de aglutinante.

La adherencia de un material con otro, es un fenómeno superficial que depende de:

- El contacto íntimo de las superficies.
- La afinidad de las superficies de los dos materiales.

El contacto íntimo de dos sólidos es difícil de lograr, a menos que uno de ellos, al tiempo de producirse el contacto, esté en estado líquido. Es por eso que el material asfáltico se le utiliza en estado líquido cuando se realiza la mezcla.

Para que exista una unión firme, es preciso que el aglutinante envuelva al sólido y que el contacto sea durante un tiempo suficientemente largo para permitir que se desarrolle el fenómeno de absorción. Para que la primera condición se cumpla, será necesario que el sólido presente una superficie libre de polvo y de otras materias extrañas que impidan el contacto. Una vez que se establece el contacto entre el aglutinante y el agregado, algunas fracciones de las resinas se absorben selectivamente.

Son las diferencias químicas entre los diversos hidrocarburos pesados, las que hacen que ciertas resinas sean adsorbidas selectivamente; se sabe que las resinas que se adsorben más fácilmente, son aquellas que pueden ser producidas por los disolventes ligeros.

Además existe un inconveniente: para que la absorción se pueda llevar a cabo eficientemente, es necesario que el aglutinante se sitúe sobre la superficie sólida y permanezca en reposo absoluto y sin tener una viscosidad reducida (como sucede en caliente).

Si un material caliente se enfría bruscamente al entrar en contacto con el agregado, no solamente por estar fría la superficie, sino también por influencia del ambiente, el enfriamiento brusco va contrayendo al material de tal manera que no tendrá el reposo suficiente para tener una buena adherencia. Es necesario que exista un cierto grado de dureza para que la absorción sobrevenga correctamente.

La adherencia real debida a los fenómenos de absorción en la interfase aglutinante - agregado, es casi siempre superior a la cohesión interna del aglutinante. A esto se debe que las rupturas que se llevan a cabo sean más frecuentemente en la masa misma que en la interfase.

Para conseguir que el asfalto envuelva a los pétreos es necesario eliminar el agua de su superficie y reducir su viscosidad para que “moje” perfectamente a los agregados, y una vez establecido el contacto de las moléculas polares del asfalto tenderán a orientarse hacia la superficie del pétreo para satisfacer las cargas electrostáticas de la superficie mineral.

Dentro del término de adherencia se agrupan dos propiedades distintas que son:

- La facilidad para que el asfalto “moje” al agregado pétreo: *adherencia activa*.
- La resistencia que ofrece el asfalto, una vez adherido al pétreo, al ser desplazado por el agua: *adherencia pasiva*.

Para evaluar la adherencia del asfalto, en la tecnología de carreteras se emplean procedimientos de laboratorio, rápidos y sencillos y se basan en uno de estos tres principios:

- Medida indirecta del mojado: estimación de la desenvuelta.
- Medida de la adhesión mecánica.
- Evaluación de la adherencia mediante ensayos mecánicos.⁽³⁾

1.4.2 VISCOSIDAD

La *viscosidad* puede definirse como la resistencia que presenta un material a ser deformado, en función de la velocidad de aplicación de una carga, y se debe al rozamiento o fricción interna de sus moléculas. Se puede decir que la *viscosidad* es una propiedad que frena la libre y rápida deformación de un material.

La *viscosidad* de un asfalto es una característica esencial del mismo, tanto desde el punto de vista de su comportamiento en las capas del pavimento como en el momento de su aplicación, por sus efectos sobre la trabajabilidad, adhesividad, compactación y dosificación; es por eso que las bajas viscosidades facilitan el cubrimiento del agregado, pero las altas viscosidades promueven la adhesividad una vez que el cubrimiento adecuado se ha logrado, es decir, mejoran la cohesión.

Los viscosímetros usados con mayor frecuencia en las aplicaciones del asfalto, son aquellos en que se da como medida de la viscosidad, el tiempo que cierta cantidad de producto tarda en fluir por un orificio de dimensiones normalizadas. Ente ellos, las viscosidades más utilizadas son la *viscosidad dinámica*, la *viscosidad cinemática* y la *viscosidad Saybolt – Furol*.

- *VISCOSIDAD DINÁMICA A 60°C*. La prueba consiste en determinar el tiempo que tardan en pasar 20 ml. del material por probar a través de un tubo capilar al vacío, bajo condiciones de presión y temperatura preestablecidas, corregido por el factor de calibración del viscosímetro.

Magnitud	Unidad	Símbolo	Unidad base
Viscosidad dinámica	poise	η	Pa-s

- *VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 135°C*. Con ésta prueba se mide el tiempo en que un volumen de asfalto fluye a través de un viscosímetro capilar, de un orificio determinado. El tiempo se multiplica por un factor de calibración del viscosímetro, la unidad que

emplea es el "centistokes". Ésta unidad se basa en las relaciones de densidad de un líquido a la temperatura de prueba representada en 1 gr/cm^3 .

Magnitud	Unidad	Símbolo	Unidad base
Viscosidad cinemática	stokes	v	m^2/s

- **VISCOSIDAD SAYBOLT - FUROL.** Nos ayuda a conocer la temperatura en la cual el asfalto es de fácil manejo. En ésta prueba se mide el tiempo que tardan en pasar 60 cm^3 de asfalto por un orificio de diámetro aproximadamente igual a 1 mm ., éste ensaye se efectúa a temperaturas que van de los 60°C a los 135°C dependiendo del tipo de asfalto de que se trate.

Las especificaciones de los trabajos de pavimentación requieren, generalmente, ciertos valores de viscosidad a temperaturas de 60°C y 135°C . La viscosidad a 60°C es la viscosidad usada para clasificar el cemento asfáltico. Ella representa la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta que el pavimento puede llegar a experimentar durante su servicio. La viscosidad a 135°C corresponde, aproximadamente, a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y la colocación. El conocer la consistencia de un asfalto dado a éstas dos temperaturas ayuda a determinar si el asfalto es apropiado o no para el pavimento que está siendo diseñado.

1.4.3 COHESIÓN

Es la capacidad del asfalto de mantener firmemente y en todo tiempo, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

La cohesión de un asfalto en función de la temperatura, se evalúa mediante un ensayo desarrollado por *Vialit* (Viafrance a partir de 1971), basado en la medida de la energía absorbida por la rotura de una película de ligante, a diferentes temperaturas, por efecto del impacto de un péndulo: *mouton-pendule* (Fig. 1.4).⁽²⁾

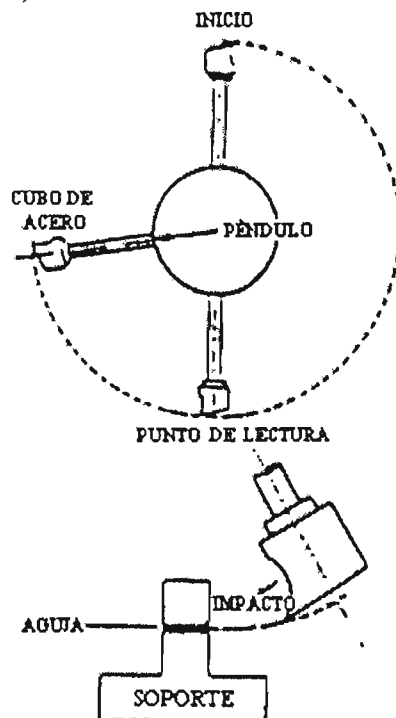


FIGURA 1.4 Péndulo para medir la cohesión de los asfaltos.

La figura muestra un cubo de acero con una de sus caras estriada, de 10 mm. de lado, representando un agregado, está pegado por el asfalto a ensayar sobre un soporte de acero igualmente estriado. El espesor de la película de asfalto es de 1 mm, sobre 1 cm² de sección. El extremo del péndulo golpea al cubo en la vertical de su eje de rotación después de girar 180°. Debido al choque y a la posición del punto de impacto, el asfalto que sostiene el cubo se rompe por el plano medio de su espesor. Un cuadrante graduado provisto de una aguja permite medir, en grados, el ángulo suplementario de la oscilación del péndulo, y determinar la energía absorbida durante el impacto para romper el asfalto y desprender el cubo.

Con el objeto de medir la energía absorbida por el asfalto durante su rotura, el ensayo se efectúa dos veces: en la primera el cubo de acero está pegado al soporte por el asfalto, mientras que en la segunda el cubo no está adherido con asfalto al soporte. Así, por diferencia de los dos resultados, se puede evaluar de forma precisa la cohesión interna del tipo de asfalto considerado, a una determinada temperatura de ensayo.

Para cada tipo de asfalto, el ensayo se efectúa, generalmente, a 8 temperaturas diferentes comprendidas entre 20°C y 60°C, aunque estos valores son exclusivos y deben ser adaptados al producto ensayado, en función de las características de servicio del pavimento.

Los resultados obtenidos pueden presentarse en una curva *cohesión-temperatura*, como la mostrada en la Fig. 1.5, a partir de la cual puede determinarse, por una parte, la temperatura de cohesión máxima y, por otra, el intervalo de consistencia que indica las temperaturas de servicio para un nivel de cohesión dado. ⁽³⁾

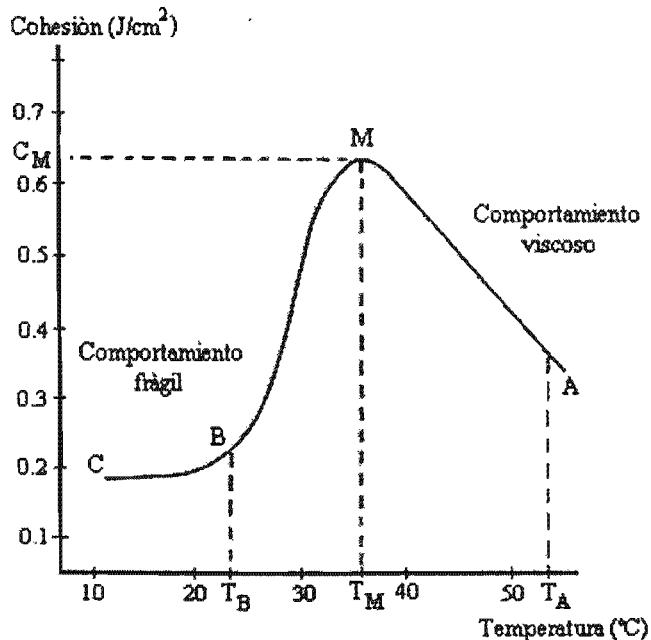


FIGURA 1.5 Curva típica de la cohesión de un asfalto. ⁽²⁾

1.5 COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO

1.5.1 SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA

La *susceptibilidad térmica* de un asfalto indica la sensibilidad que presenta el mismo al variar su viscosidad por elevación o disminución de la temperatura. Ésta *susceptibilidad térmica* es la que permite su empleo como ligante; a elevadas temperaturas se alcanzan viscosidades tan bajas que

permiten la envuelta de los agregados pétreos y la posterior extensión y compactación de las mezclas asfálticas; al enfriarse aumenta considerablemente su viscosidad y actúa como aglomerante de los agregados pétreos dando cohesión a la mezcla.

Todos los asfaltos son *termoplásticos*, esto es, se vuelven más duros (más viscosos), a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos), a medida que su temperatura aumenta. La *susceptibilidad térmica* varía entre los asfaltos de crudos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

Es muy importante conocer la *susceptibilidad térmica* del asfalto que va a ser utilizado pues ello indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado, y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la reología.

Desde el punto de vista de su empleo, se podría definir un "asfalto ideal" aquel cuya susceptibilidad a la temperatura fuese mínima en el intervalo de las temperaturas de servicio, sin llegar a ser un sólido quebradizo a temperaturas frías o un líquido relativamente viscoso a temperaturas elevadas tal como se muestra en la Fig. 1.6 que representa un asfalto convencional y uno ideal.

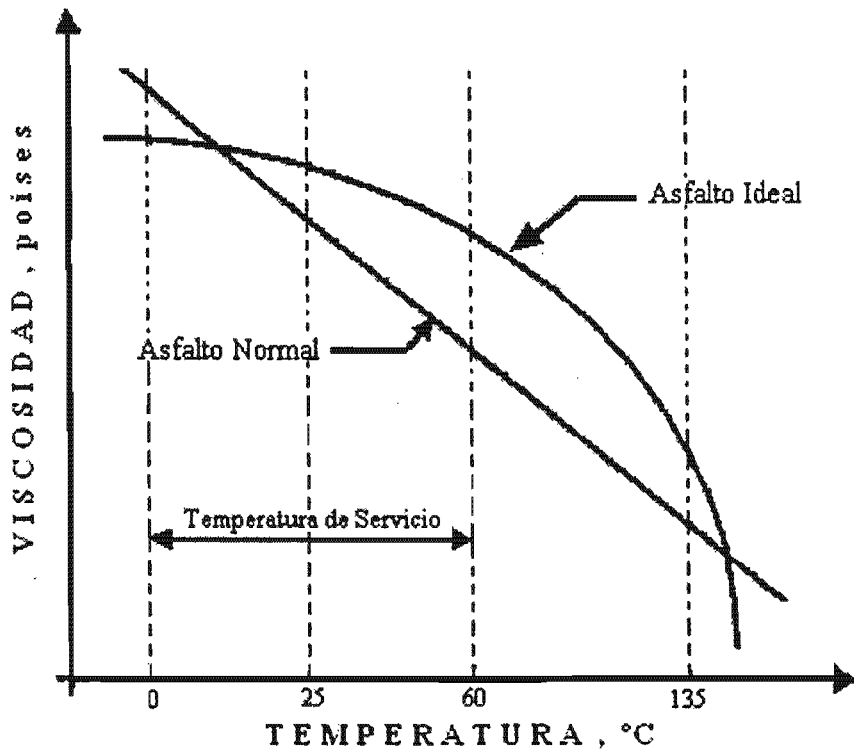


FIGURA 1.6 Representación de un asfalto ideal desde el punto de vista de su viscosidad.

1.5.2 ENVEJECIMIENTO ATMOSFÉRICO

Ocurre cuando un asfalto en forma de película delgada se expone a las inclemencias atmosféricas, a veces pierde parte de su plasticidad y se hace quebradizo a causa de ciertos cambios físicos y químicos. El *envejecimiento atmosférico* causado en el asfalto de un pavimento por endurecimiento progresivo da lugar en ocasiones a la formación de finas grietas. Cuando éste proceso continúa, las grietas se ensanchan y, finalmente, el agua superficial entra por las grietas, reblandeciendo la *base*, dando lugar a que el pavimento asfáltico quede deteriorado.

No todos los asfaltos se envejecen a la misma velocidad cuando son calentados en forma de películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento, y así poder ajustar las técnicas constructivas para minimizar el envejecimiento.

Durante el proceso de *envejecimiento* de un asfalto, éste va perdiendo plasticidad y ganando viscosidad y dureza, a la vez que la cohesión va haciéndose mayor hasta alcanzar un máximo, correspondiente a una dureza crítica, a partir de la cual la cohesión disminuye y el material va adquiriendo fragilidad llegando a ser incapaz de soportar esfuerzos bruscos o deformaciones rápidas. En éste estado no es capaz de absorber tensiones y es fácil la rotura a partir de fisuras superficiales que irán progresando hacia el interior con el paso del tiempo.

De los factores antes mencionados que pueden provocar el envejecimiento de un asfalto, los que generalmente se toman en cuenta para explicar el proceso de envejecimiento son:

- Evaporación de los productos más volátiles, asociada generalmente al envejecimiento a corto plazo durante el proceso de fabricación, puesta en obra y quizás el primero o segundo año de servicio.
- Oxidación o reacciones químicas entre los componentes del asfalto y el oxígeno, asociadas al envejecimiento a largo plazo durante el período de servicio.

El *envejecimiento* se produce también por oxidación, como ya se mencionó. El oxígeno reacciona con la sustancia asfáltica, eliminándose parte del hidrógeno y del carbono en forma de H_2O y de CO_2 respectivamente, acelerándose ésta reacción por la acción de las altas temperaturas y el efecto catalizador de los rayos ultravioletas del sol; ésta acción es mucho más peligrosa en productos que poseen componentes nafténicos.

La reacción de oxidación catalizada por la acción de la luz es mucho más rápida que la reacción térmica en la oscuridad, pero debido a que el asfalto es un buen absorbente de la luz, la acción se reduce aproximadamente a 5 micras superiores de la capa expuesta. La reacción de oxidación térmica, más lenta, aparece como la principal causa de envejecimiento del asfalto dentro de la mezcla.

Aunado a ello, la pérdida de componentes volátiles produce poros que son una vía de entrada de agua y del oxígeno atmosférico, que oxida ciertos componentes asfálticos, transformándolos en productos solubles en agua, que son disueltos y extraídos por ésta. Se producen así nuevos poros, acelerándose de éste modo la desintegración del material, sometido a la acción de la intemperie.

En cualquier caso, el espesor de la película de asfalto, interviene como factor muy importante en su envejecimiento. A las temperaturas usuales en el pavimento, la reacción de oxidación no sólo será controlada por la reactividad del asfalto con el oxígeno, sino que también por la velocidad de difusión del oxígeno en la película del asfalto, de manera que cuanto más pequeño es éste espesor, más rápido es el proceso de envejecimiento. Por lo tanto, la velocidad de envejecimiento de un asfalto depende de su susceptibilidad al envejecimiento por reacción térmica con oxígeno, de su grado de exposición al aire en el pavimento (contenido de huecos de la mezcla), y del régimen de temperaturas del pavimento.

1.5.3 REOLOGÍA

Es la ciencia de la deformación y el fluir de la materia, por lo que cualquier material sometido a un esfuerzo cortante suficiente es capaz de deformarse y fluir.

Los asfaltos se clasifican tomando en cuenta sus propiedades reológicas bajo dos puntos de vista: por su carácter o comportamiento al esfuerzo de deformación y de acuerdo con su dureza. Al elevarse la temperatura (partiendo de temperatura ambiente), decrece la dureza de los asfaltos pero sin que se modifique su carácter. Cuando se alcanza la consistencia de un líquido fluido y delgado, todos los asfaltos se comportan como líquidos newtonianos y desaparece cualquier diferencia de carácter.

El carácter reológico de los asfaltos, permite discernir mucho acerca de su comportamiento; es posible dividir, de acuerdo con ésta propiedad, en tres grandes grupos, tomando en cuenta la deformación de los materiales sujetos a un esfuerzo cortante constante (ver Fig. 1.7)

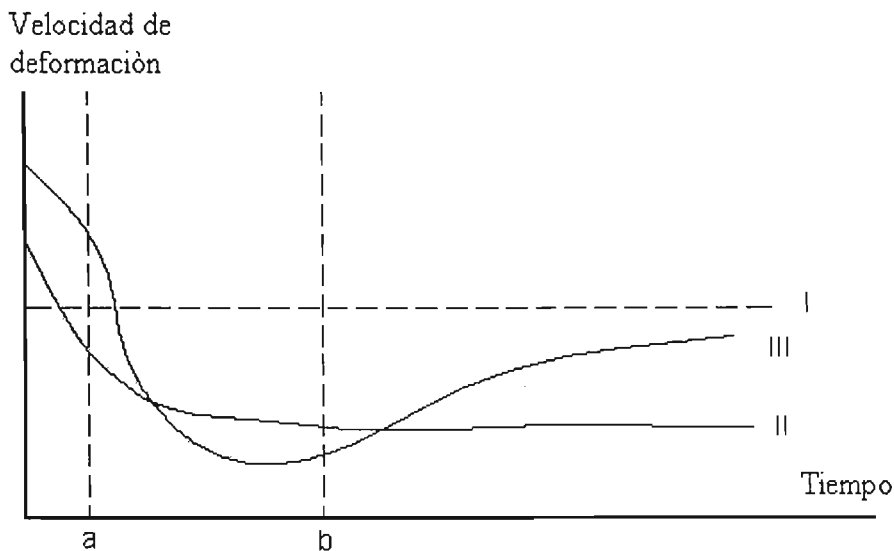


FIGURA 1.7 Representación de la velocidad de deformación debido a la ley de Newton.

En el primer grupo (I) las propiedades reológicas son muy sencillas. Durante la deformación el material se comporta de acuerdo con la *ley de Newton*, de manera que desde el comienzo de la deformación, la “rapidez de corte” es constante y proporcional al esfuerzo cortante; al ceder el esfuerzo, no vuelve al estado que tenía el fenómeno debido a la elasticidad. A éste tipo corresponden los líquidos altamente viscosos y no coloidales.

En el segundo tipo (II), la “rapidez de corte” bajo un esfuerzo cortante constante, disminuye al iniciarse la deformación; después de transcurrido algún tiempo, la rapidez de corte se hace constante y éste valor constante se mantiene (casi) proporcional al esfuerzo cortante aplicado. Al ceder el esfuerzo hay alguna “recuperación” por elasticidad, aún cuando no aparece una deformación inicial. Se puede comprobar que la velocidad inicial mayor, al comenzar la deformación, es también debida a las propiedades elásticas. El estado coloidal corresponde también a una estructura *tipo sol*.

En el tercer caso (III), la “rapidez de corte” bajo un esfuerzo cortante constante, decrece al principio de la deformación, pasa después por un valor mínimo y aumenta finalmente cuando el esfuerzo cortante aplicado excede de un valor determinado. Al ceder el esfuerzo hay una

recuperación por elasticidad, que puede ser total si la deformación precedente quedó entre ciertos límites. Se ve que en cierto grado corresponde el último tipo al caso de un sólido, pues comparte sus propiedades. Éste tipo de asfalto tiene una estructura *tipo gel*.

Las propiedades reológicas de un asfalto se pueden conocer a base de métodos rápidos, convencionales. Las determinaciones del punto de reblandecimiento (temperatura a la cual el producto posee una consistencia determinada), y de la penetración, dan valores que son correlativos con el carácter reológico de los asfaltos (sección 1.8.1.3). El comportamiento reológico de un material está sujeto a las variables: *temperatura, presión, tiempo de aplicación de la carga, esfuerzo cortante y velocidad de deformación*.

1.6 TIPOLOGÍA DEL ASFALTO

1.6.1 CEMENTO ASFÁLTICO

Son los asfaltos obtenidos por un proceso de destilación del petróleo para eliminar a éste sus solventes volátiles y parte de los aceites, y éste tendrá como particularidad de que se puede reblandecer al calentarse y al enfriarse vuelve a tener la consistencia semisólida original de color café oscuro. Los *cementos asfálticos* están constituidos fundamentalmente por una mezcla de hidrocarburos parafínicos, nafténicos y aromáticos, aunque contienen también pequeñas proporciones de azufre, oxígeno y nitrógeno. Las distintas proporciones en la composición de un *cemento asfáltico* sobre alguno de estos grupos de hidrocarburos, varía con el petróleo de origen y tienen una marcada influencia en las características y propiedades del asfalto final, por lo que no todos los petróleos son igualmente adecuados para la producción de asfaltos.

Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licuan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo.

Su aplicabilidad está restringida para el caso de mezclas para pavimento con carpetas o superficies de rodamiento asfáltico, sometido a tránsito intenso o pesado y en donde se deben tener condiciones de resistencia y estabilidad.

En general las propiedades fundamentales que deben de poseer los *cementos asfálticos* para su empleo en carreteras son:

- *Carácter termoplástico*: Por la acción de la temperatura, su consistencia debe disminuir de manera que sean capaces de “mojar” y envolver a los agregados pétreos.
- *Buena adhesividad a los agregados pétreos* para ejercer su poder aglomerante y evitar la desmenuza y desprendimientos de los agregados pétreos.
- *Buen comportamiento mecánico y reológico* para resistir las tensiones y deformaciones impuestas conjuntamente por el tránsito y el clima, con el fin de diseñar mezclas resistentes y durables.

Según su viscosidad dinámica a 60°C, los *cementos asfálticos* se clasifican como se indica en la tabla 8 y 9, donde se señalan los usos más comunes de cada uno. ⁽⁹⁾

TABLA 8 y 9. Clasificación de los cementos asfálticos según su viscosidad dinámica a 60°C.

Clasificación	Viscosidad a 60°C Pa-s (P ^[1])	Usos más Comunes
AC - 5	50±10 (500±100)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la Fig. 1.8. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en el sistema de riegos de impregnación, de liga y poreo con arena, así como en estabilizaciones.
AC - 10	100±20 (1000±200)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Fig. 1.8. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezclas en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la Fig. 1.8
AC - 20	200±40 (2000±400)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 3 en la Fig. 1.8. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezclas en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Fig. 1.8
AC - 30	300±60 (3000±600)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 4 en la Fig. 1.8. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezclas en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 3 y 4 en la Fig. 1.8 • En la elaboración de asfaltos rebajados en general, para utilizarse en carpetas de mezclas en frío, así como en riegos de impregnación.

[1] Poises.

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT 4-05-001/00



FIGURA 1.8 Regiones geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su viscosidad dinámica a 60°C (ver tabla 8).

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT 4-05-001/00

El parámetro fundamental para elegir el tipo de asfalto es la viscosidad, útil para determinar las temperaturas adecuadas para el manejo y el uso de los asfaltos. En climas cálidos y húmedos (sur del país), los asfaltos se vuelven blandos (usar asfaltos duros). En climas fríos (norte del país), los asfaltos se endurecen (usar asfaltos blandos).

La Fig. 1.8 muestra cuatro zonas geográficas para la utilización del asfalto, clasificadas esencialmente en función del clima y la topografía de cada región. La zona 3 presenta un clima húmedo, siendo así abarca casi en su totalidad, la parte sur de la República Mexicana y Baja California Sur. La zona 2 y 4 presenta un clima seco; por el día presenta un clima muy cálido (la carpeta asfáltica se "expande"), y por las noches un clima frío (la carpeta asfáltica se "contrae"), abarca la parte norte del país.

Los cementos asfálticos deben satisfacer los requisitos de calidad que se indican en la siguiente tabla:

TABLA 10. Requisitos de calidad para cemento asfáltico clasificado por viscosidad dinámica a 60°C.

Características	Clasificación			
	AC - 5	AC - 10	AC - 20	AC - 30
Del cemento asfáltico original:				
Viscosidad Dinámica a 60°C; Pa-s (P ^[1])	50±10 (500±100)	100±20 (1000±200)	200±40 (2000±400)	300±60 (3000±600)
Viscosidad Cinemática a 135°C; mm ² /s, mínimo (1 mm ² /s = 1 centistoke)	175	250	300	350
Viscosidad Saybolt - Furol a 135°C; seg. mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg; 10-1 mm, mínimo	140	80	60	50
Punto de Inflamación Cleaveland; °C, mínimo	177	219	232	232
Solubilidad; %, mínimo	99	99	99	99
Punto de Reblandecimiento; °C	37 - 43	45 - 52	48 - 56	50 - 58
Del residuo de la prueba de la película delgada:				
Pérdida por Calentamiento; %, máximo	1	0.5	0.5	0.5
Viscosidad Dinámica a 60°C; Pa-s (P ^[1]) máximo	200 (2000)	400 (4000)	800 (8000)	1200 (12000)
Ductilidad a 25°C y 5 cm/min; cm, mínimo	100	75	50	40
Penetración retenida a 25°C; %, mínimo	46	50	54	58

[1]Poises

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT 4-05-001/00

1.6.2 EMULSIÓN ASFÁLTICA

Las *emulsiones asfálticas* son el resultado después de que se fluidifica el cemento asfáltico, o sea que se separa mecánicamente y en caliente, hasta obtener glóbulos a los cuales se les dispersa en agua tratada con emulsificantes (como el jabón emulsificante, ácido clorhídrico o la sosa cáustica). De ésta forma se tienen dos fases: una continua que es el agua y la otra dispersa que es la que está constituida por el cemento asfáltico. En una emulsión bien hecha, el diámetro de los glóbulos esféricos de asfalto varía entre una y diez micras. Las *emulsiones asfálticas*, son líquidos de color chocolate casi tan fluidos como el agua. Dependiendo del agente emulsificante, las emulsiones asfálticas pueden ser *aniónicas*, si los glóbulos tienen carga eléctrica negativa o *catiónicas*, si los glóbulos asfálticos tienen carga eléctrica positiva. Éstas emulsiones pueden ser de *rompimiento rápido, medio o lento*.

El empleo de las emulsiones está sujeto principalmente al tipo de agregados que se utilicen en la mezcla asfáltica. Para determinar el tipo de emulsión a utilizar, generalmente se toma en cuenta la cantidad de sílice y los óxidos alcalinos que contiene el agregado, pero en términos generales, podría decirse que las *emulsiones catiónicas* resultan más adecuadas a medida que el agregado contiene más sílice, mientras que las *emulsiones aniónicas* resultan adecuadas en el caso de materiales alcalinos.⁽⁴⁾

El proceso de emulsificación consiste en separar mecánicamente el cemento asfáltico caliente en diminutos glóbulos, los cuales son dispersados en agua tratada con una pequeña cantidad de agente emulsivo. Por lo tanto el sistema queda constituido por el agua como fase continua y las micrométricas gotitas de asfalto como fase dispersa. La separación mecánica del asfalto en estos pequeñísimos glóbulos de tamaño coloidal se logra mediante el uso de molinos coloidales. La idea del funcionamiento de las emulsiones radica en que una vez evaporada el agua, el asfalto adquiere nuevamente su consistencia original debido a que los glóbulos dispersos se vuelven a unir, quedando en condiciones de actuar como cementante de los agregados pétreos. Éste proceso en que se separan las fases, se conoce como *rotura de la emulsión*.

Usos:

Se dice que las *emulsiones asfálticas* son de aplicación en frío ya que la misma se realiza a temperatura ambiente, o levemente superior a ésta. Las emulsiones asfálticas pueden ser usadas con el agregado frío, seco o ligeramente húmedo. Otra de las ventajas de las emulsiones radica en la gran variedad de usos que las mismas tienen, pudiendo citarse entre otros los tratamientos superficiales, ya sean éstos de una o varias capas, o de sellado, gran variedad de riegos bituminosos (de liga, de imprimación, de curado, paliativos de polvo, etc.), mezclas en planta o en sitio, pudiendo ser éstas abiertas o densas, estabilización de suelos, lechadas asfálticas y micropavimentos.

Las *emulsiones asfálticas* pueden ser de los siguientes tipos:

- De *rompimiento rápido*, que generalmente se utilizan para *riegos de liga* y carpetas por el sistema de riegos, a excepción de la emulsión *ECR – 60*, que no se debe utilizar en la elaboración de éstas últimas.
- De *rompimiento medio*, que normalmente se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta, especialmente cuando el contenido de finos en la mezcla es menor o igual a 2%, así como en trabajos de conservación tales como bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas.
- Para *impregnación*, que particularmente se utilizan para impregnaciones de *subbases y/o bases* hidráulicas.
- *Superestables*, que principalmente se emplean en estabilizaciones de materiales y en trabajos de recuperación de pavimentos.

Según su contenido de cemento asfáltico en masa, su tipo y polaridad, las *emulsiones asfálticas* se clasifican como se indica en la siguiente tabla: ⁽⁹⁾

TABLA 11. Clasificación de las emulsiones asfálticas. ⁽⁹⁾

Clasificación	Contenido de cemento asfáltico en masa %	Tipo	Polaridad	
EAR – 55	55	Rompimiento Rápido	Aniónica	
EAR – 60	60			
EAM – 60	60	Rompimiento Medio		
EAM – 65	65			
EAL – 55	55	Rompimiento Lento		
EAL – 60	60			
EAI – 60	60	Para Impregnación		
ECR – 60	60	Rompimiento Rápido		Catiónica
ECR – 65	65			
ECR – 70	70			
ECM – 65	65	Rompimiento Medio		
ECL – 65	65	Rompimiento Lento		
ECI – 60	60	Para Impregnación		
ECS – 60	60	Sobrestabilizada		

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT 4-05-001/00

Otorgando al mismo tiempo ventajas como las enumeradas a continuación:

- a) Aumento de la elasticidad que brinda a las mezclas una mejor resistencia a las deformaciones permanentes.
- b) Incremento de la cohesión a altas temperaturas, que mejora la resistencia a las deformaciones.
- c) Disminución de la fragilidad, aumentando consecuentemente la flexibilidad a bajas temperaturas, disminuyendo el riesgo de fisuración en clima frío.
- d) Mayor consistencia del ligante modificado (mayor viscosidad, punto de ablandamiento, y menor penetración) que implica una disminución del riesgo de deformaciones y exudación de las mezclas.
- e) Mejoramiento de la adherencia con los agregados pétreos, minimizando los desprendimientos.

Son muchos los puntos que se pueden destacar respecto de la conveniencia del uso de las emulsiones asfálticas, siendo indudablemente el más importante el carácter ecológico de las mismas, ya que eliminan las emanaciones de solventes a la atmósfera, evitando de ésta manera la contaminación del medio ambiente. Además, el hecho de que las emulsiones se utilicen y transporten a temperatura ambiente o levemente superior a ésta, hace que disminuya considerablemente el consumo energético necesario para el calentamiento de materiales y transporte reduciendo así los costos como también el impacto ambiental, y evitando a la vez riesgos en la manipulación de las mismas. Por otra parte, las *emulsiones asfálticas* son productos de gran rendimiento, lo que implica un menor consumo tanto de ligantes como de agregados. Debe destacarse también que las emulsiones poseen una gran versatilidad al poder adaptarse a las condiciones y materiales de cada lugar, permitiendo el uso de técnicas económicas e innovadoras que reducen notablemente las interferencias al tránsito y facilitan una rápida reapertura al mismo.

Las *emulsiones asfálticas* deben satisfacer los requisitos de calidad que se indican a continuación:

A) PARA LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS ANIÓNICAS

Las *emulsiones asfálticas aniónicas*, según su clasificación, han de cumplir con todos los requisitos establecidos en la siguiente tabla:

TABLA 12. Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas aniónicas.

Características	Clasificación						
	EAR - 55	EAR - 60	EAM - 60	EAM - 65	EAL - 55	EAL - 60	EAI - 60
De la emulsión:							
Contenido de Cemento Asfáltico en masa; %, mínimo	55	60	60	65	55	60	60
Viscosidad Saybolt – Furol a 25°C; seg, mínimo	5	-	-	-	20	20	5
Viscosidad Saybolt – Furol a 50°C; seg, mínimo	-	40	50	25	-	-	-
Asentamiento en 5 días; diferencia en %, máximo	5	5	5	5	5	5	5
Retenido en malla N° 20 en la prueba del tamiz; %, máximo	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pasa malla N°20 y se retiene en la malla N°60 en la prueba del tamiz; %, máximo	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Cubrimiento del agregado seco; %, mínimo	-	-	90	90	90	90	-
Cubrimiento del agregado húmedo; %, mínimo	-	-	75	75	75	75	-
Miscibilidad con cemento Portland; %, máximo	-	-	-	-	2	2	-
Carga eléctrica de las partículas	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
Demusibilidad; %	60 min	50 min	30 máx	30 máx	-	-	-
Del residuo de la destilación:							
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa – s (P ^{II})	50 ± 10 (500±100)	100 ± 20 (1000±200)	50 ± 10 (500±100)	100 ± 20 (1000±200)	50 ± 10 (500±100)	100 ± 20 (1000±200)	50 ± 10 (500±100)
Penetración a 25°C, en 100 gr y 5 seg; 10 ⁻¹ mm	100 - 200	50 - 90	100 - 200	50 - 90	100 - 200	50 - 90	150 - 250
Solubilidad, %, mínimo	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5
Ductilidad a 25°C; cm, mínimo	40	40	40	40	40	40	40

[1]Poises

FUENTE:

NORMA SCT

N-CMT 4-05-001/00

CMT. Características de los materiales.

B) PARA LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS CATIONICAS

Las *emulsiones asfálticas cationicas*, según su clasificación, han de cumplir con todos los requisitos establecidos en la siguiente tabla:

TABLA 13. Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas catiónicas.

Características	Clasificación						
	ECR - 60	ECR - 65	ECR - 70	ECM - 65	ECL - 65	ECI - 60	ECS - 60
De la emulsión:							
Contenido de Cemento Asfáltico en masa; %, mínimo	60	65	70	65	65	60	60
Viscosidad Saybolt – Furol a 25°C; seg, mínimo	-	-	-	-	25	5	25
Viscosidad Saybolt – Furol a 50°C; seg, mínimo	5	40	50	25	-	-	-
Asentamiento en 5 días; diferencia en %, máximo	5	5	5	5	5	10	5
Retenido en malla N°20 en la prueba del tamiz; %, máximo	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pasa malla N°20 y se retiene en la malla N°60 en la prueba del tamiz; %, máximo	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Cubrimiento del agregado seco; %, mínimo	-	-	-	90	90	-	90
Cubrimiento del agregado húmedo; %, mínimo	-	-	-	75	75	-	75
Carga eléctrica de las partículas	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Disolvente en volumen; %, máximo	-	3	3	5	-	15	-
Índice de ruptura; %	<100	<100	<100	80 - 140	>120	-	>120
Del residuo de la destilación:							
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa – s (P ⁽¹⁾)	50 ± 10 (500±100)	50 ± 10 (500±100)	50 ± 10 (500±100)	50 ± 10 (500±100)	50 ± 10 (500±100)	50 ± 10 (500±100)	50 ± 10 (500±100)
Penetración ^[2] a 25°C, en 100 gr y 5 seg; 10 ⁻¹ mm	110 - 250	110 - 250	110 - 250	100 - 250	100 - 250	100 - 400	100 - 250
Solubilidad, %, mínimo	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5	-
Ductilidad a 25°C; cm, mínimo	40	40	40	40	40	40	-

[1] Poises

[2] En climas que alcancen temperaturas iguales o mayores de 40°C, la penetración en el residuo de la destilación de las emulsiones ECR-65, ECR-70, ECM - 65 y ECL-65, en el proyecto se puede considerar de 50 a 90 x 10⁻¹ mm.

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT 4-05-001/00
CMT. Características de los materiales.

1.6.3 ASFALTOS REBAJADOS

Son productos asfálticos cuyo residuo es un cemento asfáltico y su viscosidad se acondiciona para hacerlo trabajable adicionándole solventes derivados del mismo petróleo. Estos solventes se evaporan después de empleado el rebajado. Con el fin de poder trabajar con el cemento asfáltico a temperaturas menores, es necesario fluidificarlo; para ello se producen los rebajados y las emulsiones asfálticas.

Los *rebajados asfálticos* se fabrican diluyendo el cemento asfáltico en gasolina, tractolina (también conocida como petróleo diáfano), diesel o aceites ligeros, dando como resultado los siguientes materiales:

I. GENERALIDADES SOBRE PAVIMENTOS FLEXIBLES

- a) Los *rebajados de fraguado rápido*, denominado *FR*, que son aquellos productos obtenidos al agregar *gasolina o nafta* a un cemento asfáltico.
- b) Los *rebajados de fraguado medio* ò *FM*, resultado de la mezcla de un solvente de menor volatilidad como la *kerosina* con el cemento asfáltico.
- c) Los de *fraguado lento* ò *FL*, que resultan de rebajar el cemento asfáltico con destilados de volatilización lenta, como el *diesel*, éste tipo de asfaltos es también llamado *aceites para caminos*.

A los asfaltos rebajados ya sea de *FR*, *FM* ò *FL*, se les fabrica con diferentes grados de fluidez, dependiendo éste, de tres factores a saber:

- 1) Tipo de cemento asfáltico empleado.
- 2) Tipo de solvente empleado.
- 3) Proporción empleada de ambos productos.

En la *Norma de la SCT* vigente sólo consideran dos tipos de asfaltos rebajados, los *FR - 3* y los *FM - 1* y los requisitos de calidad son los mostrados en la siguiente tabla:

TABLA 14. Clasificación de los asfaltos rebajados.

Clasificación	Velocidad de fraguado	Tipo de solvente
FR - 3	Rápida	Nafta, Gasolina
FM - 1	Media	Queroseno

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT 4-05-001/00
CMT. Características de los materiales.

Los asfaltos rebajados fueron muy utilizados hasta la década de los 70's, sin embargo hoy en día prácticamente han desaparecido por razones económicas y ecológicas. Eran productos caros, por ser una mezcla de cemento y solvente; éste último tenía que evaporarse para dejar el ligante asfáltico sólo, lo cual constituye un costoso desperdicio. Por otra parte, el solvente es precursor del ozono, constituyendo un problema de contaminación ambiental.

REQUISITOS DE CALIDAD PARA ASFALTOS REBAJADOS

Los *asfaltos rebajados*, según su clasificación, deben satisfacer los requisitos establecidos en la siguiente tabla:

TABLA 15. Requisitos de calidad para los asfaltos rebajados.

Características	Grado	
	FM - 1	FR - 3
Del asfalto rebajado:		
Punto de inflamación Tag; °C, mínimo	38	27
Viscosidad Saybolt – Furol a 50°C; seg	75 - 150	-
Viscosidad Saybolt – Furol a 60°C; seg	-	250 – 500
Contenido de solvente por destilación a 360°C, en volumen, %		
Hasta 225°C	20 máx	25 mín
Hasta 260°C	25 - 65	55 mín
Hasta 315°C	70 - 90	83 mín
Contenido de cemento asfáltico por destilación a 360°C, en volumen, %, mínimo	60	73
Contenido de agua por destilación a 360°C, en volumen, %, máximo	0.2	0.2
Del residuo de la destilación:		
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa – s (P ¹¹), máximo	200 ± 40 (2000 ± 400)	200 ± 40 (2000 ± 400)
Penetración a 25°C, en 100 gr y 5 seg; 10 ⁻¹ mm	120 - 300	80 – 120
Ductilidad a 25°C; cm, mínimo	100	100
Solubilidad; %, mínimo	99.5	99.5

[1]Poises

FUENTE: NORMA SCT

N-CMT 4-05-001/00

CMT. Características de los materiales.

1.7 ADITIVOS UTILIZADOS PARA MEZCLA ASFÁLTICA

Considerando la forma en que las cargas del tránsito han venido aumentando, tanto en magnitud como en frecuencia y teniendo en cuenta las condiciones climatológicas de un sitio específico al diseñar un *pavimento flexible*, resulta claro que las solicitaciones bajo las cuales trabajan los materiales que componen a éstos pavimentos son cada día más severas. Bajo éstas nuevas consideraciones de carga y con los mismos espesores o quizá menores, el período de servicio será bastante menor si se desea mantener los niveles de servicio adecuados, incrementándose por lo tanto, los gastos posteriores de mantenimiento o reconstrucción.

Por tal situación ha surgido la necesidad de investigar y encontrar materiales de mejor calidad. Tratar de modificar las características que rigen el comportamiento de los materiales a fin de volverlos más resistentes bajo condiciones adversas de trabajo y a un bajo costo, se ha hecho necesario la aplicación de *aditivos*, ya que se emplean con éxito en otros países, en los que se ha logrado mejorar notablemente el comportamiento del pavimento, con el consecuente incremento en la vida útil del mismo.

El uso de *aditivos* en las mezclas asfálticas, empieza con la disolución o incorporación en el asfalto, de un *polímero* o de *hule molido de neumáticos*, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación. Los aditivos producen una actividad superficial iónica que incrementa la adherencia en la interfase entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aún en presencia del agua. También aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura. Estos aditivos por lo general se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo. Es

importante mencionar que el tipo de aditivo a utilizar está en función del tipo de mezcla asfáltica y de la aplicación concreta a que se destine dentro del pavimento.

1.7.1 POLÍMEROS

Un *polímero* es una sustancia macromolecular con propiedades viscoelásticas que al ser incorporado al asfalto, dará lugar a interacciones entre las moléculas del polímero y los componentes del asfalto y producirá alteraciones en el sistema coloidal de éste último, lo que provocará cambios en las propiedades originales.⁽⁵⁾

El propósito de modificar el asfalto con *polímeros* es mejorar el funcionamiento de los pavimentos. Esto significa que:

- El usar *polímeros* debe propiciar que las carpetas asfálticas cumplan con requisitos climáticos sin algún riesgo.
- Puedan diseñarse carpetas que cumplan con requisitos de mayor durabilidad de carreteras, aún con el actual incremento del tránsito, cargas axiales y presión de llantas.
- Simplemente que seremos capaces de diseñar carpetas que reduzcan los costos de las estructuras debido a su mayor ciclo de vida útil, así como a la menor cantidad de material asfáltico utilizado.⁽³⁾

Las mejoras que se han observado al modificar un asfalto con *polímeros* incluyen las siguientes:

- Mejora la resistencia a la ruptura por fatiga de la carpeta asfáltica.
- Mejora la resistencia a la deformación permanente.
- Disminuye la fragilidad en tiempo de frío.
- Aumenta la cohesión en tiempos de calor.
- Mejora la resistencia al impacto.
- Menor fuga en mezclas de graduación abierta.
- Menor sensibilidad a la humedad.
- Mejora la adherencia de los agregados.
- Menor endurecimiento asociado al envejecimiento del asfalto.
- Reduce la formación de “roderas”.
- Reduce significativamente los costos de mantenimiento.

Tipos de polímeros:

Los polímeros se clasifican en *termoendurecibles* y *termoplásticos*, los *termoendurecibles* son: las resinas epoxi, poliuretanos y poliésteres. Los polímeros *termoplásticos* a su vez se clasifican en *plastómeros* y *elastómeros*; los *plastómeros* son el polietileno (PE), polipropileno (PP), EVA (Etileno Acetato de Vinilo), y el PVC (Policloruro de Vinilo), los *elastómeros* son el SBR (Estireno Butadieno, Hule), hule natural Isopreno, hules sintéticos neopreno y el SBS (Estireno Butadieno Estireno).

ASFALTO MODIFICADO CON EL POLÍMERO TIPO I

Descripción:

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de las mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en bloques de Estireno, en polímeros elastoméricos radiales de tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones como Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), o Estireno-Butadieno (SB), entre otras.

USOS:**TIPO I-A**

Apropiado para mezclas de concreto asfáltico en climas fríos y en aplicaciones de tratamiento y calafateo de grietas. (Tabla 16).

TIPO I-B

Adecuado para la elaboración de concreto asfáltico y aplicaciones selladoras en climas moderados o fríos. (Tabla 16).

TIPO I-C

Adecuado para la elaboración de concreto asfáltico y aplicaciones selladoras calientes en climas más calientes que *I-B*. (Tabla 16).

TIPO I-D

Aplicación en climas calientes en donde el concreto asfáltico debe ser utilizado en áreas de alto volumen de tránsito con un gran porcentaje de camiones. (Tabla 16).⁽³⁾

		I-A	I-B	I-C	I-D
Penetración a 25°C, 100 gramos, 5 segundos	mín	100	75	50	40
	máx	150	100	75	75
Penetración a 4°C, 200 gramos, 60 segundos	mín	40	30	25	25
Viscosidad a 60°C, P	mín	1,000	2,500	5,000	5,000
Viscosidad a 135°C, cst	máx	2,000	2,000	2,000	2,000
Punto de Reblandecimiento, Anillo y Bola, °C	mín	43	49	54	60
Punto de Encendido, °C	mín	218	218	240	240
Solubilidad en Tricloroetileno, %	mín	99	99	99	99
Separación, Diferencia de Anillo y Bola, °C	máx	2.2	2.2	2.2	2.2
Residuo RTFOT o TFOT					
Recuperación Elástica 25°C	mín	45	45	45	50
Penetración a 4°C, 200 gramos, 60 segundos	mín	20	15	13	13
* Solubilidad de asfalto original por ASTM D-2042.					

TABLA 16. Polímeros tipo I.

FUENTE: PRIDARSA: Promotora e Industrializadora de Asfaltos y Rebajados, S.A. de C.V.

ASFALTO MODIFICADO CON EL POLÍMERO TIPO II

Descripción:

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Está fabricado con base en *polímeros elastoméricos* lineales, mediante una configuración de caucho de Estireno, Butadieno – Látex o Neopreno – Látex.

USOS:**TIPO II-A**

Apropiado para mezclas elaboradas en caliente, en condiciones de servicio en clima frío y en aplicaciones de tratamientos superficiales y calafateo de grietas. (Tabla 17).

TIPOS II-B y II-C

Todos los grados propuestos para granulometría abierta de concreto asfáltico y aplicaciones de sello en climas calientes. (Tabla 17).⁽³⁾

I. GENERALIDADES SOBRE PAVIMENTOS FLEXIBLES

		II-A	II-B	II-C
Penetración a 25°C, 100 gramos, 5 segundos	mín	100	70	80
Viscosidad a 60°C	mín	800	1,600	1,600
Viscosidad a 135°C, cst	máx	2,000	2,000	2,000
Ductilidad a 4°C, 5 cpm, centímetros	mín	50	50	25
Punto de Encendido, °C	mín	240	240	240
Solubilidad en Tricloroetileno*, %	mín	99	99	99
Rigidez, 25°C, centímetros, kilogramos	mín	420	615	615
Tenacidad, 25°C, centímetros, kilogramos	mín	280	420	420
Residuo RTFOT o TFOT				
Viscosidad 60°C, P	máx	4,000	8,000	8,000
Ductilidad a 4°C, 5 cpm, centímetros	mín	25	25	8
Rigidez, 25°C, centímetros-kilogramos	mín			615
Tenacidad, 25°C, 50 ipm, centímetros-kilogramos	mín			420
* Solubilidad de asfalto original por ASTM D-2042.				

TABLA 17. Polímeros tipo II.

FUENTE: PRIDARSA: Promotora e Industrializadora de Asfaltos y Rebajados, S.A. de C.V.

ASFALTO MODIFICADO CON EL POLÍMERO TIPO III

Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Está fabricado con base en un polímero del tipo *plastòmero*, mediante configuraciones como Etil – Vinil – Acetato (EVA), o polietileno de alta o baja densidad (HDPE, LDPE), entre otras.

USOS:

Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

Estos asfaltos *Tipo III* se distinguen por diferencias en consistencia a 4°C, utilizando la prueba de penetración y una temperatura alta utilizando la prueba del punto de encendido. (Tabla 18).⁽³⁾

		III-A	III-B	III-C	III-D	III-E
Penetración a 25°C, 100 gramos, 5 segundos	mín	30	30	30	30	30
	máx	130	130	130	130	130
Penetración a 4°C, 200 gramos, 60 segundos	mín	48	35	26	18	12
Viscosidad a 60°C, P	mín	150	150	150	150	150
Viscosidad a 135°C, cst	máx	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
Punto de Reblandecimiento, Anillo y Bola, °C	mín	51	54	57	60	63
Punto de Encendido, °C	mín	218	218	218	218	218
Separación, Diferencia de Anillo y Bola °C		Homog.	Homog.	Homog.	Homog.	Homog.
Residuo RTFOT o TFOT						
Pérdida, %	máx	1	1	1	1	1
Penetración a 4°C, 200 gramos, 60 segundos	mín	24	18	13	9	6

TABLA 18. Polímeros tipo III.

FUENTE: PRIDARSA: Promotora e Industrializadora de Asfaltos y Rebajados, S.A. de C.V.

A continuación se enlistan algunos productos utilizados y su nombre comercial así como el tipo de producto:

Producto	Proveedor	Tipo de producto
Kraton D1111	Shell	SBS (Estireno Butadieno Estireno)
Kraton D 1184	Shell	SBS (Estireno Butadieno Estireno)
Europrene 405	Eniquen	SBS (Estireno Butadieno Estireno)
Solprene 411	Negromex	SBS (Estireno Butadieno Estireno)
Elvax 150	Dupont	SBR (Estireno Butadieno Hule)
Làtex 115	Dupont	SBR (Estireno Butadieno Hule)
Solprene 1205	Negromex	SBR (Estireno Butadieno Hule)
Elvaloid	Dupont	SBRS (Estireno Butadieno Hule Estireno)

TABLA 19. Polímeros comerciales.

FUENTE: PRIDARSA: Promotora e Industrializadora de Asfaltos y Rebajados, S.A. de C.V.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros para la selección del polímero, puntos a considerar:

Equipo	Equipo requerido para realizar la mezcla como es tipo y potencia del agitador
Tiempo de mezclado	Tiempo requerido para lograr la completa integración del polímero.
Nivel	Cantidad del polímero requerido como porcentaje en peso de asfalto empleado.
Otros aditivos	Requerimiento de solventes o aditivos adicionales.
Manejo	Facilidad de manejo de la mezcla asfalto-polímero.
Estabilidad	Posibilidad de la mezcla a ser almacenada por períodos largos.
Presentación del asfalto	Posibilidad de integrarse al tipo de mezcla asfáltica disponible.

TABLA 20. Selección del tipo de polímero

FUENTE: PRIDARSA: Promotora e Industrializadora de Asfaltos y Rebajados, S.A de C.V.

Los asfaltos modificados con polímeros elevan la vida útil de un pavimento de dos a tres veces (según el caso a aplicar), con un costo adicional de hasta un 25% sobre la mezcla asfáltica. Está plenamente probado que los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en una amplia gama de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito. Sin embargo, el creciente incremento de volumen del tránsito y la magnitud de las cargas, y la necesidad de optimizar las inversiones, provoca que, en algunos casos, las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes. Por ejemplo, con los asfaltos convencionales, aún con los grados más duros, no es posible eliminar el problema de las deformaciones producidas por el tránsito canalizado (ahuellamiento), especialmente cuando se deben afrontar condiciones de alta temperatura. Además, con la simple adopción de asfaltos más duros, se corre el riesgo de fisuraciones por efectos térmicos cuando las temperaturas son muy bajas.

Además de los asfaltos modificados con polímeros, algunos países emplean asfaltos especiales y multigrados, comúnmente denominados de *alto índice*. Los polímeros del tipo *SBS* son, por lejos, los más utilizados siguiéndole en las preferencias los *plastómeros* del tipo *EVA*. El uso de asfaltos especiales o de *alto índice* no ha alcanzado hasta el momento el mismo crecimiento que los asfaltos modificados con polímeros pero se observan buenas perspectivas de crecimiento. Una crítica generalizada es que se ha enfatizado mostrar las ventajas técnicas de los asfaltos modificados, pero se han realizado pocos estudios que tengan en cuenta la relación beneficio - costo.⁽⁵⁾

1.7.2 HULE MOLIDO

Las llantas de los vehículos al término de su ciclo de vida útil, se convierten en un desecho no biodegradable. La eliminación de llantas es un problema mundial debido al gran número de que anualmente se desechan. Sin embargo, actualmente existe una industria en nuestro país que se encarga del reciclado de llantas para la obtención del *hule molido*, acero y fibras sintéticas. El *hule molido* se emplea principalmente para asfaltos mejorados y una gran variedad de artículos de hule.

Actualmente en nuestro país, sólo se utiliza el asfalto ahulado en tratamientos superficiales de carpetas. Al utilizar asfalto ahulado en un tratamiento superficial se obtiene una superficie duradera a prueba de agrietamientos, permitiendo flexibilidad para adecuarse a los movimientos de la superficie del pavimento existente.

La vida del pavimento se prolonga varias veces al tener menor cantidad de agua que entra a la *base*, *sub-base* y *capa subrasante*, al proporcionar una membrana a prueba de agua obteniendo una estabilidad máxima de la estructura.

Al utilizar carpetas con asfalto ahulado, además de obtener un sello a prueba de agua minimizando y retrasando la reflexión de grietas, existe un mejor confort en el manejo, extiende la vida del pavimento, mayor resistencia a las deformaciones permanentes y al deslizamiento, y se puede aumentar la resistencia de la carpeta.

Actualmente, la *Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos* han implementado como parte de su programa de modernización de las carreteras que operan, la construcción de carpetas delgadas de graduación abierta (Open-Graded), con la incorporación de hule molido de neumáticos en porcentajes que van del 6% al 17% en relación con el peso del cemento asfáltico utilizado para la elaboración de la mezcla.

OBTENCIÓN DEL HULE MOLIDO

Existen dos principales procesos para la obtención de *hule molido*:

- 1) El *proceso mecánico*, que consiste en eliminar los cinturones de acero de las llantas, después la llanta es llevada a un equipo triturado donde se reduce la llanta a tamaños aproximados entre 25 y 40 cm². Éste producto es llevado a tolvas instaladas en la entrada de los granuladores. El granulador recibe el producto y lo lleva a una serie de moliendas por medio de cuchillas que pulverizan el hule. Dentro de estos procesos, existen sistemas magnéticos que separan el acero y el metal expulsándolo mediante un tubo vibratorio a los depósitos principales de recolección de acero. El hule pasa a una mesa vibratoria donde está instalado un sistema de vacío que elimina la fibra sintética que tiene la llanta. Después de éste paso, se transporta el hule a unas cribas que permiten seleccionar las medidas deseadas de acuerdo a las necesidades de granulometría del mercado.
- 2) El *proceso criogénico*, que se basa en el aprovechamiento de la capacidad de enfriamiento del nitrógeno líquido (-196°C), para congelar el hule hasta el punto en que se torna quebradizo, se logra una temperatura por debajo de la transición vítrea, en la que se comporta frágil, llevándose a cabo la pulverización en ausencia de oxígeno, permitiendo de ésta manera proteger la superficie envolvente de cada partícula del polvo pulverizado con antioxidantes, antiozonantes, etc., evitando así, la degradación del producto.

PROPIEDADES DEL HULE MOLIDO

- Absorción de cargas y esfuerzos.
- Resilencia.
- Resistencia al torque.
- Aislante térmico y eléctrico.
- Baja permeabilidad.
- Resistencia al intemperismo y luz solar, cambios bruscos de temperatura, lluvia.
- Resistencia al ozono.
- Resistencia al envejecimiento, viscosidad constante.
- Resistencia al desgarre.
- Resistencia a la abrasión.
- Resistencia a la humedad.

INCORPORACIÓN DEL HULE MOLIDO AL ASFALTO

El equipo necesario para el procedimiento de modificación de asfalto con *hule molido* es el siguiente:

a) Tanque de calentamiento del asfalto

Un tanque de calentamiento de asfalto con un sistema de transferencia de calor a través de aceite caliente o un sistema de calentamiento con retorno capaz de calentar el cemento asfáltico a la temperatura necesaria para mezclarla con el hule granulado. Ésta unidad debe ser capaz de calentar un mínimo de 10,000 litros de cemento asfáltico, a una temperatura de 200°C.

b) Mezcladora

La mezcladora mecánica de asfalto ahulado debe tener un proceso de mezclado continuo de dos etapas, capaz de producir una mezcla homogénea de cemento asfáltico y hule granulado, con las relaciones especificadas en el diseño de la mezcla. La capacidad máxima del tanque de mezclado primario deberá ser de 2,000 litros. La unidad de mezclado deberá ser capaz de mezclar por completo las partículas individuales de hule con el cemento asfáltico. Se requieren bombas separadas de alimentación de cemento asfáltico y de producto terminado. Ésta unidad debe tener tanto un medidor catalizador de cemento asfáltico en litros y un medidor de flujo en litros por minuto.

c) Tanque de almacenamiento / reacción

Un tanque de almacenamiento/reacción de asfalto ahulado equipado con un sistema de calentamiento debe mantener una temperatura de 155°C a 196°C para la reacción, el bombeado y para la adición del cemento al agregado. El tanque de almacenamiento/reacción, debe estar separado de las mezcladoras primaria y secundaria de la unidad mezcladora. La capacidad máxima del tanque de almacenamiento/reacción debe ser de 32,000 litros. Ésta unidad debe tener un dispositivo interno de mezclado capaz de mantener una mezcla uniforme de cemento asfáltico y de hule granulado.

d) Sistema de alimentación

Un sistema de alimentación de asfalto ahulado equipado con una bomba y un dispositivo de medición interconectado directamente capaz de dosificar el cementante por volumen al agregado al porcentaje requerido por la fórmula de la mezcla de trabajo.

e) Medidor de temperatura

Un termómetro reforzado, del rango adecuado, con lectura de temperaturas, debe estar fijo en la línea de alimentación del asfalto ahulado en la localización adecuada cerca de la unidad de mezclado.

CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO AHULADO

- El polvo de llanta criogénicamente pulverizado conserva sus propiedades físicas originales al agregarlo al asfalto, que comprenden resistencia, elasticidad, absorción de carga, resistencia al desgarre, abrasión, resistencia a la humedad e intemperismo y al ozono, así como aislamiento térmico y eléctrico.
- El beneficio - costo por el uso de hule de llanta pulverizado criogénicamente, justifica su empleo en carpetas asfálticas, bacheos, que se someten a trabajo rudo, altas velocidades y que buscan un bajo costo de mantenimiento y largos períodos entre reparaciones y rehabilitaciones.
- El hule reciclado de llanta, mezclado al asfalto en proporción de 10% a 20%, provoca mayor unión y duración de la molécula del asfalto para calles y carreteras.
- Ofrecen de 10 a 15 veces más duración del asfalto con hule que sin él.

PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO Y REACCIÓN DEL ASFALTO AHULADO

1) Temperatura del cemento asfáltico

La temperatura del cemento asfáltico debe estar entre 177°C y 204°C en el momento de adicionar el hule molido.

2) Mezclado y reacción

El asfalto y el hule granulado deberán ser combinados y mezclados en una unidad de mezclado, bombeado hacia el tanque de reacción y almacenamiento con agitador y luego dejarlo reaccionar por un mínimo de 45 minutos desde que se adiciona el hule granulado al cemento asfáltico. Se deberá mantener la temperatura de la mezcla de asfalto ahulado a no menos de 177°C durante el período de reacción. Puede permitirse que se enfríe el asfalto ahulado hasta 155°C después de que ha reaccionado durante el período especificado.

3) Medición

Después de que el material ha reaccionado durante por lo menos 45 minutos, el asfalto ahulado deberá ser medido al ser enviado a la cámara de mezclado de la planta de producción de concreto asfáltico al porcentaje requerido por la fórmula de la mezcla de trabajo aprobada.

4) Almacenamiento

Cuando ocurra una demora o atraso en el uso del cementante después de que ha reaccionado por completo, debe recalentarse el asfalto ahulado lentamente justo antes de usarlo, a una temperatura entre 155°C y 196°C debiendo estar muy bien mezclado antes de medirlo al ser bombeado a la planta caliente para combinarlo con el agregado. El proveedor de asfalto ahulado debe verificar la viscosidad del asfalto ahulado. Si la viscosidad está fuera del rango especificado, debe ser ajustada con la adición de cemento asfáltico o hule granulado para producir un material con la viscosidad apropiada.

MEZCLADO DE AFALTO AHULADO Y AGREGADO

Debe hacerse la adición y el mezclado del asfalto ahulado con el agregado, con uno de los siguientes tipos de plantas de asfalto de mezclado en caliente:

- a) Planta de mezclado por cargas, consistiendo de almacenamiento y alimentación de agregado frío, secador, unidad de control de granulometría, torres de almacenamiento de agregado caliente, tolva de agregado y unidad de mezclado de doble flecha. También, la planta puede estar equipada con torres de almacenamiento o tolvas de la mezcla caliente para almacenar la mezcla por corto tiempo hasta que sea tendida.
- b) Planta de mezclado en tambor secador, consistiendo de almacenamiento y alimentación de agregado frío, sistema automático de pesaje, mezclador de tambor secador y torres de almacenamiento o tolvas de mezcla caliente para almacenar por corto tiempo la mezcla hasta que sea tendida.
- c) El asfalto ahulado debe estar a una temperatura de 155°C a 196°C al ser medido cuando sea bombeado a la planta apropiada. El agregado debe ser secado y calentado para suministrar el concreto asfáltico inmediatamente después de ser mezclado, teniendo una temperatura que no exceda 166°C y un contenido de humedad que no exceda de 1 % del peso de la mezcla.⁽⁶⁾

1.8 PRUEBAS DE LABORATORIO

1.8.1 EN CEMENTOS ASFÁLTICOS

1.8.1.1 PESO ESPECÍFICO

Para evitar que varíe el peso específico del material, debido a cambios de volumen a diferentes temperaturas, el peso específico se determina a una temperatura fija. La temperatura escogida es 15.6°C y se indica así:

Peso específico 15.6°/15.6°. Esto quiere decir que se relaciona el peso de un determinado volumen de asfalto a 15.6°C de temperatura, con el peso de igual volumen de agua a la misma temperatura. La determinación del *peso específico* de materiales asfálticos, sirve para hacer las correcciones volumétricas correspondientes, cuando los materiales tienen temperaturas elevadas, y además, para calcular el porcentaje de vacíos en las mezclas asfálticas compactadas.⁽⁷⁾

1.8.1.2 PUNTO DE INFLAMACIÓN

El *punto de inflamación* de un producto asfáltico es la temperatura a la que, durante el calentamiento, se inflaman o arden sus vapores cuando se ponen en contacto con una llama. Para determinar el *punto de inflamación* de los productos asfálticos se emplean usualmente dos tipos

de aparatos. Se usa el *vaso abierto Tagliabue* para los *asfaltos rebajados* cuyo punto de inflamación es relativamente bajo; para productos de *punto de inflamación* más elevado se utiliza el *vaso abierto de Cleveland*. El *punto de inflamación* o de llama de un producto es la temperatura crítica a partir de la cual deben tomarse precauciones adecuadas para evitar peligros de incendio durante su calentamiento y manipulación. (Fig. 1.9).⁽⁷⁾

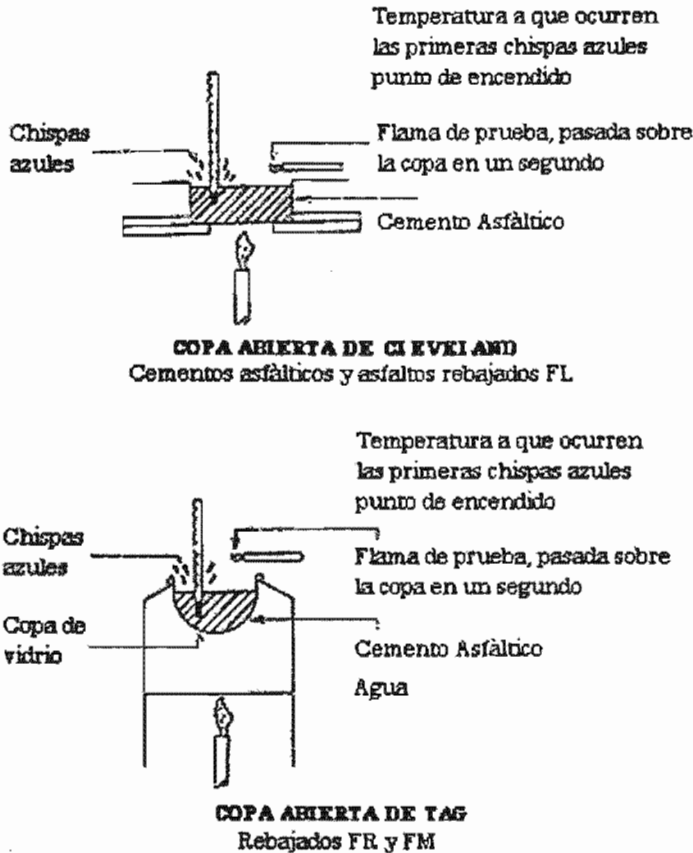


FIGURA 1.9 Represtación del ensayo de punto de inflamación.

1.8.1.3 PENETRACIÓN A 25 °C

Método ASTM D - 5

La *penetración* de un material bituminoso es la distancia en décimas de milímetro que una aguja estándar penetra verticalmente en la muestra, bajo condiciones normalizadas de carga, tiempo y a 25°C, porque es la temperatura ambiente media.

Para realizar la prueba se requiere:

- Cualquier tipo de aparato de penetración que permita el movimiento del vástago, sin que se tenga una fricción apreciable y que esté perfectamente calibrado para aportar resultados de acuerdo con la descripción del término "penetración".

Cuando la aguja va montada en la mordaza, el peso del vástago debe ser de 47.5 ± 0.05 gr. Cualquiera que sea el aditamento del montaje, el peso total del vástago con la aguja debe ser de 50 ± 0.1 gr. Debe contar con pesas de 50 ± 0.1 gr. y de 100 ± 0.1 gr. para poder tener pesos totales de 100 gr. y 200 gr., según las condiciones de la prueba.

El vaso de traslado para el recipiente debe ser un cilindro de metal o de vidrio con fondo plano, provisto de algún medio que asegure un apoyo firme para evitar que el recipiente se balancee. Debe tener un diámetro interior mínimo de 90 mm. y una altura mínima de 55 mm. por encima de los apoyos del fondo. El termómetro deberá estar en inmersión a 150 ± 15 mm. con un rango de 18°C a 27°C. (ASTM E-1).⁽⁷⁾

El procedimiento es el siguiente:

- 1) Al hacer la prueba, la muestra se debe colocar en el vaso de traslado con agua del baño, en cantidad suficiente para cubrir completamente el recipiente. Después se coloca el vaso de traslado que contiene la muestra sobre el soporte del penetrómetro. La aguja cargada con el peso especificado, se ajusta de modo que haga contacto con la superficie de la muestra, por medio de una fuente luminosa convenientemente situada se puede apreciar mejor. Después se anota la lectura de la escala o se pone la manecilla en cero. Se suelta la aguja durante el período de tiempo especificado, tras lo cual se ajusta el vástago del penetrómetro para leer la distancia penetrada.
- 2) Se deben hacer por lo menos tres pruebas sobre puntos de la superficie de la muestra, que no estén a menos de 1 cm. de la pared del recipiente, ni a menos de 1 cm. de distancia entre sí. Después de cada prueba, la muestra y el vaso de traslado se deben regresar al baño de agua, mientras la aguja se limpia cuidadosamente hacia su punta; primero con un paño limpio humedecido con Tetracloruro de carbono o Tricloroetano, para quitar todo el asfalto adherido y después con un paño limpio y seco. La penetración reportada debe ser el promedio calculado aproximado a la unidad más cercana de por lo menos tres pruebas, cuyos valores individuales no deben diferir del promedio en más de las tolerancias calculadas con aproximación de una unidad para dicha penetración. Las tolerancias se deben calcular como sigue:

$$\text{Tolerancia} = \frac{\text{Penetración}}{100} \pm 1$$

- 3) Cuando se desee variar la temperatura y con el objeto de proporcionar un método uniforme para reportar los resultados los resultados si hay variaciones, se sugieren las siguientes combinaciones de temperatura, tiempo y carga:

- A 0°C, 200 gr. de carga, 60 segundos.
- A 46.1°C, 50 gr. de carga, 5 segundos.

Cuando se tengan penetraciones de 5 segundos o menos y se requieren resultados más significativos, la prueba se puede hacer empleando una carga creciente. Se sugieren incrementos de 100 gr. cuando se hagan variaciones. Las muestras deben ser preparadas de acuerdo con las instrucciones anteriores, aunque tenga que usar salmuera en lugar de agua, en el baño si es necesario para mantener las bajas temperaturas.

Los resultados de las pruebas por éste método, deben ser obtenidos por distintos laboratoristas dentro de los límites arriba y abajo del resultado promedio, como sigue:

$$\text{Límite} = (\pm) \frac{\text{Penetración Promedio}}{50}$$

En la Fig. 1.10 muestra el procedimiento general para la *prueba de penetración*:

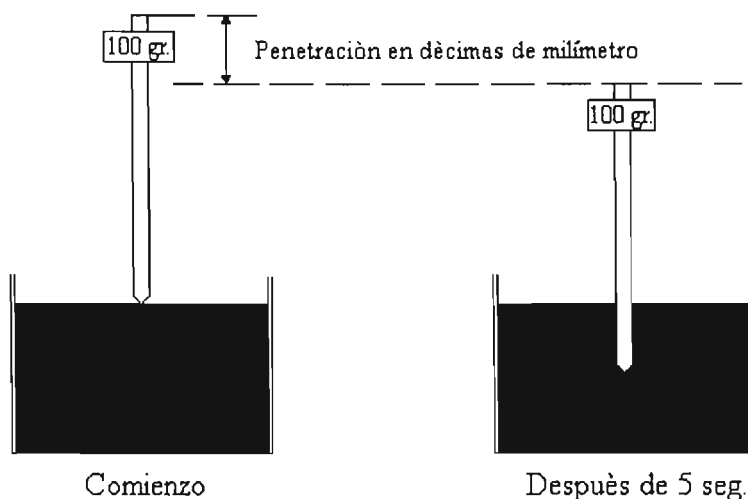


FIGURA 1.10 Representación esquemática de la prueba de penetración.

1.8.1.4 DUCTILIDAD

Método ASTM D 113 - 44

Se llama *ductilidad* a la distancia en centímetros que una probeta de asfalto de dimensiones determinadas puede estirarse sin romperse. La sección transversal mínima de la pieza de asfalto es de 1 cm^2 . El ensayo normal de ductilidad del asfalto se hace a una temperatura de $25^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$, y la velocidad de separación de los dos extremos de la pieza es de $5 \text{ cm. /min.} \pm 5\%$.

El baño de agua debe mantenerse a la temperatura de prueba especificada, con variaciones no mayores de 0.1°C con respecto a dicha temperatura. El volumen de agua no debe ser menor de 10 litros y la muestra debe ser sumergida a una profundidad no menor de 10 cm. y debe estar colocada sobre un entrepaño perforado que se halle a no menos de 5 cm. del fondo del baño.

Una *ductilidad* alta es deseable en caminos para que no se agriete la carpeta al presentarse algún desplazamiento.

El procedimiento es como sigue:

Se amalgaman dos piezas laterales removibles del molde de latón para formar la briqueta de prueba y la placa de cobre para evitar que se adhiera el asfalto. Para ello se aplicará con un trapo una pasta formada por glicerina y arcilla de china. Se colocará el molde encima de la placa en posición horizontal y se vaciará el asfalto que ha sido previamente fundido a la temperatura más baja posible, hasta alcanzar un nivel ligeramente mayor que el de enrase. Se deja enfriar a la temperatura ambiente durante 40 minutos, después de lo cual se sumergirán la briqueta y la placa en un baño de agua a 25°C y se mantendrá en él durante una hora y media, después de lo cual se quitarán las piezas laterales y la placa de cobre e inmediatamente se colocará la briqueta en el aparato de prueba debiendo quedar el nivel de agua a no menos de 2.5 cm. de la cara superior de la briqueta. Se pondrá en marcha el aparato, se medirá la distancia a que ha desalojado la mordaza hasta que se rompa la briqueta. Ésta distancia, en centímetros, expresará la *ductilidad del asfalto*. (Fig. 1.11).⁽⁷⁾

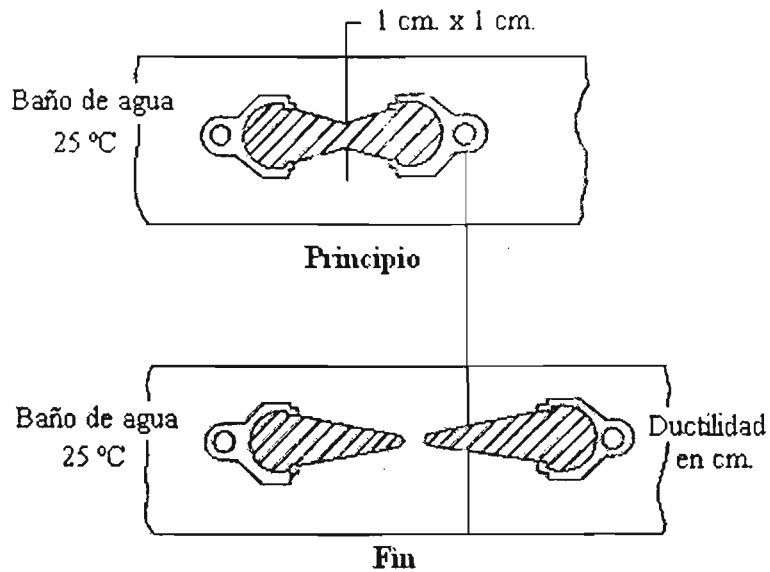


FIGURA 1.11 Representación de la prueba de ductilidad.

1.8.1.5 VISCOSIDAD DINÁMICA

Ésta prueba permite determinar la consistencia de los materiales asfálticos mediante sus características de flujo a una temperatura de 60°C. Es aplicable a materiales asfálticos que tengan una viscosidad de 4.2 a 20,000 Pa-s (42 a 200,000 P).

La prueba consiste en determinar el tiempo que tardan en pasar 20 ml. del material por probar a través de un tubo capilar al vacío, bajo condiciones de presión y temperatura preestablecidas, corregido por el factor de calibración del viscosímetro.

1) EQUIPO

a) Viscosímetro

De tipo capilar, cilíndrico, hecho de vidrio de borosilicato templado. Puede ser de los siguientes tipos:

- Viscosímetro capilar de vacío del Instituto del Asfalto (AIVV)

Contará con bulbos de medición (*B, C y D*), localizados en el brazo (*M*), del viscosímetro, el cual es un capilar de vidrio perforado de precisión. Los bulbos serán segmentos capilares y estarán separados por marcas para cronometraje (*F, G, H, I*). Además el viscosímetro contará con un soporte que lo mantenga en posición vertical cuando se coloque en el baño, aplicando vacío al líquido; como el mostrado en la Fig. 1.12 y que cumpla con las características en la tabla 21.⁽⁹⁾

Magnitud	Unidad	Símbolo	Unidad base
Viscosidad dinámica	poise	η	Pa-s
Viscosidad cinemática	stokes	ν	m ² /s

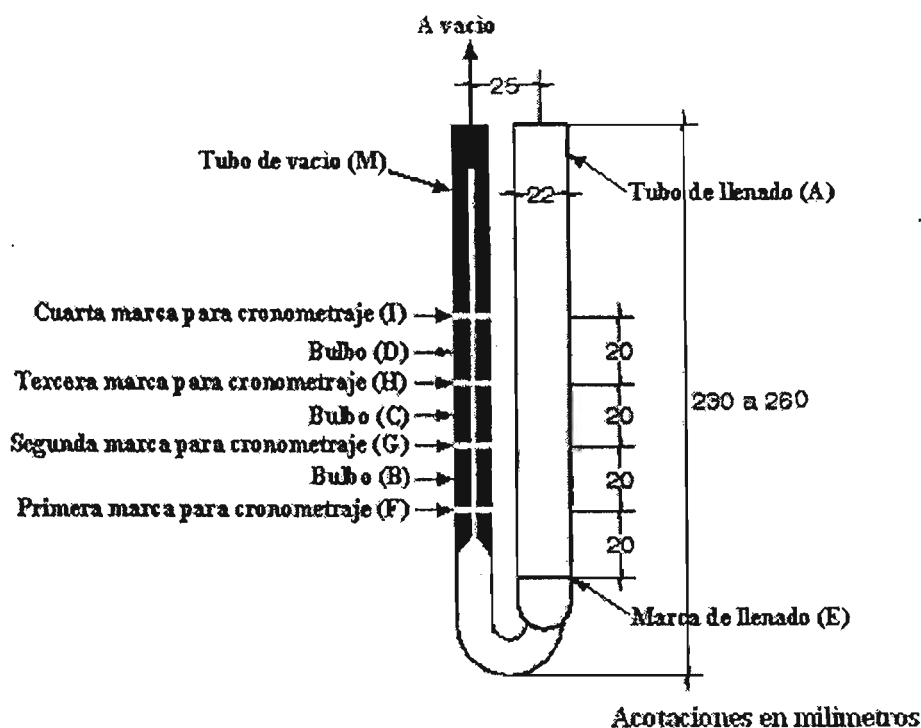


FIGURA 1.12. Viscosímetro capilar de vacío del Instituto del Asfalto (AIVV).

FUENTE: NORMA SCT
N-MMP 4-05-002/02

TABLA 21. Tamaños de viscosímetros estándar, radio capilar, factores de calibración aproximados (K) y rangos de viscosidad para viscosímetros capilares de vacío del Instituto del Asfalto (AIVV).

Tamaño nominal	Radio capilar mm	Factor de calibración aproximado (K) ^[1] Vacío de 300 mm Hg Pa (P/s)			Rango de viscosidad dinámica, η ^[2] Pa-s (P)
		Bulbo B	Bulbo C	Bulbo D	
25	0.125	0.2(2)	0.1(1)	0.07(0.7)	4.2 a 80 (42 a 800)
50	0.25	0.8(8)	0.4(4)	0.3(3)	18 a 320 (180 a 3200)
100	0.5	3.2(32)	1.6(16)	1(10)	60 a 1280 (600 a 12800)
200	1.0	12.8(128)	6.4(64)	4(40)	240 a 5200 (2400 a 52000)
400	2.0	50(500)	25(250)	16(160)	960 a 20000 (9600 a 200000)
400R ^[3]	2.0	50(500)	25(250)	16(160)	960 a 14000 (9600 a 140000)
800R ^[3]	4.0	200(2000)	100(1000)	64(640)	3800 a 580000 (38000 a 5800000)

[1] Los factores de calibración exactos se obtendrán con viscosidad estándar.

[2] Los rangos de viscosidad corresponden a tiempos de llenado de 60 y 400 segundos. en ocasiones especiales se puede utilizar tiempos de flujo mayores, incluso superiores a 1000 segundos.

[3] En estos casos se tienen marcas adicionales a 5 y 10 mm. arriba de la marca para cronometraje F (ver Fig. 1.12), para diseños especiales de asfaltos en cubiertas. Así, el rango de viscosidad máxima se incrementa respecto a aquel que utiliza al factor de calibración del bulbo B.

FUENTE: NORMA SCT
N-MMP 4-05-002/02

- Viscosímetro de vacío Koppers modificado (MKVV)

Consistirá en un tubo de llenado (A), y un tubo de vidrio perforado capilar de vacío de precisión (M), unidos por una junta de borosilicato (N), con un filo estándar 24/40. Los bulbos de medición (B, C y D), serán segmentos capilares de 20 mm. de longitud, separados por marcas para

cronometraje (F, G, H, I). Además contará con un soporte que lo mantenga en posición vertical cuando se coloque en el baño; como el mostrado en la Fig. 1.13 y que cumpla con las características de la tabla 22. ⁽⁹⁾

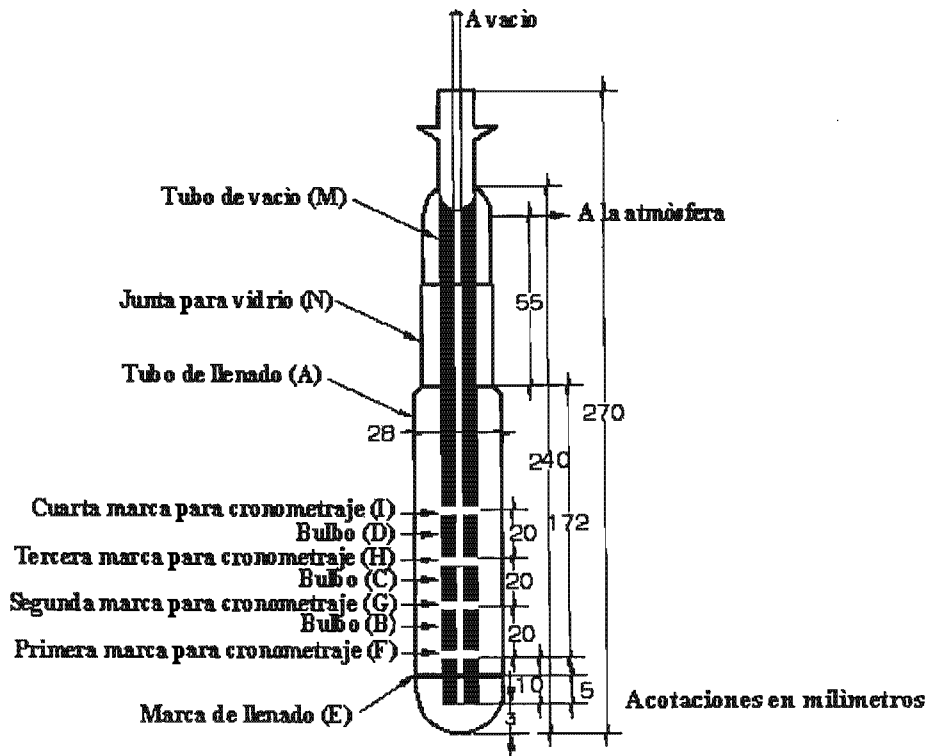


FIGURA 1.13. Viscosímetro capilar de vacío de Koppers modificado (MKVV).

FUENTE: NORMA SCT
N-MMP 4-05-002/02

TABLA 22. Tamaños de viscosímetros estándar, radio capilar, factores de calibración aproximados (K) y rangos de viscosidad para viscosímetros capilares de vacío Koppers modificados (MKVV).

Tamaño nominal	Radio capilar mm	Factor de calibración aproximado (K) ^[1] Vacío de 300 mm Hg Pa (P/s)			Rango de viscosidad dinámica, η ^[2] Pa-s (P)
		Bulbo B	Bulbo C	Bulbo D	
25	0.125	0.2(2)	0.1(1)	0.07(0.7)	4.2 a 80 (42 a 800)
50	0.25	0.8(8)	0.4(4)	0.3(3)	18 a 320 (180 a 3200)
100	0.5	3.2(32)	1.6(16)	1(10)	60 a 1280 (600 a 12800)
200	1.0	12.8(128)	6.4(64)	4(40)	240 a 5200 (2400 a 52000)
400	2.0	50(500)	25(250)	16(160)	960 a 20000 (9600 a 200000)

[1] Los factores de calibración exactos se obtendrán con aceites de calibración de viscosidad estándar.

[2] Los rangos de viscosidad corresponden a tiempos de llenado de 60 y 400 segundos. en ocasiones especiales se puede utilizar tiempos de flujo mayores, incluso superiores a 1000 segundos.

FUENTE: NORMA SCT
N-MMP 4-05-002/02

b) Termómetro

- De inmersión total, con escala que abarque de 0°C a 150°C y aproximación de 0.2°C.

c) Baño

- Con las dimensiones adecuadas para que la marca para cronometraje superior de los viscosímetros, pueda ubicarse por lo menos a 20 mm. por debajo de la superficie del líquido del baño.
- Que permita observar en todo momento tanto el viscosímetro como el termómetro.
- Que forme parte integral del viscosímetro o que cuente con un soporte firme para éste último.

d) Sistema de vacío

- Que tenga un sistema como el que se muestra en la Fig. 1.14.
- Capaz de mantener un nivel de vacío de hasta 300 mm. de mercurio con aproximación de ± 0.50 mm. de mercurio.
- A base de tubos de vidrio con un diámetro interior de 6.35 mm. ($1/4''$), con juntas herméticas entre los tubos que garanticen que no se pierda el vacío.
- Que cuente con un manómetro de mercurio con un extremo abierto, con aproximación de 1 mm. de mercurio y una bomba de vacío.

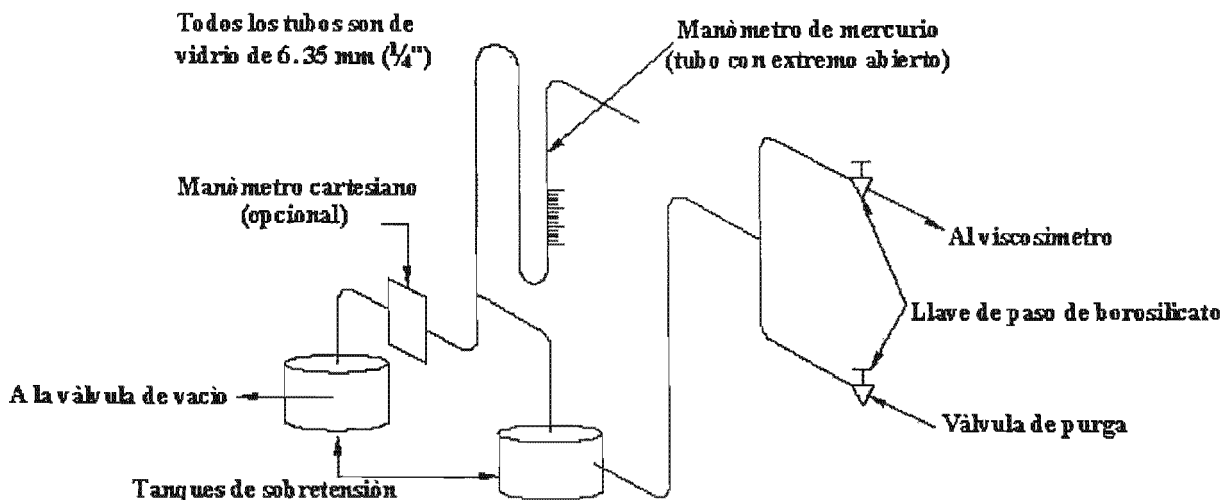


FIGURA 1.14. Sistema de vacío sugerido para viscosímetros capilares de vacío.

FUENTE: NORMA SCT

N-MMP 4-05-002/02

e) Cronómetros

- Dos cronómetros, con aproximación de 0.1 segundo y precisión de $\pm 0.05\%$

f) Líquido para llenar el baño

- Agua destilada.

2) MUESTRA DE CEMENTO ASFÁLTICO

- Se calienta la muestra en un recipiente apropiado, agitándola ocasionalmente para evitar el sobrecalentamiento local y distribuir el calor uniformemente hasta que adquiera la fluidez suficiente que facilite su vaciado.
- Se vacían 20 ml. de la muestra en un contenedor adecuado y se calienta hasta alcanzar una temperatura de $135^{\circ}\text{C} \pm 5.5^{\circ}\text{C}$, agitándola ocasionalmente para evitar el sobrecalentamiento local, distribuir el calor uniformemente y evitar que quede aire atrapado.

3) DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DINÁMICA

a) Calibración del viscosímetro de vacío por medio de un aceite de viscosidad estándar.

- Se calibrará mediante un aceite de viscosidad estándar cuando en la muestra de prueba se esperen las viscosidades dinámicas aproximadas señaladas en la tabla 23.

Viscosidad estándar	Viscosidad dinámica aproximada, η Pa-s (P)	
	A 20°C	A 38°C
N 30,000	150 (1500)	24 (240)
N 190,000	800 (8000)	160 (1600)
S 30,000	---	24 (240)

TABLA 23. Viscosidades estándar de aceites utilizados para la calibración de los viscosímetros.

FUENTE: NORMA SCT
N-MMP 4-05-002/02

- Se selecciona de la tabla 23, un aceite de viscosidad estándar que tenga un tiempo mínimo de 60 segundos a la temperatura de calibración.
- Se carga un viscosímetro limpio y seco con el aceite estándar hasta ± 2 mm. de la línea de llenado (E) (ver Fig. 1.12 y 1.13).
- Se coloca el viscosímetro cargado en el baño, manteniendo la temperatura de calibración con aproximación de $\pm 0.01^\circ\text{C}$.
- Se establece un vacío de 300 ± 0.5 mm. de Hg en el sistema de vacío y se conecta éste al viscosímetro con la llave de paso cerrada en la línea que va a éste último.
- Después de que el viscosímetro ha estado en el baño por 30 ± 5 min., se inicia el flujo del aceite estándar abriendo la llave de paso en la línea que va al sistema de vacío.
- Se mide el tiempo requerido para que la orilla principal del menisco, pase entre las marcas F y G, con aproximación de 0.1 segundos. Utilizando otro cronómetro, se mide el tiempo requerido para que la orilla principal del menisco pase entre las marcas para cronometraje G y H, con aproximación de 1 segundo. Si el instrumento contiene marcas para cronometraje adicionales, se determina de la misma manera el tiempo de flujo para cada bulbo sucesivo.
- Se calcula el factor de calibración K, para cada bulbo como sigue:

$$K = \frac{\eta_e}{t}$$

Donde:

K = Factor de calibración del bulbo (a 300 mm. de Hg), Pa.

η_e = Viscosidad dinámica del aceite de viscosidad estándar a la temperatura de calibración, Pa-s.

t = Tiempo de flujo, seg.

- Se repite el procedimiento de calibración utilizando la misma viscosidad estándar u otra viscosidad estándar distinta.
- Se calcula y registra el promedio del valor de calibración K para cada bulbo. Los resultados obtenidos en las dos deformaciones no deben variar más del 2% respecto a su promedio, en caso contrario se repetirá el procedimiento hasta que esto se cumpla.
- Es importante hacer notar que los factores de calibración del bulbo son independientes de la temperatura.

b) Procedimiento de la prueba.

El procedimiento de la prueba varía ligeramente según el tipo de viscosímetro que se utilice:

- Se mantiene el baño a $60^{\circ}\text{C} \pm 0.01^{\circ}\text{C}$, aplicando, en su caso, las correcciones necesarias en todas las lecturas del termómetro.
- Se selecciona un viscosímetro limpio y seco, que dé un tiempo de flujo mayor de 60 segundos y se precalienta a $135^{\circ}\text{C} \pm 5.5^{\circ}\text{C}$.
- Se carga el viscosímetro vertiendo la muestra preparada a ± 2 mm. de la línea de llenado (E) (ver Fig. 1.12 y 1.13).
- Se coloca el viscosímetro cargado en un horno o un baño, mantenidos a $135^{\circ}\text{C} \pm 5.5^{\circ}\text{C}$ por un período de 10 ± 2 min., para eliminar la mayor parte de las burbujas de aire atrapadas.
- Se retira el viscosímetro del horno o del baño y, en un tiempo no mayor de 5 min., se inserta el viscosímetro en un soporte y se coloca verticalmente en el baño, de tal manera que la marca para cronometraje superior, esté al menos 20 mm. por debajo de la superficie del líquido del baño.
- Se establece un vacío de 300 ± 0.5 mm. de Hg. en el sistema de vacío y se conecta éste al viscosímetro con la llave de paso cerrada.
- Después de que el viscosímetro ha estado en el baño por 30 ± 5 min., se inicia el flujo del material asfáltico abriendo la llave de paso en la línea que va al sistema de vacío.
- Se mide el tiempo requerido para que la orilla principal del menisco pase entre dos marcas para cronometraje sucesivas, que es el tiempo de flujo. Se reporta el primer tiempo de flujo que sea mayor de 60 segundos entre dos marcas para cronometraje sucesivas, registrando la letra de identificación de éstas últimas.
- Una vez completa la prueba, se deja drenar el viscosímetro para después limpiarlo perfectamente enjuagándolo varias veces con un solvente apropiado completamente miscible con la muestra, seguido por un solvente totalmente volátil. Posteriormente se seca el viscosímetro pasando por él una corriente lenta de aire seco filtrado durante 2 min., o hasta que la última marca de solvente desaparezca.

c) Cálculos y resultados

- Se selecciona el factor de calibración (K) que corresponda al par de marcas para cronometraje utilizadas para la determinación del tiempo de flujo. Se calcula la viscosidad mediante la siguiente expresión:

$$\eta = K \times t$$

Donde:

η = Viscosidad dinámica, en Pa-s.

K = Factor de calibración seleccionado, en Pa.

t = Tiempo de flujo, en seg.

- La *viscosidad dinámica* se reportará con una aproximación al milésimo, anotando además, la temperatura de prueba y la presión de vacío utilizada.

1.8.1.6 VISCOSIDAD CINEMÁTICA

Ésta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos mediante sus características de flujo a una temperatura de 135°C . Es aplicable a cementos asfálticos que tengan una viscosidad de 30 a $100,000 \text{ mm}^2/\text{s}$ (30 a 100,000 centistoke).

Magnitud	Unidad	Símbolo	Unidad base	Unidad derivada
Viscosidad cinemática	Stokes (st)	v	m^2/s	$1 \text{ mm}^2/\text{s} = 1 \text{ centistoke}$

La prueba consiste en determinar el tiempo que tardan en pasar 20 ml. del material por probar a través de un tubo capilar, bajo condiciones de temperatura preestablecidas, y multiplicar dicho tiempo por el factor de calibración del viscosímetro.

1) EQUIPO

El equipo para la ejecución de la prueba estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes. Todos los materiales por emplear serán de alta calidad, considerando siempre la fecha de su caducidad.

a) Viscosímetro

De flujo inverso, tipo *Zeitfuchs Cross-Arm*, capilar, cilíndrico, hecho de vidrio de borosilicato templado, como el mostrado en la Fig. 1.15.

b) Termómetro

De inmersión total, con escala que abarque de 0°C a 150°C y aproximación de 0.2°C .

c) Baño

- Con las dimensiones adecuadas para que la marca para cronometraje superior de los viscosímetros, pueda ubicarse por lo menos a 20 mm. por debajo de la superficie del líquido del baño.
- Que permita observar en todo momento tanto el viscosímetro como el termómetro.
- Que forme parte integral del viscosímetro o que cuente con un soporte firme para éste último.

d) Cronómetro

Con aproximación de 0.1 segundo y precisión de $\pm 0.05\%$

e) Líquido para llenar el baño

Aceite mineral, para determinaciones de la viscosidad a 135°C . Se puede utilizar agua destilada en el caso de que se deseen realizar determinaciones a 60°C .

f) Barómetro

Para medir la presión barométrica en el sitio donde se realice la prueba.

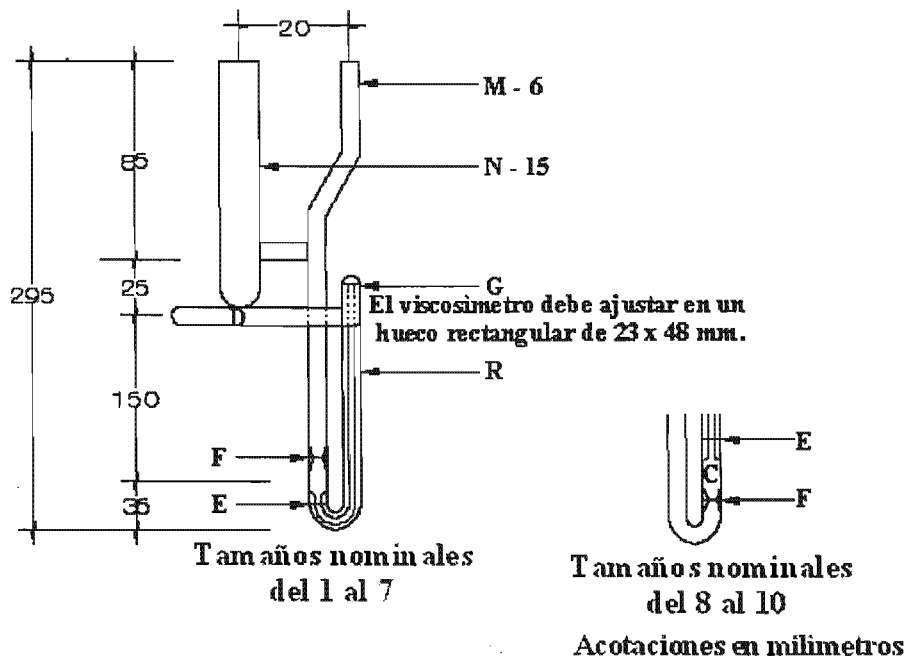


FIGURA 1.15. Viscosímetro Zeitfuchs Cross - Arm.

FUENTE: NORMA SCT
N-MMP 4-05-003/02

2) PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

- Se calienta la muestra en un recipiente apropiado, agitándola ocasionalmente para evitar el sobrecalentamiento local y distribuir el calor uniformemente hasta que adquiera la fluidez suficiente que facilite su vaciado.
- Se vacían 20 ml. de la muestra en un contenedor adecuado y se calienta hasta alcanzar una temperatura de $135^{\circ}\text{C} \pm 5.5^{\circ}\text{C}$, agitándola ocasionalmente para evitar el sobrecalentamiento local, distribuir el calor uniformemente y evitar que quede aire atrapado.

3) DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA

a) Calibración del viscosímetro por medio de un aceite de viscosidad estándar.

- Se selecciona de la tabla 24, un aceite de viscosidad estándar que tenga un tiempo mínimo de 20 segundos a 37.8°C y se mide el tiempo de flujo con aproximación de 0.1 segundo, de acuerdo con el procedimiento para la *determinación de la prueba*.

Viscosidad estándar	Viscosidad cinemática aproximada, a 37.8°C mm^2/s
S 60	60
S 200	200
S 600	600
S 2000	2000
S 8000	8000
S 30000	27000

TABLA 24. Viscosidades estándar de aceites utilizados para la calibración de los viscosímetros.

FUENTE: NORMA SCT
N-MMP 4-05-003/02

- Se calcula el factor de calibración C , como sigue:

$$C = \frac{v}{t}$$

Donde:

C = Factor de calibración, mm^2/s^2 .

v = Viscosidad cinemática del aceite de viscosidad estándar a 37.8°C , en mm^2/s .

t = Tiempo de flujo, en seg.

b) Procedimiento de la prueba.

- Se mantiene el baño a $135^{\circ}\text{C} \pm 0.03^{\circ}\text{C}$, aplicando, en su caso, las correcciones necesarias en todas las lecturas del termómetro.
- Se selecciona un viscosímetro limpio y seco, que dé un tiempo de flujo mayor de 60 segundos y se precalienta a $135^{\circ}\text{C} \pm 5.5^{\circ}\text{C}$.
- Se monta el viscosímetro en el baño manteniendo vertical el tubo N y se carga vertiendo la muestra preparada a través de dicho tubo dentro del tubo D , hasta que el nivel de la muestra esté a una distancia no mayor de 0.5 mm. de la línea de llenado G en el tubo del sifón (Fig. 1.15), cuidando que no se humedezcan las paredes del tubo N durante el vertido. La muestra debe estar libre de pelusa, partículas sólidas u otras materias ajenas.

- Se deja el viscosímetro en el baño hasta que la muestra haya alcanzado la temperatura de prueba de $135^{\circ}\text{C} \pm 0.03^{\circ}\text{C}$, pero no más de 30 minutos.
- Se aplica una ligera succión al tubo *N* para hacer que el menisco de la muestra de prueba se mueva hacia el tubo del sifón, hasta aproximadamente 30 mm. abajo del nivel del tubo *D* en el tubo capilar *R*, con lo que se provoca el flujo de la muestra por gravedad.
- Se mide el tiempo requerido para que la orilla principal del menisco pase de la marca *E* a la *F*, con aproximación de 0.1 segundo. Si éste tiempo de flujo es menor de 60 segundos, se selecciona un viscosímetro con un diámetro capilar menor y se repite el procedimiento de prueba como se indicó anteriormente.

c) Cálculos y resultados

- Se calcula la viscosidad cinemática mediante la siguiente expresión:

$$v = C \times t$$

Donde:

v = Viscosidad cinemática, en mm^2/s .

C = Factor de calibración del viscosímetro, en mm^2/s^2 .

t = Tiempo de flujo, en seg.

- La viscosidad cinemática se reportará con una aproximación al milésimo, anotando además, la temperatura de prueba.

1.8.1.7 VISCOSIDAD SAYBOLT - FUROL

Método ASTM D - 244

Es un ensayo específico que se emplea para medir la viscosidad de los materiales asfálticos líquidos. Es el número de segundos que necesitan 60 cm^3 del material para fluir a través de un orificio de tamaño dado y a una temperatura especificada. No es conveniente realizar el ensayo a la misma temperatura para todos los asfaltos líquidos. La viscosidad del asfalto es una función decreciente de la temperatura; por consiguiente, se elige la temperatura de ensayo de cada grado de forma que se obtenga un tiempo de fluencia adecuado a los fines prácticos. (Fig. 1.16).⁽⁷⁾



FIGURA 1.16 Representación de la prueba de viscosidad Saybolt - Furol.⁽⁷⁾

1.8.1.8 PÉRDIDA POR CALENTAMIENTO

Para ejecutar ésta prueba se someten 500 gramos de cemento asfáltico a un calentamiento de 5 horas, a una temperatura de 163°C , en un recipiente ancho y poco profundo que se coloca en un horno. Al finalizar el período de calentamiento se saca el recipiente del horno y una vez

enfriada se pesa nuevamente para calcular las pérdidas debidas a la volatilización que se reportarán como porcentaje del peso original de la muestra.

Este ensayo sirve, entre otras cosas, para determinar si el asfalto está bien mezclado con materiales más ligeros. Se realiza el ensayo de penetración sobre el asfalto antes y después del período de calentamiento. Muchos consideran la pérdida de penetración como un buen índice de la calidad del asfalto desde el punto de vista de envejecimiento atmosférico.

1.8.1.9 TECNOLOGÍA SHRP

El SHRP (*Strategic Highway Research Program*), es un programa de investigación de carreteras que en sus aspectos básicos se desarrolló en Estados Unidos y Canadá entre 1988 y 1993. En las nuevas especificaciones SHRP los asfaltos se clasifican según las temperaturas a las que se alcanzan unas determinadas características mecánicas referidas a las mezclas asfálticas: resistencia a las deformaciones plásticas a alta temperatura, fatiga a temperatura media y fatiga a temperatura baja, a las que se añaden características relativas a la trabajabilidad (viscosidad), a la seguridad (inflamación), y al envejecimiento. Los ensayos desarrollados, que se realizan sobre el cemento previamente envejecido, son los siguientes:

- *Reómetro de corte dinámico (Dynamic Shear Rheometer)*, para evaluar el comportamiento viscoelástico del asfalto mediante medidas del módulo de rigidez del ángulo de desfase (módulo complejo).
- *Reómetro de viga a flexión (Bending Beam Rheometer)*, para medir el módulo de rigidez (y como va variando según se aplica la carga), a las temperaturas de servicio más bajas.

En cuanto a las determinaciones tradicionales que se han mantenido en el método, son las relativas a la viscosidad (*Viscosímetro Rotacional Brookfield*), punto de inflamación (*Aparato Cleveland de Vaso Abierto*), y envejecimiento. Sobre éste último se utilizan el método de película delgada y rotatoria (*Rolling Thin – Film Oven Test, RTFOT*), para simular el envejecimiento durante la fabricación y la puesta en obra y un nuevo procedimiento de envejecimiento por presión (*Pressure Ageing Vessel, PAV*), a fin de reproducir el envejecimiento durante la vida de servicio.

El programa de investigaciones desarrollado por SHRP condujo a la implementación de nuevas técnicas de ensayo y especificaciones de asfaltos para pavimentación. Una diferencia significativa entre las especificaciones comúnmente empleadas para clasificar a los asfaltos, con la nueva especificación SHRP, reside en que los asfaltos se clasifican de acuerdo con las temperaturas a las cuales deben ser alcanzadas estas propiedades, varían de acuerdo al clima en el que el ligante ha de actuar.

En las especificaciones SHRP, las temperaturas máximas de diseño están relacionadas con las deformaciones permanentes mientras que las bajas lo están con el fisuramiento por efecto térmico y las intermedias con el fisuramiento por fatiga.⁽⁸⁾

CUAL ES EL CONCEPTO DE LAS ESPECIFICACIONES PARA CEMENTOS ASFÁLTICOS DE SHRP

- 1) Determinar un estudio en el que se considerarán todas las fallas de los pavimentos y su relación con las propiedades físicas de los asfaltos para poder tener un parámetro, y con éste, determinar que valores límite pueden ser fijados a dichas propiedades.

- 2) Los mecanismos de falla que preocupan en las mezclas asfálticas están referidas a lo siguiente:
- Grietas ò fisuras por contracciones de baja temperatura.
 - Grietas por fatiga debido a las cargas dinámicas en intensidad y tipo de carga.
 - Deformación plástica en las capas asfálticas “roderas” por falta de capacidad estructural o altas temperaturas del pavimento.
 - Envejecimiento prematuro del asfalto debido a la acción de los agentes atmosféricos junto con la calidad propia del asfalto.
 - Daños por la presencia de humeado en el asfalto, debido a lluvias, congelamiento, humedad ambiente, etc.
- 3) *Características del clima:* Las condiciones ambientales y del lugar donde se coloca un pavimento, tiene una gran influencia en la temperatura a que van a trabajar los pavimentos asfálticos y esto afecta a la resistencia que ofrecen durante su vida de servicio.

ENSAYOS SHRP:

- Punto de inflamación

El punto de *inflamación Cleveland* de “vaso abierto” *AASHTO T - 48*, se utiliza como temperatura de seguridad. (Tabla 25).

- Viscosidad

Para asegurar que los ligantes, especialmente los modificados puedan ser bombeados en las plantas asfálticas en caliente, la especificación introduce un requisito de viscosidad máxima para el ligante no envejecido (original). El valor especificado es de 3 Pa-s (30 poises), a 135°C, de acuerdo con al método *ASTM D-4402* que se utiliza el *Viscosímetro Brookfield*. (Tabla 25).

- Envejecimiento

La especificación *SHRP* incluye dos procedimientos para simular el envejecimiento que sufren los asfaltos durante la operación de mezclado y colocación de las mezclas y durante su vida útil en servicio.

En forma resumida el método consiste en calentar durante 85 minutos una película de asfalto colocada dentro de una estufa que está a una temperatura de 163°C. Los efectos del calor y del aire se determinan a partir de los cambios físicos medidos antes y después del calentamiento. (Tabla 25).

- La respuesta de un ligante a la acción de una carga consiste de dos componentes: una elástica (recuperable), y una viscosa (no recuperable).

I. GENERALIDADES SOBRE PAVIMENTOS FLEXIBLES

PRUEBA	DETERMINA	NORMA	
		ASTM	AASHTO
Punto de encendido "SP"	Temperatura de riesgo	ASTM D-9290	AASHTO T-48
Viscosidad coaxial rotacional Coaxial Brookfield "V.B."	Viscosidad a altas temperaturas	ASTM D-4402	AASHTO TP-48
Reómetro de corte dinámico "DSR"	Módulo complejo de corte y el ángulo de fase a altas y medias temperaturas	ASTM D-003	AASHTO TP-5
Envejecimiento en película delgada rolada "RTFOF"	Envejecimiento a corto plazo	ASTM D-2872	AASHTO T-240
Envejecimiento en el molde de presión "PAV"	Envejecimiento a largo plazo	ASTM D-005	AASHTO PP-1
Ensaye de tensión directa "DTT"	Deformación a la ruptura por tensión a baja temperatura	ASTM D-006	AASHTO TP-7
Reómetro de flexión por viga de apoyos "BBR"	S(t) y m a baja temperatura	ASTM D-002	AASHTO TP-1

TABLA 25. Ensayes por SHRP para cementos asfálticos. ⁽⁵⁾

Éste programa desarrolló especificaciones para pavimentos utilizando procedimientos que tienen en cuenta factores reales, tales como el clima, las cargas y velocidad del tránsito vehicular y las características de la estructura existente.

1.8.2 EMULSIONES ASFÁLTICAS

1.8.2.1 CARGA ELÉCTRICA DE LA PARTÍCULA

Método ASTM D - 244

Ésta prueba tiene por objeto identificar las emulsiones asfálticas aniónicas o catiónicas a través de su carga eléctrica. Los glóbulos de asfalto con carga eléctrica positiva los clasifican como *catiónicos*; los de carga negativa en *aniónicos*.

El equipo de prueba es el siguiente:

- Un dispositivo que proporcione una corriente eléctrica directa de 12 voltios, provisto de una resistencia variable y un miliamperímetro.
- Un vaso de precipitado de vidrio, de 150 a 250 ml. de capacidad.
- Un cronómetro.

El procedimiento de prueba es el siguiente:

- 1) Viértase en el vaso una cantidad de emulsión suficiente para que los electrodos puedan sumergirse 25.4 mm. dentro de ella sin tocar el fondo del vaso.
- 2) Conéctense al aparato los electrodos limpios y secos, en seguida, sumérjense en la emulsión hasta una profundidad de 25.4 mm., sin tocar las paredes ni el fondo del vaso.
- 3) Acciónese el interruptor de la corriente eléctrica; ajústese ésta a una intensidad de 8 miliamperios y a partir de éste momento, cuéntese el tiempo.
- 4) Cuando hayan transcurrido 30 minutos de aplicación de la corriente o bien, la intensidad de ésta se hayan reducido a 2 miliamperios en un tiempo menor, interrúmpase la corriente; desconéctense los electrodos y lávense con agua de llave.

- 5) Obsérvese si hay asfalto depositado en los electrodos; una emulsión catiónica depositará una cantidad apreciable de asfalto sobre el cátodo o electrodo positivo, mientras que el ánodo o electrodo negativo se conservará relativamente limpio.
- 6) En caso de no apreciarse depósito de asfalto en ninguno de los electrodos, deberá repetirse la prueba con mayor intensidad de la corriente.

Repórtense los resultados de la prueba en términos de la polaridad determinada, como positiva (catiónica), si el asfalto se ha depositado en el cátodo, o negativa (aniónica), si el depósito se observa en el ánodo, cuando la prueba se realice a una intensidad de corriente mayor.⁽⁷⁾

1.8.2.2 POTENCIAL DE HIDROGENO(pH)

Método ASTM D - 244

Ésta prueba es muy significativa para los productores de emulsión, ya que su control de calidad durante el proceso de fabricación debe verificar la acidez o alcalinidad del jabón emulsificante, a fin de tener los resultados deseados.

Una misma emulsión se comporta en forma diferente durante la construcción, según tenga un *pH* de 4.5 ó de 2.0. La primera tendrá una buena adherencia, pero su rompimiento será muy rápido; en la segunda, la adherencia se conservará dentro de los límites aceptables, pero su rompimiento será mucho más lento.

El *pH* de la emulsión es difícil de determinar, ya que se pegan las paredes de vidrio de los electrodos y los valores que se obtengan pueden ser inexactos. Ésta prueba sirve para determinar el potencial de hidrógeno de la fase acuosa de las emulsiones asfálticas.

El equipo de materiales necesarios para la prueba es:

- Un potenciómetro con escala doble (una para la banda ácida y otra para la banda alcalina), y un dispositivo que permita corregir los efectos de la temperatura. El voltímetro del aparato debe tener una resistencia interna elevada de 1012 omh., para eliminar los efectos de polarización en los electrodos.
- Un electrodo de referencia de tipo platino/mercurio/calomel, en solución acuosa saturada de KCL.
- Un electrodo de medición de vidrio.
- Una solución de referencia de Tartrato ácido de potasio (saturada), con un $\text{pH}=3.57 \pm 0.02$ entre 20°C y 30°C.
- Una solución de referencia de bórax 0.01 m. con:
 - $\text{pH}=9.22 \pm 0.01$ a 20°C.
 - $\text{pH}=9.18 \pm 0.01$ a 26°C.
 - $\text{pH}=9.13 \pm 0.01$ a 30°C.
- Una solución saturada de KCL.
- Una solución de diamina comercial de clorhidrato de propileno al 1%, en casos de *pH* comprendido entre 3 y 5.
- Una solución de jabón de resina vinsol con un *pH* entre 12 y 13.
- Agua destilada, acetona y tricloroetileno.
- Dos vasos de 100 ml. y uno de 250 ml. de polietileno.

Antes de la prueba, se homogeneiza suficientemente una muestra representativa de 200 gr. de emulsión.

La ejecución de la prueba es la siguiente:

- 1) En el caso de las emulsiones catiónicas, los electrodos se mojan en la solución de diamina de clorhidrato de propileno. Para las aniónicas con el jabón de resina vinsol.
- 2) Se lavan los electrodos con agua destilada.
- 3) Los electrodos se calibran sumergiéndolos en algunas de las soluciones de referencia y se anota la lectura obtenida como pH_1 , cuidando de hacer la corrección por la temperatura.
- 4) Se lavan los electrodos con agua destilada.
- 5) A continuación se vierten 50 ml. de la muestra en un vaso de 100 ml., se introducen los electrodos y después de agitar el vaso durante algunos segundos, se determina la lectura pH_2 .
- 6) Lávense finalmente los electrodos con agua destilada.
- 7) Con objeto de verificar la calibración de los electrodos, efectúese una determinación más en la misma solución de referencia y anótese la lectura pH_3 .
- 8) Para lavar los electrodos, enjuáguese con acetona, enseguida con tricloroetileno, nuevamente con acetona y finalmente con agua destilada. ⁽⁷⁾

El resultado debe reportarse así:

- 1) Como resultado de la prueba se reportará la lectura como pH_2 con un decimal.
- 2) Indíquese la temperatura de la prueba, que debe estar comprendida entre 20°C y 30°C.

1.8.2.3 DEMUSIBILIDAD

El ensayo de *demusibilidad* sirve para determinar la resistencia relativa a la rotura por contacto con la superficie de los agregados pétreos. Se hace mezclando la emulsión con una cantidad medida de una solución patrón de *cloruro de calcio*, y determinando la proporción de emulsión que se ha descompuesto por recuperación del asfalto precipitado. Se usan dos soluciones patrón de *cloruro de calcio*, una para las emulsiones de rotura rápida, y la otra para las de rotura media y lenta. La solución de *cloruro de calcio*, poco concentrada, empleada en el ensayo de las emulsiones de rotura rápida, no es mucho más fuerte que el agua dura. Una emulsión de rotura rápida debe ser suficientemente sensible al contacto con los agregados pétreos para romper casi por completo durante el ensayo en contacto con aquella solución. Si una emulsión es suficientemente sensible al contacto con los agregados pétreos para romperse bajo los efectos de la solución débil de *cloruro de calcio*, también romperá muy rápidamente cuando entre en contacto con las piedras o con la superficie del camino.

1.8.2.4 MISCIBILIDAD CON CEMENTO "PÒRTLAND"

Método ASTM D - 244

La prueba se aplica a las emulsiones aniónicas para conocer la estabilidad de la emulsión al mezclarse con un material tan fino como el cemento.

El equipo y los materiales necesarios para la prueba son los siguientes:

- Una malla circular "U.S. Standard" de aberturas cuadradas, de 0.177 mm. (Nº 80).
- Una malla circular "U.S. Standard" de aberturas cuadradas, de 1.41 mm. (Nº 14), con su fondo.
- Un recipiente metálico de fondo redondo y de 500 ml. de capacidad.

- Una varilla metálica de extremos redondeados y de 1.25 cm. de diámetro, aproximadamente.
- Una probeta de vidrio graduada, con capacidad de 100 ml. y cemento Pórtland tipo III, con una superficie específica mínima de 1900 cm² por gramo, determinada con el método del turbidímetro de *Wagner*.

El procedimiento es el siguiente:

- 1) Dilúyase en agua 200 ml. de una muestra representativa de la emulsión, hasta alcanzar un residuo asfáltico de 55%. La cantidad de agua necesaria deberá calcularse determinando previamente el residuo de la emulsión por destilación o por evaporación, siguiendo los métodos de prueba correspondientes. El porcentaje de residuo de la emulsión diluida deberá verificarse mediante alguna de las dos pruebas antes citadas.
- 2) Críbese una porción de cemento a través de la malla de 0.177 mm. (Nº 80); tómense 50 ± 0.1 gramos de la fracción que pasa por dicha malla y colóquense en el recipiente metálico.
- 3) Agréguese al cemento 100 gr. de la emulsión a la temperatura de 25°C y mézclense mediante movimientos circulares de la varilla metálica, a una velocidad de 60 revoluciones por minuto, aproximadamente.
- 4) Después de transcurrido un minuto de mezclado, agréguese 150 ml. de agua destilada y continúese el mezclado por tres minutos más.
- 5) Finalizado éste período, críbese la mezcla a través de la malla de 1.41 mm. (Nº 14), cuyo peso, incluyendo el del fondo, se habrá anotado previamente como W_t . Lávese con agua destilada el recipiente en que se hizo la mezcla y hágase pasar el producto del lavado a través de la malla, la que a continuación se lavará también con agua destilada, hasta que ésta salga clara. Para el lavado de la malla, el agua deberá dejarse caer desde una altura de 15 cm., aproximadamente, para no forzar el paso de los grumos retenidos.
- 6) Colóquese el fondo de la malla y séquese en el horno a una temperatura de 163°C, hasta obtener un peso constante.
- 7) Pésese la malla con su fondo y el residuo, anotando el peso como W_r .

Calcúlese el peso en gramos del material retenido, en la malla y en el fondo, mediante la siguiente expresión:

$$M = W_r - W_t$$

En donde:

M = Peso del material retenido en la malla y el fondo, en gramos.

W_r = Peso de la malla, fondo y material retenido, en gramos.

W_t = Peso de la malla y fondo, en gramos.

El valor M será el que se reporte como resultado de la prueba de *miscibilidad con cemento Pórtland*, expresando como porcentaje de los 100 gramos de la emulsión empleada. ⁽⁷⁾

1.8.2.5 CUBRIMIENTO DEL AGREGADO PÉTREO EN HÚMEDO

Si la superficie del agregado contiene agua o si se introduce agua en la mezcla, después del recubrimiento, el problema es análogo en su desarrollo teórico a lo que hemos explicado, pero habrá nuevas interfases y tensiones interfaciales, puesto que intervendrá otro líquido con propiedades humectantes diferentes. Consideremos que la mezcla esté íntegramente sumergida en

agua (esto representa a una condición límite). El agua habrá desplazado el aire en el sistema que fue descrito y surgirá una competencia entre el agua y el asfalto para unirse al agregado.

Se tendrá las siguientes tensiones interfaciales:

T_{aw} : tensión interfacial agregado – agua.

T_{bw} : tensión interfacial asfalto – agua.

T_{ab} : tensión interfacial agregado – asfalto.

Para que sea posible el recubrimiento del agregado húmedo tiene que desaparecer la interfase agua – agregado y también la energía interfacial T_{aw} por unidad de área. La interfase agregado – asfalto que se forma, conduce a un aumento de la energía interfacial igual a T_{ab} . Nuevamente crecerá el asfalto, aumentando la interfase asfalto – agua, por lo que aumentará la energía interfacial en T_{bw} .

El cambio total de energía es:

$$T_{aw} - (T_{ab} + T_{bw}) \text{ ó } T_{aw} - T_{ab} - T_{bw}$$

Y el trabajo será:

$$W = T_{aw} - (T_{ab} + T_{bw})$$

El proceso se realizará si el desplazamiento del agua y el recubrimiento del agregado resultan en una disminución de la energía libre de la superficie.

El agregado permanecerá cubierto de agua (o bien desplazará el agua al asfalto), cuando:

$$T_{ab} > T_{aw} + T_{bw}$$

Es necesario que tengamos las siguientes condiciones, para que exista una buena adherencia:

1) $T_{a} > T_{ab} + T_b$ (para agregado seco).

2) $T_{aw} > T_{ab} + T_{bw}$ (para agregado húmedo).

La pérdida de eficiencia en un aditivo es debida a reacciones químicas entre el aditivo y el asfalto; el área superficial de asfalto expuesta al aire, no afecta al aditivo por consiguiente.

Los aditivos ejercen su acción óptima cuando se forman películas monomoleculares en la interfase; si se realizan fricciones excesivas del agente, es común que éste se separe en gotas y que deje de actuar.

1.8.2.6 RESIDUO POR DESTILACIÓN

Método ASTM D - 244

Ésta prueba tiene por objeto determinar las proporciones de agua y de residuo asfáltico contenidas en la emulsión; el residuo de la destilación puede efectuarse para efectuar las pruebas de penetración, ductilidad y solubilidad en Tetracloruro de carbono o Tricloroetileno.

El equipo necesario para la prueba es el siguiente:

- Un alambique cilíndrico de fierro.

- Un alambique modificado de fierro, con cámara de expansión para ser usado con emulsiones asfálticas que producen gran cantidad de espuma.
- Un quemador anular de gas de 101.6 mm. de diámetro, con perforaciones en el contorno interior.
- Un quemador anular de gas de 52.4 mm. de diámetro interior, con perforaciones en el contorno interior.
- Un quemador anular de gas de 50.8 mm. de diámetro interior, con perforaciones en la parte superior.
- Un tubo de conexión, una camisa de lámina, un refrigerante recto con camisa de metal y una probeta graduada.
- Un termómetro de inmersión total, con graduaciones -2°C a $+300^{\circ}\text{C}$, tipo *ASTM 7 - C* ó similar.
- Un mechero tipo "Bunsen".
- Una malla "U.S. Standard" de aberturas cuadradas de 0.297 mm. (N° 50).

El procedimiento de prueba es el siguiente:

- 1) Pénsese 200 ± 0.1 gr. de una muestra representativa de la emulsión en el alambique modificado de fierro previamente tarado con sus accesorios, incluyendo el termómetro. Désígnese como W_i el peso del alambique y sus accesorios, más la emulsión.
- 2) Conéctese el alambique y colóquese cerca de su parte superior el quemador de 152.4 mm. de diámetro, por lo que al mismo tiempo funcionará como apoyo; el quemador anular de 101.6 mm. de diámetro se colocará debajo del engrosamiento del alambique y el de 50.8 mm. de diámetro a 5 cm. a bajo de su fondo.
- 3) Iníciase la destilación, aplicando calor únicamente con el quemador inferior. Cuando aquella cese, enciéndase los dos quemadores mayores ajustándoles a una flama baja, con lo cual se reanuda la destilación.
- 4) Cuando se interrumpa la destilación, increméntese el calor, ajustando la flama del quemador inferior. Al aparecer la columna de mercurio en la parte del termómetro que sobresale y se pueda leer la temperatura, vuélvase a incrementar el calor, ajustando las flamas de los quemadores medio e inferior hasta alcanzar una temperatura de 260°C .
- 5) Si hay indicios de que la emulsión empieza a formar espuma y ésta trata de pasar al tubo de conexión retírese rápidamente el quemador inferior y, sin mover el alambique, sumérjase en un recipiente con agua hasta que su fondo quede a 5 cm. bajo el nivel de aquella, durante el tiempo necesario para detener la formación de espuma. A continuación, reanúdense la aplicación de calor, observando cuidadosamente el tubo de conexión para repetir el proceso, si es necesario.
- 6) Cuando el residuo alcance la temperatura de 260°C , consérvase ésta durante 15 minutos. Transcurridos éstos, desconéctese el alambique y pésese con sus accesorios, anotando el resultado como W_f .
- 7) Para ésta variante de la prueba, la destilación debe realizarse en un tiempo comprendido entre una hora y una hora 15 minutos, medido desde la primera aplicación de calor, aún cuando puede requerirse un tiempo mayor si la formación de espuma obliga a repetir el proceso indicado en el punto 5.

Calcúlese y repórtese el *residuo de la destilación*, según el porcentaje del peso original de la muestra, empleando la fórmula siguiente:

$$R = \frac{200 - (W_i - W_f)}{200} \times 100$$

$$R = 100 - \frac{(W_i - W_f)}{2}$$

En donde:

R = Contenido de residuo por destilación, en porcentaje.

W_i = Peso del alambique y sus accesorios más la emulsión antes de la prueba, en gramos.

W_f = Peso del alambique y sus accesorios más el residuo después de la prueba, en gramos.

$W_i - W_f$ = Peso del destilado, en gramos.

Al efectuar la prueba se tendrá en cuenta que, debido a un fenómeno de flotación en el aire presente a temperaturas elevadas, los alambiques pesan a la temperatura de 260°C cerca de 1 y 2 gramos menos que a la temperatura ambiente. Por ello antes de efectuar los cálculos debe agregarse 1 ó 2 gramos al peso final W_f .⁽⁷⁾

1.8.2.7 ASENTAMIENTO (sedimentación) EN 5 DÍAS

Método ASTM D - 244

El ensayo de sedimentación sirve para determinar si es posible almacenar con seguridad una emulsión sin que el asfalto se asiente en el fondo. El ensayo se realiza situando una cantidad medida de la emulsión en una probeta bien graduada y dejándola en reposo durante 5 días. Al final de éste tiempo se toma una muestra del fondo y otra de la superficie del recipiente. Se evapora el agua y se determina el porcentaje de residuo en cada muestra. La diferencia entre los porcentajes de sólidos en una y otra se definen como *sedimentación en 5 días*. Las especificaciones suelen fijar para la sedimentación un valor máximo del 3% al 5%. Una emulsión que no diera resultado satisfactorio sometido a éste ensayo, sedimentaría en proporciones considerables durante el almacenaje, por lo que la parte superior de la emulsión almacenada tendría menos asfalto que la emulsión del fondo.

El equipo requerido para la prueba es el siguiente:

- Dos probetas de vidrio de 500 ml. de capacidad, con graduaciones a cada 5 ml. con base ensanchada, tapón de corcho o vidrio y con diámetro exterior de ± 0.5 cm.
- Una pipeta de vidrio de 60 cm³ de capacidad.

Se requiere además el equipo descrito como necesario para la determinación del residuo por evaporación.

El procedimiento de prueba es el siguiente:

- 1) Colóquese en cada una de las dos probetas una muestra representativa de la emulsión, con un volumen de 500 ml.; déjense tapadas y en reposo durante el tiempo especificado a la temperatura ambiente.
- 2) Transcurrido éste lapso, por medio de la pipeta extráigase de la parte superior 55 ml. de cada una de las muestras, sin alterar el resto del contenido de las probetas.
- 3) Colóquese en los vasos de 500 ml. cada una de las porciones tomadas. Uniformícense con la varilla de vidrio y ajústese el peso de cada porción a 50 gr. utilizando la pipeta.
- 4) Determínese en ambas porciones el contenido de residuo por evaporación, siguiendo el procedimiento indicado para tal efecto y anótese el promedio de ambos resultados como R_s .⁽⁷⁾

1.9 MATERIALES PÉTREOS

1.9.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS

Las principales características de los suelos son las siguientes:

- 1) Su composición química y mineralógica.
- 2) El tamaño de sus partículas.
- 3) La forma de sus partículas.
- 4) Su peso específico.
- 5) Su contenido de humedad.
- 6) La estructura de su masa.

Su *composición química y mineralógica* de los suelos es la principal característica, pues las propiedades de un suelo están íntimamente relacionadas con su contenido de metales o metaloides.

El *tamaño de sus partículas* depende del origen o trituración que tiene un suelo. La forma de las partículas influye en la formación de vacíos o espacios en la masa del suelo.

El *peso específico* de los suelos, depende de la clase de mineral o minerales que lo componen, así como de su mayor o menor contenido de materia orgánica, y varía de 2 a 3. Se ha adoptado como tipo de comparación el peso específico de las arcillas, está comprendido entre 2.7 y 3.0. La materia orgánica hace disminuir el peso específico de un suelo.

El *contenido de humedad*: En la determinación del contenido de humedad de un suelo, nos limitaremos a considerar únicamente el agua libre, el agua capilar y el agua higroscópica, sin tomar en cuenta el agua "pelicular". Las aguas, libre y capilar, pueden ser totalmente evaporadas por efecto del calor, a una temperatura mayor de 100°C (temperatura máxima usada: 110°C).

La *estructura de una masa de suelo* es de mucha importancia en las arcillas, pues ella puede ser destruida por la acción de fuerzas exteriores. La modificación de la estructura de una masa arcillosa altera su volumen de vacíos. Se ha observado que algunas arcillas presentan una estabilidad menor cuando cambia su estructura; de ahí que una masa de arcilla "inalterada" sea, por lo general, más estable que una "remoldeada". En cambio, en los limos, y sobre todo, en las arenas, la alteración de la estructura de su masa tiene poca influencia.

1.9.2 MÓDULOS DE ELASTICIDAD

Los materiales que van a conformar las diferentes capas o los que ya constituyen el pavimento existente, deberán ser caracterizados por los módulos de elasticidad de *Young* y las relaciones de *Poisson*.

1) Módulos de Elasticidad

a) Capa Subrasante

En el caso de estar en presencia de suelos finos la componente de la deformación total correspondiente a la deformación resiliente es prácticamente igual a la deformación elástica, razón por la cual se hablará en éste tipo de suelos de módulos resilientes en vez de módulo de elasticidad dinámico.

La expresión propuesta en el método de diseño *Shell* para el cálculo de éste módulo es función de la capacidad portante del suelo de cimentación, que en éste caso es determinado en términos del ensayo *CBR* (*California Bearing Ratio*).

La expresión es la siguiente:

$$MR = 100 \times CBR$$

En donde:

MR = Módulo resiliente, en kg/cm^2

CBR=Ensayo CBR, en % (para CBR<8%).

Es importante indicar que ésta expresión deberá ser manejada con mucho criterio, pues se ha encontrado que no se cumple del todo. Para el diseño de una rehabilitación el valor del módulo así calculado solamente servirá como valor índice y mediante un proceso iterativo con ayuda del computador se llegará al valor real.

b) Capas granulares

El valor del módulo de elasticidad dinámico de las capas granulares que no poseen resistencia a la flexión, depende esencialmente de su espesor y de la rigidez de la superficie o capa de apoyo.

De igual manera que para el cálculo del módulo resiliente de la *capa subrasante* se recomienda utilizar la expresión propuesta en el método *Shell* para el cálculo del módulo de las capas granulares.

$$E_{\text{capa granular}} = 0.204 * h^{0.45} * E_{\text{capa inferior}}$$

En donde:

h = Espesor de la capa granular, en mm.

E = Módulo de elasticidad, en kg/cm^2 .

Es importante resaltar que estos módulos son función del estado de tensiones a que se encuentra sometido cada material y que mediante ensayos dinámicos es posible encontrar unas ecuaciones constitutivas de los materiales, en caso de no contar con estas expresiones o que los espesores de capa determinados en el prediseño sean altos se deberá subdividir ésta capa y determinar los módulos de elasticidad correspondientes.

2) Relación de Poisson

La *relación de Poisson* es la relación que existe entre la deformación horizontal y la deformación vertical inducida en el pavimento por la acción de una carga. La variación de éste parámetro no incide considerablemente en el cálculo de los espesores de capa, razón por la cual se considera suficiente emplear los valores presentados en la tabla siguiente:

Estructura	μ
Capa asfáltica	0.35
Base granular	0.40
Subbase granular	0.45
Capa subrasante	0.50

TABLA 26. Relaciones de Poisson.

FUENTE: Instituto Panamericano de Carreteras, Santafé de Bogotá, Colombia.

1.9.3 CALIDAD DE LOS MATERIALES PÉTREOS PARA CARPETAS

Los *materiales pétreos* son aquellos que pueden ser seleccionados de una fuente de abastecimiento o de un banco para su mejor comportamiento en el soporte y transmisión de esfuerzos impuestos por el tránsito y el medio ambiente; generalmente son muy heterogéneos no sólo en su composición química, sino en su composición granulométrica y en sus propiedades físicas.

Para la obtención de los materiales pétreos que se utiliza en la estructura del pavimento, se deberá recurrir a diferentes fuentes de abastecimiento, considerándose antes de seleccionar estos, la calidad, accesibilidad, facilidad de explotación, el volumen disponible, tratamiento, así como su costo.

Estas fuentes o bancos las podemos encontrar según su estado natural en mantos de roca o yacimientos de agregados naturales de río o de depósitos de aluvión, conglomerados, etc.

Al tener dichos bancos para extraer los materiales necesarios, se debe conocer su estado natural, su clasificación, tamaño máximo, dureza y cementación, así como otras características como son plasticidad, afinidad entre materiales, el desgaste y su estabilidad, para que de ésta manera se escoja que procedimiento y equipo de tratamiento se debe utilizar.

Para diseñar correctamente el espesor de refuerzo que puede requerir el pavimento en servicio, es necesario conocer las condiciones de calidad y resistencia del material que forma la *capa subrasante*, así como también las condiciones de calidad y espesores de las capas que forman el pavimento (sub-base, base y carpeta); esto último con el fin de determinar la forma como esas capas pueden ser tomadas en cuenta en el espesor del pavimento que en definitiva quedará proyectado.

FUNCIONES DE LA CARPETA ASFÁLTICA:

- Proporcionar al tránsito una superficie estable, flexible, uniforme y de textura apropiada.
- Proporcionar una superficie de rodamiento que brinde al usuario seguridad, comodidad y economía.
- La carpeta debe presentar una regularidad superficial (longitudinal y transversal), sin presentar roderas, ondulaciones, asentamientos, entre otros.
- Debe contar con una adecuada resistencia al derrapamiento todo el tiempo de su vida de servicio.
- Debe proporcionar a la superficie de rodamiento un buen drenaje, que no le provoque una superficie resbaladiza.
- Contar con una superficie impermeable, que impida la entrada de agua al pavimento.
- La carpeta asfáltica deberá tener especificaciones con un nivel bajo de ruido, que no sea molesto ni perjudicial para los usuarios.
- Una estructura que distribuya las presiones producidas por las cargas del tránsito, de tal manera que al nivel de la capa subrasante, los esfuerzos sean compatibles con su resistencia y que no produzcan deformaciones indeseables.
- La carpeta asfáltica deberá presentar una superficie de rodamiento que no eleve los costos de operación del vehículo como desgaste de llantas, consumo excesivo de aceites, mantenimiento continuo, etc.
- Contar con propiedades adecuadas de reflexión luminosa.
- La estética ante todo, con una apariencia agradable.

Los materiales pétreos para construir *carpetas asfálticas* son suelos inertes, provenientes de playones de ríos o arroyos, de depósitos naturales denominados minas o de rocas, los cuales, por lo general, requieren cribado y triturado para utilizarse.

REQUISITOS DE CALIDAD DE MATERIALES PÉTREOS PARA CARPETAS ASFÁLTICAS

• **De granulometría densa:**

El material pétreo que se utilice en la elaboración de *carpetas asfálticas de granulometría densa*, con mezcla en caliente o en frío, en función de su tamaño nominal y del tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento (ΣL), cumplirá con lo que se indica a continuación:

- a) Cuando el tránsito esperado (ΣL) sea igual a 1 millón de ejes equivalentes o menor, el material pétreo, según su tamaño nominal, cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la tabla 27 o bien las señaladas en la tabla 29, así como los requisitos de calidad que se indican en la tabla 28.
- b) Si el tránsito esperado (ΣL) es mayor de 1 millón de ejes equivalentes, el material pétreo cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la tabla 29 y con los requisitos de calidad que se indican en la tabla 30.

TABLA 27. Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L \leq 10^6$).

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (pulg.)				
Abertura (mm)	Designación	12.5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37.5 (1 1/2)	50 (2)
Porcentaje que pasa						
50	2"					100
37.5	1 1/2"				100	90-100
25	1"			100	90-100	76-90
19	3/4"		100	90-100	79-92	66-83
12.5	1/2"	100	90-100	76-89	64-81	53-74
9.5	3/8"	90-100	79-92	67-82	56-75	47-68
6.3	1/4"	76-89	66-81	56-71	47-65	39-59
4.75	N°4	68-82	59-74	50-64	42-58	35-53
2	N°10	48-64	41-55	36-46	30-42	26-38
0.85	N°20	33-49	28-42	25-35	21-31	19-28
0.425	N°40	23-37	20-32	18-27	15-24	13-21
0.25	N°60	17-29	15-25	13-21	11-19	9-16
0.15	N°100	12-21	11-18	9-16	8-14	6-12
0.075	N°200	7-10	6-9	5-8	4-7	3-6

TABLA 28. Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L \leq 10^6$).

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de los Angeles; %, máximo	35
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	40
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

TABLA 29. Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL).

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (pulg.)				
Abertura (mm)	Designación	12.5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37.5 (1 1/2)	50 (2)
Porcentaje que pasa						
50	2"					100
37.5	1 1/2"				100	90-100
25	1"			100	90-100	74-90
19	3/4"		100	90-100	79-90	62-79
12.5	1/2"	100	90-100	72-90	58-71	46-60
9.5	3/8"	90-100	76-90	60-76	47-60	39-50
6.3	1/4"	70-81	56-69	44-57	36-46	30-39
4.75	Nº4	56-69	45-59	37-48	30-39	25-34
2	Nº10	28-42	25-35	20-29	17-24	13-21
0.85	Nº20	18-27	15-22	12-19	9-16	6-13
0.425	Nº40	13-20	11-16	8-14	5-11	3-9
0.25	Nº60	10-15	8-13	6-11	4-9	2-7
0.15	Nº100	6-12	5-10	4-8	2-7	1-5
0.075	Nº200	2-7	2-6	2-5	1-4	0-3

TABLA 30. Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L > 10^6$).

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de los Ángeles; %, máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT-4-04/03
CMT. Características de los materiales.

- **De granulometría abierta:**

El material pétreo que se emplee en la elaboración de *carpetas asfálticas de granulometría abierta*, generalmente con mezcla en caliente cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la tabla 31, en función del espesor de la carpeta, así como los requisitos de calidad que se indican en la tabla 32:

TABLA 31. Requisitos granulométricos del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría abierta.

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	Para espesores ≤ 4 cm	Para espesores > 4 cm
25	1"		100
19	3/4"	100	62-100
12.5	1/2"	65-100	45-70
9.5	3/8"	48-72	33-58
6.3	1/4"	30-52	22-43
4.75	Nº4	18-38	14-33
2	Nº10	5-19	5-19
0.075	Nº200	2-4	2-4

TABLA 32. Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría abierta.

Característica ^[1]	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de los Ángeles; %, máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	25
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

[1] El material debe ser 100 % producto de trituración de roca sana.

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT-4-04/03
CMT. Características de los materiales.

- **De mortero asfáltico:**

El material pétreo que se utilice en la elaboración de *carpetas de mortero asfáltico*, generalmente con mezcla en frío, cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la tabla 33 y con los requisitos de calidad que se indican en la tabla 34:

TABLA 33. Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas de mortero asfáltico.

Malla		Porcentaje que pasa
Abertura mm	Designación	
4.75	Nº4	100
2.0	Nº10	89-100
0.85	Nº20	43-72
0.425	Nº40	26-53
0.25	Nº60	17-41
0.15	Nº100	10-30
0.075	Nº200	5-15

TABLA 34. Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas de mortero asfáltico.

Característica	Valor
Desgaste por abrasión en húmedo, %, máximo	10
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT-4-04/03
CMT. Características de los materiales.

- **Por el sistema de riegos:**

El material pétreo que se utilice en la elaboración de *carpetas construidas por el sistema de riegos*, según su denominación, cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la tabla 35 y con los requisitos de calidad que se indican en la tabla 36:

TABLA 35. Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas por el sistema de riegos.

Malla		Denominación del material pétreo				
Abertura (mm)	Designación	1	2	3-A	3-B	3-E
		Porcentaje que pasa				
31.5	1 ¼"	100				
25	1"	95 mín				
19	¾"		100			
12.5	½"	5 màx	95 mín	100		100
9.5	3/8"			95 mín	100	95 mín
6.3	¼"	0	5 màx		95 mín	
4.75	Nº4					5 màx
2	Nº10		0	5 màx	5 màx	0
0.425	Nº40			0	0	

TABLA 36. Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas por el sistema de riegos.

Característica	Valor
Desgaste de los Ángeles; %, máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35
Intemperismo acelerado; %, máximo	12
Desprendimiento por fricción; %, máximo	25
Cubrimiento con asfalto (Método inglés); %, mínimo	90

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT-4-04/03
CMT. Características de los materiales.

1.9.4 MATERIALES PARA BASE

Ésta capa tiene por finalidad absorber los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos y, además, repartir uniformemente estos esfuerzos a la *sub-base* y a la *capa subrasante*.

Las *bases* pueden ser granulares, o bien estar formadas por mezclas bituminosas o mezclas estabilizadas con cemento u otro material ligante.

Por lo general, para la *capa de base* se emplea piedra triturada, grava o mezclas estabilizadas de suelo - cemento, suelo bituminoso, etc.

FUNCIONES DE BASES:

- Recibir y resistir las cargas del tránsito a través de la capa que constituye la superficie de rodamiento (carpeta asfáltica).
- Transmitir estas cargas, adecuadamente distribuidas, a las terracerías.
- Impedir que la humedad de las terracerías ascienda por capilaridad.
- En caso de introducirse agua por la parte superior, permitir que el líquido descienda hasta la *capa subrasante*, donde se desaloja al exterior por el efecto del bombeo o la sobre elevación.

Las características que deben cumplir los materiales para *base* se enuncian en la siguiente tabla:

TABLA 37. Requisitos de calidad de materiales para capa de base. ⁽⁹⁾

CARACTERÍSTICA	VALOR %	
	$\Sigma L \leq 10^6$ ^[1]	$\Sigma L > 10^6$ ^[1]
Límite líquido ^[2] , máximo	25	25
Índice plástico ^[2] , máximo	6	6
Equivalente de arena ^[2] , mínimo	40	50
Valor Soporte de California (CBR) ^[2,3] , mínimo	80	100
Desgaste de los Ángeles ^[2] , máximo	35	30
Partículas alargadas y lajeadas ^[2] , máximo	40	35
Grado de compactación ^[2,4] , mínimo	100	100

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8.2 ton, esperando durante la vida útil del pavimento.

[2] Determinado mediante el procedimiento de prueba que corresponde a la Normativa de la SCT.

[3] Con el grado de compactación indicado en ésta tabla.

[4] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada.

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT-4-02-002/04
CMT. Características de los Materiales.

1.9.5 MATERIALES PARA SUB – BASE

Es la capa de material seleccionado que se coloca encima de la *capa subrasante*.

Tiene por objeto:

- Servir de capa de drenaje al pavimento.
- Controlar, o eliminar en lo posible, los cambios de volumen, elasticidad y plasticidad perjudiciales que pudiera tener el material de la *capa subrasante*.
- Controlar la ascensión capilar del agua proveniente de las capas freáticas cercanas, o de otras fuentes, protegiendo así el pavimento contra los hinchamientos que se producen en épocas de helada. Éste hinchamiento es debido al congelamiento del agua capilar, fenómeno que se observa especialmente en suelos limosos donde la ascensión capilar del agua es grande.

El material de la *sub-base*, debe ser seleccionado y tener mayor capacidad de soporte que el terreno de fundación compactado. El material de la *sub-base* puede ser: arena, grava, granzón, escoria de los altos hornos, o residuos del material de cantera. En algunos casos, se puede emplear el material de la *capa subrasante* mezclado con granzón, cemento, etc.

FUNCIONES DE SUB – BASES:

- Recibir y resistir las cargas del tránsito a través de la capa que constituye la superficie de rodamiento (carpeta asfáltica).
- Transmitir estas cargas, adecuadamente distribuidas, a las terracerías.
- Impedir que la humedad de las terracerías ascienda por capilaridad.
- En caso de introducirse agua por la parte superior, permitir que el líquido descienda hasta la *capa subrasante*, donde se desaloja al exterior por el efecto del bombeo o la sobre elevación.

MATERIALES PARA SUB-BASE:

Los materiales para *sub-base* estarán sujetos a los tratamientos mecánicos que lleguen a requerir para cumplir con las especificaciones adecuadas, siendo los más usuales: la eliminación de desperdicios, el disgregado, el cribado, la trituración y en algunas ocasiones el lavado, los podemos encontrar en cauces de arroyos de tipo torrencial, en las partes cercanas al nacimiento de un río y en los cerros constituidos por rocas andesíticas, basálticas y calizas. Es de gran importancia conocer el tipo de terreno con el que se va a trabajar ya que en base a esto se elige el tipo de maquinaria y el personal suficiente para trabajar en forma adecuada. El material que se manda del banco para efectuar el análisis correspondiente, deberá traer las etiquetas adecuadas y al llegar a laboratorio se le efectuará un secado, su disgregación y se le cuarteará.

En la tabla 38 se presentan las características de los materiales de la capa de *sub-base*, que deben cumplir para la utilización en la *carpeta asfáltica*.

TABLA 38. Requisitos de calidad de materiales para capa de sub-base. ⁽⁹⁾

CARACTERÍSTICA	VALOR %	
	$\Sigma L \leq 10^6$ ^[1]	$\Sigma L > 10^6$ ^[1]
Límite líquido ^[2] , máximo	30	25
Índice plástico ^[2] , máximo	10	6
Equivalente de arena ^[2] , mínimo	50	60
Valor Soporte de California (CBR) ^[2,3] , mínimo	30	40
Desgaste de los Ángeles ^[2] , máximo	50	40
Grado de compactación ^[2,4] , mínimo	100	100

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8.2 ton, esperando durante la vida útil del pavimento.

[2] Determinado mediante el procedimiento de prueba que corresponde a la Normativa de la SCT.

[3] Con el grado de compactación indicado en ésta tabla.

[4] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada.

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT-4-02-002/04
CMT. Características de los Materiales.

1.9.6 MATERIALES PARA CAPA SUBRASANTE

La *capa subrasante* es una capa de transición entre el terreno natural o el cuerpo del terraplén y el pavimento. Cuando el material del terreno natural es de buena calidad, únicamente se conforma y se le da una buena compactación, usándose como una *capa subrasante* para absorber las irregularidades que resulten al efectuar un corte.

Los materiales para *capa subrasante* son los suelos naturales, seleccionados o cribados, producto de los cortes o de la extracción en bancos, que se utilizan para formar dicha capa inmediatamente encima de la cama de los cortes, de la capa subyacente o del cuerpo de un terraplén cuando ésta última no se construya para servir de desplante a un pavimento.

Los materiales que se utilizan para la formación de la *capa subrasante*, en función de sus características y de la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento, cumplirán con lo que se indica a continuación:

- a) Cuando la intensidad del tránsito sea igual a 1 millón de ejes equivalentes o menor, el material cumplirá con las características granulométricas y con los requisitos de calidad que se establecen en la tabla 39 y tendrá un espesor mínimo de 20 cm.
- b) Cuando la intensidad del tránsito sea de 1 millón a 10 millones de ejes equivalentes, el material cumplirá con las características granulométricas y con los requisitos de calidad que se establecen en la tabla 39 y tendrá un espesor mínimo de 30 cm.
- c) Cuando la intensidad del tránsito sea mayor de 10 millones de ejes equivalentes, la *capa subrasante* será motivo de diseño especial.
- d) Si la *capa subrasante* se desplanta directamente sobre el terreno de cimentación y su espesor es menor que el señalado en el inciso a y b, según corresponda, deberá cumplir con los requisitos establecidos de la tabla 39.

Tabla 39. Requisitos de calidad de materiales para capa subrasante ⁽⁹⁾

Característica	Valor
Tamaño máximo; mm	76
Límite líquido; %, máximo	40
Índice plástico; %, máximo	12
Valor soporte de California (CBR) ^[1] ; %, mínimo	20
Expansión máxima; %	2
Grado de compactación ^[2] ; %	100 ± 2

[1] Especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en ésta tabla, con un contenido de agua igual al del material en el banco a 1.5 m de profundidad.

[2] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto indique otra cosa.

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT-1-03/02
CMT. Características de los Materiales.

TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE MATERIALES PARA CAPA SUBRASANTE

- a) Cuando el material para la *capa subrasante* sea producto de los cortes, se podrá transportar utilizando tractores o motoescrepas.
- b) Cuando el material para la *capa subrasante* sea extraído de bancos, o sea necesario almacenarlo para su posterior utilización en la obra, se tendrá cuidado en su transporte y almacenamiento, con el propósito de evitar la alteración de sus características, atendiendo los siguientes aspectos:
 - El material se almacenará en un sitio específicamente destinado para tal propósito. Cuando en dicho sitio no se cuente con un firme, previamente a su utilización se deberá:
 - Remover la materia vegetal y limpiar la superficie.
 - Conformar, nivelar y compactar la superficie, dejando una sección transversal uniforme que permita el drenaje.
 - Los materiales constituidos por partículas de diferentes tamaños se almacenen en los depósitos, tienden a segregarse, por lo que será necesario que al cargar el material para llevarlo al frente de trabajo, se tome desde la parte baja del depósito.
 - Los materiales se cargarán y transportarán al frente de trabajo, en vehículos con cajas cerradas o protegidas con lonas, que impidan la contaminación del entorno o que se derramen.

FUNCIONES DE LA CAPA SUBRASANTE:

- Recibir y resistir las cargas del tránsito que le son transmitidas por el pavimento.
- Transmitir y distribuir de modo adecuado las cargas del tránsito al cuerpo del terraplén.
- Evitar que los materiales finos plásticos que formen el cuerpo del terraplén contamine el pavimento.
- Evitar que las terracerías, cuando estén formadas principalmente por fragmentos de roca (pedraplenes), absorban el pavimento. En éste caso, la granulometría del material debe ser intermedia entre los fragmentos de roca del cuerpo del terraplén y los granulares del pavimento (base ò sub-base).
- Evitar que las imperfecciones de la cama de los cortes se reflejen en la superficie de rodamiento.
- Uniformizar los espesores del pavimento, sobre todo cuando varían mucho los materiales de las terracerías a lo largo del camino.
- Economizar los espesores del pavimento, en especial cuando los materiales de las terracerías requieren un espesor grande.

*1.10 TIPOLOGÍA DE CARPETAS ASFÁLTICAS**1.10.1 RIEGOS*

Son las que se construyen mediante la aplicación de uno o dos riegos de un material asfáltico, intercalados con una, dos o tres capas sucesivas de material pétreo triturado de tamaños decrecientes que, según su denominación, satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula G. de la *Norma N-CMT-4-04, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Las carpetas por el *sistema de riegos* se clasifican en carpetas de uno, de dos y de tres riegos. Las carpetas de un riego o la última capa de las carpetas de dos o tres riegos, pueden ser premezcladas ò no. Normalmente se colocan sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, nueva o existente, como capa de rodadura con el objeto de proporcionar resistencia al derrapamiento y al pulimento.

En la construcción de carpetas asfálticas por el *sistema de riegos* se tomará en cuenta lo siguiente:

- La emulsión asfáltica que se utilice en la construcción de carpetas asfálticas por el sistema de riegos será de rompimiento rápido; sin embargo, nunca se utilizará la emulsión *ECR-60*.
- En cada caso, las cantidades de los distintos tipos de materiales pétreos que se empleen, así como las del material asfáltico, serán las establecidas en el proyecto o aprobadas por el organismo a cargo. En términos generales las cantidades de materiales que se utilicen estarán comprendidas dentro de los límites indicados en la tabla 40. ⁽⁹⁾

TABLA 40. Cantidades de materiales pétreos y asfálticos en mezclas asfálticas por el sistema de riegos.

Materiales (1) lt/m ²	Tipo de carpeta							
	Tres riegos			Dos riegos			Un riego	
Cemento asfáltico material pétreo tipo 1	0 20-25			----			----	
Cemento asfáltico material pétreo tipo 2	0.7 - 0.8 8 - 12			0.7 - 0.8 8 - 12			----	
Cemento asfáltico material pétreo tipo 3-A	0.7 - 0.8 8 - 10	----	----	0.7 - 0.8 8 - 10	----	----	0.7 - 0.8 8 - 10	----
Cemento asfáltico material pétreo tipo 3-B	----	0.7 - 0.8 6 - 8	----	----	0.7 - 0.8 6 - 8	----	----	----
Cemento asfáltico material pétreo tipo 3-E	----	----	0.7 - 0.8 9 - 11	----	----	0.7 - 0.8 9 - 11	----	0.7 - 0.8 9 - 11

(1) El cemento asfáltico considerado en ésta tabla se refiere al que contiene la emulsión o el asfalto rebajado que se utilice. Para calcular la cantidad de emulsión o de asfalto rebajado por aplicar, debe dividirse el valor anotado entre el contenido de cemento que tenga la emulsión o el asfalto rebajado, ambos expresados en litros.

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT-4-05-003/02

1.10.2 LECHADAS

La aplicación de la *lechada asfáltica* prolongaría significativamente la vida de los pavimentos existentes, protegiendo las capas debajo del firme de los daños ocasionados por las filtraciones del agua.

Ventajas en el empleo de *lechadas asfálticas*:

- El sistema de tratamiento de pavimentos más versátil que hay.
- Alta eficacia de la inversión.
- Amplía la vida del pavimento existente protegiéndolo contra la oxidación y el deterioro.
- Proporciona una superficie duradera apropiada para toda clase de climas, antipolvo y libre de exudación.
- Lista para ser usada poco después de ser aplicada.
- Mejora las propiedades anti-deslizantes y las características de la conducción sin el peligro de piedras sueltas.
- Rellena las grietas y huecos proporcionando el color y la textura deseados en una sola pasada.
- Una solución económica para la conservación de los *pavimentos flexibles*.
- Se puede aplicar a cualquier superficie pavimentada, vieja o nueva, sin utilizar riego de adherencia ni compactar.

Como el más versátil tratamiento de pavimentos, la *lechada asfáltica* es también única por su capacidad para depositar una mezcla bituminosa duradera de acuerdo con las exigencias de una superficie de textura variable, sellando contra los agentes climatológicos y además proporciona:

- *Bajo costo*: De instalación económica y de alto rendimiento.
- *Utilización rápida*: Su fácil y rápida aplicación convierte a la lechada en especialmente atractiva para la rehabilitación de las vías públicas con mucho tránsito.
- *Prevención de problemas*: Utilizada sobre pavimentos de nueva construcción. La lechada asfáltica evitará el deterioro del pavimento, tales como los efectos de los agentes climatológicos, la oxidación y la fragilidad de la mezcla se ven reducidos al mínimo.

La *lechada asfáltica* se aplica a una superficie pavimentada existente por medio de un cajón extendedor que va unido a la unidad de mezclado de lechada. La lechada se introduce al cajón extendedor que a continuación aplica la capa de lechada según avanza el mezclador extendedor. El cajón puede extender la *lechada asfáltica* a lo ancho de la calzada en una sola pasada, y está construido de forma que se mantenga en estrecho contacto con la superficie existente. Esto garantiza una aplicación uniforme de la nueva capa sobre una variedad de configuraciones que abarcan distintas formas de bombeos.

Operarios adiestrados vigilan continuamente el procedimiento de mezclado automático. Otras personas limpian la superficie antes de las aplicaciones de la lechada, cortan las calles, inspeccionan la operación en cuanto a su uniformidad, limpian las tapas de metal de los registros del alcantarillado, luz, gas, etc., después de la aplicación completan el extendido de la lechada asfáltica en cualquier zona inaccesible para el cajón extendedor.

1.10.3 MORTEROS

Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado, agua y arena con tamaño máximo 2.36 mm. (N°8), que satisfaga los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula F. de la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Normalmente se coloca sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, como capa de rodadura.⁽⁹⁾

En la fabricación del *mortero asfáltico* se tomará en cuenta lo siguiente:

- La emulsión asfáltica que se utilice en la fabricación del mortero será de rompimiento lento.
- El asfalto que se utilice en la fabricación del mortero será de fraguado rápido.
- El agua que se utilice para dar la consistencia necesaria al mortero, estará libre de materias extrañas y de sales solubles en cantidades que, a juicio del organismo a cargo, resulten perjudiciales.
- El proporcionamiento del *mortero asfáltico* cumplirá con lo establecido en la tabla 41.

TABLA 41. Requisitos de proporcionamiento de morteros asfálticos.

Componentes	Contenido en la mezcla % ^[1]
Emulsión asfáltica de rompimiento lento.	18 – 25
Agua para dar la consistencia necesaria a la mezcla con emulsión asfáltica.	10 – 15

[1] por ciento respecto a la masa seca del material pétreo.

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT-4-05-003/02

La *Asociación Internacional de Morteros Asfálticos*, propone tres tipos de graduaciones básicas de los agregados:

- 1) *Tipo I o fino*: Utiliza un tamaño máximo de agregado de 3.2 mm. (1/8"). Éste tipo de *mortero asfáltico* es recomendable cuando se requiere una máxima penetración en las grietas así como para obtener una buena preparación antes de colocar una sobrecarpeta de concreto asfáltico elaborado en caliente. Comúnmente se le utiliza en lugares de poco tránsito, como pueden ser áreas de estacionamientos de vehículos ligeros, donde el principal objetivo es el sellado de la superficie.
- 2) *Tipo II o general*: Utiliza un tamaño máximo de agregado de 6.4 mm. (1/4"). Éste tipo de *mortero asfáltico* se puede utilizar como sello. Para corregir problemas de oxidación,

baches, falta de aglutinante, y para mejorar la resistencia al derrapamiento. Dependiendo de la calidad de los agregados y del diseño, puede ser aplicado en superficies donde el tránsito es moderado o pesado.

- 3) *Tipo III o grueso*: Utiliza un tamaño máximo de agregado de 9.5 mm. (3/8"). Éste tipo de *mortero asfáltico* se utiliza para corregir superficies de rodamiento en malas condiciones, como una primera capa de una estructura multicapa; se emplea también para mejorar la resistencia al derrapamiento, para incrementar la vida útil del pavimento y para prevenir el hidroplaneo (cuaplaneo), del mismo.

El *mortero asfáltico* se elabora en una planta móvil que deberá constar de:

Un depósito de capacidad adecuada para los materiales, un mezclador que asegure la correcta incorporación de los materiales entre sí, una barra rociadora de agua para humedecer la superficie por tratar, un distribuidor que asegure el flujo continuo y el extendido uniforme en todo lo ancho de la caja distribuidora y el esparcidor. Éste tipo de mezclas presentan sobre las carpetas de riego la ventaja de su mayor *impermeabilidad*.

1.10.4 CARPETAS EN FRÍO

Las carpetas asfálticas con mezclas en frío, son aquellas que se construyen mediante el tendido y compactación de una mezcla de materiales pétreos y un material asfáltico, modificado o no, que puede ser rebajado con solventes o una emulsión.

PLANTA DE MEZCLADO:

Deben contar con:

- Cribas para clasificar el material pétreo por lo menos en tres tamaños, con capacidad suficiente para mantener siempre en las tolvas el material pétreo disponible para la mezcla.
- Tolvas para almacenar el material pétreo, protegidas de la lluvia y el polvo, con capacidad suficiente para asegurar la operación continua de la planta por lo menos durante 15 minutos sin ser alimentadas, divididas en compartimentos para almacenar los materiales pétreos por tamaños.
- Dispositivos que permitan dosificar los materiales pétreos por masa, y sólo en casos excepcionales, cuando así lo apruebe el organismo a cargo, por volumen. Los dispositivos permitirán un fácil ajuste de la dosificación de la mezcla en cualquier momento, para poder obtener la granulometría que indique el proyecto.⁽⁹⁾
- Dispositivos que permitan dosificar el cemento asfáltico, con una aproximación de $\pm 2\%$ de la cantidad requerida según el proporcionamiento de la mezcla.
- Mezcladora equipada con un dispositivo para el control del tiempo de mezclado.
- Recolector de polvo.
- Dispositivo para agregar finos.

Los trabajos serán suspendidos en el momento en que se presenten situaciones climáticas adversas y no se reanudarán mientras estas no sean las adecuadas, considerando que no se construirán carpetas asfálticas con mezclas en frío:

- Sobre superficies con agua libre o encharcada.
- Cuando exista amenaza de lluvia o esté lloviendo.
- Cuando la temperatura de la superficie sobre la cual serán construidas esté por debajo de los 4°C.

Inmediatamente antes de iniciar la construcción de la carpeta asfáltica con mezcla en frío, la superficie sobre la que se colocará estará debidamente terminada dentro de las líneas y niveles, exenta de materias extrañas, polvo, grasa o encharcamientos de material asfáltico, sin irregularidades y reparados satisfactoriamente los baches que hubieran existido.

Los acarreos de la mezcla hasta el sitio de su utilización, se hará de tal forma que el tránsito sobre la superficie donde se construirá la carpeta, se distribuya sobre todo el ancho de la misma, evitando la concentración en ciertas áreas y, por consecuencia su deterioro. No se permitirá que los camiones que transportan la mezcla asfáltica, haga maniobras que puedan distorsionar, disgregar u ondular las orillas de una capa recién tendida. En el caso de que por algún motivo ésta situación llegue a suceder, el contratista de obra reparará inmediatamente los daños causados, por su cuenta y costo. ⁽⁹⁾

El tendido de la mezcla se hará en forma continua, utilizando un procedimiento que minimice las paradas y arranques de la pavimentadora o mezcladora. Durante el tendido de la mezcla, la tolva de descarga de la pavimentadora permanecerá llena, para evitar la segregación de los materiales. No se permitirá el tendido de la mezcla si existe segregación. Inmediatamente después de tendida la mezcla asfáltica, o bien cuando la emulsión haya comenzado a romper, será compactada. Al final de cada jornada y con frecuencia necesaria, se limpiarán perfectamente todas aquellas partes de la pavimentadora o de la mezcladora que presente residuos de la mezcla.

La compactación se hará longitudinalmente a la carretera, de las orillas hacia el centro en las tangentes y del interior al exterior en las curvas, con un traslape de cuando menos la mitad del ancho del compactador en cada pasada.

Por ningún motivo se estacionará el equipo de compactación, por períodos prolongados, sobre la carpeta recién compactada, para evitar que se produzcan deformaciones permanentes en la superficie terminada.

Una vez concluida la compactación en todo el ancho de la corona de la última capa de la carpeta, se formará un chaflán en las orillas, cuya base será igual a 1.5 veces el espesor de la *carpeta asfáltica*, compactándolo con el equipo adecuado. Para ello se utilizará mezcla asfáltica adicional, colocándola inmediatamente después del tendido, o bien directamente con las pavimentadoras si están equipadas para hacerlo.

Éste tipo de mezcla asfáltica surgió de la necesidad de encontrar una solución que no obligue al uso de calentamiento del material pétreo en la construcción de las carpetas. Se ha recurrido a dos procedimientos para abatir la viscosidad del cemento asfáltico:

- a) Agregar un disolvente del asfalto que actúe como vehículo para facilitar su manejo y aplicación al material pétreo.
- b) Emulsionar el asfalto para que en forma de pequeños glóbulos se mantenga en suspensión en agua y que al contacto con el material pétreo se produzca un rompimiento de la emulsión depositándose el asfalto en forma de película en la superficie del agregado. ⁽⁹⁾

CARPETAS ELABORADAS CON MOTOCONFORMADORA

La *motoconformadora* es un equipo que se utiliza para mover materiales pétreos sueltos. Su función consiste en nivelar, modelar o dar la pendiente necesaria al material con el que se trabaja, para darle una configuración determinada. Es de particular utilidad, porque su hoja puede

mantenerse en diversas posiciones. A ésta hoja también se llama *hoja conformadora ò moldeada*; su hoja estándar tiene de 3 a 4.2 m. de longitud. Los ángulos extremos presentan un problema de aplicación de fuerza en las ruedas de la motoconformadora, por tal razón, las posiciones de las ruedas de las motoconformadoras son ajustables; las ruedas frontales pueden inclinarse mucho para "acostar" la máquina cuando la hoja está a un ángulo considerable, medido desde la horizontal y los ejes traseros son "flotantes" para lograr el apoyo pleno de todas las ruedas para todas las formas del terreno. ⁽⁴⁾

La *motoconformadora* trabaja mezclando los materiales previamente colocados sobre el lecho del camino en pilas longitudinales. Esto se hace para una operación de mezcla asfáltica en el lugar. La ventaja principal que ofrece la amplia base de ruedas de la motoconformadora, durante el proceso de distribución de la capa, es la eliminación de los abuellamientos, ondulaciones, e irregularidades excesivas en la rasante o en el pavimento viejo.

Para hacer éste tipo de trabajos con mayor precisión, las motoconformadoras disponen de controles automáticos de la hoja, que permiten ajustar la hoja a la inclinación deseada y dar una línea de inclinación establecida. El sistema comprende una consola de mando en la que se fijan las metas, servo-válvulas para convertir las señales eléctricas enviadas por los elementos sensoriales en acciones hidráulicas, y un sistema hidráulico para accionar los cilindros que mueven a la hoja en forma hidráulica.

El procedimiento para éste tipo de carpeta con la *motoconformadora* se indica a continuación:

- 1) *Elección de bancos.* Con éste fin se explora la zona que la obra atravesará y sus alrededores, se muestran los bancos de depósitos en ríos y arroyos, los materiales de mina, los bancos de conglomerado y las rocas que pudieran utilizarse; se obtiene el contenido óptimo de asfalto para cada material; y, al final, de acuerdo con la calidad de las mezclas elaboradas y los estudios económicos, se eligen los bancos que se habrán de utilizar en la obra de que se trate.
- 2) *Ataque de los bancos.* Si se trata de materiales conglomerados o de roca firme, se tendrá que hacer uso de explosivos y la extracción se hará con palas frontales o palas mecánicas; si se trata de materiales aglomerados, la extracción se puede hacer ya sea con palas manuales, frontales ò con dragas.
- 3) *Tratamientos previos.* Cuando las mezclas se elaboran en el lugar, los tratamientos previos pueden ser de cribado o triturado, de acuerdo con el desperdicio que tengan los materiales.
- 4) *Transporte a la obra.* Después de aplicar el o los tratamientos previos a los materiales, éstos se trasportan a la obra, en donde se acamellonan por medio de una motoconformadora y se mide el volumen acarreado, para hacer los ajustes necesarios por si el material falta o sobra, conforme a los espesores de proyecto, se calcula la cantidad requerida del producto asfáltico. En éste caso, es posible corregir el porcentaje óptimo de asfalto obtenido en el laboratorio, si hay algún cambio en la granulometría. La corrección de campo se puede hacer si los índices asfálticos de laboratorio y de campo no varían en $\pm 20\%$.
- 5) Una vez calculada la cantidad de asfalto para regarse en un tramo de longitud determinada, el material pétreo se va abriendo con la motoconformadora en una parte de la corona; sobre éste material, se riega asfalto por medio de una petrolizadora. La motoconformadora abre de nuevo el material acamellonado (esparcirlo sobre el anterior),

y la petrolizadora riega otra parte del asfalto calculado. Estas operaciones se vuelven a realizar hasta que se incorpora todo el asfalto necesario, en pasadas completas de la petrolizadora. A partir de éste momento, la motoconformadora empieza a mezclar el material pétreo y el asfalto, al pasarlos de un lado a otro de la corona hasta homogeneizar por completo el asfalto. Si el contenido de solventes en la mezcla es mayor que 9% respecto a la cantidad de cemento asfáltico utilizado, la mezcla se sigue moviendo con la motoconformadora hasta que el contenido esté debajo de ese valor. ⁽⁴⁾

- 6) Después de lograr lo anterior, sobre la base impregnada y barrida, se da un *riego de liga* con rebajado asfáltico *FR-3* en proporción de 0.70 lt/m^2 ; de inmediato se extiende la mezcla sobre la corona con un espesor constante. Para no segregar materiales, conviene acamellonar toda la mezcla hacia el centro y extenderla poco a poco hacia las orillas, con la motoconformadora a baja velocidad.
- 7) Ya extendida la mezcla, se compacta, para ello es factible utilizar rodillos neumáticos ò lisos, ò ambos, con pesos de 8 a 15 toneladas, hasta alcanzar un 95% del peso volumétrico de la prueba de *Porter estándar*. Al final de la compactación, se borran las huellas de los neumáticos por medio de un rodillo liso que cierre a media rueda toda la superficie compactada.

1.10.5 CARPETAS EN CALIENTE

Son aquellas que se construyen mediante el tendido y compactación de una mezcla de materiales pétreos y cemento asfáltico, modificado ò no, utilizando calor como vehículo de incorporación, en una planta mezcladora estacionaria ò móvil. Las carpetas asfálticas con mezclas en caliente se construyen para proporcionar al usuario una superficie de rodamiento uniforme, bien drenada, resistente al derrapamiento, cómoda y segura.

Las *mezclas asfálticas en caliente* se elaborarán a las temperaturas que permitan obtener una mezcla y cubrimiento del material pétreo uniformes, pero lo suficientemente altas para disponer del tiempo requerido para su transporte, tendido y compactación. En general, las temperaturas de mezclado, dependiendo del tipo de cemento asfáltico utilizado, pueden ser las indicadas en la tabla 42.

Cuando se trate de cementos asfálticos modificados, las temperaturas de mezclado deben consultarse con el fabricante del modificador que se utilice. ⁽⁹⁾

Clasificación del cemento asfáltico	Temperatura de mezclado °C
AC - 5	120 - 145
AC - 10	120 - 155
AC - 20	130 - 160
AC - 30	130 - 165

TABLA 42. Temperaturas de mezclado para mezclas en caliente. ⁽⁹⁾

PLANTA DE MEZCLADO:

Deben contar con:

- Secador con inclinación ajustable colocado antes de las cribas clasificadoras y con capacidad suficiente para secar una cantidad de material pétreo igual ò mayor que la capacidad de producción de la planta.

- Un pirógrafo a la salida del secador para registrar automáticamente la temperatura del material pétreo.
- Cribas para clasificar el material pétreo por lo menos en tres tamaños, con capacidad suficiente para mantener siempre en las tolvas material pétreo disponible para la mezcla.
- Tolvas para almacenar material pétreo, protegidas de la lluvia y el polvo, con capacidad suficiente para asegurar la operación continua de la planta por lo menos durante 15 minutos sin ser alimentadas, divididas en compartimentos para almacenar los materiales pétreos por tamaños.
- Dispositivos que permitan dosificar los materiales pétreos por masa, y sólo en casos excepcionales, cuando así lo apruebe el organismo a cargo, por volumen. Los dispositivos permitirán un fácil ajuste de la dosificación de la mezcla en cualquier momento, para poder obtener la granulometría que indique el proyecto.
- Equipo necesario para calentar el cemento asfáltico en forma controlada, que garantice que éste no se contamine y que esté provisto de un termómetro con rango de 20°C a 210°C.
- Dispositivos que permitan dosificar el cemento asfáltico, con una aproximación de $\pm 2\%$ de la cantidad requerida según el proporcionamiento de la mezcla.
- Mezcladora equipada con un dispositivo para el control del tiempo de mezclado.
- Recolector de polvo.
- Dispositivo para agregar finos.

Los materiales pétreos, asfálticos y, en su caso, aditivos que se empleen en la elaboración de las carpetas asfálticas con mezcla en caliente, se mezclarán con el proporcionamiento necesario para producir una mezcla asfáltica homogénea, con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por el organismo a cargo.⁽⁹⁾

Los trabajos serán suspendidos en el momento en que se presenten situaciones climáticas adversas y no se reanudarán mientras estas no sean las adecuadas, considerando que no se construirán carpetas asfálticas con mezclas en caliente:

- Sobre superficies con agua libre o encharcada.
- Cuando exista amenaza de lluvia o esté lloviendo.
- Cuando la temperatura de la superficie sobre la cual serán construidas esté por debajo de los 15°C.

Los acarrees de la mezcla hasta el sitio de su utilización, se hará de tal forma que el tránsito sobre la superficie donde se construirá la carpeta, se distribuya sobre todo el ancho de la misma, evitando la concentración en ciertas áreas y, por consecuencia su deterioro. No se permitirá que los camiones que transportan la mezcla asfáltica, hagan maniobras que puedan distorsionar, disgregar u ondular las orillas de una capa recién tendida. En el caso de que por algún motivo ésta situación llegue a suceder, el contratista de obra reparará inmediatamente los daños causados, por su cuenta y costo.

Durante el tendido de la mezcla, la tolva de descarga de la pavimentadora permanecerá llena, para evitar la segregación de los materiales. No se permitirá el tendido de la mezcla si existe segregación. Inmediatamente después de tendida la mezcla, será compactada.

La compactación se hará longitudinalmente a la carretera, de las orillas hacia el centro en las tangentes y del interior al exterior en las curvas, con un traslape de cuando menos la mitad del ancho del compactador en cada pasada. La compactación se terminará cuando la mezcla asfáltica tenga una temperatura igual o mayor que la mínima conveniente para la compactación, que haya determinado el contratista de obra.

Por ningún motivo se estacionará el equipo de compactación, por períodos prolongados, sobre la carpeta recién compactada, para evitar que se produzcan deformaciones permanentes en la superficie terminada.

Una vez concluida la compactación en todo el ancho de la corona de la última capa de la carpeta, se formará un chaflán en las orillas, cuya base será igual a 1.5 veces el espesor de la *carpeta asfáltica*, compactándolo con el equipo adecuado. Para ello se utilizará mezcla asfáltica adicional, colocándola inmediatamente después del tendido, o bien directamente con las pavimentadoras si están equipadas para hacerlo.

Los espesores compactados de las capas que se construyan con mezclas asfálticas en caliente, no serán menores de 1.5 veces el tamaño nominal del material pétreo utilizado.

El espesor máximo de la capa, será aquel que el equipo sea capaz de compactar, de tal forma que la diferencia entre el grado de compactación en los 3 cm. superiores y los 3 cm. inferiores, no difiera en más del 1 %; si esto sucede, la carpeta se construirá en dos o más capas. ⁽⁹⁾

Las mezclas asfálticas en caliente, constituyen el mejor tipo de ellas y podemos definir las como una combinación de agregados pétreos uniformemente mezclados y cubiertos con cemento asfáltico.

Para secar los agregados pétreos y lograr la suficiente fluidez del cemento asfáltico, se usa calor y por ello es que se conocen con la denominación de *mezclas en caliente*.

Los agregados y el cemento asfáltico, se combinan en una planta central de mezclado, en la cual, todos los constitutivos son calentados y mezclados. Terminada ésta fase, se procede al traslado de la mezcla al lugar de utilización mientras está aún caliente y las operaciones de esparcido y compactación, también deben hacerse cuando está a temperaturas altas.

El agregado está constituido generalmente por la parte gruesa, que es piedra triturada, escoria triturada o grava triturada; el material fino, que lo forma la arena y siempre el "relleno" o "filler" que en estas mezclas tiene importancia primordial.

Como aglutinantes se utiliza siempre cementos asfálticos de diferente grado de penetración, según las condiciones climáticas. Las especificaciones para la mezcla, la colocación, la densidad final y la exactitud del acabado de las superficies son de lo más exigentes. (ver tabla 9).

TIPOS DE CEMENTOS ASFÁLTICOS USADOS PARA MEZCLAS EN CALIENTE

Para las *mezclas en caliente*, como hemos dicho, se usan sólo los cementos asfálticos y para escoger el grado de penetración puede servir de guía la tabla siguiente:

Tipo de tránsito	Temperaturas ambientales		
	Alta	Media	Baja
Liviano	70-85	70-85	70-85
Medio	60-70	70-85	70-85
Pesado	50-60	60-70	60-70

TABLA 43. Diferentes temperaturas para el empleo de mezclas en caliente en función al tipo de tránsito. ⁽⁵⁾

La compactación inicial deberá iniciarse cuando la suma de la temperatura de la mezcla, más la temperatura del aire esté comprendida entre 149°C y 163°C .

La primera compactación transversal, cuando el ancho es mayor de 6.0 m. se debe efectuar cuando la temperatura de la mezcla varía de 52°C a 57°C . Se debe terminar la compactación cuando la temperatura de la mezcla es aproximadamente de 38°C y a ésta temperatura haya alcanzado una compactación de 95% a 98% .

NOTA: No deberá abrirse al tránsito el camino hasta que no se haya enfriado totalmente la mezcla.

CAPÍTULO II

EVALUACIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

OBJETIVO PARTICULAR:

Analizar y conocer cuidadosamente las fallas ocasionadas en la estructura del pavimento flexible con el fin de satisfacer la resistencia y distribución de las cargas ocasionadas por el tránsito, impermeabilidad y distribución de las capas, resistencia a los agentes atmosféricos y cierta flexibilidad para adaptarse a algunas fallas de las capas inferiores.

2.1 INTRODUCCIÓN

2.2 DETERIOROS

- 2.2.1 *TIPOS Y CAUSAS DE DETERIOROS*
- 2.2.2 *FALLA FUNCIONAL*
- 2.2.3 *FALLA ESTRUCTURAL*
- 2.2.4 *FALLAS EN LA CARPETA*
- 2.2.5 *FALLA EN LA BASE*
- 2.2.6 *FALLA EN LA SUB-BASE*
- 2.2.7 *FALLA EN LA CAPA SUBRASANTE*

2.3 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES ESTRUCTURALES DEL PAVIMENTO

2.4 ANÁLISIS DE LAS DISTINTAS CAPAS DEL PAVIMENTO

- 2.4.1 *DIAGNÓSTICO*
- 2.4.2 *REPERCUSIONES FUNCIONALES Y ESTRUCTURALES*
- 2.4.3 *REPERCUSIONES ECONÓMICAS*
- 2.4.4 *PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS*
- 2.4.5 *PRUEBAS DESTRUCTIVAS*

2.5 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS SUPERFICIALES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

- 2.5.1 *RUGOSIDAD*
- 2.5.2 *FRICCIÓN*
- 2.5.3 *RUIDO*
- 2.5.4 *DRENABILIDAD*
- 2.5.5 *LUMINOSIDAD*
- 2.5.6 *DEFORMABILIDAD*
- 2.5.7 *UNIFORMIDAD*

CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.

2.1 INTRODUCCIÓN

La evaluación del *pavimento flexible* incluye el conjunto de actividades que se realizan para determinar las condiciones estructurales y funcionales en que se encuentra el pavimento. Constituye un aspecto que ha adquirido una gran importancia en la tecnología de los pavimentos, que empieza desde la misma ejecución de la obra, su puesta en operación y durante su ciclo de vida, mediante mediciones periódicas del comportamiento del pavimento, investigando la evolución en el tiempo y en el espacio de los deterioros, capacidad estructural, calidad de rodamiento, seguridad y costos asociados a la conservación y operación del pavimento.

Por lo tanto, la etapa de evaluación de los *pavimentos flexibles* ha adquirido una gran importancia hoy en día, destacando las siguientes aplicaciones: ⁽¹⁾

- Proporcionar información para calibrar, ajustar y actualizar los métodos de diseño de los pavimentos flexibles.
- Obtener información que permita comprobar las predicciones de diseño y en caso necesario poder corregirse y actualizarse.
- Producir información acerca de la eficacia de los métodos y procedimientos de construcción, conservación, rehabilitación y reconstrucción.
- Seguir la evolución del estado de los pavimentos flexibles, tanto en forma individual como de una red, con fines de la programación de las actividades de su conservación, iniciando éste proceso desde el momento mismo de su puesta en servicio.
- Durante la construcción, conocer la calidad y eficacia de algunos procesos, gracias a lo cual pueda garantizarse el cumplimiento de las especificaciones que gobiernan la seguridad y comodidad del usuario.
- Proporcionar información útil para los análisis de tipo económico, respecto a los costos del organismo y principalmente de los usuarios, formando parte muy importante en la aplicación y utilización de los *Sistemas de Administración de Pavimentos*.

2.2 DETERIOROS

La descripción precisa de los daños o deterioros que existen en un pavimento o una sección de pavimentos es sin duda, uno de los factores que deben intervenir en la formulación de un diagnóstico, basado en la necesidad de un refuerzo o su rehabilitación, y en el proyecto y la selección de la técnica para dicho refuerzo.

El objetivo principal para un Ingeniero en pavimentos es en cierta manera, buscar una alternativa para evitar la aparición de deterioros y fallas en toda la sección estructural del *pavimento flexible*, así mismo deberá determinar una relación causa-efecto con el fin de controlar estas fallas por medio del apego a las especificaciones de proyecto o de conservación.

Los *deterioros* pueden tener su origen en el empleo de una mala calidad de los materiales o bien en inadecuados procedimientos de construcción, cargas excesivas, ya sea en el número de repeticiones o en su intensidad, o ambas, la presencia del agua en condiciones desfavorables, etc. Todos estos factores se ven más acentuados por una mala o insuficiente labor de mantenimiento.

2.2.1 TIPOS Y CAUSAS DE DETERIOROS

CAUSAS DE DETERIOROS:

- **Tránsito**

El *tránsito* es un parámetro cuya influencia segura todavía no ha podido definirse debidamente. Los ensayos de la *AASHTO* han demostrado que la evolución de las deformaciones, del agrietamiento, etc., estaba asociada a la carga de los ejes, a la duración de su aplicación y al número de pasadas, pero que estos resultados sólo podían aplicarse a un pavimento determinado, apoyado sobre un suelo dado y en condiciones climáticas precisas. Por consiguiente, es necesario ser muy prudente al interpretar estos resultados y aplicarlos a un *pavimento flexible* cualquiera. ⁽²⁾

- **Condiciones climatológicas y el medio ambiente**

El agua se infiltra en el cuerpo del pavimento ya sea:

- Por la superficie pavimentada:* Basta entonces con proteger la superficie con un riego de sello o el calafateo de grietas o juntas.
- Por infiltración lateral:* El agua proviene de los acotamientos, se desplaza horizontalmente. Éste fenómeno si no es el más importante desde el punto de vista de cantidad de agua por unidad de tiempo, es el más frecuente y el más peligroso. Puede resolverse en forma adecuada impermeabilizando los acotamientos y construyendo un subdrenaje eficaz.
- Por afloración capilar:* El agua proviene del nivel freático, en éste caso el problema de la evacuación del agua es complejo y requiere casi siempre de capas rompedoras de capilaridad, geotextiles, etc.

- **La estructuración**

Se pueden producir *deterioros* por la insuficiencia en los espesores de las capas del pavimento. Otra razón puede ser por defectos constructivos aunque los materiales sean de buena calidad. Y una razón más es por fatiga que se produce por la continua repetición de las cargas del tránsito provocando degradación y pérdida de resistencia, así como deformación acumulada.

- **La calidad de los materiales y su colocación**

Proviene de:

Materiales inadecuados:

- Granulometría incorrecta.
- Porcentaje elevado de partículas redondeadas.
- Insuficiente dureza de los agregados.
- Agregados contaminados.
- Desgaste excesivo de los agregados.
- Contenido de finos plásticos.

Fabricación deficiente:

- Porcentaje incorrecto de asfalto o de finos.
- Mezcla deficiente.

Colocación que no satisface las condiciones requeridas:

- Insuficiente compactación.
- Excesiva compactación.
- Insuficiente temperatura de colocación.
- Segregación durante la colocación.
- Insuficiencia de proyecto.
- Defectos constructivos:
 - *Carpeta porosa*: Falta de control de la granulometría, seguramente por falla de una compuerta en la planta. Por lo común, no pasa las normas y es rechazada.
 - *Carpeta cerrada*: Indicadora de exceso de finos por fallas de control en la granulometría. Puede cumplir con las normas, pero la superficie lisa resultante deberá ser corregida para mejorar sus condiciones de fricción.
 - *Mezcla pinta*: Indicadora de falta de tiempo de mezclado y de fallas en la alimentación de asfalto caliente en la planta de producción continua.
 - *Mezcla excesivamente brillante*: Indicadora de exceso de asfalto producido por fallas en el control de la dosificación.
 - *Defectos de nivelación*: Producto de falta de cuidado durante el tendido, o de falla en el equipo extendedor.
 - *Carpeta abierta*: Indicadora de falta de compactación completa. ⁽²⁾

La primera etapa en el estudio de un *deterioro* será el observar cuidadosamente la misma para que permita emitir una hipótesis preliminar que deberá ser verificada posteriormente con análisis y mediciones más exactas.

Es necesario tener muy presente que la sola inspección visual no es suficiente para conocer a fondo la causa o causas de una falla en un pavimento. Se precisa un cuidadoso estudio de laboratorio para poder sacar realistas conclusiones. También es necesario conocer que el diagnóstico de deterioros en los pavimentos es un problema bastante difícil, que exige toda la atención ingenieril posible y necesaria.

TIPOS DE FALLAS:

2.2.2 FALLA FUNCIONAL

Es una alteración de la superficie de rodamiento que repercute, en mayor o menor grado, en la capacidad del camino de permitir un tránsito fluido, cómodo y seguro al usuario; a ésta capacidad se le llama *servicio*. Dependen, por ejemplo, del deterioro normal acumulado, de la calidad de la construcción, de la calidad y variabilidad de los materiales, e inclusive de las técnicas de conservación. Estas fallas son de gran importancia para los usuarios, ya que de ellas dependen, en gran parte, las condiciones de seguridad, comodidad y economía del servicio que el pavimento ofrece al usuario. Las medidas que se implementan para su mejora pueden ser de conservación periódica o rutinaria.

La experiencia en éste tipo de fallas ha demostrado que una "calificación actual" comprendida entre 1.5 y 2.5 corresponde a las condiciones de "falla funcional", como se muestra en la Fig. 2.1. ⁽¹⁾

2.2.3 FALLA ESTRUCTURAL

Las *fallas estructurales* corresponden a una deficiencia del pavimento que provoca, a corto o mediano plazo, una reducción en la capacidad de carga del mismo, y como consecuencia de su incapacidad para soportar las cargas de proyecto; la *falla estructural* se manifiesta, en su etapa

más avanzada, en una destrucción generalizada del pavimento. Al reducir la capacidad de carga de la sección estructural, se propicia la deformación y/o destrucción generalizada del mismo, es decir, la falla inicial se va extendiendo hasta destruir por completo la estructura del pavimento.

Consisten en el rompimiento del pavimento por falla estructural de la *capa subrasante*, la *sub-base* o *base*, también puede fallar estructuralmente el cuerpo del terraplén o el suelo que lo soporta. Estas fallas si imposibilitan al pavimento, cuando están muy avanzadas. Estas fallas pueden catalogarse como graves e imposibilitan al pavimento en su uso correcto. De acuerdo al Índice de Servicio, se identifica cuando llega a un valor de menos de 2, habitualmente 1.5. La falla estructural requiere generalmente trabajos de rehabilitación mayor o reconstrucción completa (Fig. 2.1).

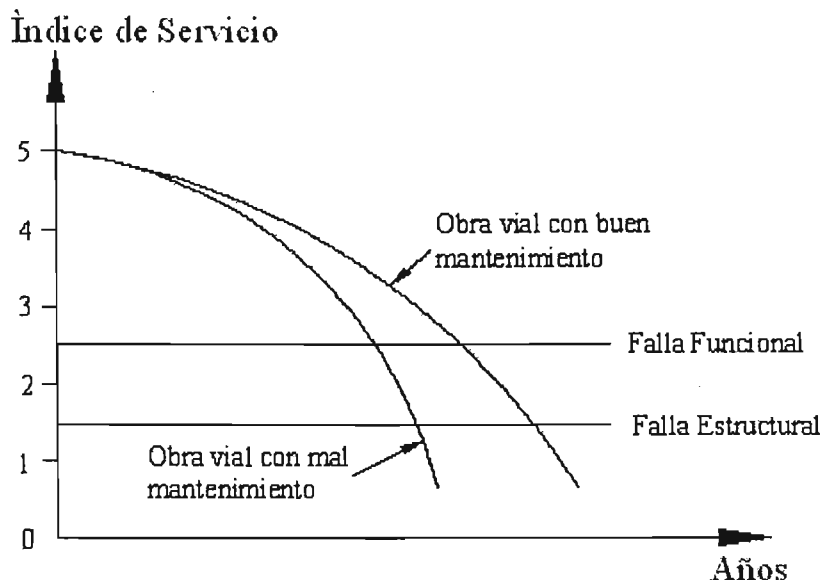


FIGURA 2.1. Comportamiento del pavimento a través del tiempo. ⁽¹⁾

2.2.4 FALLA EN LA CARPETA

Siendo la *carpeta* la que está en contacto con las cargas y los efectos del intemperismo, su falla se observa con facilidad. La falla funcional de un sello se presenta, por ejemplo, cuando la cantidad de asfalto es mayor que la necesaria o cuando la granulometría del agregado es muy fina y la superficie pronto se vuelve lisa, se arruga o se canaliza. El agregado también puede tener más arcilla que la permitida o no tener adecuada afinidad con el asfalto y desprenderse mucho de él.

Las *fallas en las carpetas asfálticas*, pueden también ser funcionales y estructurales. Las primeras se presentan cuando por exceso de asfalto, de arcilla o humedad, o algunas de ellas juntas, la carpeta pierde su *tersura*. También puede deformarse la carpeta por consolidación debida a la falta de compactación. Si la cantidad de asfalto es menor que la óptima, el agregado se desprende pronto y la carpeta se “desgranará”. O puede ser que el espesor de ésta capa no sea el indicado para el tránsito que la usa y la falla será por fatiga de la mezcla. Estas fallas pueden provocar ondulaciones, grietas aisladas o en forma de *piel de cocodrilo*, y en la temporada de lluvias reproducen muchos baches en ella, el frío intenso también provoca grietas en las carpetas débiles.

A continuación se relacionan las fallas que se manifiestan en la superficie de rodamiento y que son debidas a defectos en la carpeta asfáltica; además se indican las causas probables que las producen:

a) Agrietamiento

- Endurecimiento del asfalto.
- Bajas temperaturas.
- Escasez de asfalto.
- Falta de adherencia entre las capas inferiores.
- Espesor de la capa de rodamiento demasiado delgada.
- Presión del tránsito pesado.

b) Desintegración (disgregación)

- Escasez de asfalto.
- Endurecimiento del asfalto.
- Acción del agua.
- Insuficiente compactación durante la construcción.
- Colocación de la carpeta en tiempo muy húmedo o frío.
- Sobrecalentamiento de la mezcla.
- Utilización de agregados sucios, desintegrables o de poca afinidad con el asfalto.

c) Baches

- Poca resistencia de la carpeta en la zona defectuosa.
- Exceso o ausencia de finos en la mezcla.
- Drenaje insuficiente.

d) Inestabilidad o corrugaciones (deformación plástica)

- Exceso de asfalto.
- Partículas de agregado pétreo lisas y pulidas.
- Exceso de agregados finos.
- Cargas de tránsito muy pesadas.
- Exceso de agua.
- Cemento asfáltico demasiado blando.
- Contaminación por derrame de aceite, combustible.

e) Sangrado o afloramiento de asfalto

- Exceso de asfalto en la mezcla.
- Construcción inadecuada del sello.
- Riego de liga o de impregnación excesivos.
- Contaminación por algunos solventes que acarrea el asfalto a la superficie.

2.2.5 FALLA EN LA BASE

Ésta capa es muy importante en los *pavimentos flexibles*. Sus fallas son de tipo funcional, por la deformación que presenta. Pueden deberse a exceso de arcilla que al saturarse se expande y pierden resistencia, provocando una deformación junto con la carpeta. Si el tránsito es pesado e intenso, pronto se provoca el bache en ella y en la carpeta. El espesor de la *capa de base* puede ser menor que el correspondiente a su factor de carga, y la falla es por esfuerzo cortante.

Si la compactación fue insuficiente, seguramente se presenta un asentamiento y la deformación, permanente, provoca también deformación de la carpeta. El material de la *base* puede ser muy arenoso y perder compactación cuando se seca provocando movimientos, que se reflejan en la carpeta.

2.2.6 FALLA EN LA SUB-BASE

Las fallas en ésta capa, son del tipo que las mencionadas para la *base*. En la *base* esto no es importante. La *sub-base*, por estar en contacto con la *capa subrasante*, cuando se necesita capa de *sub-base*, puede contaminarse con arcilla, si la *capa subrasante* es muy arcillosa.

Si la falla está en la *sub-base* o la *capa subrasante*, el movimiento en la *base* y la carpeta es exagerado y se manifiesta por unas roderas o deformaciones muy profundas. Si la falla está en la *base* o en la carpeta el movimiento es menor, en donde las deformaciones son poco profundas. De ahí que la amplitud de una rodada indica en donde está localizada la falla.

2.2.7 FALLA EN LA CAPA SUBRASANTE

Ésta capa se dispone bajo la *sub-base*, con menos requisitos de calidad que ésta, pero cuyo papel en la estabilidad del conjunto *terraceria-pavimento* es fundamental. De hecho se debe buscar la conveniencia de tener un material de terracería cuidadosamente compactado, sin variación brusca respecto a la calidad y condición de la *capa subrasante*.

Es muy claro que la *capa subrasante* juega un papel importante desde un punto de vista mecánico y como función estructural, pero podría mencionarse una consideración de orden económico ya que si se cuenta con un suficiente espesor y calidad permite tener importantes ahorros en espesores de pavimentos a los que subyace, sin perjuicio de la función estructural conjunta, pues será capaz de absorber niveles de esfuerzo relativamente altos provenientes de la superficie y transmitirlos disminuidos a las terracerías.

2.3 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES ESTRUCTURALES DEL PAVIMENTO

Se refiere principalmente a la capacidad del pavimento para soportar las cargas del tránsito en la actualidad y seguirlo haciendo en el futuro próximo, ya que del análisis que se haga de la estructura del pavimento se podrá determinar con más precisión el criterio para el refuerzo o rehabilitación.

Los tipos y alcance de las fallas del pavimento deben ser evaluadas por una encuesta de la condición del pavimento. La encuesta debe incluir determinación de la cantidad y severidad de grietas, deformación permanente, asfalto aflorado, desmoronamiento de pavimento y qué tratamientos de mantenimiento se han requerido.

El espesor del pavimento y las características de materias subyacentes deben ser determinados.

Con la evaluación de la estructura del pavimento se pretende determinar si es adecuado en la actualidad y predecir su vida útil, con respecto al tránsito que lo utiliza. Cuando se encuentra que el pavimento es inadecuado, la evaluación sirve para diseñar las mejoras necesarias para que de servicio durante un determinado período.

Las técnicas de evaluación caen dentro de dos categorías generales: ⁽¹⁾

- 1) *Análisis de los componentes*, utiliza la relación entre el soporte de la *capa subrasante*, estructura del pavimento y cargas debidas al tránsito. Éste procedimiento es semejante al empleado en el diseño de pavimentos nuevos excepto que deben estimarse la estructura y el espesor del pavimento existente, convirtiéndolos en espesores de pavimento asfáltico o grava equivalente.

- 2) *Análisis por deflexiones*, implica efectuar medidas de deflexión en el pavimento y hacer un estudio de esas deflexiones en función del tránsito. En algunos casos, es conveniente utilizar los datos de los dos antes de tomar una decisión final.

FORMA DE MUESTREO:

Si la inspección realizada indica la necesidad de hacer investigaciones a fondo y se toma la decisión de obtener muestras de la *capa subrasante* y del pavimento, o de medir sus deflexiones, los lugares de prueba deben escogerse adecuadamente. Para hacer una evaluación correcta, el camino deberá dividirse en tramos de condiciones iguales o semejantes, determinándose después en cada uno de ellos, los lugares donde es necesario tomar las muestras de la estructura del pavimento (ensayos destructivos).

MUESTREO ALEATORIO:

Con ésta técnica, los sitios de muestreo se seleccionan de tal modo que todos los lugares posibles dentro del tramo que se investiga, tienen las mismas probabilidades de ser escogidas. Los lugares así escogidos son al azar usando las tablas de números aleatorios; ésta técnica nos puede reducir la cantidad de trabajo y el costo.

DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS MATERIALES:

Para diseñar correctamente el espesor de refuerzo que puede requerir el pavimento en servicio, es necesario conocer las condiciones de calidad y resistencia del material que forma la capa subrasante, así como también, las condiciones de calidad y espesores de las capas que forman el pavimento (sub-base, base y carpeta asfáltica), esto último con el fin de determinar la forma de cómo esas capas pueden ser tomadas en cuenta en el espesor del pavimento que en definitiva quedará proyectado.

ESTUDIOS DE CAMPO:

Se realizarán pruebas de campo a fin de obtener los espesores y la calidad de los materiales de la estructura del pavimento y dependiendo de la información que se requiere se podrán realizar las siguientes exploraciones:

- *Calas*: Son pequeñas excavaciones que permiten conocer los espesores y el tipo de material que integran la *carpeta asfáltica*, la capa de *base* y tal vez la *capa subrasante*, también podrá determinarse el contenido de agua y el peso volumétrico.
- *Pozos a cielo abierto (PCA)*: Permite llegar hasta el terreno natural y determinar en cada una de las capas del pavimento el valor relativo de soporte (*VRS*) en el lugar o bien ejecutar una prueba de placa: además, se puede determinar el peso volumétrico y contenido de agua en el lugar, así como obtener muestras representativas alteradas e inalteradas, para ensayos en el laboratorio. Pueden realizarse uno por cada tramo homogéneo. En tramos problemáticos, deben hacerse como mínimo dos sondeos.
- *Trincheras*: Se realizan en casos especiales y consisten en excavaciones transversales al eje del camino que se utilizan para efectuar observaciones directas, hacer pruebas en el lugar y tomar muestras alteradas o inalteradas.

2.4 ANÁLISIS DE LAS DISTINTAS CAPAS DEL PAVIMENTO

Se llama *pavimento* al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente.

La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, ya que cuando determinamos el espesor de una capa, el objetivo es darle el grosor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior. La resistencia de las diferentes capas no sólo dependerá del material que la constituye, también resulta de gran influencia el procedimiento constructivo; siendo dos factores importantes la compactación y la humedad, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas y es cuando se producen deformaciones permanentes.

El pavimento como sistema se caracteriza por sus propiedades de espesores y disposición de los materiales que lo constituyen, así como, por la calidad de los procedimientos constructivos en la que tienen gran importancia las especificaciones, la supervisión de la obra y el control de calidad ejercido.

La resistencia de los materiales que forman los pavimentos interesa desde dos puntos de vista:

- 1) En cuanto a la capacidad de carga que pueden desarrollar las capas constituyentes del pavimento para soportar adecuadamente las cargas del tránsito.
- 2) En cuanto a la capacidad de carga de la *capa subrasante*, que constituye el nexo de unión entre el pavimento y la terracería, para soportar los esfuerzos transmitidos y transmitir, a su vez, esfuerzos a la terracería a niveles convenientes.

CARPETA ASFÁLTICA:

La *carpeta asfáltica* es la parte superior del pavimento flexible, soporta directamente las sollicitaciones del tránsito y aporta las características funcionales de la carretera, es elaborada con material pétreo seleccionado y el empleo de un producto asfáltico depende del tipo de camino que se va a construir.

Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, es decir, en la *carpeta asfáltica* y la *base*, siendo de menor calidad los que se colocan en las terracerías además de que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza, y por consecuencia resultan los más económicos.

La idea básica para la construcción de un camino en todas las condiciones utilizadas por los vehículos, es preparar una adecuada *carpeta asfáltica* que:

- Tenga un espesor total suficiente y resistencia interna para soportar las cargas de tránsito esperadas.
- Tenga una adecuada compactación para prevenir la penetración ó la acumulación interna de humedad.
- Tenga una superficie final suave, resistente al deslizamiento, distorsión y resistente al deterioro por la acción de químicos anticongelantes.

Las características superficiales de la *carpeta asfáltica* influyen en diversos aspectos del funcionamiento de una carretera, tales como seguridad, comodidad, tiempos de recorrido, costos de operación y dinámica de los vehículos que circulan. Su duración depende del proyecto inicial, de la calidad de construcción de la carpeta, materiales utilizados, del desgaste producido por los vehículos, así como el deterioro producido por los factores climáticos, entre otros.

Algunas características superficiales de la *carpeta asfáltica* son:

- Regularidad superficial.
- Resistencia al deslizamiento o derrapamiento.
- Drenaje superficial.

- Permeabilidad.
- Resistencia al rodamiento.
- Consumos debidos al contacto neumático-pavimento.
- Propiedades reflejantes y de color.
- Proyección de agua al paso de los vehículos.
- Bajo nivel de ruido entre el contacto neumático-pavimento.
- Apariencia agradable.

BASE:

Es la capa que recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por los vehículos. La carpeta es colocada sobre de ella porque la capacidad de carga del material friccionante es baja en la superficie por falta de confinamiento. Regularmente ésta capa además de la compactación necesita otro tipo de mejoramiento (estabilización) para poder resistir las cargas del tránsito pesado sin deformarse y además de transmitir las en forma adecuada a las capas inferiores. En caso contrario, cuando las *bases* se construyen con materiales inertes y se comienza a transitar por la carretera, los vehículos provocan deformaciones transversales. En el caso de la granulometría, no es estrictamente necesario que los granos tengan una forma semejante a la que marcan las fronteras de las zonas granulométricas.

SUB-BASE:

Cumple una cuestión de economía ya que nos ahorra dinero al poder transformar un cierto espesor de la *capa de base* a un espesor equivalente de material de *sub-base* (no siempre se emplea en el pavimento), impide que el agua de las terracerías ascienda por capilaridad y evita que el pavimento sea absorbido por la *capa subrasante*. Deberá transmitir en forma adecuada los esfuerzos a las terracerías.

CAPA SUBRASANTE:

La función de la *capa subrasante* es soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, además de considerarse la cimentación del pavimento. Entre mejor calidad se tenga en ésta capa, el espesor del pavimento será más reducido y habrá un ahorro en costos sin mermar la calidad. Otra de las funciones de la *capa subrasante* es evitar que el terraplén contamine al pavimento y que sea absorbido por las terracerías.

Una *capa subrasante* resistente, será capaz de tolerar niveles de esfuerzos relativamente altos, permitiendo usar sobre ella espesores reducidos sin comprometer la estabilidad general, lo que conducirá a importantes ahorros en la inversión, ya que debe repetirse, los costos de las diferentes capas de un pavimento flexible crecen en general según estas estén más cerca de la superficie.

2.4.1 DIAGNÓSTICO

Los defectos que presenta un pavimento y que disminuyen la comodidad del usuario o la vida de servicio de esa estructura, frecuentemente corresponden a defectos constructivos y difícilmente pueden clasificarse como deterioros.

Sin embargo, atendiendo al hecho de que habrán de ser corregidos mediante labores de mantenimiento o conservación, en el presente *catálogo* se han incluido como deterioros. Adicionalmente puede decirse que tales defectos pueden sufrir un deterioro gradual con el paso de los vehículos y convertirse así en verdaderos deterioros del pavimento. ⁽²⁾

El interés del presente *catálogo* se orienta a las evaluaciones con miras a los trabajos de conservación, rehabilitación o reconstrucción. Los deterioros de pavimentos incluidos se consideran los más relevantes.

Se han agrupado en tres grandes categorías; los de *superficie*, los de *estructura* y los que encuentran su origen en la *construcción*.

Los deterioros dentro de las tres grandes categorías se agrupan a su vez en las subcategorías de:

- Desprendimientos.
- Alisamientos.
- Exposición de agregados.
- Deformaciones.
- Agrietamientos.

Cada ficha técnica incluye el nombre del *deterioro* con el grupo y subgrupo en el que se ha clasificado; la descripción del deterioro; una imagen o aspecto superficial; una forma propuesta para su evaluación; los trabajos típicos de corrección asociados a las fronteras establecidas en la evaluación y finalmente, las causas más comunes que dan origen al deterioro descrito.

CATÁLOGO DE FALLAS DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES

1. DETERIOROS DE LA SUPERFICIE

1.1. Desprendimientos

- a) Pérdida de agregados.
- b) Pérdida de la capa de rodadura.
- c) Bache superficial.

1.2. Alisamientos

- a) Exudación de asfalto.
- b) Desgaste de agregados pétreos.

1.3. Exposición de agregados.

2. DETERIOROS DE LA ESTRUCTURA

2.1. Deformaciones

- a) Roderas.
- b) Canalizaciones.
- c) Baches profundos.
- d) Ondulaciones.

2.2. Agrietamientos

- a) Grietas longitudinales.
- b) Grietas transversales.
- c) Fisuras, solas o en retícula.
- d) Piel de cocodrilo.

3. DETERIOROS POR DEFECTOS CONSTRUCTIVOS


- a) Falta de control en la granulometría del material pétreo.
- b) Falta de tiempo de mezclado entre el asfalto y el agregado pétreo (mezcla pintada).
- c) Indicadora de exceso de asfalto en forma de manchas negras (mezcla excesivamente brillante).
- d) Falta de cuidado durante el tendido (defectos de nivelación).
- e) Indicadora de falta de compactación completa: roderas, canalizaciones, etc.
- f) Defectos de ejecución:
 - Mala terminación de juntas.
 - Formación de líneas longitudinales con pérdida de gravilla (peinado), debidas a un mal reparto de los difusores del tanque regador.

- Pérdidas de gravilla por mal reparto de los difusores.
 - Fraguado precipitado de la mezcla asfáltica.
 - Fraguado lento de la mezcla asfáltica.
- g) La más frecuente, se debe a la apertura prematura al tránsito.

DETERIOROS DE LA SUPERFICIE

DESPRENDIMIENTOS:


TABLA 1. Pérdida de Agregados.

Deterioro	1. Deterioros de la superficie 1.1 Desprendimientos a) Pérdida de agregados		
Descripción	Desprendimiento de agregados pétreos en la superficie		
	<i>De tratamientos superficiales:</i> Pérdida parcial del agregado dejando expuestas áreas aisladas de la capa de apoyo.	<i>De capas asfálticas:</i> Pérdida en la superficie de los agregados de capas asfálticas con espesor mayor que 5 cm.	
Imagen o aspecto superficial			
Evaluación	Proporción del área afectada respecto al área total, en tramos de 100 m., por banda de circulación.		
	Ligero:	Ligero < 5%	Ligero < 5%
	Medio:	5 % < Medio < 30 %	5 % < Medio < 10 %
	Fuerte:	Fuerte > 30 %	Fuerte > 10 %
Frontera y tipo de intervención	Ligero:	Tratamiento aislado en mantenimiento rutinario.	Tratamiento aislado en mantenimiento rutinario.
	Medio:	Nuevo tratamiento superficial en mantenimiento periódico.	Reposición del material perdido y tratamiento superficial en mantenimiento periódico.
	Fuerte:		Sobrecapa asfáltica > 5 cm.
Causas comunes	<ul style="list-style-type: none"> • Esparcido irregular del asfalto. • Asfalto inadecuado. • Agregado pétreo inadecuado por falta de adherencia en el asfalto. • Agregado sucio, con polvo adherido. • Lluvia durante el esparcido o antes del fraguado del asfalto. 		

Nota: Se considera como área afectada la suma de las áreas de los rectángulos que circunscriben a cada una de las áreas con deterioro. ⁽³⁾

FUENTE: CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMERICA.
XX CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS DE MONTREAL.


TABLA 2. Pérdida de la Capa de Rodadura.

Deterioro	1. Deterioros de la superficie 1.1 Desprendimientos b) Pérdida de la capa de rodadura (peladuras)	
Descripción	Desprendimiento de la última capa delgada, de tratamientos superficiales como: <ul style="list-style-type: none"> • Lechadas. • Microcarpetas 1 a 2 cm. • Capas de rodadura de 2 a 3 cm. • Sobrecarpetas delgadas de 3 a 5 cm. 	
Imagen o aspecto superficial		
Evaluación	Proporción del área afectada respecto al área total, en tramos de 100 m., por banda de circulación.	
	Ligero < 5%	
	5 % < Medio < 30 %	
	Fuerte > 30 %	
Frontera y tipo de intervención	Ligero:	Tratamiento aislado en mantenimiento preventivo.
	Medio:	Nuevo tratamiento superficial en mantenimiento periódico. Generalmente se requiere un doble tratamiento.
	Fuerte:	
Causas comunes	<ul style="list-style-type: none"> • Limpieza insuficiente previa al tratamiento superficial. • Esparcido heterogéneo del asfalto. • Asfalto inadecuado. • Dosificación del agregado pétreo – asfalto inadecuado. • Colocación con lluvia o exceso de agua en la capa de apoyo, que produce delaminación. • Compactación deficiente. • Fraguado incompleto después de la apertura al tránsito. • Envejecimiento del asfalto. 	

Nota: Se considera como área afectada la suma de las áreas de los rectángulos que circunscriben a cada una de las áreas con deterioro.⁽³⁾

FUENTE: CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA.
XX CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS DE MONTREAL.

TABLA 3. Bache superficial.

Deterioro	1. Deterioros de la superficie 1.1 Desprendimientos c) Bache superficial	
Descripción	Desprendimiento del material de la capa de base en la que se apoya la carpeta, después de la pérdida de ésta; generalmente en bases no tratadas.	
Imagen o aspecto superficial		
Evaluación	Proporción del área afectada respecto al área total, en tramos de 100 m., por banda de circulación.	
	Ligero < 5%	
	5 % < Medio < 30 %	
	Alta > 30 %	
Frontera y tipo de intervención	Ligero:	Tratamiento aislado en mantenimiento preventivo.
	Medio:	Base sin tratar: Recuperación, reperfilado y recompactación de la base.
	Fuerte:	Base tratada: Colocación de una capa correctiva (Carpeta reniveladora y una nueva carpeta o tratamiento superficial).
Causas comunes	<ul style="list-style-type: none"> • Insuficiente penetración (< 0.5 cm.), del riego de impregnación en bases hidráulicas. • Dosificación insuficiente del asfalto en bases asfálticas con cemento asfáltico, aplicado en caliente, diluido o emulsificado. • Asfalto inadecuado o de mala calidad. • Espesor insuficiente de la carpeta. 	

Nota: Se considera como área afectada la suma de las áreas de los rectángulos que circunscriben a cada una de las áreas con deterioro. ⁽³⁾

FUENTE: CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMERICA.
XX CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS DE MONTREAL.

ALISAMIENTOS:

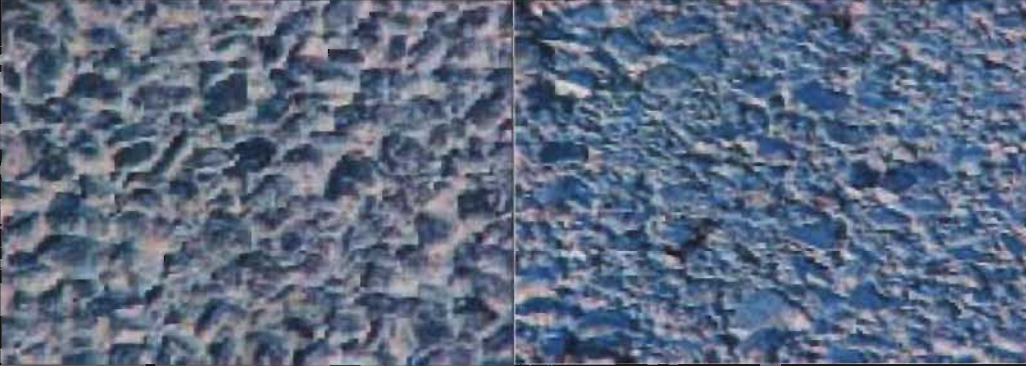
TABLA 4. Alisamientos.

Deterioro	1. Deterioros de la superficie 1.2 Alisamientos a) Exudación de asfalto (llorado)	
Descripción	Presencia de asfalto sin agregado en la superficie.	
Imagen o aspecto superficial		
Evaluación	Proporción del área afectada respecto al área total, en tramos de 100 m., por banda de circulación.	
	Ligero < 10 %	
	10 % < Medio < 50 %	
	Fuerte > 50 %	
Frontera y tipo de intervención	Ligero:	Tratamiento aislado en mantenimiento rutinario.
	Medio:	Fresado superficial < 1 cm. de inmediato. Colocación de nueva carpeta asfáltica.
	Fuerte:	
Causas comunes	<ul style="list-style-type: none"> • Exceso de asfalto en la dosificación. • Uso de asfalto muy blando. • Derrame de solventes. 	

Nota: Se considera como área afectada la suma de las áreas de los rectángulos que circunscriben a cada una de las áreas con deterioro. ⁽³⁾

FUENTE: CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA
XX CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS DE MONTREAL.

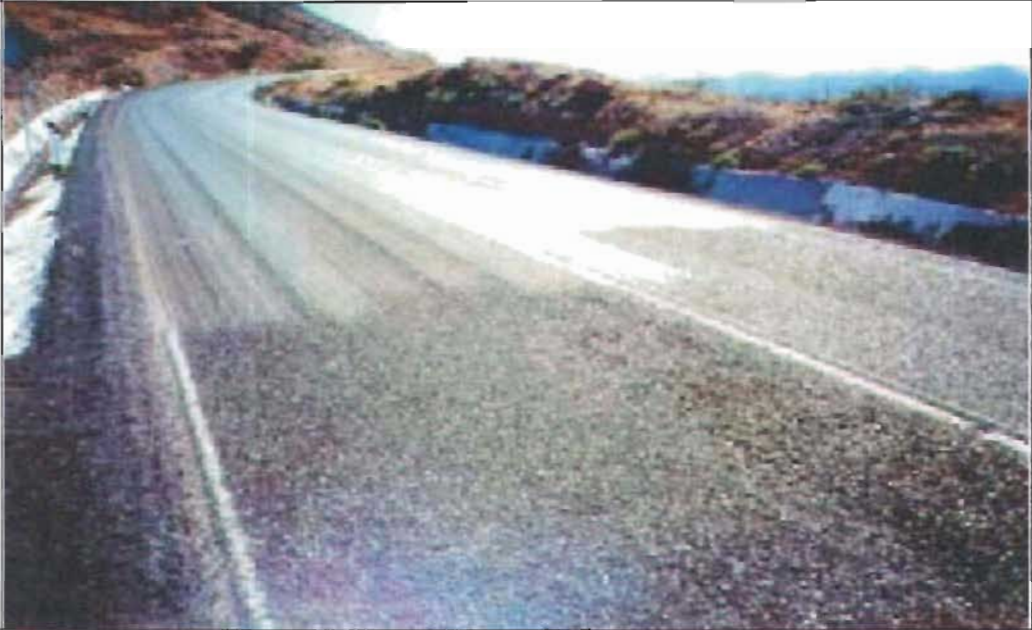
TABLA 5. Desgaste de Agregados.

Deterioro	1. Deterioros de la superficie 1.2 Alisamientos b) Desgaste de agregados pétreos
Descripción	Presencia de agregados que presentan una cara plana en la superficie, generalmente bañados en el asfalto.
Imagen o aspecto superficial	
Evaluación	Se mide el coeficiente de fricción en forma continua o puntual. Los tramos con coeficiente de fricción aproximados a 1 deben ser atendidos de inmediato.
Frontera y tipo de intervención	Los tramos afectados, si corresponden a una capa de rodadura mayor que 5 cm., se fresan de inmediato. Si corresponden a un tratamiento superficial o microcarpeta, se aplica un nuevo tratamiento, con agregados duros.
Causas comunes	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de agregados suaves (por ejemplo calizas), susceptibles al pulimento.

FUENTE: CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA.
XX CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS DE MONTREAL.

EXPOSICIÓN DE AGREGADOS:

TABLA 6. Exposición de Agregados.

Deterioro	2. Deterioros de la superficie 1.3 Exposición de agregados	
Descripción	Presencia de agregados parcialmente expuestos fuera del mortero asfáltico - arena.	
Imagen o aspecto superficial		
Evaluación	Proporción del área afectada respecto al área total, en tramos de 100 m., por banda de circulación.	
	Ligero < 20 %	
	20 % < Medio < 50 %	
	Fuerte > 50 %	
Frontera y tipo de intervención	Ligero:	No requiere intervención.
	Medio:	Nueva capa de rodadura en áreas afectadas.
	Fuerte:	Nueva capa de rodadura al siguiente año en mantenimiento periódico en todo el tramo.
Causas comunes	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de agregados con tamaño inadecuado y distribución granulométrica deficiente en el rango de las arenas. • Circulación de llantas con clavos. • Segregación de los agregados durante su manejo en obra. 	

Nota: Se considera como área afectada la suma de las áreas de los rectángulos que circunscriben a cada una de las áreas con deterioro. ⁽³⁾

FUENTE: CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA.
XX CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS DE MONTREAL.

DETERIOROS DE LA ESTRUCTURA


DEFORMACIONES:

TABLA 7. Roderas.

Deterioro	2. Deterioros de la estructura 2.1 Deformaciones a) Roderas	
Descripción	Deformación del perfil transversal por hundimiento a lo largo de las rodadas, con la aparición de líneas laterales a cada lado de la rodera.	
Imagen o aspecto superficial		
Evaluación	Profundidad máxima de la rodera, medida a partir de una regla colocada transversalmente cada 100 m. o más.	
	Ligero < 2 cm	
	2 cm < Medio < 4 cm	
	Fuerte > 4 cm	
Frontera y tipo de intervención	Ligero:	Aisladamente rellenar la rodera en mantenimiento rutinario.
	Medio:	Rellenar la rodera en forma continua en mantenimiento rutinario.
	Fuerte:	Fresar la carpeta y sustituirla en la banda de circulación afectada.
Causas comunes	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de asfaltos blandos. • Dosificación de asfalto en exceso. • Uso de agregados redondeados. • Espesor y resistencia insuficiente de la capa de base. 	


FUENTE: CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA.
XX CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS DE MONTREAL.

TABLA 8. Canalizaciones.

Deterioro	2. Deterioros de la estructura 2.1 Deformaciones b) Canalizaciones	
Descripción	Deformación del perfil transversal, tanto por hundimiento a lo largo de las rodadas como por elevación de las áreas vecinas adyacentes a las rodadas. Las deformaciones presentan una configuración más amplia que las roderas.	
Imagen o aspecto superficial		
Evaluación	Profundidad máxima de la canalización, medida a partir de una regla colocada transversalmente sobre las elevaciones laterales, cada 100 m. o más.	
	Ligero < 2 cm	
	2 cm < Medio < 4 cm	
	Fuerte > 4 cm	
Frontera y tipo de intervención	Ligero:	Aisladamente rellenar en sus puntos críticos la canalización en mantenimiento rutinario. Bacheo profundo.
	Medio:	Rellenar la rodera en forma continua en mantenimiento rutinario y programar mantenimiento periódico.
	Fuerte:	Recuperar la capa de rodadura, más aparte la capa de base para estabilizar de 15 a 20 cm., con asfalto o cemento Pórtland y reforzar la estructura. Colocar una nueva carpeta de rodadura del espesor necesario.
Causas comunes	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad estructural del pavimento insuficiente. 	

FUENTE: CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMERICA.
XX CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS DE MONTREAL.

TABLA 9. Baches Profundos.

Deterioro	2. Deterioros de la estructura 2.1 Deformaciones c) Baches profundos	
Descripción	Hundimiento local de la carpeta, con agrietamiento en malla cerrada y generalmente pérdida parcial de bloques de la carpeta asfáltica.	
Imagen o aspecto superficial		
Evaluación	Proporción del área afectada respecto al área total en tramos de 100 m., con hundimiento mayor que 2 cm., medidos a partir de una regla de 3 m.	
	Ligero < 1 %	
	1 % < Medio < 10 %	
	Fuerte > 10 %	
Frontera y tipo de intervención	Ligero:	Tratamiento aislado en mantenimiento rutinario. Bacheo.
	Medio:	Tratamiento aislado y nueva capa de rodadura para refuerzo en el tramo afectado.
	Fuerte:	Recuperación de la capa de rodadura y la capa de base para estabilización de 15 a 20 cm. Agregar nueva capa de rodadura del espesor necesario.
Causas comunes	<ul style="list-style-type: none"> • Estructura inadecuada. • Defecto constructivo aislado. • Subdrenaje inadecuado. 	

Nota: Se considera como área afectada la suma de las áreas de los rectángulos que circunscriben a cada una de las áreas con deterioro. ⁽³⁾

FUENTE: CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA.
XX CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS DE MONTREAL.


TABLA 10. Ondulaciones.

Deterioro	2. Deterioros de la estructura 2.1 Deformaciones d) Ondulaciones	
Descripción	Deformaciones del perfil longitudinal con crestas y valles regularmente espaciados a distancias cortas. Generalmente están acompañadas, en los sitios críticos, por grietas semicirculares.	
Imagen o aspecto superficial		
Evaluación	Profundidad máxima de los valles medida a partir de una regla de 3 m. colocada longitudinalmente.	
	Ligero < 1 cm	
	1 cm < Medio < 2 cm	
	Fuerte > 2 cm	
Frontera y tipo de intervención	Ligero:	No requiere intervención
	Medio:	Sustitución local de la capa de rodadura en mantenimiento rutinario.
	Fuerte:	
Causas comunes	<ul style="list-style-type: none"> • Circulación lenta en pendientes pronunciadas. • Frenado de vehículos pesados en intersecciones. • Dosificación de asfalto inadecuado. • Agregados redondeados. • Asfaltos blandos. • Contaminación con aceite y combustible. 	

FUENTE: CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA.
XX CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS DE MONTREAL.


AGRIETAMIENTOS:

TABLA 11. Grietas longitudinales.

Deterioro	2. Deterioros de la estructura 2.2 Agrietamientos a) Grietas longitudinales
Descripción	Rotura longitudinal sensiblemente paralela al eje de la carretera, con abertura mayor de 3 mm.
Imagen o aspecto superficial	
Evaluación	Longitud de las grietas en tramos de 100 m., respecto a la longitud del tramo.
	Ligero < 20 %
	20 % < Medio < 100 %
	Fuerte > 100 %
Frontera y tipo de intervención	En cualquier nivel, reparar las grietas en mantenimiento rutinario, calafateándolas.
Causas comunes	<ul style="list-style-type: none"> • Juntas longitudinales de construcción inadecuadamente trabajadas. • Gradiente térmico superior a los 30°C. • Uso de asfaltos muy duros. • Asfaltos envejecidos. • Expansión y contracción en las orillas de la carpeta asfáltica.


FUENTE: CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA.
XX CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS DE MONTREAL.

TABLA 12. Grietas transversales.

Deterioro	2. Deterioros de la estructura 2.2 Agrietamientos b) Grietas transversales	
Descripción	Rotura transversal sensiblemente perpendicular al eje de la carretera, con abertura mayor de 3 mm.	
Imagen o aspecto superficial		
Evaluación	Número de grietas por tramos de 100 m.	
	Ligero < 2 grietas	
	2 grietas < Medio < 15 grietas	
	Fuerte > 15 grietas	
Frontera y tipo de intervención	Ligero:	Reparación en mantenimiento rutinario, calafateándolas.
	Medio:	
	Fuerte:	Sustitución de la capa de rodadura o sobrecarpeta con espesor suficiente.
Causas comunes	<ul style="list-style-type: none"> • Juntas transversales de construcción inadecuadamente trabajadas. • Gradiente térmico superior a los 30°C. • Uso de asfaltos muy duros. • Reflejo de grietas en la capa de base estabilizada. 	


FUENTE: CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA.
XX CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS DE MONTREAL.

TABLA 13. Fisuras aisladas o en retícula.

Deterioro	2. Deterioros de la estructura 2.2 Agrietamientos c) Fisuras aisladas o en retícula	
Descripción	Rotura longitudinal o transversal, con abertura menor que 3 mm. y separación mayor que 15 cm.	
Imagen o aspecto superficial		
Evaluación	Relación del área rectangular, de ancho igual a 0.5 m. y largo igual a la longitud de cada fisura, respecto al área total en tramos de 100 m.	
	Ligero < 10 %	
	10 % < Medio < 50 %	
	Fuerte > 50 %	
Frontera y tipo de intervención	Ligero:	Calafateo de cada fisura individual en mantenimiento rutinario.
	Medio:	Lechada superficial o microcarpeta, en toda el área afectada.
	Fuerte:	Sobrecarpeta con espesor mayor de 5 cm.
Causas comunes	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de asfaltos muy duros. • Reflejo de fisuras en capa de base estabilizada. 	

FUENTE: CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA.
XX CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS DE MONTREAL.

TABLA 14. Piel de cocodrilo.

Deterioro	2. Deterioros de la estructura 2.2 Agrietamientos d) Piel de cocodrilo	
Descripción	Roturas longitudinales y transversales, con separación menor que 15 cm., y con abertura creciente según avanza el deterioro. Generalmente presenta hundimiento del área afectada.	
Imagen o aspecto superficial		
Evaluación	Proporción del área afectada respecto al área total, en tramos de 100 m.	
	Ligero < 10 %	
	10 % < Medio < 50 %	
	Fuerte > 50 %	
Frontera y tipo de intervención	Ligero:	Lechada superficial en cada área afectada.
	Medio:	Lechada superficial en todo el tramo.
	Fuerte:	Recuperación de la capa de rodadura y parte de la capa de base para estabilización como refuerzo. Nueva carpeta asfáltica.
Causas comunes	<ul style="list-style-type: none"> • Incompatibilidad de deflexiones con el espesor de la carpeta asfáltica. • Subdrenaje inadecuado en sitios aislados. • Uso de asfaltos muy duros. 	

Nota: Se considera como área afectada la suma de las áreas de los rectángulos que circunscriben a cada una de las áreas con deterioro. ⁽³⁾

FUENTE: CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA.
XX CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS DE MONTREAL.

DETERIOROS POR DEFECTOS CONSTRUCTIVOS

TABLA 15. Deterioros por defectos constructivos.

Deterioro	3. Deterioros por defectos constructivos	
Descripción	Deterioros que se producen por defectos en la construcción de instalaciones bajo los pavimentos. Siguen un patrón bien definido en concordancia con la instalación. Se muestran como hundimientos localizados, grietas longitudinales o transversales, etc.	
Imagen o aspecto superficial		
		
Evaluación	Aplica el criterio según el tipo de deterioro.	
Frontera y tipo de intervención	Aplica la correspondiente al tipo de deterioro y su categoría.	
Causas comunes	<ul style="list-style-type: none"> • Inadecuado relleno de zanjas abiertas para colocar instalaciones o equipamientos. • Inadecuada estructura del pavimento sobre relleno de zanjas. • Materiales inadecuados en el relleno de zanjas. 	

FUENTE: CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA.
XX CONGRESO MUNDIAL DE CARRETERAS DE MONTREAL.

2.4.2 REPERCUSIONES FUNCIONALES Y ESTRUCTURALES

Entre las características *funcionales* tenemos:

- La resistencia al derrapamiento obtenida a través de una adecuada textura superficial, adaptada a las velocidades previstas de circulación y cuya influencia en la seguridad vial es decisiva.
- La regularidad superficial del pavimento, tanto transversal como longitudinal, que afecta a la comodidad de los usuarios en mayor o menor medida en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación. Ésta característica está ligada igualmente a la facilidad para eliminar el agua superficial, que también afecta a la seguridad del usuario.
- El ruido al circular tanto en el interior de los vehículos (usuarios), como en el exterior (entorno).
- Las propiedades de reflexión luminosa, tan importantes para la conducción nocturna y para el diseño adecuado de las instalaciones de iluminación. Es importante el color para efectos de contraste con el señalamiento horizontal.
- El desagüe superficial rápido para limitar el espesor de la película de agua, salpicaduras, mediante pendientes adecuadas que conduzcan el agua hacia los dispositivos de drenaje.⁽¹⁾

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

2.4.3 REPERCUSIONES ECONÓMICAS

Las características superficiales de los pavimentos tienen además influencia en los costos de operación de los usuarios, incidiendo en el consumo de energía y en la ocurrencia de accidentes, así como en otros rubros, por ejemplo, los relacionados con aspectos ambientales, como el ruido generado, que es necesario considerarlo en el costo total del transporte. En la Fig. 2.3 se presenta la relación entre las características superficiales del pavimento y los factores que producen un incremento en los costos de operación de los vehículos. Diferentes organismos, entre ellos el *Instituto Mexicano del Transporte* ⁽⁴⁾, han realizado estudios sobre la influencia del estado superficial de los pavimentos en los costos de operación de los vehículos (Fig. 2.4 y 2.5). Éste concepto es sumamente importante en los análisis económicos de las alternativas de mantenimiento y rehabilitación de los *pavimentos flexibles*.

La interacción *vehículo-pavimento* conduce a que las irregularidades superficiales influyan en mayor o menor grado en determinadas características superficiales que afectan al usuario, las cuales se clasifican de acuerdo con las longitudes de onda y amplitudes de las irregularidades de la superficie, definiéndose los conceptos de *microtextura*, *macrotextura*, *megatextura* e *irregularidad superficial* o de *planicidad*. En la tabla 16 se presenta la clasificación propuesta por el *Comité Técnico* de CSP de la AIPCR (Association Internationale Permanente des Congrès de la Route), y en la Fig. 2.2 se muestran los campos de influencia de las irregularidades superficiales sobre las interacciones *vehículo-pavimento*.⁽⁵⁾

TABLA 16. Clasificación de las irregularidades superficiales de un pavimento (Comité Técnico de CSP AIPCR).

DOMINIO		RANGO DE DIMENSIONES	
		Longitud de onda (Horizontal)	Amplitud (Vertical)
MICROTEXTURA		0 - 0.5 mm	0 - 0.2 mm
MACROTEXTURA		0.5 - 50 mm	0.2 - 10 mm
MEGATEXTURA		50 - 500 mm	1 - 50 mm
IRREGULARIDADES SUPERFICIALES	ONDAS CORTAS	0.5 - 5 m	1 - 20 mm
	ONDAS MEDIAS	5 - 15 m	5 - 50 mm
	ONDAS LARGAS	15 - 50 m	10 - 200 mm

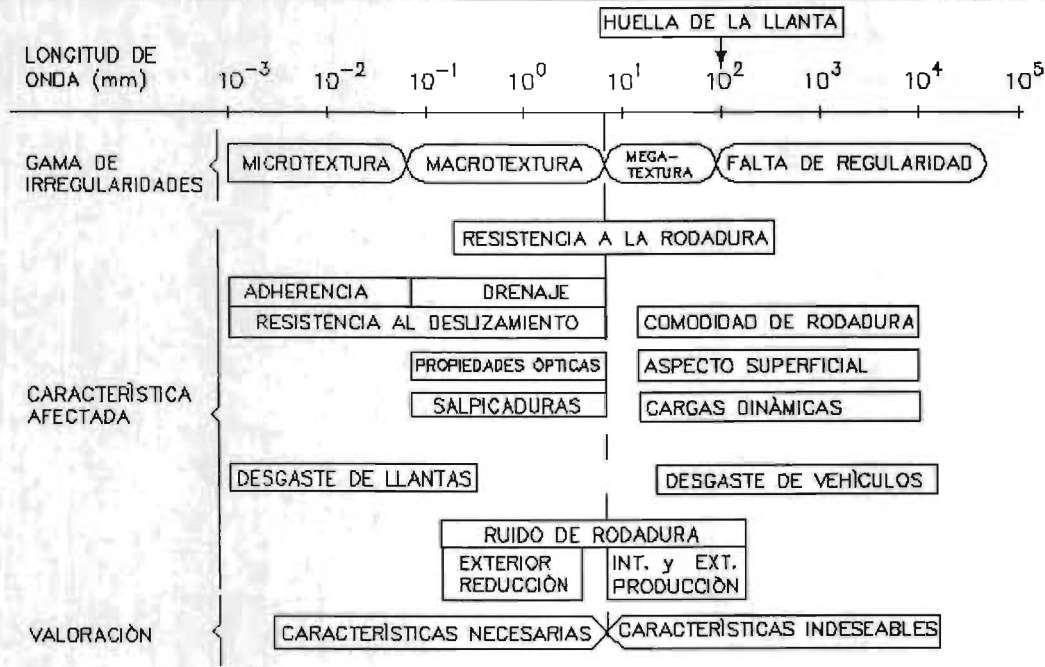


FIGURA 2.2. Campos de influencia de las irregularidades superficiales del pavimento sobre las interacciones carretera - vehículo. ⁽⁶⁾

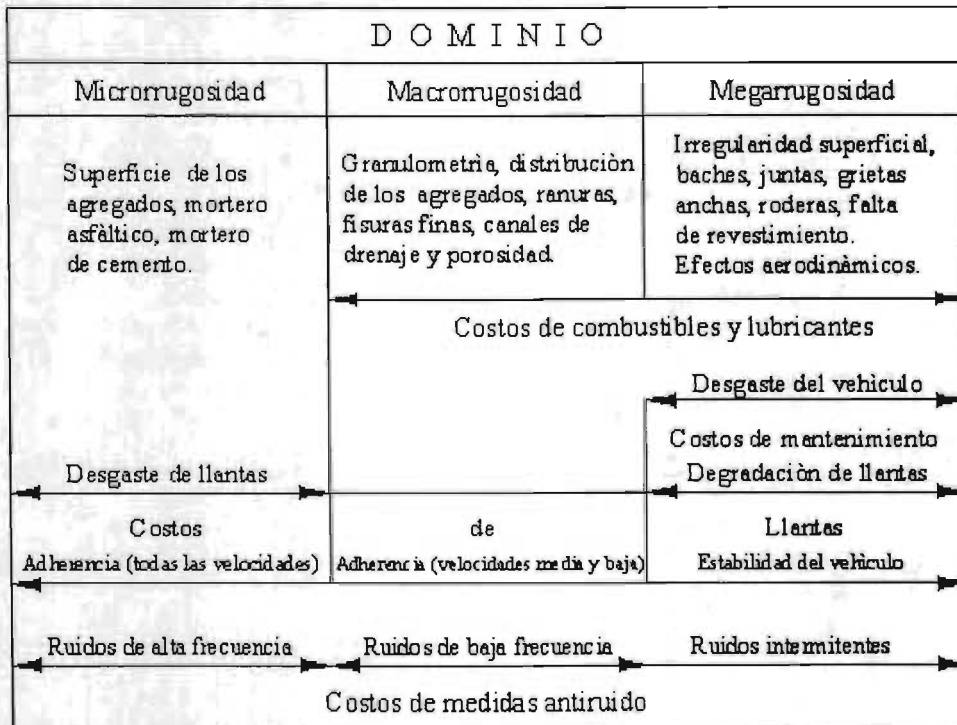


FIGURA 2.3. Relación entre las características superficiales del pavimento y los factores de consumo de energía y costos de operación, accidentes y ambientales. ⁽⁶⁾

Como se observa en la Fig. 2.6, los costos de operación dependen también, de la magnitud de las irregularidades superficiales del pavimento, afectando la velocidad de circulación, el desgaste de las llantas y de los vehículos, costos de combustibles y lubricantes, y otros efectos que repercuten fuertemente en dichos costos.

Por otra parte, puede decirse que en general los factores que afectan la velocidad del vehículo, también inciden en los costos de operación, así como una deficiente visibilidad, encharcamientos, disminución de la resistencia al deslizamiento, etc., de manera que deben también vigilarse para obtener la máxima eficiencia de la carretera y el menor costo del transporte.

En los sistemas actuales de evaluación, para el mantenimiento y rehabilitación de los *pavimentos flexibles*, es de gran importancia conocer la forma en que el pavimento se degrada en el transcurso del tiempo, así como la configuración del tránsito, con el objetivo de poder efectuar los análisis económicos respectivos, sobre la eficiencia con que el pavimento cumple con sus funciones, las ventajas de las acciones de conservación y rehabilitación adoptadas y la acumulación de la experiencia necesaria para mejorar la mejor administración de los pavimentos.

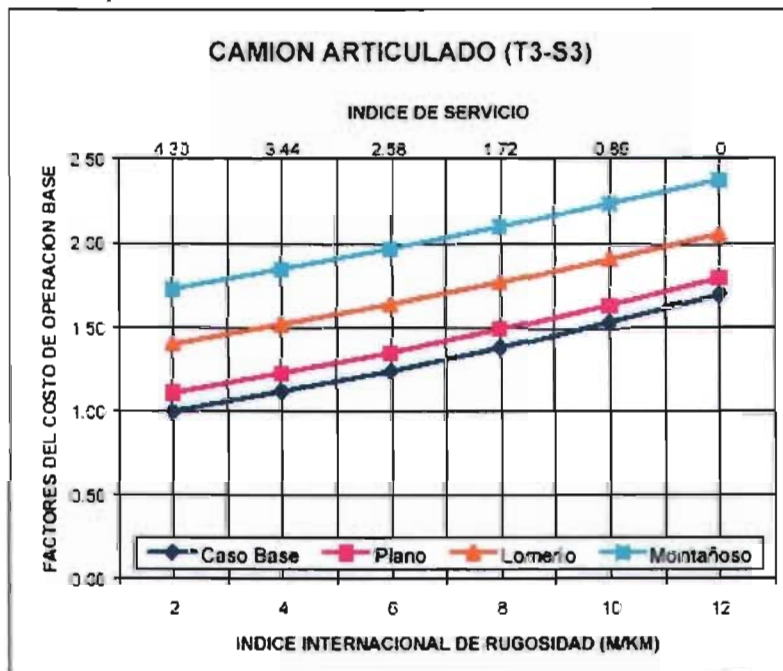


FIGURA 2.4. Efecto del estado superficial del pavimento y la topografía en los costos de operación. ⁽⁴⁾

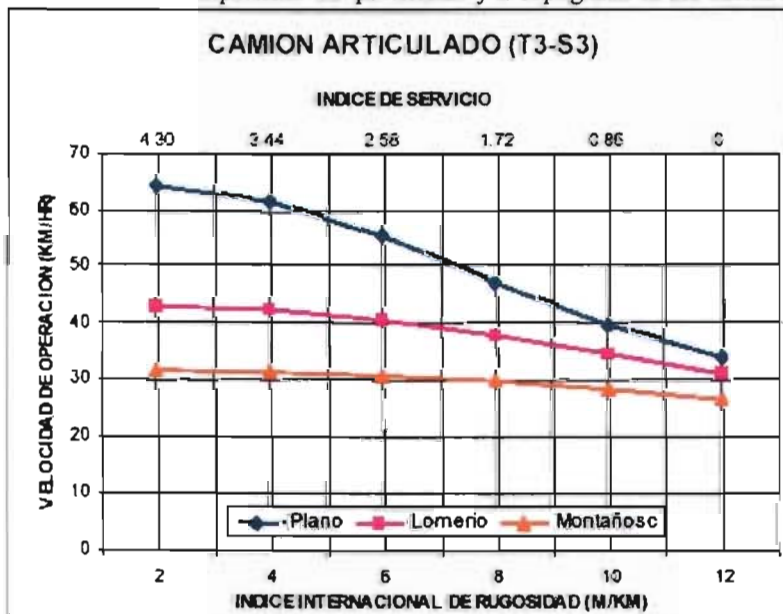


FIGURA 2.5. Efecto del estado superficial y topografía del pavimento en los costos de operación. ⁽⁴⁾

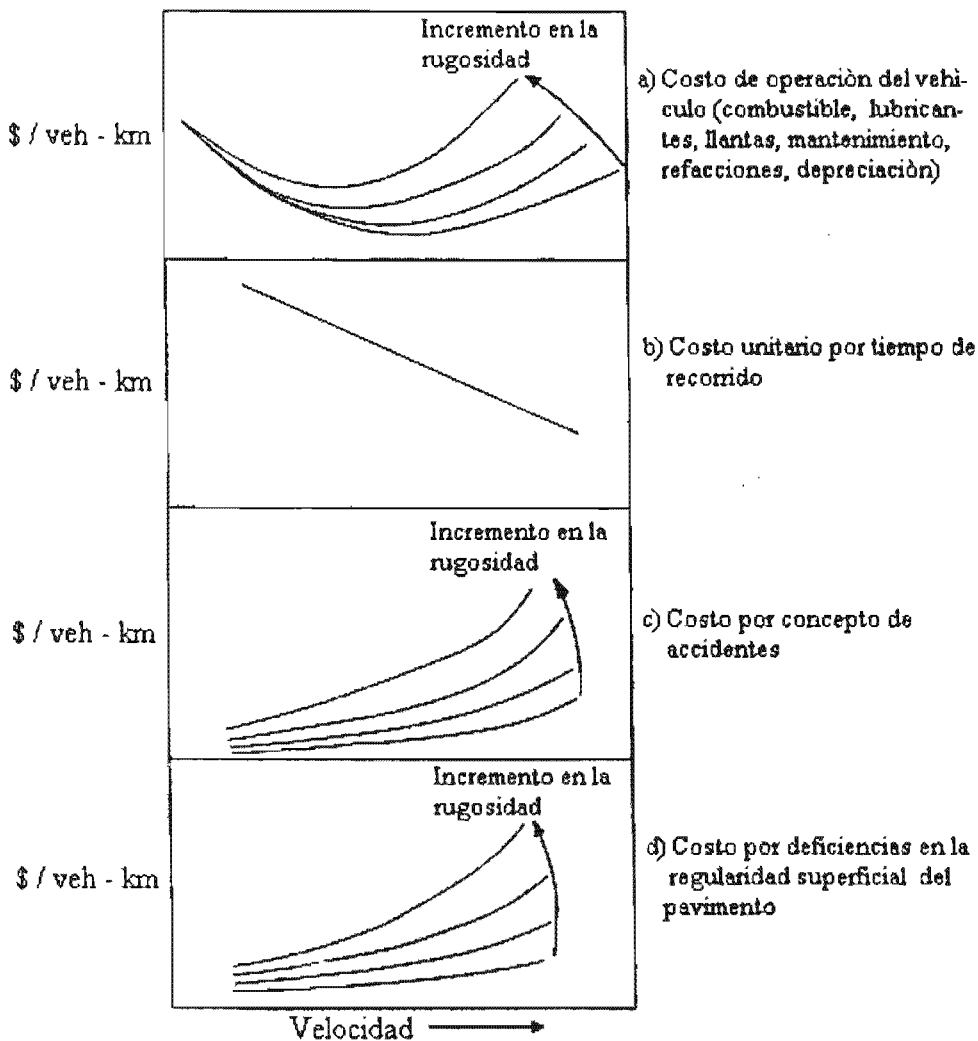


FIGURA 2.6. Efecto del estado superficial del pavimento y de la velocidad en los costos de operación. ⁽⁶⁾

2.4.4 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

Es importante señalar que los métodos de evaluación estructural de pavimentos suelen clasificarse en *destructivos* y *no destructivos*, dependiendo del nivel de alteraciones físicas al que se sujeten los materiales de las capas del pavimento durante su evaluación. Los primeros involucran la ruptura del pavimento, al excavar en el mismo "pozo a cielo abierto" para muestrear y probar, generalmente, en el sitio los materiales componentes de las distintas capas. Los segundos se refieren a las técnicas efectivas de evaluación que involucran la medición superficial de deflexiones o curvaturas (ante la aplicación de cierta carga), combinada con la obtención de "calas" del pavimento, con el fin de obtener espesores y muestras de los materiales de las distintas capas que permitan probarlos posteriormente en el laboratorio; éste tipo de evaluación no involucra alteraciones significativas de los materiales de las capas del pavimento.

Los métodos de *pruebas no destructivos* son clasificados en cuatro categorías:

- 1) *Medición de la respuesta a una carga estática o a la aplicación de una carga con movimiento lento.* Se obtiene midiendo la deflexión de la superficie del pavimento bajo la carga. Los instrumentos más comunes que se emplean para hacer estas mediciones son la

Viga Benkelman, Pruebas de Placa, el Deflectómetro Viajero, y el Deflectómetro de Lacroix. Este método no representa adecuadamente los efectos de las cargas circulantes del tránsito y no permite determinar el nivel de transferencia de carga en juntas y grietas de pavimentos flexibles.

- 2) *Medición de la respuesta a una carga compuesta por una parte estática y otra repetida o dinámica de tipo senoidal.* Las deflexiones se miden a través de sensores inerciales de velocidad (geófonos), los equipos de éste tipo más comúnmente empleados son el *Dynalect* y el *Calificador de Caminos*; una desventaja es que dan lugar a deflexiones bajas no representativas, adicionalmente la frecuencia de la carga dinámica afecta la deflexión resultante, siendo generalmente difícil establecer una frecuencia de carga que sea representativa al paso de los vehículos.
- 3) *Medición de la respuesta a una carga dinámica de impacto.* Se emplean geófonos para medir las deflexiones, el equipo que se utiliza es el *FWD (Falling Weight Deflectometer)*; una ventaja que tiene es su habilidad para modelar adecuadamente las cargas circulantes del tránsito tanto en magnitud como en duración, produciendo una deflexión causada por un vehículo en movimiento. Otras ventajas son su habilidad para medir el nivel de transferencia de cargas en juntas y grietas, detecta la presencia de oquedades, registra la cuenca de deflexiones y la velocidad con que puede realizarse las pruebas, por lo que hace el equipo más conveniente.
- 4) *Medición continua de la respuesta ante la aplicación de una carga rodante también continua.* El aparato que se emplea es el *RWD (Rolling Wheel Deflectometer)*, el cual mide deflexiones del pavimento continuamente y con buena precisión utilizando sensores a base de rayos láser, sin embargo, sus diferentes versiones actuales aún se encuentran en desarrollo.

2.4.5 PRUEBAS DESTRUCTIVAS

Las *pruebas destructivas* son aquellas que requieren de muestreos y pruebas de laboratorio a los materiales que componen una sección estructural, destruyéndola parcialmente por medio de calas, pozos a cielo abierto, trincheras o extracción de corazones, principalmente.

Se usan cuando se requiere saber exactamente donde están ocurriendo las fallas en el pavimento y sus causas, o para determinar los tipos de capas y materiales que constituyen la estructura del camino, así como sus características de calidad y resistencia.

Al realizar alguna de estas operaciones, es necesario que las capas del pavimento destruidas sean repuestas con material de calidad adecuada, dándoles una buena compactación. En el caso de la carpeta lo que se requiere conocer es si el material pétreo es adecuado en dureza, resistencia y si tiene adherencia con el material asfáltico empleado, el cual define el tipo de mezcla asfáltica elaborada.

También se requiere conocer la granulometría del material pétreo. Para las *bases* se requiere conocer su granulometría, *VRS* estándar, propiedades índice, clasificación, contracción lineal, contenido natural de agua. Los resultados de la pruebas anteriores se comparan con los requisitos de calidad para cada capa de la estructura de la carretera y de ésta manera se determina si los materiales son adecuados o no.

PRUEBA DEL VRS (en el lugar o en muestras inalteradas) ⁽⁷⁾

Desarrollada por el departamento de carreteras del estado de *California*. Ésta prueba es directa y se emplea para determinar el *VRS (Valor Relativo de Soporte)*, de las terracerías compactadas,

principalmente las que forman la *capa subrasante*, las que están constituidas por finos que alcanzan un grado de saturación no menor del 90 %.

El *VRS* se obtiene de una prueba de penetración, en la que un vástago de 19.4 cm^2 de área se hace penetrar en un espécimen de suelo a razón de 0.127 cm/min. , se mide la carga aplicada para penetraciones que varían en 0.25 cm. El *VRS* de la muestra inalterada se define como la relación expresada como porcentaje entre la presión necesaria para penetrar los primeros 0.25 cm. y la presión requerida para tener la misma penetración en un material arbitrario, adoptado como patrón, que es una piedra triturada en la que se producen las presiones en el vástago.

El resultado de ésta determinación se utiliza para proyecto y revisión de espesores de pavimentos, y su mayor aplicación en carreteras con el fin de analizar diferentes alternativas.

EQUIPO Y MATERIALES:

El equipo portátil de carga está integrado por:

- Un gato mecánico o hidráulico de 4.5 toneladas.
- Un aparato de medición constituido por 2 anillos calibrados de 900 y 300 kg., respectivamente.
- Una base ajustada al gato provista de extensiones para ajustar al pistón, con sección circular de 19.4 cm^2 .
- Una placa circular de acero con un diámetro de 2.54 cm. que tenga un orificio circular de 5.4 cm. de diámetro y un peso de 4.54 kg.
- Placas circulares de acero para sobrecarga con diámetro de 15.4 cm. que tengan un orificio central de 2.54 cm. de diámetro y un peso de 3 kg. cada una.
- Extensómetro con carrera de 2.54 cm. y aproximación de 0.1 mm. , provisto de una abrazadera para acoplarlo al pistón de penetración.
- Un bloque o elemento rígido de forma geométrica regular o de dimensiones apropiadas para apoyar el vástago del extensómetro.
- Un vehículo o dispositivo con peso total suficiente para producir una reacción de 3000 kg. para ser utilizado como apoyo del equipo de carga.
- Un cronómetro.
- Palas, picos, barretas, etc.

EJECUCIÓN:

El lugar de la prueba se prepara dejando al descubierto la capa que se va a estudiar para lo cual se elimina la parte superior que se encuentre alterada, en una superficie de forma rectangular cuya dimensión es de 50 cm., ésta superficie se hace horizontal y se empareja de tal manera que no presente salientes mayores de 2 cm., se eliminan las partículas sueltas y enseguida se cubre con una manta húmeda para evitar que el material pierda agua por evaporación.

A continuación, se quita la manta húmeda y se coloca la placa circular de 4.54 kg. y sobre ella, las placas de sobrecarga para producir una carga equivalente a la que inducirá el peso propio de las capas de material que se estime y que vayan a construirse sobre la superficie en estudio.

Se instala el equipo portátil de carga y el extensómetro en posición vertical haciendo pasar la aguja de penetración a través de los orificios. Se ajusta el extensómetro y se efectúa la penetración y los resultados se grafican. Ampliando la parte descubierta de la placa en estudio, se

repite la prueba en lugares que visten no menos de 15 cm., hasta contar con tres determinaciones de la carga, las cuales deben cumplir con el siguiente criterio para su aceptación:

- Para el que caso en que 2 de las 3 determinaciones tengan cargas menores de 150 kg., la diferencia entre las cargas mínima y máxima no será mayor de 30 kg.
- Para el caso en que 2 de las 3 determinaciones tengan cargas comprendidas entre 150 y 450 kg., la diferencia entre las cargas mínima y máxima no será mayor de 70 kg.
- Para el caso en que 2 de las 3 determinaciones tengan cargas comprendidas entre 450 kg. y 850 kg., la diferencia entre la mínima y la máxima no será mayor de 140 kg.
- Para cargas mayores de 800 kg. se considera que no tienen importancia las variaciones en las lecturas individuales.

2.5 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS SUPERFICIALES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

CONDICIONES DE SUPERFICIE:

Para poder determinar cuales son las condiciones de la superficie de rodamiento del camino de análisis es necesario realizar una evaluación específica. Se evaluará por medio del Índice de Servicio o la calificación actual, que son métodos cuantitativos y cualitativos. ⁽⁸⁾

Cuando las deformaciones y los baches son frecuentes y numerosos, el estado de la superficie del pavimento analizado será irregular y proporcionará un tránsito incómodo e inseguro, lo que quiere decir que éste índice valora el estado de la superficie de rodamiento desde el punto de vista de comodidad y seguridad, siendo un método cuantitativo.

2.5.1 RUGOSIDAD

Se define como las irregularidades en la superficie del pavimento, tanto inicial como a lo largo del tiempo, que afectan adversamente a la calidad de rodado, seguridad y costos de operación del vehículo.

Para la calidad y comodidad de la rodadura de los vehículos, se planteó a nivel internacional el interés de desarrollar un índice único y común al que referirse, fuera independiente del equipo o técnica de obtención de la geometría del perfil y que además representará el conjunto de las percepciones de los usuarios circulando en un vehículo específico a una velocidad dada. Estas necesidades dieron lugar a la celebración del experimento internacional denominado *IRRE* (International Road Roughness Experiment), uno de cuyos frutos fue el desarrollo del concepto, definición y método de cálculo del *IRI*.

La evaluación de la superficie de rodamiento de una carretera, es un factor muy importante que nos ayuda ha determinar las condiciones del servicio actual del pavimento. El método para calificar estas condiciones, se basa en lo que conocemos como *Índice de Servicio Actual (ISA)*. Éste es un valor subjetivo que se obtiene a través del confort al ir circulando por la carretera.

El *Índice de Servicio Actual* nos sirve de apoyo para determinar si la superficie de rodamiento necesita mejorarse, pero por sí solo no debe usarse para el diseño de sobrecarpetas u otras mejoras. Generalmente, para ésta evaluación se utiliza una escala cuyos valores oscilan entre 0.0 y 5.0, distribuidos de la siguiente forma:

Calificación		Trabajo a realizar	Descripción
Numérica	Verbal		
5.0 4.0	Muy buena	Mantenimiento rutinario	Sólo los pavimentos nuevos (o casi nuevos), son los suficientemente suaves y sin deterioro para clasificar en ésta categoría. La mayor parte de los pavimentos construidos o recarpeteados durante el año de inspección normalmente se clasificarían como muy buenos.
4.0 3.0	Buena	Mantenimiento rutinario	Los pavimentos de ésta categoría, si bien no son tan suaves como los "Muy buenos", entregan un manejo de primera clase y muestran muy poco signo de deterioro superficial. Los pavimentos flexibles pueden estar comenzando a mostrar signos de ahuellamiento y fisuración aleatoria.
3.0 2.0	Regular	Reforzamiento	En ésta categoría la calidad de manejo es notablemente inferior a la de los pavimentos nuevos, y puede presentar problemas para altas velocidades de tránsito. Los defectos superficiales en los pavimentos flexibles pueden incluir ahuellamientos, baches y agrietamiento.
2.0 1.0	Mala	Reconstrucción	Los pavimentos en ésta categoría se han deteriorado hasta un punto donde pueden afectar la velocidad de tránsito de flujo libre. Los pavimentos flexibles pueden tener grandes baches y grietas profundas; el deterioro incluye pérdida de agregados pétreos, agrietamiento y ahuellamiento, y ocurre en un 50 % o más de la superficie.
1.0 0.0	Muy mala	Reconstrucción	Los pavimentos en ésta categoría se encuentran en una situación de extremo deterioro. Los caminos se pueden pasar a velocidades reducidas y con considerables problemas de manejo. Existen grandes baches y grietas profundas. El deterioro ocurre en un 75 % o más de la superficie.

TABLA 17. Escala de calificación de la serviciabilidad del pavimento según el ISA. ⁽⁸⁾

Como se puede observar, los *Índices de Servicio Actual* altos, corresponden a condiciones más satisfactorias. Cuando un tramo denota calificaciones bajas (de 2.5 hacia abajo), se debe hacer un examen más detallado de la superficie, utilizando, si es necesario, otros métodos para su evaluación. La experiencia indica que un *ISA* comprendido entre 2.5 y 0.0, denota la necesidad de hacer trabajos de reforzamiento a la vialidad en estudio (aclarando que estos son solamente una sugerencia y depende de los estudios adicionales que se efectúen para determinar lo realmente necesario).

Los diversos métodos existentes para medir la rugosidad de los *pavimentos flexibles* fueron agrupados en cuatro categorías: ⁽⁸⁾

1) Perfiles de precisión

Ésta clase representa los más altos niveles de precisión para medir el *IRI*. Un método *clase 1* requiere que el perfil longitudinal de una huella sea medida en forma precisa y que sea definido por medio de una serie de elevaciones en puntos separados a una pequeña distancia.

Los perfilómetros de alta velocidad ofrecen la posibilidad de medir rápidamente el *IRI*; sin embargo, los valores del perfilómetro deben validarse alguna vez cotejándolos con los obtenidos con métodos estáticos para verificar su exactitud, pues no todos cumplen con ser *clase 1*.

Por sus bajos rendimientos y excesiva exactitud, comparada con la incertidumbre de la trayectoria recorrida, los métodos estáticos no se aconsejan como adecuados para grandes auscultaciones, sino más bien para calibración de otros equipos. Los *perfilómetros dinámicos* de ésta clase son capaces de obtener medidas de gran calidad y a alta velocidad, sin requerir esfuerzos considerables de calibración y mantenimiento, aunque tienen la desventaja de ser los sistemas de instrumentos más costosos y complejos y, en general, requieren operadores que hayan tenido formación técnica apropiada.

2) Otros métodos perfilométricos

Éste grupo incluye otros métodos que basan el cálculo del *IRI* en la medida del perfil longitudinal, pero que no tienen la exactitud de los de *clase 1*. Ésta clase también comprende medidas tanto con perfilómetros de alta velocidad como con métodos estáticos que no satisfacen los criterios de precisión y exactitud como para ser considerados de *clase 1*.

3) Estimaciones del *IRI* mediante correlaciones

A ésta clase pertenece el instrumento *MERLIN*, cuyas mediciones generan un valor de irregularidad superficial correlacionable con el *IRI*, aunque no se mida el perfil propiamente tal, y al mismo tiempo requiere una calibración periódica.

4) Valoraciones subjetivas y medidas sin calibrar

Hay ocasiones en las que, por condiciones económicas o de otro tipo, sólo se necesita conocer aproximadamente el estado de la uniformidad superficial de un pavimento. A pesar de ello es deseable relacionar la medida de la rugosidad a la escala del *IRI*. En estos casos se puede utilizar un aparato tipo respuesta sin calibrar para tener una estimación del estado de la carretera, o bien se puede valorar éste estado mediante sensaciones de confort y seguridad que experimenta una persona experta en la materia al circular por dicho camino.

ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (*IRI*)

El *índice internacional* constituye una medida de rugosidad, entendida como las deformaciones verticales de la superficie de una carretera con respecto a la superficie plana, mismas que afectan la dinámica del vehículo, la calidad del viaje, las cargas dinámicas y el drenaje superficial del camino, como nos lo muestra la Fig. 2.7. Por tanto el *IRI* puede definirse como la suma de las irregularidades verticales (en valor absoluto), a lo largo de la zona de rodadura de un tramo homogéneo de carretera, entre la longitud del mismo.

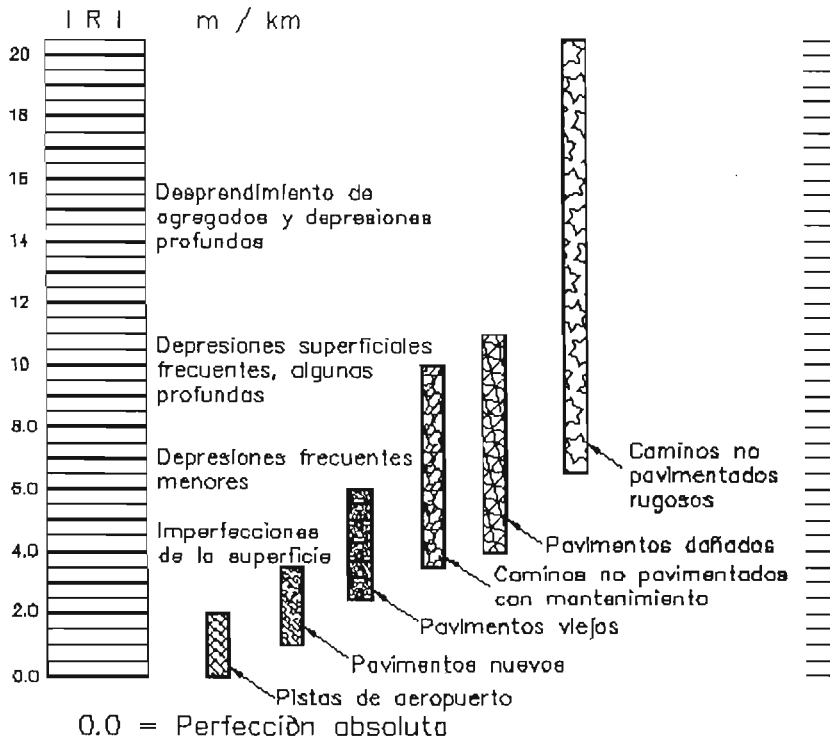


FIGURA 2.7. Escala del Índice de Rugosidad Internacional (IRI).⁽⁴⁾

El perfil real de una carretera recién construida tiene un estado cero, definido por su *IRI* inicial > 0 , debido a condiciones constructivas. Una vez puesta en servicio, la geometría del pavimento se modifica lentamente en función del paso del tránsito, evolucionando hacia valores más elevados del *IRI* (mayores irregularidades).

El *IRI* se determina mediante un cálculo matemático realizado con las ordenadas o cotas de una línea del perfil longitudinal, obtenidas por cualquier técnica o equipo de medida del perfil longitudinal. Las consideraciones más importantes sobre el *IRI* son:

- Su principal ventaja reside en que el *IRI* es un modelo matemático cuyo resultado es independiente de la técnica o equipo con el que se haya obtenido el perfil.
- Para el cálculo del *IRI* es importante considerar la representatividad de las ordenadas que se introducen, es decir, la confiabilidad de la técnica o equipo con el que se obtiene el perfil y la frecuencia del muestreo del mismo.
- La precisión de los equipos de medida de la rugosidad es uno de los temas más delicados y complejos de decidir y valorar.

La definición del *IRI* se establece a partir de conceptos asociados a la mecánica vibratoria de sistemas dinámicos, en base a ella, un vehículo se puede modelar por un conjunto de masas ligadas entre sí y con la superficie de la carretera mediante resortes y amortiguadores.

El movimiento sobre el perfil de la carretera produce desplazamientos, velocidades y aceleraciones en las masas. Todo el sistema queda regido por la *Primera Ley de Newton*:

$$\text{Fuerza} = \text{Masa} \times \text{Aceleración}$$

El *IRI*, también llamado por su nombre técnico *RARS₈₀*, definido en forma más completa por *Sayers* en 1995 debe cumplir con las siguientes cinco condiciones:

- 1) Es calculado a partir de un sólo perfil. El intervalo de muestreo del perfil debería ser menor a 300 mm. para cálculos precisos. La resolución requerida depende del nivel de rugosidad, necesitándose resoluciones más finas para pavimentos más lisos. Una resolución de 0.5 mm. en la obtención del perfil es apropiada para todas las condiciones.
- 2) Se asume que el perfil tiene una pendiente constante entre puntos contiguos de elevación.
- 3) El perfil es primero suavizado mediante el uso de medidas móviles cuyo largo base es de 250 mm. Esto es realizado por dos motivos, la primera es simular el comportamiento de la envolvente de los neumáticos y la segunda reducir la sensibilidad de la simulación del *cuarto de carro* al esparcimiento de muestreo del perfil longitudinal. ⁽⁸⁾
- 4) El perfil suavizado es filtrado utilizando la simulación de un *cuarto de carro*, *RQCS* (*Reference Quarter Car Simulation*), con sus parámetros específicos, a una velocidad de 80 km/hr. ⁽⁸⁾
- 5) El movimiento de la suspensión simulada es acumulada y dividida por el largo del perfil para así obtener el valor del *IRI*, es de ésta forma que el *IRI* es expresado, generalmente en unidades de *m/km*.

2.5.2 FRICCIÓN

Se refiere a la relación con las llantas de los vehículos que circularán sobre la superficie constituida por la mezcla, es lo que se conoce con el nombre de *resistencia al deslizamiento*.

La *resistencia al deslizamiento* es la fuerza desarrollada entre la superficie del pavimento y los neumáticos, que estando impedidos de rodar, deslizan a lo largo de la superficie. El reconocimiento de la importante influencia de la presencia de agua en la superficie ha llevado a definir en forma explícita un coeficiente de fricción (*f*) determinado con el pavimento mojado. ⁽⁹⁾

$$f = \frac{F_a}{N}$$

Donde:

f = Coeficiente de fricción con el pavimento mojado.

F_a = Fuerza de fricción con el pavimento mojado.

N = Peso sobre la rueda.

La textura superficial que se obtiene, es la que determina la resistencia que presentará al deslizamiento, por eso importa: la cantidad de asfalto, la granulometría de los agregados pétreos y la presencia de materiales extraños en la superficie, como agua o polvo. El exceso de asfalto es causa de bajo coeficiente de deslizamiento. Cuando la textura superficial es semejante a la del papel de lija, se obtiene el más alto coeficiente, siendo disminuido por la presencia de agua, polvo o lodo.

Una de las principales características que debe cumplir un pavimento, se refiere a disponer de una superficie que asegure una buena adherencia con los neumáticos en todo instante y especialmente en zonas de frenado, curvas y cuando el pavimento se encuentra mojado, lo cual es fundamental para la seguridad de los usuarios. Ésta adherencia *pavimento-neumático* o resistencia al deslizamiento va disminuyendo en el tiempo por efecto del pulimento causado por el tránsito, llegando a constituirse en un importante indicador del comportamiento del pavimento. Un parámetro importante en la adherencia es el *coeficiente de fricción*.

El *coeficiente de fricción* se puede cuantificar físicamente mediante un factor que resulta de la relación entre la fuerza de fricción desarrollada en la interfase de un neumático impedido de rodar con el pavimento y el peso sobre el neumático. Debido a la importante influencia del agua en ésta propiedad, los distintos métodos han optado por normalizar los ensayos en condiciones de pavimento mojado, velocidad y tipo de neumáticos.

Existen distintos procedimientos de ensayos para determinar la *resistencia al deslizamiento*. Dentro de los más conocidos a nivel internacional se encuentran: el *SCRIM*, *Mu-Meter* y *Grip Tester* para mediciones continuas de alto rendimiento; y el *Péndulo TRRL* para medidas puntuales de bajo rendimiento. Estos dispositivos en general sirven para caracterizar la resistencia al deslizamiento a medianas velocidades (50 km/hr).⁽¹⁰⁾

CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE

Las características de *resistencia al deslizamiento* de un pavimento, se puede definir considerando que la adherencia superficial está determinada por dos tipos de condiciones: *microtextura* y *macrotextura* (Fig. 2.8).⁽¹⁰⁾

La *microtextura* corresponde a la textura superficial propia de la superficie de los agregados pétreos, las cuales pueden presentar características de tipo áspero o pulida. En general, los agregados utilizados en pavimentos por su mayor dureza presentan un menor desgaste o pulimento.

La *macrotextura* en cambio, se refiere a la textura superficial del pavimento, proveniente del efecto conjunto de las partículas de los agregados pétreos que sobresalen de la superficie. En éste caso, las propiedades de la *macrotextura* están dadas por el tipo de mezcla que exista en la superficie. En el caso de mezclas drenantes o tratamientos superficiales, la *macrotextura* será del tipo grueso, mientras que en el caso de mezclas densas convencionales, la *macrotextura* será más bien fina.

Por lo tanto, la *resistencia al deslizamiento* que presente un pavimento, será en general el resultado de la combinación *microtextura - macrotextura* que presente la superficie.

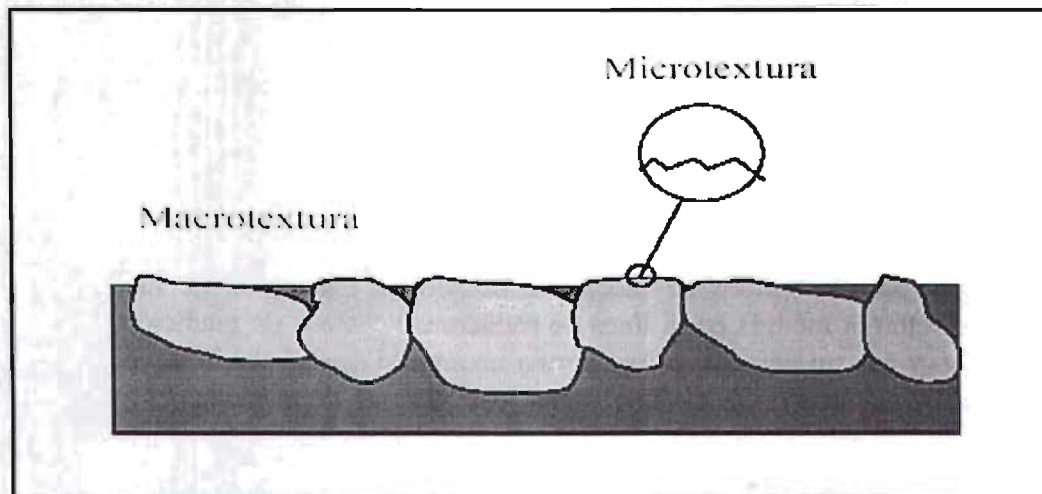


FIGURA 2.8. Diferencia entre microtextura y macrotextura presentados en el pavimento.⁽¹⁰⁾

MEDICIONES DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

Los primeros estudios y evaluaciones realizados en relación a la resistencia al deslizamiento se han efectuado utilizando el equipo *Péndulo de Fricción*⁽¹⁰⁾. Actualmente las evaluaciones a nivel de red se realizan con equipo *SCRIM*, existiendo desde su llegada a México (1999) a la fecha, aproximadamente 6,000 km. de auscultación continua de fricción.

Péndulo de Fricción TRRL

Respecto al *Péndulo de Fricción*, éste es un dispositivo muy difundido internacionalmente, principalmente por su bajo costo en comparación a otros equipos más sofisticados. Éste equipo desarrollado por el TRRL, tiene sus mediciones normalizadas según *ASTM E-303*, el cual se

muestra en la Fig. 2.9. Para efectuar la medida, éste se ajusta de modo que el patín de goma, fijado en el péndulo, recorra una distancia normalizada en la superficie a medir. El péndulo se balancea desde la vertical hasta el reposo. La pérdida de energía del péndulo debido a la fricción del pavimento se registra en una escala graduada. Éste instrumento es indicativo de la resistencia al deslizamiento a bajas velocidades (< 50 km/hr), por consiguiente provee medidas para la *microtextura*. La medición entrega como resultado el valor *BPN* (*British Pendulum Number*).



FIGURA 2.9. Péndulo TRRL. ⁽¹⁰⁾

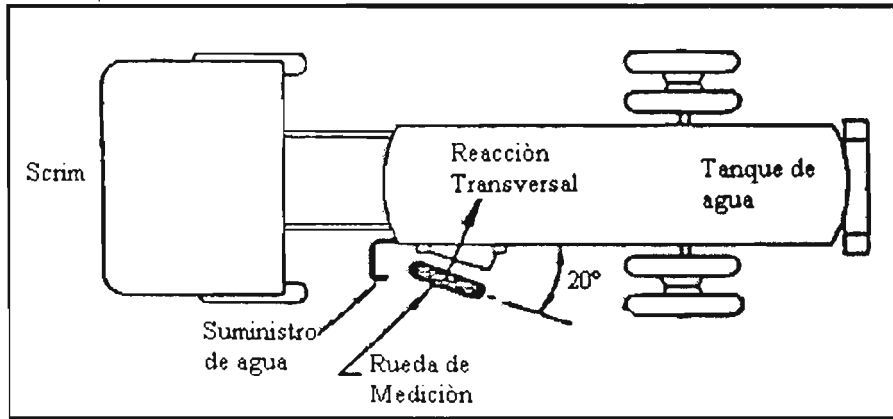
Sin embargo, la gran desventaja de éste procedimiento es su bajo rendimiento, requiriendo gran despliegue de seguridad al momento de la medición con la consecuente obstaculización del tránsito lo que limita su aplicación a nivel de red.

SCRIM (Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine)

De diseño británico, éste aparato permite apreciar la adherencia de los pavimentos midiendo el *Coefficiente de Fricción Transversal* de modo continuo. Se realiza la medición en forma continua en carretera mojada (aproximadamente 0,5 mm. de agua), a 50 km/hr en carretera y 100 km/hr en autopistas. El *SCRIM* es un camión que lleva una cisterna de 5000 litros, lo que le da una autonomía de 60 km. continuos de medición, dotado de una rueda de medición en el lado derecho, que efectúa la medida en la línea de rodadura. La rueda de medición, cargada con una masa de 200 kg. y con un neumático liso, forma un ángulo de 20° con la trayectoria del camión; el riego de la calzada se hace desde la cisterna justo delante de la rueda. El *SCRIM* dispone de equipos especiales para la adquisición y procesamiento de la información. (Fig. 2.10 y 2.11). ⁽¹¹⁾



FIGURA 2.10. Vista general del SCRIM. ⁽¹¹⁾

FIGURA 2.11. Esquema de la rueda inclinada. ⁽¹¹⁾

2.5.3 RUIDO

El *ruido* afecta directamente la calidad de vida de las personas, principalmente en las zonas de gran densidad de población donde existe un gran volumen de tránsito. Sus orígenes y propagación dependen de la interacción entre tres factores:

- 1) *Los vehículos*: Tipo, número y velocidad.
- 2) *La estructura de la carretera*: Su concepción, construcción y materiales.
- 3) *El medio próximo al sistema carretera – entorno*: Sus componentes y receptores, por ejemplo, las características de los edificios y el número de habitantes.

Desde el punto de vista económico existen dos principales fuentes de financiación de la reducción del ruido:

- a) Impuesto sobre carburantes, lo que produce un ingreso regular.
- b) Recursos especialmente destinados a ello, por los administradores.

Estos recursos se aplican únicamente a las carreteras existentes. Los gastos unidos a la reducción del ruido en las nuevas carreteras son internalizados en los costes de construcción y por tanto son soportados por las *Administraciones de Carreteras*. Las dos fuentes de financiación mencionadas anteriormente pueden aplicarse para mejorar el nivel del ruido a:

- Acciones centralizadas para una mejora escalonada sobre la base de programas a largo plazo.
- Actuaciones específicas sobre las zonas más contaminadas.

La evaluación de los niveles de ruido por el tránsito puede llevarse a cabo a través de dos formas distintas: *medición y previsión*. Los métodos de *medición* consisten en la toma de medidas directas del ruido mediante instrumentos acústicos, como son los *sonómetros*. Los métodos de *previsión* se basan en el conocimiento de las teorías de la emisión y propagación del sonido, estas permiten calcular los niveles de ruido a través de la simulación de situaciones reales o predecibles mediante modelos matemáticos o físicos. Frecuentemente, se combinan los métodos de *previsión y medición* para proporcionar una mejor o simplemente más operativa evaluación. En la práctica actual, dos características determinan la calidad de un método:

- a) Su validez, lo que significa la precisión de los resultados obtenidos.
- b) Su operatividad, en términos tanto de tiempo como de costes económicos.

Los métodos de *medición* se emplean principalmente para determinar los niveles de ruido antes de la construcción de las carreteras, con el objeto de predecir el incremento de nivel que se producirá posteriormente, mientras que los métodos de *previsión* pueden utilizarse tanto para las situaciones existentes como para las que se planifiquen.

Desde el punto de vista técnico, los métodos de *previsión* son mejores para determinar el nivel del sonido derivado del tránsito rodado. Sus menores costes y su mayor fiabilidad nos indican que deberían preferirse a la hora de proceder a la evaluación del ruido. En forma más generalizada se presenta el método de *medición y previsión* en la tabla 18:

	Modelos matemáticos de previsión	Acciones	Medida
Carreteras nuevas	Previsión del ruido	Construcción	Control de las Previsiones
Carreteras existentes	<ul style="list-style-type: none"> • Previsión en caso de ensanche de la carrera. • Previsión en caso de realización de protecciones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensanche. • Protección contra el ruido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Control de las Protecciones. • Control de las previsiones.

TABLA 18. Funciones de medida y previsión del ruido. ⁽¹²⁾

Las diferentes medidas a adoptar, para controlar el ruido, se han basado en:

- Medidas físicas aplicadas a la carretera y/o su entorno.
- Regulación del tránsito.
- Reducción del ruido en el origen.

MEDIDAS FÍSICAS APLICADAS A LA CARRETERA Y/O SU ENTORNO

Las medidas físicas de reducción del ruido aplicadas a la carretera y/o su entorno, deben estar incluidas en los planes de ordenación del territorio, con objeto de lograr su optimización y evitar la aparición de nuevos problemas. Es importante conocer la forma en que la carretera interacciona con el espacio adyacente para poder controlar el ruido.

En la última década, la mayoría de los países se han esforzado en considerar el factor del ruido antes del comienzo de la construcción de una nueva carretera. Esto significa que antiguos conceptos han sido revisados para tener en cuenta los problemas derivados de la contaminación acústica, incluso si esto implica la adopción de más amplias y más costosas soluciones.

PANTALLAS ACÚSTICAS

Para la construcción de *Pantallas Acústicas* se pueden adoptar a lo largo de las carreteras existentes para reducir el nivel del ruido. Éste tipo de protección se utiliza, sobre todo, en carreteras que se encuentran a una cierta distancia de los edificios, con el fin de evitar el efecto de obstrucción visual, y en el caso de zonas de alta densidad de edificación. En éste último caso, las pantallas que presentan el aspecto de cerca ajardinada compacta tienen muy buena aceptación. Desde el punto de vista estético debe procurarse que se integren en el entorno al que deben proteger. Dado que la vegetación casi siempre aporta un efecto visual positivo, las pantallas verdes (recubiertas de vegetación), puede constituir otra alternativa.

Para que una pantalla *anti-ruido* sea eficaz, debe ser suficientemente alta y larga para impedir la propagación del ruido hacia el receptor. El rendimiento acústico de una pantalla anti-ruido queda determinado por el lugar de emplazamiento, su anchura, su altura así como sus características de transmisión y de aislamiento / absorción.

Según su forma, las pantallas *anti-ruido* pueden ser:

- Pantallas (barreras), naturales, como los montículos o diques de tierra.
- Pantallas artificiales, como los muros.
- La combinación de las dos, como las pantallas sobre taludes.

CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UNA PANTALLA ACÚSTICA ⁽¹²⁾

- **Consideraciones acústicas**

Las cualidades de atenuación del ruido, es decir, la eficacia acústica de la pantalla en términos de reducción de frecuencias y de intensidad sonora son:

- Una pantalla *anti-ruido* reduce generalmente los niveles del ruido de 10 a 15 $dB(A)$ * en la zona de sombra.
- Una pantalla *anti-ruido* proporciona una reducción de ruido insignificante cuando ésta no es lo suficientemente alta para cortar la línea visual entre la calzada y el receptor.
- Al otro lado de ésta línea visual para cada metro de altura suplementaria de la pantalla, se obtiene una reducción del nivel del ruido aproximadamente 1.5 $dB(A)$ (con un máximo teórico de 20 $dB(A)$ para el total).
- La longitud de una pantalla *anti-ruido* debe ser aproximadamente cuatro veces la distancia entre el receptor y la pantalla (para receptores situados a menos de 100 m.).
- Una pantalla *anti-ruido* debe tener una densidad mínima de 20 kg/m^2 .

* $dB(A)$ = Es el nivel de ruido producido por el desplazamiento de los vehículos en la carretera, se mide en decibelios (dB), la A , significa que el nivel del ruido es recogido por un micrófono que lo filtra y/o ajusta. ⁽¹⁰⁾

- **Consideraciones no acústicas**

En el diseño de la *pantalla acústica* es necesario tener en cuenta:

- La *estética*, que debe estar en concordancia con su entorno.
- La *seguridad vial*: Garantizar una buena visibilidad para los automovilistas y una buena resistencia a los choques de los vehículos.
- El *mantenimiento* (y los costes del mismo), de la pantalla y estructuras adyacentes y las necesidades de drenaje.
- El *rendimiento estructural* (acciones del viento y del tránsito, estabilidad a largo plazo), y la durabilidad (generalmente de 15 a 20 años).
- Los *costes de construcción* que dependen del tipo de cimentación necesaria del sistema de construcción en presencia o no del tránsito.

REGULACIÓN DEL TRÁNSITO

La *regulación del tránsito* incluye, por ejemplo, calles con un único sentido de circulación, el cierre de ciertas calles a la circulación de automóviles, etc., con el fin de canalizar el tránsito lejos de zonas sensibles al ruido o, por lo menos, reducir su flujo. Los anillos de circunvalación de zonas urbanas, pueden considerarse una medida eficaz, ya que ofrecen la posibilidad, siempre y cuando la planificación urbana vaya en la misma dirección, de disminuir el tránsito en el interior de la zona considerada.

Los vehículos que producen más ruido son los vehículos pesados. Controlar o alejar éste tipo de tránsito de las zonas sensibles al ruido es un sistema eficaz de reducir éste problema. Favoreciendo un tránsito más fluido, se puede obtener una reducción de 2 a 5 $dB(A)$ en las vías urbanas.

REDUCCIÓN DEL RUIDO EN EL ORIGEN

La fuente emisora de ruido, en el caso que nos ocupa, es el vehículo. A velocidades bajas predomina el ruido del motor, mientras que a velocidades altas, domina el ruido debido a la rodadura. Controlar el ruido en su origen es la mejor solución para todos los agentes implicados en el problema, aunque hay que tener en cuenta que el ruido no puede nunca suprimirse por completo, y existen además una serie de problemas derivados del tránsito que no se resuelven con la aplicación directa de control del ruido en los vehículos.

Para llegar a vehículos menos ruidosos se puede introducir un impuesto sobre los mismos en función del ruido que emite el motor. De ésta forma, los más silenciosos resultarán más baratos. Sin embargo, aún consiguiendo disminuir el ruido del motor queda el de rodadura, producido por el contacto existente entre el pavimento de la carretera y el neumático del vehículo.

PAVIMENTOS SILENCIOSOS

Las capas de rodadura deben ser elegidas de tal forma que aseguren una buena capacidad portante, una adherencia y un confort de rodamiento indispensable para la seguridad, así como para reducir de una manera óptima el ruido generado. Una capa de rodadura se escogerá, por tanto, comparando los niveles de rendimiento acústico que se puede alcanzar haciendo variar las características de las micro, macro y mega – texturas de los diferentes tipos de mezclas asfálticas utilizados para la construcción de las carreteras. En la tabla 19 muestra los niveles medidos al borde de la vía y en el interior de los vehículos en relación con diferentes tipos de pavimentos analizados.

Tabla 19. Variación del nivel del ruido de contacto neumático – calzada en función del tipo de pavimentación. ⁽¹²⁾

TIPOS DE CARPETA	NIVEL SONORO, dB(A)								
	70	PERCEPTIBLE			INCÓMODO			MOLESTO	
		72	74	76	78	80	82	84	
Mezcla asfáltica tradicional									
Mezcla asfáltica triturada									
Mezcla asfáltica en frío									
Tratamiento superficial simple									
Tratamiento superficial doble									
Asfalto poroso									
Concreto hidráulico									
Adoquín									
Coefficiente de deslizamiento longitudinal	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9

Nivel sonoro para un vehículo aislado rodando con motor parado a 80 km/hr.
 Coeficiente de deslizamiento longitudinal a 80 km/hr.

Como se ha visto, la emisión del ruido depende esencialmente de la textura de la capa de rodadura, la capacidad de atenuar éste fenómeno, es sobre todo, característica de los pavimentos que a continuación se van a describir:

- **Pavimentos tipo A**

Los *pavimentos tipo A*, se obtienen extendiendo simplemente una sobrecapa de microtextura superficial sobre un *pavimento flexible*. Éste tipo de pavimento interesa particularmente a las zonas urbanas o carreteras que soportan una circulación limitada de mercancías y que generan ruido en bajas frecuencias. Se caracterizan por una porosidad nula o reducida (huecos residuales < 2 mm.), y las mezclas son de granulometría abierta.

Para éste tipo de pavimentos los valores mínimos del coeficiente de absorción acústica son respectivamente de 0.0 y 0.1 para los intervalos de frecuencia de 0-700 Hz, 700-1250 Hz y 1250-2000 Hz, salvo en el caso de mezclas compuestas por agregados porosos con granulometría abierta, para los que estos valores suben a 0.0, 0.2 y 0.35. ⁽¹²⁾

- **Pavimentos tipo B**

El *pavimento tipo B*, se califica como de espesor medio con alta macro – porosidad (3.8 cm. de grosor). Está formado por una capa de rodadura constituida por una mezcla asfáltica drenante/absorbente del sonido, preparada con aditivos de tipo normal con huecos residuales del orden de 1 a 10 mm. no representando menos del 20 % del volumen de la capa.

El coeficiente de absorción acústica de éste tipo de pavimento es bastante bueno, dependiendo de su espesor (hasta 0.8), para las frecuencias comprendidas en el intervalo de 520 a 1200 Hz, en función del espesor, de la cantidad y de la calidad de los huecos residuales, así como de la granulometría de los agregados pétreos. Los *pavimentos tipo B* se usan en los servicios de carreteras con objeto de reducir el riesgo potencial del deslizamiento sobre el agua. ⁽¹²⁾

- **Pavimentos tipo C**

El *pavimento tipo C*, es de alto o medio espesor, (hasta 50 cm.), con una fuerte macroporosidad. Para éste tipo de pavimento la reducción del ruido es debida a la existencia de una o más capas de pavimento asfáltico. El coeficiente de absorción acústica depende del grosor, en la medida en que el pavimento con mayor espesor puede ser eficaz sobre el conjunto de intervalos de frecuencia (100-5000 Hz); se utiliza éste tipo de pavimento sobre todo por su capacidad para la evacuación del agua. ⁽¹²⁾

- **Pavimentos tipo D**

El *pavimento tipo D*, llamado “pavimento eufónico”, está formado por una capa de rodadura de mezcla porosa presentando características de drenaje y de absorción del sonido, de 40 a 60 mm. de espesor. Para éste tipo de pavimento, el coeficiente de absorción del sonido en los tres intervalos de frecuencia de 0-700 Hz, de 750-1250 Hz y de 1250-2000 Hz, alcanza los valores siguientes: 0.6, 0.4 y 0.7. ⁽¹²⁾

2.5.4 DRENABILIDAD

Numerosos estudios han demostrado que la conservación a largo plazo de la porosidad, depende del rendimiento de los materiales (granulometría, tipo y porcentaje de asfalto), de las condiciones de circulación (velocidad, tipos y porcentajes de vehículos), y de las operaciones de mantenimiento (proceso de disminución de los huecos, mejora del drenaje lateral).

Se ha demostrado que cuanto mayor es la permeabilidad del pavimento drenante tras su colocación, más tiempo se mantiene el buen rendimiento. Las cualidades hidráulicas se ven también significativamente favorecidas por la reducción del contenido en arena de la mezcla, radicando en ésta limitación el mantenimiento de la integridad de la superficie (pérdida local del material o agregados pétreos), así como en la resistencia mecánica al paso de la circulación. Parece que la cantidad de huecos debe quedar limitada al 25 % (huecos intercomunicados > 20 %).

La interacción vehículo – pavimento conduce a que las irregularidades superficiales influyan en mayor o menor grado en determinadas características superficiales que afectan al usuario, las cuales se clasifican de acuerdo con las longitudes de onda y las amplitudes de las irregularidades de la superficie, definiéndose los conceptos de *microtextura*, *macrotextura* y *megatextura*:

- **Microtextura**

Es función de la textura superficial, de los agregados pétreos y del mortero asfáltico o del cemento asfáltico. Es muy importante para la adherencia entre llanta - pavimento y por lo tanto para la resistencia al deslizamiento, en todas las circunstancias de superficie seca o mojada. Influye en el desgaste de las llantas y algo en el ruido en las altas frecuencias del espectro acústico.

- **Macrotextura**

Depende de la composición de la mezcla, riego o lechada asfáltica o del tratamiento de superficie dado a la carpeta asfáltica (rasurado, denudado). Los deterioros tales como desprendimientos de agregados, grietas y juntas sólo contribuyen cuando ocurren en casos frecuentes o si hay escalonamiento notable.

En zonas urbanas (velocidades moderadas), es adecuada una *macrotextura* moderada y una *microtextura* áspera, en carreteras será conveniente que exista además una *macrotextura* rugosa (Fig. 2.12).

La *macrotextura* tiene una pequeña influencia en el consumo de combustible al aumentar la resistencia al rodamiento, que puede estar compensada por una ligera disminución de la velocidad de circulación. Mejora la visibilidad y las propiedades ópticas del pavimento al reducir las proyecciones de agua y producir una reflexión difusa. Un drenaje más eficaz permite así mismo una mejor visibilidad de las marcas viales.

Puede definirse además la *macrotextura positiva* y *negativa*. La primera es la general, típica de los tratamientos superficiales, formando capas impermeables; la segunda se refiere a las carpetas permeables. Además ofrecen, en diferente grado, las ventajas mencionadas anteriormente; sin embargo, son muy diferentes en lo referente al ruido. Mientras que la *macrotextura positiva* aumenta el ruido en todas las frecuencias, las mezclas porosas llegan a disminuir sensiblemente el nivel de ruido, no sólo en el contacto rueda – pavimento sino el debido al motor, por absorción acústica.

La *macrotextura* facilita la expulsión rápida de agua en la interfaz llanta – pavimento, evitando la generación de una presión hidrodinámica por la presencia de una lámina de agua que induce el fenómeno de acuaplaneo. En la Fig. 2.12 se observa que en caso de lluvia, frente a la llanta del vehículo existe una película o lámina de agua que impide el contacto entre la superficie de la llanta y la del pavimento, formando la *zona 1* bajo la llanta. A continuación existe la *zona 2*, en

la cual el agua ha sido expulsada produciéndose un contacto parcial entre ambas superficies y finalmente, al haberse expulsado el agua totalmente, el contacto entre ambas superficies es completo, *zona 3*. un aspecto importante es la forma en que estas tres zonas se modifican con la velocidad, observándose en la misma figura como aumenta la *zona 1* a expensas de la reducción que experimenta la *zona 3*, que es la más importante desde el punto de vista de la seguridad.

- **Megatextura**

Corresponde a irregularidades de tipo intermedio, relacionadas con la construcción y también a diversos tipos de fallas y degradaciones o reparaciones.

Ésta gama de irregularidades aumenta en particular la resistencia al rodamiento y el nivel de ruido con frecuencias bajas. El desplazamiento es más incomodo, con vibraciones y dificultades para mantener la estabilidad de avance. Contribuyen además al desgaste de los vehículos, incluidas las llantas. ⁽⁶⁾

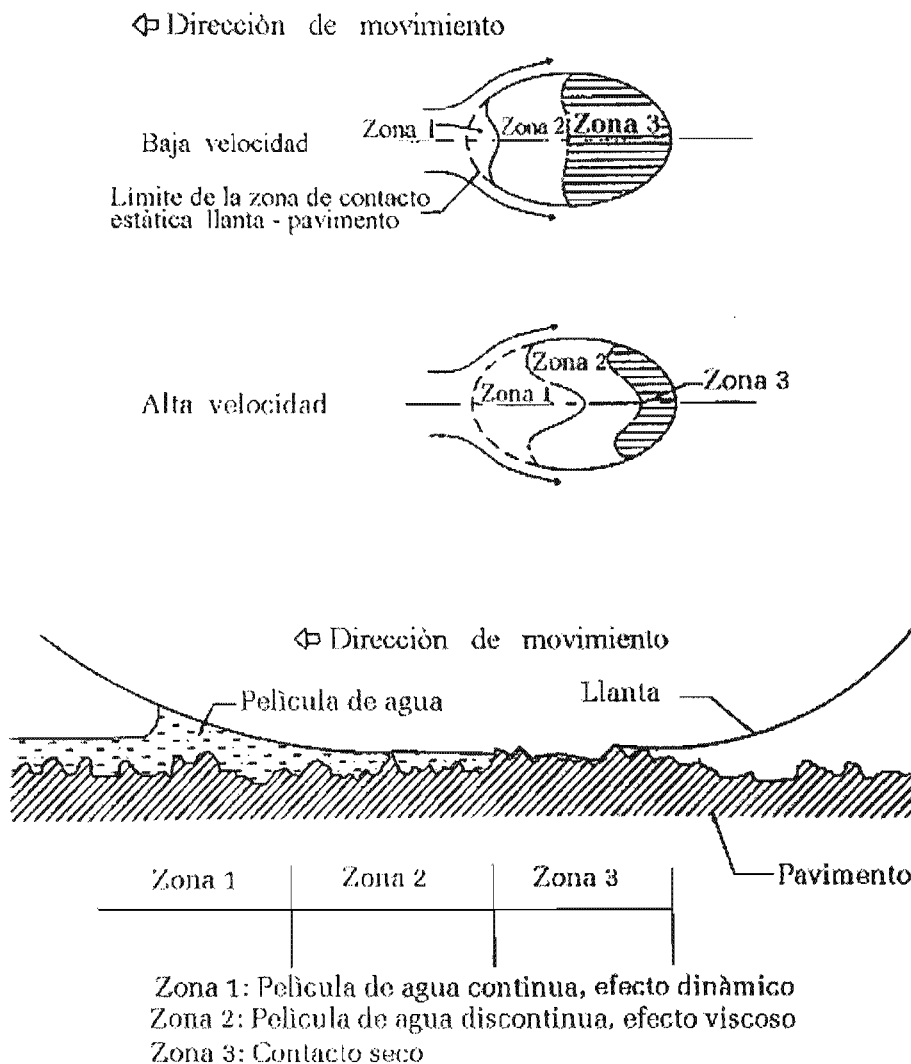


Figura 2.12. Zonas de contacto llantas - pavimento en condiciones de pavimento mojado. ⁽⁶⁾

En la Fig. 2.13 se presenta el efecto de la textura superficial sobre el coeficiente de fricción, tanto en condiciones de pavimento seco como mojado, mostrando el efecto combinado de la *micro* y la *macrotextura*. Se observa el efecto favorable de la *macrotextura abierta* y de la *microtextura*

áspera, para mantener un nivel adecuado del coeficiente de fricción en condiciones de pavimento mojado; las peores condiciones se obtienen con *macrotextura cerrada* y *microtextura lisa* o pulida. ⁽⁶⁾

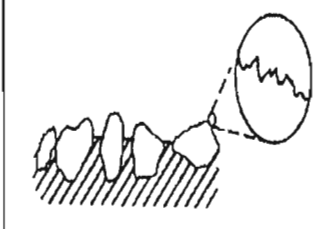
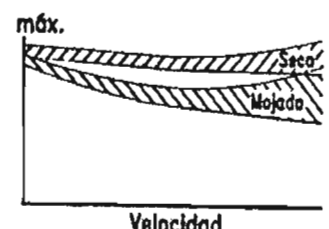
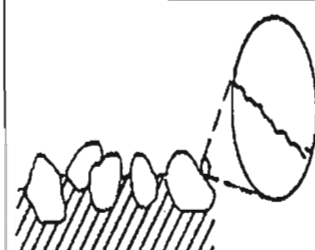
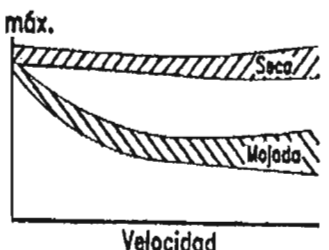
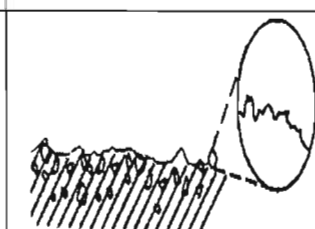
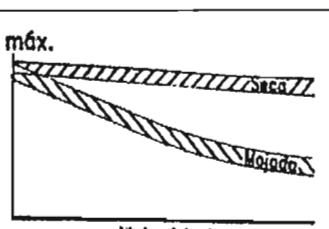
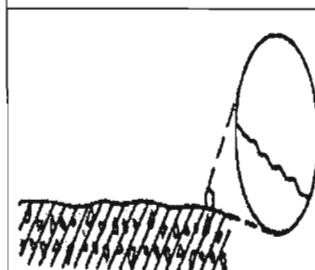
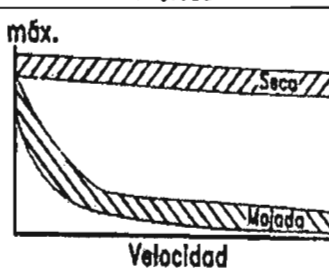
CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE		Tendencias aproximadas del coeficiente máximo de desplazamiento llanta-superficie correspondientes a llantas lisas (escala vertical).
MACROTEXTURA	MICROTEXTURA	
Las superficies de macrotextura ABIERTA, proporcionan un buen drenaje en la zona de contacto llanta-superficie. En la superficie mojada, el valor disminuye gradualmente a medida que aumenta la velocidad. Las ranuras de la llanta no influyen mucho. A gran velocidad se puede aumentar debido a los efectos de histéresis.	 <p>La microtextura ÁSPERA permite una considerable penetración de la película delgada de líquido; el nivel de resistencia al deslizamiento es elevado.</p>	 <p>máx.</p> <p>Seco</p> <p>Mojado</p> <p>Velocidad</p>
	 <p>La microtextura LISA o PULIDA presenta escasas posibilidades de penetración para las películas delgadas y generalmente el nivel de resistencia al deslizamiento que se produce es bajo.</p>	 <p>máx.</p> <p>Seco</p> <p>Mojado</p> <p>Velocidad</p>
Las superficies de macrotextura CERRADA ofrecen un escaso drenaje en la zona de contacto. En la superficie mojada, los valores disminuyen rápidamente con el aumento de la velocidad; las ranuras de la llanta son más eficaces.	 <p>La microtextura ÁSPERA permite una considerable penetración de la película delgada de líquido; el nivel de resistencia al deslizamiento es elevado.</p>	 <p>máx.</p> <p>Seco</p> <p>Mojado</p> <p>Velocidad</p>
	 <p>La microtextura LISA o PULIDA presenta escasas posibilidades de penetración para las películas delgadas y generalmente el nivel de resistencia al deslizamiento que se produce es bajo.</p>	 <p>máx.</p> <p>Seco</p> <p>Mojado</p> <p>Velocidad</p>

FIGURA 2.13. Efecto de la textura de la superficie sobre el coeficiente de deslizamiento llanta-superficie. ⁽⁶⁾

2.5.5 LUMINOSIDAD

NIVELES DE LUMINANCIA E ILUMINANCIA

Se permite que las necesidades visuales a lo largo de las vialidades, que en nuestro caso las carreteras puedan darse en términos de la iluminancia o de la luminancia.

Las necesidades visuales del entorno a lo largo de una vialidad en función de la luminancia deben ser descritas en la tabla 20 que se muestra a continuación:

TABLA 20. Valores mantenidos de luminancia.⁽¹³⁾

Clasificación de las vialidades	Luminancia promedio mínima $L_{prom}(cd/m^2)$	Uniformidad de luminancia		Relación de luminancia de deslumbramiento L_d/L_{prom}
		L_{prom}/L_{min}	L_{max}/L_{min}	
Autopistas y carreteras	0.4	3.5 a 1	6 a 1	0.3 a 1
Vías de acceso controlado y vías rápidas	1.0	3 a 1	5 a 1	0.3 a 1
Vías principales y ejes viales	1.2	3 a 1	5 a 1	0.3 a 1
Vías primarias o colectoras	0.8	3 a 1	5 a 1	0.4 a 1
Vía secundaria residencial Tipo A	0.6	6 a 1	10 a 1	0.4 a 1
Vía secundaria residencial Tipo B	0.5	6 a 1	10 a 1	0.4 a 1
Vía secundaria industrial Tipo C	0.3	6 a 1	10 a 1	0.4 a 1

L_d = Luminancia de deslumbramiento.

Magnitud	Unidad	Símbolo
Luminancia	Candela por metro cuadrado	cd/m^2

Enseguida se describen cada uno de los conceptos utilizados en la tabla 20:

La *Iluminancia (Luminosidad) (E)* en un punto dado de una superficie, se define como el flujo luminoso que fluye hacia el exterior de un elemento de la superficie, dividido por el área de ese elemento. Es la relación del flujo luminoso incidente en una superficie por unidad de área, la unidad de medida es el *lux (lx)*.

La *Luminancia (L)* en punto de una superficie, se define como la intensidad luminosa de un elemento de esa superficie, dividida por el área de la proyección ortogonal de éste elemento sobre un plano perpendicular a la dirección considerada. La unidad de medida es la candela por metro cuadrado (cd / m^2).

Las *Autopistas* se definen como las vialidades con alto tránsito vehicular de alta velocidad con control total de acceso y sin cruces al mismo nivel.

Las *Carreteras*, como vialidades que interconectan dos poblaciones con cruces al mismo nivel.

Las *Vías principales y ejes viales*, como vialidades que sirven como red principal para el tránsito de paso; conecta áreas de generación de tránsito y vialidad importante de acceso a la ciudad. Generalmente tiene alto tránsito peatonal y vehicular y puede tener circulación vehicular en contra flujo. Típicamente no cuenta con pasos peatonales.

Las *Vías colectoras o primarias*, como vialidades que sirven para conectar el tránsito entre las vías principales y las secundarias.

Las *Vías secundarias*, como vialidades usadas fundamentalmente para acceso directo a zonas residenciales, comerciales e industriales, se clasifican a su vez en:

- 1) *TIPO A*. Vía de tipo residencial con alto tránsito peatonal nocturno, tránsito vehicular de moderado a alto, y con moderada existencia de comercios.
- 2) *TIPO B*. Vía de tipo residencial con moderado tránsito peatonal nocturno, tránsito vehicular de bajo a moderado y con moderada existencia de comercios.

- 3) *TIPO C*. Vía de acceso industrial que se caracteriza por bajo tránsito peatonal nocturno, moderado tránsito vehicular y baja actividad comercial.

Se deben considerar las características reflectivas del pavimento para el cálculo de *luminancia* de una vialidad, las cuales son mostradas en la tabla 21.

TABLA 21. Características reflectivas del pavimento. ⁽¹³⁾

Clase	Q_0	Descripción	Tipo de reflectancia
R ₁	0.10	Superficie de concreto, Cemento Pórtland, superficie de asfalto difuso con un mínimo de 15 % de agregados brillantes artificiales.	Casi difuso
R ₂	0.07	Superficie de asfalto con un agregado compuesto de un mínimo de 60 % de grava de tamaño mayor a 10 mm. Superficie de asfalto con 10 a 15 % de abrillantador artificial en la mezcla agregada.	Difuso especular
R ₃	0.07	Superficie de asfalto regular y con recubrimiento sellado, con agregados oscuros tal como roca volcánica, textura rugosa después de algunos meses de uso (típico de autopistas).	Ligeramente especular
R ₄	0.08	Superficie de asfalto con textura muy tersa.	Muy especular

NOTA: Q_0 representa el coeficiente de luminancia media.

2.5.6 DEFORMABILIDAD

La *deformabilidad* es la medida de la deflexión elástica que experimenta un pavimento al paso de una carga, y es función no sólo del tipo y estado del pavimento, sino también del método y equipo de medida. La medición de ella, generalmente, se realiza en forma no destructiva y se utiliza para relacionarla con la capacidad estructural del pavimento.

En la Fig. 2.14 se puede apreciar el efecto que causa un vehículo sobre la superficie de un *pavimento flexible*, el desplazamiento vertical de la superficie corresponde a la *deformabilidad*. Es importante destacar que no sólo se desplaza el punto bajo la carga, sino que un sector alrededor de ella, causando un conjunto de deflexiones, el cual se denomina *cuenco*.

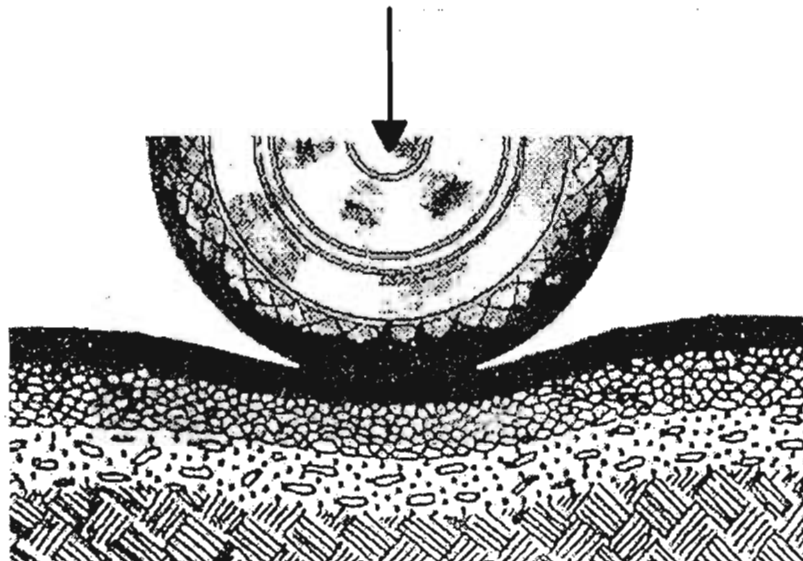


FIGURA 2.14. Esquema de la deformabilidad de un pavimento flexible.

Para llevar a cabo la medición del cuenco de deflexiones de un pavimento existen diversos equipos, cuyo procedimiento general es de aplicar una carga sobre el pavimento, midiendo la deformación producida en la superficie de él en diversos puntos ubicados a distintas distancias de la carga.

Con una dirección hacia un análisis y diseño mecanicista de los pavimentos, el cual se basa en los principios fundamentales de la Física, el uso de la información de deflexión ha empezado a ser más sofisticado. En la actualidad, las mediciones de deformaciones tienen diversos usos, entre los que se encuentran: ⁽⁸⁾

- Identificación de las secciones de los pavimentos que son estructuralmente uniformes.
- Identificación de las zonas débiles y/o deterioradas.
- Cálculo de la capacidad estructural.
- Diseño de recarpeteos o de rehabilitación.
- Restricciones de carga (estacionales y permanentes).
- Procedimientos para permitir sobrecarga.
- Aplicación en la gestión de pavimentos.
- Evaluación de anomalías.

Es importante hacer notar que el uso de las deflexiones como una medida directa de la capacidad estructural de un pavimento debe ser evitada, ya que puede inducir a errores. En lugar de ello, las deformaciones deben ser utilizadas para calcular los módulos de las capas, y a través de ellos calcular las deformaciones y tensiones, las cuales pueden ser utilizadas para evaluar la capacidad estructural o la vida remanente del *pavimento flexible*.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL ⁽⁸⁾

Existen diversos métodos para medir la deformabilidad del *pavimento flexible*, por tal razón existen diversas clasificaciones, siendo las más importantes según la posición donde se miden, la forma de aplicar la carga, y el tipo y número de sensores para realizar las mediciones. A continuación se señalan algunas clasificaciones:

- Lugar donde realiza las mediciones. ⁽⁸⁾
 - Dentro del cuenco.
 - Fuera del cuenco.
- Forma de aplicar la carga. ⁽⁸⁾
 - Estática o de movimiento lento.
 - Vibración.
 - Impacto.
 - Propagación de ondas.
- Tipos de sensores. ⁽⁸⁾
 - *Geòfonos*, miden la velocidad de desplazamiento de la superficie del pavimento.
 - *Acelerómetros*, miden la aceleración de la superficie del pavimento.
 - *Transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT)*, miden los desplazamientos de la superficie del pavimento.

Debido a la importancia de la deformabilidad medida, la clasificación más usada es: *el tipo de carga*, describiéndose a continuación las distintas categorías:

1) ESTÁTICA O DE MOVIMIENTO LENTO

Corresponde a la primera generación originada, básicamente, con el desarrollo de la *Viga Benkelman*. Estos equipos proveen la medida de deflexión en un punto, bajo una carga fija o de movimiento lento; para su uso, necesitan un vehículo cargado para lograr la sollicitación del ensayo. Consumen mucho tiempo y su labor es intensa. Entre estos equipos se encuentran:

- **Base Profunda:** Corresponde a un pozo de 3 m. de profundidad, desde la superficie del pavimento, en el cual se instala un medidor de deflexión anclado al fondo de él. Su objetivo es obtener una medición de deflexión absoluta del pavimento.
NOTA: Su uso se restringe a investigación, no es práctico como rutina.
- **Viga Benkelman:** Éste equipo opera en base al principio de palanca, debe ser usada con un camión cargado, normalmente 80 kN en un eje, con las ruedas infladas a una presión de 0.48 a 0.55 MPa. Las mediciones se realizan colocando la punta de la viga entre las dos ruedas y midiendo el rebote cuando el vehículo se aleja. Los resultados de las deformaciones se leen en un dial indicador.
- **Deflectómetro Lacroix:** Consiste en un camión con un peso estándar en su eje posterior cuya separación entre ejes es de 6.75 m. En él, van montadas dos vigas similares a la *Benkelman*. La forma de medir es similar a la *Viga Benkelman*.

2) VIBRACIÓN

Estos equipos son más móviles y más productivos que los equipos *estáticos*, en donde las deflexiones son generadas por elementos vibratorios que imponen una fuerza senoidal dinámica sobre un peso estático. La magnitud de la carga dinámica entre los puntos más altos es menor que dos veces la carga estática: por lo tanto, estos equipos siempre aplican una carga de compresión de magnitud variable sobre el *pavimento flexible*. La deflexión se determina a través de *acelerómetros* o sensores de velocidad (geófonos). Estos sensores se colocan normalmente debajo de la carga y a distancias regulares del centro.

Una ventaja de estos equipos sobre los *estáticos*, es que no se requiere un punto de referencia. La desventaja principal de éste método es que las cargas reales que transitan por los pavimentos, no tienen el mismo comportamiento que las que aplican ellos. Entre los equipos más característicos se encuentran:

- **Dynalect (electro – mecánico):** Produce la vibración a través de unos pesos rotatorios con los cuales aplica un rango de fuerzas entre 453.6 kg. Para medir las deflexiones cuenta con cinco transductores de velocidad ubicados a 0, 30, 76, 91 y 122 cm. respectivamente. Fig. 2.15. ⁽¹⁴⁾
- **Road Rater (electro – hidráulico):** Genera las vibraciones a través de un sistema hidráulico que mueve unas masas, con él produce un rango de frecuencias entre 5 y 60 Hz. Para medir las deflexiones utiliza transductores de velocidad.
- **WES Heavy Vibrator:** Fue desarrollado por la *Corps of Engineers USA*, para la evaluación de pavimentos de aeropuertos. El *WES Heavy Vibrator* aplica una precarga de 71 kN con una carga vibratoria de 130 kN a una frecuencia de 15 Hz. Éste equipo no está disponible en el mercado.

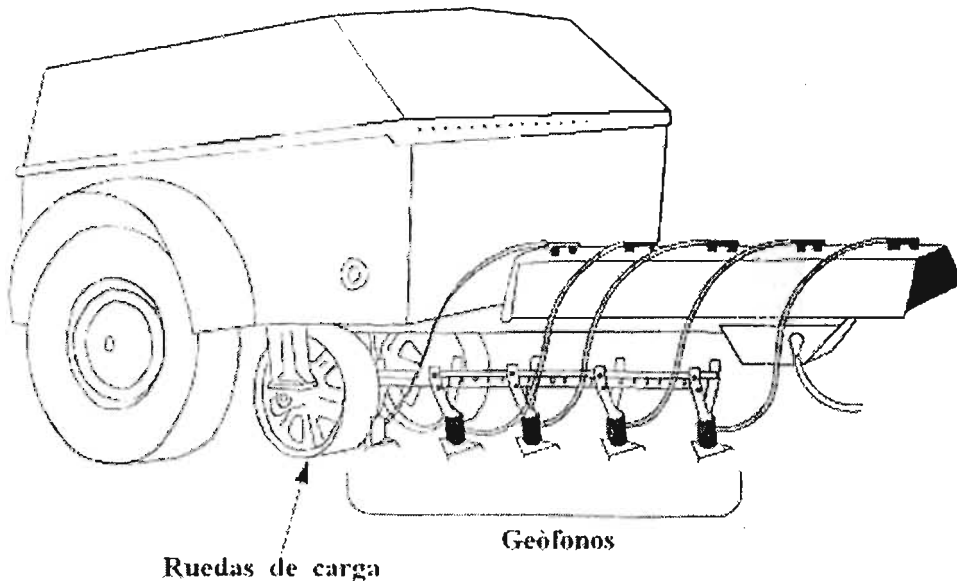


FIGURA 2.15. Dispositivo Dynaflect en posición de operación. ⁽¹⁴⁾

3) IMPACTO

Las irregularidades se reflejan en ondas de diferente longitud debidas a deficiencias constructivas en la extensión, compactación, guiado, etc., a deformaciones por efecto del tránsito o a deformaciones del suelo en profundidad. Estas irregularidades afectan la comodidad del rodamiento por las vibraciones que producen, aumentan el consumo de combustible e influyen en la estabilidad de los vehículos, cuanto mayor es la velocidad del usuario, más le afectan las irregularidades de gran longitud de onda. ⁽¹⁴⁾

Se incluyen los equipos que entregan una carga de impacto sobre el pavimento: *Falling Weight Deflectometer (FWD)*. Variando el peso y la altura de caída se puede general diferentes cargas de impacto. La ventaja principal de estos equipos es su mecanismo de carga, ya que permite modelar bastante bien la magnitud como la duración de una carga real del tránsito.

Las pesas y la altura de caída de los *FWD* pueden combinarse de manera que pueden obtenerse impactos de 20 a 240 kN (2700 a 24500 kg), el efecto del impulso se registra en un lapso de 25 a 30 milisegundos, equivalente al efecto de una carga móvil real sobre el *pavimento flexible*. Como se mencionó anteriormente, la carga cae sobre una placa circular cuya superficie es similar al área de contacto de una llanta, y los efectos producidos por el impacto en el pavimento son determinados en 7 sensores cuyas posiciones pueden ser las mostradas en la Fig.2.16; mediante un procesamiento de las mediciones de campo, el dispositivo permite obtener las deflexiones bajo cada uno de los sensores, pudiendo definirse por lo tanto la forma y dimensiones de la cuenca de deflexiones, aspectos que están relacionados con el espesor y rigidez del pavimento, las características de los materiales de apoyo y la magnitud de la carga aplicada.

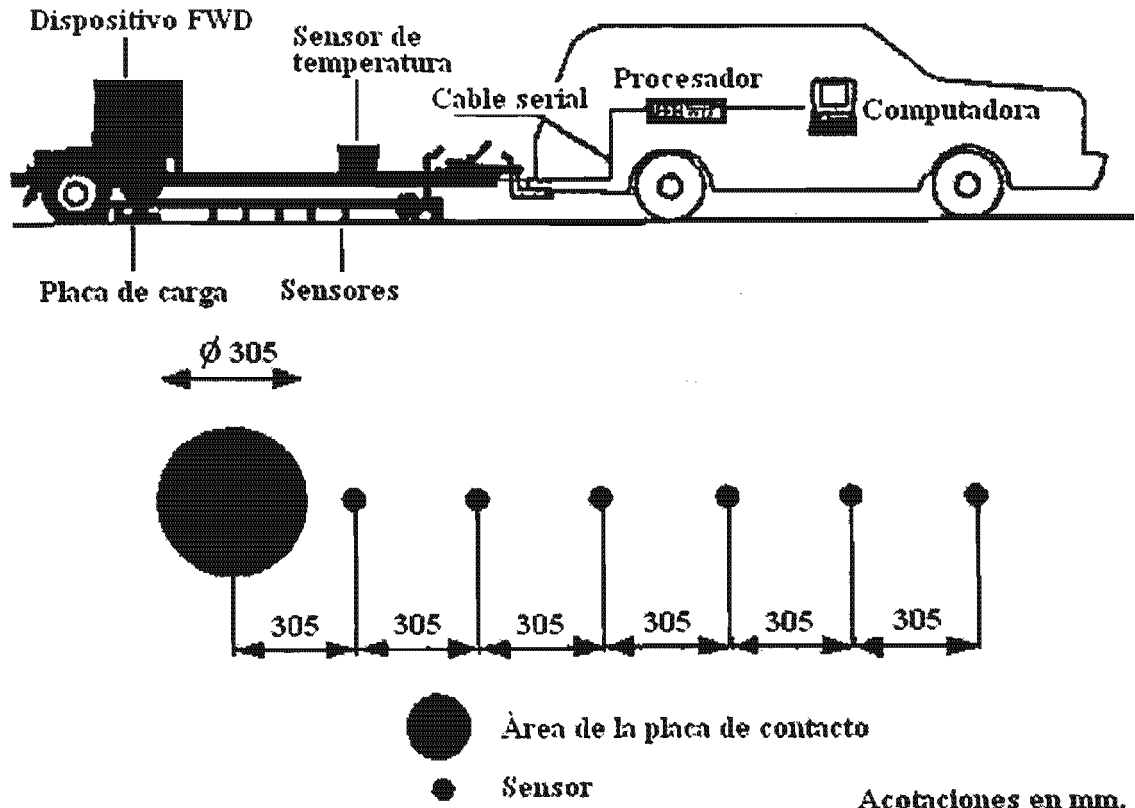


FIGURA 2.16. Posición típica de la placa de carga y de los sensores y esquema del dispositivo FWD. ⁽¹⁴⁾

2.5.7 UNIFORMIDAD

Se designa como uniforme una carretera, cuando el perfil longitudinal y transversal difiere muy poco del perfil teórico, y no tienen, por lo tanto, desnivelaciones ni ondulaciones.

La *uniformidad* es una cualidad esencial no solamente para asegurar el confort de los usuarios, sino también para disminuir los gastos de tracción, para reducir el desgaste de los vehículos y el de la calzada misma que, según hemos demostrado, se produce rápidamente en los pavimentos sometidos a continuos deterioros. No es, por lo tanto, un lujo, sino una cualidad rentable.

Naturalmente, es ilusorio buscar la *uniformidad* de una carretera (ya sea en el cuerpo de la misma o en el terreno de fundación), si su resistencia a los esfuerzos cortantes no está asegurada. Es lo que sucede frecuentemente en las carreteras, en que los reflejos de arcilla han contaminado el terreno de fundación y por lo tanto ésta pierde progresivamente su resistencia y se deforma.

Las características de *uniformidad* debidas al proceso constructivo inadecuado de la *capa de base* son también difícilmente reparables. Es el caso de las ondulaciones presentada en los materiales, que puede ser producido por una apisonadora trabajando demasiado rápido, en los *pavimentos flexibles* por un acabado irregular de la capa inferior, que da lugar a un espesor variable; por un trabajo defectuoso de la niveladora, falta de control de la regla y de la muestra, una compactación insuficiente. La primera condición para tener una superficie *uniforme* es, que el cuerpo en su conjunto de la *carpeta asfáltica* haya sido construido con el espesor suficiente y apegado estrictamente al proyecto y normas estipuladas.

En un *pavimento flexible*, las "ondulaciones" mostradas en la capa superficial, ocasionados por aglomerados poco estables o con tratamientos superficiales muy ricos en asfalto, baches debidos al desgaste acelerado alrededor de un punto débil de la superficie, etc., revelan la inestabilidad y transitabilidad de la carretera.

CAPÍTULO III

CONSERVACIÓN Y MEJORAMIENTO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

OBJETIVO PARTICULAR:

Se analizará la mejor manera de conservar, rehabilitar el comportamiento de la carpeta asfáltica incluyendo las capas de base, sub-base y la capa subrasante, para ampliar la vida útil del pavimento encaminada a la modernización y ampliación de las mismas.

- 3.1 INTRODUCCIÓN
- 3.2 CONSERVACIÓN RUTINARIA, PREVENTIVA Y CORRECTIVA
- 3.3 TRATAMIENTO SUPERFICIAL
 - 3.3.1 *CARPETAS DE RIEGOS SIN AGREGADOS*
 - 3.3.1.1 *RIEGOS DE IMPREGNACIÓN*
 - 3.3.1.2 *RIEGOS DE LIGA*
 - 3.3.2 *RIEGOS CON AGREGADOS*
 - 3.3.2.1 *RIEGO SIMPLE*
 - 3.3.2.2 *RIEGO DOBLE*
 - 3.3.2.3 *RIEGO TRIPLE*
 - 3.3.3 *MEZCLAS DRENANTES*
- 3.4 BACHEO
- 3.5 RENIVELACIÓN DE LA CARPETA
- 3.6 REFUERZO MEDIANTE SOBRECARPETAS
- 3.7 RECONSTRUCCIÓN DE CARPETAS
- 3.8 TRATAMIENTO MEDIANTE CAPAS GRUESAS CON CARPETAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA
- 3.9 RECUPERACIÓN Y RECICLADO
- 3.10 SOBRECARPETA DE CONCRETO HIDRÁULICO (WHITE TOPPING)
- 3.11 ESTABILIZACIÓN Ó MEJORAMIENTO DEL MATERIAL GRANULAR
 - 3.11.1 *ESTABILIZACIÓN FÍSICA*
 - 3.11.1.1 *MEZCLAS DE SUELOS*
 - 3.11.2 *ESTABILIZACIÓN QUÍMICA*
 - 3.11.2.1 *CAL*
 - 3.11.2.2 *CEMENTO PÓRTLAND*
 - 3.11.2.3 *PRODUCTOS ASFÁLTICOS*
 - 3.11.2.4 *CLORURO DE SODIO*
 - 3.11.3 *ESTABILIZACIÓN MECÁNICA*
 - 3.11.3.1 *COMPACTACIÓN*
 - 3.11.3.1.1 *COMPACTACIÓN DE SUELOS*
 - 3.11.3.1.2 *COMPACTACIÓN DE LA CARPETA ASFÁLTICA*

CAPÍTULO 3. CONSERVACIÓN Y MEJORAMIENTO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.**3.1 INTRODUCCIÓN**

La *conservación* de las vialidades, y en especial de los pavimentos, juega un papel importante desde el punto de vista económico. La acción de conservar los componentes de una carretera trae como objetivo primario que sus condiciones físicas sean aceptables respecto a su transitabilidad, seguridad y confort, pero también durante la ejecución de los trabajos correspondientes, brinde comodidad y seguridad a los usuarios. Así pues, todo tipo de obra durante el mejoramiento y mantenimiento de la red vial, deberá llevarse a cabo con todo rigor dentro de las normas y procedimientos de construcción fijados para carreteras y caminos.

La *conservación periódica* es vital, si consideramos que al construir una carretera y abrirla a la circulación, se piensa que se ha cumplido el objetivo desde el punto de vista de ingeniería de las vías terrestres, sería un error. Se observa que las carreteras que carecían de mantenimiento mínimo indispensable sufrieron fallas en un porcentaje considerable. Conjuntamente con esto, dadas las características de los caminos, el tránsito por las mismas aumenta de acuerdo al nivel económico de las poblaciones que conecta. Dicho incremento va disminuyendo las características de resistencia y calidad que el pavimento posee y a razón de la tasa de crecimiento del tránsito considerado. Dado que el tránsito aumenta día a día en peso y volumen, las carreteras existentes acusan desgaste y desperfectos y tienen que sufrir cambios en su conformación y estructuración, superficie de rodamiento y en algunos casos en lo que a drenaje y subdrenaje se refiere.

La *conservación rutinaria, preventiva y correctiva* no abarcan los casos de acciones correspondientes a “modernizaciones” o “ampliaciones” de pavimentos, ni a una reconstrucción. En la reconstrucción se aprovechan los accesos, trazo y parte de los materiales, sin embargo, desde el momento en que se decide reconstruir una *carpeta asfáltica*, se establece que su pavimento prácticamente ya no tiene vida residual y que, en consecuencia, un programa de rehabilitación carece de sentido. En éste caso se tiene que hacer acopio de materiales nuevos y, de ser el caso, de materiales reciclados para la reconstrucción, y realizarse un proyecto nuevo, empleando para ello las especificaciones nuevas que sean aplicables. La selección, manejo y especificación de materiales, así como el diseño de las vialidades por construir se ubicarán entonces dentro de lo que se puede denominar “proyecto nuevo”.⁽¹⁾

Por otro lado, la evolución cambiante de las necesidades de conservación hace inevitable que se vuelvan a plantear políticas de conservación, atendiendo a las variantes de los requerimientos de la población, del intercambio de bienes y servicios, de las redistribuciones del transporte de carga y sus implicaciones económicas y principalmente de los recursos económicos necesarios para la *conservación de las carreteras*; por lo tanto se tiene un cuadro completo de factores que inciden en la adopción de estrategias de mejoramiento más adecuadas. Es por ello que en los últimos años se han venido utilizando sistemas de administración de éste último rubro, con objeto de hacer más eficientes y oportunos los trabajos de *conservación*.

3.2 CONSERVACIÓN RUTINARIA, PREVENTIVA Y CORRECTIVA**a) Conservación Rutinaria**

Es el conjunto de acciones que se realizan de manera habitual para que el pavimento de una carretera esté siempre en condiciones de ofrecer un tránsito fluido y seguro. Después de realizar

inspecciones visuales, el levantamiento físico de daños y trabajos de evaluación, la *conservación rutinaria* incluye actividades como: bacheo, renivelación de hundimientos diferenciales, restituir y retocar señalamientos, limpiar cunetas, contracunetas y lavaderos, desasolar, reparar cunetas, contracunetas y bordillos, lavaderos, zampeados y elementos de subdrenaje, etc. Algunas son de tipo cotidiano y otras sólo se realizan al surgir la necesidad.

b) Conservación Preventiva

Es el conjunto de acciones programadas para prolongar lo más posible la vida útil del pavimento y mantenerlo en buenas condiciones estructurales y de servicio. Con ello se debe anticipar la ejecución de las labores que se tendrán que realizar para prevenir la aparición o la rápida evolución de deterioros, a fin de minimizar tanto los costos del usuario como los inherentes al propio pavimento. Típicamente las acciones de *conservación preventiva* incluyen las siguientes: conservar en buen estado el sistema de drenaje y subdrenaje, tratamientos superficiales, rebajado, ranurado, etc. La ejecución de una sobrecarpeta con fines preventivos se adopta cuando, después de tomar en cuenta criterios económicos y de proyección del tránsito, resulta más atractivo anticipar ésta erogación si el análisis de alternativas en el ciclo de vida arroja como resultado que el costo final es menor en comparación con la opción de retrasar los trabajos de *conservación preventiva* y emplear más tarde otras técnicas de carácter correctivo.

c) Conservación Correctiva

Ésta se constituye por labores que corrigen pequeñas fallas del pavimento o posibles causas de deterioros mayores en el mismo, que en el futuro conduzcan a la reducción de la capacidad de servicio del *pavimento flexible* y costos más altos de mantenimiento y/o rehabilitación.

Dependiendo básicamente de la severidad y la densidad de los principales defectos observados en el pavimento, las labores de *conservación correctiva menor* se encuentran:

- Riego de sello.
- Bacheo.
- Renivelación.
- Calafateo de grietas.

Y las posibles labores de *conservación correctiva mayores* se encuentran:

- La construcción de una sobrecarpeta.
- Renivelación.
- Fresado y/o reciclado.
- Entre otros.

La *conservación correctiva* de los pavimentos asfálticos, son efectuados por empresas constructoras generalmente, contratadas mediante licitación bajo la modalidad de costo por unidad de obra terminada.

3.3 TRATAMIENTO SUPERFICIAL

Los *tratamientos asfálticos superficiales* son aplicaciones de material asfáltico sólo o con agregados pétreos sobre capas de base flexible recién construidas, de buena calidad y del espesor adecuado para soportar las cargas del tránsito. La función de estos tratamientos superficiales consiste en proteger la capa de base y proporcionarle una capa de desgaste sin polvo, sobre la que el tránsito pueda moverse cómoda y seguramente.

Un *tratamiento superficial*, por sí mismo, no es un pavimento, sino más bien una capa impermeable que cubre el pavimento existente. Siendo su espesor usualmente inferior a 25 mm., su finalidad no es aumentar la resistencia de la *capa de rodamiento*. Los *tratamientos superficiales* sellan y prolongan la vida de las superficies viales, sin embargo, no se consideran parte estructural del pavimento debido a que añaden poca capacidad de soporte. Normalmente no se toman en cuenta al calcular la carga límite de un pavimento y pueden clasificarse de la siguiente manera:

Sin agregado pétreo:

- Riego de impregnación.
- Riego de liga.

Con agregado pétreo:

- Riego simple.
- Riego doble.
- Riego triple.

Las condiciones atmosféricas son un importante factor a tener en cuenta en la construcción de *tratamientos superficiales*. Para obtener mejores resultados en la retención de los agregados es deseable que la temperatura del asfalto sea relativamente elevada durante la aplicación del tratamiento, y que sea considerablemente inferior antes de que se permita al tránsito rápido emplear la nueva superficie. Una estadística de los *tratamientos superficiales* construidos con resultados considerados excelentes, indica que más del 85 % se aplicaron en los meses más cálidos del verano, por lo que deben extremarse los esfuerzos para conseguir que el trabajo se ejecute rápidamente en estos meses.

Uso de los tratamientos superficiales:

Los *tratamientos superficiales* con asfalto se utilizan básicamente para los siguientes propósitos:

- Proveer una superficie de bajo costo para toda condición del tiempo atmosférico, en caminos de categoría ligera y mediana.
- Formar una capa de protección impermeable para evitar la entrada de agua a las capas subyacentes.
- Proveer una superficie resistente al deslizamiento. Los agregados ásperos y duros proporcionan buena resistencia al deslizamiento.
- Proveer una cubierta temporal para una nueva base granular que no va a recibir su cubierta final por un amplio período.
- Sellar una superficie de rodamiento existente.
- Rejuvenecer las superficies existentes deterioradas por el intemperismo.
- Proteger los pavimentos viejos que se han deteriorado por la edad o por grietas de retracción o de fatiga, mientras se efectúa un mejoramiento permanente.
- Definir acotamientos para que no se confundan con carriles de circulación.
- Permitir la aplicación de franjas ruidosas para seguridad en sitios estratégicos.
- Cubrir los pavimentos existentes.
- Servir como paliativo para el polvo.
- Guiar el tránsito y mejorar la visibilidad en la noche; por ejemplo, a través de agregados con contraste en colores.

Los tipos de tratamientos para superficies con asfalto incluyen los siguientes: *tratamientos de superficie simple*, que consiste en una aplicación de material asfáltico cubierta con una capa de

agregado, estos tratamientos asfálticos también llamados en *monocapa* se usan como capas de protección sobre bases flexibles o semirrígidas para tránsito liviano o como pavimento provisional sobre bases destinadas a soportar tránsito pesado mientras se construye la carpeta asfáltica definitiva; también existe el tratamiento superficial múltiple que resulta de 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 que se construye es más superficial. El tipo más empleado es el de las dos capas, que se conoce también como tratamiento superficial de doble riego y tiene su aplicación más frecuente como pavimento provisional en carreteras para tránsito mediano o pesado que se construye por etapas.

3.3.1 CARPETAS DE RIEGOS SIN AGREGADOS

Uno de los tratamientos superficiales corresponde a los riegos sin agregados; estos riegos, también llamados en negro, se usan generalmente como tratamientos auxiliares; por sí mismos, raras veces constituyen la superficie de rodamiento de un pavimento asfáltico.

3.3.1.1 RIEGO DE IMPREGNACIÓN

Un *riego de impregnación* es una aplicación de asfalto diluido de curado medio o de asfalto emulsificado, se efectúan sobre *bases* o capas granulares no tratadas previamente. Cuando se usa un asfalto diluido (diluido con solvente), de curado medio, éste debe ser aplicado en suficiente cantidad para que penetre dentro del material de *base*. Cuando se usa un asfalto emulsificado, éste debe ser mezclado con el material de *base* usando una motoniveladora, un mezclador rotatorio o cualquier otro tipo de equipo adecuado. Su función es conseguir una superficie negra, de impermeabilidad uniforme, sin polvo ni partículas minerales sueltas, para poder extender adecuadamente las capas asfálticas siguientes. Se utilizan ligantes que tengan escasa viscosidad y que, además, ésta característica se mantenga durante un cierto tiempo, para que pueda penetrar ligeramente por capilaridad. (Fig. 3.1).

Se debe humedecer con agua la superficie de la *base*, horas antes de la extensión del ligante, para que los capilares queden lo más libres posible y se favorezca la impregnación, la cantidad de ligantes necesaria se suele fijar como la que es capaz de absorber la base en un período de 24 horas. Después de éste período, las zonas especialmente ricas en asfalto se cubrirán con arena o agregado fino para absorber el exceso y las especialmente porosas o pobres se volverán a reparar con un nuevo *riego de impregnación*. Esto se consigue utilizando asfaltos fluidificados tipo *FM*, o emulsiones asfálticas de rompimiento lento y alto contenido de fluidificantes con dotaciones de aproximadamente 1.0 lt/m^2 .

El resultado positivo de éste tipo de tratamiento, dependerá en gran medida, de la cantidad de finos que tenga la *base* a tratar pues estos entorpecen la penetración del asfalto.

Un *riego de impregnación* sirve para tres propósitos:

- 1) Ayuda a prevenir la posibilidad de que se desarrolle un plano de deslizamiento entre la capa de *base* y la capa superficial.
- 2) Evita que el material de *base* se desplace bajo las cargas de tránsito, durante la construcción, antes de que la primera capa sea colocada.
- 3) Protege las capas de *base* de la intemperie.

En ocasiones se aplica demasiado asfalto diluido a la capa de *base*. En estos casos, no todo el asfalto es absorbido por el material de *base*, aún después de un período normal de curado

(24 horas). Éste exceso de asfalto deberá secarse con arena limpia, para evitar que el *riego de impregnación* presente exudación a través del concreto asfáltico, o que produzca un plano de deslizamiento. El proceso de secado consiste en rociar arena limpia sobre la superficie que ha sido impregnada y luego se debe apisonar la superficie antes de colocar la mezcla asfáltica sobre la *base*. Cualquier exceso de arena evitará que se obtenga una buena liga entre la capa de adherencia y las capas asfálticas. El *riego de impregnación* debe inspeccionarse antes de la pavimentación para asegurar que se encuentre en buena condición.

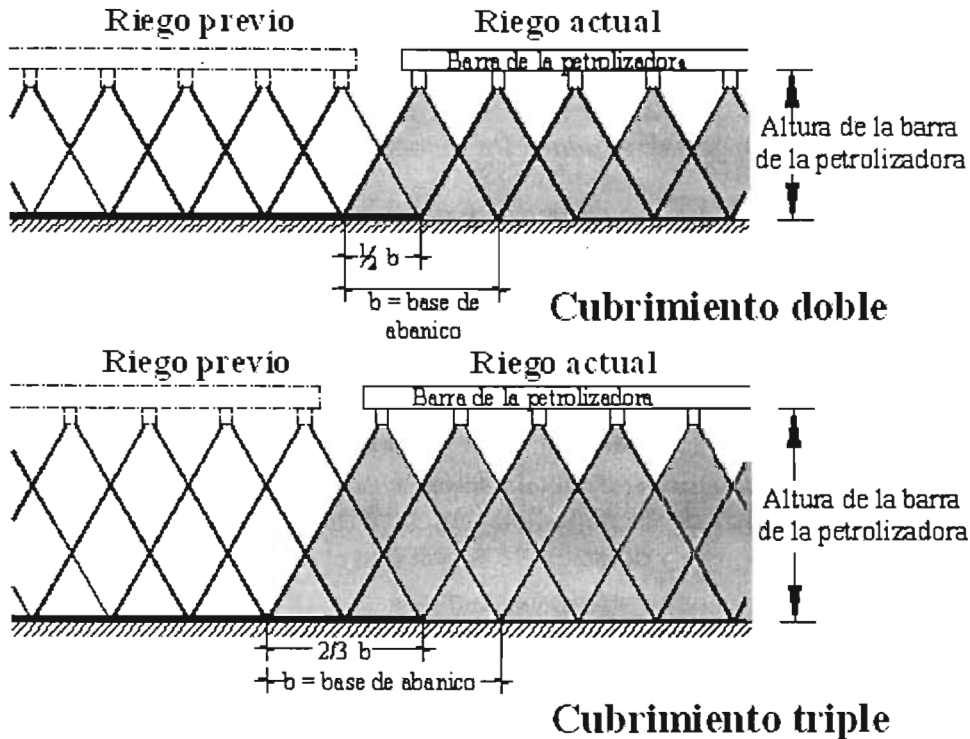


FIGURA 3.1. Aplicación del material asfáltico. ⁽³⁾

3.3.1.2 RIEGO DE LIGA

El *riego de liga* consiste en la aplicación de una película lo más fina posible de ligantes sobre una superficie asfáltica o impermeable, con el fin de conseguir una buena unión con la nueva capa asfáltica que se va a poner en obra inmediatamente. El propósito de un *riego de liga* es mejorar la unión entre las capas viejas y nuevas del pavimento; los *riegos de liga* también son usadas en lugares donde la mezcla en caliente entra en contacto con la cara vertical de las aceras, las cunetas y las estructuras y juntas de pavimento en frío.

La superficie de un *riego de liga* es resbaladiza antes de romperse la emulsión (el agua en el asfalto emulsionado empieza a evaporarse y el asfalto comienza a ligarse con la superficie vieja del pavimento). Debido a esto, es necesario mantener el tránsito fuera del *riego de liga* para que no se presente una condición peligrosa. Además, se deberá advertir al tránsito de la posibilidad de salpicaduras de emulsión si se llega a transitar sobre el riego.

Los ligantes asfálticos adecuados deben ser poco viscosos, con objeto de conseguir un buen reparto sobre la superficie con dotaciones escasas (del orden de 200 a 300 gr/m^2), de ligante asfáltico residual; además no deben contener fluidificantes en exceso, ya que estos reblandecen las capas asfálticas inferiores y la que se va a colocar en obra, necesitan un largo período de curado o pérdida de solventes, que va en perjuicio de la rapidez de la obra.

Aunque se pueden usar otros tipos de asfaltos en *riegos de liga*, la emulsión diluida (una parte de agua por una parte de asfalto emulsificado) proporciona los mejores resultados por las siguientes razones:

- El asfalto emulsificado diluido fluye fácilmente del distribuidor, lo cual permite una aplicación más uniforme del *riego de liga*.
- La emulsión se diluye para que el distribuidor funcione, con el volumen suficiente a una velocidad normal.

Cuando se apliquen los riegos de impregnación y los riegos de liga, se debe tener suficiente cuidado para evitar rociar asfalto sobre las aceras, las cunetas, las cubiertas de puentes, las defensas laterales del camino, y sobre todo a los automóviles que estén pasando.

3.3.2 CARPETAS DE RIEGOS CON AGREGADOS

El tratamiento superficial abarca todo tipo de tratamiento hecho con agregados pétreos, que tenga por objeto proporcionar una superficie de rodadura impermeable y segura en toda época del año.

El tipo de técnica empleada en los tratamientos superficiales implica una serie de dispersiones en cadena respecto a unos ajustes o dosificación teóricos previos. Pueden mencionarse: variación de la permeabilidad de la superficie del soporte, variaciones en la extensión del ligante, variaciones en la limpieza y dotación de la gravilla, etc.

Las funciones de éste tipo de tratamiento son las de proporcionar:

- Protección para la estructura del pavimento flexible.
- Una capa de rodamiento con rugosidad adecuada.
- Una capa impermeable y que tome algunos esfuerzos tangenciales de aceleración y frenaje.

Recomendaciones generales:

- Se recomienda utilizar materiales pétreos libres de polvo para que cumplan con las especificaciones y tenga mejor adherencia con el asfalto. Otra opción es premezclarlo antes de efectuar el riego.
- Cuando se usen *emulsiones asfálticas*, conviene humedecer ligeramente el material pétreo con el fin de eliminar el polvo adherido a la gravilla. Una variante de esta opción es la de premezclar con emulsión dicho material pétreo antes de efectuar el riego de gravilla.

3.3.2.1 RIEGO SIMPLE

El proceso es el siguiente:

Sobre la base del pavimento ya conformada, compactada y seca, se da un riego de producto asfáltico del tipo *FR – 3* a razón de 1.5 a 2.0 lt/m^2 e inmediatamente se cubre con el material pétreo tipo *3-A* (clasificado entre las mallas de $3/8''$ a $N^{\circ}8$ de la tabla *I*), a razón de 6 a 8 lt/m^2 ; se rastrea para uniformar la superficie y se plancha con una aplanadora liviana de 5 a 8 toneladas, pudiéndose abrirse al tránsito en unos días después. Ésta carpeta asfáltica es aconsejable para un tránsito inferior a 200 vehículos por día. En zonas de alta precipitación

pluvial, conviene mejor colocar un tratamiento superficial doble para mayor eficiencia y duración del pavimento. Si se emplea una emulsión asfáltica, puede usarse de 1.3 a 1.4 lt/m² y de 10 a 12 lt/m², de material pétreo puede usarse el tipo 3-A ó 3-E (ver tabla 1).⁽³⁾

Transcurrido un tiempo no menor de tres días se recolectará mediante barrido y se removerá el material pétreo excedente a fin de que no se formen ondulaciones en la carpeta. El resultado final se observa en la siguiente figura:

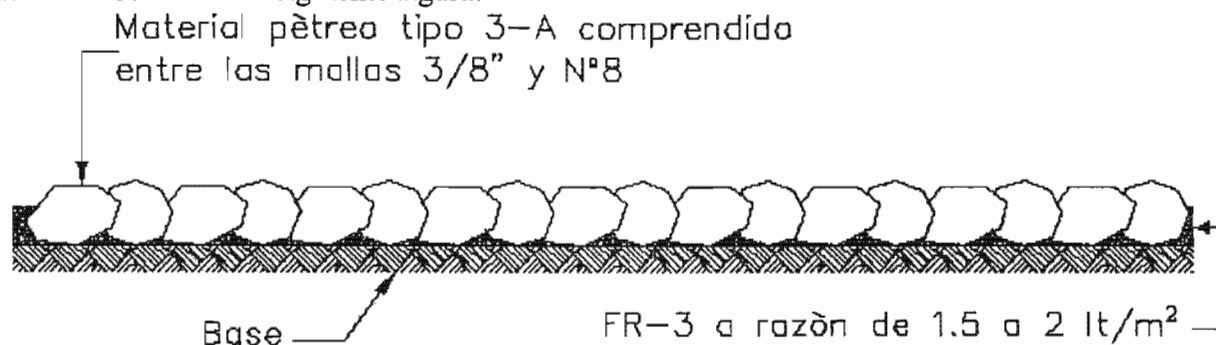


FIGURA 3.2. Proporción adecuada entre el material pétreo y el asfalto, con la gravilla hundida en un 60 % aproximadamente.

REQUISITOS DE CALIDAD DE MATERIALES PÉTREOS PARA CARPETAS POR EL SISTEMA DE RIEGOS

El material pétreo que se utilice en la elaboración de *carpetas por el sistema de riegos*, según su denominación, cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la tabla 1, así como los requisitos de calidad que establecen en la tabla 2.

TABLA 1. Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas por el sistema de riegos.⁽³⁾

Malla		Denominación del material pétreo				
Abertura mm	Designación	1	2	3 - A	3 - B	3 - E
Porcentaje que pasa						
31.5	1 ¼"	100	---	---		
25	1"	95 mín	---	---		
19	¾"	---	100	---		
12.5	½"	5 máx	95 mín	100		100
9.5	⅜"	---	---	95 mín	100	95 mín
6.6	¼"	0	5 máx	---	95 mín	---
4.75	Nº 4	---	---	---	---	5 máx
2.36	Nº 8	---	0	5 máx	5 máx	0
0.425	Nº 40	---	---	0	0	---

TABLA 2. Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas por el sistema de riegos.⁽³⁾

Característica	Valor
Desgaste de los Ángeles; %, máximo	30
Partículas alargadas; %, máximo	35
Partículas lajeadas; %, máximo	35
Intemperismo acelerado; %, máximo	12
Desprendimiento por fricción; %, máximo	25
Cubrimiento con asfalto (método inglés); %, mínimo	90

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT-4-04/01
CMT. Características de los materiales.

Los casos en que se recomienda un *riego simple* son los siguientes:

- 1) Cuando se requiera proporcionar una superficie de poco desgaste a la carpeta.
- 2) Cuando la carpeta existente esté agrietada y/o tenga una textura muy abierta; para evitar que se introduzca el agua y especialmente que llegue ésta a la capa de *base*.
- 3) Dar rugosidad a la superficie para hacerla antiderrapante.
- 4) Reavivar el asfalto de una carpeta expuesta a la acción de la intemperie.
- 5) Proteger la carpeta cuando inicia el proceso de desgranamiento y/o desgaste superficial.
- 6) Obtener en la superficie de rodamiento un color adecuado para mayor visibilidad nocturna.

3.3.2.2 RIEGO DOBLE

El proceso es el siguiente:

Sobre la base de pavimento ya conformada, compactada y seca, se da un riego de producto asfáltico del tipo *FR-3* a razón de 2 lt/m^2 e inmediatamente se cubre con material pétreo N°2 (clasificado entre mallas de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{1}{4}$ " de la tabla I), a razón de unos 12 a 14 lt/m^2 , se rastrea y se plancha con aplanadora liviana de 5 a 8 toneladas de peso. Dos o tres días después se barre y se le da un nuevo riego de producto asfáltico tipo *FR-3* a razón de 1.5 a 2.0 lt/m^2 y se cubre inmediatamente con material pétreo tipo *3-B* (clasificado entre las mallas de $\frac{1}{4}$ " y N°8 de la tabla I), se rastrea para uniformar la superficie, y se plancha con aplanadora pequeña de 5 a 8 toneladas de peso. Éste tipo de carpeta asfáltica es aconsejable para un tránsito inferior a 600 vehículos por día. Si se emplea emulsión asfáltica puede usarse en el primer riego la cantidad de 1.2 lt/m^2 cubriéndolos con 12 litros de material pétreo N°2 y en el segundo riego usar 1.5 lt/m^2 de emulsión cubriéndola de material pétreo tipo *3-B*.

Transcurrido un tiempo no menor de tres días se recolectará mediante barrido y se removerá el material pétreo *3-B* excedente a fin de que no se adhiera al material asfáltico del segundo riego, como se observa en la siguiente figura:

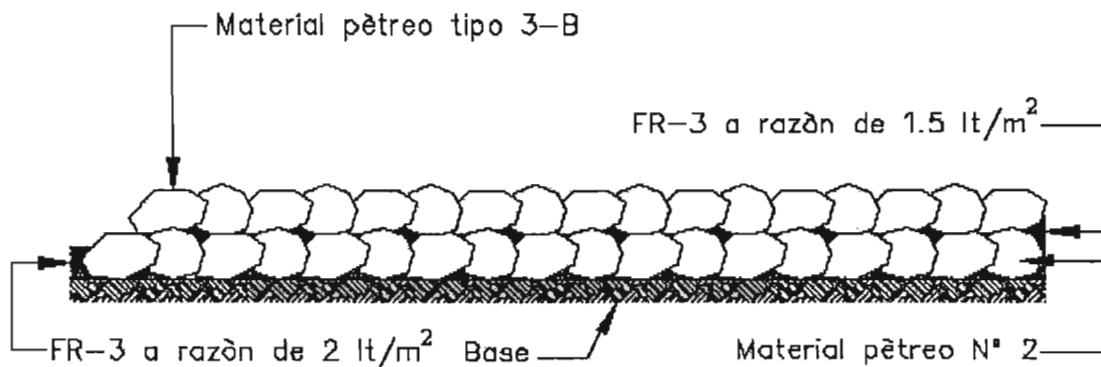


FIGURA 3.3. Carpeta de dos riegos.

3.3.2.3 RIEGO TRIPLE

La carpeta asfáltica formada por tres riegos se construye de la siguiente manera:

Sobre la base de pavimento ya conformada, compactada y seca se da un riego de producto asfáltico del tipo *FR-3* a razón de 2.5 lt/m^2 e inmediatamente se cubre con material pétreo N°1 (clasificado entre las mallas 1 " y $\frac{1}{2}$ " de la tabla I), a razón de 20 a 22 lt/m^2 , se rastrea y se plancha con aplanadora pequeña de 5 a 8 toneladas de peso. Dos o tres días después se barre el material pétreo sobrante y se coloca una carpeta de dos riegos sobre ésta, quedando así

terminada la carpeta de tres riegos. Ésta carpeta asfáltica admite perfectamente bien los 1000 vehículos por día. Transcurrido un tiempo no menor de tres días se recolectará mediante barrido y se removerá el material pétreo excedente a fin de que no se adhiera al material asfáltico del tercer riego, como se observa en la siguiente figura: ⁽³⁾

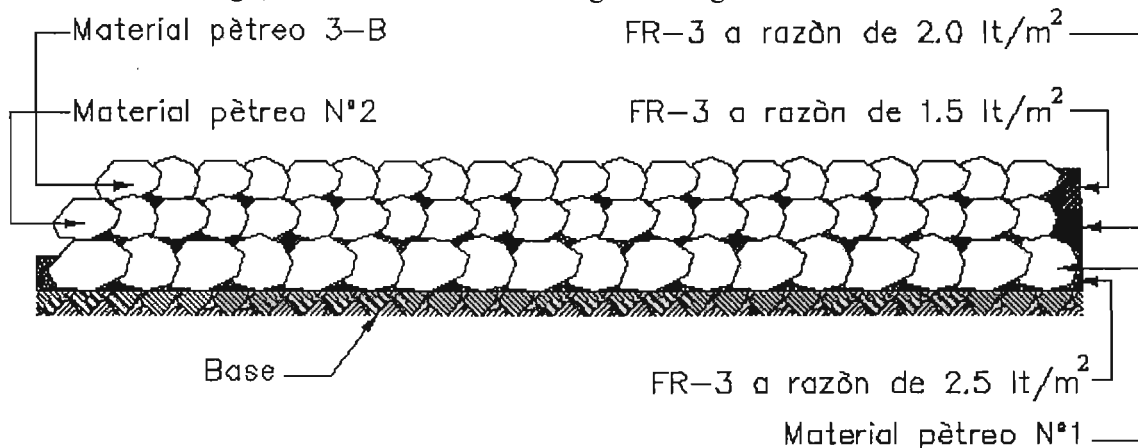


FIGURA 3.4. Carpeta de tres riegos.

3.3.3 MEZCLAS DRENANTES

Las *mezclas drenantes o porosas* son mezclas asfálticas con alto contenido de vacíos, que se logran con una granulometría de agregados pétreos marcadamente discontinua. Su campo de aplicación son las capas de rodamiento de carreteras de alto tránsito en las cuales es necesario actuar sobre algunos de los siguientes aspectos: atenuar los efectos negativos del agua sobre la superficie, disminuir el ruido de rodadura, aumentar la adherencia *neumático-pavimento* a altas velocidades y reforzar las calzadas que presentan deterioros moderados.

COMPONENTES DE LAS MEZCLAS DRENANTES ⁽²⁾

Responden a las siguientes características:

- Tamaño máximo de agregados, entre 10 y 16 mm.
- Proporción de agregado fino (pasa la malla N°8 de la serie estándar), entre 10% y 20%.
- Contenido de filler, entre 3% y 6%.
- Uso prácticamente exclusivo de ligante modificado con polímeros, con un rango que oscila entre 4% y 5% del total de la mezcla.

VENTAJAS:

- **Carácter drenante**

Elimina súbitamente el agua superficial, disminuyendo al mínimo las posibilidades de hidroneo y de proyecciones de agua por efecto del tránsito en días lluviosos; también tiene características antirreflectantes, pues la película de agua sobre la calzada favorece el reflejo de las luces de los vehículos, provocando molestias en la circulación nocturna.

- **Resistencia al deslizamiento**

La elevada macrotextura mejora la resistencia al deslizamiento a altas velocidades en días secos y para cualquier velocidad en jornadas lluviosas.

- **Disminución del ruido**

La alta porosidad y la "macrotextura negativa" de estos pavimentos (las irregularidades se manifiestan en profundidad, proporcionando una rodadura lisa), le otorgan características

fonoabsorbentes. La reducción sonora es directamente proporcional al porcentaje de vacíos y al espesor de la calzada porosa.

- **Capa de refuerzo**

Por tratarse de un material tenaz, flexible y resistente a las deformaciones plásticas, se usa para corregir deformaciones superficiales estables y retardar la aparición de fisuras moderadas.

LIMITACIONES:

- **Resistencia a la abrasión**

Las solicitaciones del tránsito tienden a disgregar estas mezclas en un grado mayor que en las mezclas "cerradas". La obtención de mezclas resistentes a la abrasión es una condición fundamental de diseño. El uso de asfaltos modificados ayuda en buena medida a contrarrestar éste mecanismo de deterioro.

- **Resistencia a la colmatación**

Con el tiempo, los poros tenderán a colmatarse, afectando la drenabilidad. Un mayor valor inicial del porcentaje de vacíos (y por lo tanto de la permeabilidad), atenúa éste defecto. También un tránsito intenso, pues los vehículos producen un efecto autolimpiante por succión.

- **Resistencia a la acción de agentes atmosféricos**

Los huecos facilitan la oxidación del ligante y a la pérdida de adherencia *agregado-asfalto* por la acción del agua. Pero el grosor de la película bituminosa que recubre a los agregados (tres veces mayor que en las mezclas tradicionales), y las propiedades del asfalto modificado con polímeros, permiten atenuar estos procesos de envejecimiento.

FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA DE MEZCLAS DRENANTES ⁽²⁾

La fabricación y puesta en obra de mezclas drenantes debe seguir, en gran medida, los mismos criterios seguidos con las mezclas cerradas convencionales. Sin embargo, la peculiar composición y propiedades de las mezclas drenantes traen como consecuencia algunas diferencias que es preciso conocer y respetar para poder aplicar ésta técnica con éxito. Estas diferencias hacen referencia a distintos aspectos del proceso constructivo:

- *Preparación del soporte:* Se requiere asegurar la impermeabilidad, una planimetría adecuada y una buena adherencia entre capas.
- *Fabricación:* Control riguroso de la granulometría y temperaturas de los agregados.
- *Transporte:* Hay que limitar las condiciones para evitar segregaciones, escurrimientos y el enfriamiento.
- *Extensión y compactación:* Extremar las precauciones en la ejecución y disposición de las juntas. Se emplean compactadores metálicos lisos. Control de la temperatura de mezcla antes de la apertura al tránsito.
- *Otros detalles constructivos:* Asegurar la evacuación del agua, evitando barreras y aumentando la capacidad de drenaje si es preciso.
- *Control de calidad:* Similar a las mezclas convencionales, excepto en lo referido a la determinación de huecos y permeabilidad. Cálculo cuidadoso de la densidad de referencia.

3.4 BACHEO

Es la reposición del material de la superficie de rodamiento que ha sido destruida y removida en pequeñas zonas por los efectos del tránsito. Éste tipo de fallas se dividen en calaveras y baches, existen las primeras cuando la dimensión es menor de 15 cm., en caso contrario la falla es un *bache*. Estos a su vez se dividen en *baches superficiales aislados y profundos*. Sean unos u otros, el bacheo será su corrección definitiva sólo si se encuentran aislados en áreas muy grandes y siempre se deberá determinar cual es la causa de la falla y atacarla de origen, para que ésta no vuelva a aparecer. Cuando las fallas ocurren de forma continua y numerosa sobre una pequeña área, será necesario programar una reconstrucción.

En la Fig. 3.5 aparecen imágenes de manera muy generalizada para la ejecución de un *bacheo asfáltico superficial*.

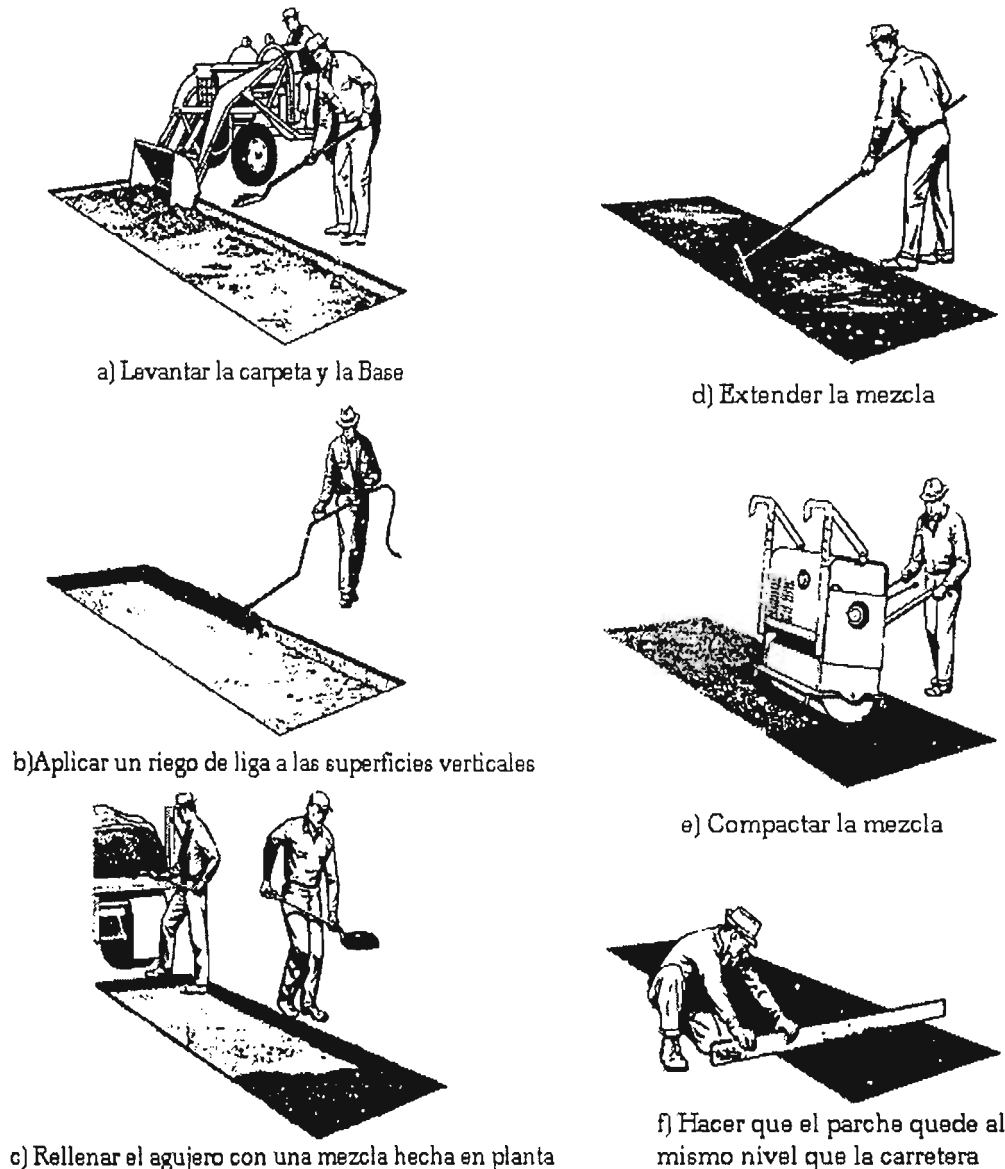


FIGURA 3.5. Bacheo superficial de un pavimento asfáltico. (The Asphalt Institute)

1) BACHEO SUPERFICIAL AISLADO ⁽³⁾

Es el conjunto de actividades que se realizan para reponer una porción de la *carpeta asfáltica* que presenta daños como oquedades por desprendimiento o desintegración inicial de los agregados, en zonas localizadas y relativamente pequeñas, cuando la base del pavimento se encuentra en condiciones estables y sin exceso de agua. Se considera *bacheo superficial aislado* cuando las áreas afectadas tengan una extensión menor de 100 m², por cada 7000 m² de pavimento.

a) Equipo

El equipo que se utilice para el *bacheo superficial*, será el adecuado para obtener la calidad especificada por el organismo a cargo, en cantidad suficiente para producir el volumen aprobado por la misma y conforme al programa de utilización de maquinaria.

- *Equipo de corte.* Con la capacidad, la potencia y el tamaño adecuado para ejecutar los cortes en todo el espesor de la *carpeta asfáltica*.
- *Esparcidora de asfalto.* La necesaria para aplicar previamente un *riego de liga* a las superficies verticales.
- *Compactadores de rodillo.* Serán manuales, autopropulsados, reversibles, con uno o dos rodillos metálicos provistos de petos limpiadores para evitar que el material se adhiera a ellos.
- *Compactadores de placa.* Que cuenten con dispositivos para el control de la vibración y con una placa metálica de las dimensiones adecuadas para compactar zonas donde no sea posible la utilización de compactadores con rodillo.

b) Transporte y almacenamiento

El *transporte y almacenamiento* de todos los materiales son responsabilidad exclusiva del contratista de obra y los realizará de tal forma que no sufran alteraciones que ocasionen deficiencias en la calidad de la obra.

Los residuos producto de la remoción de la *carpeta* dañada se cargarán y transportarán al banco de desperdicios que apruebe el organismo, en vehículos con cajas cerradas y protegidos con lonas, que impidan la contaminación del entorno o que se derramen.

c) Proporcionamiento de materiales

Los materiales pétreos, asfálticos y, en su caso, aditivos que se empleen en el *bacheo superficial*, se mezclarán con el proporcionamiento necesario para producir una mezcla homogénea, con las características aprobadas por el organismo a cargo. La reposición de la *carpeta* puede hacerse con mezcla asfáltica en caliente o bien, con mezcla o mortero asfáltico en frío.

d) Condiciones climáticas

Los trabajos serán suspendidos en el momento en que se presenten situaciones climáticas adversas y no se reanudarán mientras estas no sean las adecuadas, considerando que no se ejecutarán trabajos de *bacheo superficial aislado* en las siguientes condiciones:

- Sobre superficies con agua libre o encharcada.
- Cuando exista amenaza de lluvia o esté lloviendo.
- Cuando la temperatura de la superficie sobre la cual será colocada la mezcla esté por debajo de los 15°C, si se utiliza mezcla asfáltica en caliente, o bien, cuando esté por debajo de los 4°C en el caso de mortero o mezcla asfáltica en frío.

- Cuando la temperatura ambiente esté por debajo de los 10°C , si se utiliza mezcla asfáltica en caliente, o bien, cuando esté por debajo de los 4°C en el caso de mortero o mezcla asfáltica en frío. La temperatura ambiente será tomada a la sombra lejos de cualquier fuente de calor artificial.

e) Trabajos previos

- Previo al inicio de los trabajos, se realizará un levantamiento mediante inspección visual, de los daños en la carpeta que serán reparados mediante *bacheo superficial*.
- Sobre la superficie de la *carpeta asfáltica*, se delimitarán con pintura las áreas por reparar identificadas en el levantamiento de daños previamente aprobado por el organismo a cargo. Las demarcaciones serán de forma rectangular con dos de sus lados perpendiculares al eje de la carretera, donde el *bache* quedará inscrito, con un margen de 30 cm. desde el límite de la demarcación hasta las partes afectadas.
- Una vez delimitado el *bache*, se efectuará el corte perimetral de las áreas marcadas en la carpeta, con una máquina cortadora de disco, para lograr que las paredes de la excavación sean verticales y evitar daños a la carpeta fuera del área afectada.
- Después del corte, la carpeta dañada se retirará desde el interior hacia el perímetro del área afectada, empleando para ello herramienta adecuada, martillos neumáticos, escarificadores u otro procedimiento que no dañe la carpeta fuera del área afectada. La excavación debe quedar con el fondo nivelado libre de residuos de la carpeta demolida, partículas sueltas, polvo o de cualquier otra materia extraña, si es necesario empleando para su limpieza aire a presión. Los residuos podrán cargarse directamente al camión o acumularse en almacenamientos temporales que apruebe el organismo a cargo, de tal forma que no vuelvan a depositarse sobre la superficie del pavimento, o que impidan el drenaje superficial u obstruyan las obras de drenaje.
- Sobre la superficie de la base compactada y en las paredes de la excavación se aplicará un riego asfáltico ligero y uniforme con una emulsión de rompimiento rápido, a razón de 1.2 lt/m^2 , a menos que el organismo apruebe otro material asfáltico u otra dosificación.
- Inmediatamente antes de iniciar el *bacheo superficial aislado*, la superficie por reparar deberá estar debidamente preparada, exenta de materias extrañas, polvo, grasa o encharcamientos de material asfáltico.

f) Tendido de la mezcla

- Cuando se utilice mezcla asfáltica en caliente, ésta se tenderá con una temperatura mínima de 110°C . Si inmediatamente antes de ser tendida, su temperatura es de 5°C o más, por debajo de la temperatura mínima de tendido, esa mezcla será rechazada y no será objeto de medición.
- La mezcla se extenderá de las orillas del área dañada hacia el centro para evitar la segregación, en cantidad suficiente y utilizando un dispositivo enrasador adecuado para que, una vez compactada, la superficie terminada, quede uniforme y al mismo nivel que el resto de la carpeta. No se permitirá el tendido de la mezcla si existe segregación y ésta no será objeto de medición.
- De ser necesario, la mezcla se extenderá en capas sucesivas, con un espesor no mayor que aquel que el equipo sea capaz de compactar. Cuando el tendido se haga por capas y se utilice mezcla asfáltica en caliente, la capa sucesiva no debe tenderse hasta que la temperatura de la capa anterior sea menor de 70°C en su punto medio.

g) **Compactación**

- Si se utiliza mezcla asfáltica en caliente, la *compactación* se iniciará cuando su temperatura sea de 100°C como mínimo, y se terminará a una temperatura mínima de 80°C .
- La capa extendida se compactará hasta alcanzar el mismo nivel que el resto de la carpeta.
- La *compactación* se hará longitudinalmente, de las orillas hacia el centro, efectuando un traslape de cuando menos la mitad del ancho del compactador en cada pasada.

h) **Conservación de los trabajos**

- La superficie del bache tratado debe quedar limpio, presentar una textura y acabado uniforme, con el mismo nivel que el resto de la carpeta.
- Durante el proceso de bacheo, el supervisor de obra tomará las precauciones necesarias para evitar la contaminación de suelos, aguas superficiales o subterráneas y la flora.
- Que la diferencia de nivel entre el área bacheada y los bordes de la carpeta que la limitan, determinada mediante la colocación de una regla rígida de longitud suficiente para cubrir la superficie reparada en cualquier dirección, sea como máximo de ± 0.5 cm., colocada la regla en cualquier dirección.
- Que la textura en la superficie del área reparada sea uniforme y similar a la del resto de la carpeta.
- Una vez terminado el *bacheo superficial aislado*, la superficie del pavimento debe estar limpia; que la disposición final de todos los residuos, producto de la demolición de la carpeta dañada se haya hecho en bancos de desperdicios aprobados por el organismo a cargo.

FUENTE: NORMA SCT
N-CSV-CAR-2-02-003/00
CSV. Conservación.

2) **BACHEO PROFUNDO AISLADO** ⁽³⁾

Es el conjunto de actividades que se realizan para reponer una porción de la *carpeta asfáltica* que presenta daños como oquedades por desprendimiento o desintegración inicial de los agregados, en zonas localizadas y relativamente pequeñas, cuando la base del pavimento se encuentra en condiciones estables y sin exceso de agua. Se considera *bacheo profundo aislado* cuando las áreas afectadas tengan una extensión menor de 100 m^2 , por cada 7000 m^2 de pavimento.

a) **Equipo**

El equipo que se utilice para el *bacheo profundo*, será el adecuado para obtener la calidad especificada por el organismo a cargo, en cantidad suficiente para producir el volumen aprobado por la misma y conforme al programa de utilización de maquinaria:

- *Equipo de corte*. Con la capacidad, la potencia y el tamaño adecuado para ejecutar los cortes en todo el espesor de la *carpeta asfáltica*.
- *Esparcidora de asfalto*. La necesaria para aplicar previamente un *riego de liga* a las superficies verticales.
- *Compactadores de rodillo*. Serán manuales, autopropulsados, reversibles, con uno o dos rodillos metálicos provistos de petos limpiadores para evitar que el material se adhiera a ellos.

- *Compactadores de placa*. Que cuenten con dispositivos para el control de la vibración y con una placa metálica de las dimensiones adecuadas para compactar zonas donde no sea posible la utilización de compactadores con rodillo.

b) Transporte y almacenamiento

El *transporte y almacenamiento* de todos los materiales son responsabilidad exclusiva del contratista de obra y los realizará de tal forma que no sufran alteraciones que ocasionen deficiencias en la calidad de la obra.

Los residuos producto de la remoción de la carpeta dañada se cargarán y transportarán al banco de desperdicios que apruebe el organismo a cargo, en vehículos con cajas cerradas y protegidos con lonas, que impidan la contaminación del entorno o que se derramen.

c) Preparación de los materiales para la base

Cuando sea necesario mezclar los materiales con cemento o cal, para lograr un material con calidad de base para la reposición de los materiales subyacentes a la *carpeta asfáltica*, su mezclado se efectuará mediante uno de los siguientes métodos:

1) Mezclado en planta

Los materiales se mezclarán incorporando la cantidad de agua necesaria para la compactación, en una planta de mezclado central del tipo amasado o *pugmill*, de tambor rotatorio o bien de mezclado continuo tomando en cuenta lo siguiente:

- En las plantas de tipo *pugmill* o de *tambor rotatorio*, la dosificación de materiales se hace por masa.
- En mezcladoras de tipo continuo, la dosificación de materiales se hace por masa o por volumen. En ambos casos la mezcla debe cumplir con las mismas características de calidad aprobadas por el organismo.
- El material mezclado en planta se transportará al sitio de su utilización, procurando mantener el contenido de agua apropiado, para que pueda ser colocado y compactado.

2) Mezclado en el lugar

Si la mezcla de los materiales con cemento o cal se hace en el lugar de su utilización, se mezclarán en seco con objeto de obtener un material homogéneo.

d) Proporcionamiento de la mezcla asfáltica

Los materiales pétreos, asfálticos y, en su caso, aditivos que se empleen en el *bacheo profundo*, se mezclarán con el proporcionamiento necesario para producir una mezcla homogénea, con las características aprobadas por el organismo. La reposición de la carpeta puede hacerse con mezcla asfáltica en caliente o bien, con mezcla o mortero asfáltico en frío.

e) Condiciones climáticas

Los trabajos serán suspendidos en el momento en que se presenten situaciones climáticas adversas y no se reanudarán mientras estas no sean las adecuadas, considerando que no se ejecutarán trabajos de *bacheo profundo aislado* en las siguientes condiciones:

- Sobre superficies con agua libre o encharcada.
- Cuando exista amenaza de lluvia o esté lloviendo.

- Cuando la temperatura de la superficie sobre la cual será colocada la mezcla esté por debajo de los 15°C, si se utiliza mezcla asfáltica en caliente, o bien, cuando esté por debajo de los 4°C en el caso de mortero o mezcla asfáltica en frío.
- Cuando la temperatura ambiente esté por debajo de los 15°C, si se utiliza mezcla asfáltica en caliente, o bien, cuando esté por debajo de los 4°C en el caso de mortero o mezcla asfáltica en frío. La temperatura ambiente será tomada a la sombra lejos de cualquier fuente de calor artificial.

f) Trabajos previos

- Previo al inicio de los trabajos, se realizará un levantamiento mediante inspección visual, de los daños en la carpeta que serán reparados mediante *bacheo profundo*.
- Sobre la superficie de la *carpeta asfáltica*, se delimitarán con pintura las áreas por reparar identificadas en el levantamiento de daños previamente aprobado por el organismo a cargo. Las demarcaciones serán de forma rectangular con dos de sus lados perpendiculares al eje de la carretera, donde el *bache* quedará inscrito, con un margen de 50 cm. desde el límite de la demarcación hasta las partes afectadas.
- Una vez delimitado el *bache*, se efectuará el corte perimetral de las áreas marcadas en la carpeta, con una máquina cortadora de disco, para lograr que las paredes de la excavación sean verticales y evitar daños a la carpeta fuera del área afectada.
- Después del corte, desde la carpeta hasta una profundidad de 10 cm. por debajo de la última capa por reponer, el pavimento dañado se retirará desde el interior hacia el perímetro del área afectada, empleando para ello herramienta adecuada, martillos neumáticos, escarificadores u otro procedimiento que no dañe el pavimento fuera de dicha área. La excavación debe quedar con el fondo nivelado libre de residuos de la carpeta demolida, partículas sueltas, polvo o de cualquier otra materia extraña, si es necesario empleando para su limpieza aire a presión. Los residuos podrán cargarse directamente al camión o acumularse en almacenamientos temporales que apruebe el organismo, de tal forma que no vuelvan a depositarse sobre la superficie del pavimento, o que impidan el drenaje superficial u obstruyan las obras de drenaje.
- Durante la excavación, al descubrir las capas subyacentes a la carpeta, se procurará no alterar sus condiciones, empleando, si es necesario, herramienta manual hasta llegar al nivel de excavación previsto en los últimos 20 cm. para que las paredes de la excavación permanezcan verticales, se aplicará en ellas, si es necesario, un mortero hidráulico en proporción 1:3.
- Si así lo indica el organismo a cargo, el fondo de la excavación se recompactará empleando equipo vibratorio adecuado, hasta alcanzar un grado de compactación mínimo del 100 % respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida en la prueba *AASHTO estándar*, dentro de las tolerancias que establezca el organismo.
- Los materiales para la reposición de las capas subyacentes a la *carpeta asfáltica*, se colocarán con el contenido óptimo de compactación, en capas con espesor no mayor que aquel que el equipo sea capaz de compactar.

g) Tendido de la mezcla

- Inmediatamente antes de iniciar el *bacheo profundo aislado*, la superficie por reparar deberá estar debidamente preparada, exenta de materias extrañas, polvo, grasa o encharcamientos de material asfáltico.
- Sobre la superficie de la *base* compactada y en las paredes de la excavación se aplicará un riego asfáltico ligero y uniforme con una emulsión de rompimiento rápido,

a razón de 1.2 lt/m^2 , a menos que el organismo a cargo apruebe otro material asfáltico u otra dosificación.

- Cuando se utilice mezcla asfáltica en caliente, ésta se tenderá con una temperatura mínima de 110°C . Si inmediatamente antes de ser tendida, su temperatura es de 5°C o más, por debajo de la temperatura mínima de tendido, esa mezcla será rechazada y no será objeto de medición.
- La mezcla se extenderá de las orillas del área dañada hacia el centro para evitar la segregación, en cantidad suficiente y utilizando un dispositivo enrasador adecuado para que, una vez compactada, la superficie terminada, quede uniforme y al mismo nivel que el resto de la carpeta. No se permitirá el tendido de la mezcla si existe segregación y ésta no será objeto de medición.
- De ser necesario, la mezcla se extenderá en capas sucesivas, con un espesor no mayor que aquel que el equipo sea capaz de compactar. Cuando el tendido se haga por capas y se utilice mezcla asfáltica en caliente, la capa sucesiva no debe tenderse hasta que la temperatura de la capa anterior sea menor de 70°C en su punto medio.

h) Compactación

- En el caso de material de *base*, la capa se compactará hasta alcanzar un grado de compactación mínimo del 100% respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida en la prueba *AASHTO estándar*, excepto los últimos 30 cm. , en los que se compactará como mínimo al 100% respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida en la prueba *AASHTO modificada*, en ambos casos dentro de las tolerancias que establezca el organismo a cargo.
- La compactación de los materiales de *base*, se hará de preferencia con compactadores de placa o de rodillos lisos vibratorios.
- Si se utiliza mezcla asfáltica en caliente, la compactación se iniciará cuando su temperatura sea de 100°C como mínimo, y se terminará a una temperatura mínima de 85°C . En todos los casos la compactación de la mezcla asfáltica se hará hasta alcanzar un 95% de la masa volumétrica máxima, obtenida en la prueba *Marshall* dentro de las tolerancias que establezca el organismo.
- La compactación de la capa de *base* y la mezcla asfáltica se hará longitudinalmente, de las orillas hacia el centro, efectuando un traslape de cuando menos la mitad del ancho del compactador en cada pasada.

i) Conservación de los trabajos

- La superficie del *bache* tratado debe quedar limpio, presentar una textura y acabado uniforme, con el mismo nivel que el resto de la carpeta.
- Durante el proceso de *bacheo*, el supervisor de obra tomará las precauciones necesarias para evitar la contaminación de suelos, aguas superficiales o subterráneas y la flora.
- Que la diferencia de nivel entre el área bacheada y los bordes de la carpeta que la limitan, determinada mediante la colocación de una regla rígida de longitud suficiente para cubrir la superficie reparada en cualquier dirección, sea como máximo de $\pm 0.5 \text{ cm.}$, colocada la regla en cualquier dirección.
- Para verificar los volúmenes colocados, previo a la reposición del material de la capa de *base* y al tendido de la mezcla asfáltica, se cubique el volumen en la excavación, aplicando seccionamiento y el método de promedio de áreas extremas.
- Que la textura en la superficie del área reparada sea uniforme y similar a la del resto de la carpeta.

- Una vez terminado el *bacheo profundo aislado*, la superficie del pavimento debe estar limpia; que la disposición final de todos los residuos, producto de la demolición de la carpeta dañada se haya hecho en bancos de desperdicios aprobados por el organismo a cargo.

FUENTE: NORMA SCT
N-CSV-CAR-2-02-004/00
CSV. Conservación.

3.5 RENIVELACIÓN DE LA CARPETA

Es el conjunto de actividades que se realizan sobre la superficie de rodamiento de un pavimento asfáltico para corregir deformaciones permanentes, tales como roderas, depresiones y corrugaciones, entre otras, con el propósito de restablecer las características geométricas de drenaje superficial, de seguridad y de comodidad de la carretera.

Para llevar a cabo una *renivelación* y con el fin de tomar una solución adecuada y que garantice que la deformación no se volverá a presentar en un lapso previsible, se hará un estudio previo con el auxilio de un laboratorio para conocer a fondo la causa del deterioro. En los lugares donde existían asentamientos antes de la reconstrucción se harán los trabajos de *renivelación* necesarios, con el fin de lograr uniformidad en la superficie de rodamiento de las nuevas carpetas, como a continuación se indica:

- 1) En caso de deformaciones pequeñas de 1 a 3 cm., estas podrán corregirse empleando el sistema de *riego simple*.
- 2) Si las deformaciones son superiores a 3 cm. se deberá emplear mezcla asfáltica en la siguiente forma:
 - a) Se limpiará perfectamente la zona por renivelar de toda materia extraña.
 - b) Se definirá y se marcará el área por renivelar siguiendo el perímetro de la zona fallada. Inmediatamente se procederá a abrir una caja perimetral de 5 cm. de ancho para evitar espesores pequeños en la orilla de la renivelación así como evitar que la mezcla se corra.
 - c) Cuando la superficie esté constituida por una capa de *base* impregnada o carpeta de un riego, se picará la zona por renivelar con un espaciado en cada golpe de zapapico de 30 cm., barriendo el material excedente, se dará un *riego de liga*, con un producto asfáltico cubriendo en su totalidad el área por reparar sin exceso de asfalto, dándose el tiempo necesario de fraguado para evitar solvente atrapado y el deslizamiento de la mezcla.
 - d) En la mezcla asfáltica variará el tamaño máximo del material pétreo, de acuerdo con el espesor de la capa por construir, en forma tal, que nunca exceda el 40% de ella. Cuando el asentamiento sea mayor de 7 cm. se rellenará en dos o más capas pudiendo ser la superficial hasta de 6 cm. de espesor suelto y las inferiores hasta de 10 cm.; estas capas se compactarán con rodillo o aplanadora de las orillas hacia el centro, el pisón de mano sólo se usará en renivelaciones poco profundas cuya superficie no sea mayor de 4 m², no permitiéndose el tránsito hasta lograr la compactación óptima, concluyéndose el trabajo con el sello en un lapso no mayor de un mes.

3.6 REFUERZO MEDIANTE SOBRECARPETAS

En muchos países se presenta con frecuencia la necesidad de analizar el estado de un pavimento construido anteriormente a fin de decidir sobre la necesidad de repararlo y sobre el monto de la reparación. Las rehabilitaciones por incremento normal del tránsito suelen resolverse con el

empleo de *sobrecarpetas*, en tanto que las reconstrucciones serán necesarias en pavimentos que muestren indicios de falla, consistentes en la aparición de deformaciones excesivas o en niveles muy elevados de deflexión. Las siguientes normas de criterio definen la necesidad de darle un *refuerzo al pavimento flexible* existente:

a) Nivel de servicio

Éste concepto variará según el tipo de la vía terrestre.

b) Condición estructural

Éste concepto se refiere a la capacidad del pavimento para soportar las cargas del tránsito en la actualidad y seguirlo haciendo en el futuro próximo.

c) Condiciones de la superficie

La apariencia del pavimento (deformaciones, grietas, etc.), no necesariamente está ligada a la capacidad estructural y desde luego no lo está por una relación única y sencilla, si bien es cierto que una falta de capacidad estructural se reflejará rápidamente en la apariencia del pavimento. Muchos defectos en las condiciones superficiales pueden corregirse fácilmente con métodos que no producen ninguna mejoría real en las condiciones estructurales.

d) Seguridad

El concepto se evalúa generalmente con base en estadísticas de accidentes.

e) Costo

Se refiere no sólo a la erogación necesaria para pagar la rehabilitación, sino también a los costos de conservación y de operación a que se llegue. El índice de servicio se estima frecuentemente con base en la opinión de un grupo de usuarios, quienes recorren el camino en condiciones normales y lo califican de algún modo. Adicionalmente al concepto de nivel de servicio es importante considerar las condiciones de la superficie de rodamiento en lo que se refiere a agrietamientos, deformaciones permanentes y cualquier otro deterioro cuya presencia, como se mencionó anteriormente, no siempre debe atribuirse a insuficiencia estructural. Es muy importante que ante todo programa para la ejecución de un estudio con fines de *reconstrucción o refuerzo* a un pavimento se incluya un levantamiento de los deterioros que presente la superficie de rodamiento y su posible relación con las condiciones de drenaje y subdrenaje, topografía de la zona y cualquier otra que se considere con alguna influencia en el comportamiento general exhibido por el pavimento.

La evaluación final de la capacidad estructural deberá tener en consideración los resultados obtenidos con el uso de los dos criterios, *deflexión y resistencia*, lo cual es particularmente importante si se toman en cuenta las correlaciones existentes entre las medidas de deflexión, los espesores y la calidad de los pavimentos, así como el tránsito que circula por ellos. El método de las deflexiones maneja el valor total de ellas en cada punto, pero no su distribución en profundidad, que es la característica realmente importante y en esto radica, quizá, su mayor limitación. Por lo que se refiere al equipo a utilizar para la medición de las deflexiones, la selección ha de estar basada en su disponibilidad, costo y necesidades de avance, también en la rapidez y eficiencia para la determinación de las lecturas de deflexión.

Una vez que han sido analizados y evaluados todos los conceptos anteriores (nivel de servicio, condiciones superficiales del pavimento y capacidad estructural), que pueden ser considerados

como las “constantes” del problema, debe pasarse a la siguiente etapa en donde entran en juego todos aquellos conceptos en los que se encuentran el incremento del volumen e intensidad de las cargas del tránsito que circulará por el pavimento, el costo de los trabajos de rehabilitación y su relación con la disponibilidad de fondos para su ejecución, la vida útil que deba considerarse a la rehabilitación y el costo de su mantenimiento; una vez determinado que el *refuerzo* es la medida de rehabilitación más adecuada, se requiere cuantificar la magnitud de dicho refuerzo, establecer las normas y especificaciones a que deberá sujetarse su construcción y señalar la necesidad, si existe, de obras de drenaje y/o subdrenaje y de todas aquellas que aseguren al máximo el comportamiento satisfactorio del pavimento.

Por lo que se refiere a la capacidad estructural del *pavimento flexible*, ésta característica se ha relacionado, para fines de evaluación, con la medición de la deflexión del pavimento cuya capacidad estructural se desea evaluar. Las deflexiones de un *pavimento flexible* bajo una carga vibratoria, pueden ser determinadas con equipos tales como el *Deflectómetro* del tipo *Dynalect*; cuando la carga que se aplica al pavimento es dinámica se utiliza el *Deflectómetro de impacto FWD*. (ver capítulo 2).

EL DYNAFLECT

El *Dynalect* es un sistema electromecánico que mide la deflexión dinámica de la superficie del pavimento cuando se le aplica una carga oscilatoria (senoidal). El aparato medidor viaja en un remolque arrastrado por un vehículo en el que se disponen los controles de la medición (Fig. 3.6). El medidor trabaja a base de un generador de fuerzas dinámicas ejercidas sobre el pavimento (vibraciones), cuyos efectos recogen en un sistema de sismógrafos alineados (geòfonos). Una ventaja del aparato es no requerir ningún punto de referencia fijo en la superficie en que se realizan las mediciones y otra es la operación automática, libre de errores de operación y susceptible de ser realizada a una velocidad relativamente alta del remolque.



FIGURA 3.6. Equipo para medir deflexiones bajo carga dinámica estable (Dynalect).

EL DYNATEST

Con objeto de obtener una mejor simulación del efecto de las cargas aplicadas al pavimento, surgió la tercera generación de dispositivos para la medición de deflexiones, conocidos como los *deflectómetros de impacto FWD* (*Falling Weight Deflectometer*), mediante los cuales es posible aplicar a través de un impacto el efecto transitorio de una carga dinámica.

El *Deflectómetro de impacto DYNATEST HWD - 8081* es el más potente de los existentes, siendo capaz de transmitir al pavimento una carga equivalente de 24 toneladas al máximo de sus posibilidades. El vehículo está compuesto por un coche de arrastre y un remolque. El operador,

situado en el coche de arrastre, coloca el remolque con sus geófonos en el punto de medida, para lo que se ayuda de un *odómetro* (aparato para medir la distancia recorrida). El vehículo de arrastre está provisto de una serie de masas que se levantan y se dejan caer sobre una placa de carga que simula la huella del neumático. (ver Fig. 3.7).

Sobre una barra recta, se sitúan, a distancia variable, en función del espesor y tipo del pavimento a auscultar, siete geófonos que permiten medir la deflexión que se produce en siete puntos diferentes por cada ensayo. Uno de los geófonos se sitúa en la placa de carga y permite medir la deflexión máxima. El operador puede variar el número de masas y la altura a la que levanta dichas masas con objeto de producir golpes con cargas variables. Estos golpes son programables desde la cabina del vehículo.

La obtención de siete deflexiones por punto permite, mediante programas de cálculo inverso y conociendo las capas del pavimento y su espesor, calcular los módulos de elasticidad de las diversas capas. Con dicha estructura del pavimento y conociendo los módulos de elasticidad, es sencillo calcular el refuerzo de una mezcla asfáltica necesaria. (ver Fig. 3.8).

El vehículo debe estar detenido para realizar la auscultación, por lo que la velocidad media de toma de datos, varía en función del número de puntos que se requieran auscultar por kilómetro. Aunque la densidad de datos sea menor que en el caso del *Deflectógrafo Lacroix 03*, la cantidad de datos obtenidos por punto le hacen imprescindible para los casos de estudios detallados de refuerzo. El efecto del impulso se registra en un lapso de 25 a 30 milisegundos, equivalente al efecto de una carga móvil real sobre el pavimento.

El análisis de la cuenca de deflexiones permite obtener varios parámetros que se correlacionan con la condición estructural de los pavimentos, aplicada a las técnicas de evaluación. Entre estos parámetros se encuentran los siguientes, obtenidos con el equipo *FWD*:⁽⁴⁾

Máxima deflexión:	D_0
Área normalizada (mm.):	$\text{Área} = 150 (1 + 2D_1/D_0 + 2D_2/D_0 + D_3/D_0)$
Factores de forma:	$F_1 = (D_0 - D_2)/D_1; F_2 = (D_1 - D_3)/D_1$
Índice de curvatura superficial:	$\text{SCI} = D_0 - D_r$
Relación de deflexión:	$Q_r = D_r / D_0$

Donde:

D_0 = Deflexión bajo la carga.

D_1, D_2, D_3 = Deflexiones a 305, 610 y 914 mm. de distancia de la carga aplicada.

D_r = Deflexión a 305 ò 500 mm.

La deflexión bajo el punto de impacto representa la máxima deflexión del pavimento.

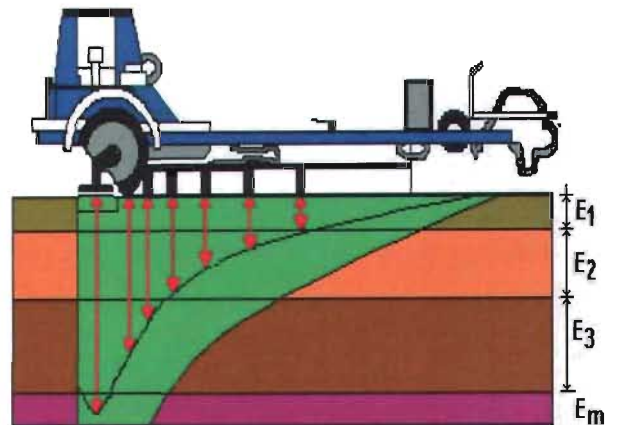
Por lo que respecta al área normalizada (ÁREA), ésta representa la mitad de una sección de la cuenca de deflexiones, entre el eje que pasa de éste punto. Una área normalizada, significa que el área geométrica de la sección de la cuenca descrita, se divide entre la máxima deflexión, D_0 , correspondiente al punto de impacto. Su valor máximo es de 915 mm. y ocurre cuando las cuatro deflexiones (D_0 a D_3) son iguales. El valor mínimo es de 280 mm. y corresponderá a un caso en que no exista pavimento o es semejante su módulo elástico al de la *capa subrasante*.⁽⁴⁾

El análisis de la deflexión máxima y del área normalizada puede dar una idea de la resistencia de la estructura del pavimento y de la *capa subrasante* como puede verse en la tabla siguiente:

Área	Deflexión, D_0	Conclusión
Baja	Baja	Estructura débil, capa subrasante resistente.
Baja	Alta	Estructura débil, capa subrasante débil.
Alta	Baja	Estructura y capa subrasante resistentes.
Alta	Alta	Estructura resistente, capa subrasante débil.

TABLA 3. Análisis de la deflexión máxima y del área normalizada. ⁽⁴⁾

Las diferencias de pendiente o deflexión en la cercanía al punto de impacto de la carga, como el factor de forma y el índice de curvatura superficial, tienden a reflejar la rigidez relativa de las capas superiores de la estructura del pavimento; en la parte media de la cuenca (entre 300 y 900 mm.), reflejan la rigidez relativa de la base o de las capas inferiores del pavimento, y las deflexiones hacia el final de la cuenca se relacionan con la rigidez de la *capa subrasante*.

FIGURA 3.7 y 3.8. Equipo para medir las deflexiones bajo carga de impacto, y la aplicación de carga del equipo HWD-8081 al pavimento y la medición de los módulos elásticos mediante sensores. ⁽⁴⁾

Donde:

E_1 = Módulo elástico de la carpeta asfáltica.

E_2 = Módulo elástico de la capa de base.

E_3 = Módulo elástico de la capa sub-base.

E_m = Módulo elástico de la capa subrasante.

En donde $E_1 > E_2 > E_3 > E_m$.

La metodología Dynatest:

La *metodología Dynatest* es la filosofía técnica en la que se basan todos los productos y servicios desarrollados, provistos y apoyados por *Dynatest*. Ésta filosofía está relacionada en un conjunto de principios y estrategias ingenieriles que son el resultado del continuo esfuerzo que *Dynatest* ha hecho para entender, cuantificar y sintetizar las complejas relaciones que existen entre el comportamiento del pavimento y la calidad de los materiales, las cargas debido al tránsito y las influencias ambientales.

Simplemente dicho, es la convicción de que estas relaciones deben de ser reconocidas y usadas en un grado máximo en la práctica de la ingeniería de pavimentos. Éste punto de vista "analítico" o "mecánico" pone un énfasis en las características estructurales y las condiciones funcionales de los pavimentos para predecir el comportamiento futuro. La carga del tránsito se considera la causa primaria, pero no la única causa contribuyente al deterioro estructural de los pavimentos.

La *metodología Dynatest* no es solamente elegante, sino también un sistema práctico para la ingeniería de pavimentos. Éste sistema integra los beneficios de sofisticados equipos de ensayos de pavimentos con el conocimiento especializado y la experiencia de Ingenieros Civiles.

El objetivo:

El objetivo del equipo *Dynatest* es el de desarrollar y de hacer disponible un rango completo de equipos no destructivos y destructivos para el ensayo de pavimentos, como así también programas de computadora y servicios para la industria del pavimento con el fin de facilitar la conservación, el diseño y la administración de las redes de *pavimentos asfálticos*.

La meta final es el reconocimiento y la aceptación de la *metodología Dynatest* como un estándar en la industria, y continuar enfocando en los logros científicos y tecnológicos en un ambiente seguro y comercialmente factible. El compromiso que tiene *Dynatest* de proveer calidad, apoyo y la integración de productos continuará siendo una parte esencial en la estrategia del consorcio.

El concepto empresarial:

El principal mercado de *Dynatest* consiste en administradores de caminos públicos y privados o de aeropuertos, consultores e ingenieros, quienes son responsables del mantenimiento, rehabilitación y construcción de *pavimentos asfálticos*.

Éste mercado hoy día necesita una asistencia importante en el desarrollo de técnicas y procesos para poder administrar mejor la gran inversión que se ha hecho en los pavimentos que componen la infraestructura de caminos y aeropuertos.

Con un presupuesto ilimitado, el mantenimiento de las redes de pavimentos a un nivel de condición uniformemente excelente no sería un problema, pero dado las restricciones fiscales usualmente impuestas al sector público, es de importancia suprema que la infraestructura de los pavimentos asfálticos sea científicamente mantenida y mejorada de la manera más eficiente y beneficiosa posible.

3.7 RECONSTRUCCIÓN DE CARPETAS

En muchas ocasiones los deterioros del pavimento pueden abarcar una área bastante grande y resultan antieconómicos los métodos de conservación normal, en estos casos es necesario aplicar los procedimientos de *reconstrucción*.

Al estudiarse la *reconstrucción* de una superficie asfáltica económica debe prestarse considerable atención a la obtención del máximo aprovechamiento de los materiales existentes. Cuando sea necesario un refuerzo apreciable del espesor de la capa de *base*, el procedimiento más económico será sacrificar la superficie asfáltica e incorporarla a los materiales de la *capa de base* existentes. De éste modo resulta posible aprovechar el 100% de la capa de *base* flexible, pero, al convertir la superficie escarificada en agregados para la capa de *base*, se pierde el 75%, aproximadamente, del valor original de dicha superficie.

Los beneficios principales que ofrecen las nuevas técnicas son las reducciones de costos, los ahorros de energía y la conservación de los recursos naturales. Otros beneficios que pueden ser aplicables a algunos proyectos son el control vertical con relación a las alturas libres de

estructuras superiores, esto es, control de la rasante del camino, reducción del daño al pavimento en conexión con el acarreo del nuevo material al sitio de la obra y rectificación de las deficiencias en las mezclas existentes.

Dentro de los procedimientos constructivos que en éste escrito se han definido, debido a que su utilización en nuestro país tiene relativamente poco tiempo, se encuentran las siguientes:

- 1) Revitalización o rejuvenecimiento del pavimento asfáltico.
- 2) Fresar la carpeta actual y reutilizar el material para una nueva carpeta.

La selección de uno u otro método, como procedimiento de *reconstrucción*, debe hacerse tan sólo se estime como la mejor solución técnica económica. A continuación se describen cada uno de estos métodos.

1) **Revitalización o rejuvenecimiento del pavimento asfáltico**

El dar una nueva vida o rejuvenecer a los *pavimentos asfálticos* mediante algunos agentes químicos es un método que día a día se va imponiendo en razón de lo práctico que resulta su aplicación, así como su relativo bajo costo. Entre los agentes más comunes se encuentra el que se ha designado como “Reclamite”, que es una emulsión especial de resinas y aceites de petróleo (químicamente una emulsión catiónica de maltenos). Éste producto penetra en las mezclas asfálticas viejas transformándose en parte del ligante, *revitalizándolas*. Se puede decir que las funciones del agente rejuvenecedor, en combinación con el procedimiento de escarificación en caliente, son:

- Mejorar la cohesión de la mezcla y la adherencia del asfalto con el agregado.
- Devolver su elasticidad al asfalto envejecido y endurecido.
- Restaurar los componentes perdidos en el asfalto.

Estos efectos ocurren entre los 20 o 25 mm. superiores de la *carpeta asfáltica*, ya que es la parte que más se oxida y envejece.

PROCEDIMIENTO

Son varios los procedimientos empleados para la aplicación de agentes *rejuvenecedores* y van desde un simple “rociado” en mezclas en caliente recién tendidas, hasta su empleo como parte del procedimiento de sobre encarpetao.

La secuencia constructiva del método más comúnmente empleado es la que se indica a continuación:

- a) Es esencial que se desarrolle una buena dosificación del agente rejuvenecedor que deberá emplearse en la carpeta existente; para lograr esto, un número adecuado de muestras del pavimento, deben ser obtenidas y efectuarles las pruebas en el sitio donde se desee aplicar éste método.
- b) Efectuar la limpieza del pavimento a reparar, en el cual previamente se deberán realizar los trabajos de mantenimiento normal correspondientes.
- c) Se procede al calentamiento de la superficie del pavimento. Para ello, se aplica sobre ésta, una especie de horno, una de cuyas paredes es la superficie de rodamiento (la carpeta).

El calor se aplica mediante quemadores de gas, aunque pueden hacerse mediante la aplicación de rayos infrarrojos; las llamas no se debe aplicar directamente sobre la mezcla asfáltica; la temperatura que debe alcanzar la mezcla asfáltica debe estar comprendida entre 110°C y 125°C en 25 mm. de espesor. La velocidad del equipo de calentamiento está

en función de la dureza y contenido de asfalto en la mezcla, así como de la temperatura del medio ambiente.

- d) Ésta etapa consiste en el escarificado de la superficie calentada. La escarificación se efectúa mediante líneas de pernos montados en el mismo equipo de calentamiento con el objeto de aprovechar su peso. Estos pernos o uñas se encuentran en forma traslapada para lograr un escarificado efectivo y su montaje permite que al encontrar dichos dispositivos, un objeto duro, produzca una especie de muelleo o resorteo que permite que se salve el obstáculo. Todo el sistema de escarificado está controlado por gatos hidráulicos. La profundidad de escarificado está en función de la temperatura de la mezcla asfáltica, su dureza, así como de la configuración de las uñas y la presión aplicada sobre estas. Se debe tratar de no escarificar más allá de lo que el gradiente de temperatura lo permita para no destrozarse las capas inferiores, en cuyo caso podría requerirse una reparación costosa.
- e) La siguiente etapa consiste en restituir en el pavimento escarificado, la geometría original mediante gusanos distribuidores o algún otro equipo que realice ésta operación.
- f) Inmediatamente después se aplica una ligera compactación con un *rodillo tandem de acero*. Ésta operación puede juzgarse como no necesaria si el proyecto así lo desea.
- g) Una vez realizado lo anterior, se aplica el riego del agente rejuvenecedor, en la proporción adecuada, empleando para ellos una petrolizadora tradicional. Durante el período de absorción y si la superficie ha sido compactada, es recomendable “rociar” arena muy dura y angulosa, la cual proporciona una fricción aceptable y no interfiere con el proceso de absorción, sin embargo, no debe permitirse el tránsito antes de que transcurran 30 minutos a partir de la aplicación del agente.

2) Fresar la carpeta actual y reutilizar el material para una nueva carpeta

Éste procedimiento es el de fresar la carpeta y transportar el material por medio de camiones a una planta de concreto asfáltico donde se le mezcla con concreto asfáltico nuevo, renovándole sus propiedades, luego se transporta a la obra y se construye la nueva carpeta con concreto asfáltico reciclado. En éste procedimiento es necesario aplicar fresados dobles, si esto es posible económicamente hablando, uno para eliminar los riegos simples y otro para levantar la carpeta, no sin antes haber verificado que es de concreto asfáltico.

Según la experiencia, el porcentaje máximo a usar en los reciclados, es de 60 % de material viejo y 40 % de material nuevo, para garantizar una buena calidad de concreto asfáltico reciclado. El inconveniente de éste método, es que no se puede asegurar que el material de la carpeta que se vaya a fresar sea homogéneo y por lo tanto la calidad del concreto asfáltico obtenido del reciclado tampoco será homogéneo.

Los dos procedimientos anteriores son costosos y para su aplicación se analizará primero el aspecto económico y la disponibilidad de materiales de buena calidad, tanto pétreos como asfálticos en el lugar. Las propiedades que debe tener una carpeta al igual que una sobrecarpeta, son las siguientes:

- No deberá desplazarse ni desintegrarse por la acción del tránsito.
- Tendrá resistencia al intemperismo.
- Soportará pequeñas deformaciones, sin sufrir agrietamientos.

Algo que se debe cuidar al *reconstruir* una carpeta, es que el desnivel entre la superficie de rodamiento y la del acotamiento no debe ser mayor de 5 cm. y por otro lado no es conveniente construir carpetas de mezclas en el lugar o en planta de menos de 3 cm. de espesor compacto, por que físicamente no se puede realizar, además el nivel de la superficie de rodamiento siempre deberá ser más alto que el de los acotamientos.

3.8 TRATAMIENTO MEDIANTE CAPAS GRUESAS CON CARPETAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA

Son las que se construyen sobre un pavimento existente, mediante el tendido y compactación de una mezcla elaborada generalmente en caliente, de cemento asfáltico, modificado o no y materiales pétreos de granulometría densa, con la finalidad principal de reforzar la estructura del pavimento, además de restablecer o mejorar las características de comodidad y seguridad de la superficie de rodadura. En el caso de mezclas elaboradas en frío, el material asfáltico puede ser rebajado con solventes o en emulsión.

1) Materiales

Los materiales que se utilicen en la construcción de *carpetas de granulometría densa*, cumplirán con lo establecido en las normas *N-CMT-4-04, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, *N-CMT-4-05-001, Calidad de Materiales Asfálticos*, *N-CMT-4-05-002, Calidad de Materiales Asfálticos Modificados* y *N-CMT-4-05-003, Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*.⁽³⁾

- a) Si el contratista de obra propone la utilización de aditivos, lo hará mediante un estudio técnico que los justifique, sometiéndolo a la consideración del organismo a cargo para su análisis y aprobación.
- b) Si en la ejecución del trabajo y a juicio del organismo, los materiales presentan deficiencias respecto a las características, se suspenderá inmediatamente el trabajo en tanto que el contratista de obra los corrija o los remplace por otros adecuados.

REQUISITOS DE CALIDAD DE MATERIALES PÉTREOS PARA CARPETAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA ⁽³⁾

El material pétreo que se utilice en la elaboración de *carpetas asfálticas de granulometría densa*, con mezcla en caliente o en frío, en función de su tamaño nominal y del tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento (ΣL), cumplirá con lo que se indica a continuación:

- a) Cuando el tránsito esperado (ΣL) sea igual a 1 millón de ejes equivalentes o menor, el material pétreo, según su tamaño nominal, cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la tabla 4 o bien las señaladas en la tabla 6, así como los requisitos de calidad que se indican en la tabla 5.
- b) Si el tránsito esperado (ΣL) es mayor de 1 millón de ejes equivalentes, el material pétreo cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la tabla 6 y con los requisitos de calidad que se indican en la tabla 7.

3. CONSERVACIÓN Y MEJORAMIENTO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

TABLA 4. Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L \leq 10^6$).

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (pulg.)				
Abertura (mm)	Designación	12.5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37.5 (1 1/2)	50 (2)
Porcentaje que pasa						
50	2"					100
37.5	1 1/2"				100	90-100
25	1"			100	90-100	76-90
19	3/4"		100	90-100	79-92	66-83
12.5	1/2"	100	90-100	76-89	64-81	53-74
9.5	3/8"	90-100	79-92	67-82	56-75	47-68
6.3	1/4"	76-89	66-81	56-71	47-65	39-59
4.75	Nº4	68-82	59-74	50-64	42-58	35-53
2	Nº10	48-64	41-55	36-46	30-42	26-38
0.85	Nº20	33-49	28-42	25-35	21-31	19-28
0.425	Nº40	23-37	20-32	18-27	15-24	13-21
0.25	Nº60	17-29	15-25	13-21	11-19	9-16
0.15	Nº100	12-21	11-18	9-16	8-14	6-12
0.075	Nº200	7-10	6-9	5-8	4-7	3-6

TABLA 5. Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L \leq 10^6$).

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de los Ángeles; %, máximo	35
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	40
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

TABLA 6. Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL).

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (pulg.)				
Abertura (mm)	Designación	12.5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37.5 (1 1/2)	50 (2)
Porcentaje que pasa						
50	2"					100
37.5	1 1/2"				100	90-100
25	1"			100	90-100	74-90
19	3/4"		100	90-100	79-90	62-79
12.5	1/2"	100	90-100	72-90	58-71	46-60
9.5	3/8"	90-100	76-90	60-76	47-60	39-50
6.3	1/4"	70-81	56-69	44-57	36-46	30-39
4.75	Nº4	56-69	45-59	37-48	30-39	25-34
2	Nº10	28-42	25-35	20-29	17-24	13-21
0.85	Nº20	18-27	15-22	12-19	9-16	6-13
0.425	Nº40	13-20	11-16	8-14	5-11	3-9
0.25	Nº60	10-15	8-13	6-11	4-9	2-7
0.15	Nº100	6-12	5-10	4-8	2-7	1-5
0.075	Nº200	2-7	2-6	2-5	1-4	0-3

TABLA 7. Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L > 10^6$).

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de los Ángeles; %, máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

FUENTE: NORMA SCT
N-CMT-4-04/03
CMT. Características de los materiales.

2) Equipo

El equipo que se utilice para la construcción de *carpetas de granulometría densa*, será el adecuado para obtener la calidad especificada en el proyecto o aprobado por el organismo a cargo.⁽³⁾

a) Planta de mezclado

Deberá contar como mínimo con:

- Tolvas para almacenar el material pétreo, protegidas de la lluvia y el polvo, con capacidad suficiente para asegurar la operación continua de la planta por lo menos durante 15 minutos sin ser alimentadas, y divididas, como mínimo en 3 compartimentos para almacenar los materiales pétreos por tamaños.
- Secador con inclinación ajustable colocado antes de las cribas clasificadoras, con capacidad suficiente para secar una cantidad de material pétreo igual a la capacidad de la planta o mayor, en el caso de mezclas en caliente.
- Pirógrafo a la salida del secador para registrar automáticamente la temperatura del material pétreo, en el caso de mezclas en caliente.
- Cribas para dosificar el material pétreo por lo menos en 3 tamaños, con capacidad suficiente para mantener siempre en las tolvas material pétreo disponible para la mezcla.
- Dispositivos para dosificar los materiales pétreos por masa, y sólo en casos excepcionales, cuando así lo apruebe el organismo, por volumen y que permitan un fácil ajuste de la dosificación de la mezcla en cualquier momento, para poder obtener la granulometría que indique el proyecto.
- Equipo para calentar el cemento asfáltico en forma controlada, que garantice que éste no se contamine y que esté provisto de un termómetro con rango de 20°C a 200°C, en el caso de mezclas en caliente.
- Dispositivos para dosificar el material asfáltico, con una aproximación de $\pm 2\%$ de la cantidad requerida según el proporcionamiento de la mezcla.
- Mezcladora equipada con un dispositivo para el control del tiempo de mezclado.
- Recolector de polvo.
- Dispositivo para agregar finos.

b) Pavimentadoras

Autopropulsadas, capaces de esparcir y precompactar la capa de mezcla que se tienda, con el ancho, sección y espesor establecidos en el proyecto o aprobados por el organismo a cargo, incluyendo los acotamientos y zonas similares. Estarán equipadas con los dispositivos

necesarios para un adecuado tendido de la *carpeta de granulometría densa*, como son: un enrasador, que pueda ajustarse automáticamente en el sentido transversal, ser calentado en caso necesario y proporcionar una textura lisa y uniforme, sin protuberancias o canalizaciones; una tolva receptora de la mezcla asfáltica con capacidad para asegurar un tendido homogéneo, equipada con un sistema de distribución mediante el cual se reparta la mezcla uniformemente frente al enrasador y sensores de control automático de niveles.

Es recomendable contar además, con un equipo especial para verter la mezcla asfáltica a la pavimentadora, evitando que el camión vacíe directamente a las tolvas de la misma, mejorando así la uniformidad superficial de la carpeta.

c) Compactadores

- **Compactadores de rodillos metálicos**

Autopropulsados, reversibles y provistos de petos limpiadores para evitar que el material se adhiera a los rodillos. Pueden ser de 3 rodillos metálicos en 2 ejes, o de 2 a 3 ejes con rodillos tándem, con diámetro mínimo de 1m. en todos los casos.

- **Compactadores neumáticos**

Remolcados o autopropulsados. Tendrán 9 ruedas como mínimo, de igual tamaño, montadas sobre dos ejes unidos a un chasis rígido, equipado con una plataforma o cuerpo que pueda ser lastrado, de forma que la masa total del compactador se distribuya uniformemente en las ruedas, dispuestas de manera que las del eje trasero cubran, en una pasada, el espacio completo entre llantas adyacentes en el eje delantero. Las llantas serán lisas, con tamaño mínimo de 7.50-15 de 4 capas e infladas uniformemente a la presión recomendada por el fabricante, con una tolerancia máxima de 34 kPa (5 lb/in²).⁽³⁾

d) Barredoras mecánicas

Autopropulsadas o remolcadas. Tendrán una escoba rotatoria con el tipo de cerdas adecuadas para el material por remover y la superficie por barrer.

3) Ejecución

a) Proporcionamiento de materiales

- Los materiales pétreos, asfálticos y aditivos que se empleen en la elaboración de las *carpetas de granulometría densa*, se mezclarán con el proporcionamiento necesario para producir una mezcla asfáltica homogénea, con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por el organismo a cargo.
- El proporcionamiento se determinará mediante un diseño de mezclas de granulometría densa, ya sea en caliente o en frío, según corresponda, para obtener las características establecidas en el proyecto o aprobadas por el organismo. Éste diseño será responsabilidad del contratista de obra.⁽³⁾
- Si en la ejecución del trabajo y a juicio del organismo, con las dosificaciones de los distintos tipos de materiales pétreos, asfálticos y aditivos utilizados en la elaboración de la *carpeta de granulometría densa*, no se obtiene una mezcla con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por el organismo, se suspenderá inmediatamente el trabajo en tanto que el contratista de obra las corrija por su cuenta y costo.

b) Condiciones climáticas

Los trabajos serán suspendidos en el momento en que se presenten situaciones climáticas adversas y no se reanudarán mientras éstas no sean las adecuadas, considerando que no se construirá *carpetas de granulometría densa*:

- Sobre superficies con agua libre o encharcada.
- Cuando exista amenaza de lluvia o esté lloviendo.
- Cuando la temperatura de la superficie sobre la cual será colocada la mezcla esté por debajo de los 15°C, si se utiliza mezcla asfáltica en caliente, o bien, cuando esté por debajo de los 4°C en el caso de mortero o mezcla asfáltica en frío.
- Cuando la temperatura ambiente esté por debajo de los 15°C y su tendencia sea a la baja, en el caso de mezclas en caliente. Sin embargo, pueden ser construidas cuando la temperatura ambiente esté por arriba de los 10°C y su tendencia sea a la alza. La temperatura ambiente será tomada a la sombra lejos de cualquier fuente de calor artificial.
- Cuando la temperatura ambiente esté por debajo de los 4°C, en el caso de mezclas asfálticas en frío. La temperatura ambiente será tomada a la sombra lejos de cualquier fuente de calor artificial.

c) Trabajos previos

- Cuando así lo indique el proyecto, previamente a la construcción de la *carpeta de granulometría densa*, se hará un fresado continuo que abarque toda la superficie por cubrir, eliminando los defectos superficiales de la carpeta original y de las nivelaciones locales que en su caso se hayan colocado.
- Inmediatamente antes de la construcción de la *carpeta de granulometría densa*, la superficie de la carpeta sobre la que se colocará deberá estar debidamente preparada, exenta de materias extrañas, polvo, grasa o encharcamiento de material asfáltico y reparados satisfactoriamente los baches que hubieran existido. No se permitirá la construcción sobre tramos que no hayan sido previamente aceptados por el organismo.⁽⁵⁾
- Si así lo indica el proyecto o lo aprueba el organismo a cargo, inmediatamente antes de iniciar el tendido de la *carpeta de granulometría densa*, se aplicará un *riego de liga* en toda la superficie de rodamiento.
- No se permitirá que los camiones que transportan la mezcla asfáltica, hagan maniobras que puedan distorsionar, disgregar u ondular las orillas de una capa recién tendida. En el caso de que por algún motivo ésta situación llegue a suceder, el contratista de obra reparará inmediatamente los daños causados por su cuenta y costo.

d) Elaboración de la mezcla

Durante el proceso de producción no se cambiará de un tipo de mezcla a otro, hasta que la planta haya sido vaciada completamente y los depósitos de alimentación del material pétreo sean cargados con el nuevo material.

e) Tramo de prueba

Sobre la superficie donde se construirá la *carpeta de granulometría densa*, el contratista de obra ejecutará previamente un tramo de prueba con una longitud de 400 m. y del ancho mínimo de un carril, con la finalidad de evaluar el procedimiento y los equipos que se utilizarán.

f) Tendido de la mezcla

Después de elaborada la mezcla asfáltica, se extenderá y se conformará con una pavimentadora autopropulsada, de tal manera que se obtenga una capa de material sin compactar de espesor sensiblemente uniforme. Sin embargo, en áreas irregulares e inaccesibles a la pavimentadora, la mezcla asfáltica puede tenderse y terminarse a mano:

- El tendido se hará en forma continua, utilizando un procedimiento que minimice las paradas y arranques de la pavimentadora.
- Cuando el tendido se haga en dos o más franjas, con un intervalo de más de un día entre franjas, estas se ligarán con cemento asfáltico o con emulsión de rompimiento rápido. Esto se puede evitar si se elimina la junta longitudinal utilizando pavimentadoras en batería.
- La cara expuesta de las juntas transversales se recortará aproximadamente a 45° antes de iniciar el siguiente tendido, ligando las juntas con cemento asfáltico o con emulsión de rompimiento rápido.
- Se tendrá especial cuidado para que el enrasador traslape las juntas de 3 a 5 cm. y que el control del espesor sea ajustado de tal manera que el material quede ligeramente por arriba de la capa previamente tendida, para que al ser compactado, el pavimento quede con los niveles y dentro de las tolerancias establecidos en el proyecto.
- Cada capa de mezcla asfáltica se colocará cubriendo como mínimo el ancho total de un carril.
- Durante el tendido de la mezcla, la tolva de descarga de la pavimentadora permanecerá llena, para evitar la segregación de los materiales. No se permitirá el tendido de la mezcla si existe segregación. Es recomendable utilizar un equipo especial para verter la mezcla asfáltica a la pavimentadora, evitando que el camión vacíe directamente a las tolvas de la misma, mejorando así la uniformidad superficial de la carpeta.
- Al final de cada jornada y con la frecuencia necesaria, se limpiarán perfectamente todas aquellas partes de la pavimentadora que presenten residuos de mezcla.
- Una vez extendida la mezcla, se evitará el tránsito vehicular sobre la superficie tratada, hasta que la mezcla asfáltica haya fraguado suficientemente, para evitar que sea desprendida o se marquen rodaduras. El tiempo de fraguado se determinará en campo, de acuerdo con las condiciones climáticas, el tipo de cemento asfáltico utilizado, las proporciones de los ingredientes y el propio comportamiento de la mezcla.

g) Compactación

- La compactación se hará longitudinalmente a la carretera, de las orillas hacia el centro en las tangentes y del interior al exterior en las curvas, efectuando un traslape de cuando menos la mitad del ancho del compactador en cada pasada.
- El uso de compactadores vibratorios sólo se permitirá para la compactación de capas mayores de 4 cm. de espesor.
- En el caso de mezclas en caliente, la compactación se terminará cuando a la mezcla tenga una temperatura igual a la mínima conveniente para la compactación.
- Por ningún motivo se estacionará el equipo de compactación, por períodos prolongados, sobre la carpeta recién compactada, para evitar que se produzcan deformaciones permanentes en la superficie terminada.

h) Acabado

- La superficie de la carpeta, quedará limpia y presentará una textura y acabado uniforme en todo el ancho de la calzada o la corona, según sea el caso.
- Una vez concluida la compactación de la última capa de la *carpeta de granulometría densa*, en todo el ancho de la calzada o la corona, según sea el caso, se formará un chaflán en las orillas, cuya capa de *base* sea igual a 1.5 veces el espesor de la carpeta, compactándolo con el equipo adecuado. Para ello se utilizará mezcla asfáltica adicional de las mismas características, colocándola inmediatamente después del tendido, o bien directamente con las pavimentadoras si están equipadas para ello.

i) Medidas de mitigación del impacto ambiental

Durante la construcción de la *carpeta de granulometría densa*, el contratista tomará las precauciones necesarias para evitar la contaminación del aire, los suelos, las aguas superficiales o subterráneas y la flora.

4) Criterios de aceptación o rechazo

Para que la *carpeta de granulometría densa* se considere terminada y sea aceptada por el organismo a cargo, con base en el control de calidad que ejecute el contratista de obra, se comprobará:

a) La calidad de la mezcla asfáltica

- Que los materiales pétreos, asfálticos y aditivos utilizados en la mezcla asfáltica, hayan cumplido con las características establecidas en la calidad de los materiales, indicada anteriormente.
- Que las características de la mezcla asfáltica hayan cumplido con lo establecido en el proyecto o aprobado por el organismo a cargo.

b) El índice de perfil

Que el *índice de perfil* de la superficie de la última capa de la *carpeta de granulometría densa* compactada, en cada línea de tendido de cada subtramo de 200 m. de longitud o fracción, haya sido de 31 cm/km como máximo, a menos que el proyecto indique otro valor. Se podrán aceptar índices de perfil de hasta 46 cm/km, en cuyo caso se aplicarán al contratista de obra los factores de sanción por incumplimiento de calidad de acuerdo con la "Determinación del índice de perfil".

En los casos de carriles de aceleración y desaceleración, ampliaciones en paraderos, no se medirá el *índice de perfil*. El contratista de obra, hará la verificación del *índice de perfil* conforme a la norma *ASTM-E 1274*, dentro de 48 horas siguientes a la terminación de la compactación, considerando lo que a continuación se señala y el organismo a cargo evaluará diariamente los resultados que se obtengan.

- **Equipo**

El contratista de obra dispondrá y mantendrá el tiempo que dure la obra, de un perfilógrafo que cumpla con la norma *ASTM-E 1274*. Antes de su utilización, el equipo se calibrará como se indica en esa norma, pudiendo el organismo a cargo, verificar la calibración en cualquier momento y si a su juicio, el perfilógrafo presenta deficiencias o no está bien calibrado, se suspenderá inmediatamente la evaluación en tanto que el contratista de obra lo calibre adecuadamente, corrija las deficiencias o lo remplace.

- **Tramo de prueba**

Para que el tramo de prueba mencionado anteriormente sea aceptado por el organismo a cargo, tendrá un *índice de perfil* de 31 cm/km como máximo.

- **Determinación del índice de perfil**

- La obtención del *índice de perfil*, en cada línea de tendido, se hará a lo largo de la línea imaginaria ubicada a 90 ± 20 cm. de la orilla interior de la línea de tendido por evaluar. Las mediciones serán divididas en secciones consecutivas de 200 m., con el propósito de establecer subtramos en los que se aplique un factor de estímulo por mejoramiento de calidad o de sanción por incumplimiento de calidad, según la calidad obtenida en la superficie terminada.
- Cuando la longitud de una línea de tendido de un subtramo construida en un día de trabajo, no alcance los 200 m., será agrupada con el tramo inmediato que se construya al día siguiente. En éste caso, la medición del *índice de perfil* deberá hacerse dentro de las 48 horas de completado el subtramo. Si el contratista de obra no es el responsable del tendido de un tramo subsecuente, no se medirá el *índice de perfil* en los 5 últimos metros del tendido del subtramo.
- Cuando el *índice de perfil* determinado en una línea de tendido de un subtramo de 200 m. o fracción, esté entre 31.1 a 46 cm/km, el contratista de obra deberá corregir la superficie terminada como se indica más adelante.

- **Índice de perfil promedio diario**

- Cada día de trabajo se determinará el *índice de perfil promedio diario*, obteniendo el promedio aritmético de todos los *índices de perfil* determinados ese día. Si el *índice de perfil promedio diario*, resulta mayor de 46 cm/km, se suspenderá de inmediato la construcción de la *carpeta de granulometría densa*. Para reanudar la construcción de la carpeta, el contratista de obra debe construir otro tramo de prueba como si se tratara del inicio de los trabajos. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por éste motivo se ocasionen, serán imputables al contratista de obra.
- Para determinar el *índice de perfil promedio diario*, se puede utilizar el formato que se muestra en la tabla 8, en el que, para un mismo día de trabajo y cada línea de tendido y subtramo, se anota el *índice de perfil* obtenido. Se calcula el promedio aritmético de todos los *índices de perfil* obtenidos el mismo día y se anota en el último renglón del formato. Si el tramo tiene más de 2 líneas de tendido, al formato se le agregan las columnas que sean necesarias para completar el número de líneas de tendido. Los *índices de perfil* que se obtengan en subtramos que hayan sido corregidos, serán registrados en la columna correspondiente, pues los valores originales deberán conservarse sin alterar.

TABLA 8. Formato para el cálculo del índice de perfil promedio diario.

Fecha de construcción:

Tramo ^[1]		Subtramo ^[2]		I_p cm/km		I_{pc} cm/km		
Del km	Al km	Del km	Al km	Línea de tendido 1	Línea de tendido 2	Fecha de obtención	Línea de tendido 1	Línea de tendido 2
+	+	+						
	+	+						
	+	+						
	+	+						
	+	+						
+	+	+						
	+	+						
	+	+						
	+	+						
	+	+						
+	+	+						
	+	+						
	+	+						
	+	+						
	+	+						

$$\bar{I}_p = \text{ }$$

I_p = Índice de perfil original del subtramo y línea de tendido correspondientes.

I_{pc} = Índice de perfil después de corregido el subtramo y línea de tendido correspondientes.

\bar{I}_p = Índice de perfil promedio diario. Promedio aritmético de todos los I_p obtenidos en un mismo día (cm/km).

[1] = Tramo de 1 km o mayor, pero siempre menor de 2 km.

[2] = Subtramo de 200 m. o fracción.

FUENTE: NORMA SCT
N-CSV-CAR-3-02-005/02
CSV. Conservación.

• **Corrección de la superficie de la carpeta de granulometría densa**

- Después de obtenido el *índice de perfil* de cada línea de tendido en un subtramo de 200 m., todas aquellas áreas en las que el perfil presente una desviación igual a 1 cm. o mayor, en 7.5 m. o menos, medidos en el perfilograma, serán corregidas mediante el *fresado*. Concluida la corrección, se obtendrá nuevamente el *índice de perfil* de la línea de tendido en el subtramo correspondiente para verificar el cumplimiento de lo mencionado anteriormente.
- Una vez realizadas las correcciones individuales de todas las desviaciones a que se refiere el párrafo anterior, cualquier subtramo de 200 m. que presente un *índice de perfil* mayor de 46 cm/km en cualquiera de sus líneas de tendido, será mediante alguno de los procedimientos que se indican a continuación. En cualquier caso, concluida la corrección se determinarán nuevamente los *índices de perfil* de todas las líneas de tendido del subtramo para verificar el cumplimiento de lo mencionado anteriormente:
 - a) Fresado continuo de la superficie de la carpeta, en tramos no menores de 50 m. y a todo el ancho de la calzada, en carreteras de 2 carriles, o en todos los carriles de un mismo sentido en carreteras con carriles múltiples, para reducir el *índice de perfil* a 46 cm/km o menos. Sobre la superficie fresada, se colocará un tratamiento superficial aprobado por el organismo a cargo, con un espesor de 2 cm. como mínimo, a menos que el proyecto establezca la construcción de una carpeta de granulometría abierta o semiabierta.
 - b) Colocación sobre la carpeta, de una sobrecarpeta de 3 cm. de espesor como mínimo, en tramos no menores de 50 m. y a todo el ancho de la calzada, en

carreteras de 2 carriles, o en todos los carriles de un mismo sentido en carreteras con carriles múltiples, elaborada con la misma mezcla utilizada en la carpeta, que cumpla con lo establecido por el organismo a cargo y que tenga un *índice de perfil* de 46 cm/km como máximo.

- No se permitirá efectuar trabajos de corrección con equipos de impacto que por su forma de operación puedan dañar la estructura del pavimento, ni con cualquier otra forma de ejecución.
- Todos los trabajos de corrección de la superficie de la carpeta, se efectuarán antes de que se verifiquen sus líneas, pendientes y espesores, salvo que la corrección se realice mediante una sobrecarpeta, en cuyo caso la verificación de los espesores se hará antes de colocarla.

c) Resistencia a la fricción

- Que la superficie de rodadura de la *carpeta de granulometría densa* compactada, haya tenido una resistencia a la fricción en condiciones de pavimento mojado, igual a 0.6 o mayor, medida con el equipo *Mu-Meter*, a una velocidad de 75 km/hr, por lo menos sobre la huella de la rodada externa de cada línea de tendido. El contratista de obra hará ésta verificación conforme a la norma *ASTM-E 670*. La prueba se hará sobre la superficie de rodadura compactada y, en su caso, corregida de acuerdo al párrafo anterior.
- Cuando la resistencia a la fricción de una *carpeta de granulometría densa compactada*, sea menor de 0.6 y el proyecto no establezca la construcción sobre ella, de una carpeta de granulometría abierta o semiabierta, el contratista de obra, por su cuenta y costo, corregirá la superficie terminada mediante la colocación de una carpeta de un riego, conforme a lo indicado en la norma *N-CSV-CAR-3-02-002, Carpetas de un Riego*, en tramos no menores de 50 m. y a todo el ancho de la calzada, en carreteras de 2 carriles, o en todos los carriles de un mismo sentido en carreteras con carriles múltiples. La corrección también podrá hacerse mediante alguno de los procedimientos indicados en los incisos *a)* y *b)* mencionados anteriormente, en cuyo caso, una vez concluida, se determinarán nuevamente la *resistencia a la fricción* y los *índices de perfil* de todas las líneas de tendido del subtramo, para verificar el cumplimiento de lo estipulado en el inciso anterior.

d) Limpieza de la superficie del pavimento

Una vez terminada la *carpeta de granulometría densa*, la superficie del pavimento deberá estar limpia, atendiendo lo indicado en la norma *N-CSV-CAR-2-02-001, Limpieza de la Superficie de Rodamiento y Acotamientos*.

FUENTE: NORMA SCT
N-CSV-CAR-3-02-005/02
CSV. Conservación.

3.9 RECUPERACIÓN Y RECICLADO

El *reciclado* de un concreto asfáltico, consiste en incrementar la utilidad de un pavimento que se encuentra en mal estado, salvando la materia prima (agregado pétreo y asfalto), contenida en el material descartado, haciendo que la superficie de rodamiento sea nuevamente transitable, con lo cual se resuelve el problema de reposición.

Con el fin de determinar si el proceso de *reciclado* resulta adecuado para la rehabilitación de pavimentos asfálticos, es necesario analizar las fallas que presenta la superficie de la carpeta y efectuar en caso necesario, sondeos para obtener el espesor y la calidad del material que componen las capas de la estructura, con lo que se determinan si los deterioros que se observan se deben a una insuficiencia estructural, a defectos constructivos o a fallas por fatiga.

Cuando se tienen fallas por insuficiencia estructural es conveniente efectuar un *escarificado*, que consiste en la recuperación de material de la carpeta actual sin pulverizar o quebrar los agregados, éste sistema elimina la laminación que se genera entre la carpeta y la colocación de una sobrecarpeta.

Cuando la falla ocurre por defectos constructivos en alguna de las capas del pavimento, es necesario levantar el material de la estructura hasta llegar a la capa que se encuentra en mal estado y reconstruir el pavimento nuevamente, por lo que el *reciclado* tiene su importancia al volver a utilizar el concreto asfáltico removido de la carpeta. Las fallas por defectos en la construcción de la carpeta como son agrietamientos, disgregación, corrugación y sangrado o llorado del asfalto, pueden ser eliminados con un adecuado proceso de reciclado, ya que se toma en cuenta que el material que se escarifica se procesa nuevamente, por lo que adquiere la granulometría y asfalto necesario para tener un concreto asfáltico en buenas condiciones.

Si la falla se debe al agrietamiento de la superficie de rodamiento por la pérdida de los solventes del asfalto debido a los agentes del intemperismo (oxidación del asfalto), un reciclado con la adición de un aditivo le devuelve a la carpeta la elasticidad perdida.

El *reciclamiento* de los pavimentos asfálticos ha alcanzado un nivel tecnológico tan alto, que se asegura el éxito en cualquier obra, con la condición de que sean observados los principios científicos físicos y químicos requeridos para una rehabilitación determinada. Los objetivos básicos del reciclamiento de los *pavimentos asfálticos* son los mismos que los de cualquier industria recicladora:

- Resolución de un problema de reposición.
- Salvar la materia prima valiosa contenida en el material descartado.

Existen tres formas de reciclar un pavimento:

- 1) **Reciclado superficial**
 - a) Proceso en caliente.
 - b) Proceso en frío.
- 2) **Reciclado en el lugar**
 - a) Proceso en caliente.
 - b) Proceso en frío.
- 3) **Reciclado en planta central**
 - a) Proceso en caliente.
 - b) Proceso en frío.

1) **Reciclado superficial**

Consiste en el reciclamiento de 5 cm. de espesor de la *carpeta asfáltica*, éste sistema en el sitio es el menos caro y el más simple, sin embargo sólo es apropiado si la capa de *base* y sus condiciones estructurales son adecuadas, es de esperarse que el reciclamiento superficial será más ampliamente usado en calles y caminos secundarios.

Este proceso tiene una efectividad limitada en reparación de caminos escarapelados, caminos severamente surcados por el paso constante del tránsito o en incrementos significativamente grandes de la capacidad de carga de transporte, sin embargo, es actualmente la forma más adecuada de reciclaje, ya que se efectúa a un costo razonable y puede tratar una gran variedad de deterioros del pavimento incluyendo desmoronamientos de bordos, surcos, arrasado y corrugaciones; con el reciclaje superficial se tiene una desorganización mínima de tránsito.

Algunas de las técnicas usadas para el reciclaje de superficie son:

- Calentamiento – nivelado.
- Calentamiento – escarificado.
- Remoción en frío.

CALENTAMIENTO – NIVELADO

Los calentadores – niveladores son usados principalmente para el mantenimiento del nivel longitudinal del pavimento y su pendiente transversal, otros usos incluyen el retiro del pavimento de los puentes para reducir el peso muerto; mantener la altura apropiada en túneles, pasos a desnivel y puentes de semáforo; también retira los *riegos simples* o *de sello* construidos inapropiadamente, así como irregularidades de *pavimentos asfálticos* causados por inestabilidad, bordos de lodo y actividad de mantenimiento tales como sellados de grietas, etc.

DESVENTAJAS QUE TIENE EL RECICLADO DE SUPERFICIE

- Poca mejoría estructural.
- Sin pasos múltiples de equipo, el calentamiento-escarificado y el calentamiento-nivelado tienen una efectividad limitada sobre el pavimento áspero.
- Restauración casi nula en pavimentos severamente inestables.
- La vegetación cercana a la carretera puede verse dañada.
- Las mezclas con agregados de tamaño máximo mayores a 1" no pueden ser tratadas con cierto equipo.

2) Reciclado en el lugar

Para la remoción del material se cuenta con el equipo de construcción adecuado para triturar el pavimento viejo y dejarlo a tamaños convenientes para su procesamiento, últimamente se han presentado refinamientos que incluyen una nueva tendencia a usar equipo pulverizador y técnicas de reducción a tamaños adecuados como una trituradora móvil de martillo.

Las estabilizaciones utilizando materiales como la cal, cemento, productos asfálticos y otros productos químicos han sido utilizados en éste tipo de reciclaje sin necesidad de calor adicional.

Para *reciclar en el lugar* se pueden utilizar dos planteamientos básicos dependiendo del espesor del pavimento a ser tratado y de la superficie de rodamiento:

- 1) Si la carpeta de concreto asfáltico tiene un espesor de 5 cm. o menos se puede utilizar equipo de pulverización sin necesidad de rasgadura o ruptura preliminar.
- 2) Para superficies de concreto asfáltico con un espesor mayor de 5 cm., se utilizan motoconformadoras con escarificadores o bulldozers con dientes desgarrantes para la ruptura inicial, si se requiere ruptura adicional antes de la pulverización se puede utilizar equipo pesado (bulldozers, rodillos, compactadores, etc.).

VENTAJAS DEL RECICLAJE EN EL LUGAR

- La habilidad para mejorar significativamente la capacidad de transporte de carga del pavimento sin cambios en la geometría horizontal o vertical de la carretera.
- Facilidad para tratar todos los tipos de deterioros del pavimento.
- Reducir o eliminar agrietamientos por reflexión.
- Mejora la resistencia al patinaje y la calidad del rodaje de la carretera.

DESVENTAJAS DEL RECICLAJE EN EL LUGAR

- El control de calidad no es tan bueno como el de las operaciones de una *planta central*.
- Causa desorganización de tránsito.
- Necesita de reparación periódica del equipo de pulverización.

3) Reciclado en planta central

El reciclaje de superficie utilizando *planta central* consiste en mezclar el material recuperado y un agente reciclante, los cuales forman un nuevo concreto asfáltico que servirá posteriormente para colocar la superficie de rodamiento; el crecido interés del reciclaje en *planta central*, ha conducido a desarrollar novedosas técnicas para el calentamiento de materiales reutilizables, así como nuevos conceptos en remoción y reducción de trozos de pavimento.

Se están utilizando dos procesos para reducir los materiales antes de su *reciclaje en planta central*:

- 1) El pavimento es reducido de tamaño en el lugar y luego acarreado a la *planta central*.
- 2) El pavimento puede ser transportado desde el lugar de la obra y luego triturado en *planta central*.

La *remoción y reducción* ya sea en planta o sobre la marcha del nivelado, puede ser llevada a efecto con equipo normalmente destinado al reciclaje en el lugar, específicamente con máquinas de remoción de agregados, equipo de calentamiento-nivelado y pulverizadores que trabajan sobre la marcha del extendido.

La reducción en *planta central* puede llevarse a cabo con equipo convencional, fijo y portátil de trituración y tamizado; el pavimento es normalmente desgarrado y roto antes de su embarque al tamaño apropiado para ser recibido por el triturador primario, en algunos casos resulta económico usar rodillos aplanadores de rejilla u otros equipos de construcción para lograr el tamaño adecuado del material en la carretera antes de su acarreo a la *planta central*.

En el *reciclado en caliente*, parte de la superficie de rodamiento que se remueve, se criba y se mezcla en caliente con cemento asfáltico adicionado en la *planta central*; las técnicas de reciclaje para procesar centralmente en caliente el material reciclado pueden separarse con tres categorías generales:

- 1) *Calentamiento a flama directa*. Éste calentamiento típicamente se lleva a cabo en una mezcladora circular en la que todos los materiales son mezclados simultáneamente en un tambor giratorio con una flama en el extremo, ésta mezcladora en un principio tenía problemas de terminación, lo que condujo a diversas modificaciones tales como la adición de escudos para el calor, cargas divididas, etc.
- 2) *Calentamiento a flama indirecta*. Es efectuado con mezcladoras circulares especiales con tubos intercambiables; el fin de estos tubos es transferir los gases, por lo que impiden que

las mezclas tengan un contacto directo con la flama y las temperaturas extremadamente altas.

- 3) *Agregado sobrecalentado*. Puede ser empleado para elevar la temperatura del material asfáltico reciclado; la técnica de éste sistema en *planta central* está limitada a cerca del 50% de materiales asfálticos reciclados.

Mencionamos algunas ventajas que se obtienen en el *reciclado* en *planta central* de la carpeta asfáltica:

- Tienen una mejoría estructural significativa.
- Buen control de calidad.
- El agrietamiento por reflexión puede ser eliminado.
- Mejora la resistencia al patinaje.
- La geometría de la carretera puede ser fácilmente corregida.
- Se tiene un mejor control al utilizar aglomerante y/o agregados nuevos.
- La superficie de rodamiento es más uniforme.

La principal desventaja es:

- Se pueden tener problemas de contaminación del aire en el sitio de la planta.

El *reciclaje en frío* de pavimentos asfálticos provee un número de ventajas importantes que incluyen las siguientes:

- *Conserva energía*. El proceso se realiza “*in situ*” y el manejo de materiales es muy reducido. No se requiere combustible para calentar materiales, pues todo el proceso es completado en frío.
- *Conserva materias*. Los materiales del pavimento existente son reciclados. Éste uso adicional de materiales ayuda a conservar los materiales restantes y sus fuentes, a veces limitadas.
- *Controla el agrietamiento por reflexión*. Donde queda algún espesor del pavimento asfáltico existente, el agrietamiento reflexivo puede demorarse. Cuando el espesor entero es tratado, el agrietamiento reflexivo normalmente se elimina.
- Restaura la corona y el perfil.
- La pérdida del derrame del bordillo es reducida o eliminada.
- *Reduce los costos de mantenimiento del pavimento*.
- A largo plazo eficiente y de costo mínimo.
- Deseable con respecto al medio ambiente; la dispersión de las materias del pavimento se reduce mucho o es eliminada. Menos contaminantes del aire se producen a causa de que no hay necesidad de calentar y reduce la transportación de materiales.

3.10 SOBRECARPETA DE CONCRETO HIDRÁULICO (WHITETOPPING)

Corresponden a rehabilitaciones de *pavimentos asfálticos* deteriorados. El término aquí utilizado se refiere a rehabilitaciones con pavimentos de concreto convencional, tomando como estructura de soporte el *pavimento asfáltico* que se tiene en el lugar. Los métodos de diseño toman en cuenta ésta solución considerando las características de soporte de la estructura existente, que normalmente tiene la capa de *sub-base* y *asfalto*.

Esta técnica permite incrementar la capacidad estructural del *pavimento flexible* mediante la construcción directa de una losa de concreto hidráulico delgada, con un mínimo de obras concurrentes o preliminares de preparación.

Los espesores de las losas de concreto así construidas varían generalmente entre 13 y 30 cm., si bien los valores más frecuentes se encuentran entre 18 y 25 cm. Su aplicación se encuentra en *pavimentos flexibles* antiguos y deteriorados, que deben soportar un tránsito pesado e intenso y con pocas posibilidades de conservación con materiales asfálticos por su vida útil menor y por las alteraciones al tránsito. No es aconsejable cuando el grado de deterioro es severo y cuando el pavimento existente pueda experimentar asentamientos importantes. Algunos de los trabajos preliminares que se deben considerar para la colocación del pavimento *Whitotopping* difieren de los que se aplican a los pavimentos convencionales.⁽⁶⁾

Los aspectos que se evalúan para determinar la factibilidad técnica de que un pavimento sea rehabilitado mediante la técnica de *Whitotopping* son:⁽⁶⁾

- Daños estructurales.
- Daños asociados a la fatiga de las capas asfálticas.
- Daños asociados a la alteración del perfil por deformaciones plásticas acumuladas.
- Daños asociados a la inestabilidad del terraplén.
- Daños superficiales.
- Daños asociados a las deficiencias en el diseño o fabricación de la mezcla asfáltica.
- Daños asociados a la calidad de los materiales.

El espesor requerido de sobrecarpeta de concreto mediante la técnica de *Whitotopping*, para soportar el tránsito futuro se determina de acuerdo con la siguiente expresión:

$$D_{sc} = D_f$$

Donde:

D_{sc} = Espesor requerido de sobrecarpeta de concreto hidráulico, en cm.

D_f = Espesor requerido de pavimento de concreto hidráulico para soportar el tránsito futuro, en cm.

El espesor de la sobrecarpeta de concreto hidráulico *Whitotopping* se determinará de acuerdo con el siguiente proceso:

- Determinar la estructura del pavimento existente, espesores de sus capas y materiales existentes, efectuar el análisis del tránsito futuro.
- Conocer el estado del pavimento, principalmente en cuanto a los siguientes deterioros:
 - Expansiones y asentamientos.
 - Evidencias de desprendimiento de asfalto, que pueda agravarse con la presencia de la sobrecarpeta.
 - Grandes grietas transversales que pudieran reflejarse.
 - Bombeo.
- Determinación del *módulo de reacción estático*, mediante pruebas no destructivas. Para ello será necesario determinar el *módulo de resiliencia* de la *capa subrasante*, M_r y el módulo efectivo de todas las capas del pavimento existentes sobre la *capa subrasante*, E_p . Conocida la cuenca de deflexiones, se determinará el módulo M_r con la siguiente expresión:

$$M_r = \frac{0.24 P}{d_r r}$$

Donde:

M_r = Módulo de resiliencia de la capa subrasante, en kg/cm^2 .

P = Carga aplicada para producir las deflexiones, en kg.

d_r = Deflexión a la distancia r del centro de la carga, en cm.

r = Distancia al centro de la carga, lo suficientemente grandes para eliminar el efecto de las capas existentes de la capa subrasante, en cm.

Se determinará el espesor total del pavimento, D , por medio de la Fig. 3.9, a partir del módulo M_r , del módulo efectivo del pavimento, E_p , obteniéndose la relación E_p / M_r , de la carga aplicada, P , y de la deflexión máxima, d_o .

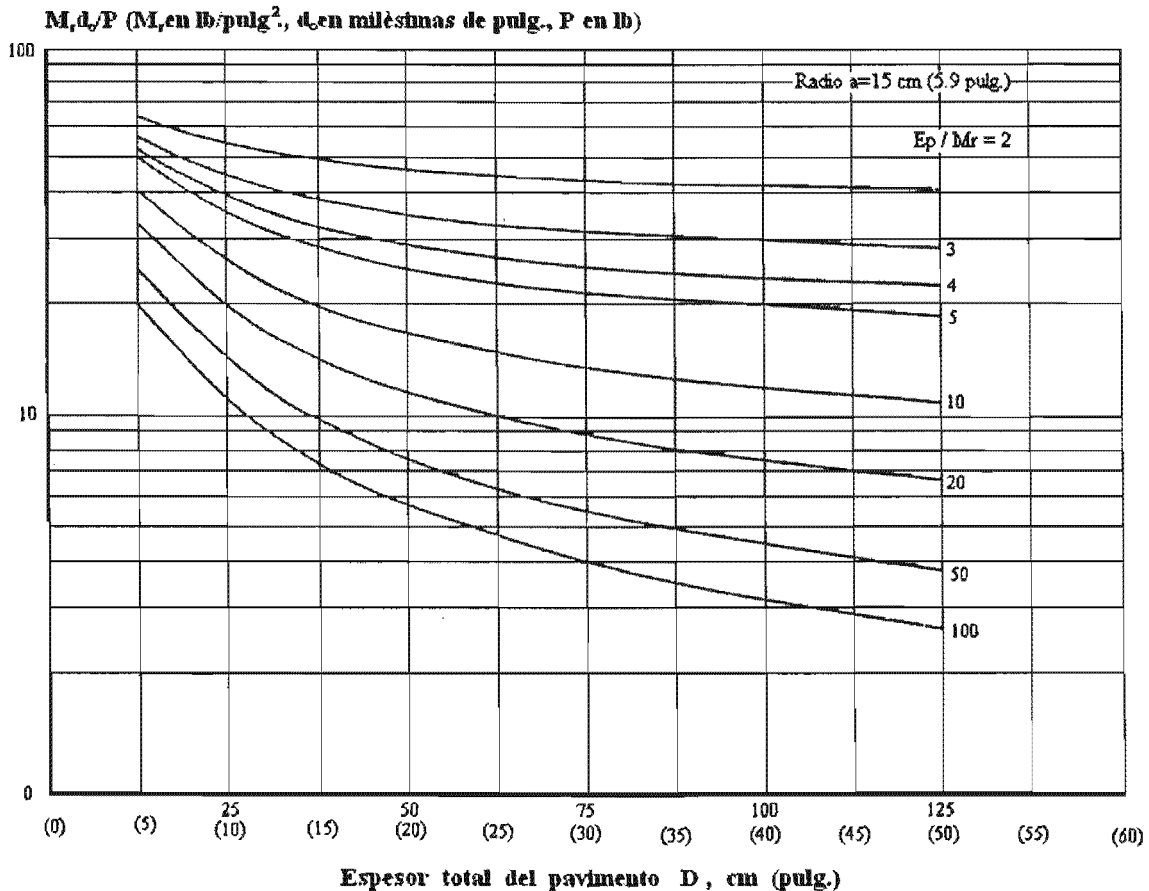


FIGURA 3.9. Determinación de la relación E_p / M_r .⁽⁷⁾

El espesor así obtenido debe ser considerado como el mínimo requerido al tomar en cuenta las irregularidades de la superficie en que se apoyará la sobrecarpeta. Es recomendable efectuar un levantamiento topográfico de las secciones transversales del pavimento existente para proyectar la rasante y las secciones de construcción de la sobrecarpeta nueva.

De acuerdo con la importancia de la vialidad, los espesores mínimos considerados serán los siguientes:⁽⁷⁾

TABLA 9. Espesores mínimos considerados para la sobrecarpeta.⁽⁷⁾

Tipo de vialidad	Espesor mínimo, cm
Carreteras principales, red primaria interestatal.	15
Carreteras secundarias, con bajo volumen de tránsito.	10
Estacionamientos.	10

Las juntas transversales y longitudinales deben diseñarse como se indica en la parte del *Proyecto y Construcción* de la obra y por parte del organismo a cargo, multiplicando el factor de 0.245 por el espesor de la losa, en cm., como separación máxima. El serrado deberá profundizarse no menos de 1/3 del espesor de la losa en ambos tipos de juntas, debiendo considerar el caso de espesores de losa mayores por distorsiones del pavimento de apoyo; cuando estas deformaciones son del orden de 5 cm., efectuando el serrado a la profundidad necesaria para satisfacer la recomendación anterior. Para el caso de tránsito pesado e intenso deberá considerarse la colocación de pasajuntas en las juntas transversales, de acuerdo con la siguiente tabla:

TABLA 10. Características de las pasajuntas para sobrecarpeta con alto volumen de tránsito. ⁽⁷⁾

Espesor de la losa, cm	Características de las pasajuntas		
	Diámetro, cm	Longitud, cm	Separación, cm
10-18	No se requieren		
20	3.2	38	30
23	3.2	38	30
25	3.8	40	30
28	3.8	40	30
30	3.8	40	30

Adicionalmente debe tenerse en cuenta la necesidad de efectuar algunas obras previas a la construcción de la sobrecarpeta, como se indica en la tabla 11: ⁽⁷⁾

TABLA 11. Trabajos previos a la construcción de la sobrecarpeta. ⁽⁷⁾

Tipo de deterioro	Trabajos previos
Rodera, menores que 5 cm.	Ninguno; considerar la profundidad del serrado.
Rodera, mayores que 5 cm.	Corte en frío o nivelación con mezcla asfáltica.
Protuberancias.	Corte en frío.
Baches.	Rellenar con grava triturada; mezclas asfálticas en frío o en caliente.
Fallas por debilidad de la capa subrasante.	Sustituir por material adecuado.
Grietas de piel de cocodrilo.	Ninguno.
Agrietamientos tipo mapa.	Ninguno.
Grietas transversales.	Ninguno.
Grietas longitudinales.	Ninguno.
Llorado (exudación).	Ninguno.
Desprendimientos.	Ninguno.

Debe considerarse además la aplicación de una lechada de cal y agua cuando se construyan capas de nivelación con mezcla asfáltica y cuando la temperatura del pavimento existente sea mayor de 43°C, lo cual puede ocurrir en los meses de verano, cuando la temperatura ambiente esté por arriba de los 32°C. La lechada reducirá la temperatura de la superficie, evitando problemas de agrietamientos por contracción en la sobrecarpeta, siendo necesario aplicar riegos adicionales cuando la temperatura del pavimento se mantenga en el orden de 43°C, cuidando en éste caso de no contaminar a las pasajuntas dispuestas en silletas ni afectar el rodamiento de la pavimentadora.

3.11 ESTABILIZACIÓN Ó MEJORAMIENTO DEL MATERIAL GRANULAR

La *estabilización* consiste en agregar un producto químico o aplicar un tratamiento físico logrando así que se modifiquen las características de los suelos. Se dice que es la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al material o bien, disminuir su plasticidad.

Cuando los suelos de un lugar están sueltos o son altamente compresibles, o bien, cuando tienen índices de consistencia inapropiados, muy alta permeabilidad o cualquier otra propiedad indeseable para su utilización en un proyecto de construcción, pueden ser *estabilizados*.⁽⁸⁾

La *estabilización* puede consistir en cualquiera de los siguientes procedimientos:⁽⁸⁾

- Aumentar la densidad del suelo.
- Agregar materiales para efectuar un cambio químico y/o físico en el suelo.
- Bajar el nivel freático del suelo.
- Remoción o reemplazo de suelos inadecuados.

Las formas de lograrlo son las siguientes:

3.11.1 ESTABILIZACIÓN FÍSICA

3.11.1.1 MEZCLAS DE SUELOS

Cuando se diseñan mezclas de suelos, para lograr con ellas unas determinadas propiedades deseables, la granulometría suele ser el requisito más relevante en la fracción gruesa, en tanto que la plasticidad lo es, naturalmente, en la porción fina.

El tamaño máximo de las partículas de la mezcla tiene importancia, puesto que los tamaños demasiado grandes son difíciles de trabajar y producen superficies muy rugosas; una proporción demasiado grande de tamaños gruesos conduce a mezclas muy segregables. La presencia de contenidos importantes de materiales finos, menores que la malla N°40, hace difícil lograr buenas características de resistencia y de deformabilidad, además de que puede conducir a superficies demasiado lisas y fangosas, cuando están húmedas y pulverulentas, que cuando están secas.

En laboratorio se hace un ensaye para cuantificar el efecto de la incorporación de finos (material menor que la malla N°200), a los triturados pétreos que suelen disponerse como materiales de base de pavimento, a una matriz constituida por un basalto triturado en planta a tamaño máximo de 3.8 cm. (1 1/2"), se le añadieron porcentajes variables, comprendidos entre 5% y 20 % de un material fino relativamente inerte (CL-ML), de una *caolinita* y de una *bentonita* comercial. En el ensaye se estudiaron los efectos de estos finos en el comportamiento de las mezclas obtenidas en cuanto a *resistencia triaxial, relación esfuerzo-deformación y valor relativo de soporte*.⁽⁵⁾

La Fig. 3.10 se refiere al comportamiento *esfuerzo-deformación* de las mezclas de los mismos materiales, cuyos especímenes se dejaron en contacto con agua para que la absorbieran libremente. Las curvas que se presentan se obtuvieron con una presión de confinamiento en la cámara triaxial de 0.703 kg/cm².⁽⁵⁾

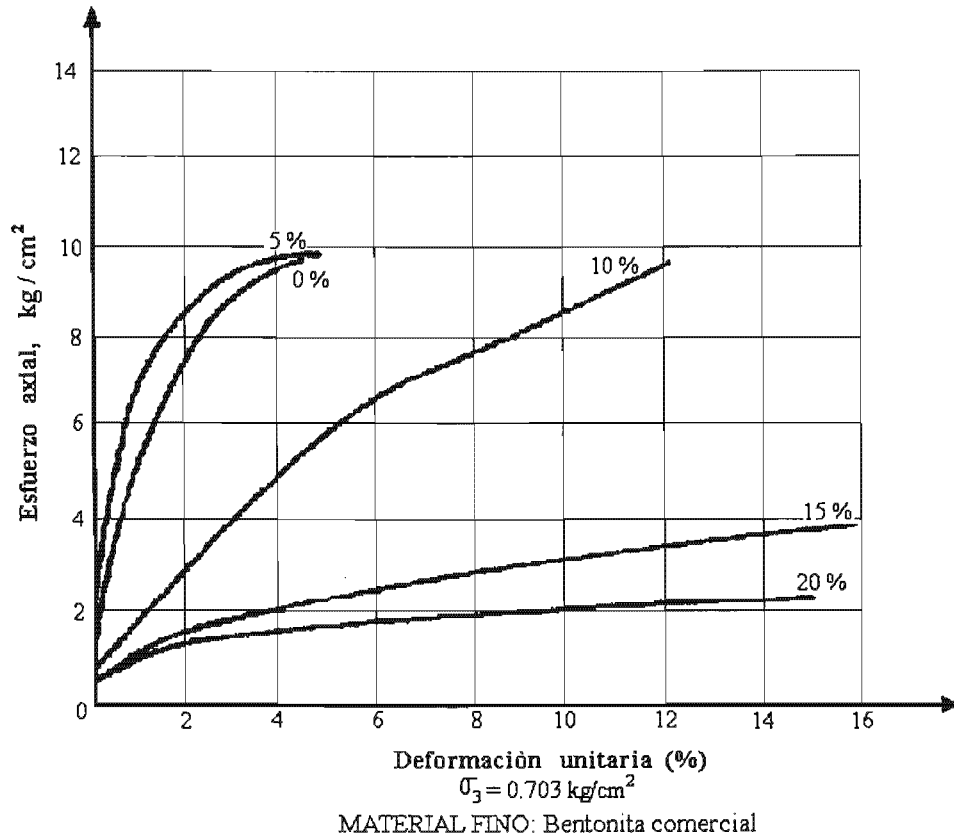


FIGURA 3.10. Efecto de la inclusión de finos en la relación esfuerzo-deformación de una matriz de material triturado. ⁽⁵⁾

La influencia de la actividad de los finos en la deformabilidad de la mezcla es sobresaliente; los finos más inertes ejercen un efecto relativamente moderado en el comportamiento *esfuerzo-deformación* de las mezclas, pero ésta situación cambia drásticamente cuando se incorpora la *bentonita*.

Finalmente, la Fig. 3.11, da la variación del *VRS* de las diferentes mezclas, con el contenido de finos que se use en las mismas. En éste caso, los especímenes se formaron con la energía de compactación correspondiente a la prueba *AASHTO estándar* y posteriormente se saturaron. La Fig. 3.16 muestra información en relación al contenido óptimo de finos que deben tener diferentes suelos gruesos para lograr el máximo peso volumétrico seco y el mayor *VRS*.

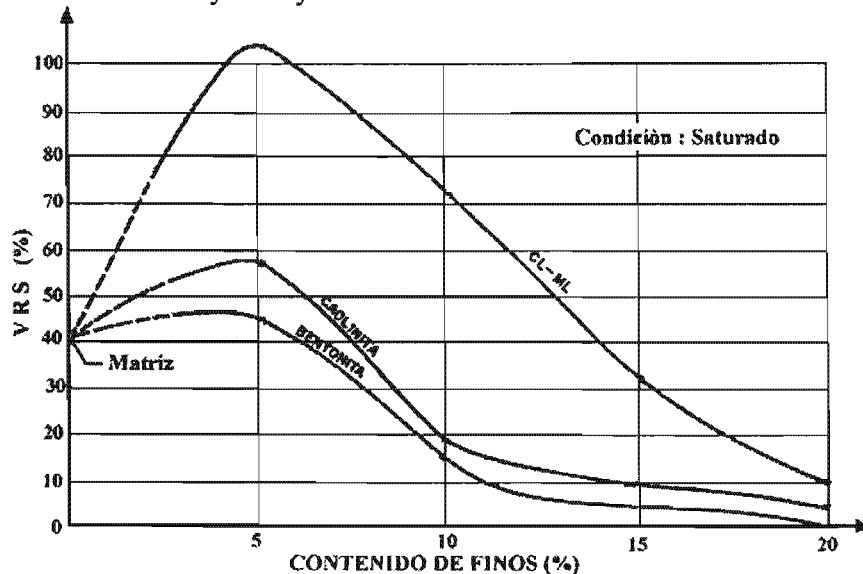


FIGURA 3.11. Efecto del porcentaje de finos en el *VRS* de las mezclas. ⁽⁵⁾

Los resultados de la Fig. 3.12 reflejan únicamente una condición física de las mezclas de suelos, que se compactan mejor o se penetran más difícilmente si hay finos que llenan los huecos entre las partículas gruesas, pero sin exceder significativamente ese valor, pero de ningún modo reflejan un comportamiento general en cuanto a resistencia o deformabilidad, en condiciones variadas de esfuerzos, bajo el efecto del agua o a largo plazo. Puede verse como el contenido óptimo de finos, tiende a aumentar cuanto más fino sea el suelo grueso, llegándose a porcentajes del orden del 25 % como óptimos para que se alcance el mayor VRS. El aspecto más delicado de la *estabilización con mezclas de otros suelos* es el criterio mismo que se adopte para medir las propiedades del nuevo suelo.

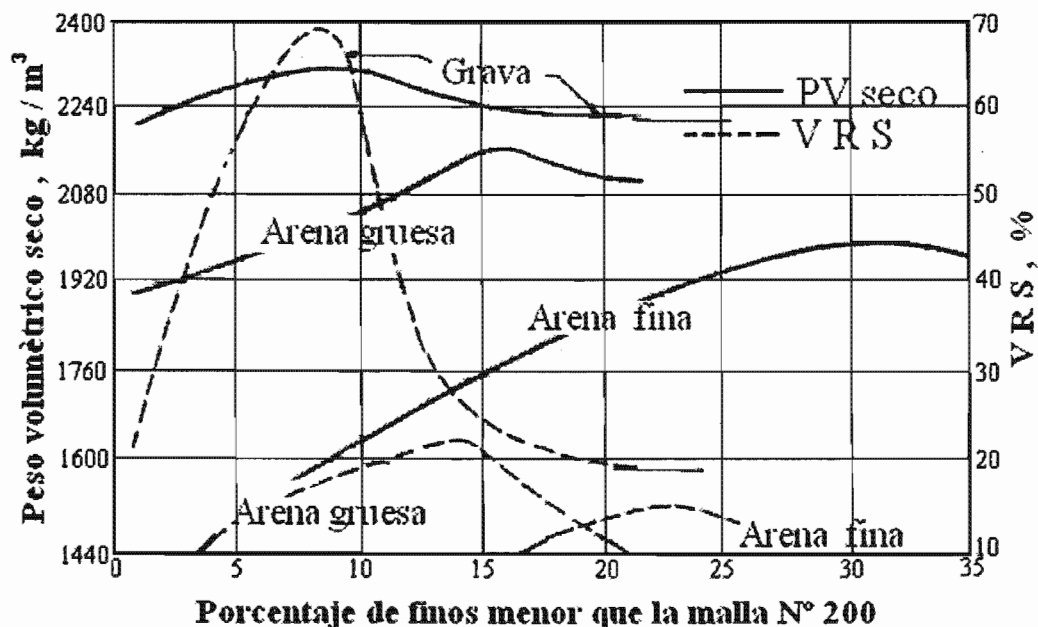


FIGURA 3.12. Valores óptimos del contenido de finos desde el punto de vista del peso volumétrico seco y el VRS. ⁽⁵⁾

El control de los finos mezclados, midiendo adicionalmente y por separado la plasticidad de los mismos, no parece ser suficiente en la práctica, quizá por los muy rápidos cambios en plasticidad que se producen en los bancos. El criterio para juzgar las virtudes de una mezcla de suelos debe ser la incidencia de la manipulación en las propiedades fundamentales del suelo, que usualmente serán la *resistencia triaxial* y la relación *esfuerzo-deformación*.

En lo que se refiere a la preparación de mezclas de dos suelos, para producir un tercero que tenga una granulometría que le garantice ciertas propiedades deseables, previamente establecidas por un estudio de laboratorio o por unas especificaciones, existen en la práctica diversos métodos, variantes de una misma idea central. En términos generales es el problema puede enunciarse así: "Se tiene un suelo dividido en varias fracciones, conocido el porcentaje que constituye cada fracción y se desea variar uno o más de esos porcentajes, por la adición de alguna proporción de otro suelo, de granulometría conocida". ⁽⁵⁾

En general, si A, B, C, \dots son los porcentajes que pasan una cierta malla de un conjunto de suelos $1, 2, 3, \dots$ son los porcentajes en que tales suelos $1, 2, 3, \dots$ van a entrar en la combinación, el porcentaje de la mezcla que pasará por una cierta malla estará dado por la ecuación:

$$P = aA + bB + cC + \dots \quad (1)$$

3. CONSERVACIÓN Y MEJORAMIENTO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

Los problemas de mezclas son de varios aspectos; a veces habrá que obtener toda la curva granulométrica de la mezcla y, otras bastará con garantizar algún o algunos porcentajes apropiados de algunos tamaños específicos; un ejemplo del último caso sería la modificación de la fracción fina de suelo para mejorar su plasticidad o su permeabilidad.

Supóngase que se tiene una mezcla de sólo dos suelos; entonces la ecuación (1) queda:

$$P = aA + bB \quad (2)$$

Evidentemente: $a + b = 100 \%$, de donde:

$$a = 1 - b$$

Sustituyendo en la ecuación (2) se tiene:

$$P = (1 - b) A + bB = A - Ab + bB$$

$$P - A = b(B - A)$$

De donde se obtiene:

$$b = \frac{P - A}{B - A} \quad (3)$$

$$a = \frac{P - B}{A - B} \quad (4)$$

Las expresiones (3) y (4) dan los porcentajes en que los suelos 1 y 2 deben combinarse, para que la mezcla tenga el porcentaje P pasando la malla que se haya elegido como base del cálculo. La tabla 12 proporciona los datos de los suelos 1 y 2, con cuya mezcla se desea fabricar un material que cumpla las especificaciones que se señalan en la propia tabla. ⁽⁵⁾

TABLA 12. Datos del problema

Malla Suelo	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 8	Nº 30	Nº 50	Nº 100	Nº 200
1	100	90	59	16	3.2	1.10	0	0	0
2	100	100	100	96	82	51	36	21	9.20
Mezcla	100	80-100	70-90	50-70	35-50	18-29	13-23	8-16	4-10

La Fig. 3.13 muestra granulometrías de los materiales 1 y 2; el problema que se plantea no está determinado, por lo que en la práctica suele requerir de un cierto manejo de tanteos, por lo menos en el laboratorio, para llegar a soluciones suficientemente aproximadas. Estos tanteos pueden orientarse y facilitarse mucho, estimando desde el principio las fracciones en que los suelos 1 y 2 pueden intervenir con mayor facilidad, por ejemplo la Fig. 3.13 puede notarse que el agregado 1 debe ser usado sobre todo para proporcionar los tamaños gruesos de la mezcla, en tanto que el agregado 2 podrá proporcionar los finos.

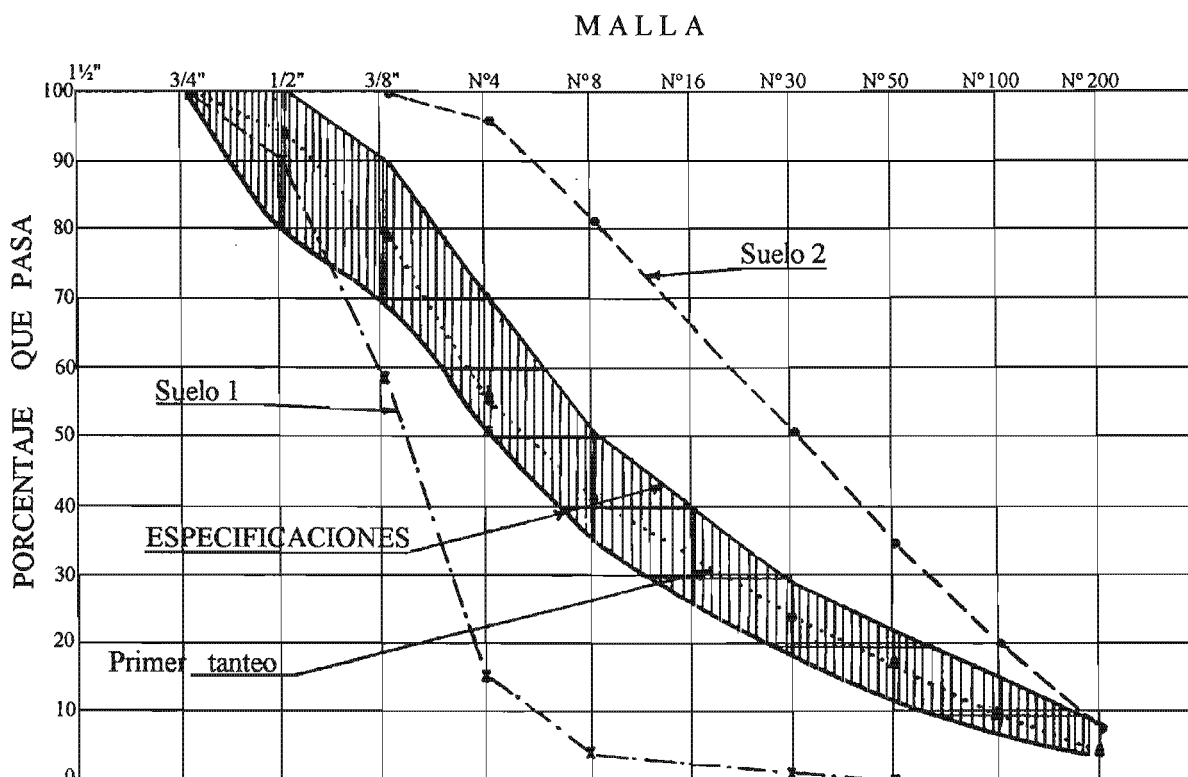


FIGURA 3.13. Granulometrías de los suelos 1 y 2 de la mezcla resultante. ⁽⁵⁾

Para ilustrar el cálculo se tomará el caso de fijar el porcentaje de la mezcla que debe pasar la malla N°8. Se intentará que dicho porcentaje sea el promedio de los límites señalados, entonces:

$$P = \frac{35+50}{2} = 42.5\%$$

De donde, aplicando la ecuación (3) se llega a:

$$b = \frac{P-A}{B-A} = \frac{42.5-3.2}{82-3.2} = \frac{39.3}{78.8} = 50\%$$

De manera que se utiliza el 50% de cada suelo componente para formar la mezcla, se estará atendiendo al requerimiento de dicha mezcla en lo referente a la malla N°8, pero sin poder garantizar lo mismo para todas las demás mallas; sin embargo, tal criterio puede utilizarse como primer tanteo.

Se observa que la mezcla obtenida quedó dentro de las especificaciones deseadas, si bien bastante justa en lo que respecta al material que pasa la malla N°200. Si éste hubiera quedado excedido, por ejemplo, un modo de corregirlo sería efectuar un segundo tanteo aumentando un poco el porcentaje del material 1, que no tiene finos, disminuyendo correspondientemente el del material N°2, que es el que contribuye a esa fracción en la mezcla.

El método anterior puede ser también interpretado por una solución gráfica, que resulta especialmente útil para aquellos casos en que no sea muy fácil visualizar cual de los suelos componentes debe contribuir más a la formación de diferentes fracciones de la mezcla; esto sucede sobre todo cuando se cruzan las curvas granulométricas de los materiales componentes.

Para la realización del método gráfico se comienza por dibujar un cuadrado (Fig. 3.14), en cuyos lados se colocan escalas de porcentajes granulométricos en la disposición mostrada. En la escala vertical de la derecha se dibujan puntos según la granulometría que muestra el material 1,

señalando en cada porcentaje la malla correspondiente en que tal porcentaje ocurre; igual se hace con el material 2 en la escala vertical de la izquierda. Si se unen tales puntos por líneas rectas como se hace en la figura, se tendrá una recta para cada malla. Sobre esas líneas rectas y con base en las escalas verticales de porcentajes que pasan se colocan, en cada una, los límites de la especificación a que se desea se sujete la mezcla (ver tabla 12, para interpretar los límites señalados en la Fig. 3.14).⁽⁵⁾

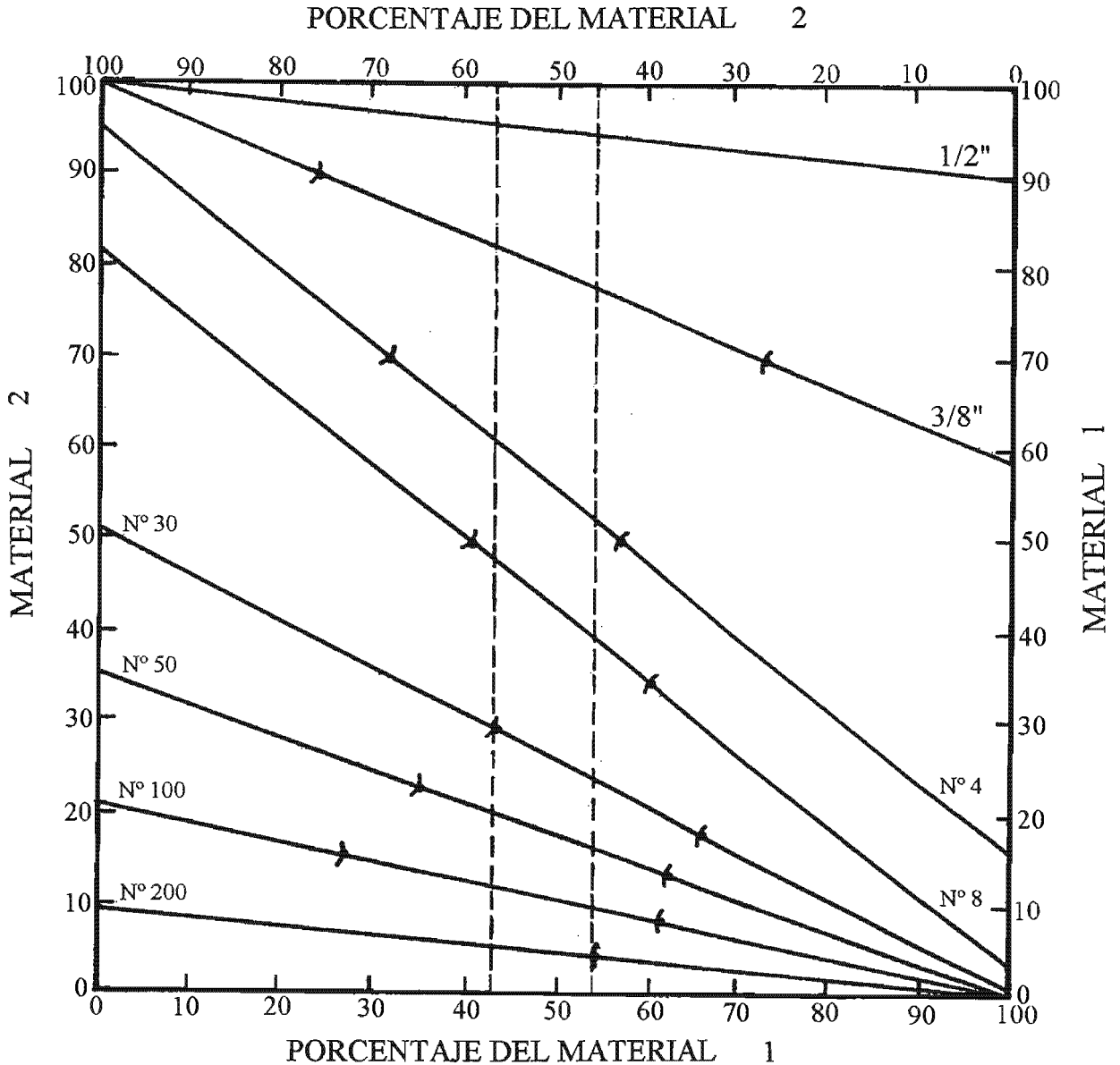


FIGURA 3.14. Método gráfico para diseño de mezclas de dos materiales.⁽⁵⁾

La Fig. 3.14 está construida de tal manera que un punto cualquiera de los señalados en una de las líneas inclinadas, que representa un cierto porcentaje de la mezcla, en el tamaño correspondiente a la línea, permite leer en las escalas horizontales superior e inferior los respectivos porcentajes en que deberán entrar en la mezcla los materiales 1 y 2 para producir un porcentaje como el señalado, en el tamaño correspondiente.

Así, si se trazan las dos líneas verticales de puntos, por los puntos más próximos entre sí, de todos los que corresponden a límites de especificación de la mezcla, se habrá limitado una zona tal que si los porcentajes en que se mezclan los suelos 1 y 2 quedan dentro de ella, se producirá una mezcla que automáticamente resulta dentro de todas las especificaciones señaladas.

El mezclado en sí puede ser causa de problemas, sobre todo cuando los componentes son finos. Los suelos más finos suelen requerir pulverización antes de las operaciones de mezclado, lo que puede hacerse con arados de discos, rastras, etc.

Una utilización de las mezclas de suelos de uso no demasiado común, pero de enorme potencialidad, es aquella que tiende a modificar la composición mineralógica de los minerales.

Las proporciones de finos de una u otra naturaleza pueden ser modificadas, lográndose cambios muy importantes en alguna propiedad específica. Ejemplos típicos de ésta técnica son la adición de arenas finas a suelos que tienen un porcentaje apreciable de partículas susceptibles al rebote elástico o la adición de porcentajes de *bentonita* para reducir la permeabilidad de los suelos.

3.11.2 ESTABILIZACIÓN QUÍMICA

Un suelo se estabiliza químicamente cuando interviene el agua en la mezcla de los materiales y se presentan reacciones químicas. La *estabilización química* se realiza generalmente con el fin de obtener uno o más de los siguientes mejoramientos del suelo: ⁽⁹⁾

- El aumento de la resistencia y la durabilidad del suelo.
- La impermeabilización del suelo para impedir la entrada del agua.
- La disminución del potencial del cambio de volumen del suelo debido a una contracción o una expansión.
- La manejabilidad del suelo.

Hay diferentes materiales para realizar éste tratamiento, los cuales son por lo general de tipo industrial como las siguientes:

3.11.2.1 CAL

Es un método económico para disminuir la plasticidad de los suelos y darle un aumento en la resistencia. Los porcentajes por agregar varían del 2% al 6% con respecto al suelo seco del material por estabilizar, con estos porcentajes se consigue estabilizar la actividad de las arcillas obteniéndose un descenso en el índice plástico y un aumento en la resistencia. Es recomendable no usar más del 6% ya que con esto se aumenta la resistencia pero también tenemos un incremento en la plasticidad. Los estudios que se deben realizar a suelos estabilizados con cal son: *límites de Atterberg, granulometría, equivalente de arena, VRS, compresión*. Además también se realizan estos estudios para suelos estabilizados con *puzolanas, cloruro de sodio y calcio y cemento Portland*. ⁽¹⁰⁾

Una parte importante de los suelos con los que el Ingeniero tiene que trabajar, corresponde a las *arcillas*, las cuales frecuentemente requieren de su estabilización con el objeto de incrementar su resistencia y disminuir su sensibilidad a variaciones volumétricas debidos a cambios del agua. El tratamiento de suelos arcillosos mediante la *estabilización con cal* logra los siguientes objetivos:

- Se reduce el *índice plástico* en forma considerable; esto se debe generalmente a un pequeño incremento del *límite plástico* y una considerable reducción del *límite líquido*.
- El agua y la cal colaboran para acelerar la disgregación de los grumos de arcilla durante la operación de pulverización, lo cual facilita la trabajabilidad.
- Reduce los efectos aglomerantes.
- En áreas pantanosas o en donde los suelos tienen humedades superiores a la óptima, la aplicación de la *cal* facilita el disgregado del suelo, lo que a su vez propicia un secado más rápido.

- Las contracciones y expansiones debidas a cambios de humedad se reducen considerablemente.
- La resistencia del suelo a la compresión se incrementa. Así mismo, el *VRS* se incrementa.
- La capa estabilizada proporciona una excelente plataforma de trabajo para la construcción de las capas superiores de la sección estructural del pavimento.
- *La cal es el estabilizador de suelos más utilizado por su versatilidad en su manejo, aplicación y por su bajo costo.*
- Un suelo tratado con *cal* modifica las propiedades físicas del suelo de manera permanente, disminuye el *índice plástico* y la *contracción lineal* e incrementa el *VRS* y la resistencia a la compresión.

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

La capa inferior a la que se va a estabilizar, deberá estar totalmente terminada, el mezclado puede realizarse en una planta adecuada o en campo, obteniéndose mejores resultados en el primer caso, lo cual puede agregarse en forma de lechada, a granel o en sacada. Cuando se efectúa el mezclado en el campo, el material que se va a mejorar deberá estar disgregado y acamellonado, se abre una parte y se le agrega el estabilizador distribuyéndolo en el suelo para después hacer un mezclado en seco, se recomienda agregar una ligera cantidad de agua para evitar los polvos. Después de esto se agrega el agua necesaria y se tiende la mezcla debiendo darle un curado de hasta 48 horas de acuerdo con el tipo de arcilla de que se trate. Se tiende la mezcla y se compacta a lo que marca el proyecto para después aplicarle un curado final, el cual consiste en mantener la superficie húmeda por medio de un ligero rocío. Se recomienda no estabilizar cuando amenace la lluvia o cuando la temperatura ambiente sea menor a 5°C, además se recomienda que la superficie mejorada se abra al tránsito vehicular en un tiempo de 24 a 48 horas. ⁽¹⁰⁾

3.11.2.2 CEMENTO PÓRTLAND

Al mejorar un material con *cemento Pórtland* se piensa principalmente en aumentar su resistencia y durabilidad, pero además de esto, también se disminuye la plasticidad, es muy importante para que se logren estos efectos, que el material por mejorar tenga una cantidad mínima de materia orgánica. Existen dos formas o métodos para estabilizar con *cemento Pórtland*, unas llamadas estabilizaciones del *tipo flexible*, en el cual el porcentaje de cemento varía del 1% al 4%, con esto sólo se logra disminuir la plasticidad y el incremento en la resistencia resulta muy bajo, las pruebas que se efectúan para éste tipo de muestras son semejantes a las que se hacen a los materiales estabilizados con *cal*.

Otra forma de mejorar el suelo con cemento, se conoce como *estabilización rígida*, en ella el porcentaje de cemento varía del 6% al 14%, éste tipo de mejoramiento es muy común en las *bases*, ya que resulta muy importante que éstas y la carpeta presenten un módulo de elasticidad semejante, ya que con ello se evita un probable fracturamiento de la carpeta, ya que ambos trabajan en conjunto; para conocer el porcentaje óptimo por emplear, se efectúan pruebas de laboratorio con diferentes contenidos de cemento. ⁽¹⁰⁾

3.11.2.3 PRODUCTOS ASFÁLTICOS

Es la mezcla de un suelo, roca o escoria de fundición, triturada o cribadas, con un producto asfáltico adecuado para proporcionarle características que le permitan trabajar satisfactoriamente como *sub-base* o *base* de una *carpeta*.

La *estabilización* de un suelo con un *producto asfáltico* tiene dos finalidades:

- 1) Lograr la impermeabilidad superficial, ya sea en los grumos arcillosos, o en las grietas en las partes expuestas de una arcilla, tanto en estado natural o compactada.
- 2) En los suelos arenosos, la de proporcionarle la cementación requerida que asegure la estabilidad permanente del suelo, al evitar deformaciones por desplazamiento de sus partículas bajo la acción de las cargas.⁽¹⁰⁾

Con el objeto de que la estabilidad sea suficiente, se requiere que el suelo se encuentre con un bajo contenido de humedad para que pueda ser disgregado uniformemente antes de adicionar el producto asfáltico. Dicha humedad puede ser tal que permitiendo la disgregación del material facilite la distribución uniforme del asfalto en una película delgada.

Por lo que respecta a la cantidad necesaria de *producto asfáltico* para estabilizar un suelo, es mayor a medida que el grado de finura del suelo lo es, de aquí la necesidad de que exista fragmentos gruesos en el material, que además de aumentar la estabilidad, disminuye el contenido de asfalto al reducirse la superficie por cubrirse.

En cuanto al *producto asfáltico* adecuado para las estabilizaciones de suelos arenosos, se deberán usar asfaltos rebajados de fraguado rápido o medio, o emulsiones de fraguado lento.

El material asfáltico que se emplee para mejorar un suelo puede ser el *cemento asfáltico* o bien las *emulsiones asfálticas*; el primero es el residuo último de la destilación del petróleo. Para mezclar el *cemento asfáltico* con material pétreo deberá calentarse a temperaturas que varían de 140°C a 160°C, el más común que se emplea en la actualidad es el AC-20⁽³⁾. Éste tipo de producto tiene la desventaja de que resulta un poco más costoso y que no puede mezclarse con agregados pétreos húmedos.

Las *emulsiones asfálticas* son las más usadas ya que éste tipo de productos si pueden emplearse con pétreos húmedos y no se necesitan altas temperaturas para hacerlo maniobrable, en éste tipo de productos se encuentra en suspensión con el agua.⁽⁵⁾

En una estabilización *suelo-arena-emulsión* cada componente cumple una determinada función. El suelo aporta cohesión a la mezcla, por eso es importante controlar los valores de plasticidad. La arena aporta sus propiedades friccionantes en el suelo. De aquí surge que la proporción óptima entre arena y suelo se logra cuando el suelo llena los espacios vacíos dejados por la arena. El asfalto, proveniente de la emulsión asfáltica, es el que hace la mezcla insensible al agua. Mediante ensayos sencillos no sólo es posible dosificar correctamente una estabilización de suelos sino también predecir sus características una vez realizado.

En la estabilización con *emulsión asfáltica*, debe evaporarse parte del agua de la mezcla. Esto da como resultado un aumento de la resistencia mecánica de la capa, debido al incremento de cohesión aportada por la fracción arcillosa del suelo. Si bien el tiempo necesario para lograr la mayor resistencia mecánica puede prolongarse por varios meses, la habilitación al tránsito se realiza una vez finalizado el proceso de compactación.

Éste tipo de aglutinantes puede usarse casi con cualquier tipo de material aunque por economía se recomienda que se emplee en suelos gruesos o en materiales triturados que no presenten un alto índice de plasticidad, puede usarse también con las arcillas pero sólo le facilita cierta impermeabilidad, resultando un método muy costoso, además con otros productos se logra mayor eficiencia y menor costo para los suelos plásticos. Es importante que el material pétreo que se va

a mejorar, presente cierta rugosidad para que exista un anclaje adecuado con la película asfáltica, situación que se agrava si el material pétreo no es afín con el producto asfáltico. Algunos *productos asfálticos* contienen agua y si esto no se toma en cuenta se pueden presentar problemas muy serios al momento de compactar, la prueba que más comúnmente se emplea en el laboratorio para determinar el porcentaje adecuado de asfalto a utilizar se conoce como "prueba de valor soporte florida modificada" y el procedimiento consiste en elaborar especímenes de agregados pétreos que presentan cierta humedad usando diferentes porcentajes de asfalto, se compactan con carga estática de 11.34 kg., después de esto se pesan y se introducen a curar al horno a una temperatura de 60°C, se sacan y se penetran hasta la falla o bien hasta que tengan una profundidad de 6.35 mm. registrándose la carga máxima en kg., se efectúa una gráfica para obtener el porcentaje óptimo de emulsión y se recomienda que el material por mejorar presente un equivalente de arena mayor de 40% y el porcentaje de emulsión varíe 1%.⁽¹⁰⁾

3.11.2.4 CLORURO DE SODIO

El *cloruro de sodio* se produce mediante tres métodos, el más antiguo consiste en el empleo de calor solar para producir la evaporación del agua salada, con lo que se obtienen los residuos de sal, otro método consiste en la extracción directa de las minas de sal y el método más reciente consiste en la evaporación del agua de mar, mediante el empleo de hornos.

Generalmente, el procedimiento para estabilizar con *cloruro de sodio* usando un equipo tradicional, es el siguiente:⁽¹⁰⁾

- Escarificación.
- Disgregación.
- Adición de cloruro de sodio.
- Adición del agua.
- Mezclado con motoconformadora.
- Tendido y compactación.

Cuando se intente la *estabilización con sal* deberán tenerse en cuenta las siguientes limitaciones:

- El *cloruro de sodio* es muy útil en climas con problemas de congelamiento.
- Se puede esperar un mejor resultado si el suelo contiene material fino que reaccione con la *sal*.
- La materia orgánica inhibe la acción de la *sal*.
- El rodillo *pata de cabra* no da buenos resultados en la compactación de suelos con *sal* adicionada.
- Es indispensable la intervención de un técnico especializado en todo estudio con *estabilización con sal*, incluyendo las pruebas correspondientes.

Frecuentemente se ha usado el *cloruro de sodio* como un estabilizante de acción no muy durable o como ayuda en la superficie de deslizamiento contra el polvo.

El *cloruro de sodio* es efectivo en todos los suelos, aunque mucho menos en los que contienen materia orgánica. Su efecto estriba en producir reacciones coloidales y en alterar las características del agua contenida en el suelo. Normalmente actúa como floculante y desde este punto de vista suele ayudar en la compactación.⁽⁵⁾

Un uso muy particular, pero prometedor de la *sal* común es la disminución de la permeabilidad que se produce en muchas arcillas, lo que la hace útil para tratar a las arcillas expansivas. La principal desventaja de estos tratamientos es que la sal es muy soluble y, por lo tanto, fácilmente lavada; por esto se le adjudica al principio la calificación de no durable.

3. CONSERVACIÓN Y MEJORAMIENTO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE
3.11.3 ESTABILIZACIÓN MECÁNICA

Ésta comprende una variedad de técnicas para redistribuir, añadir o remover partículas del suelo. El objetivo casi siempre radica en incrementar la densidad del suelo, disminuir el contenido de agua o mejorar la graduación. Las partículas se pueden redistribuir al mezclar las capas de un suelo estratificado, al remodelar un suelo no perturbado o al aumentar la densidad de un suelo. Algunas veces se puede obtener el mejoramiento deseado con un drenaje nada más; sin embargo, con frecuencia se necesita una operación de compactación y además del control el agua. ⁽¹⁰⁾

3.11.3.1 COMPACTACIÓN

3.11.3.1.1 COMPACTACIÓN DE SUELOS

Es el proceso mecánico por el cual se busca mejorar las características de resistencia, compresibilidad y *esfuerzo – deformación* de los mismos; por lo general el proceso implica una reducción más o menos rápida de vacíos y por lo tanto en el suelo ocurren cambios de volumen importantes a la pérdida de aire y no de agua durante la *compactación*.

En la *compactación*, el volumen del suelo se reduce utilizando maquinaria especializada. Al obtenerse un mejor acomodo de las partículas sólidas y la reducción del volumen de aire que contiene el suelo, se produce un aumento de su peso o masa específica o volumétrica, al darle cierto número de pasadas con el equipo adecuado; el tiempo por lo general se mide en horas.

El objetivo principal es el de obtener un suelo mejorado para que tenga un comportamiento mecánico adecuado durante la vida útil del pavimento. Las características a mejorar serían:

- Resistencia.
- Compresibilidad.
- Esfuerzo – deformación.
- Resistencia a la erosión.

Es importante mencionar que la *compactación* resulta ser un proceso de objetivos múltiples, es evidente también que una *compactación* intensa produce un material resistente pero sin duda muy susceptible al agrietamiento, por lo tanto, el proceso debe de ser bien realizado, con un control de calidad y verificación de campo y laboratorio eficiente, un aspecto importante para la *compactación*, es el aumento de *peso volumétrico*, ya que éste va ligado al mejoramiento de las características fundamentales (las ya mencionadas). En los suelos finos, su estructura y la forma de sus partículas hace más difícil mejorar sus características fundamentales que en los suelos gruesos.

VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LA COMPACTACIÓN

Los suelos pueden comportarse de varias formas y en cada caso se tendrá un resultado diferente, y también una forma de *compactación* dará resultados diferentes si se aplica a suelos diversos.

Si una misma forma de *compactación* se aplica a un suelo determinado, podrán obtenerse resultados muy diferentes si de un caso a otro varían ciertas condiciones de los que prevalecen en dicho suelo. Con todo esto se desprende que los resultados de un proceso de *compactación* dependen de varios factores, unos que atañen al tipo de suelo, otros relativos al método de *compactación* que se emplee y por último, varios más que se refieren a determinadas circunstancias que existen en el momento de la *compactación*.

a) La naturaleza del suelo

Es claro que la clase de suelo con que se trabaja influye mucho en el proceso de *compactación* y de hecho deberán de referirse las técnicas a emplear y los resultados que se obtengan con el suelo especificado, se distinguen principalmente a los suelos finos, gruesos, arcillosos y fricciónantes. Una buena selección del procedimiento se refleja en el peso volumétrico seco máximo, obteniendo así mejores resultados. ⁽¹⁰⁾

b) Método de compactación

En el laboratorio resulta bastante fácil clasificar los métodos de *compactación* en uso en tres tipos bien diferenciados: *por impacto*, *por amasado* y *por aplicación de carga estática*. Al tratar métodos de *compactación* diferentes no es posible hacer comparaciones a igual energía de compactación, a causa de los factores imponderables que influyen en la eficiencia del proceso de *compactación* y en la magnitud misma de la energía aplicada al suelo. ⁽¹⁰⁾

c) La energía específica

Se entiende por *energía específica de compactación* la que se entrega al suelo por unidad de volumen, durante el proceso mecánico que se trate. Es muy fácil evaluar la *energía específica* en una prueba de laboratorio. La prueba consiste en compactar el suelo en cuestión en tres capas, dentro de un molde de dimensiones y forma especificadas, por medio de golpes de un pisón, también especificado, que se deja caer libremente desde una altura prefijada. ⁽¹⁰⁾

El molde es un cilindro de 10.2 cm. de diámetro y 11.7 cm. de altura; el pisón es de 2.5 kg. de peso y consta de un vástago en cuyo extremo inferior hay un cilindro metálico de 5 cm. de diámetro. Los golpes se aplican dejando caer el pisón desde una altura de 30.5 cm.

Con los datos anteriores la *energía específica de compactación* es de 6 kg/cm/cm³, calculada con expresión siguiente: ⁽⁹⁾

$$E_c = \frac{N n W h}{V}$$

Donde:

E_c = Energía específica, en kg/cm/cm³.

N = Número de golpes del pisón compactador por cada una de las capas en que se acomoda el suelo en el molde de compactación.

n = Número de capas que se disponen para llenar el molde.

W = Peso del pisón compactador.

h = Altura libre de caída del pisón al aplicar los impactos al suelo.

V = Volumen del molde de compactación igual al volumen total del suelo compactado.

d) El contenido del agua del suelo

Es muy importante, ya que *Proctor* comprobó que es fundamental ésta variable durante el proceso de compactación. *Proctor* observó que con el contenido de agua creciente a partir de valores pequeños se obtendrían más altos pesos específicos secos para el material compactado, si se usa la misma energía de compactación; pero observó también que ésta tendencia no se mantiene indefinidamente, y que cuando la humedad pasa de cierto valor, disminuyen los pesos específicos secos logrados. ⁽¹⁰⁾

Si el material de la primera muestra se compacta dándole una energía de compactación E_1 , por medio de un pisón, ésta energía se empleará principalmente en romper los grumos de material y su grado de compactación será bajo; si a la siguiente muestra de material le agregamos un poco de agua, los meniscos que forman los grumos empezarán a romperse, por lo que al proporcionarle la misma energía de compactación E_1 ésta será más eficiente y se obtendrá un peso volumétrico más alto; si a la tercera muestra le agregamos una mayor cantidad de agua, además de romperse los meniscos, se tendrá una acción lubricante de éste elemento, por lo que el peso volumétrico será todavía mayor; si seguimos aumentando agua a las muestras del material, llega un momento en que baja el peso volumétrico seco, debido a que el agua ocupa el lugar que antes ocupaba parte del suelo y además absorbe parte de la energía de compactación; éste fenómeno es mayor mientras más aumenta el agua. Si los diferentes datos obtenidos se colocan en ejes coordenados, en los que las abscisas corresponden a las humedades de las muestras y las ordenadas a los pesos volumétricos correspondientes, obtenidos al proporcionar la energía de compactación E_1 , se tiene una curva como la que se muestra en la siguiente figura, llamada *curva de compactación*, donde existe un contenido de agua llamado *óptimo* que produce el *máximo peso volumétrico seco*.⁽⁵⁾

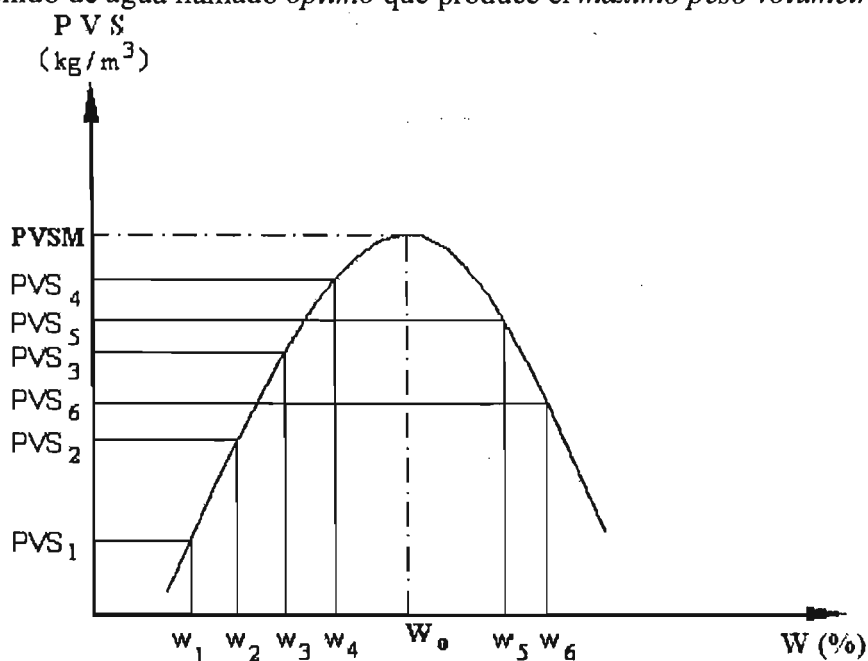


FIGURA 3.15. Curva Proctor que muestra la acción del agua en la compactación de los suelos, el peso volumétrico seco máximo (PVS_M) y la humedad óptima (W_o).⁽⁵⁾

e) Otras variables

Serían el contenido de agua original del suelo, el sentido en el que se recorre la escala de humedades al efectuar la compactación, la recompactación, la temperatura, el número y espesor de capas en las que se va colocando el suelo, el número de pasadas del equipo compactador y el equipo utilizado, etc.⁽¹⁰⁾

GRADO DE COMPACTACIÓN

Se le llama *grado de compactación de un suelo* G_c (%), a la relación en porcentaje, entre el peso volumétrico seco obtenido por el quipo en el campo (γ_d campo) y el peso volumétrico seco máximo (γ_d máx lab.), correspondiente a la prueba del laboratorio. El *grado de compactación* se un suelo es:

$$G_c (\%) = 100 \frac{\gamma_d \text{ campo}}{\gamma_d \text{ máx lab.}}$$

IMPORTANCIA DE LA COMPACTACIÓN

La necesidad de compactar los suelos que habrían de integrar una obra de tierra, como lo son los pavimentos, fue quizás uno de los primeros conocimientos empíricos que el constructor primitivo derivó de su experiencia, posiblemente por accidente. La *compactación* fue entonces generada como medio para obtener obras más duraderas y con mejores propiedades mecánicas para una mejor operación.

El éxito de los *pavimentos flexibles*, depende en gran medida de la importancia de la *compactación*, de la cual se obtendrá un comportamiento adecuado debido a la mejoría de las características mecánicas de las terracerías, de lo contrario el pavimento se empezaría a deformar, a agrietar debido a las cargas impuestas por el tránsito.

RECOMENDACIONES EN TRABAJOS DE COMPACTACIÓN

Tres objetivos principales se buscan en la *compactación de suelos*: ⁽¹⁰⁾

- 1) Reducir la relación de vacíos, por tanto, la permeabilidad del suelo.
- 2) Incrementar la resistencia al corte, con lo que aumenta la capacidad de carga del suelo.
- 3) Lograr que el suelo sea menos susceptible a los cambios de volumen, por tanto, a la tendencia a sufrir asentamientos bajo carga o por la influencia de vibraciones.

La efectividad del proceso de compactación depende de: ⁽¹⁰⁾

- Naturaleza y tipo de suelo (arena o arcilla; uniforme o de buena graduación; plástico o no plástico).
- Contenido de humedad en el momento de colocar el suelo.
- Compactación máxima posible con el suelo considerado.
- Compactación máxima posible en las condiciones de campo.
- Tipo de equipo de compactación que se use.

En general, entre más grande es el compactador, mayor es su fuerza centrífuga y más profunda la capa que puede compactar. Sin embargo, un compactador debe tener suficiente peso en el bastidor delantero para hacer presión hacia abajo en el tambor y dirigir toda la fuerza de *compactación* hacia el suelo. Con la relación correcta del peso del tambor al peso del bastidor, el rodillo no da saltos sobre el material y se evita así una disminución en el esfuerzo de *compactación*.

Además del espesor de la capa, hay que considerar el tipo de suelo cuando se escoge un compactador. Los suelos, ya sean redondos o angulares, bien o mal graduados, se pueden dividir en suelos de partículas gruesas (grava y arena) y suelos de partículas finas (limo y arcilla). Tomando un poco de suelo en la mano para formar una bola, se puede determinar el tipo de suelo. Si la bola permanece aglutinada, el suelo está compuesto mayormente de partículas finas. Si se rompe fácilmente, es que está compuesto de partículas gruesas.

El tamaño del trabajo es otro factor que hay que considerar para escoger un compactador. Las extensiones grandes con capas delgadas que hay que compactar, se pueden hacer con rodillos pequeños. Sin embargo, debido a que éstos son menos anchos, se empleará más tiempo y habrá que hacer más pasadas para lograr la densidad deseada. Por el contrario, si se usa un compactador grande para hacer trabajos pequeños, se invertirá más tiempo tratando de maniobrar alrededor de obstáculos. Además, con un compactador grande es difícil compactar ciertas áreas en espacios reducidos.

PRUEBAS DE COMPACTACIÓN

Debido a la importancia de llevar un control en los trabajos de *compactación* en el campo, se hacen pruebas en laboratorio; aquí se nombrará las de mayor uso, debido a que hay distintas pruebas. Ésta prueba es la *prueba Proctor* que se describe a continuación: ⁽¹⁰⁾

Proctor establece que hay una correspondencia entre el peso volumétrico de un suelo compacto y su resistencia. Consiste en tomar una muestra representativa, de humedad conocida, en un cilindro de 10 cm. de diámetro por 4.5 cm. de altura, el cual se llena en 3 capas, las cuales se compactan, dándole 25 golpes con un martillo de 2.5 kg. con un área de contacto de 20 cm², dejándose caer a una altura de 35 cm., con el objeto de dar al material la misma *energía de compactación*.

Una vez realizado esto se pesa el material, y como el volumen es conocido, se calcula el peso volumétrico húmedo al dividirlo entre su volumen. Como la humedad es conocida, se resta el peso del agua y se obtiene el peso volumétrico seco para esa humedad. Se repite la prueba varias veces, variando la humedad, con lo que se obtendrán pares de valores constituidos por humedad, peso volumétrico seco, y se hace la gráfica siguiente:

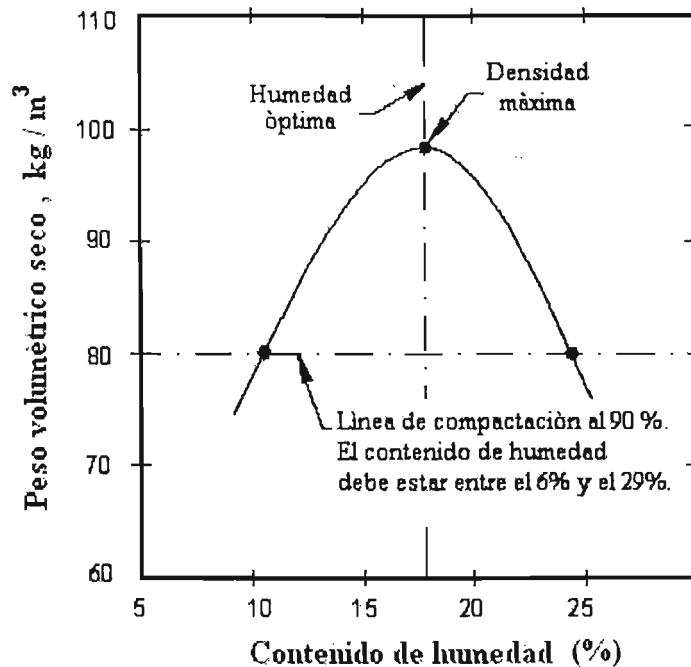


FIGURA 3.16. Curva de compactación típica encontrada por R.R. Proctor. ⁽¹⁰⁾

Según se observa en la figura 3.16 la existencia de un grado de humedad con el cual se obtiene el *peso volumétrico seco máximo*, se le denomina *humedad óptima* (W_o) y *peso volumétrico seco máximo* ($\gamma_d \text{ máx}$) respectivamente. Por ejemplo si el porcentaje de compactación es del 90 %, quiere decir que se debe de obtener un peso volumétrico seco mínimo del 90 % del *PVSM*.

EQUIPO EMPLEADO EN LA COMPACTACIÓN DE SUELOS

CLASIFICACIÓN:

1) **Por impactos:** Que son las pruebas de compactación dinámica.

- AASHTO ESTÁNDAR T 99 - 74. (ver tabla 13).
- AASHTO MODIFICADA T 180 - 74. (ver tabla 13).
- CALIFORNIA.
- TEXAS.

- 2) *Por presión o carga estática*: Como es la prueba de compactación PORTER. (ver tabla 13).
- 3) *Por amasado*: Como es el caso del método de compactación de HVEEM.
- 4) *Por vibración*: Como es el método de compactación en que se utiliza una mesa vibratoria.

PRUEBAS DE COMPACTACIÓN DINÁMICA								
Prueba		Material T. máx	Molde Ø pulg (mm)	Peso del Pisón (kg)	Altura de caída (cm)	Número de capas	Número de golpes	Número de puntos
Tipo (Designación)	Método							
AASHTO Estándar (T 99-74)	A	Malla Nº 4	4 (101.6)	2.5	30.5	3	25	4 a 5
	B	Malla Nº 4	6 (152.4)				56	
	C	3 / 4 "	4 (101.6)				25	
	D	3 / 4 "	6 (152.4)				56	
AASHTO Modificada (T 180-74)	A	Malla Nº 4	4 (101.6)	4.54	45.7	5	25	4 a 5
	B	Malla Nº 4	6 (152.4)				56	
	C	3 / 4 "	4 (101.6)				25	
	D	3 / 4 "	6 (152.4)				56	
PRUEBA DE COMPACTACIÓN ESTÁTICA								
Porter		1 " IP máx 6%	6 (152.4)	27 ton	carga - descarga	3	25 punta de bala	1

TABLA 13. Relación entre diferentes tipos de pruebas de compactación. ⁽¹⁰⁾

FUENTE: Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. The American Association of State Highway and Transportation Officials. Part II. Eleventh Edition. September 1974.

1) *Por impactos*

Consiste en el levantamiento de un objeto por parte de una grúa a una determinada altura, dejándolo caer, el objeto golpea contra la superficie del suelo a una frecuencia baja normalmente a menos de 600 golpes por minuto.

En el proceso de *compactación por impacto*, la duración de la transmisión del esfuerzo es corta. Los equipos que pueden ser clasificados dentro de éste grupo son diferentes pisones que van desde el tipo más elemental de caída libre y accionados manualmente, hasta los equipos de compresión neumática o por combustión interna.

2) *Por presión o carga estática*

La compactación se produce por la acción del peso propio de la máquina para aumentar su densidad. Las máquinas compactadoras de presión se dividen a su vez en máquinas con y sin salientes. Los compactadores sin salientes son los rodillos lisos y los rodillos de neumáticos.

Existe una gran variedad de equipos para obtener la *compactación por presión o carga estática*:

a) **Rodillos lisos o metálicos**

Son remolcados y autopropulsados, su peso varía de 14 a 20 toneladas. Se usa en materiales que no requieren de concentración elevada de presión, disgregación de grumos o amasado. El efecto de la compactación es de arriba hacia abajo, disminuyendo el efecto con el espesor, usualmente de 10 a 20 cm.

Conocidos también como *rodillos de ruedas de acero*, son especialmente utilizados para suelos sin cohesión, con o sin vibración incluida, son los más eficientes para compactar grava y arena con un bajo contenido de partículas finas.

Las fuerzas vibratorias generadas por los *compactadores de rodillo liso* reagrupan las partículas del suelo, lo cual disminuye los vacíos entre ellas y aumenta la densidad del suelo. Son empleados para la compactación final de *capas subrasantes y sub – bases*.

Dentro de éste grupo se puede hacer la siguiente división:

- *Planchas tándem*; son aquellas que tienen 2 o 3 rodillos metálicos paralelos.
- *Planchas de 3 ruedas*; estas planchas tienen 2 ruedas traseras paralelas y una rueda delantera paralela.

Tanto las *planchas tándem* como las de 3 *rodillos*, tienen baja velocidad de operación y poca seguridad al compactar las orillas de terraplenes altos. Los *compactadores tándem* se utilizan con efectividad para nivelar los puntos altos dejados por rodillos *patas de cabra*, *vibratorios* o *de neumáticos*. Sin embargo, éste tipo de compactación tiene una tracción limitada.

En la tabla 14 se pueden observar algunas características de uso de éste equipo de *compactación*.

b) **Rodillos neumáticos (llantas de caucho infladas con aire).**

Pueden ser remolcados pero generalmente son autopropulsados. El acabado superficial rugoso que se obtiene con estos rodillos, garantiza una buena adhesión entre la capa ya compactada y con la que se va a colocar encima de ella. Son utilizados para suelos arenosos con finos plásticos.

Son muy eficientes y esenciales en la compactación de *sub-bases, bases y carpetas asfálticas*. Estos compactadores pueden ser divididos de acuerdo al tamaño de sus llantas:

- *De llantas pequeñas*; generalmente tiene 2 ejes tándem y el número de llantas puede variar entre 4 y 13. Las llantas están arregladas de tal manera que las llantas traseras traslapan con las llantas delanteras. En algunos equipos se tienen montadas llantas que oscilan o bailan al rodar, lo que aumenta su efecto de amasamiento.
- *De llantas grandes*; son generalmente arrastradas por un tractor y pesan de 15 a 50 toneladas. Tienen 4 o 6 llantas en un mismo eje. Existen 2 factores de importancia en éste tipo de compactadores: el peso total del compactador y la presión de inflado de las llantas.

Los *rodillos neumáticos* tienen mayor maniobrabilidad, no empujan mucho material al frente de los neumáticos, y en general, estos equipos tienen gran utilidad para sellar las capas superiores, con lo que se logra una buena impermeabilidad; están limitadas a una compactación de poca profundidad.

En la tabla 14 se pueden observar algunas características de uso de éste equipo de *compactación*.

c) Rodillos segmentados (compactadores de rueda segmentada)

Diseñados para suelos cohesivos, formados por tres capas enlazadas entre sí, de aro interrumpido, lo cual forma la segmentación.

En la tabla 14 se pueden observar algunas características de uso de éste equipo de *compactación*.

d) Rodillos “pata de carnero”

Conocidos también con el nombre de *rodillos apisonadores*, tienen patas pequeñas y rectangulares semejantes al rodillo *patas de cabra*. Apropriados para suelos cohesivos.

3) Por amasado

Éste método amasa al suelo para compactarlo; éste proceso origina una distribución uniforme de *energía de compactación* en cada capa y una buena liga entre las sucesivas. Su utilización es óptima para los suelos finos.

a) Rodillos “pata de cabra”

Estos compactadores tienen un peso de 2 a 20 toneladas y un ancho de 0.76 a 2.54 m., tienen como elementos activos unos cilindros metálicos erizados, generalmente fijos, llamadas *patas de cabra*; cuya longitud es poco variable (17 a 26 cm.), y su superficie de apoyo es alrededor de 10 cm², su forma de apoyo puede ser circular, cuadrada o rectangular. Estos compactadores concentran la fuerza de *compactación* sobre la pequeña área del conjunto de *patas*, ejerciendo una fuerza estática muy grande en las *patas* que penetran el suelo. Conforme avanza el proceso de *compactación*, las *patas* penetran cada vez menos llegando al punto en que no presenta una *compactación* adicional; en una profundidad aproximada de 6 cm., la superficie siempre queda distorsionada, compactándose ésta al tender la siguiente capa.

Normalmente éste equipo tiene su mejor efectividad en capas con espesores de entre 25 y 65 cm.

Apropriados para suelos cohesivos, son generalmente remolcados por un tractor de orugas o de neumáticos. Presenta beneficios como son: distribución de la energía de *compactación* en cada capa, romper trozos de arcillas que no pueden ser desintegrados por otros métodos, proporcionar una buena adhesión entre capas debido a la irregularidad de la superficie que se produce al pasar.

En la tabla 14 se pueden observar algunas características de uso de éste equipo de *compactación*.

b) Rodillos de malla o de rejilla

Es utilizado principalmente para materiales que requiere disgregación, en el cilindro tiene como superficie lateral un enrejado. Utilizados para suelos rocosos, gravas y arenas.

En la tabla 14 se pueden observar algunas características de uso de éste equipo de *compactación*.

4) *Por vibración*

Por último se tienen los *compactadores vibratorios*, que transmiten ondas dinámicas a los materiales y les producen un acomodo masivo; son muy efectivos para compactar materiales inertes como gravas y arenas. Su ventaja principal es la de trabajar con capas de gran espesor, aumentando el rendimiento y reduciendo el costo de operación. Los espesores que se trabajan, van desde 0.60 a 1.20 m; existen de una sola rueda, en triciclo, tipo tandem, triajes y dobles, generalmente.

Hay varios factores que intervienen en la *compactación vibratoria*, y además influyen substancialmente en el resultado y rendimiento del equipo; los principales son:

- 1) La frecuencia a la que vibra el tambor, normalmente a más de 1500 vibraciones por minuto.
- 2) El peso del equipo de compactación.
- 3) La amplitud, es decir lo alto que sube el tambor.
- 4) El empuje dinámico que se genera en cada impacto.
- 5) La forma y tamaño del área de contacto del vibrador con el suelo.
- 6) La estabilidad de la máquina.
- 7) La fuerza centrífuga, o energía, en *kiloNewtons* (kN) transmitida sobre el área de contacto del tambor con el suelo, determinada por el ancho y el diámetro del tambor.

En la *compactación vibratoria*, las ondas de energía que se transmiten al suelo disminuyen el roce entre las partículas del suelo, lo cual hace que las partículas se aglutinen más apretadamente. Las ondas de energía empiezan en la parte de abajo de la capa que se está compactando y se transmiten hacia arriba. Esto reagrupa las partículas, disminuye los vacíos y aumenta la densidad del suelo. La elección de una máquina que pueda compactar todo el espesor de la capa es esencial para lograr un buen resultado.

Los *rodillos vibratorios* funcionan con una rápida sucesión de impactos contra el suelo (Fig. 3.17), estos impactos se generan por un rodillo excéntrico, que produce fuerzas y presiones que se transmiten al suelo. Cada ciclo de carga genera una onda de presión que va perdiendo intensidad a medida que se aleja del tambor. Las características de cada onda dependen de las propiedades del suelo, ya que reaccionan de una manera diferente a la hora de ser sometidos a vibraciones. La utilidad de los equipos vibratorios está en su capacidad de compactar una gran variedad de suelos con mayor profundidad y en menor tiempo que con los equipos convencionales estáticos.

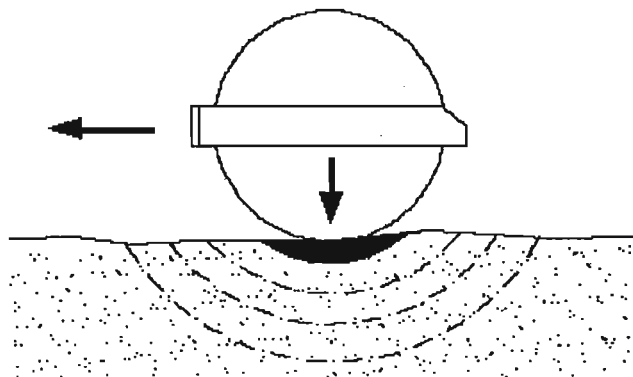


FIGURA 3.17. Ondas de compactación. ⁽¹⁰⁾

Si no se hace la *compactación* correctamente en todo el espesor de la capa, la parte de arriba queda bien compactada, pero la de abajo queda suelta; esto crea una condición llamada "puente", donde el material compactado "flota" sobre el suelo sin compactar, lo cual es una causa común de fallas prematuras.

Equipo de compactación	Característica	Suelo	Espesor de capa (cm)	Pasadas
Liso		Gravas	10 – 20	4 a 8
Neumático	La presión de inflado depende del tipo de suelo.	Arenas, limos y arcillas	20 – 25	3 a 6
Pata de cabra	El tamaño de las patas depende del tipo de suelo.	Arcilloso	15	4 a 8
Segmentado		Cohesivo	15 – 30	4 a 8
Rejillas		Rocoso, gravas y arenas	10 – 20	4 a 8
Pisón mecánico		Todos	10 – 15	2

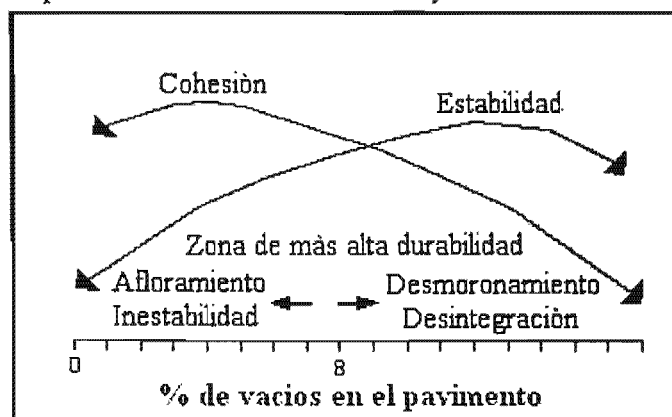
TABLA 14. Características de uso de algunos equipos de compactación. ⁽¹⁰⁾

Una vez que se han considerado estos factores, el Ingeniero constructor puede determinar si necesita un rodillo vibratorio, estático o de impacto; con tambor liso o de pata de cabra, para hacer conversiones; una unidad grande o pequeña, con o sin mando en el tambor y, finalmente, el ancho del tambor y la fuerza centrífuga que se requieren para cada aplicación. La selección de la unidad correcta maximiza el trabajo y reduce la posibilidad de fallas estructurales después que se ha terminado el proyecto, y lo más importante, obtener una compactación al mínimo costo.

3.11.3.1.2 COMPACTACIÓN DE LA CARPETA ASFÁLTICA

La compactación es un proceso que consiste en comprimir un volumen dado de la *carpeta asfáltica en caliente*, en uno más pequeño. Esto se consigue al comprimir las partículas de agregado, revestidas de asfalto, eliminando así la mayoría de los vacíos (espacios), en la mezcla y aumentando la densidad (proporción de peso a volumen), de la misma. Se considera que la compactación ha sido exitosa cuando la carpeta terminada tiene contenidos óptimos de vacíos y de densidad.

El contenido óptimo de vacíos, en un pavimento recién construido, es de 8% o menos para mezclas densamente graduadas. En éste nivel, los vacíos no están, generalmente, interconectados. La Fig. 3.18 es una representación gráfica del efecto de los vacíos sobre la durabilidad del pavimento. Cuando el contenido de vacíos es demasiado alto, el pavimento tiende a presentar desmoronamiento y desintegración. Cuando el contenido de vacíos es demasiado bajo, hay peligro que el pavimento presente exudación de asfalto y se vuelva inestable. ⁽¹¹⁾

FIGURA 3.18. Durabilidad del pavimento en relación al contenido de vacíos. ⁽¹¹⁾

La *compactación* logra dos objetivos importantes al comprimir las partículas de agregado:

- 1) La resistencia.
- 2) La estabilidad de la mezcla.

La mecánica de la *compactación* involucra tres tipos de fuerzas actuantes durante el proceso de *compactación*. Estas son: las fuerzas de compresión de los rodillos, las fuerzas en la mezcla que resisten las fuerzas de los rodillos y las fuerzas de soporte proporcionadas por la superficie que se encuentran debajo de la carpeta. La *compactación* y la densidad pueden obtenerse solamente cuando la mezcla logra ser confinada adecuadamente.

Para que ocurra la *compactación*, la fuerza de compresión del rodillo, asociada con las fuerzas opuestas proporcionadas por la superficie de la carpeta debe vencer las fuerzas resistentes de la carpeta. La Fig. 3.19 ilustra éste concepto. ⁽¹¹⁾

La fuerza de compresión de los rodillos proviene del peso de los rodillos o de una combinación de peso y energía dinámica de los rodillos.

Las fuerzas de soporte de la capa inferior provienen de la estabilidad y firmeza de la misma. Igualmente, las fuerzas resistentes de la mezcla provienen de la fricción entre las partículas del agregado y de la viscosidad del asfalto. Estas fuerzas resistentes aumentan a medida que la densidad aumenta mientras la mezcla se enfría. Cuando la densidad y la temperatura de la mezcla alcanzan el punto en donde las fuerzas resistentes de la mezcla igualan la fuerza compresiva de los rodillos y las fuerzas resistentes de la capa inferior, se logra un equilibrio y se completa el proceso de *compactación*. ⁽¹¹⁾

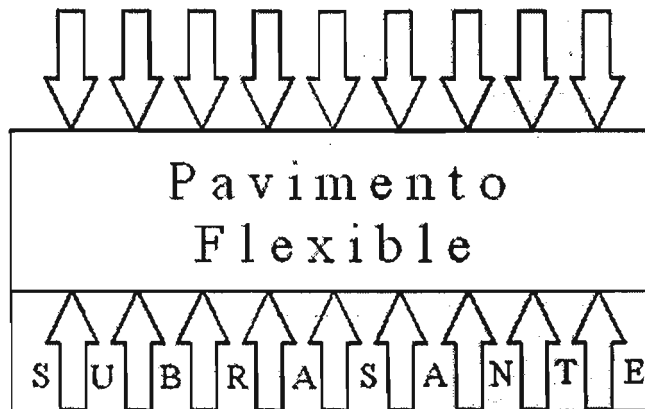


FIGURA 3.19. Fuerzas activas durante la compactación. ⁽¹¹⁾

Los factores que afectan la *compactación* pueden dividirse en tres clases:

- a) Propiedades de la mezcla.
- b) Condiciones ambientales.
- c) Espesor de la capa.

1) PROPIEDADES DE LA MEZCLA

Ciertas propiedades del agregado y del asfalto tienen un efecto pronunciado sobre la trabajabilidad de la mezcla, a diferentes temperaturas:

- **Agregado**

La granulometría, la textura superficial y la angulosidad del agregado, son las principales características que afectan la trabajabilidad de la mezcla. A medida que aumenta el tamaño máximo de agregado, o el porcentaje de agregados gruesos en la mezcla, la trabajabilidad

disminuye y por consiguiente se requiere un mayor esfuerzo de *compactación* para obtener la densidad de referencia.

Las arenas naturales son añadidas a las mezclas, con frecuencia, para buscar economía. Una mezcla con demasiada arena, especialmente en los tamaños medianos (alrededor de la malla N°30), puede resultar en una mezcla con alta trabajabilidad pero poca estabilidad. La mezcla debe tener suficientes finos para que se combinen con el asfalto y puedan producir la cohesión necesaria cuando la mezcla se enfríe. La adición de relleno mineral ayudará a compensar las propiedades desfavorables de las mezclas que contienen demasiada arena. Por otro lado, si la arena contiene demasiados finos, se volverá "gomosa" y será muy difícil de compactar. ⁽¹¹⁾

- **Asfalto**

A temperatura ambiente el asfalto es virtualmente sólido, mientras que a temperaturas entre 120°C y 150°C es completamente fluido. El asfalto trabaja como lubricante durante la *compactación*. A medida que la mezcla se enfría, el asfalto pierde fluidez (se vuelve más viscoso). Es así como a temperaturas por debajo de 85°C el asfalto, en combinación con los finos de la mezcla, comienza a ligar firmemente las partículas de agregado. En consecuencia, la compactación de la mezcla se hace extremadamente difícil cuando se ha enfriado por debajo de 85°C. ⁽¹¹⁾

La trabajabilidad también está afectada por la cantidad de asfalto en la mezcla. A medida que aumenta el contenido de asfalto, el espesor de la película de asfalto sobre las partículas de agregado también aumenta. Éste aumento de espesor de película aumenta, a su vez, el efecto lubricante del asfalto a las temperaturas de compactación hasta cierto punto hace que la compactación sea más fácil de efectuar.

- **Temperatura de mezclado**

Hasta cierto nivel, entre más caliente esté la mezcla, más fluido será el asfalto y menos resistente será la mezcla bajo la *compactación*. El límite superior para la temperatura de la mezcla es de aproximadamente 163°C. Las temperaturas más altas pueden dañar el asfalto. La mejor temperatura para empezar a compactar la mezcla, dentro del margen de temperaturas de 163°C a 85°C, es la máxima temperatura a la cual la mezcla puede resistir el rodillo sin desplazarse horizontalmente. ⁽¹¹⁾

2) CONDICIONES AMBIENTALES

Como se explicó anteriormente, la velocidad a la cual se enfría la mezcla afecta la duración de tiempo durante el cual se puede, y se debe, lograr la densidad deseada. La temperatura ambiental, la humedad, el viento y la temperatura de la superficie debajo de la mezcla afectan la velocidad de enfriamiento. Las temperaturas ambientales frías, la humedad alta, los vientos fuertes y las superficies frías acortan el tiempo durante el cual se debe efectuar la *compactación*.

3) ESPESOR DE LA CAPA

En general, es más fácil lograr la densidad de referencia con capas gruesas de concreto asfáltico que con capas delgadas. Esto se debe a que entre más gruesa sea la carpeta, más tiempo demora en enfriarse, y por lo tanto, hay más tiempo para lograr una *compactación* adecuada. Éste hecho puede usarse ventajosamente para colocar capas de mezclas con alta estabilidad que sean difíciles de compactar, o cuando es necesario pavimentar bajo condiciones ambientales que causen enfriamiento rápidos en capas delgadas. Por otro lado, un aumento en el espesor de la capa permite que las temperaturas de la mezcla sean más bajas debido a la disminución en la velocidad de enfriamiento. ⁽¹¹⁾

3. CONSERVACIÓN Y MEJORAMIENTO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

COMPACTADORES ⁽¹¹⁾

Normalmente se requieren compactadoras automotrices para la compactación de mezclas de concreto asfáltico. No se deben usar compactadoras tipo remolque, pero se pueden usar compactadoras de mano o placas vibratorias en las áreas que sean inaccesibles a las compactadoras grandes. Las compactadoras típicas abarcan los tres tipos siguientes:

- Tándem de ruedas de acero.
- Ruedas neumáticas.
- Vibratoria.

Todo tipo de compactadora debe ser inspeccionada antes de ser usada en la obra para verificar que se encuentre en buena condición mecánica. Cuando sea de importancia, se deben revisar los siguientes detalles:

- Peso total de la compactadora.
- Peso por unidad de ancho (para compactadora de ruedas de acero).
- Esfuerzo promedio de contacto (compactadoras neumáticas).

1) Compactadoras Tándem de ruedas de acero

Las *compactadoras Tándem* de ruedas de acero tienen ruedas o rodillos de acero, generalmente montados sobre dos ejes tándem. Típicamente, estas compactadoras varían en peso desde 3 hasta 14 toneladas y a veces más. En casi todas se pueden añadir balastos a las ruedas con el fin de aumentar el peso. Para la construcción de calles, carreteras y pavimentos de tránsito denso se requiere como mínimo un peso bruto de 10 toneladas. Éste tipo de compactadoras puede usarse para la primera pasada, la *compactación* intermedia y la *compactación* final (últimas pasadas). Para estas últimas pasadas se requiere un peso bruto mínimo de 8 a 10 toneladas.

El rodillo compactador (rodillo impulsor) de las *compactadoras tándem de ruedas de acero* debe impartir, como mínimo 4500 kg/ml de ancho cuando es usado en la primera pasada o en la *compactación* intermedia. ⁽¹¹⁾

2) Compactadoras de ruedas neumáticas

Las *compactadoras de ruedas neumáticas* tienen ruedas de caucho en vez de ruedas o rodillos de acero. Generalmente poseen dos ejes tándem con 3 o 4 ruedas en el eje delantero y 4 o 5 ruedas en el eje trasero. Las ruedas se mueven independientemente hacia arriba y hacia abajo. Las *compactadoras de ruedas neumáticas* pueden cargar un balasto (lastre) para ajustar el peso bruto total. Éste balasto, dependiendo del tamaño y el tipo, puede variar entre 10 y 35 toneladas. Sin embargo, más importante que el peso bruto es el peso de cada rueda, el cual debe variar entre 1350 y 1600 kg. si la compactadora va a ser usada para la primera pasada de *compactación* o para la *compactación* intermedia.

Éste tipo de compactadora puede estar equipada con ruedas de 380, 430, 511 o 610 mm. de diámetro. Durante la *compactación*, las ruedas deben tener rodaduras lisas y deben estar infladas con la misma presión, permitiendo una variación máxima de 35 kPa (5 psi), para que puedan aplicar una presión uniforme durante la *compactación*.

Los requerimientos deseados en las compactadoras de ruedas neumáticas, para la primera *compactación* y la *compactación* intermedia son: ⁽¹¹⁾

- Un peso de rueda de 1350 a 1600 kg.
- Un diámetro mínimo de rueda de 510 mm.

- Una presión de rueda de 480 a 520 kPa cuando la rueda está fría y de 620 kPa cuando está caliente.

Cuando se usa una compactadora de *ruedas neumáticas* para el amasamiento de una superficie asfáltica terminada es deseable tener los siguientes requerimientos:

- Un peso mínimo de rueda de 6820 kg.
- Un diámetro mínimo de rueda de 380 mm.
- Una presión de rueda de 345 a 415 kPa.

3) Compactadoras vibratorias

Las *compactadoras vibratorias* proporcionan la fuerza compactadora mediante una combinación del peso y la vibración de sus rodillos de acero, comúnmente llamados *tambores*. Las compactadoras usadas para concreto asfáltico son automotrices y varían en peso desde 7 hasta 17 toneladas. Existen dos modelos básicos: las unidades de *tambor sencillo* y las unidades de *tambor doble*.

La propulsión de los modelos de *tambor sencillo* es proporcionada por *ruedas de acero* o *ruedas neumáticas*. La propulsión de los modelos de *tambor doble* es proporcionada, usualmente, por ambos tambores, aunque existe al menos una clase de compactadora que posee dos ruedas impulsoras de acero situadas entre los dos tambores vibratorios. Los tambores de las compactadoras vibratorias varían en diámetro desde 0.9 hasta 1.5 m. y en ancho desde 1.2 hasta 2.4 m. sus pesos estáticos, en términos del ancho del tambor, están generalmente entre 29 y 32 kg/cm de ancho.

El motor que proporciona la potencia para la propulsión también suministra potencia a la unidad vibratoria. Las vibraciones son generadas por la rotación de un peso excéntrico dentro del tambor. Ésta velocidad de rotación determina la frecuencia o vibraciones por minuto (vpm), del tambor. El peso y la longitud de excentricidad (distancia desde el eje), determinan la amplitud (cantidad), de la fuerza de impacto generada. La frecuencia y la amplitud de las vibraciones están controladas independientemente de la velocidad del motor y del recorrido de la compactadora. La frecuencia de vibración de los tambores usados para la *compactación* de concreto asfáltico se encuentra generalmente entre 2000 y 3000 vpm, dependiendo del modelo y el fabricante.⁽¹¹⁾

REQUISITOS DE COMPACTACIÓN

Se han efectuado varios estudios sobre las tasas de enfriamiento de mezclas, bajo condiciones variables de temperatura de mezcla, espesor de capa y temperatura de la capa de soporte. La temperatura provee una indicación bastante precisa del intervalo de tiempo necesario para obtener la densidad de referencia (Fig. 3.20). Ésta aproximación puede usarse para determinar el número requerido de compactadoras en la obra.

Se debe planear y usar un patrón de *compactación* que proporcione el cubrimiento más uniforme posible en el carril que está siendo pavimentado. Debido a que las compactadoras son producidas con diferentes anchos, es imposible diseñar un patrón que pueda aplicarse a todas las compactadoras. Por ésta razón, el mejor patrón, para un tipo dado de compactadora, se obtiene por medio de un tramo de prueba:

- 1) Antes de usar un patrón de prueba se debe tomar una decisión respecto a la manera de cómo se van a operar los siguientes aspectos de la compactadora:
- Velocidad.
 - Patrón de recorrido para el ancho de la pavimentación.
 - Número de pasadas.
 - Selección de la zona de operación de la compactadora detrás del asfaltador.

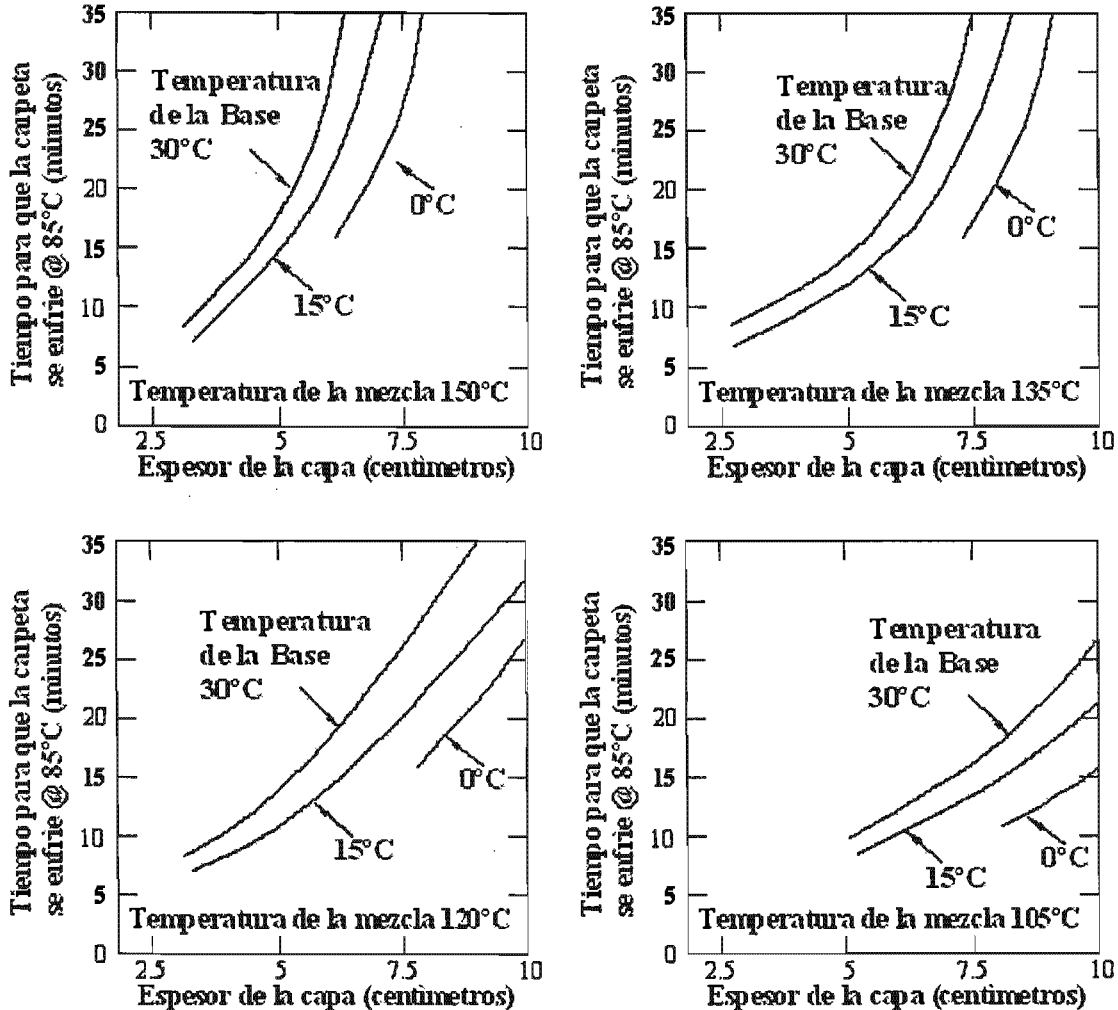


FIGURA 3.20. Tiempo permitido para la compactación, basado en la temperatura y espesor de la mezcla y la temperatura de la capa de soporte. ⁽¹¹⁾

- 2) Si el tramo de prueba no cumple con las especificaciones, se debe efectuar una serie nueva de tramos de prueba. Para esto se recomienda el siguiente procedimiento:
- Disminuya la velocidad de la compactadora.
 - Tome una medida nuclear de 15 segundos con el densímetro nuclear después de cada pasada o recorrido de ida y vuelta, hasta que el calibrador indique una densidad adecuada (dentro de las especificaciones).
 - Trate una velocidad mayor usando el mismo número de pasadas. Utilice el densímetro nuclear para ver si todavía se consigue una densidad adecuada, y si es así, continúe aumentando la velocidad, con el mismo número de pasadas, hasta que la densidad sea inadecuada (no cumpla con las especificaciones). Después disminuya la velocidad hasta el punto donde se obtenga la máxima velocidad que cumpla con las especificaciones de densidad en el menor número de pasadas.

- d) La velocidad correcta de *compactación* es, siempre, un balance entre la *compactación* rápida para conseguir productividad y la *compactación* necesaria para cumplir con las especificaciones de densidad y terminado. Por lo tanto, si la velocidad escogida conduce a una densidad hasta que desaparezcan los defectos.
- 3) El patrón de compactación para la franja de prueba deberá ser el mismo patrón que será usado en la obra.
- Nunca use un patrón más lento que aquel seleccionado para la obra.
 - Nunca use más pasadas que aquellas seleccionadas para la obra. De otra manera encontrará que el compactador tendrá problemas en mantener el ritmo del asfaldador.
- 4) Es muy importante reconocer el hecho de que todas las técnicas de operación están regidas por el comportamiento de la mezcla durante el proceso de *compactación*. Éste comportamiento varía de obra en obra y de capa en capa. Por lo tanto, las normas no son absolutas y tan sólo deben ser consideradas como una guía.

SECUENCIA DE LAS OPERACIONES DE COMPACTACIÓN

Como se mencionó anteriormente, existen tres tipos de operaciones de *compactación*. Estos son:

- *Compactación inicial*. La primera pasada de la compactadora sobre la capa recién colocada.
- *Compactación intermedia*. Todas las pasadas siguientes de la compactadora para obtener la densidad requerida antes de que la mezcla se enfríe por debajo de 85°C.
- *Compactación final*. La compactación efectuada solamente para mejorar la superficie mientras la mezcla todavía está lo suficiente caliente para permitir la eliminación de cualquier marca de la compactadora.

Las dos primeras operaciones (inicial e intermedia), deben seguir una secuencia específica para garantizar que la carpeta obtenga la densidad, forma y lisura deseadas. La secuencia dicta que partes de la carpeta deben ser compactadas primero y cuales al final. Además, la secuencia es diferente para capas delgadas que para capas gruesas. ⁽¹¹⁾

REQUISITOS DE APROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL PAVIMENTO

La calidad del pavimento depende de que tanto éxito se logre en el proceso de *compactación*. Generalmente se usan tres criterios para juzgar la aprobación de una carpeta terminada; estos son: *textura superficial*, *tolerancia de la superficie* y *densidad*.

- **Textura superficial**

Los defectos en la *textura superficial* pueden ser causados por errores en el mezclado, en el manejo, en la *pavimentación* o en la *compactación*. Una mezcla defectuosa por causa de un mezclado, un manejo o una colocación inadecuada, deberá ser removida y reemplazada antes de la *compactación*. Los defectos que aparezcan durante la *compactación* y que no puedan ser corregidos con pasadas adicionales, deberán ser reemplazados con mezcla elaborada en caliente fresca antes de que la temperatura de la carpeta que está alrededor baje de los 85°C. Se deberá tener cuidado en toda área reparada de asegurar que se mantenga la rasante correcta y que la tolerancia de la superficie cumpla con las especificaciones.

- **Tolerancia de la superficie**

Las variaciones en la uniformidad de la carpeta no deberán exceder de 6 mm. bajo una regla reta de 3 m. colocada perpendicularmente a la línea central, y 3 mm. cuando está sea colocada paralelamente a la línea central. En algunos casos se usa una regla recta con rodamientos, la cual mide y registra sobre un gráfico continuo, variaciones de la superficie. Las variaciones registradas son luego sumadas y reportadas como aspereza de superficie en *mm/km*.

- **Densidad**

La *densidad* del pavimento se considera aceptable, o no, cuando se compara con la *densidad de referencia* en el laboratorio usando una muestra de campo. La *densidad* del pavimento puede variar en un porcentaje promedio, establecido por las especificaciones, respecto a la *densidad de referencia*.

Existen tres métodos básicos para determinar la *densidad de referencia*, estos son: *porcentaje de la densidad de laboratorio*, *porcentaje de la densidad máxima teórica* y *densidad de la sección de prueba (franja de control)*. El objetivo de los tres métodos es el obtener un pavimento compactado que tenga, en promedio, un contenido de vacíos de 8% o menos. ⁽¹¹⁾

REQUISITOS DE VERIFICACIÓN

- **Pruebas**

Las *pruebas* para verificar la *compactación* pueden efectuarse usando núcleos de mezcla del pavimento terminado, o medidores nucleares de densidad (Fig. 3.21). De cualquier forma, las lecturas de densidad nuclear deberán ser correlacionadas con densidades de núcleos. Los densímetros nucleares presentan dos ventajas sobre el muestro de núcleos, *una es que son rápidos y fáciles de usar y la otra es que son no destructivos*. ⁽¹¹⁾

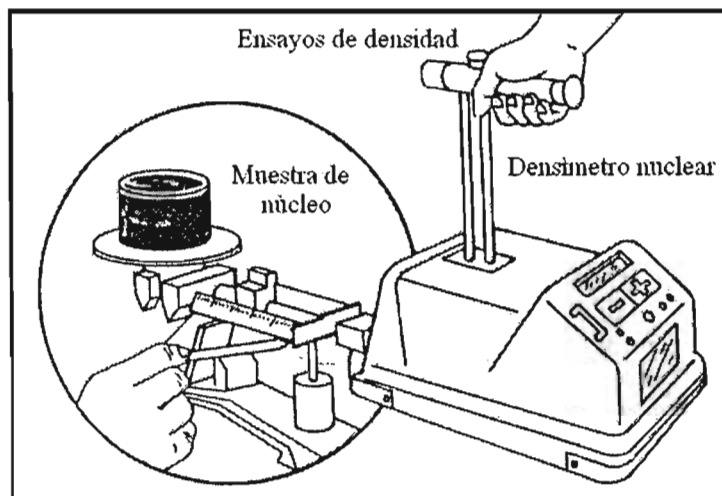


FIGURA 3.21. Pruebas de densidad. ⁽¹¹⁾

Las pruebas, usando cualquier método, deben ser aleatorias, con un número mínimo de ensayos o núcleos para cada lote de mezcla (usualmente la producción de un día). El promedio de las densidades obtenidas en las pruebas debe satisfacer uno, o más, de los siguientes criterios, dependiendo del método usado para establecer la densidad de referencia: ⁽¹¹⁾

- 96 % de la densidad de laboratorio,
- 92 % de la densidad máxima teórica,
- 99 % de la densidad de la franja de control.

- **Muestreo**

Las *muestras* usadas para verificar la densidad deben ser extraídas con una sierra de punta de diamante, o una máquina saca-núcleos, con el fin de minimizar el daño que pueda ocurrir en el pavimento y en las muestras. Si el pavimento no se ha enfriado a la temperatura ambiente, hasta la profundidad de la muestra, entonces puede usarse hielo para acelerar el proceso. ⁽¹¹⁾

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

OBJETIVO PARTICULAR:

Describir la mejor propuesta de la manera más factible y económica para la conservación de la carpeta asfáltica, evaluando y analizando la funcionalidad, el beneficio-costos del mantenimiento y operación del tratamiento que se lleve a cabo.

4.1 INTRODUCCIÓN

4.2 COSTOS

- 4.2.1 *COSTO INICIAL*
- 4.2.2 *COSTO DE CONSERVACIÓN*
- 4.2.3 *COSTO DE OPERACIÓN*
- 4.2.4 *COSTO DE RESCATE*

4.3 ELABORACIÓN DEL PROYECTO

- 4.3.1 *PLANOS*
- 4.3.2 *ESPECIFICACIONES*
- 4.3.3 *PROYECCIÓN DEL TRÁNSITO*
- 4.3.4 *BANCOS DE MATERIALES*
- 4.3.5 *SEÑALAMIENTO HORIZONTAL Y VERTICAL*
- 4.3.6 *DERECHO DE VÍA*
- 4.3.7 *CONTROL DE CALIDAD*
- 4.3.8 *ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO*

4.4 EVALUACIÓN DE PROYECTOS

- 4.4.1 *EVALUACIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO*
- 4.4.2 *EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO*
- 4.4.3 *EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO*

4.5 TÉCNICAS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA

4.6 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE TÉCNICAS

4.7 SISTEMAS DE ADMINISTRACIÓN DE PAVIMENTOS

- 4.7.1 *SISTEMA "PAVEMENT EVALUATOR"*
- 4.7.2 *SISTEMA "CAPUFE"*

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.

4.1 INTRODUCCIÓN

Los estudios económicos dirigidos principalmente a las carreteras, se hacen por una o más de las siguientes razones:

- Para determinar la viabilidad de un proyecto.
- Para evaluar diferentes aspectos del diseño de carreteras.
- Para determinar la prioridad de mejoramientos.
- Para asignar la responsabilidad de los costos de mejoramiento de las carreteras entre las diferentes clases de usuarios.
- Ocasionalmente, para comparar proyectos de mejoramiento de carreteras de otros proyectos públicos como la educación, salud, etc.

La realización de análisis económicos en la *Ingeniería de Pavimentos* ha recibido gran atención en años recientes, debido a que constituye un elemento fundamental para la toma de decisiones. Dichos análisis pueden efectuarse por un proyecto en particular o para toda una red, extendiéndose su aplicación tanto al campo de los pavimentos nuevos como en casos de su conservación, rehabilitación y refuerzo.

Los *pavimentos flexibles* no fallan catastróficamente, sino que son sometidos a un proceso de degradación de sus características, como *calidad de rodamiento, seguridad, capacidad estructural y en su integridad general, al paso del tránsito y del tiempo*. La rapidez con que se lleva a cabo éste proceso depende, entre otras cosas, de lo adecuado del proyecto, de la calidad de la construcción, de las características de los materiales, de la influencia de los factores ambientales, etc., así como del nivel de conservación que se aplique al pavimento.

En el caso de un proyecto de una carretera, su documento se suele integrar por varios estudios parciales tales como: *estudio de mercado, estudio técnico y el estudio financiero*, en los cuales se pretende tomar decisiones en forma interactiva, proceso que se va caracterizando al proyecto en los diferentes aspectos y que económicamente se reduce a una serie de ingresos y gastos en el tiempo, lo cual conforma un flujo de efectivo total correspondiente a ese proceso de decisiones.

Lo anterior lleva a la necesidad de que el Ingeniero Civil realmente domine una serie de técnicas que le permitan mejorar su proceso de toma de decisiones en problemas de selección de alternativas, tanto en escenarios determinísticos como en probabilísticos, incluyendo situaciones donde no sea suficiente observar solamente el comportamiento de las consecuencias económicas.

4.2 COSTOS

4.2.1 COSTO INICIAL

El *costo inicial* corresponde al costo del proyecto como pavimento nuevo, así como para cada una de las estrategias propuestas de mejoramiento, rehabilitación o refuerzo, cubriendo todo el espectro de posibles soluciones para un problema, debiendo considerar todos los tipos de pavimentos, materiales, espesores, técnicas, etc., disponibles según la tecnología del momento.

Porque en la construcción de carreteras, éstas pueden realizarse con fondos prestados y estos se deben pagar con el interés que se obtenga. Por otra parte si la obra se financia con los ingresos del propietario, el interés es una carga fija de la obra que debe compensar la pérdida de poder adquisitivo del "dinero congelado" con ella.

En casos de fondos públicos obtenidos mediante impuestos, estos fondos, si no hubieran sido inmovilizados de ésta forma, podrían haber sido inventados por el público para obtener una contabilidad segura y razonable y por consiguiente, el interés del dinero representa un costo.

Debe calcularse el costo de cada una de las estrategias consideradas, lo que implica conocer los volúmenes de materiales que intervienen o el tipo de técnica aplicada y por otro lado, el precio unitario correspondiente. De ésta manera, el organismo debe contar con información relativa a las estrategias que puede aplicar, su costo y además la vida útil de cada una de ellas, disponiendo propiamente de un amplio catálogo de soluciones, con su correspondiente costo y vida útil, debiendo tener en cuenta que para la aplicación de un cierto tipo de solución, será necesario efectuar algunos trabajos complementarios, que en cada caso se requerirán y cuyo costo deberá sumarse al costo inicial de la estrategia principal.

4.2.2 COSTO DE CONSERVACIÓN

Es el costo que se requiere para la preservación de la carretera ya construida y sus anexos, y para conservar sus instalaciones en condiciones de servicio durante toda la vida económica del pavimento. Lo relativo a la cantidad que se gasta en la conservación de los pavimentos flexibles, debe prestarse gran atención al aspecto económico, pues tiene que estar equilibrado con: los costos iniciales (costo de inversión), y la intensidad de tránsito que por ellos circule, de tal forma que en función de estos tres factores (costo inicial, costo de mantenimiento e intensidad de tránsito), podamos determinar para cada caso especial el tipo más económico, es decir, aquel que nos proporcione mayores beneficios al menor costo.

Naturalmente los gastos de conservación, de un pavimento aumenta con la edad del mismo y llega un momento dado, en que los costos serán tan grandes que será más económico volver a construir el pavimento nuevo del tipo más conveniente en función de la intensidad del tránsito en ese momento o probable durante la vida económica de ese nuevo pavimento.

Como ya sabemos, el pavimento además de transmitir las cargas de los vehículos en forma disipada al terreno de soporte, deber proporcionar una superficie que permita al vehículo seguridad al transitar, presentándose la falla cuando éste llega a perder las características de servicio para las que fue proyectado; ésta capacidad de servicio disminuye con el tiempo por lo que ya se mencionó, trae consigo el aumento en los gastos de conservación.

Por lo tanto podemos dividir los gastos de conservación fundamentalmente en dos tipos distintos:

- Aquellos que son necesarios ejecutar periódicamente y que casi siempre, son independientes del uso que se le da al pavimento.
- El segundo tipo corresponde a reparaciones debido a deterioros del pavimento, necesarios para mantenerlo en un nivel establecido de servicio o con una velocidad de deterioro definido, lo que propiamente consiste en determinar el nivel de conservación que deba aplicarse.

Debe tenerse en cuenta que el tipo de estructura originalmente adoptada, su desempeño, el nivel de conservación y el nivel de servicio proporcionado al usuario, son conceptos que se encuentran interrelacionados, de tal manera que una alteración en alguno de ellos genera modificaciones en los otros conceptos. El comportamiento es una función del nivel de mejoramiento, de tal manera que si éste se incrementa se extiende la vida útil del pavimento; sin embargo, existe un límite en el cual no resulta factible incrementar el nivel de mejoramiento, resultando muy costosa la ampliación de la vida económica del mismo.

En el costo de mantenimiento deben intervenir exclusivamente los relacionados directamente con el pavimento y su comportamiento, como es el caso del drenaje, acotamientos, etc., además de los relativos a reparación, sellado de juntas, bacheos, riegos, etc.

1) Costos de conservación rutinaria (CCR)

La *conservación rutinaria* contempla los trabajos de limpieza de alcantarillas, desazolve de cunetas, limpieza del camino (eliminación de la maleza que se encuentra en los hombros del mismo), así como el refinamiento o conformación de la superficie de rodamiento utilizando una motoconformadora generalmente.

Para la determinación del costo *de conservación rutinaria* se utiliza la expresión siguiente:

$$CCR_{xyz} = (CCRU_{xyz})L$$

Donde:

$CCRU_{xyz}$ = Costo de conservación rutinaria por kilómetro de longitud con superficie de rodamiento x , alojado en una región con nivel de precipitación y , así como un tipo de terreno z .

L = Longitud total del camino.

2) Costo de conservación periódica (CCP)

Si se trata de caminos cuya superficie de rodamiento está ya pavimentada, la *conservación periódica* puede ir desde un *riego de sello* hasta una sobrecarpeta, dependiendo, al igual que en el caso anterior, del daño que presente la superficie de rodamiento, lo cual depende básicamente del nivel de precipitación pluvial en la zona que se localice el camino, daños causados por el tránsito, así mismo se llevan a cabo trabajos de mantenimiento y limpieza de las obras de drenaje.

La valoración del *costo de conservación periódica*, se realiza de la manera siguiente:⁽¹⁾

$$CCP_{xyz} = (CCPU_{xyz})L$$

Donde:

$CCPU_{xyz}$ = Costo de conservación periódica por kilómetro de longitud con superficie de rodamiento x , un nivel de precipitación pluvial y , así como un tipo de terreno z .

L = Longitud total del camino por rehabilitar.

La periodicidad de las acciones de *conservación periódica*, dependen del tipo de superficie de rodamiento, del nivel de precipitación pluvial y daños causados por el tránsito, de tal forma que la frecuencia con que se lleva a cabo la acción de conservación, varía entre los 3 y 7 años para el caso de aquellos que cuentan con superficie de rodamiento pavimentada. Es conveniente señalar que cuando se lleva a cabo la *conservación periódica* de un camino no se realiza la *conservación rutinaria o normal*, debido a que la primera incluye las actividades relacionadas con la segunda.

4.2.3 COSTO DE OPERACIÓN

Estos costos son aquellos que se designan para dar el uso del costo total de operación de los vehículos durante el diseño de vida de las carreteras propuestas, y se pueden determinar por:

- La geometría del camino, incluyendo la pendiente y el grado de curvatura.
- El tipo de superficie del camino y su estado.
- Diversos parámetros de tránsito, incluyendo los tipos de vehículos y la correspondiente velocidad contra la distancia por la sección del camino para cada tipo de vehículo y para cada dirección.

Seguramente es el factor económico más importante en un análisis económico de alternativas, estando relacionado directamente con el estado superficial del pavimento y con la velocidad de los vehículos. Los tres principales tipos de costos asignados a los *costos de operación*, son los siguientes:

- 1) Costos de operación de los vehículos:
 - a) Consumo de combustibles.
 - b) Desgaste de llantas.
 - c) Mantenimiento del vehículo.
 - d) Consumo de lubricante.
 - e) Depreciación del vehículo.
 - f) Refacciones.
- 2) Costo del tiempo de recorrido del usuario
- 3) Costo de accidentes:
 - a) Accidentes fatales.
 - b) Accidentes no fatales. Daños a propiedades, incluyendo al pavimento.

Los *costos de operación* deben ser investigados por el organismo, presentándose como ejemplo, los propuestos por el *Instituto Mexicano del Transporte* ⁽²⁾, determinados para vehículos típicos que circulan por las carreteras del país y teniendo en cuenta el estado del pavimento, la velocidad de operación y el tipo de terreno. Estos costos deben ser actualizados por la variación que sufren los insumos y las innovaciones de la industria automotriz. ⁽³⁾

Para valorar estos costos será necesario conocer el espectro actual del tránsito y su proyección en el período de análisis, la predicción del comportamiento del pavimento, en términos de rugosidad, la determinación de los perfiles de velocidad con el tiempo, los tiempos de recorrido y los costos de accidentes. La velocidad dependerá también del congestionamiento de la carretera con el tiempo, de donde debe desprenderse la necesidad de efectuar ampliaciones, por ejemplo. Finalmente, considerando el costo unitario por vehículo tipo, deberá calcularse el número de éstos que circularán por el pavimento en el período de análisis, para obtener el costo total, año tras año. Evidentemente las acciones de rehabilitación aplicadas al pavimento modificarán los costos de operación al mejorarse las condiciones superficiales del pavimento.

4.2.4 COSTO DE RESCATE

El *costo de rescate* depende del tipo de material que constituye cada una de las capas del pavimento y de su posible reutilización en el proyecto de rehabilitación. Generalmente se considera como un porcentaje del costo original del material, por ejemplo 40% para *carpetas*, 20% para *capa de base* y 10% para *sub-base* de pavimentos flexibles. Éste costo, evidentemente tiene signo negativo.

4.3 ELABORACIÓN DEL PROYECTO

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

Además de las características funcionales y estructurales, el proyecto de los *pavimentos flexibles* requiere la consideración de aspectos constructivos. El análisis de los costos debe completarse con una previsión del comportamiento del pavimento durante el período de diseño, la conservación necesaria y su costo actualizado y, finalmente, una estimación de futuros refuerzos

estructurales, renovaciones superficiales o reconstrucciones. A la par de los costos actualizados, deben tomarse en cuenta los costos del usuario, relacionados con su seguridad, comodidad y con las demoras que se originan en vialidades relativamente congestionadas por los trabajos de conservación y repavimentación.

La elaboración de un proyecto de un *pavimento flexible*, se basa principalmente en los siguientes factores:

a) Tránsito

Interesan las cargas más pesadas por eje (simple, tándem o triple), esperadas en el carril de proyecto (que generalmente es el más solicitado y que determinará la estructura del pavimento de la vialidad), durante el período del proyecto adoptado. Sin embargo, en los casos de vialidades con carriles múltiples, podrá realizarse un diseño con estructuras y espesores diferenciados, de acuerdo con el tránsito asignado a cada carril. La repetición de cargas y la acumulación de sus efectos sobre el pavimento, como la fatiga o la deformación permanente, son fundamentales para el cálculo. Por otro lado, se tendrán en cuenta las máximas presiones de contacto, las sollicitaciones tangenciales en tramos especiales (curvas, zonas de frenado y aceleración, etc.), las velocidades de aplicación (en particular, las lentas en rampas y zonas de estacionamiento de vehículos pesados), la canalización del tránsito, etc. El tránsito generalmente se establece como número de ejes acumulados de 82 kN (18000 lb.), en el período de diseño. ⁽⁴⁾ (ver sección 4.3.3).

b) Capa subrasante

Como parámetro fundamental se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas de tránsito. Debe considerarse la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a su resistencia como a las eventuales variaciones de volumen, (expansión – contracción). Por lo general, el parámetro de resistencia utilizado para caracterizar la resistencia de los materiales es el *Valor Relativo de Soporte* (CBR), aunque actualmente algunos métodos emplean el *Módulo de Resiliencia* (M_R), siendo común, además, manejar correlaciones entre el CBR y el M_R . ⁽⁴⁾

c) Clima

Constituye un factor aún no suficientemente considerado en el diseño. Normalmente debe tenerse en mente cuando se seleccionan los materiales y en determinados elementos colaterales, como el drenaje. En el diseño de la propia estructura del *pavimento flexible* interesa su comportamiento bajo efectos de temperatura y humedad. Son objeto de consideración las temperaturas extremas diarias y estacionales, así como el régimen e intensidad de las precipitaciones, aspectos que además inciden en los aspectos constructivos. ⁽⁴⁾

d) Los materiales disponibles

Son determinantes para la selección de la estructura del pavimento en la forma más adecuada técnica y económicamente posible. Por una parte, se consideran los agregados disponibles en los bancos de materiales de la zona, además de la calidad requerida, en la que se incluye la deseada homogeneidad, deben verificarse las cantidades disponibles, el suministro y su precio, considerando en gran medida por la distancia de transporte. Por otro lado, se considerarán los materiales básicos de mayor costo, como cementantes, estabilizadores y modificadores, así como la experiencia y habilidad en su manejo y uso. En general, los materiales de las capas del pavimento están estandarizados y definidos en las normas de los organismos, aunque en años recientes se marca una tendencia a emplear materiales locales, marginales, reciclados, y también nuevos, como los modificadores asfálticos. ⁽⁴⁾ (ver sección 4.3.4).

e) Drenaje y subdrenaje

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

Para obtener un mejor comportamiento del pavimento, el proyectista debe reconocer que el agua puede entrar a la estructura del pavimento y a la *capa subrasante* de varias maneras, como en las grietas, los baches y juntas, jardineras y camellones, fugas en los sistemas de drenaje y agua potable, ascensión capilar, posición del nivel freático, etc. ⁽⁴⁾

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

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

Por ésta razón, se deben tomar las medidas pertinentes para proponer sistemas de drenaje y subdrenaje que actúen con efectividad, captando, conduciendo y desalojando el agua, sin afectar al pavimento o a la *capa subrasante*. En cuanto al drenaje superficial, deben tomarse en cuenta los siguientes aspectos:

- La pendiente transversal del pavimento deberá ser por lo menos del 1%.
- No se deberán admitir depresiones en la superficie que puedan provocar estancamientos de agua.
- La textura superficial debe facilitar la expulsión rápida del agua de manera transversal.
- No deberán existir obstáculos que faciliten el encharcamiento del agua en las bocas de tormenta o rejillas, lavaderos, cunetas y alcantarillas.
- Las juntas de construcción en el pavimento deberán tratarse en forma adecuada. Tampoco deberán permitirse agrietamientos en el pavimento ya que facilitan la filtración de agua a las capas inferiores.

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

f) Otros factores

Existen otros factores que en ocasiones afectan de manera importante el proyecto de un *pavimento flexible*, como el entorno urbano, las dimensiones de la obra, la experiencia y equipos de las empresas constructoras, así como de algunas medidas de política general o local, entre otros. ⁽⁴⁾

4. ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

Cuando se trata de modificaciones de gran envergadura, que pueden dar lugar a la construcción de una nueva carretera o de grandes desviaciones, y en general, se impone un estudio muy profundo de: *Estudios de Topografía, Estudios de Geotecnia y Estudios de Estructuras*, como se muestra en la siguiente figura:

EL PROYECTO

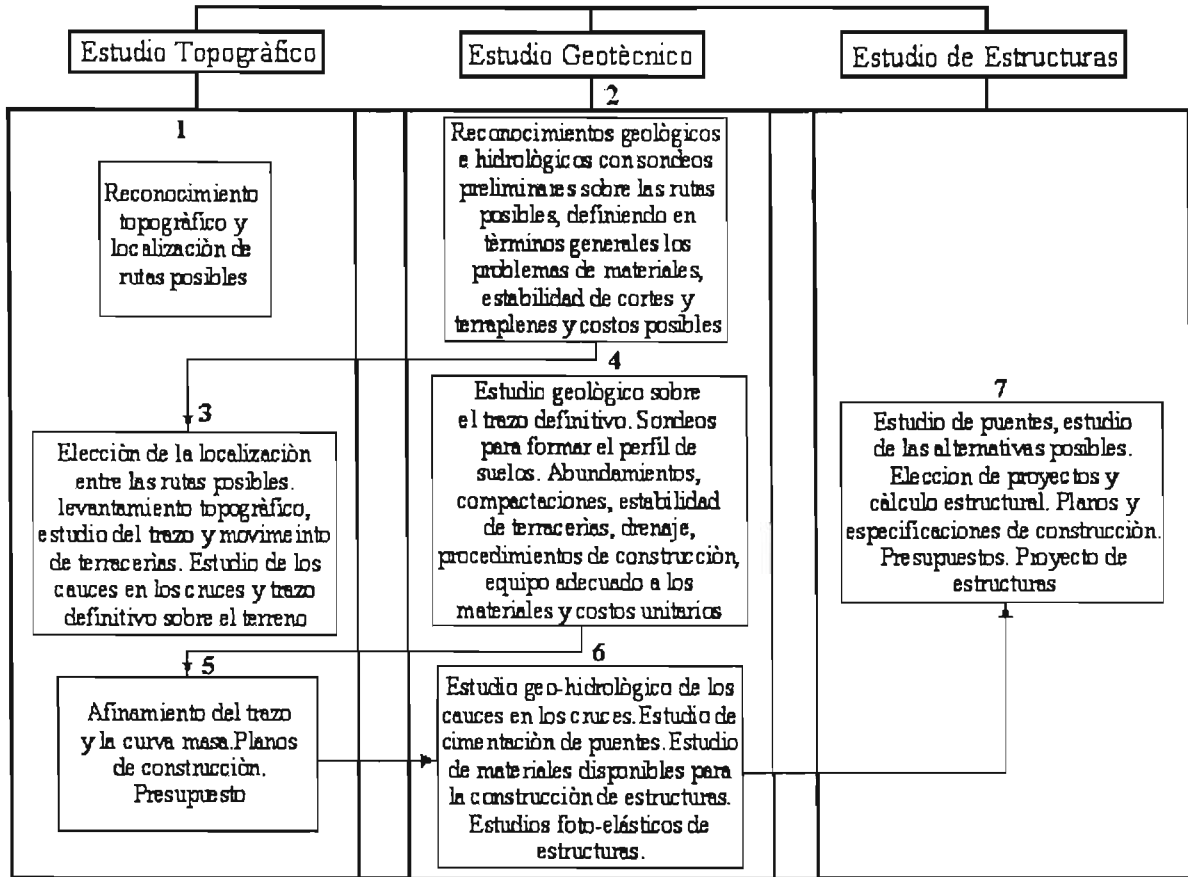


FIGURA 4.1. Diagrama general de la estructuración de un proyecto. ⁽⁵⁾

4.3.1 PLANOS

Cualquier serie de planos para la reconstrucción de carreteras, debe incluir los siguientes datos:

- Un plano de localización en que se fije la posición exacta de la reparación propuesta con respecto a su trazo, pueblos o ciudades, corrientes mayores y otros puntos definidos de referencia.
- Una sección transversal típica que muestre detalles del pavimento, dimensiones de la capa de *base*, pendiente de las cunetas, cotas de nivel, espesor, ancho y profundidad, así como otros detalles necesarios para completar la configuración.
- El plano de la carretera, así como el perfil con las líneas de nivel en detalle para curvas horizontales y verticales.
- Secciones transversales de cortes y terracerías.
- Detalle del trazo de ensanchamiento y tránsito.
- Planos completos para estructuras auxiliares y anexas, excepto para puentes, cuando se hace referencia a una serie de planos de los puentes.
- Un lista de la estructura del alcantarillado incluyendo líneas de drenaje bajo la superficie y estación de localización de las mismas.
- Detalles de construcción tales como defensas, alumbrados en partes rectas, trazos especiales en las intersecciones, señalamiento, etc.

- Construcciones especiales de acuerdo con las necesidades que no están incluidas en las normas especiales.
- Un estudio con las cantidades estimadas de excavación, así como de cualquier material proporcionado por el contratista. Se incluyen datos tales como el desmonte, limpieza, remoción de construcciones viejas, conformar la carretera y otros trabajos específicos que se hacen como parte del contrato.
- Un diagrama de conjunto puede o no, ser incluido.⁽⁶⁾

4.3.2 ESPECIFICACIONES

Se requerirá indicar los requisitos que deban satisfacer los materiales y equipos necesarios para la ejecución de las obras de carreteras, así como también, materiales complementarios, como resinas, polímeros y otro tipo de modificadores.

Es importante indicar los lineamientos de acabado superficial, en cuanto a uniformidad, textura, luminosidad, etc., de manera que las áreas reparadas no constituyan un defecto adicional al pavimento. La limpieza, preparación y determinación de las zonas de trabajo, así como el uso de herramientas para cortes, demoliciones, etc., deberán estar claramente indicadas en ésta parte del proyecto.

Se indicará además, las limitantes y el cuidado necesario en cuanto a la temperatura, lluvia, deficiencias en el funcionamiento de equipos, etc.

4.3.3 PROYECCIÓN DEL TRÁNSITO

El *manejo de tránsito* es un factor de primera importancia a la hora de determinar o predecir el año en el tiempo que sufrirá un daño severo el pavimento en un período dado. Se puede apreciar que el volumen de vehículos ha crecido en forma importante en los últimos años, pero ese aumento ha sido aún mayor si lo vemos en términos de la carga que se transporta (Fig. 4.2), ésta situación tiene una implicación significativa en el comportamiento de los pavimentos.⁽¹⁾

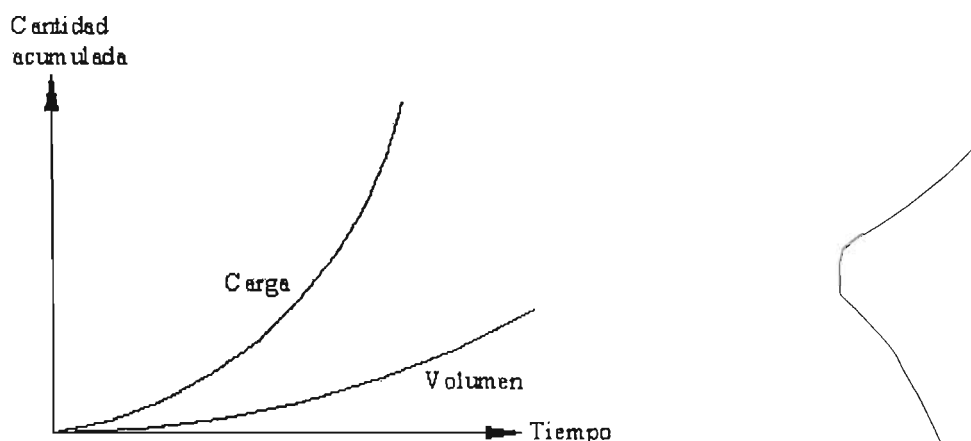


FIGURA 4.2. Proyección de tránsito y carga transportada.

Hay cuatro consideraciones sobre la estimación del tránsito que puede afectar significativamente el ciclo de vida de un pavimento:

- La exactitud de los valores de la carga equivalente utilizados para estimar el daño inducido por los ejes equivalentes.
- La precisión de la información sobre volúmenes y pesos del tránsito existente.

- La predicción de los ejes equivalentes para el período a evaluar.
- La interacción de la edad y el tránsito que afecta el nivel de serviciabilidad.

Es posible estimar el tránsito a futuro en base a las siguientes consideraciones:

- Crecimiento general de la economía.
- Diversificación del tránsito, si el camino es mejorado, los vehículos que transitaban por una ruta paralela, ahora preferirán la rehabilitada.
- Tránsito generado, es el tránsito que se espera que surja solamente por el mejoramiento de una vía.⁽⁷⁾

Es necesario conocer el tránsito actual con sus características principales, como volumen, composición por número de ejes, distribución en los diferentes carriles, así como el peso por eje y el peso total del vehículo. Esto es importante para considerar el efecto de la sobrecarga, aspecto que en gran medida se ha observado en el tránsito que circula en las carreteras nacionales y que tiene una gran influencia en el efecto destructivo del tránsito sobre los pavimentos. Con respecto al número de vehículos y su composición será necesario efectuar aforos en el tramo, siguiendo las técnicas y metodologías necesarias para determinar el *Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA)*.⁽⁷⁾

El conocimiento de las características del tránsito en un proceso de evaluación de pavimentos es muy importante por las siguientes razones:

- La determinación del tránsito que ha soportado el pavimento en el pasado permitirá conocer su capacidad estructural con base en la vida remanente.
- Conociendo las características del tránsito actual se puede explicar el estado de deterioro que presenta el pavimento y prever su comportamiento futuro.
- De igual manera, el conocimiento del tránsito en el período de análisis permitirá las necesidades de rehabilitación o de refuerzo para un nuevo ciclo de vida del pavimento.
- Así mismo, el conocimiento del tránsito en forma sistematizada a lo largo del tiempo permitirá determinar los costos de operación y por tanto, se podrá definir el comportamiento económico del pavimento, indicando el momento en que su operación deja de ser favorable económicamente. Debe tenerse en cuenta que el volumen de tránsito aumenta con el tiempo, pero de la misma forma se reducen los factores de textura y rugosidad del pavimento, siendo ambos factores determinantes en los costos de operación.⁽⁷⁾

Debe mencionarse que la determinación real del tránsito es un aspecto muy importante; es pertinente un monitoreo continuo y confiable del tránsito para comparar la predicción con la realidad y la valoración correcta del volumen y peso de los vehículos, para así obtener proyectos confiables, funcionales y económicos.

Constituye el factor más importante en el diseño, conservación y rehabilitación de los pavimentos. El conocimiento del tránsito deberá incluir principalmente su volumen actual y futuro, su composición y la magnitud de las cargas que actúan sobre el pavimento en el período de análisis, principalmente. Las características del tránsito que es necesario conocer para efectuar el proyecto de los pavimentos son:

- 1) Tránsito diario promedio anual (TDPA)
- 2) Características del tránsito:
 - a) Censo del tránsito (volúmenes y cargas).
 - b) Tipología del tránsito.
 - c) Velocidad de operación.

- d) Accidentes.
- e) Características de nuevos vehículos.
- 3) Tránsito en el carril de diseño
- 4) Composición del tránsito por:
 - a) Tipos de vehículos.
 - b) Peso de los vehículos, cargados y vacíos.
 - c) Número y posición de ejes y llantas.
- 5) Incremento anual del tránsito.
- 6) Número de vehículos o de ejes que transitarán por el camino durante su vida útil.

1) Tránsito diario promedio anual (TDPA)

El *tránsito diario promedio anual (TDPA)*, corresponde al número total de vehículos que pasa por una carretera en ambos sentidos durante un año, dividido entre 365 días. Para determinar el *TDPA* de un camino en operación, se cuenta en forma directa el tránsito mediante una operación que se llama *aforo* y que pueden realizar operarios o contadores mecánicos; el conteo puede llevarse también durante todo el año o sólo en ciertas temporadas y luego proyectarlo a un año. Para estos trabajos, se emplean técnicas estadísticas. Al calcular el *TDPA* de varios años consecutivos, se puede conocer la tendencia de incremento.

Interesa desde el punto de vista geométrico y de capacidad de la carretera, haciendo notar la necesidad de ampliaciones, mejoramiento de los alineamientos horizontal y vertical y obras de modernización en general. Desde el punto de vista estructural, el volumen del tránsito pesado en sus diferentes tipos de vehículos es fundamental para el cálculo del número de ejes equivalentes, teniendo en cuenta además el pronóstico de crecimiento en el período de diseño.⁽⁸⁾

2) Características del tránsito

a) Censo de tránsito (volúmenes y cargas)

Ésta actividad consiste en desarrollar una metodología eficiente mediante la cual se puede tener un conocimiento global del tránsito que circula por la red y determinar las principales características de la utilización de los caminos nacionales.

El *TDPA* corresponde a la cantidad total de vehículos promedio que circulará por la vía durante los 365 días del año; éste valor se obtiene a partir del promedio aritmético de los *TDPA*, para cada día del año. Para calcularlo, se obtienen valores representativos para días laborales y festivos, ponderándolos y luego dividiendo por 365 días.⁽⁸⁾

Coefficiente de expansión horaria (CE):

$$CE = \frac{TD}{T12}$$

Donde:

TD = Tránsito diario (24 horas).

T12 = Tránsito en 12 horas.

b) Tipología del tránsito

Cuando se lleva a cabo la sustitución de una carretera *A* por una *B* (como ejemplo), en mejor estado, sirviendo ambas a los mismos centros de población, se tiene la existencia de un tránsito de vehículos, previo a la construcción de la nueva carretera o a la modernización de la existente,

llamado *tránsito normal*. Si no se construye la carretera *B*, el tránsito en la carretera actual aumentará de acuerdo a una tasa de crecimiento dada, cuyo valor sería completamente distinto si se llevara a cabo el proyecto. De estas observaciones se ha determinado la existencia de tres tipos de tránsito relacionado con cualquier proyecto:

- a) *Tránsito normal*. Es aquel que circula normalmente por la carretera. El crecimiento normal del tránsito es el incremento del volumen debido al aumento en número y uso de vehículos de motor.
- b) *Tránsito inducido*. Es aquel tránsito que no se hubiera presentado sin el proyecto; aparecen gracias a la disminución de los costos de operación de los vehículos y debido al mejoramiento en el uso del suelo adyacente al camino.
- c) *Tránsito desviado*. Corresponde a aquel existente en otras vías de transporte como rutas alternas, ríos, ferrocarriles y aviones, que dada la reducción de los costos de operación en la nueva carretera se transfiere a ésta.

c) *Velocidad de operación*

Los vehículos modernos están capacitados para circular a velocidades altas, las cuales dependerán del estado de los pavimentos, entre otros factores. El costo de operación depende también de la velocidad del vehículo, de tal manera que es importante efectuar el seguimiento de éste factor, tanto desde el punto de vista funcional como económico.

d) *Accidentes*

Es conveniente efectuar un registro de accidentes, ya que si estos ocurren con cierta regularidad en una misma zona, es indudable que en ella se presentan condiciones que deben investigarse, debiendo programarse, un estudio puntual que permita conocer las causas que los producen para su corrección.

e) *Características de nuevos vehículos*

Repercute el interés de conocer su peso, dimensiones, número de ejes y presión de inflado de llantas, entre otros aspectos. Existe la tendencia en los vehículos modernos a incrementar la presión de inflado, la cual puede influir en el comportamiento de los pavimentos.

Hoy, todos los métodos de diseño de pavimentos, consideran el tránsito de todos los vehículos que usarán el pavimento, para una vida de diseño de 20 o 25 años. Se determina el volumen de tránsito de cada tipo, al momento de construir el pavimento. Reconvierte cada tipo de vehículo a carga de eje sencillo de diseño, de 8200 kg. generalmente, y se cuantifica el número de esas cargas para 20 o 25 años, considerando la tasa de aumento anual de los vehículos, siendo la más probable del 4%. Para calles de tipo residencial, esto puede ser de menos de 1000 cargas estándar (de 8.2 ton/m), hasta el tránsito acumulado para una calzada o calle comercial, con muchos autobuses, que puede ser de cerca de 30, 000, 000 cargas estándar. ⁽⁷⁾

Una adecuada auscultación del tránsito en una red resulta así importante para su adecuada operación, mantenimiento y desarrollo; es por lo tanto, un insumo indispensable para la planeación de todas las actividades a realizar en la red. En lo que a la infraestructura respecta, permite apoyar la asignación de tránsito en los nuevos segmentos propuestos, así como definir sus características geométricas y estructurales. En los segmentos existentes permite priorizar las necesidades de mantenimiento, definir el momento de las modernizaciones o reconstrucciones y señalar la necesidad de rutas alternas.

En lo que a la operación respecta, el conocimiento del flujo vehicular permite comparar la oferta con la demanda existente y realizar análisis operacionales que orienten el encauzamiento del tránsito y el desenvolvimiento de la red.

3) Tránsito en el carril de diseño

Del *TDPA* se necesita conocer el porcentaje de vehículos que usan el carril en donde se carga más el movimiento, llamado *carril de diseño*; respecto a un camino de dos carriles (uno en cada sentido), se ha llegado a la conclusión de que el *carril de diseño* lleva de 60% a 65% del *TDPA*; en cuanto a un camino de cuatro carriles, el *carril de diseño* lleva casi la misma cantidad de vehículos que uno de dos, pues en los carriles de la derecha, transitan los automotores de mayor peso y que dañan más el pavimento, por lo que se toma en éste caso, el 50% del *TDPA* para el carril de diseño.

4) Composición del tránsito

a) Tipos de vehículos

Es necesario conocer la cantidad de vehículos de cada tipo que circulan por las carreteras, los cuales se pueden dividir en grupos para hacer menos difíciles los cálculos; por ejemplo, los *vehículos del tipo A* son todos los automóviles y los que tengan un peso menor que 3 toneladas; los *vehículos del tipo B* son todos los autobuses y los *vehículos del tipo C* son los camiones de carga con más de 3 toneladas; estos últimos se desglosan en grupos, pues tienen una gran variedad de características y su peso total puede oscilar desde 3 hasta 60 toneladas, con diferentes combinaciones en la posición de sus ejes y llantas (ver tabla 1).

TABLA 1. Tipología de los vehículos de acuerdo a la SCT. ⁽⁸⁾

Vehículo tipo	Abreviatura	Descripción
A	A 2	Automóvil
	A' 2	Camión ligero, con capacidad de carga de hasta de 3 ton.
B	B 2	Autobús de dos ejes
	B 3	Autobús de tres ejes
	B 4	Autobús de cuatro ejes
C	C 2	Camión de dos ejes
	C 3	Camión de tres ejes
	C 4	Camión de cuatro ejes
	T 2 – S 1	Tractor de dos ejes con semirremolque de un eje
	T 2 – S 2	Tractor de dos ejes con semirremolque de dos ejes
	T 3 – S 2	Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes
	T 3 – S 3	Tractor de tres ejes con semirremolque de tres ejes
	C 2 – R 2	Camión de dos ejes con remolque de dos ejes
	C 3 – R 2	Camión de tres ejes con remolque de dos ejes
	C 3 – R 3	Camión de tres ejes con remolque de tres ejes
	T 2 – S 1 – R 2	Tractor de dos ejes con semirremolque de un eje y remolque de dos ejes
	T 2 – S 2 – R 2	Tractor de dos ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de dos ejes
	T 3 – S 1 – R 2	Tractor de tres ejes con semirremolque de un eje y remolque de dos ejes
	T 3 – S 2 – R 2	Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de dos ejes
	T 3 – S 2 – R 3	Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de tres ejes
	T 3 – S 2 – R 4	Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de cuatro ejes

FUENTE:

Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT, México, D.F. 1999

b) *Peso de los vehículos*

El *peso de los vehículos* es determinante para el cálculo correcto del *ESAL* (número de ejes equivalentes), lo cual tiene importancia en el nivel terminal del pavimento, ya que si el *ESAL* estimado es menor que el real, el nivel terminal se alcanzará antes con incrementos en los costos de conservación y de operación. Es importante determinar el peso real de los vehículos cargados y descargados, ya que en nuestro país son muy importantes los sobrepesos y el número de vehículos sobrecargados y debe recordarse que el factor de equivalencia de las cargas crece exponencialmente con el peso de los ejes. ⁽⁸⁾

De cada vehículo es necesario conocer sus pesos, cargados y vacíos principalmente; los vehículos de carga a veces de componen de una unidad de tracción, una caja y un remolque, cada uno con varios ejes en diferentes combinaciones y una o dos llantas, se tiene así ejes sencillos con llantas sencillas, ejes con llantas dobles o ejes tandem y ejes triples con ruedas dobles. (ver tabla 2).

c) *Número y posición de ejes y llantas*

La importancia de conocer el tipo de vehículos, sus pesos y la posición y número de ejes y llantas, es la de poder estudiar la magnitud de los esfuerzos en la estructura vial y proyectar adecuadamente la sección transversal de la carretera. (ver tabla 2).

TABLA 2. Tabla donde se muestran los pesos de los diferentes tipos de vehículos automotores y los coeficientes de equivalencia a vehículos estándar de 8.2 ton. ⁽¹⁰⁾

Tipo de vehículo	Peso total (ton)	Coeficiente de daño, bajo carga máxima	Peso de ejes cargados (ton)				
			Tractor		Semirremolque	Remolque	
			Delantero	Trasero		Delantero	Trasero
A 2	2.0	0.003	1.0 (s)	1.0 (s)			
A' 2	5.5	0.06	1.7 (s)	3.8 (s)			
B 2	15.2	2.0	5.5 (s)	10.0 (s)			
B 3	20.0	1.8	5.5 (s)	14.5 (t)			
B 4	27.0	2.3	9.0 (t)	18.0 (t)			
C 2	15.5	1.8	5.5 (s)	10.0 (s)			
C 3	23.5	2.2	5.5 (s)	18.0 (t)			
C 4	28.0	2.5	5.5 (s)	22.5 (tr)			
T 2 - S 1	25.5	4.0	5.5 (s)	10.0 (s)	10.0 (s)		
T 2 - S 2	32.5	4.2	5.5 (s)	10.0 (s)	18.0 (t)		
T 3 - S 2	41.5	4.3	5.5 (s)	18.0 (t)	18.0 (t)		
T 3 - S 3	50.5	6.0	5.5 (s)	18.0 (t)	22.5 (tr)		
C 2 - R 2	35.5	5.5	5.5 (s)	10.0 (s)		10.0 (s)	10.0 (s)
C 3 - R 2	43.5	6.0	5.5 (s)	18.0 (t)		10.0 (s)	10.0 (s)
C 3 - R 3	51.5	6.3	5.5 (s)	18.0 (t)		10.0 (s)	18.0 (t)
T 2 - S 1 - R 2	45.5	6.1	5.5 (s)	10.0 (s)	10.0 (s)	10.0 (s)	10.0 (s)
T 2 - S 2 - R 2	53.5	6.4	5.5 (s)	10.0 (s)	18.0 (t)	10.0 (s)	10.0 (s)
T 3 - S 1 - R 2	53.5	6.6	5.5 (s)	18.0 (t)	10.0 (s)	10.0 (s)	10.0 (s)
T 3 - S 2 - R 2	61.5	8.4	5.5 (s)	18.0 (t)	18.0 (t)	10.0 (s)	10.0 (s)
T 3 - S 2 - R 3	69.5	8.2	5.5 (s)	18.0 (t)	18.0 (t)	10.0 (s)	18.0 (t)
T 3 - S 2 - R 4	77.5	8.0	5.5 (s)	18.0 (t)	18.0 (t)	18.0 (t)	18.0 (t)

(s) = eje sencillo; (t) = eje tandem; (tr) = eje triple.

Uno de los costos más importantes en la construcción y conservación de los *pavimentos flexibles*, corresponde a los materiales, roca, grava, arena y otros suelos, por lo que su localización y selección se convierte en uno de los problemas básicos del Ingeniero Civil.

Parece una labor realmente urgente e importante centralizar de alguna manera toda la información que día a día va surgiendo sobre materiales utilizables, localización, volúmenes aprovechables, utilización, tratamientos, etc.; una vez bien realizada ésta tarea a nivel nacional, todas las instituciones constructoras del país podrán obtener considerables ahorros en la búsqueda de materiales. ⁽¹¹⁾

Un punto fundamental en la determinación de *bancos de materiales*, es la evaluación de las rocas o suelos contenidos, la que suele ser muy difícil de establecer en forma cuantitativa. En lo que se refiere a las rocas, dos puntos principales deben merecer atención:

- 1) Se refiere a los cambios físicos que la roca pueda sufrir por fragmentación durante la extracción, por manejo o durante la colocación.
- 2) La alteración físico-química que pueda tener lugar durante la vida útil del pavimento.

• LOCALIZACIÓN DE BANCOS

Localizar un banco es más que descubrir un lugar en donde exista un volumen alcanzable y explotable de suelos o rocas que pueda emplearse en la construcción y reconstrucción de una determinada parte de una vía terrestre; satisfaciendo las especificaciones de calidad de la institución constructora y los requerimientos de volumen del caso.

El problema comprende el desarrollo de criterios y técnicas para la *localización de bancos* de materiales. Ha de garantizarse que los bancos elegidos son los mejores entre todos los disponibles en varios aspectos que se interrelacionan: ⁽¹¹⁾

- a) En lo que se refiere a la calidad de los materiales extraíbles, juzgada en relación estrecha con el uso a que se dedicarán.
- b) Tienen que ser lo más fácilmente accesibles y los que se puedan explotar por los procedimientos más eficientes y menos costosos.
- c) Tienen que ser los que produzcan las mínimas distancias de acarreo de los materiales a la obra.
- d) Tienen que ser los que conduzcan a los procedimientos constructivos más sencillos y económicos durante su tendido y colocación final, requiriendo los mínimos tratamientos.
- e) Los bancos deben estar localizados de tal manera que su explotación no conduzca a problemas legales de difícil o lenta solución y que no perjudiquen a los habitantes de la región.

Un buen proyecto de carreteras carece de sentido si no se le enfoca como un conjunto que comprenda los bancos de materiales disponibles y la utilización que de ellos pretenda hacerse. El Ingeniero debe disponer de un mapa donde aparezcan todos los posibles aprovechamientos de material que puedan interesar a su obra, habiéndose probablemente excluido otros muchos, por algún o algunos inconvenientes obvios. Entre todo éste conjunto de bancos que se vean factibles, deberá el Ingeniero desarrollar sus líneas de opción en estrecha vinculación con su proyecto. ⁽¹¹⁾

• EXPLORACIÓN Y MUESTREO DE BANCOS

La exploración de una zona en la que se pretenda establecer un banco de materiales debe tener los siguientes objetivos:

4. ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

- a) Determinación de la naturaleza del depósito, incluyendo toda la información que sea importante obtener sobre su geología, historia de explotaciones previas, relaciones con escurrimientos de agua superficial, etc.
- b) Profundidad, espesor, extensión y composición de los estratos de suelo o roca que se pretendan explotar.
- c) Situación del agua subterránea, incluyendo posición y variaciones del nivel freático.
- d) Obtención de toda la información posible sobre las propiedades de los suelos y las rocas, los usos que de ellos se hayan hecho, etc.

La investigación completa está formada por tres etapas:

- 1) Reconocimiento preliminar, que debe incluir la opinión de un geólogo. En ésta etapa debe considerarse esencial el contar con el estudio geológico de la zona, por sencillo que parezca.
- 2) La exploración preliminar, en la que por medio de procedimientos simples y expeditos, pueda obtenerse información sobre el espesor y composición del subsuelo, la profundidad del agua freática y demás datos que permitan, en principio, definir si la zona es prometedora para la implantación de un banco de las características del que se busca y sí, por consiguiente, conviene continuar la investigación sobre ella.
- 3) La exploración definitiva, en la que por medio de sondeos y pruebas de laboratorio han de definirse detalladamente las características ingenieriles de los suelos y las rocas encontradas.

Los bancos de suelos han de muestrearse para conocer en el laboratorio las características que interesen para definir o autorizar su uso. No existe ninguna regla para fijar el número de sondeos que es necesario hacer en un caso dado. Naturalmente, la muestra que se extraiga dependerá de la utilización que pretenda hacerse del suelo.

Al tratar con bancos de suelo que vayan a usarse en pavimentación es también frecuente que se distinga un conjunto de pruebas dentro de una etapa de estudio preliminar, de otras pruebas que se hagan posteriormente con carácter definitivo. Éste criterio permitirá seleccionar las zonas más prometedoras dentro de un banco dado o establecer racionalmente alternativas de uso entre varios bancos vecinos. La tabla 3 presenta el tipo de pruebas que se hace a los distintos materiales provenientes de los bancos, según el uso que de ellos pretenda realizarse.

TABLA 3. Pruebas de laboratorio que se efectúan a los suelos que se extraen de bancos según su utilización. ⁽¹¹⁾

Uso	Clasificación	Calidad	Diseño
Terracerías	<ul style="list-style-type: none"> • Límites de plasticidad • Granulometría 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso volumétrico máximo • Valor Relativo de Soporte 	
Capa subrasante	<ul style="list-style-type: none"> • Límites de plasticidad • Granulometría 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso volumétrico máximo • Valor Relativo de Soporte • Expansión • Equivalente de arena 	<ul style="list-style-type: none"> • Valor Relativo de Soporte • Pruebas triaxiales
Base y Sub-base	<ul style="list-style-type: none"> • Límites de plasticidad • Granulometría 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso volumétrico máximo • Valor Relativo de Soporte • Expansión 	Si se desea hacer un diseño estructural por capas, deberán realizarse las pruebas indicadas para la capa subrasante.
Carpeta asfáltica	<ul style="list-style-type: none"> • Límites de plasticidad • Granulometría 	<ul style="list-style-type: none"> • Pruebas de desgaste • Equivalente de arena • Expansión • Afinidad con el asfalto • Pruebas para definir la forma de los agregados 	<ul style="list-style-type: none"> • Prueba de Marshall

• MATERIALES ENCONTRADOS EN LOS BANCOS

a) *Alteración de rocas*

Los materiales que el Ingeniero encuentra en los lugares de posible explotación son suelos o rocas que han soportado en ese sitio, numerosos cambios por evolución, los que han dejado sus huellas, hasta formar los materiales que sea posible encontrar en la actualidad.

Los suelos transportados y depositados en un nuevo lugar pueden continuar intemperizándose en ese lugar o ser retransportados y redepositados en un nuevo ambiente. Además de estar sujetos a la meteorización y a la erosión, las rocas que van quedando cubiertas por sedimentos acumulados, pueden ir quedando también sometidas a aumentos de temperatura, de presión y a la acción de nuevos estados de esfuerzos. Como consecuencia, su estructura mineral puede alterarse químicamente o reagruparse físicamente.

La alteración de una roca es siempre un modo de adaptarse a su ambiente; por ello, cuando una roca antes no expuesta queda sujeta a la meteorización, se altera para adaptarse al nuevo ambiente que le ha sido impuesto. Lo mismo sucede cuando la roca es fragmentada o triturada y colocada en una estructura ingenieril. Por tal motivo el Ingeniero debe considerar que todas sus manipulaciones son fuente de alteración futura.

Las rocas que se usan en las diferentes estructuras de una vía terrestre procedentes de los bancos de materiales quedan sujetas en general a compresión y, muchas veces, a abrasión e impacto; todas estas son causas adicionales de alteración. Entre las formas de alteración, la rotura de granos puede producir cambios fundamentales en los materiales de pavimento en corto tiempo; el agua y el desarrollo de presiones neutrales también pueden producir efectos notorios dentro de la vida útil del pavimento.

b) *Tratamientos*

Los materiales procedentes de bancos que van a ser usados en terracerías no suelen sujetarse a ningún tipo de tratamiento especial y se utilizan tal como se obtienen; en esa condición natural deberán cumplir las especificaciones constructivas y de calidad que se señalen.

En los trabajos de pavimentación, por el contrario, es usual, como ya se mencionó anteriormente, someter los materiales a diversos tratamientos que los adecúen a sus funciones. Los tratamientos más usuales son: ⁽¹⁰⁾

1) *Eliminación de desperdicios*

Se trata, por ejemplo, de eliminar en bancos de suelos un determinado porcentaje de partículas cuyo tamaño máximo sobrepasa el que se haya considerado en el proyecto (frecuentemente en el orden de 7.5 cm.). Ésta eliminación se hace muchas veces a mano.

2) *Disgregación*

Ésta operación se hace generalmente en bancos de suelo duro, de roca muy alterada o en materiales con la consistencia de aglomerados poco cementados. La disgregación se hace muchas veces con arados y cuchillas dispuestas en las máquinas o con rodillos de compactación del tipo *pata de cabra* o similar.

3) *Cribado*

Generalmente se utiliza para lograr en un material de naturaleza friccionante una granulometría adecuada o para eliminar porcentajes altos de partículas mayores que el tamaño máximo requerido, que generalmente son desperdiciadas; se ha dicho que porcentajes arriba de 10% ò 15%, conviene eliminarlos cribando.

Las instalaciones de cribado para la eliminación de tamaños grandes suelen ser muy sencillas. Normalmente el material se maneja por gravedad, recogiendo en un camión el material que pasa una criba determinada. Éste método tiene peligros de segregación, que conduce a la obtención de materiales no uniformemente mezclados. Cuando se requiere una buena dosificación de materiales en diversos tamaños ha de recurrirse a plantas de cribado, con cribas vibratorias, dispuestas en dos o tres niveles; el ritmo de vibración suele ser de 1200 ciclos por minuto. Estas plantas se utilizan generalmente en combinación con equipos de trituración.

En la actualidad, se usan cada vez más cribadoras por centrifugación, con cribas cilíndricas concéntricas que giran a la vez, de manera que el material va pudiendo pasar de una a otra recorriendo, según su tamaño, diferente camino desde el centro a la periferia del sistema. Es obvio que éste tipo de plantas garantizan mejor que ninguna otra la obtención de dosificaciones precisas.

4) Trituración

Es el tratamiento a que generalmente se recurre para llegar a la granulometría adecuada a partir de materiales naturales muy gruesos o de fragmentos de roca. Es normal realizar la trituración en varios pasos o etapas, según el producto final a que desee llegarse; así se habla de trituradoras primarias, secundarias o terciarias.

La trituración suele realizarse en plantas muy completas que incluyen alimentadores, bandas de transportación, plantas de cribado, elevadores de material y dispositivos trituradores de quijada, de impactos, de rodillos de diferente separación, etc.

Es importante la relación de tamaños de la partícula en la etapa inicial y final del proceso, que define el tipo de quipo que ha de usarse y el costo de la operación. También es importante la forma que adquiera la partícula triturada, pues de ella depende en mucho el comportamiento mecánico posterior. Una forma equidimensional de la partícula, es obviamente la más deseable.

5) Lavado

Se aplica en materiales contaminados por arcilla, materia orgánica o polvos, frecuentemente se usa en conexión con operaciones de trituración y cribado.

El lavado se realiza por el empleo de tanques lavadores, en los que el material es removido con palas mecánicas, mientras se le somete a riegos de agua a presión.

c) Tipos de bancos

Los depósitos de río reciben el nombre genérico de *aluviones*. Debido a que el agua a lo largo del curso tiene ocasión de erosionar materiales muy diferentes, es normal que los *aluviones* estén formados por materiales muy variados. La capacidad del agua para transportar sedimentos depende de la velocidad de la corriente y de su gasto; esto condiciona un gran poder erosivo en las zonas de curso alto, en que la corriente suele tener fuertes pendientes y, por ende, grandes velocidades, por lo que el agua es capaz de arrastrar sedimentos muy gruesos, del tamaño de la grava y la arena y aún fragmentos de roca, que van rodando cauce abajo.

En el curso medio, la pendiente de los ríos disminuye y correspondientemente lo hace la velocidad, por lo que se restringe la fuerza erosiva por éste concepto; es muy común que por ésta razón en el curso medio de los ríos se depositen los materiales del tamaño de la grava y de la arena, siendo estas zonas muy apropiadas para la búsqueda de estos bancos.

En la etapa final de su recorrido, el río usualmente pierde mucha velocidad, entra a zonas más planas, divaga y busca su salida en el mar, en un lago o en otro río importante; en ésta etapa, el poder erosivo disminuye aún más, especialmente cerca de la desembocadura, en donde suele

ejercerse un efecto de frenaje muy importante por parte de las masas de agua comparativamente estáticas a las que el río terminará por desembocar. Ésta es la zona en que la corriente deposita los materiales más finos, de tipo de los limos y las arcillas. Si el régimen se hace muy lento en la desembocadura, se formará un delta, con predominio notorio de sedimentos muy finos. ⁽¹¹⁾

El Ingeniero que busca “bancos” suele tener información bastante precisa en cuanto a la naturaleza del río que tenga en estudio. Se podrá esperar encontrar gravas en el curso alto, arenas en el curso medio y, limos y arcillas, en el curso bajo y en la desembocadura. Si el río tiene crecientes importantes relativamente poco espaciadas en el tiempo será muy probable encontrar sedimentos más gruesos en las zonas más bajas, especialmente en las curvas del río, en las llanuras de inundación o en las terrazas fluviales vecinas, lugares donde la velocidad, aún en creciente extraordinaria, tenderá a disminuir.

En resumen, los depósitos que sean importantes encontrar en valles fluviales, llanuras de inundación y en terrazas y abanicos aluviales son relativamente variables, no sólo en naturaleza mineralógica, sino también en tamaño y dependen del desarrollo de la corriente, de su régimen hidrológico y de las formaciones que se atraviesan.

Los bancos localizados en depósitos fluviales deberán ser atacados en la época en que el río conserva los niveles más bajos. Pues se corre el riesgo de que su explotación se vea imposibilitada durante las grandes avenidas, interrumpiendo el avance de toda la obra. Así mismo, un inconveniente adicional se encuentra en la contaminación que pueden sufrir los materiales por los suelos finos en suspensión que arrastran los ríos durante sus crecientes.

Los lagos actúan como depósito de sedimentación para las corrientes que a ellos llegan. Los sedimentos más finos penetran en el lago con el agua del río y se depositan en zonas más profundas. Los depósitos lacustres suelen estar estratificados, con capas bastante homogéneas de materiales finos, en las que se manifiesta cierta tendencia a una alternativa de estratos limo-arcillosos con otros de arcillas muy finas.

El viento es otro elemento de transporte fundamental; arrastra sobre el suelo partículas relativamente gruesas y suspende y transporta limos y arenas muy finas. La distancia de acarreo depende del tamaño de la partícula y de la fuerza del viento. Un depósito *eólico* típico es el *loes*. El origen de los *loes* suele estar en depósitos glaciares o en zonas desérticas, a partir de los cuales sobrevino el transporte del viento.

El predominio de las partículas de limo es grande en todos los *loes*, pues las arenas generalmente son demasiado gruesas para sufrir tanto transporte aéreo y las arcillas se defienden mucho más del embate del viento. Por ésta causa, muchos Ingenieros prefieren, por razón propia, exponer los *loes* en cortes verticales, obteniendo mejores resultados que con taludes inclinados, más expuestos a las lluvias.

Los *loes* son buenos y abundantes bancos para material de *terracería*, pero pueden presentar problemas de rebote elástico cuando se usan en la *capa subrasante*, por lo que no conviene aceptarlos para éste fin sin pruebas especiales.

En la búsqueda de materiales para pavimentación, una fuente indiscutible la constituyen las formaciones rocosas sanas donde quiera que aparezcan, exceptuando naturalmente aquellas cuya naturaleza arcillosa no las hace adecuadas para estos fines. Estos materiales deberán ser triturados totalmente y, en algunos casos, sujetos a tratamientos especiales para mejorar alguna característica como, por ejemplo, su afinidad con el asfalto. Durante la explotación de estos bancos, deberá tenerse especial cuidado en evitar las zonas alteradas o la contaminación con arcilla que rellene fracturas o grietas, pudiendo llegarse en algunos casos al recurso del lavado para eliminar estos materiales indeseables.

• EXPLOTACIÓN DE BANCOS

La *explotación de bancos* de roca o suelo se hace utilizando determinados equipos con características y usos bien establecidos por la experiencia previa de construcción. La selección de equipo adecuado para un caso particular será función de tres factores fundamentales:

- 1) La disponibilidad equipo.
- 2) El tipo de material por atacar.
- 3) La distancia de acarreo del material.

En la Fig. 4.3 y 4.4 se muestra en forma esquemática alguna de las operaciones que suele exigir la preparación de un banco, antes de ser explotado, que incluyen el desmonte y la limpieza superficial y un posible afloje del material para facilitar las maniobras de carga y transporte.

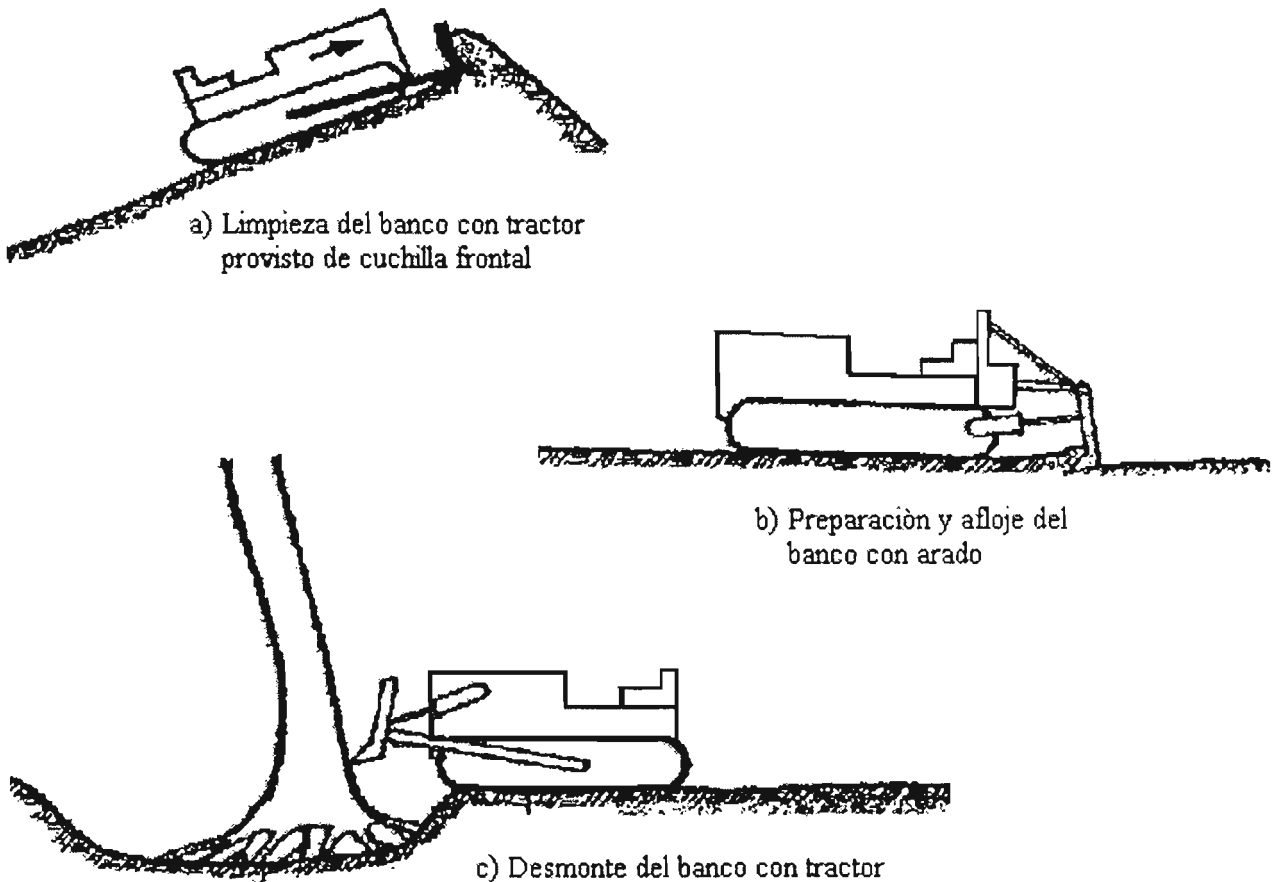


FIGURA 4.3 y 4.4. Limpieza y preparación de un banco. ⁽¹¹⁾

Establecida la clase de equipo, su tamaño es sobre todo función del volumen de la obra por ejecutar, del tiempo en que dicha obra debe realizarse y del espacio disponible para las maniobras. En la actualidad existen máquinas sumamente diversificadas, cuya utilización conjunta y racionalmente programada permite explotaciones muy eficientes y económicas. La tabla 4 presenta los equipos más comunes para la explotación de los bancos de materiales con que más frecuentemente trabaja el Ingeniero de vías terrestres, en la misma tabla se anota el equipo de transporte usual, de acuerdo con la distancia de acarreo y el tipo de material.

TABLA 4. Equipo común para explotación de bancos y transporte de materiales. ⁽¹¹⁾

Tipo de material	Despalme y limpieza (si se requiere)	Preparación del banco	Excavación y carga		Transporte	
			Tamaño máximo (m)	Equipo	Distancia (m)	Equipo
ROCAS						
Roca sana (superficialmente alterada)	Tractor de orugas con cuchilla frontal, inclinable	Barrenación y tronado de acuerdo al tipo de roca y al tamaño por obtener	$0.75 < x < 2.00$	Pala mecánica	Menos de 150	Volquete o camión
			$0.30 < x < 0.75$	Pala mecánica o cargador frontal	De 150 a 2500	Vagoneta o camión
			$0.075 < x < 0.30$	Pala mecánica o cargador frontal	De 2500 a 100000	Camión o remolque
Roca alterada (superficialmente muy alterada)	Tractor de orugas o neumáticos con cuchilla frontal inclinable	Barrenación y tronado, escarificación y moneo o sólo escarificación	$0.30 < x < 0.75$	Pala mecánica o cargador frontal	Menos de 150	Volquete o camión
			$0.075 < x < 0.30$	Pala mecánica o cargador frontal	De 150 a 2500	Vagoneta o camión
					Más de 2500	Camión o remolque
Roca muy alterada (suelo y fragmentos chicos superficiales)	Tractor de orugas o neumáticos con cuchilla frontal inclinable o escrepa con tractor de orugas	Escarificación y moneo o sólo escarificación	$0.075 < x < 0.75$	Pala mecánica o cargador frontal	Menos de 150	Volquete o camión
					De 150 a 2500	Vagoneta o camión
					Más de 2500	Camión o remolque
	Escarificación	$x < 0.075$	Escrepa	Menos de 150	Escrepa con tractor de orugas o motoescrepa	
				De 150 a 2500	Escrepa con tractor neumático o motoescrepa	
SUELOS						
Aluviones	Tractor de orugas o neumáticos con cuchilla frontal inclinable	Escarificación y moneo	$0.30 < x < 0.75$	Pala mecánica o cargador frontal	Menos de 150	Volquete o camión
		Escarificación	$0.075 < x < 0.30$		De 150 a 2500	Vagoneta o camión
	Draga	Ninguno	$x < 0.075$ Bajo el NAF	Draga de almeja o de arrastre	Más de 2500	Camión o remolque
	Tractor de orugas o neumáticos con cuchilla frontal inclinable o escrepa con tractor de orugas	Escarificación	$x < 0.075$ Sobre el NAF	Escrepa	Menos de 150	Escrepa con tractor de orugas o motoescrepa
					De 150 a 2500	Escrepa con tractor neumático o motoescrepa
Arenas, limos y arcillas	Tractor de orugas o neumáticos con cuchilla frontal inclinable	Escarificación cuando está compacto, cementado o duro	$x < 0.005$	Pala mecánica	Menos de 150	Volquete o camión
				Motoniveladora	De 150 a 2500	Vagoneta o camión
				Cargador frontal	Más de 2500	Camión o remolque
	Escrepa con tractor de orugas o motoescrepa	Escarificación cuando está compacto, cementado o duro	$x < 0.005$	Escrepa	Menos de 150	Escrepa con tractor de orugas o motoescrepa
					De 150 a 2500	Escrepa con tractor neumático o motoescrepa
Draga de arrastre o almeja	Ninguno	$x < 0.005$ Bajo el NAF	Draga de arrastre o almeja	Menos de 150	Volquete o camión	
Draga marina	Ninguno		Draga marina	De 150 a 2500	Vagoneta o camión	
				Conducción hidráulica al tanque de sedimentación		

La figura 4.5 esquematiza alguno de los casos de explotación con pala mecánica, que es un equipo de uso frecuente. El elemento de ataque de la pala es muy variable de acuerdo con la naturaleza y la posición relativa del banco. La cuchara normal se usa para cargar materiales rocosos o suelo, cuando están en frentes verticales o amontonados; la operación con draga de arrastre se utiliza cuando el material ha de ser recogido, como sucede cuando está a nivel inferior de la máquina o cuando está bajo el agua; la almeja es útil cuando en una mezcla de abundantes fragmentos de roca y suelos, se desea seleccionar los primeros para su utilización.

En la figura 4.6 se muestra el trabajo de un cargador frontal, muy utilizado en la práctica de las vías terrestres.

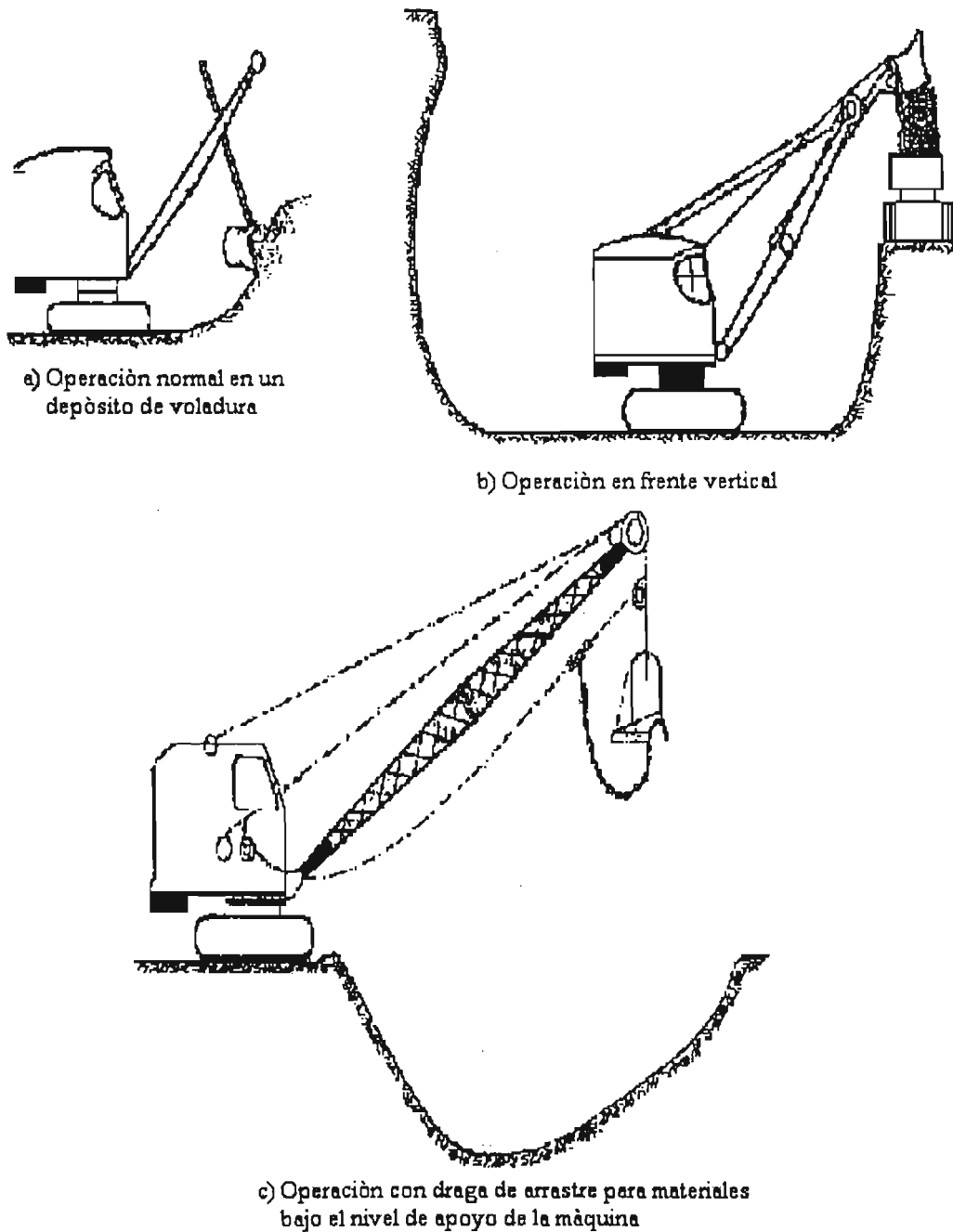


FIGURA 4.5. Explotación de un banco con pala mecánica. ⁽¹¹⁾

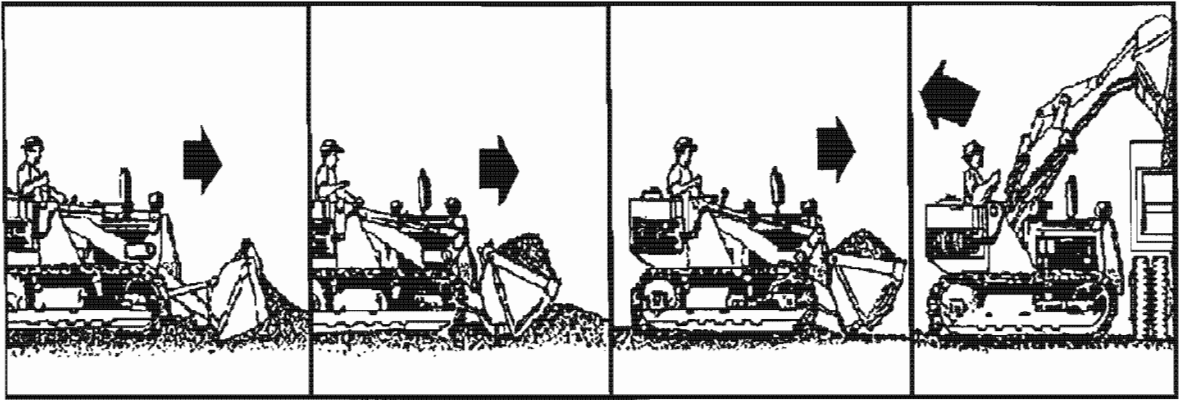


FIGURA 4.6. Trabajo de un cargador frontal en la explotación de un banco. ⁽¹¹⁾

Es de señalar el uso cada vez mayor que se está haciendo de tractores pesados con arados para fragmentar los materiales hasta un grado tal que puedan ser removidos por el propio tractor o por otras máquinas, evitando así operaciones de barrenación y uso de explosivos, que siempre son más lentas y costosas. El tractor se utiliza también como máquina excavadora y empujadora, por efecto de su cuchilla frontal, estando limitada la primera acción generalmente a no más de 50 cm.; para estos trabajos suele recurrirse casi siempre al tractor de orugas, quedando reservado el de llantas neumáticas para maniobra de remolque de equipo de transporte a distancias cortas (entre 150 m. y 250 m.).

En la construcción pesada se impone cada vez más la utilización de escrepas auto-propulsadas y autocargables, cuando la naturaleza del material permite su operación, pues obviamente resultan equipos muy rápidos y versátiles en lo que se refiere tanto al material que con ellos se puede manejar, como a la distancia a que es económico efectuar el acarreo. Es frecuente que se ayude su capacidad de autocarga empujándolas con un tractor, el cual se emplea en la disgregación del material durante el tiempo de acarreo de la motoescrepa. Las escrepas no autopropulsadas se emplean remolcadas, generalmente por tractores de llantas y operan eficientemente en distancias de acarreo cortas.

La pala mecánica exige frentes de ataque bien definidos y de volúmenes abundantes, de manera que no hayan de ser trasladadas con frecuencia. La gran mayoría opera sobre orugas, lo que permite que se adapten a cualquier tipo de terreno, aún con pendientes muy fuertes, conservando siempre buena estabilidad.

En la explotación de los bancos es fundamental establecer una relación adecuada entre la capacidad de las máquinas removedoras y excavadoras y los elementos de transporte; sólo así podrán evitarse costosas interferencias o tiempos ociosos. Conviene que la capacidad de la caja de los vehículos transportadores sea un múltiplo entero de la capacidad del elemento que excava o carga.

Durante la *explotación de bancos de roca*, en la que el estrato aprovechable se encuentra cubriendo otro de características inadecuadas, por ejemplo, una corriente de lava sobre una capa de arcilla, deberá atacarse el banco de manera que siempre se tenga sobre el piso constituido por el material inadecuado, una capa de por lo menos 30 a 50 cm. de rezaga del propio banco, para evitar posibles contaminaciones. Todos los materiales constituidos por partículas de diferentes tamaños, tienden siempre a segregarse cuando se les coloca en un depósito, dejándolos caer desde la parte alta sobre el talud del mismo. Para corregir dicha segregación al cargar nuevamente el material deberá tomarse éste desde la parte baja, mezclando así todos los tamaños que presenta el frente completo del depósito y nunca mediante capas horizontales tomadas de la parte superior del depósito.

4. ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE
4.3.5 SEÑALAMIENTO HORIZONTAL Y VERTICAL

En la Ingeniería de carreteras existen 2 tipos de señalamientos:

- El *Señalamiento horizontal* que son las rayas, palabras, símbolos y objetos, aplicados o adheridos sobre el pavimento.
- El *Señalamiento vertical* que son todas aquellas señales construidas con placas e instaladas a través de postes.

SEÑALAMIENTO HORIZONTAL:

El *Señalamiento horizontal* es el conjunto de marcas que tienen por objeto delinear las características geométricas de las vialidades y denotar todos aquellos elementos estructurales que estén instalados dentro del derecho de vía, con el fin de regular y canalizar el tránsito de vehículos y peatones, así como proporcionar información a los usuarios. Estas marcas pueden ser rayas, símbolos, letras o dispositivos, que se pintan o colocan sobre el pavimento, guarniciones y estructuras, dentro o adyacentes a las vialidades. ⁽¹²⁾

El *señalamiento horizontal* para calles, carreteras y autopistas, por su uso, se clasifica como se indica en la tabla 5:

TABLA 5. Clasificación del señalamiento horizontal. ⁽¹²⁾

Clasificación	Tipos de marcas
M – 1	Raya separadora de sentidos de circulación
M – 1.1	Raya continua sencilla (calzada hasta 6.5 m.)
M – 1.2	Raya discontinua sencilla (calzada hasta 6.5 m.)
M – 1.3	Raya continua doble (calzada mayor de 6.5 m.)
M – 1.4	Raya continua – discontinua (calzada mayor de 6.5 m.)
M – 1.5	Raya discontinua sencilla (calzada mayor de 6.5 m.)
M – 2	Raya separadora de carriles
M – 2.1	Raya separadora de carriles, continua sencilla
M – 2.2	Raya separadora de carriles, continua doble
M – 2.3	Raya separadora de carriles, discontinua
M – 3	Raya en la orilla de la calzada
M – 3.1	Raya en la orilla derecha, continua
M – 3.2	Raya en la orilla derecha, discontinua
M – 3.3	Raya en la orilla izquierda
M – 4	Raya guía en zonas de transición
M – 5	Rayas canalizadoras
M – 6	Rayas de alto
M – 7	Rayas para cruce de peatones
M – 7.1	Rayas para cruce de peatones en vías rápidas
M – 7.2	Rayas para cruce de peatones en calles secundarias
M – 8	Marcas para cruce de ferrocarril
M – 9	Rayas con espaciamiento logarítmico
M – 10	Marcas para estacionamiento
M – 11	Símbolos para regular el uso de carriles
M – 12	Marcas en guarniciones
M – 12.1	Para prohibición del estacionamiento
M – 12.2	Para delinear guarniciones
M – 13	Marcas en estructuras y objetos adyacentes a la superficie de rodamiento
M – 13.1	Marcas en estructuras
M – 13.2	Marcas en otros objetos
DH – 1	Violetas sobre el pavimento
DH – 2	Violetas sobre estructuras
DH – 3	Botones

SEÑALAMIENTO VERTICAL:

El *señalamiento vertical* es el conjunto de tableros fijados en postes, marcos y otras estructuras, con leyendas y/o símbolos que tienen por objeto regular el uso de la vialidad, indicar los principales destinos, la existencia de algún sitio turístico o servicio, transmitir al usuario un mensaje relativo a la calle, carretera o autopista. ⁽¹²⁾

Las *señales verticales*, según su *función*, se clasifican como se indica en la tabla 6:

TABLA 6. Clasificación funcional del señalamiento vertical. ⁽¹²⁾

Clasificación	Tipos de marcas
SP	Señales preventivas
SR	Señales restrictivas
SI	Señales informativas
SII	Señales informativas de identificación
	De nomenclatura
	De ruta
SID	De kilometraje
	Señales informativas de destino
	Previas
	Diagramáticos
SIR	Decisivas
	Confirmativas
	Señales informativas de recomendación
	Señales de información general
SIG	Señales de información general
STS	Señales turísticas de servicios
SIT	Señales turísticas
SIS	Señales de servicios
OD	Señales diversas
OD - 5	Indicadores de obstáculos
OD - 6	Indicadores de alineamiento
OD - 8	Reglas y tubos guía para vados
OD - 12	Indicadores de curvas peligrosas

FUENTE: NORMA SCT
N-PRY-CAR-10-01-001/99
PRY. Proyecto.

Según su estructura de soporte, las *señales verticales* se clasifican en:

- Señales bajas:
 - En un poste.
 - En dos postes.
- Señales elevadas:
 - Bandera sencilla.
 - Bandera doble.
 - Tipo puente.

Señales Preventivas:

Son las señales de color amarillo que tienen un símbolo y que tienen por objeto prevenir a los conductores de la existencia de algún peligro en el camino y su naturaleza.

Señales Restrictivas:

Son las señales de color blanco con un aro de color rojo y que tienen por objeto indicar la existencia de limitaciones físicas o prohibiciones reglamentarias que regulan el tránsito. La no obediencia de algunas de estas señales está tipificada con multas en los *reglamentos de tránsito*.

Señales Informativas:

Son señales con leyendas y/o símbolos, que tienen por objeto guiar al usuario a lo largo de su itinerario por calles y carreteras e informarle sobre nombres y ubicación de poblaciones, lugares de interés, servicios, kilometrajes y ciertas recomendaciones que conviene observar. Estas señales se clasifican en:

- De Identificación
- De Destino
- De Recomendación
- De Información General
- De Servicios y Turísticas

Informativas de Identificación:

Tienen por objeto identificar las calles según su nombre y las carreteras según su número de ruta y kilometraje.

Informativas de Destino:

Tienen por objeto informar a los usuarios sobre el nombre y la ubicación de cada uno de los destinos que se presentan a lo largo de su recorrido. Su aplicación es primordial en las intersecciones en donde el usuario debe elegir la ruta a seguir según el destino seleccionado.

Informativas de Recomendación y de Información General:

El objetivo de estas señales es, informar determinadas disposiciones y recomendaciones de seguridad que conviene observar, así como cierta información general que conviene conocer.

Informativas de Servicios y Turísticas:

Tienen por objeto informar de la existencia de un servicio o de un lugar de interés turístico y/o recreativo.

CONSEJOS PRÁCTICOS PARA LA INTERPRETACIÓN DEL SEÑALAMIENTO VERTICAL

- 1) Estar alerta cuando te encuentres con una *señal preventiva*, ya que ésta te indicará que adelante podrás encontrarte con una situación en la que debas adoptar medidas de precaución para efectuar una maniobra, de la que dependerá tu propia seguridad y la de los demás vehículos.
- 2) Obedecer las indicaciones de las *señales restrictivas*, ya que éstas denotan la existencia de limitaciones o prohibiciones que exigen las propias circunstancias de la carretera y de la reglamentación del tránsito. Recordar que la desobediencia de estas señales implica sanciones establecidas en los *reglamentos de tránsito*.
- 3) Estar atento a las indicaciones de las *señales informativas*, ya que representan un auxilio muy útil para guiarte en el itinerario que llevas en tu viaje.
- 4) No destruyas el señalamiento, puesto que es uno de los principales medios para salvaguardar la seguridad del tránsito y del usuario en las calles y carreteras.

4.3.6 DERECHO DE VÍA

Se entiende por derecho de vía, la franja de terreno medida en proyección horizontal y perpendicular en ambos lados del eje de la vía y en forma continua, destinada a la construcción conservación, mantenimiento, seguridad, ensanches de vía o ubicación de las instalaciones de servicios. Para el uso de dicha franja debe de cumplirse estrictamente las reglas establecidas en la *Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal*.⁽¹⁰⁾

Corresponde al gobierno federal, a los estados, y concesionarios, recuperar de manera prioritaria el *derecho de vía* en los casos en que halla sido invadido o perturbado en cualquier tramo de la red estatal y nacional. (ver figura 4.7).



FIGURA 4.7. Esquema donde se invade el derecho de vía.

Las dimensiones mínimas del *derecho de vía* de las carreteras estatales son: ⁽⁹⁾

- 1) En caminos o carreteras rurales, un ancho mínimo de 20 metros; 10 metros a cada lado a partir del eje del camino;
- 2) En caminos o carreteras interurbanas, un ancho mínimo de 40 metros; 20 metros a cada lado a partir del eje del camino; y
- 3) En caminos o carreteras urbanas, interurbanas y vialidades que cuenten con dos o más cuerpos, quedará comprendido entre las líneas ubicadas a 20 metros hacia el exterior de los ejes de los cuerpos extremos. En ningún caso éste ancho podrá ser menor a los 40 metros. Tratándose de carreteras o vialidades ubicadas en las inmediaciones de zonas urbanas consolidadas, el ancho mínimo lo fijará la *Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal*.

OBRAS PERMITIDAS DENTRO DEL DERECHO DE VÍA DE LAS CARRETERAS ⁽⁹⁾

- Instalaciones marginales
- Cruzamientos
- Anuncios
- Paradores
- Accesos
- Dispositivos para el control de tránsito.

INSTALACIONES MARGINALES

Consideraciones generales:

La instalación será de poliducto, ductos, cables, etc. Las instalaciones que se permitan en zonas de entronques quedarán condicionadas a las limitantes de la SCT.

En caso de instalaciones marginales subterráneas, la profundidad de la instalación debe ser como mínimo de 1.20 m. para la fibra óptica y 0.75 m. para ductos de gas, y debe de contar con un señalamiento que indique su ubicación, así como los teléfonos de la empresa responsable. En instalaciones aéreas, la cimentación de los postes no debe sobresalir el nivel del terreno. ⁽⁹⁾

Requisitos:

- 1) Solicitud completa.
- 2) Descripción de las instalaciones, programando las diferentes etapas de ejecución.
- 3) Plano de ubicación y especificación de la obra por cada tipo de instalación:
 - Se elaborará en papel que permita obtener copias.
 - Se doblará de tal manera que quede a tamaño carta; su dimensión máxima no debe exceder los 100 cm. de largo.
 - El margen izquierdo será de 5 cm. y el resto de 1 cm.
 - En la parte central superior se dibujará la planta general en la que se indicará lo siguiente:
 - La planta del tramo donde se llevará la instalación, incluyendo ésta en color rojo.
 - Los kilometrajes según la secuencia de la carretera.
 - Con flechas, se indicarán las poblaciones inmediatas.
 - En ambos extremos de la planta, se dimensionará toda la geometría del camino, incluyendo los anchos de la corona y de la carpeta asfáltica.
 - Deberá dibujarse todo lo que tenga influencia en el proyecto: árboles, postes, otras instalaciones, banquetas, etc.
 - En caso de zonas urbanas deben dibujarse los parámetros de las construcciones aledañas.
 - En la parte central media inferior del plano, se dibujará una sección transversal, mostrando el eje de la carretera, el ancho de derecho de vía, de la corona y de la carpeta asfáltica, altura de la rasante, distancia del terreno natural a la parte superior del ducto y la ubicación transversal de la instalación.
 - En la parte superior izquierda se dibujará el croquis general de localización.
 - El norte hacia arriba.
 - Nombre y número de la carretera, poblaciones y kilometraje.
 - Espacio en la parte central izquierda y derecha para las notas de la SCT.
 - En la parte inferior izquierda, el detalle de corte transversal.
 - En el lado superior derecho, se ubicará una tabla de materiales.
 - En el lado inferior derecho, se ubicará el membrete SCT de 12 x 10 cm. y el cuadro de referencia del interesado con sus datos.

CRUZAMIENTOS

Es toda obra o instalación superficial, subterránea o elevada que atraviesa una carretera.

Consideraciones generales:

La instalación será de poliducto, ductos, cables, etc. Las instalaciones que se permitan en zonas de entronques quedarán condicionadas a las limitantes de la SCT.

En caso de cruzamientos bajo alcantarilla o puente, el ducto podrá instalarse a través de una zanja. En cruzamientos aéreos, la cimentación de los postes no debe sobresalir el nivel del terreno. La SCT fijará en cada caso en particular, las alturas mínimas de la estructura con respecto a la rasante.⁽⁹⁾

Requisitos:

- 1) Solicitud completa.
- 2) Descripción de las instalaciones, programando las diferentes etapas de ejecución.
- 3) Plano de ubicación y especificación de la obra para cada tipo de instalación:
 - Se elaborará en papel que permita obtener copias.

- Se doblará de tal manera que quede a tamaño carta; su dimensión máxima no debe exceder los 100 cm. de largo.
- El margen izquierdo será de 5 cm. y el resto de 1 cm.
- En la parte central superior se dibujará la planta general en la que se indicará lo siguiente:
 - La planta del tramo donde se llevará el cruzamiento, incluyendo éste en color rojo.
 - Los kilometrajes según la secuencia de la carretera.
 - Con flechas, se indicarán las poblaciones inmediatas.
 - En ambos extremos de la planta, se dimensionará toda la geometría del camino, incluyendo los anchos de la corona y de la carpeta asfáltica.
 - Deberá dibujarse todo lo que tenga influencia en el proyecto: árboles, postes, otras instalaciones, banquetas, etc.
- En caso de que el cruzamiento sea enviado, indicar el ángulo de incidencia:
 - Ancho de derecho de vía.
- En caso de zonas urbanas deben dibujarse los parámetros de las construcciones aledañas.
- En la parte central media inferior del plano, se dibujará una sección transversal, mostrando el eje de la carretera, el ancho de derecho de vía, de la corona y de la carpeta asfáltica, altura de la rasante, distancia del terreno natural a la parte superior del ducto y la ubicación transversal de la instalación.
- En la parte superior izquierda, se dibujará el croquis general de localización.
- El norte hacia arriba.
- Nombre y número de la carretera, poblaciones y kilometraje.
- Espacio en la parte central izquierda y derecha para las notas de la SCT.
- En la parte inferior izquierda, el detalle de corte transversal.
- En el lado superior derecho, se ubicará una tabla de materiales.
- En el lado inferior derecho, se ubicará el membrete SCT de 12 x 10 cm. y el cuadro de referencia del interesado con sus datos.

ANUNCIOS

Los anuncios son rótulos de información, publicidad o propaganda que se difunden a los usuarios de la carretera, mensajes de información general o relativa a la producción y comercialización de bienes y servicios así como actividades cívicas, políticas o culturales.

Solamente se autorizará dicha instalación en las zonas fijadas por la SCT y preservando una franja de 10 m. a partir del límite de derecho de vía.

Para evitar accidentes causados por distracción por parte del conductor, o por fenómenos naturales que puedan derribar dichas instalaciones sobre las carreteras, las zonas y especificaciones de instalación se determinarán conforme a los siguientes criterios: ⁽⁹⁾

- Solicitud completa
- A partir de 3 km. del límite urbanizado de las poblaciones.
- Cada 10 km. en caminos rectos.
- En cruces, entronques de caminos, pasos superiores y pasos inferiores, las zonas de anuncios se establecerán fuera de un radio de 100 m. y en zonas de curvas y cambios de alineamiento horizontal o vertical, de 150 m.
- La separación mínima entre los anuncios deberá ser de 300 m. El ángulo con el que se colocarán, será de 0° a 20° con respecto a la normal del eje de la carretera.
- Queda prohibida la utilización de anuncios luminosos.

PARADORES

Corresponde a instalaciones y construcciones adyacentes al *derecho de vía* de una carretera estatal en las que se proporciona alojamiento, alimentación, sanitarios, servicios a vehículos y comunicaciones o cualquier otro similar a éstos; también denominados como servicios conexos o auxiliares. ⁽⁹⁾

Requisitos:

- Plano general de construcción.
- Plano de instalaciones hidrosanitarias.
- Calendarización del programa de obra.

El permiso expresará lo siguiente:

- Normas y especificaciones de construcción de obra.
- Servicios a prestar.
- El término para la puesta en servicio.
- Sanciones por incumplimiento.
- Causas de revocación, caducidad y extinción.
- Autorización para la ubicación y los proyectos del acceso y del parador, sus anuncios y señalamientos.

ACCESOS

Es la obra vial que enlaza un predio o construcción con una carretera para permitir la entrada y salida de vehículos mediante carriles de aceleración y desaceleración.

El *permisionario*, es la persona física o moral autorizada por la *Junta de Caminos* del gobierno federal para usar o aprovechar el *derecho de vía* de las carreteras estatales o sus zonas laterales.

En caso de *accesos*, el *permisionario* deberá cumplir con lo siguiente: ⁽⁹⁾

- Aviso por escrito al centro *SCT*, con una anticipación de 10 días, donde se señale el inicio de la obra.
- Concluir la obra en un plazo no mayor de 180 días naturales y llevarla a cabo estrictamente conforme al proyecto elaborado o revisado por la *SCT*.

En la zona de cruceros, entronques de caminos, pasos superiores y pasos inferiores, los accesos deberán establecerse fuera de un radio de 100 m., y en zona de curvas a 150 m.

Queda prohibido dentro del *derecho de vía*:

- La construcción de cualquier tipo de obra o edificación distintas a las señaladas en la *Ley de Vías Generales de Comunicación*.
- La construcción o instalación de topes que no se ajusten a las especificaciones técnicas determinadas por la *Junta de Caminos* del gobierno federal.
- La construcción o instalación de cualquier tipo de obra que por su magnitud o importancia altere o impacte la capacidad, operación o nivel de servicio vial.
- La construcción o instalación de cualquier tipo de obra que atente contra el paisaje de las carreteras.
- La construcción o instalación de cualquier tipo de obra que modifique las condiciones de ecología o medio ambiente.
- La construcción o instalación de comercios fijos, semifijos o ambulantes.

DISPOSITIVOS PARA EL CONTROL DEL TRÁNSITO

Son todos aquellos elementos que se colocan dentro del *derecho de vía* para proteger, encauzar o prevenir a conductores de vehículos o peatones; tales como: cercas, defensas, vialetas, indicadores de obstáculos o de alineamiento, reductores de velocidad, semáforos, defensa central, así como cualquier otro análogo. ⁽⁹⁾

En vías que cuenten con dispositivos de *control de tránsito*, podrá hacerse uso del mobiliario urbano de acuerdo con lo siguiente:

- 1) Las dimensiones máximas permitidas serán de 3.50 m. de altura y del 80% del ancho de corona del camino que se trate. En ningún caso podrá excederse de una superficie por cara de anuncio de 60 m².
- 2) Deberá presentar un peritaje así como memoria de cálculo del mobiliario del que se hará uso así como de la estructura que será instalada en el mismo; y
- 3) Deberán contener un mensaje vial aprobado por la *Junta de Caminos* del gobierno federal.

Fuente:

Diario oficial de la Federación Mexicana. Junta de Caminos del Estado de México. Publicado el 14 de septiembre de 1999.

4.3.7 CONTROL DE CALIDAD

El *control de calidad* se define como el conjunto sistemático de esfuerzos, principios, prácticas y tecnología de una organización de producción o industria, para asegurar, mantener o superar la calidad de un producto al menor costo posible.

La calidad quiere decir “lo mejor para el consumidor o el usuario”; la responsabilidad de la calidad recae tanto en el productor como el usuario o consumidor. En las obras públicas, la responsabilidad del consumidor recae en las autoridades públicas, por lo éstas deben contar con un buen sistema de control de calidad para cumplir a la ciudadanía.

a) Control de calidad en el proyecto de carreteras

Para construir las vías terrestres, es necesario llevar acabo diferentes controles, a fin de obtener obras con calidad necesaria en el tiempo programado y con los costos presupuestados. *El control de calidad de carreteras*, interviene en todas las etapas de la obra, es decir, desde el proyecto y construcción hasta la operación y el mantenimiento.

b) Especificaciones

Es muy importante el conjunto de especificaciones que se manejen en el programa del *control de calidad*, pues fijan de un modo u otro las metas que se persiguen, los procedimientos de construcción, la forma de medición de los volúmenes de obra, las bases de pago y el modo de verificar si se ha alcanzado lo deseado.

Las especificaciones o normas de construcción de los materiales resultan de investigaciones, experiencias y estudios minuciosos de correlación, que toman en cuenta todas las condiciones de clima, geología, tránsito, etc., que pudieran afectarles. Las especificaciones deben ser realistas y ajustarse a lo que debe y puede lograrse, dadas las condiciones del país en donde se construirán las obras.

Recientemente se ha introducido el concepto de “control de calidad total”, que básicamente consiste en involucrar a “todo” el personal de una industria constructora para que al realizar correctamente su trabajo, se consiga la calidad necesaria en la obra durante su elaboración.

La finalidad de una industria de la construcción, es elaborar productos que cumplan el objetivo para el que fueron proyectados al menor costo posible. En el precio se incluyen los gastos que corresponden a elaborar, operar y mantener el bien producido.

Para asegurar que se efectúe la finalidad de las industrias, se requieren los controles de calidad, de avance y de costos que deben estar muy bien coordinados unos con otros para llegar a la meta requerida (Fig. 4.8). Por tanto *controlar* implica:

- Fijar un plan o meta.
- Diseñar un sistema de mediciones.
- Establecer los medios para corregir las desviaciones.
- Determinar un plan de mejoramiento.

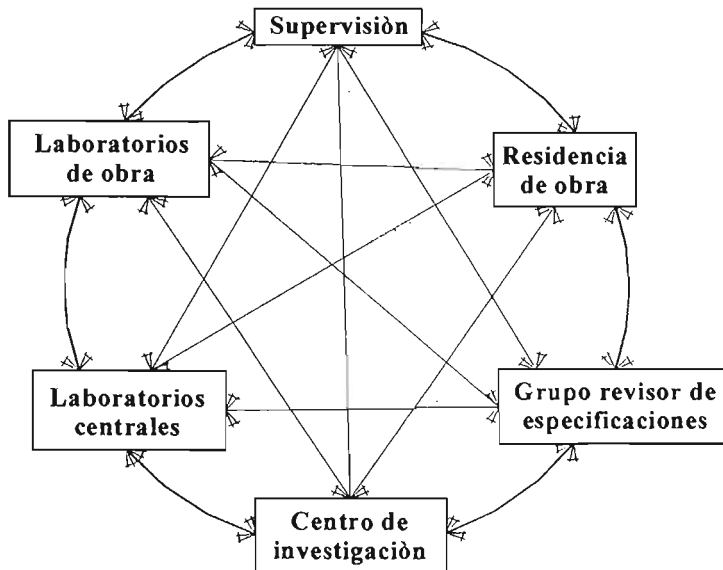


FIGURA 4.8. Esquema que muestra los elementos del control de calidad, que deben estar perfectamente coordinados para ser efectivos. ⁽¹⁰⁾

4.3.8 ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO

Es importante que el proyecto de carreteras incluya la *estrategia de mantenimiento* a que debe someterse el tramo después de los trabajos realizados, con objeto de mantener al pavimento en el nivel operativo deseado y prolongar su vida útil. Una *estrategia de mantenimiento* consiste en:

- Mantener y ampliar la red para agilizar el tránsito de carga y pasajeros que aumentará por el gran número de transportistas de importaciones y exportaciones.
- Promover una mayor participación de líneas de transporte de carga y pasajeros como resultado de la desregulación a transportistas; así también, la instalación y mejoramiento de servicios conexos para camiones y autobuses (gasolineras, talleres, áreas de descanso, etc.).
- Los transportistas deben desde ahora adecuarse a las reglamentaciones legales, técnicas, operativas, de seguridad y de servicio del gobierno federal.

4.4 EVALUACIÓN DE PROYECTOS

Cada vez se hace mayor hincapié en los estudios de costos de carreteras, debido a las reducidas sumas que se disponen tanto para la *construcción, mantenimiento y rehabilitación*. También ha sido creciente el consenso entre los administradores de caminos, economistas e ingenieros, el principio general de minimizar el costo total de transporte, como base para determinar las políticas de construcción y mantenimiento de carreteras.

La realización de análisis económicos en la Ingeniería de pavimentos ha recibido gran atención en estos últimos años, debido a que constituye un elemento fundamental para la toma de decisiones. Dichos análisis pueden efectuarse para un proyecto en particular o para toda una red, extendiéndose su aplicación tanto al campo de los pavimentos nuevos como en casos de su mantenimiento, rehabilitación y refuerzo.

Recientemente se ha determinado que en la evaluación de proyectos no es suficiente considerar los costos propios del organismo, relativos a la construcción inicial, conservación y rehabilitación. Se hace necesario además considerar los siguientes puntos:

1) **Período de diseño ò de análisis**

La evaluación requiere que el análisis se realice para los mismos períodos de tiempo. En general los períodos dependen de las características de los volúmenes de tránsito, es decir:

- Volúmenes altos: 20 a 50 años.
- Volúmenes bajos: 15 a 25 años.
- En rehabilitaciones: 10 a 20 años.

El período de vida útil de un pavimento, es aquel que va desde el día de su puesta en servicio hasta el momento en que el evaluador quiere realizar su análisis. Por lo tanto, podría suceder que el período de análisis sea mayor o menor que el período de diseño (Fig. 4.9). El período de diseño es el tiempo mínimo para el cual el *pavimento flexible* fue diseñado, es decir, el tiempo que se supone que resistirá las cargas estimadas que pasarán por él. ⁽¹⁾

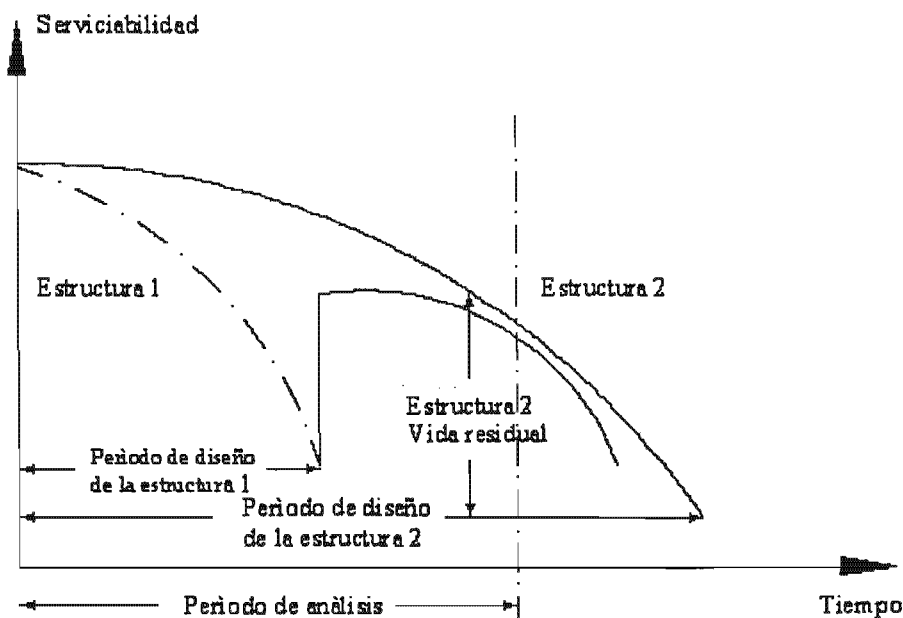


FIGURA 4.9. Períodos de análisis. ⁽¹⁾

2) Tasa de interés

Es la tasa usada para calcular los gastos futuros en términos de dinero actual. Ésta sirve para comparar distintas alternativas de uso de dinero. Los valores a aplicar dependen del evaluador, siendo común en algunos países usar entre el 6% y 12%.

3) Valor residual

Éste costo o beneficio también debe tenerse en cuenta en la evaluación y representa el valor remanente que tiene la parte física del camino en cualquier instante de su vida. A medida que el clima y las cargas proporcionadas por el tránsito actúan sobre el camino, éste comienza a deteriorarse, por lo que el valor original del camino, con el transcurso del tiempo, va disminuyendo debido a que su deterioro aumenta. Entonces el *valor residual* que un pavimento tiene el primer día de abierto al tránsito, es igual al valor de construcción y a medida que el tiempo pasa, su valor disminuye.

Una forma de calcular el *valor residual* es determinar qué hay que realizar al camino en un momento determinado para que resista un período igual al de su diseño original, y bajo las mismas condiciones de carga. Luego al valor de construcción inicial restarle el valor calculado anteriormente y así obtener el *valor residual* (Fig. 4.10):

$$VR = Co - CR$$

Donde:

VR = Valor residual.

Co = Valor de construcción inicial.

CR = Costo de rehabilitación.

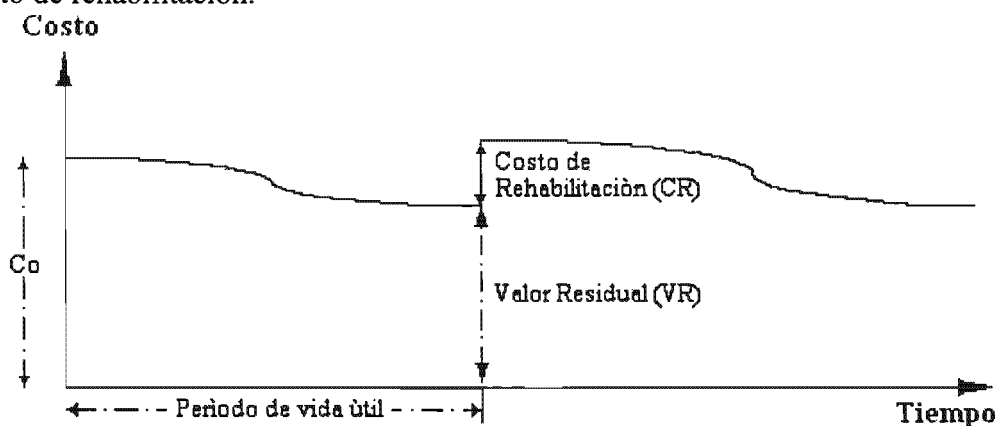


FIGURA 4.10. Valor residual y costo de rehabilitación del pavimento flexible. ⁽¹⁾

4.4.1 EVALUACIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO

Los *pavimentos* son estructuras diseñadas para entregar a los usuarios seguridad y comodidad al conducir, esto significa que el camino debe entregar un nivel de servicio acorde a la demanda que lo solicita. Dentro de éste aspecto existe lo que se llama evaluación de las condiciones de un pavimento, lo que se divide en:

- 1) *Evaluación funcional*: Se refiere a la calidad del servicio, proporcionada por los usuarios de un pavimento, por la superficie de rodamiento en un momento determinado, se realiza periódicamente (por ejemplo, anualmente), a través del *índice de servicio actual (ISA)*, generalmente.
- 2) *Evaluación de daños*: Se refiere a la exploración visual y el registro de la frecuencia y severidad de los distintos tipos de daños presentes en un pavimento.

- 3) *Evaluación estructural*: Se refiere a la evaluación de la capacidad de la estructura de pavimento para soportar las cargas del tránsito; se realiza a través del análisis de los materiales que componen las capas del pavimento o mediante equipos que aplican una carga determinada al pavimento, midiendo su respuesta inmediata en términos de deflexiones.
- 4) *Evaluación de seguridad*: En el contexto de los pavimentos, se maneja comúnmente a través de la medición de la resistencia al derrapamiento de la superficie de aquellos, aunque también puede incluir factores tales como la profundidad de las roderas que pueden afectar el control de la dirección vehicular por parte del conductor, el potencial de deslizamiento cuando el pavimento se encuentra mojado o congelado. (ver capítulo 2).

Estas evaluaciones son en sí, las de mayor importancia para la *evaluación técnica de pavimentos*. La *evaluación técnica de pavimentos* es generalmente dirigida hacia los siguientes objetivos:

- Selección de proyectos y estrategias de tratamientos a nivel de red.
- Identificación de requerimientos específicos de mantenimiento a nivel de proyecto.

Cada uno de estos objetivos requiere de información para su evaluación en mayor menor grado de detalle. En el caso de requerir el menor grado de detalle, un conjunto de medidas individuales pueden comprender la información suficiente. Tal conjunto de información representa una composición de medidas combinadas de la calidad de un pavimento.⁽¹³⁾

4.4.2 EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO

Los proyectos que implican la construcción de nuevas instalaciones de infraestructura son a menudo realizadas por entidades corporativas creadas especialmente con esa finalidad, la cual pasa a ser también el mecanismo para reunir fondos con destino al proyecto lo cual se obtiene mediante préstamos obtenidos en mercados comerciales y la inversión del capital social de la empresa, previa evaluación financiera del proyecto basada principalmente en los siguientes criterios:

- El valor actualizado que tenga las tasas de crecimiento y otros gravámenes propuestos durante el período de la concesión.
- El valor actualizado de los pagos directos que proponga eventualmente la autoridad contratante.
- Los costos de las actividades de diseño y construcción, los costos anuales de mantenimiento, el valor actualizado de los costos de capital.
- El apoyo financiero que se espere eventualmente del Estado.
- La solidez de los arreglos financieros propuestos.
- El grado de aceptación de las condiciones contractuales propuestas.

Para llevar a cabo los criterios anteriores es necesario realizar una evaluación preliminar de la viabilidad del proyecto, en particular de los aspectos económicos, como las ventajas económicas previstas, los costos estimados y los ingresos que se prevé que aportará el manejo de la infraestructura y las repercusiones ecológicas del proyecto.

Para ésta evaluación se requiere una previsión precisa de los costos de capital, ingresos y los costos previstos, los gastos, impuestos y el pasivo del proyecto. A fin de prever esas cifras con exactitud y certeza y para crear un modelo financiero para el proyecto; suele ser necesario proyectar las cifras básicas de ingresos, costos y gastos de la sociedad del proyecto durante un

largo período de tiempo de 20 años o más, a fin de determinar la deuda y el capital social que el proyecto puede apoyar. Para éste análisis es esencial la determinación y cuantificación de los riesgos. Por ésta razón, la determinación, evaluación, asignación y atenuación de riesgos, son elementos cruciales, desde el punto de vista financiero, para el método de finanzas de proyectos.

Entre los riesgos más importantes y también difíciles de evaluar y atenuar figuran el “riesgo político”, es decir, que el gobierno o sus organismos y tribunales adopten medidas adversas particularmente en lo relativo a la concesión de licencias y permisos. “El riesgo monetario”, o bien, el riesgo para el valor, transferibilidad y la convertibilidad de la moneda del país.

Los estudios anteriores deberán especificar claramente los resultados que se esperan del proyecto, justificar suficientemente la inversión, proponer una modalidad de participación del sector privado y describir una solución particular de los resultados exigidos.

Tras la determinación del futuro proyecto, concretar su prioridad relativa y asignar recursos humanos y de otro tipo para su ejecución, es aconsejable que se examinen los requisitos legales o reglamentarios para el manejo de instalaciones de infraestructura del tipo propuesto, a fin de precisar las principales autoridades públicas cuya colaboración sea necesaria para la ejecución del proyecto.⁽¹³⁾

4.4.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

La planeación es una metodología útil en *la construcción, reconstrucción y conservación* de sistemas de Ingeniería Civil, por contribuir de manera importante en un proceso sistemático de racionalización de decisiones. En el caso de carreteras, éste proceso de toma de decisiones, se organiza conforme a un plan de actividades para materializar con la infraestructura física, algún aspecto del desarrollo económico nacional, regional o estatal.

Se alcanza el concepto del proyecto, cuando éste proceso de planeación se individualiza en su más pequeña expresión para implementarse; ésta actividad de planear implica la recolección de antecedentes para diagnosticar alternativas y evaluarlas, esto es, identificar y desarrollar un proceso continuo de toma de decisiones.

Con la *evaluación económica* de los pavimentos nuevos o rehabilitados, se pueden pretender dos objetivos diferentes. El primero consiste en la definición, para una sección determinada, de cuáles son, en el caso concreto de que se trate, los costos de construcción y los de conservación que se van a producir en el futuro dentro del período de análisis. El segundo objetivo de la *evaluación económica* se puede enmarcar en las acciones de planeación a cargo de un organismo, efectuando la comparación de diferentes soluciones de manera que se puedan establecer directrices de carácter general que, en cualquier caso, deberán ser revisadas al materializarlas en un proyecto específico.⁽¹³⁾

Los objetivos que se persiguen con la *evaluación económica* pueden ser los siguientes:

- Evaluar un proyecto con fines de su aceptación o rechazo.
- Establecer un orden de importancia en un conjunto de proyectos independientes.
- Elegir la alternativa más conveniente entre varios proyectos excluyentes entre sí.

El objetivo de éste capítulo es tratar de abarcar el conjunto de técnicas de la evaluación de proyecto en el contexto de la planeación. Sin embargo, los documentos de los proyectos siguen una línea en cuanto a la agrupación de ciertos aspectos, lo cual viene a integrar estudios parciales interdependientes, con denominaciones como pudieran ser los siguientes:

- Estudio de mercado.
- Estudio técnico.
- Estudio financiero.
- Estudio económico.

Para entender mejor a lo que nos lleva una *evaluación económica de un proyecto*, debemos hablar del valor del dinero en el tiempo, el *dinero* es un medio de intercambio de bienes y servicios, vale en cuanto que permite obtener satisfacciones, siendo común que una persona prefiera tener un satisfactor ahora o tenerlo dentro de un año.

Todas las ventajas y desventajas económicas de una alternativa cualquiera, se definen solamente a través de la corriente *beneficio – gastos* que se generan en un horizonte de planeación dado, éste flujo de efectivo se representa por un vector de cantidades de dinero ordenadas en el tiempo. Todo proyecto tiene beneficios y gastos de dinero, a lo largo del tiempo. La diferencia de éstas entradas y salidas de dinero en un período determinado de tiempo se conoce como *componente del flujo de efectivo*; una componente de flujo de efectivo positivo indica una entrada de dinero en un período dado, mientras un flujo negativo implica un desembolso neto en ese intervalo de tiempo.

Un análisis de costos en el ciclo de vida de un pavimento permite al diseñador escoger la estrategia que proveerá el comportamiento deseado al menor costo en el horizonte de tiempo bajo estudio (Fig. 4.11). Para lograr esto, se deben tomar en cuenta todos los costos asociados a la implementación de una estrategia determinada, incluyendo costos de construcción, mantenimiento y de usuarios. Algunos de estos costos deben ser predichos mediante el uso de modelos durante la vida del pavimento, pero esto no siempre es fácil de implementar. Los costos asociados a pavimentos que pertenecen a la misma área, pueden proveer un buen indicador de los costos relacionados a la estrategia bajo un análisis. ⁽¹⁾

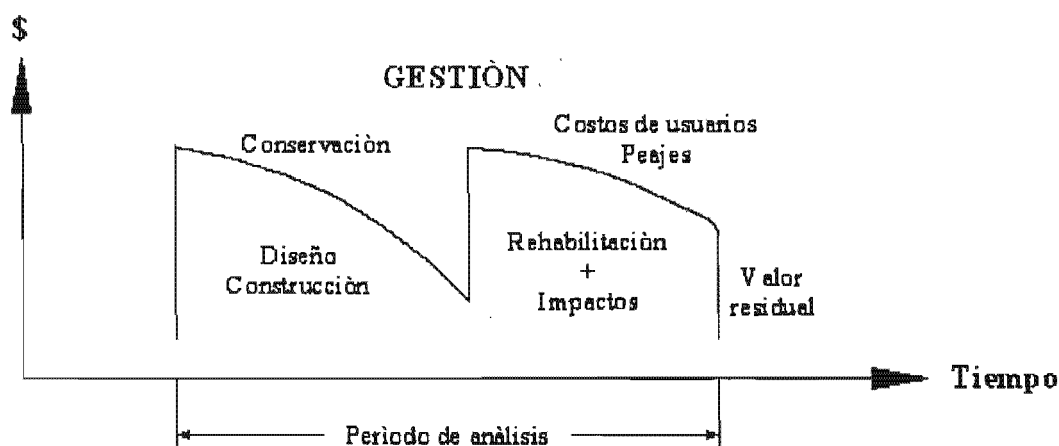


FIGURA 4.11. Evaluación económica del pavimento. ⁽¹⁾

4.5 TÉCNICAS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA

Las *técnicas de evaluación económica* que sirven para demostrar la justificación económica de un proyecto en particular, para permitir la comparación de esquemas o ubicación de alternativas, para determinar la prioridad de las mejoras, etc., pueden ser llevadas a la práctica por varios métodos. Los métodos utilizados en los estudios económicos de Ingeniería comprenden: ⁽¹³⁾

- 1) Costo Anual.
- 2) El Valor Presente Neto (VAN).
- 3) La Relación Beneficio/Costo (RBC).

- 4) Tasa Interna de Retorno (TIR).
- 5) Período de Reembolso.

1) COSTO ANUAL

Este método combina el costo de capital inicial y todos los gastos futuros en pagos anuales iguales en el período de análisis, para cada alternativa propuesta. Expresando de otra forma, cuánto debe tenerse hoy para que anualmente se tenga un valor constante durante un cierto período de tiempo, a la tasa i . Se calcula con la expresión: ⁽¹³⁾

$$C_A = F_R C_1 + C_2 + C_3 - F_R C_4$$

Donde:

C_A = Costo anual para la alternativa considerada.

F_R = Factor de recuperación del capital = $i(1+i)^n / [(1+i)^n - 1]$

i = Tasa de descuento.

n = Número de años

C_1 = Costo inicial de construcción.

C_2 = Costo promedio anual de conservación.

C_3 = Costo promedio anual de operación.

C_4 = Costo de rescate.

Este método tiene la ventaja de su simplicidad, si bien no incluye el concepto de los beneficios alcanzados en las acciones aplicadas. Los beneficios se atribuyen al ahorro en tiempo de recorrido, menores costos de operación y reducción de accidentes, entre otros, pero no se toman en cuenta cuando se efectúa la comparación entre alternativas solamente con base en la magnitud del costo anual, el cual debe ser el más bajo. ⁽¹³⁾

2) MÉTODO DEL VALOR PRESENTE NETO (VAN)

Si se aplica el valor presente a los beneficios y los costos, se obtiene el *valor presente neto* o *valor actual neto* (VAN). Este método tiene la ventaja que puede aplicarse a proyectos con distintas vidas de servicio o con etapas ya desarrolladas. Además los costos y beneficios se representan en términos actuales. Este método se aplica entre alternativas distintas. Cada alternativa se compara con otra denominada "base", la que puede ser la alternativa sin proyecto.

Una inversión es rentable cuando el VAN es positivo, a una tasa de interés conveniente para el inversionista. Mide en moneda actual cuanto más rico es el inversionista por invertir en el proyecto, en lugar de hacerlo en otra alternativa.

Entre las *ventajas* se pueden enumerar las siguientes: ⁽¹⁾

- Los beneficios y costos pueden expresarse por un sólo número.
- Proyectos de diferentes vidas de servicio y con etapas en desarrollo son directa y fácilmente comparables.
- Los costos y beneficios son expresados en términos presentes.
- El método es computacionalmente simple.

Dentro de las *desventajas* se puede decir que: ⁽¹⁾

- El método no se puede aplicar a alternativas únicas, donde no se pueden evaluar los beneficios.
- El resultado no es tan fácil de comprender como lo sería una tasa interna de retorno o el costo anual.

El procedimiento consiste en reducir todos los beneficios y costos a su valor actual de acuerdo con los principios dados. Se ha definido el valor presente neto (*VAN*) como la *diferencia entre los valores actuales de los beneficios a partir del proyecto y los costos realizados para desarrollarlo*. Es uno de los índices de significado más claro en la evaluación económica de proyectos, resultando el más atractivo aquel en que el *VAN* sea mayor. Éste valor se calcula como sigue: ⁽¹³⁾

$$VAN = \Sigma F_A B - [C_1 + \Sigma F_A (C_2 + C_3 - C_4)]$$

Donde:

VAN = Valor Presente Neto.

B = Beneficio.

F_A = Factor de actualización = $(1+i)^{-n}$

i = Es la tasa de interés.

n = Es el período de análisis.

C₁ = Costo inicial de construcción.

C₂ = Costo de conservación.

C₃ = Costo de operación.

C₄ = Costo de rescate.

En éste caso los beneficios se determinan al comparar los costos de operación entre dos alternativas, una de las cuales es analizada y la otra es una alternativa de referencia, o alternativa cero, que puede ser solamente, sujetar el pavimento a la conservación rutinaria. Una inversión es rentable cuando el valor actual de los flujos de ingresos es mayor que el valor actual de los flujos de costos.

3) RELACIÓN BENEFICIO / COSTO (RBC)

Seguramente es el método más extendido en el ámbito de análisis de proyectos carreteros. En el método de la *RBC*, se ha hecho el análisis comparando las relaciones del costo anual de los usuarios de caminos con el costo anual de la carretera en las alternativas lógicas de ubicación y diseño. El uso de la fórmula de la *RBC*, en la cual se utilizan valores actuales, se recomienda ahora como un indicador aproximado de la conveniencia del proyecto de una carretera. La *RBC* es: ⁽¹³⁾

$$RBC = \frac{\Sigma F_A B_i - \Sigma F_A B_o}{[C_{1i} + \Sigma F_A C_{2i}] - [C_{1o} + \Sigma F_A C_{2o}]}$$

Donde:

RBC = Relación Beneficio - Costo

$\Sigma F_A B_i$ = Valor actualizado neto de beneficios para la alternativa "i"

$\Sigma F_A B_o$ = Valor actualizado neto de beneficios para la alternativa "o"

$C_{1i} + \Sigma F_A C_{2i}$ = Valor actualizado neto de los costos para la alternativa "i"

$C_{1o} + \Sigma F_A C_{2o}$ = Valor actualizado neto de los costos para la alternativa "o"

La opción más deseable es aquella que resulta con el mayor valor de la *RBC*.

• Reglas de decisión en el análisis económico

Las reglas para aplicar la *RBC* del valor presente neto varían si existen restricciones presupuestales y de si los proyectos en consideración son independientes o mutuamente excluyentes. Considérese en primer lugar, el caso en que no hay restricciones presupuestales y en el que se comparan proyectos independientes, es decir, que la elección de un proyecto no impide

la elección de otros. En éste caso, todos los proyectos que tengan valores presentes netos positivos o *RBC* mayores que uno, serán económicamente factibles.

Pero si el presupuesto restringe la inversión* el analista deberá seleccionar la combinación de proyectos que produzcan el máximo *valor presente neto*, pero cuidando que estos no excedan el presupuesto disponible; de otra manera, pueden seleccionarse los proyectos en orden decreciente de las *RBC*, agregando proyectos hasta agotar el presupuesto.

En los casos en que diversas ubicaciones o proyectos sean mutuamente excluyentes, deberá escogerse la alternativa con el *valor presente neto* más alto. Si se utilizan *RBC* para elegir el proyecto, la selección debe hacerse en incrementos. Empezando con la alternativa de más bajo costo que tenga una *RBC* de uno, cada incremento de la *RBC* es mayor de uno. ⁽¹³⁾

4) TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

Corresponde a la tasa de descuento bajo la cual el *valor presente neto* definido anteriormente es igual a cero; el procedimiento consiste en determinar la tasa para la cual los costos y los beneficios son iguales, considerando valores actualizados para costos y beneficios; se calcula como:

$$\Sigma F_A B = C_1 + \Sigma F_A (C_2 + C_3 - C_4)$$

Donde:

B = Beneficio.

F_A = Factor de actualización = $(1+i)^{-n}$

i = Es la tasa de interés.

n = Es el período de análisis.

C₁ = Costo inicial de construcción.

C₂ = Costo de conservación.

C₃ = Costo de operación.

C₄ = Costo de rescate.

La tasa se calcula mediante aproximaciones sucesivas para distintos valores de *i*, hasta que se obtenga la igualdad.

La *TIR* estrictamente no nos indica que utilidad nos produce una alternativa dada, sino la tasa de retorno de la inversión inicial y de las reinversiones de los ingresos que está generando el proyecto.

Si la *tasa interna de retorno* de la estrategia evaluada es mayor que la tasa mínima especificada para los proyectos de caminos de dicha estrategia, será una de las posibles de implementar. La estrategia con la mayor *tasa interna de retorno* será la mejor a seleccionar. ⁽¹³⁾

5) PERÍODO DE REEMBOLSO

Éste método consiste en determinar el tiempo en el que se recupera la inversión inicial a una tasa de interés del 0%. Si además de la inversión inicial no existe otro flujo de caja negativo, entonces el menor valor de *n* que satisface la siguiente relación: ⁽¹³⁾

$$\Sigma_{t=1}^n R_{jt} > II$$

Donde:

II = Inversión inicial.

R_{jt} = Ingresos recibidos por la alternativa *j* en el tiempo *t*.

*Se recomienda un procedimiento de programación lineal o dinámica para aquellas situaciones en que tanto el presupuesto de inversión como el mantenimiento futuro y el presupuesto de operación están restringidos.

Define el período de reembolso para la alternativa j. La alternativa que tiene el menor período de reembolso es la recomendada por éste método. ⁽¹⁾

En la aplicación de los métodos descritos anteriormente, debe tenerse en cuenta los análisis económicos, deben extenderse al período o vida útil considerada, generalmente entre 20 y 30 años, siendo el mismo período para todas las alternativas planteadas. Por otro lado, debe tenerse presente que la tasa de actualización se considerará constante a lo largo de dicho período, cuyo valor es la diferencia entre la tasa de interés bancario y la tasa de inflación, fluctuando entre 4% y 15%, siendo frecuente tomar un valor en torno al 6%. En la Fig. 4.12, muestra gráficamente la evaluación económica de dos estrategias propuestas.

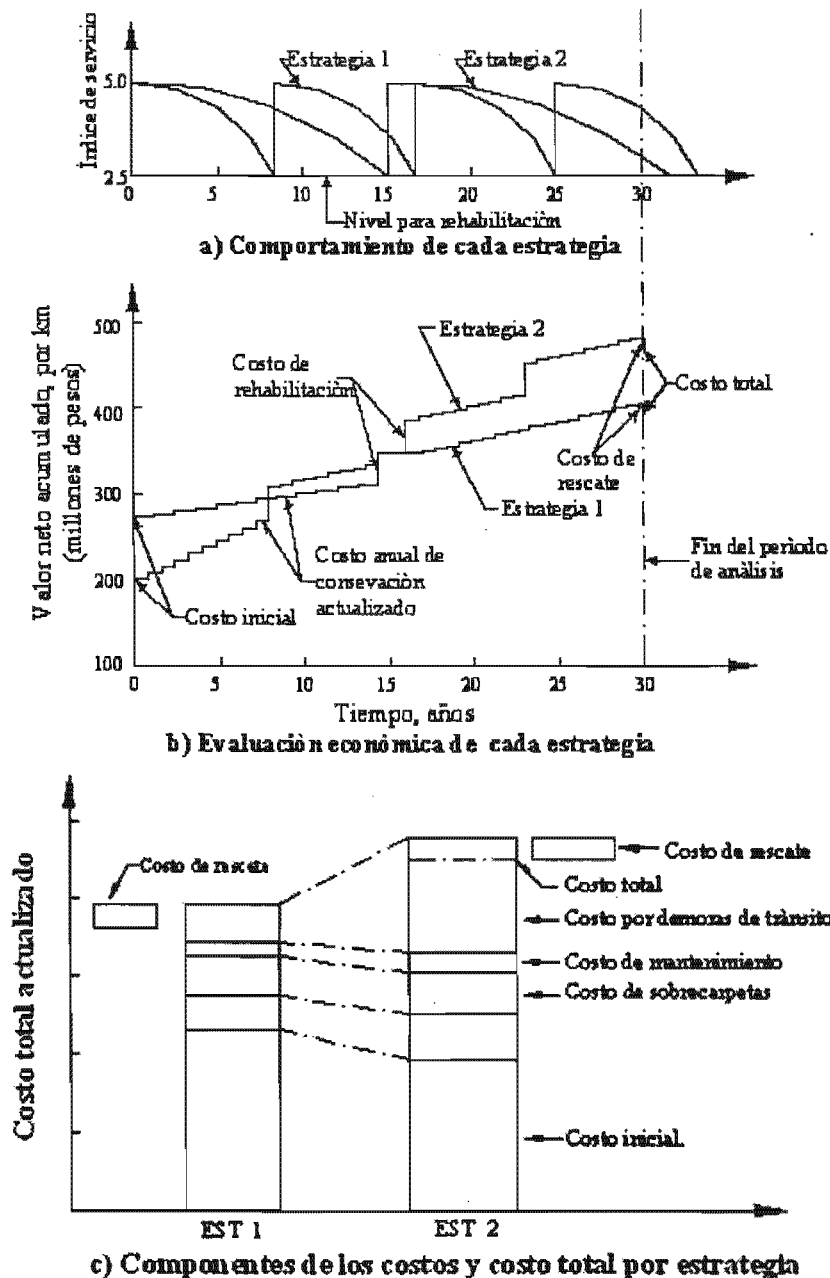


FIGURA 4.12. Análisis económico de las dos estrategias. ⁽¹³⁾

4.6 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE TÉCNICAS

Dentro de las consideraciones que se deben tener en cuenta en el momento de la elección del método a usar podemos incluir las siguientes:

- Cuán importante es el monto del flujo inicial de dinero respecto a los gastos futuros esperados. Un gasto pequeño, hoy podría significar excesivos gastos futuros para una alternativa en particular.
- Cuál es el método más conocido por la organización.
- Qué método representa mejor los requerimientos de la agencia vial.
- Si se incluyen o no los beneficios en el análisis.

En la actualidad se requiere de análisis mediante técnicas metodológicas de preparación y evaluación de proyectos, de ésta forma se protege no sólo al ente prestatario, sino que también al receptor del préstamo, aquí es, quien debe responder con sus bienes. Así, la deuda se adquiere de acuerdo a un análisis que demuestre rentabilidad positiva. En un análisis económico se deben evaluar y considerar todos los costos asociados a cada alternativa propuesta.

Tanto para determinar factibilidades, como para elegir entre distintas alternativas de un proyecto, se deben tener en cuenta todos los costos, o flujos de dinero, involucrados a lo largo de toda su vida útil. Estos flujos pueden ser mayores o menores respecto a una alternativa que se toma como base. Los análisis de evaluación económica estudian el movimiento de éstos flujos de dinero, y ayudan a seleccionar el plan de inversiones más conveniente, ya sea a nivel de red o de proyecto de un camino.⁽¹⁾

A continuación se describen una serie de principios de *ingeniería económica* aplicables a la *evaluación económica de carreteras*. La aplicación de estos principios permitirá realizar una auténtica evaluación para la toma de decisiones de los métodos de *evaluación económica*, sin dejar escapar detalles importantes.

Algunos de estos principios son los siguientes:⁽¹³⁾

- a) Prefactibilidad, el cual consiste en el estudio a grandes rasgos de la situación actual, y las posibles soluciones a aplicar. Aquí se hace una recopilación total de antecedentes y se analizan todos los factores que influyen sobre el proyecto.
- b) El nivel de gestión donde se va a realizar la evaluación debe estar claramente definido. Es decir, si se va a trabajar a nivel de proyecto o a nivel de red, tal como se precisó anteriormente.
- c) Los métodos de evaluación económica, son herramientas que nos ayudarán a realizar la mejor elección de una estrategia de inversión, la que consideremos como la más adecuada a nuestros intereses.
- d) Los métodos de evaluación económica no tienen relación con el método o fuente de los recursos de financiamiento. Las fuentes no pueden limitar el número o factibilidad de proyectos, o limitar la cantidad de recursos para un proyecto en particular. Tampoco deben afectar la metodología o principios que rigen los métodos de evaluación económica en sí.
- e) Los criterios de aplicación para la decisión deben definirse antes de que los resultados de los métodos sean aplicados.
- f) En cualquier método de evaluación económica, deben considerarse todas las alternativas posibles dentro del tiempo disponible para el análisis. Esto incluye la comparación con la situación existente y también con cada una de las restantes.

- g) Las comparaciones deben realizarse para el mismo período de tiempo. Aún cuando la vida útil de las alternativas consideradas puedan ser distintas. Para ello se deben complementar las soluciones en un plazo menor o acortar las de mayor plazo.
- h) Deben considerarse además de todos los costos posibles que incluyen en la construcción de una carretera (costo inicial, operación, mantenimiento, rescate, transporte, accidentes, etc.), los beneficios esperados, para el método de evaluación económica elegido.

Por otro lado, la *evaluación privada* compara los flujos de ingresos y los costos que afectan exclusivamente a un proyecto, desde el punto de vista del inversionista privado. Por ejemplo a él, en general, no le interesan los costos de operación de los usuarios.

La *evaluación social* se realiza mediante costos sociales o económicos, y en la privada, los flujos se determinan utilizando los precios del mercado. Otro enfoque de la *evaluación privada* sería el financiero, en donde el rendimiento se obtiene comparando el proyecto entre alternativas distintas de financiamiento; el ingreso son los préstamos y los costos son los intereses y la amortización de ese préstamo, éstos últimos son costos financieros.

Los *costos privados* (financieros), son aquellos que se realizan a precio común de mercado, y ellos comprenden el valor propio del bien, y además los correspondientes a los impuestos, aranceles, tasa de interés, leyes sobre salarios, etc., que rigen en nuestro país.

Los *costos sociales* (económicos), solamente están compuestos por el valor propio, es decir, no se incluyen en el costo que se tiene para la sociedad y no el que aprecia el usuario. En los proyectos viales, dada su naturaleza pública, en general se ven sometidos a la evaluación de tipo social, salvo aquellos que son sometidos a régimen de concesiones, a los cuales también se les realiza una evaluación de tipo privada.⁽¹⁾

Una propuesta de inversión es un proyecto único, considerando como posibilidad de inversión, es una posible opción de decisión. Así, toda propuesta puede ser una alternativa de inversión, sin embargo, una alternativa de inversión puede estar formada por un grupo de propuestas de inversión.

Cuando la aceptación de una propuesta dentro de un grupo no tiene ningún efecto sobre la aceptación de otra propuesta, se dice que éstas propuestas son *independientes*. Si la aceptación de una propuesta impide la aceptación de la otra, se dice que las propuestas son *mutuamente excluyentes*.

Si una propuesta no puede ser seleccionada a menos que se haya elegido otra, se dice que son *contingentes*. La *contingencia* es una dependencia en un sólo sentido entre un grupo de propuestas, es decir, la aceptación de una *propuesta contingente* depende de la aceptación de otra propuesta, pero la aceptación de ésta última puede ser independiente de la *propuesta de contingencia*.

Estas interdependencias son generalmente muy complejas y suelen depender de la naturaleza de la propuesta, del dinero disponible en ese instante y de las condiciones del mercado. La definición de las alternativas de inversión es de fundamental importancia durante el proceso de comparación para la obtención de las mejores evaluaciones y depende en gran parte de la identificación de las diferentes propuestas y de sus interdependencias.

El horizonte de planeación constituye la amplitud de visión del proyecto en el tiempo, siendo sensibles los resultados del análisis económico a la selección de éste parámetro. Un horizonte demasiado amplio trae consigo pérdida de confianza de los pronósticos del flujo de efectivo y un horizonte de planeación corto corre el peligro de no registrar quizás los movimientos del flujo de efectivo más importante de un proyecto.

Es un hecho que la selección del horizonte de planeación de algunos proyectos obedecerá a los flujos de costos y en otros a los flujos de ingresos o bien a una combinación de ambos, esto es, en algunos proyectos un indicador podría ser la vida económicamente útil de los activos físicos, mientras que en otros su fijación deberá depender de sus períodos de maduración y aprendizaje.

Es conveniente mencionar que el hecho de que pudieran existir varios criterios en la fijación del horizonte de planeación, la mejor decisión dependerá de la experiencia del proyectista en el campo donde se ubique el proyecto, siendo razonable realizar un análisis de sensibilidad en la evaluación económica del proyecto.

La fijación de éste parámetro deberá ser flexible, al comparar alternativas de inversión, siendo deseable que éstas sean evaluadas en un período común de tiempo. Ese período considerado en el análisis económico se denomina *horizonte de planeación*.

Cuando las alternativas de inversión tienen vidas económicamente útiles iguales, es fácil compararlas dado que el *horizonte de planeación* lo determinan sus vidas útiles, pero cuando las alternativas presentan vidas útiles diferentes, los métodos más usados son:⁽¹³⁾

- *Mínimo común múltiplo de las vidas útiles T (MCMVU)*. Si se utiliza un período igual al MCMVU, se supone que el flujo de efectivo de cada alternativa se repite en las mismas condiciones hasta que se acumule un número de períodos de vidas útiles igual al *horizonte de planeación*.

Éste procedimiento no es siempre el más práctico, ya que por ejemplo, tuviéramos que evaluar dos alternativas con vidas de 10 y 11 años respectivamente, el mínimo común múltiplo sería 110, lo que nos lleva a un horizonte demasiado amplio, muy alejado de lo que es razonable, si pudiéramos pronosticar, es claro pues que no se puede usar siempre éste método, se deberá utilizar en cada caso el criterio para determinar el *horizonte de planeación*.

- *La vida más corta del conjunto de alternativas T_c* . Si usamos como horizonte de planeación la vida económicamente más corta, tenemos que considerar de alguna forma los flujos de caja residuales de las alternativas de mayor duración en los años no considerados. Una forma de considerar los flujos de caja de los años no comprendidos en el horizonte de planeación, es suponer un valor equivalente de estos flujos en el último año del horizonte establecido.

En el caso de los componentes de la inversión, no comprendidos con el *horizonte de planeación*, éste valor equivalente en el último año se denomina *valor residual*. Conviene decir que el concepto de vida económica útil, da lugar al concepto de valor de rescate significando aquel valor que posee el bien una vez transcurrida su vida útil.

- *La vida más larga del conjunto de alternativas T_j* . Es una opción para fijar el horizonte de planeación, sin embargo, hay que tomar en cuenta el hecho que durante el período comprendido entre T_c y T_j pueden modificar las condiciones actuales, esto es, que al concluir el período T_c puede existir nuevas opciones de inversión que difícilmente pueden ser estimadas en el presente. Así, para estimar el flujo de caja de las alternativas con vidas menores que T_j , tenemos que suponer las reposiciones de las inversiones en aquellas alternativas con vida económica útil mayores y de rescate en cualquier caso.

La ventaja de éste método, es que no es necesario hacer las comparaciones sobre el mismo período, ya que se considera que de repetirse la inversión en una alternativa dada, el costo anual uniforme equivalente sería el mismo.

- *La tasa mínima atractiva de rendimiento (TMAR)*. Es el porcentaje que se usa para hacer las equivalencias entre dinero de diferentes períodos; es la tasa de descuento derivada del costo de oportunidad del dinero; el dinero no debe invertirse en alguna alternativa si no que puede tener rendimiento al menos tan grande como la *TMAR*, puesto que es razonable pensar que existan otras alternativas que si cumplen con ésta condición.

Dado que el dinero tiene un valor en el tiempo, las empresas usan el dinero para obtener máquinas, materiales y mano de obra, elementos que bien condicionados, producen utilidades; estas utilidades se atribuyen a la productividad del capital. El costo de capital es independiente del uso que se le de, no importa si el deudor invierte el dinero o sólo lo guarda, de cualquier forma deberá pagar los mismos intereses.

Cada persona o empresa se enfrenta a múltiples alternativas de inversión, cada vez que se invierte en alguna de ellas se pierde la oportunidad de obtener los beneficios de invertir ese dinero en otra alternativa.

El interés o ganancia obtenida por cada inversión determina la tasa de interés o tasa de rendimiento proporcionada. A cada tasa de interés que se realice se le debe exigir una tasa mínima de rendimiento, para que sea atractiva al inversionista, ésta tasa se denomina *tasa mínima atractiva de rendimiento (TMAR)*.

No existen reglas definidas para fijarla, sin embargo los criterios parten del costo del capital y son ponderados por algunos de los factores siguientes:

- Horizonte de planeación.
- Montos de las inversiones iniciales.
- Nuevos proyectos de inversión, reposiciones o gastos de conservación.
- Estrategia empresarial para alentar o desalentar la inversión de capital.
- Tasa de retorno de la empresa en años anteriores.
- Tasa de retorno promedio de los inversionistas con proyectos de la misma naturaleza.
- Diferentes *TMAR* para nuevas inversiones que para reposiciones o mejoras de proyectos existentes.

Todos los conceptos antes analizados, contribuyen a estructurar conceptualmente las medidas de efectividad económica de los proyectos. Estas medidas de efectividad económica, constituyen indicadores de tipo cuantitativo para expresar la bondad económica de los proyectos de inversión, significando con ello que tales indicadores son útiles tanto para comparar proyectos de alternativas de la misma naturaleza, o bien, alternativas técnicas o financieras de una misma idea de inversión.

Las medidas de efectividad económica, se pueden dividir en tres tipos:

- 1) Medidas cuya unidad de medida es el dinero en términos absolutos y cuya metodología se basa en comparar el dinero de ingresos y egresos correspondientes a un mismo período de tiempo, aplicando fundamentalmente el concepto de valor del dinero en el tiempo; éstas medidas se conocen con los nombres siguientes: *valor presente*, *valor anual*, *valor futuro*.
- 2) Modelos de los cuales la unidad de medida de efectividad económica es una tasa de interés, siendo de particular importancia de los ingresos y los costos, en sus valores actualizados, siendo de particular importancia *la tasa interna de retorno*.
- 3) Medida que expresa la relación de los ingresos y los costos, en sus valores actualizados, siendo el nombre de la metodología de la *RBC*.

Estos tres tipos de modelos de efectividad económica son consistentes en la jerarquía económica que asignen a un conjunto de proyectos de inversión, sin embargo la combinación de sus aplicaciones aporta información adicional sobre las ventajas y desventajas económicas de un proyecto determinado. ⁽¹³⁾

4.7 SISTEMAS DE ADMINISTRACIÓN DE PAVIMENTOS

La tecnología del diseño, construcción y conservación de los pavimentos se ha enriquecido considerablemente en años recientes a través de la investigación de las características fundamentales de los materiales y de su comportamiento bajo diferentes condiciones de tránsito y de clima. Otro aspecto muy relevante en el desarrollo de la tecnología de pavimentos es el empleo de las computadoras, que ha facilitado el procesamiento de grandes volúmenes de información así como la ejecución de cálculos extensos y complejos. Debe mencionarse la gran importancia que en la implementación, calibración y desarrollo de un *Sistema de Administración de Pavimentos (SAP)*, tiene la aplicación de técnicas de evaluación y seguimiento del comportamiento de los pavimentos, así como la influencia de los procesos constructivos, materiales, clima, etc.

Mediante la medición sistematizada de los parámetros que definen dicho comportamiento y del procesamiento y análisis de dicha información, ha sido posible establecer los modelos de comportamiento a futuro y predecir el tipo de falla que puede ocurrir y el tiempo en que esto puede suceder, lo cual es de gran importancia para definir las políticas de conservación y rehabilitación que deban aplicarse y su oportuna programación.

• Características del Sistema de Administración de Pavimentos (SAP)

Un *Sistema de Administración de Pavimentos (SAP)*, es un proceso para organizar, coordinar y controlar todas las actividades que afectan el costo y la vida de los pavimentos.

Es un procedimiento sistemático y constante para programar el mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos, basado en un enfoque que maximice los beneficios y minimice los costos. Su misión básica es proporcionar al público un sistema carretero seguro y eficiente, incluyendo la construcción y la conservación perpetua de dicho sistema, para obtener la mayor calidad al menor costo, como se muestra en la Fig. 4.13.

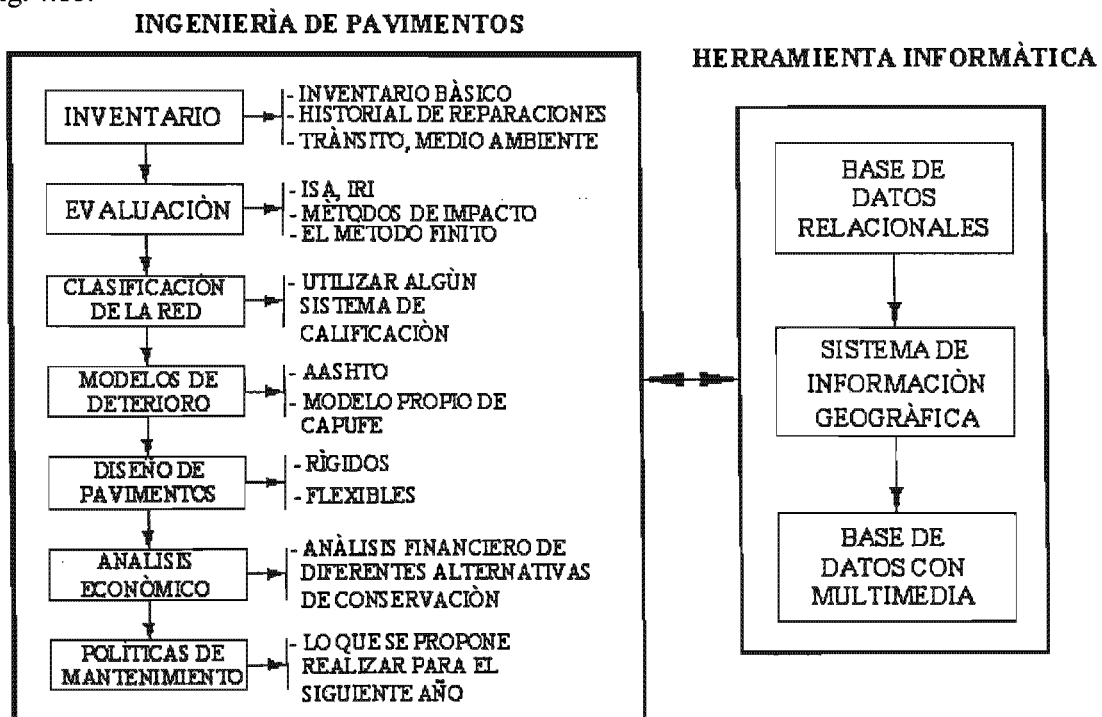


FIGURA 4.13. Diagrama general de un Sistema de Administración de Pavimentos.

FUENTE: Sistema de Información Digital para Autopistas y Puentes (SIDAP).

El reto del *SAP*, radica en cuantificar y acumular la información necesaria para establecer recomendaciones específicas, que traducidas en acciones, permitan mantener una red en condiciones de servicio aceptables, dentro de las posibilidades presupuestales.

El *SAP* representa un concepto innovador que supera los procedimientos viciados, en los cuales se toman decisiones para conservar y rehabilitar el pavimento con base en su aspecto y en evaluaciones de carácter subjetivo. Más recientemente las decisiones se han apoyado en evaluaciones de carácter estructural para determinar los requerimientos de sobrecarpetas y/o reconstrucciones, ajustadas a las limitaciones presupuestales; sin embargo, estos procedimientos tienen limitaciones severas, como las siguientes:

- Tienen a considerar las necesidades de proyectos individuales y no de la red total.
- Son altamente susceptibles a las preferencias del personal y a experiencias limitadas de quienes toman las decisiones.
- El número de alternativas consideradas es limitado.
- Los diseños se limitan generalmente a un período fijo.
- El costo de operación no se considera.
- Debido a su consistencia, las políticas se pueden afectar con el cambio de personal.
- El mantenimiento preventivo es de evaluación difícil.
- Las incertidumbres de comportamiento son ignoradas.

Por lo tanto, un *SAP* debe tener capacidad para responder a la interrogante de qué medidas de conservación deben realizarse, cuándo y dónde, considerando la disposición de un determinado presupuesto. Deberá contarse para ello con una relación de soluciones de conservación y rehabilitación, que permitan obtener los mayores beneficios para toda una red y definir su aplicación con base en la mejor información disponible sobre las condiciones actuales de la red. De ésta manera el *SAP* deberá proporcionar información sobre el nivel de servicio futuro que prestarán los pavimentos de la red, dependiendo del presupuesto disponible y definiendo qué estrategias de conservación y rehabilitación producirán las mayores tasas de retorno a las inversiones aplicadas en la preservación de los pavimentos de la red.

Los componentes básicos de un *SAP* son los siguientes:

- 1) Planeación
- 2) Diseño
- 3) Construcción
- 4) Conservación
- 5) Evaluación
- 6) Investigación

1) **Planeación**

Comprende una apreciación de las deficiencias o mejoras requeridas por una red, el establecimiento de prioridades para eliminar o reducir éstas deficiencias y el desarrollo de presupuestos y programas para realizar los trabajos necesarios.

2) **Diseño**

Consiste en la adquisición o suministro de una variada información, la generación de diferentes estrategias de alternativas de diseño, los análisis de estas alternativas, su evaluación económica y la optimización para seleccionar la mejor.

3) Construcción

La construcción convierte una recomendación de diseño en una realidad física, su principal componente incluye el detalle de las especificaciones de construcción contractuales, programas, operaciones de construcción y sus respectivos costos, control de calidad y la adquisición y procesamiento de datos para canalizarlos al banco de datos.

4) Conservación

Ésta fase incluye el establecimiento de un programa y el listado de las acciones de reparación, como las operaciones de sellado de grietas, bacheo, corrección de irregularidades en las características superficiales, etc., así como la adquisición y procesamiento de datos para alimentar el respectivo banco de datos.

5) Evaluación

Corresponde a una de las fases que últimamente ha recibido considerable atención e incluye el establecimiento de sección de control, mediciones periódicas del comportamiento real en cuanto a deterioros, capacidad estructural, calidad de rodamiento y resistencia al derrapamiento, así como la transmisión de dicha información al banco de datos.

La información adquirida tiene aplicación en:

- La verificación de la eficiencia con que el pavimento cumple con su función.
- La planeación y programación de las futuras rehabilitaciones requeridas.
- La introducción de mejoras tecnológicas de diseño, construcción y mejoramiento.

La evaluación proporciona información tanto al nivel de planeación para estimar deficiencias de la red en su conjunto, como a nivel de diseño en el desarrollo de los análisis detallados.

Todas las áreas del *SAP* deben estar interesadas en los parámetros deducidos de la evaluación de un pavimento a efecto de:

- Obtener datos que permitan verificar las predicciones del diseño y ajustarlas de ser necesario.
- Programar las medidas de conservación y rehabilitación previstas a nivel de diseño.
- Proporcionar información para mejorar los modelos de diseño y de comportamiento.
- Proporcionar información para mejorar técnicas de construcción y mejoramiento.
- Proporcionar información para actualizar los programas al nivel de la red.

6) Investigación

Surge de las propias necesidades y usualmente utiliza en forma extensiva la información derivada de la evaluación. El banco de datos es parte fundamental del *SAP*; supone básicamente la colección de la siguiente información:

- *Ficha de diseño y construcción*

Resume y pone al día la información pertinente a los parámetros originales de diseño, tales como tránsito, condiciones superficiales, materiales, espesores y costos de construcción.

- *Ficha de conservación*

Proporciona la historia de la conservación y de la rehabilitación, incluyendo los costos de cada actividad; se deben considerar además los costos del usuario y el valor de rescate.

- *Ficha de las condiciones del pavimento*
 - Condiciones físicas del pavimento, incluyendo el tipo de severidad y extensión de los deterioros.
 - Capacidad estructural, usualmente a partir de mediciones no destructivas.
 - Calidad de rodamiento, subjetiva o con medidas mediante equipos de alto rendimiento. Resistencia al derrapamiento.

En general un *SAP* consta de varios módulos operativos, siendo el primero de ellos el encargado de la recolección de información sobre el estado de los pavimentos en cuanto a los deterioros que manifiesta, la rugosidad y resistencia al derrapamiento y la capacidad estructural. Ésta información es preferentemente obtenida por medio de equipos automatizados de alto rendimiento, para representar información en forma tabular y gráfica. Otro concepto importante que debe considerarse es el relativo al tránsito, principalmente en cuanto a su composición y tendencias a futuro.

REQUERIMIENTOS PARA LA IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADMINISTRACIÓN DE PAVIMENTOS

Para establecer un *Sistema de Administración de Pavimentos* es necesario proceder a la aplicación de varias etapas, en las cuales debe imperar fundamentalmente la firme decisión del organismo de contar con un sistema operante, dinámico y de hecho perpetuo. Las principales etapas son las siguientes: ⁽¹³⁾

- 1) Decisión de implantar el sistema, apoyando las medidas conducentes para ello, entre las cuales debe considerarse la creación de una organización y funcionamiento, que identifique necesidades y formule recomendaciones para su mejoramiento.
- 2) Constituir un grupo de trabajo, encargado de revisar la situación existente, en cuanto a organización y funcionamiento, que identifique necesidades y formule recomendaciones para su mejoramiento.
- 3) Efectuar el inventario de las prácticas aplicadas para la conservación de los pavimentos.
- 4) Identificar las deficiencias específicas de las prácticas existentes, principalmente en términos de los procedimientos administrativos (coordinación de las diferentes áreas como proyecto, conservación, toma de decisiones, etc.), así como los procedimientos técnicos (capacitación de personal, equipos, materiales, etc.).
- 5) Formular recomendaciones detalladas relativas a la implantación del sistema, en cuanto a la organización técnica y administrativa necesaria para la creación del banco de datos, capacitación del personal, adquisición del equipo necesario, definición de los temas de investigación, etc.
- 6) Aplicación del sistema acorde con un programa específico, establecimiento de las prácticas de evaluación periódica y sistemática, determinación de los costos de conservación, evaluación del tránsito, etc., así como la introducción de medidas de mejoramiento del sistema. Así mismo, se establecerán los programas de capacitación y actualización del personal y de investigación, como en el caso de nuevas técnicas de conservación, conocimiento del comportamiento de materiales y nuevos productos, nuevas técnicas de investigación, aspectos económicos, etc.

La parte más importante de cualquier sistema lo constituye la organización institucional para atender a los pavimentos. En la Fig. 4.14, se muestran las actividades que se desarrollan a lo largo del año para que de una manera sistemática se lleven a cabo las labores de mantenimiento.

UN SISTEMA DE ADMINISTRACIÓN DE PAVIMENTOS NO DEBE VERSE EXCLUSIVAMENTE COMO UN PROGRAMA DE CÓMPUTO, SINO COMO UN MÉTODO SISTEMÁTICO PARA ELEVAR Y MANTENER LA RED EN UN NIVEL DE SERVICIO DESEADO

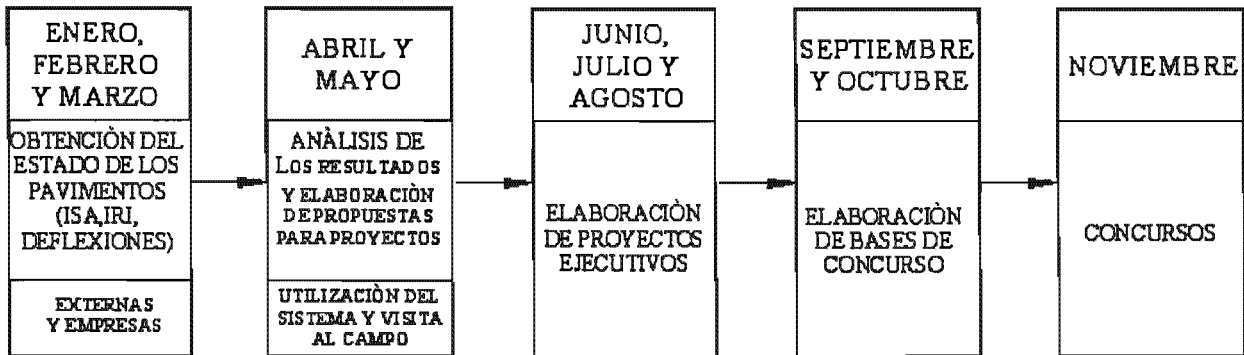


FIGURA 4.14. Ciclo anual del sistema de administración de pavimentos.

FUENTE: Sistema de Información Digital para Autopistas y Puentes (SIDIAP).

Lo que se busca con la utilización de un *sistema de administración* es conocer en todo momento el estado de la red, saber que se debe hacer y en que momento en cada tramo o eje carretero bajo una perspectiva de aprovechamiento óptimo de los recursos. Finalmente debe tenerse muy en cuenta que el éxito en la aplicación del sistema dependerá de la forma en que se realicen las acciones de coordinación, comunicación, cooperación, información y retroalimentación. Así mismo, se engloban los diferentes tipos de programas para el *Sistema de Administración de Pavimentos*:

4.7.1 SISTEMA "PAVEMENT EVALUATOR"

Desde 1998 está disponible el *Pavement Evaluator (PE)*, que es un paquete de cómputo que utiliza el software *HDM-4 (Highway Development and Management System)*, versión para el estudio, mantenimiento y rehabilitación de los *pavimentos flexibles*.

El *HDM-4* es un programa para el apoyo de decisiones, invitando a los administradores de recursos de redes viales en la investigación de las posibilidades de proveer desarrollos eficientes y en la conservación del sistema de carreteras, de manera que se traduzcan en beneficios en las comunidades donde sirven. Ofrece muchas características y capacidades, que juntas se combinan para hacer de éste sistema una formidable referencia a nivel mundial en la práctica del análisis y modelación de inversiones en carreteras.

Éste programa tiene dos aspectos principales: uno trata con análisis para el sector privado y el otro con el aspecto social de las carreteras. En el primero los beneficios se toman en cuenta como los ingresos que por concepto de peaje pagan los usuarios, mientras que en el segundo los beneficios se cuantifican basándose en los ahorros en los costos de operación para los usuarios del camino en estudio.

El programa consta de cuatro módulos: un administrador de proyectos, un administrador del tránsito vehicular, estrategias de conservación y finalmente, un módulo sobre costos de operación.

Lo interesante de éste programa, es que permite que el usuario modele muy aproximadamente el tránsito con características y geometría de vehículos locales. Además, permite que el usuario defina los estándares de mantenimiento aplicables a cada sector en que se subdivide cada tramo en cuestión, que son los elementos discretos más pequeños en los que se dividen los tramos en estudio. ⁽¹⁴⁾

HDM-4 versión 1.3:

El programa *HDM-4 versión 1.3* está siendo lanzado como una actualización de las versiones previas (versiones 1.0, 1.1 y 1.2), y está disponible para ser descargado del sitio de lanzamiento del software *ISOHDM*.

El lanzamiento de la *versión 1.3* del *HDM-4* corresponde a correcciones informadas sobre el programa y sus reportes, mejoramientos a las funciones del programa que causaban dificultad en versiones anteriores, e importantes mejoras en la funcionalidad del programa.

FUENTE: Gerencia XIII CONIC: *Instituto de la Construcción y Gerencia*. Lima, Perú, Abril, 2001.
Ponencia presentada al Congreso Nacional de Ingeniería Civil por Carlos Chang Albitres.

Arreglos al programa:

- Deficiencias no-criticas en las funciones de interfaz de usuario.
- Errores de funciones, cálculo y lógica en los efectos de deterioros del camino, efecto de las actividades, tránsito diferido, modelos de efectos de los usuarios.
- Datos de la ejecución, deficiencias en la operación de importación y exportación.

Las posibles ventajas del *HDM-4* incluyen:

- Cambios significativos en la organización de la información de tránsito y flota vehicular, tratando de reflejar de mejor forma la manera en que ésta información es organizada en las bases de datos de las agencias administradoras de carreteras.
- Clarificar y mejorar el rango de la calibración de los modelos de prueba y facilitar su adaptación.
- Expandir y refinar las capacidades de los reportes, incluyendo libre de licencia la búsqueda y reporte sobre bases de datos de estudios ya terminados.
- Reorganizar aspectos de la interfaz del usuario (ejemplo: para controlar estudios de proyecto, programa y estrategia), para hacer la herramienta fácil de usar, en línea con un completo muestreo de las necesidades de información de los administradores a niveles superiores en las agencias de administración.
- Reconfigurar la base de datos que soporta el *HDM-4*, para facilitar el enlace fácil con bases de datos de administración de recursos viales.
- Estudios de sensibilidad y análisis de riesgo.
- Mejoramiento y adición de modelos al sistema, incluyendo modelos vehiculares (ejemplo: desgaste de neumáticos, acoplados), modelos de pavimentos, modelos de costos de accidentes, modelos de energía total, modelos de efectos en zonas de trabajo.

4.7.2 SISTEMA "CAPUFE"

El sistema de *Caminos y Puentes Federales (CAPUFE)*, es básicamente un conjunto de procedimientos para planear y organizar todas las actividades relacionadas con el manejo de los pavimentos de su red carretera. Como punto de partida para el establecimiento definitivo de las características de *CAPUFE*, se utilizaron los siguientes elementos: banco de datos existentes,

evaluación de las actividades de conservación, rehabilitación y reconstrucciones realizadas cotidianamente por *CAPUFE*; características y estado de la red existente; perspectivas de crecimiento de los trabajos realizados por *CAPUFE* en los años futuros.

CAPUFE ha tenido y tiene como meta permanente aportar estos recursos (activos e ingresos), al *Sistema Nacional de Transporte* para integrar, con una visión de conjunto, las grandes regiones que conforman el territorio nacional.

A la fecha *CAPUFE* cuenta con un sistema de administración de pavimentos que tiene las características siguientes:

- Es un sistema aplicable para una red o un tramo.
- Maneja el índice de la condición del pavimento.
- Permite introducir los deterioros en pavimentos flexibles y de concreto hidráulico.
- Maneja el *ISA* y el *IRI*.
- La unidad de análisis en el tramo – carril.

Los análisis de *CAPUFE* pueden ser efectuados con un paquete de cómputo adecuado a las condiciones del organismo, éste sistema puede ser lanzado a un sistema de información geográfica a través de identificadores comunes de los elementos gráficos que representan las unidades básicas del sistema de análisis de *CAPUFE*.

Los formatos del sistema *CAPUFE*:

- Inventario de las unidades básicas de análisis.
- Ubicación de obras de drenaje.
- Irregularidad superficial de los pavimentos.
- Inspección visual de los deterioros.
- Datos de ingeniería de tránsito.

Resultados obtenidos del sistema:

- Costos de operación de vehículos por tramo.
- Alternativas de mantenimiento.
- Jerarquización de los tramos según la rentabilidad de las acciones de mantenimiento.
- Evolución de mantenimiento a corto, mediano y largo plazo.

El organismo descentralizado *Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos*, creado por el decreto del *Ejecutivo Federal* el 27 de junio de 1963 publicado en el *Diario Oficial de la Federación* el 29 del mismo mes y año, con personalidad jurídica y patrimonio propios, tendrá por objeto:

- 1) Administrar y explotar por sí o a través de terceros, mediante concesión otorgada en términos de las disposiciones legales aplicables, los caminos y puentes federales que ha venido operando, así como los que en el futuro se construyan con cargo a su patrimonio o le sean entregados para tal objeto.
- 2) Llevar a cabo por sí o a través de terceros, la conservación, reconstrucción y mejoramiento de dichas vías con cargo a su patrimonio.
- 3) Proponer en los términos de ley a las autoridades competentes las tarifas que se aplicarán para la explotación de las vías y los servicios que presta, así como percibir y disponer de su ingreso conforme a su presupuesto.
- 4) Administrar y explotar por sí o a través de terceros, mediante concesión, los servicios conexos y auxiliares a las vías generales de comunicación a que se refieren las fracciones anteriores.

- 5) Establecer, administrar y explotar en forma directa o a través de sus entidades subsidiarias, plantas industriales para producir bienes necesarios para la realización de su objeto o instrumentar la producción y distribución de estos bienes.
- 6) Construir, administrar y explotar por sí o por terceros las instalaciones complementarias que requiera para el cumplimiento de su objeto.
- 7) Promover y fomentar la participación de particulares bajo el régimen de concesión en la construcción y explotación de caminos y puentes federales, conforme a los lineamientos que emita la *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*.
- 8) Participar, conforme a las disposiciones legales aplicables, en proyectos de inversión, así como en todas las actividades inherentes a estos proyectos, para la construcción y explotación de las vías generales de comunicación a que se refiere éste precepto, pudiendo afectar con tal propósito los ingresos provenientes de las vías que administra, con la aprobación de la *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*.
- 9) Obtener financiamiento y créditos con cargo a su patrimonio para la realización de su objeto, con sujeción a las disposiciones legales aplicables.
- 10) Administrar caminos y puentes federales concesionados mediante la celebración de los convenios correspondientes.
- 11) Coadyuvar, a solicitud de la *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*, en la inspección de las carreteras y puentes federales concesionados y, en su caso, operar estos últimos.
- 12) Coadyuvar, a solicitud de la *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*, en la ejecución y operación del *Programa de Caminos y Puentes Concesionados*.
- 13) En general celebrar y realizar todos los actos jurídicos derivados de la *Ley Federal de las Entidades Paraestatales*, y los demás que sean necesarios para el cumplimiento de su objeto.

FUENTE: Sistema de Información Digital para Autopistas y Puentes (SIDIAPI).
Documento publicado por la *Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT, México, D.F.*
Diciembre.2002

OBJETIVO SOCIAL:

Entre las principales obligaciones y prerrogativas de *CAPUFE* se cuentan las siguientes:

- 1) La administración, con sus propios recursos mediante concesiones a terceros, de los caminos y puentes federales integrados a su patrimonio y aquellos que construya con cargo al mismo, así como los que sean entregados para tal fin. Con el mismo espíritu, se hace cargo de la conservación, reconstrucción y ampliación de esa infraestructura, y está formulada incluso para promover y fomentar la participación de particulares en la construcción y explotación de caminos y puentes federales bajo el régimen de concesión y sujeto a los requisitos que fije la *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*.
- 2) Diseñar y aplicar las tarifas para cada elemento, conforme a los límites que fijen las autoridades competentes, y disponer de esos ingresos para cumplir con sus objetivos, conforme a un presupuesto autorizado. Tiene la opción de realizar esas tareas con sus propios medios o mediante concesiones a terceros. Puede asimismo utilizar esos recursos en proyectos de inversión en su giro, u obtener créditos apalancados con esos recursos, previa autorización de la *SCT*.
- 3) Puede construir, administrar y explotar, con sus medios o mediante terceros, infraestructura principal o complementaria para cumplir con sus objetivos, incluida la instalación de plantas industriales que fabriquen los materiales necesarios, mismos que pueden estar sujetos a distribución.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

ANEXOS

BIBLIOGRAFIA

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Hoy en día, el transporte por carretera constituye el principal medio de desplazamiento de personas y bienes materiales, al mismo tiempo son un instrumento primordial para la integración social, económica y cultural de la nación. Ahora, no sólo se demandan nuevas infraestructuras de carretera, sino también que tengan un diseño que asegure su durabilidad, independientemente del tránsito y de las condiciones meteorológicas y además, se exige una gestión de las mismas del más alto nivel. De ahí la gran importancia que la inversión en carreteras tiene, tanto en construcción como en conservación, debiendo existir un equilibrio razonable entre ambos tipos de inversiones.

El desarrollo de la red carretera ha cobrado renovado ímpetu desde aproximadamente 1985. Las Juntas Locales de Caminos y los gobiernos de los estados han aplicado o reforzado diversos sistemas de cooperación con la población local de modo que se extendieron los caminos vecinales. La modernización de la red carretera se inició con plena conciencia de que se estaba viviendo un rezago que se traducía en la creciente ineficiencia del transporte por carretera.

Las carreteras se han ido transformando acorde a la evolución del pensamiento y el avance tecnológico; sin embargo, lo que no ha cambiado en miles de años a pesar del desarrollo, es el hecho de que los caminos se acercan a los pueblos, mejoran la economía, fomentan los intercambios culturales, económicos e ideológicos, estimulan a los profesionales y promueven el descubrimiento de riquezas arqueológicas, paisajistas y naturales.

En los últimos 30 años en *México*, la investigación, el desarrollo tecnológico y la transferencia de tecnología en el área de los *pavimentos asfálticos* ha tenido un avance muy lento; se siguen realizando las mismas prácticas de los años 70's, hoy en día son obsoletas y deficientes. Por un lado, se tiene el monopolio de abastecimiento de cementos asfálticos por parte de *PEMEX*, empresa que hasta el año 1995 producía un sólo tipo de *cemento asfáltico* de muy buena calidad lo que ha provocado que, al no existir opciones, se emplee de manera indistinta en *Chiapas, Morelos, Sonora y Nuevo León* (cuatro estados con condiciones climatológicas muy diferentes), con resultados no deseables. Por otro lado, los diseños de las mezclas asfálticas se han visto limitados a un sólo tipo de mezcla, situación que para unos casos, funciona de manera adecuada y para otros no. Por último, los materiales empleados y los procedimientos de construcción no siempre tienen o cumplen con especificaciones que, bajo un buen control de calidad, garanticen una alta durabilidad de los pavimentos dentro de los rangos aceptables de confiabilidad.

En estos momentos, ante la actual crisis económica del país donde la infraestructura del transporte nacional tiene rezagos y enfrenta problemas, sobre todo de conservación de los pavimentos asfálticos, que dificultan el apoyo a la industria y al comercio principalmente, es indudable que se requieren recursos para modernizarla según las necesidades nacionales actuales. En *México* se cuenta con recursos técnicos, maquinaria y lo más valioso, Ingenieros Civiles capacitados y la mano de obra de nuestros trabajadores, para cumplir con las obras que el país requiere; sin embargo, hay que tener presente que mejorar las técnicas de diseño, construcción y supervisión es tan importante como el nivel de inversión.

Al ser la *Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)* la entidad federal normativa en *México* en el área de pavimentos para carreteras, ha sido práctica generalizada el seguir normas y especificaciones dictadas por ésta entidad federal, lo cual no tiene por qué ser una buena práctica en todos los casos. En éste aspecto hay que comentar que la última revisión y actualización de dichas normas y especificaciones fueron editadas en 1984 y las normas y especificaciones

actualizadas en *Diciembre* del 2004, muestra una notable y estricta reglamentación conforme a la elaboración para las diferentes carpetas asfálticas. En el caso de las entidades federativas, hay que tener en cuenta las diferencias imprescindibles de las condiciones climatológicas, lo cual limita el empleo de ciertos materiales, ya que su comportamiento será diferente según sea la zona geográfica y topográfica donde se ubique.

En los estados de la zona noreste de la República Mexicana se tienen condiciones de trabajo y situaciones climatológicas diferentes que intervienen significativamente en el desempeño y durabilidad de los *pavimentos asfálticos* en el período de servicio; éstos son:

- a) La zona noreste de *México* colinda con *Texas* que es uno de los estados económicamente más fuertes de *Estados Unidos*. Las fuertes actividades comerciales generan uno de los mayores flujos terrestres de mercancías en territorio nacional por las carreteras de los estados de *Nuevo León, Tamaulipas y Coahuila*. A esto se le pueden sumar los viajes terrestres de personas y mercancías generados y atraídos por ciudades importantes del país como son las capitales de los tres estados, *Monterrey, Ciudad Victoria y Saltillo*, respectivamente, y por último, los viajes terrestres de personas y mercancías entre estas capitales y las otras ciudades no menos importantes en cada estado. Lo anterior da lugar a la acumulación de muchas cargas pesadas las cuales actúan sobre los pavimentos de estas carreteras.
- b) Las temperaturas al aire en diferentes épocas del año, de las que se tienen registros en estos estados, hacen que la diferencia entre los valores extremos o gradientes de temperaturas sean muy grandes, ya que se tienen registros de temperaturas en estaciones frías de 12°C bajo cero y en estaciones calurosas de hasta 47°C. Al ser los cementos asfálticos materiales viscoelásticos, susceptibles a los cambios de temperaturas, da lugar a comportamientos muy diferentes de acuerdo con la época del año.

Los *asfaltos modificados* mejoran las propiedades físicas en los siguientes parámetros:

- Ofrecen gran resistencia a la reflexión de fisuras.
- Mejora significativamente la resistencia a la deformación permanente.
- Mejoran la adhesión entre la carpeta de rodamiento y la base.
- Proveen superficies durables con alta cohesividad.
- Ofrecen un mejor *costo-beneficio* que los asfaltos convencionales.

Para el caso de los polímeros (SBS, SBR, SBRS), se deben usar en climas extremos con alta temperatura en verano (más de 40°C), y bajas temperaturas en invierno (debajo de 5°C bajo cero), en virtud de que estos productos hacen que el asfalto funcione con una viscosidad multigrado lo que permite comportarse bien tanto en el frío como en el calor.

Los asfaltos con polímeros tienen la particularidad de que además de soportar una mayor repetición de las cargas, su vida útil se prolonga más de dos veces respecto a la utilización de los asfaltos convencionales. Los *polímeros* tanto del tipo *SBS* como los del tipo *SBR* o *SBRS* no son fáciles de incorporar al asfalto, aún a altas temperaturas, por lo que en algunas ocasiones antes de mezclarlos habrá que añadirles algún solvente (preferentemente un aceite de tipo aromático), que además de ser un producto caro, se adiciona en proporción de 50% a 75%, respecto al polímero, esto hace que el asfalto se reblandezca por la presencia de dicho solvente, lo cual podría ocasionar baja resistencia estructural.

Las ventajas que se han logrado en las mezclas de pavimentación con el uso de ligantes ahulados son:

- Mayor resistencia al agrietamiento y a la expansión.
- Mayor resistencia al flujo y a la deformación.
- Mayor estabilidad.
- Mayor adhesividad.
- Mayor resistencia al desprendimiento de agregados.

El reutilizar los materiales existentes en el pavimento para su refuerzo y rehabilitación supone el no usar nuevos agregados y reducir el porcentaje de ligante empleado, además, no se produce contaminación por humos ni gases tóxicos. Por otra parte, ésta técnica permite llevar a cabo la rehabilitación del pavimento con un menor gasto económico y de recursos naturales; es por tanto, una de las técnicas de conservación de carreteras más respetuosa con el medio ambiente.

El *reciclamiento* que se lleva a cabo en la rehabilitación de las carreteras es muy importante, ya que permite mantener los niveles de algunas obras complementarias de drenaje (cunetas, bordillos, lavaderos), y los acotamientos de concreto asfáltico; dentro de las ciudades, su uso es indispensable para conservar los niveles de banquetas y coladeras, además de que no incrementa el peso muerto de los puentes y mantiene la altura apropiada en túneles y pasos a desnivel. El *reciclamiento* de los pavimentos asfálticos, ha alcanzado un nivel tecnológico tan alto, que asegura el éxito en cualquier obra, con la condición de que sean observados los principios físicos y químicos requeridos para una rehabilitación determinada.

La elección y la aplicación de diferentes medidas para la reducción del ruido varían, naturalmente, de lugar a lugar, de problema a problema y de país a país. Los métodos utilizados dependen de la situación física, de las posibilidades financieras, de la aceptación política y, también de los valores culturales en el que se fundamenta la toma de decisión. Es difícil definir normas internacionales para la reducción del ruido, dado que tanto los valores culturales como los políticos varían de un país a otro. Desgraciadamente las tecnologías utilizadas son costosas. Es necesario un mantenimiento continuo sin el cual su eficacia quedaría reducida.

El denominador común en cada uno de los casos es la necesidad de considerar el diseño y la implementación de las diferentes medidas como una parte dentro de un plan global, de forma que se evite la aparición de nuevos problemas. La mejora de los niveles sonoros debe ser un objetivo contemplado en todo plan global destinado a tratar los problemas medio ambientales generados por la carrera y el tránsito que lleva asociado.

¿Por qué el deterioro de los pavimentos flexibles?

Es importante recordar que los pavimentos de carreteras están constituidos por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales y de espesor variable formadas por diferentes calidades de materiales adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan en la *capa subrasante* obtenida por el movimiento de tierras y han de soportar las cargas de tránsito durante un período de varios años, sin deterioros que afecten la seguridad y la comodidad de los usuarios o a la propia integridad estructural del pavimento. Los *pavimentos flexibles* deben tener una superficie de rodamiento adecuada que permita en todo tiempo un tránsito fácil, cómodo y seguro de los vehículos.

Las fallas de las secciones estructurales de un *pavimento flexible*, se pueden originar por varias razones: mal diseño, mala construcción, empleo de materiales inadecuados y específicamente por consolidación o esfuerzos cortantes en la terracería, capa subrasante o alguna otra capa del pavimento.

Para juzgar el tipo y el lugar de una falla, tiene que hacerse un estudio de campo y laboratorio, dirigido por una persona de muchos conocimientos sobre pavimentos y laboratorio. Así un Ingeniero en carreteras tiene que abrir la parte dañada de un pavimento, visualmente analizar el caso, ordenar un cuidadoso muestreo y su envío a un laboratorio para realizar algunas pruebas. Después de reunir ésta información, puede decirse donde está la falla, si será progresiva y qué tipo de falla es.

Los defectos que presenta un pavimento, que disminuyen la comodidad del usuario o la vida de servicio de esa estructura, frecuentemente corresponden a defectos constructivos y difícilmente pueden clasificarse como deterioros. Los deterioros de pavimentos incluidos, se consideran los más relevantes, se han agrupado en tres grandes categorías; los de superficie, los de estructura y los que encuentran su origen en la construcción. Los deterioros dentro de las tres grandes categorías se agrupan a su vez en las subcategorías de:

- Desprendimientos.
- Alisamientos.
- Exposición de agregados.
- Deformaciones.
- Agrietamientos.

LA RENTABILIDAD DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

Los factores que determinan la *rentabilidad* de la conservación de la capa de rodadura son su costo, la composición y el crecimiento del tránsito en las carreteras, el costo de operación de los vehículos, los costos sociales y económicos de cualquier cierre temporal del camino que pueda ocurrir por cualquier condición climática. La programación del mantenimiento de carreteras pavimentadas significa la preparación de un conjunto especialmente diseñado de trabajos de bacheo, sellado de grietas, recubrimiento y rehabilitación de cada tramo de la carretera a lo largo de los años; para manejar ésta programación de manera estratégica es necesario manejar las siguientes consideraciones:

a) Aspectos financieros

Un problema imperecedero en el mantenimiento de carreteras es el de asegurar que se destine a esa actividad un volumen suficiente de fondos, en forma constante y eficiente. El crear un sistema de impuestos para el mantenimiento de la red vial mediante el 10% de los ingresos provenientes de los usuarios de las carreteras (impuestos sobre la gasolina y el combustible diesel, de derechos sobre licencias y matrículas de vehículos, de impuestos de importación y de consumo sobre los vehículos y sus componentes y de derechos de peaje y multas), son suficientes para sufragar la totalidad de los gastos aconsejables para el *mantenimiento de rutina y periódico*. Las recaudaciones de esos impuestos se entregan en cuotas mensuales iguales y pueden utilizarse hasta el final del ejercicio económico.

Durante períodos de dificultades financieras se puede aplazar la construcción de nuevas carreteras, dándole mayor importancia a los trabajos de *conservación rutinaria, preventiva y correctiva*. Incluso, se pueden crear fondos “autónomos” para maquinaria que perciben los cargos por arrendamiento cobrados a los usuarios de los equipos y que tienen considerables ventajas potenciales para mejorar la eficiencia de la administración y utilización de estos recursos.

b) *El factor de recursos humanos*

Un problema bastante común es la falta de personal adecuadamente capacitado o experimentado para el mantenimiento de las carreteras. Es preciso mantener un cuidadoso equilibrio entre los múltiples recursos reunidos para la ejecución del mantenimiento de la red federal, muchos de los cuales, como las actitudes y la competencia del personal, deben desarrollarse gradualmente. Esto se logra mediante un apoyo intenso para la formación de personal (becas al extranjero, financiamiento de instalaciones y adquisición de equipo de rehabilitación, del mantenimiento equipo), desde los Ingenieros principales y administradores hasta los trabajadores camioneros; una capacitación de por lo menos cada año.

c) *Aspectos administrativos*

El obstáculo a vencer es el mejoramiento de la eficiencia de las operaciones de mantenimiento, en el sentido de que las asignaciones presupuestarias probablemente serían suficientes si los fondos se emplearan en forma correcta y eficaz.

La mayoría de estos problemas obedece principalmente a factores estructurales, que sólo pueden resolverse con el tiempo, mediante la aplicación de políticas de personal más flexibles, la capacitación de los administradores de nivel medios y la búsqueda de otros medios de satisfacer las necesidades de equipo moderno de los gobiernos locales para sus respectivas obras.

d) *El aspecto institucional*

Al igual que las otras funciones de la economía, la organización institucional de un país para el mantenimiento vial (la asignación y distribución de responsabilidades entre los sectores público y privado, entre diferentes niveles de gobierno y dentro del gobierno central), debe evolucionar con el desarrollo y los cambios registrados en la estructura sociopolítica general del país. En el aspecto institucional, lo más importante sobre todo es seguir el rumbo acertado, hacia una estructura orgánica que permita aplicar los recursos disponibles con la mayor eficacia posible a la ejecución de las tareas por realizar.

e) *La función de los consultores*

La función primordial de los consultores debe ser, la preparación de documentos de licitación, la evaluación de las ofertas y la supervisión de los contratos, la preparación eficiente de manuales o normas de proyecto y ejecución de obras para el mantenimiento de la red vial, y la capacitación del personal, que se necesita para establecer programas de mantenimiento profesional.

COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES

El estado actual de la red federal requiere mejoramientos sustanciales para enfrentar el crecimiento de los volúmenes y de las cargas unitarias del tránsito, en el entorno actual de desarrollo del tránsito internacional inducido por el *Tratado de Libre Comercio (TLC)*. Por ello, se pretende crear estrategias alternativas de mantenimiento, compararlas desde el punto de vista técnico-económico y recomendar para el futuro la más adecuada para las necesidades del país. (Fig. 5.1). Estas estrategias deben ser coherentes con el esfuerzo financiero que el gobierno está dispuesto a ejercer y con las limitaciones externas de índole industrial e institucional.

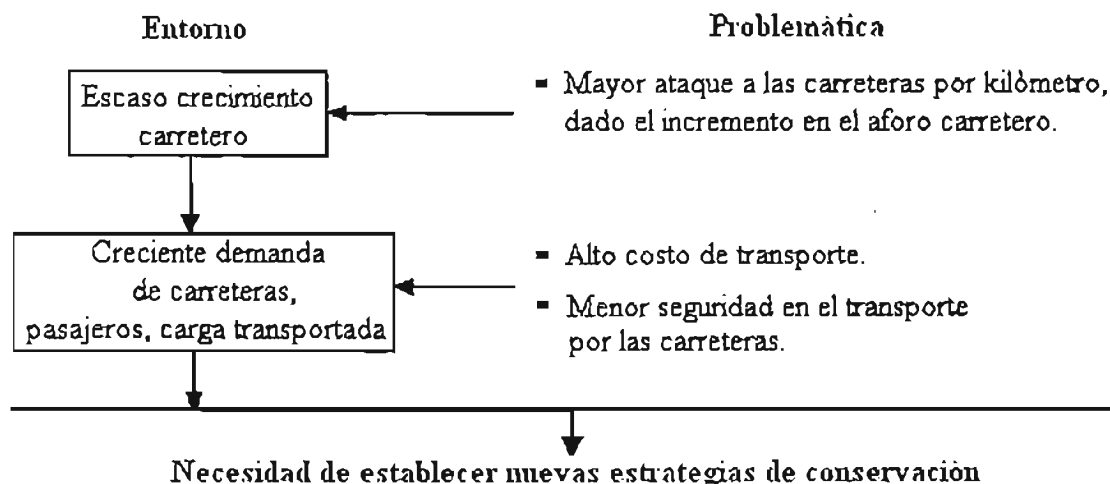


FIGURA 5.1. Causas típicas para establecer nuevas estrategias de conservación de pavimentos.

FUENTE:

Conservación de Carreteras. Órgano Oficial del Colegio de Ingenieros Civiles de México A.C. Julio. 1995. Vol. 7.

Por tal motivo se considera necesario implantar:

- Un criterio específico para la estructuración de los pavimentos, para elevados volúmenes de tránsito, cambios repentinos del medio ambiente y la calidad de los materiales principalmente, el cual tenga en cuenta la resistencia, durabilidad, confiabilidad, nivel de mantenimiento y costos de operación para la elección del tipo de estructura y material del pavimento, siendo deseable la utilización de nuevos materiales y productos más resistentes y durables que los convencionales dentro de la actual tecnología nacional.
- Finalmente se considera igualmente necesaria la implantación de un *SAP*, gracias a lo cual pueda efectuarse el manejo integral, sistemático y racional de la problemática de las carreteras en el país. A éste concepto, es deseable que se lleven a la práctica los planteamientos formulados para tal efecto por el *IMT* ⁽¹⁾, de ésta manera el país podrá disponer de una red de carreteras eficiente y moderna, un mejor aprovechamiento de los recursos y un menor costo de transporte.

(1) *IMT*. "Sistema Mexicano para la Administración de Pavimentos". Primera Fase. Documento técnico No. 1. Querétaro, Qro. México. 1989.

La población del país alcanzará en dos décadas los 120 millones de personas, lo cual exigirá la creación de nuevos espacios para su futuro crecimiento, de terrenos necesarios para nuevas zonas industriales y áreas de desarrollo turístico. Es importante mencionar algunos de los requerimientos más importantes del país para las próximas dos décadas en el rubro de las carreteras:

- La red pavimentada deberá alcanzar los 150,000 kilómetros, y se requerirán unos 12,000 kilómetros adicionales de autopistas y carreteras de primer orden.
- Deberá incrementarse la inversión destinada a la conservación y modernización de la red.
- Se deben diseñar carreteras con altas especificaciones de control de calidad requeridas para garantizar su durabilidad, seguridad y economía, utilizando materiales y productos con especificaciones que tomen en cuenta su comportamiento a largo plazo.
- Las carreteras existentes deberán reforzarse y ampliarse para dar cabida a volúmenes mayores de tránsito, principalmente el pesado.

- Efectuar un análisis de los problemas ocurridos en las obras realizadas en las últimas dos décadas, así como su comportamiento, para adecuar los procedimientos de diseño, construcción y control de calidad.

Si consideramos que en *México* el transporte carretero es el modo más importante, ya que moviliza el 98% de los pasajeros y el 65% de la carga a nivel nacional, se comprende fácilmente la importancia estratégica que tiene para la economía del país la conservación de su infraestructura carretera y la necesidad primordial para:

- 1) *Conservar y rehabilitar* de manera eficiente la red carretera.
- 2) *Incrementar* la longitud de dicha red, así como el número de carriles.
- 3) *Modernizar* el ámbito global del sistema de transporte carretero.

El proyecto, la construcción y la conservación de los *pavimentos flexibles* implica tomar en cuenta los avances tecnológicos presentados en recientes congresos sobre ésta materia, cuya tendencia se plantea a continuación:

- Modelación teórica más realista e innovadora del comportamiento de los pavimentos, que incorpore la caracterización de los materiales obtenida de pruebas no destructivas, como las resultantes del deflectómetro de impacto y el perfilómetro láser.
- Disponibilidad de datos altamente confiables, de campo y laboratorio, obtenidos de organismos oficiales e instituciones de investigación asociadas con empresas de consultoría y construcción.
- Incorporación más efectiva de los conceptos básicos de la mecánica de suelos en el proyecto y la evaluación de pavimentos, incluyendo su cimentación.
- Aplicación necesaria de parámetros geotécnicos más significativos, para suprimir el uso generalizado de conceptos empíricos como el *CBR*.

Las obras de Ingeniería deben realizarse en la forma más económica posible, pero cumpliendo cabalmente con las finalidades para las cuales fueron proyectadas. Se debe entender que una obra es económica cuando los costos de construcción, conservación y operación son mínimos en relación con otras alternativas. En resumen, la misión de un Ingeniero es proyectar y construir con el menor costo posible y que cumplan con los objetivos para los cuales se concibieron.

La idea básica para la construcción de un camino en todas las condiciones utilizadas por vehículos es preparar una adecuada *capa subrasante*, proveer un necesario drenaje y construir un pavimento que:

- Tenga un espesor total suficiente y resistencia interna para soportar cargas de tránsito esperadas.
- Tenga una adecuada compactación para prevenir la penetración ó la acumulación interna de humedad.
- Tenga una superficie final uniforme, resistente al deslizamiento y al deterioro por la acción de químicos anticongelantes.

Las vías terrestres forman parte de la infraestructura de un país; son aquellas obras que por lo general están a cargo del gobierno y contribuyen al desarrollo del mismo. Se ha dicho que los caminos son la infraestructura de la infraestructura, pues una vez que se construye uno de ellos, es más fácil proporcionar el resto de los servicios. Un camino tiene ciertas ventajas respecto a las

vías férreas y los aeropuertos, como el hecho de que puede empezar a dar servicio conforme se construyen los tramos, es decir, no es necesario esperar a la conclusión de la obra para utilizar las partes que se vayan terminando.

- Desde el punto de vista de la infraestructura, las vías terrestres tienen una importancia económica y, por tanto, deben evaluarse y programarse de acuerdo con los beneficios sociales y económicos que puedan proporcionar.
- Cuando la infraestructura vial es eficiente y adecuada, se realiza con facilidad el transporte de personas, bienes y servicios, lo que promueve el desarrollo económico del país. *México* no puede detenerse, deberá hacer el mayor esfuerzo para ocupar el lugar que le corresponde dentro de ésta nueva tendencia económica.
- Como podrá observarse, para alcanzar niveles altos de desarrollo económico en *México*, los proyectos de Ingeniería deben estar justificados con una verdadera solución técnico-económica. Es necesario construir caminos que sean durables, eficientes y confortables, buscar nuevas tecnologías para que en la conservación, mantenimiento y rehabilitación garanticen tanto técnica como económicamente las inversiones que se realizan, es decir, pasar de la *eficiencia a la eficacia*.

Se está avanzando mucho en el campo de los *asfaltos modificados*, cuyo empleo actual se limita fundamentalmente a las capas de rodadura de las vías de tránsito intenso y pesado, pero cuyas características reológicas, así como su mejor adhesividad a los agregados y resistencia al envejecimiento hacen deseable su aplicación generalizada, basada evidentemente en pruebas de laboratorio y a escala real que permitan evaluar sus propiedades y ayuden a predecir el comportamiento de la mezcla dentro del pavimento.

Con éste estudio, se pretende emplear:

- Residuos de refinería para producir *Aditivos Mejoradores de Adherencia (AMA)*. El desarrollo de estos *AMA*, requieren el empleo de compuestos químicos (tensoactivos) que proporcionen mayor capacidad de adherencia del conjunto agregado - asfalto, tendientes a evitar el desprendimiento de partículas causantes en la vías de problemas como los expuestos anteriormente y aumentar de ésta manera la vida útil del pavimento, con los consecuentes ahorros económicos para el país.

Como la mayoría de *polímeros* empleados para éste propósito en nuestro país son importados, los costos de fabricación de las mezclas asfálticas que las contienen son relativamente altos, factor que hace indispensable el desarrollo de:

- Nuevos aditivos que produzcan los mismos efectos a menores costos, utilizando para éste fin, materias primas que en la actualidad son residuos o subproductos de la industria petroquímica.

El deterioro de un *pavimento flexible*, se traduce en sobrecostos del transporte carretero, explicables principalmente por el excesivo consumo de combustible ante la mayor exigencia de potencia, por el mayor desgaste de vehículos y la reducción en la velocidad de operación. Los deterioros en las mezclas asfálticas relacionados con la mala adherencia agregado - asfalto, ocasionan grandes pérdidas económicas para el país, no sólo porque exigen una intervención más pronta de lo previsto, si no porque el estado funcional de las vías, se ve afectado de tal forma, que puede implicar un considerable aumento de los costos operativos del transporte.

El elemento clave del análisis radica entonces en:

- Definir la mejor relación posible entre el ahorro en la operación del transporte carretero, con el costo (significativamente inferior), de levantar el índice de servicio para el conjunto de todos los tramos de la red de carreteras federales y estatales en la *República Mexicana*.

IMPORTANCIA DEL MANTENIMIENTO

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

El punto de partida para el análisis de los efectos del mantenimiento proviene de las investigaciones del *Instituto Mexicano del Transporte*. Dichas investigaciones han permitido relacionar el *índice de rugosidad internacional* (IRI) de una carretera con el costo de operación o de los vehículos que transitan por ella, las investigaciones realizadas han relacionado, además, éste índice de rugosidad con el *índice de servicio actual* (ISA) que se utiliza comúnmente en nuestro país para calificar el estado de conservación en que se encuentra una carretera.

El principal factor es el originado por los importantes incrementos en el número y el peso de los vehículos de mayor carga, así como en los avances de la industria automotriz. Esto obliga a:

- Introducir nuevos materiales, más resistentes y durables, así como nuevas estructuras o tipos de pavimentos.
- Crear modelos matemáticos para poder considerar la presencia de tales materiales en el diseño de los pavimentos asfálticos.
- Utilizar programas de computación más avanzados, así como aplicar métodos mecanístico-empíricos, que son, en la actualidad, los más prometedores por las siguientes razones:
 - Su aplicación resulta trascendental en el mantenimiento de los pavimentos asfálticos. Permiten efectuar una evaluación racional de las propiedades mecánicas de los materiales existentes.
 - Brindan gran ayuda en la evaluación de la influencia de la variación de espesores, cargas, nuevos materiales, clima, ambiente, etc.
 - Permiten predecir el comportamiento del pavimento a lo largo del tiempo, su vida remanente, y son de gran utilidad en la ejecución de análisis de tipo económico.
 - Constituyen un valioso auxiliar en la fase de operación, incorporados a sistemas de administración de pavimentos.

En cuanto a los materiales:

- Deberán también quedar sujetos a mejores controles y estándares de calidad, requiriéndose de la aplicación de los conceptos de calidad total y aseguramiento de la calidad.

Hoy en día el factor predominante y de mucha importancia para el gobierno local es el consumo de energía para la producción de los materiales y de su puesta en obra, por lo tanto se considera:

- Efectuar un análisis tanto de su costo, como de la energía gastada para obtenerlos.

El *mantenimiento* de las carreteras tiene grandes variantes en función de la zona de desarrollo y del tipo de carretera de que se trate, como ya se hizo mención, los costos son un índice de ello, pues a parte de cumplir, deberán tener los ingresos suficientes para cubrir las amortizaciones correspondientes, su conservación y administración con base en el proyecto.

Es indispensable que el objetivo principal y particular para los *administradores y conservadores* de las carreteras sea:

- a) Preservar el patrimonio vial existente y garantizar una circulación lo más segura, cómoda y económica posible, ya que los costos del transporte son muy dependientes de los deterioros que presente la carretera.
- b) Prolongar su vida útil y aplazar la fecha en que deben renovarse.
- c) Reducir el costo de operación de los vehículos que transitan por ellas.
- d) Contribuir a que se mantengan abiertas al tránsito y permitir una mayor regularidad, puntualidad y seguridad de los servicios de transporte por carretera.

La primera finalidad se relaciona más directamente con los intereses del organismo de vialidad, la segunda con los de los operadores de vehículos y la tercera con los de los habitantes de la zona que atraviesa el camino.

De no realizar estos cuatro criterios, el *rezago u omisión* conduce a:

- Un rápido y prolongado deterioro del pavimento.
- Un aumento en los costos de operación.
- Incremento de accidentes automovilísticos.
- Mayor costo de reparación, rehabilitación y/o reconstrucción de la carpeta asfáltica.
- Pérdida total de la inversión (materiales, mano de obra y equipo).

Resulta adecuado resaltar que el estado de la carretera, manifestado mediante variables como la regularidad superficial, la adherencia neumático – pavimento o el agrietamiento entre otras, ejerce una gran influencia en los costos de operación de los vehículos. Los intensos estudios y la abundante información recopilada durante los últimos 10 años indican que los beneficios más importantes del *mantenimiento de carreteras* no son los que perciben las autoridades de vialidad, sino los que se obtienen en forma de ahorros en el costo de operación de los vehículos.

Por lo tanto:

- 1) Se requiere realizar una política de factibilidad para adecuar los costos de operación de los vehículos en los comienzos de los proyectos de carreteras.
- 2) Un consenso unilateral por parte de la SCT y empresas particulares, para que los costos de operación de los vehículos sea una característica de diseño en los *pavimentos flexibles*.
- 3) Realizar un balance y un estudio cada 8 meses comparando los diferentes estados de los costos de operación de los vehículos para diferentes tramos carreteros.
- 4) Implantar un acuerdo por parte de la SCT con el gobierno federal para que los costos de operación de los vehículos sean accesibles para los usuarios.

Esto conduce a tener y a mejorar:

La conservación del patrimonio nacional, el orgullo nacional de tener mejores carreteras al igual que los países de primer mundo y el reconocimiento de la extrema importancia que tiene el transporte en un país sin litoral, han sido argumentos convincentes en los congresos sobre la conservación y el mantenimiento de las carreteras.

En la vida útil de una carretera pavimentada hay normalmente una etapa crucial en la que es esencial reforzar el pavimento. La demora en hacerlo después de transcurrido ese período exigirá medidas mucho más costosas. El mantenimiento y la construcción de las carreteras deben considerarse realmente como estrategias que influyen entre sí a través del tiempo, ya que cuanto más se realiza lo uno en un tramo dado de una carretera, menos se necesita de lo otro.

Finalmente, el comportamiento no sólo depende del diseño y construcción de un *pavimento flexible*, sino que además, se da la necesidad de tomar decisiones basadas en conceptos técnicos, económicos, manejo de situaciones a futuro, análisis de sensibilidad y una gran cantidad de información procedente de la evaluación del comportamiento de los pavimentos, bajo diferentes condiciones de materiales, de clima, de construcción y de tránsito, así como de los efectos de los trabajos de conservación.

Hay que hacer mención de la utilización de los sistemas de administración de pavimentos, como el recientemente incorporado "*Highway Development and Management System*" (HDM-4), programa computacional de evaluación técnico-económica de redes de carreteras, capacitado para efectuar un análisis de sensibilidad para diferentes escenarios de economía, de políticas de mantenimiento y de variabilidad en los materiales, en el tránsito y en la construcción, permitiendo así presentar la mejor información posible que permita tomar las soluciones adecuadas con la máxima eficiencia de los recursos disponibles.

La originalidad del programa radica en el hecho de que define simultáneamente los trabajos de mantenimiento ligados a una estrategia dada y sus efectos sobre la degradación de la carretera. Se establece así la crónica de los trabajos y la degradación que el programa aplica a la red estudiada.

Elaboración de un "Proyecto integral del pavimento flexible"

Para realizar un proyecto "integral" debemos atender las siguientes consideraciones:

- Los diseños de los pavimentos tendrán que efectuarse con base en las propiedades de los materiales y tomando en cuenta el comportamiento a largo plazo, envejecimiento y fatiga, a partir de modelos matemáticos y herramientas de cálculo más avanzados, que consideren, por ejemplo, el comportamiento reológico de los materiales y atendiendo siempre los siguientes factores: *tránsito, capa subrasante, clima, materiales disponibles, drenaje y subdrenaje*.
- Los Ingenieros deberán utilizar métodos *mecanístico-empíricos* para los diseños, aunque con mayor participación de los conceptos probabilísticos y aplicar, además, los conceptos de calidad total para satisfacer así, los conceptos de normalización, acreditación y certificación.
- Deberán utilizar equipos de construcción más avanzados y multifuncionales de alto rendimiento, inteligentes, automatizados y robotizados; será indispensable definir los procesos logísticos adecuados para obtener el máximo rendimiento y la más alta calidad de construcción. En ese sentido será importante juzgar la construcción en la medida que se ejecute mediante técnicas de evaluación con pruebas no destructivas y equipos de alto rendimiento.
- Habrá que promoverse avances significativos en la evaluación, conservación y rehabilitación de las obras viales y poder interferir lo menos posible con el tránsito, utilizando técnicas, equipos y materiales adecuados.

- Se hace ver las tendencias actuales en el uso de los materiales asfálticos, como consecuencia del encarecimiento que a nivel mundial han tenido estos productos a últimas fechas, atribuible a las limitaciones que se proveen en las reservas del petróleo. Estas tendencias van encaminadas al menor uso de los materiales asfálticos y al mayor uso de los aditivos, al ahorro de los solventes ligeros del petróleo que se emplean en la fabricación de los cementos asfálticos y a una mejor calidad de los trabajos de construcción en se utilizan los referidos productos, a efecto de asegurar su mayor duración.

Se establecen en consecuencia, los elementos fundamentales para la *elaboración integral de un proyecto de pavimento flexible*, entendiéndose no solamente el dimensionamiento de la estructura del pavimento, sino también, los conceptos de especificaciones de materiales, lineamientos constructivos etc., y especialmente las condiciones de textura superficial, que son básicas desde el punto de vista de la seguridad y comodidad del usuario.

ANEXO

METODOLOGÍA ADMINISTRATIVA PARA LA PLANEACIÓN DE LA CONSERVACIÓN DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

Para programar adecuadamente las actividades de conservación, con base en el esquema de seguimiento de los tramos que conforman la red nacional, se proponen los siguientes programas administrativos, cada uno de los cuales durará 3 años y abarcará un cierto número de tramos; anualmente se iniciará un ciclo para abarcar la totalidad de los tramos.

- 1) En Enero del año $N-2$ se elaborará en las oficinas centrales un anteproyecto de programa para realizarlas en el año N , en el que se toman en varios tramos de rehabilitación y reconstrucción. La conservación normal no requiere programación previa.
- 2) A más tardar en Abril del año $N-2$ las oficinas foráneas recibirán el anteproyecto de programas y realizarán los estudios adecuados para la nueva estructuración de los pavimentos, con los cuales realizarán un anteproyecto que deberán enviar a las oficinas centrales y regionales a más tardar el 1 de Diciembre del año $N-2$.
- 3) Durante el año $N-1$ las oficinas centrales elaboran la programación definitiva y solicitarán a las autoridades competentes, los fondos necesarios para realizar las obras, con gastos actualizados al año N , tomando en cuenta también la conservación normal.
- 4) Entre Noviembre y Diciembre del año $N-1$, las oficinas centrales enviarán a las oficinas regionales (de obra), los programas definitivos y radicarán en cada región los fondos necesarios.
- 5) Durante el año N , se realizarán las obras programadas.

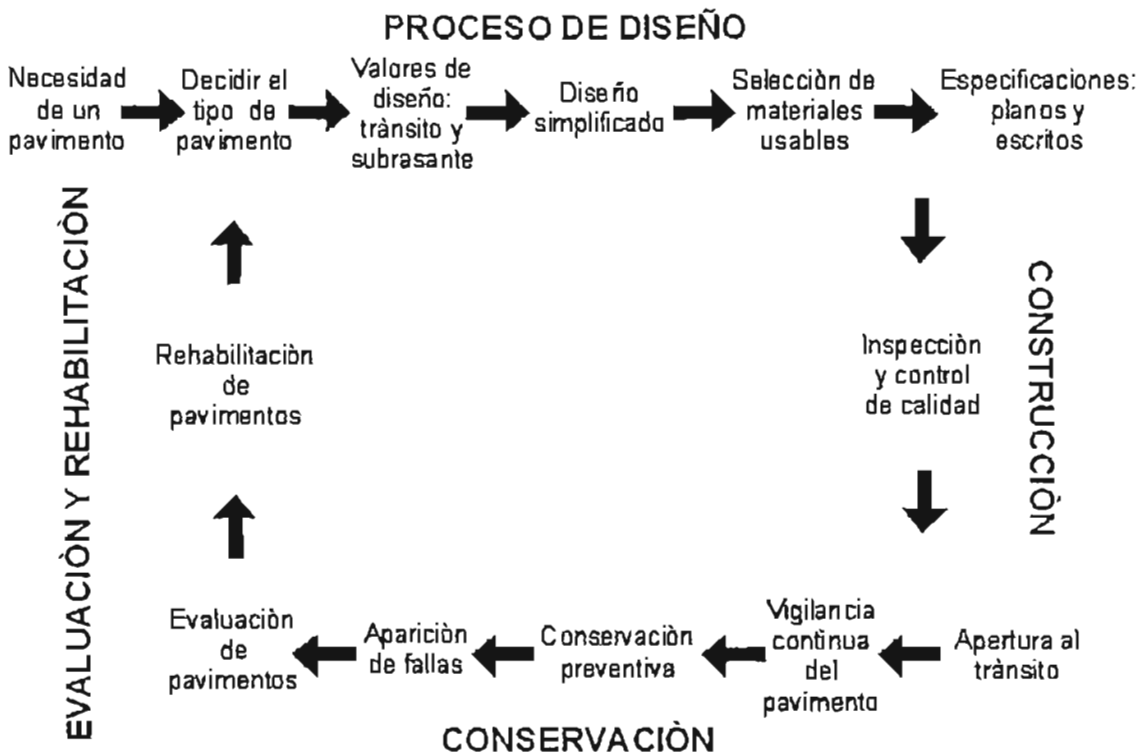
En el cuadro siguiente se muestra el ciclo de la metodología administrativa para la planeación de la conservación de un *pavimento flexible*:

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

		Año N - 2		Año N - 1		Año N
		Enero - Marzo	Abril - Diciembre	Enero - Octubre	Noviembre - Diciembre	Enero - Diciembre
Oficinas centrales a nivel ministro				A fine del anteproyecto de obras que se ejecutarán en la red Nal. En el año N se solicita a la autoridad los fondos necesarios		
Oficinas centrales encargadas de la planeación y ejecución de obras de conservación	Formato de seguimiento	Anteproyecto de obras para el año N y comunicación de oficinas foráneas			Comunicación a oficinas foráneas del programa definitivo de obras y las asignaciones para el año N	Supervisión
Oficinas foráneas de conservación			Estudio de proyecto geométrico y estructural de las obras del anteproyecto. Se comunica a oficinas centrales incluyendo antepresupuesto	Afinamiento de estudios de trazo y estructuración para las obras del año N		Realización de obras y supervisión

FUENTE: *Estructuración de Vías Terrestres*. Fernando Olivera Bustamante. México. Editorial Continental. 2000.

CICLO DE DISEÑO SIMPLIFICADO DE UN PAVIMENTO



A medida que las necesidades de movilidad han ido aumentando en las sociedades desarrolladas, la mayor demanda de desplazamientos ha hecho necesaria una dotación de infraestructuras, cuyas características generan unos impactos cada vez mayores sobre el medio ambiente y cuyos métodos de construcción son también más potentes. Esto va exigiendo métodos y planteamientos distintos a la hora de planificar y diseñar los proyectos de infraestructura de transporte cada vez más sofisticados.

Las medidas preventivas, correctivas y compensatorias en los proyectos de infraestructura de carreteras tienen por objeto eliminar, reducir o compensar los efectos ambientales negativos que podrían derivarse de la construcción y puesta en servicio de la infraestructura de la red carretera. (ver tabla 1).

A modo de ejemplo de posibilidades de medidas preventivas y correctoras, en la tabla 1 se enumeran de manera general las que son de aplicación a los proyectos de carreteras, autopistas y autovías, de los cuales hay una experiencia en nuestro país bastante amplia.

Un aspecto de gran importancia a la hora de diseñar las medidas *preventivas y correctoras* es tener en cuenta que su efectividad siempre será mayor si se diseñan de forma coordinada con el resto de los elementos del proyecto, lo que redundará, normalmente, también, en un menor costo económico.

Componente ambiental	Medidas preventivas y correctoras
Clima	<ul style="list-style-type: none"> • En el caso de corte del descenso del aire frío por el fondo del valle: sobredimensionamiento de los pasos inferiores. • Utilización de trazados en curva a la entrada y salida de bosques y creación de cercados con arbustos, varas, etc. • Para los efectos de límite, creación de cercados lo más rápido posible.
Calidad del aire	<ul style="list-style-type: none"> • Riegos durante la obra. • Señalización para mantener el tránsito fluido y constante. • Diseño de vías de amplia capacidad. • Evitar zonas con edificaciones altas. • Orientación de las vías de acuerdo con los vientos dominantes.
Ruido	<ul style="list-style-type: none"> • Utilización de pavimentos menos ruidosos. • Limitación de la velocidad. • Barreras acústicas. • Mejora de la fluidez del tránsito y desviación del tránsito nocturno. • Depresión o elevación de la carretera. • Evitar pendientes pronunciadas.
Geología y geomorfología	<ul style="list-style-type: none"> • Localización adecuada de bancos de materiales. • Cuidado con el tránsito de maquinaria pesada en la fase de obra. • Medidas para evitar la erosión y los riesgos de deslizamientos de laderas (plantaciones, redes metálicas, drenes y cunetas, etc.).
Hidrología superficial y subterránea	<ul style="list-style-type: none"> • Situar el elemento inferior de la carretera 1.5 m. por encima de la capa freática. • Minimizar las interferencias con los flujos de agua subterránea. • Mantener la tasa de infiltración en las zonas de recarga. • Uso de medidas contra la erosión. • Cuidados durante la fase de construcción. • Impedir el vertido de aceites y grasas de la limpieza de los motores. • Colocación de parapetos para retener los sedimentos durante la construcción. • Formular planes y medidas de emergencia para los vertidos accidentales. • Evitar desvíos y corte de cauces. • Evitar artificialización de los cauces.

Suelos	<ul style="list-style-type: none"> • Disminuir las alturas de terraplenes y suavizar la pendiente de los taludes. • Preservar la cobertura superficial del suelo para su reutilización. • Impermeabilizar la parte alta de los taludes. • Recubrir de vegetación los taludes y zonas desnudas. • Respetar en los drenajes, siempre que sea posible, el sistema anterior de aguas de escorrentía. • Recubrir las zonas sin suelo de una capa productiva y recuperar la cobertura edáfica superficial. • Regular y vigilar la aplicación de sales. • Formular planes y medidas de emergencia para los vertidos accidentales.
Fauna	<ul style="list-style-type: none"> • Tomar precauciones en la obra en etapas y zonas de nidificación. • Construir pasos elevados e inferiores para el traslado de fauna. • Adecuar los drenajes para el paso de fauna y evitar que actúen como trampas. • Disponer de vallas, cercas, etc., para disminuir atropellos. • Disponer dispositivos en las vallas y cercas para permitir el escape. • Señalización y limitaciones de velocidad. • Minimizar la eliminación de la vegetación acuática. • Mantener la diversidad y naturalidad de los cauces.
Paisaje	<ul style="list-style-type: none"> • Medidas de diseño de la vía para adaptarse a las formas del terreno. • Remodelación de taludes de desmontes y terraplenes. • Plantaciones de vegetación en zonas desnudas. • Barreras visuales. • Respeto a la tipología constructiva y materiales de la zona. • Diseño cromático de ciertas estructuras.
Demografía	<ul style="list-style-type: none"> • Acciones compensatorias. • Utilización de mano de obra local. • Ayudas para el incremento del aislamiento acústico de ventanas.
Sector primario	<ul style="list-style-type: none"> • Reposición de servidumbres de paso, viario rural y cañadas. • Concertación parcelaria. • Medidas de planificación. • Compensación económica adecuada por las expropiaciones.
Sector secundario y terciario	<ul style="list-style-type: none"> • Utilización de mano de obra local. • Articulación de medidas compensatorias, de planificación, de relocalización, etc. • Ayudas a los municipios locales.
Factores socioculturales	<ul style="list-style-type: none"> • Señalización y protección durante la obra de bienes de interés cultural. • Presencia del arqueólogo en la fase de remoción de tierras. • Relocalización de elementos singulares. • Articulación de medidas compensatorias.
Sistema territorial	<ul style="list-style-type: none"> • Reposición de servicios y accesibilidad transversal. • Conexión con los planes territoriales.

TABLA 1. Medidas preventivas y correctoras en proyectos de carreteras, autopistas y autovías.

FUENTE:

Carreteras. Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera. Febrero 2004. Vol. 131, Madrid, España.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) *Aipcr. Comité Technique de Caracteristiques de Surface. Rapport XVI Congres Mundial de la Route, Vienne. 1979.*
- 2) *Aspectos Químicos de los Asfaltos y Mezclas Asfálticas.*
Ing. Quím. Manuel Madrazo.
Escuela Nacional de Ingeniería. UNAM. 1989.
- 3) *Caminos.* Roger Coquand. Editorial Reverte.
México. 1970.
- 4) *Características Superficiales de los Pavimentos Asfálticos.* Ing. Manuel Zárate Aquino.
Geosol. S.A. de C.V. 2003.
- 5) *Carreteras, Calles y Aeropistas.* Raúl Valle Rodas.
México. Editorial Ateneo. 1986.
- 6) *Carreteras. Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera.* Febrero 2004.
Vol. 131, Madrid, España.
- 7) *Conservación de Carreteras.* Órgano Oficial del Colegio de Ingenieros Civiles de México
A.C. Julio. 1995. Vol. 7.
- 8) *Catálogo de Deterioros de los Pavimentos Flexibles.*
XX Congreso Mundial de Carreteras de Montreal. Consejo de Directores de Carreteras
Iberia e Iberoamérica y la SCT de México. Vol. 11. Septiembre, 2002.
- 9) *Catálogo de Fallas de Pavimentos.* Dirección General de Servicios Técnicos. SCT. 1995.
- 10) *Curso Técnico Regional sobre Calidad y Comportamiento de Mezclas Asfálticas.*
Dirección General de Servicios Técnicos.
SCT. Culiacán, Sinaloa. Septiembre, 2002.
- 11) *Diagnóstico y Mantenimiento de la Red Vial Primaria de la Ciudad de México.* Ing.
Jesús Antonio Esteva Medina. Director de Obras de Infraestructura. Dirección General de
Obras Públicas, G.D.F. 2002.
- 12) *Diseño de Pavimentos Flexibles.* Ing. Manuel Zárate Aquino. Asociación Mexicana del
Asfalto. 2003.
- 13) *Elementos de Proyecto y Costos de Operación en Carreteras.* Instituto Mexicano del
Transporte. Publicación Técnica N° 20, Querétaro, Qro. 1991.
- 14) *El Experimento Internacional de Comparación y Armonización de las Medidas de la
Resistencia al Deslizamiento y de la Textura.* Achutegui, F., Crespo del Río, R., Sánchez,
B., Sánchez, I. Revista rutas N° 53 (a), Madrid, Abril, 1996.

- 15) *El Índice de Fricción Internacional (IFI). Obtención y Aplicaciones.* Achutegui, F., Crespo del Río, R., Sánchez, B., Sánchez, I. Revista rutas N° 53 (b), Madrid, Abril, 1996.
- 16) *Empleo de Aditivos en la Elaboración de Mezclas Asfálticas.* China Fabián Juan H. México. Representaciones y Servicios de Ingeniería. 1989.
- 17) *Emulsiones Asfálticas.* Ing. Gustavo Rivera E. México. Ed. Representaciones y Servicios de Ingeniería. 1989.
- 18) *Estado Superficial y Costos de Operación en Carreteras.* José Antonio Arroyo Osorno. Roberto Aguerrebere Salido. Publicación técnica N° 202. Sanfandila, Qro. 2002.
- 19) *Estructuración de Vías Terrestres.* Fernando Olivera Bustamante. México. Editorial Continental. 2000.
- 20) *Estructuración de Vías Terrestres.* Juan Carlos Olivera. México, DF. Editorial Continental. 1993.
- 21) *Estudio de la Resistencia al Deslizamiento en Pavimentos Asfálticos Chilenos.* Gaete, R., de Solminihac, H., Echeverría, G. Revista de Ingeniería de Construcción N° 4, Departamento de Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Marzo 1988.
- 22) *Evaluación Geotécnica de Pavimentos.* Asociación Mexicana del Asfalto A.C. México. SCT. 1990.
- 23) *Experiencia Mexicana en la Conservación de Carreteras.* Escalante Sauri, Cedric, XIII Reunión Nacional de Vías Terrestres, Memoria, tomo I, Oaxtepec, Morelos, Agosto de 1998.
- 24) *Gestión de Infraestructura Vial.* Hernán de Solminihac T. Ediciones Universidad Católica de Chile. 1998.
- 25) *Guidelines for Concrete Overlay of Existing Asphalt Pavements (Whitetopping).* American Concrete Pavement Association, Skokie, III, USA, 1991.
- 26) *Ingeniería de Carreteras.* Paul H. Wright. Dadnor J. Paquette. Editorial Limusa. Grupo Noriega editores. México. 1993.
- 27) *Ingeniería de Carreteras y Aeropuertos.* Adrián R. Legault. Editorial Continental. México, DF. 1979.

- 28) *Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres, Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas*. Alfonso Rico Rodríguez y Hermilio del Castillo. Editorial Limusa. Grupo Noriega editores. Vol. 1 y 2. 1988.
- 29) *Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y Aplicaciones*. Rafael Cal y Mayor. Editorial Alfaomega. Grupo editor. 1971.
- 30) *Instalaciones Eléctricas*. Norma Oficial Mexicana Nom – 001 – Sede - 1999. Secretaría de Energía. Sexta sección.
- 31) *Manejo de los Aspectos Funcionales de los Pavimentos*. Salgado, J. y Fuentes, R. Boletín técnico Inv. N° 3. Laboratorio Nacional de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, 1990.
- 32) *Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito*. Donald Cleveland. Representaciones y Servicios de Ingeniería. S.A. México, 1998.
- 33) *Manual de Ingeniería Económica con Aplicación Práctica a los Proyectos de Conservación de Carreteras*. Preinversión y Desarrollo. Trabajo preparado para la SCT. 1995.
- 34) *Materiales Asfálticos utilizados en Pavimentación*. SCT. 1993. 120 pp.
- 35) *Mecánica de Suelos*. Lambe T. William. Segunda edición. Editorial Limusa. Noriega editores. México. 1982.
- 36) *Mejoramiento y Estabilización de Suelos*. Carlos Fernández Loaiza. Primera edición. Editorial Limusa. México, 1982.
- 37) *Normativa para la Infraestructura del Transporte (normativa SCT)*. SCT. Diciembre 2003 y 2004.
- 38) *Pavement Deflection Analysis*. Nhi course N° 1312. T. publication N° fhwa-hi-94-021, 1994.
- 39) *Pavimentos Asfálticos*. Ing. Manuel Velazquez Velazquez. Madrid. Editorial Aguilar. 1990.
- 40) *Pavimentos de Concreto*. Cemex. S.A. de C.V. México. 1995.
- 41) *Primer Ciclo de Seminario sobre Pavimentos Flexibles*. Grupo Tribasa. México. Febrero.1997.
- 42) *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*. Asphalt Institute. Serie de manuales N° 22. Ms-22. Agosto 1982.

- 43) *Prontuario de Pavimentos*.
Manuel Enrique Echegaray del Solar.
Facultad de Ingeniería Civil. UNAM. 1988.
- 44) *Propiedades Geofísicas de los Suelos*. Bowles, Joseph.
Primera edición. Bogotá. Mc Graw Hill. 1982.
- 45) *Protección del Ruido en el Entorno de las Carreteras*. Ministerio de Obras Públicas,
Transporte y Medio Ambiente. Dirección General de Carreteras. Ocede. 1995.
- 46) *Reflexiones Sobre la Aplicación de la Geotecnia a las Vías Terrestres de México en las
Próximas dos Décadas*. Ing. Manuel Zárate Aquino. Reunión Nacional de Mecánica de
Suelos. Oaxaca, México. SMMS. 2000.
- 47) *Shell Pavement Design: Manual Asphalt Pavements and Overlay for Road Traffic*. Shell
international petroleum company limited, Londres. 1978.
- 48) *Sistema Mexicano para la Administración de Pavimentos*. IMT. Primera fase.
Documento técnico N° 1. Querétaro, Qro. México. 1989.
- 49) *Tecnología para el Proyecto de Pavimentos Flexibles*.
Olivera Bustamante Fernando. México. Editorial Cccsa. 1995.
- 50) *6° Simposio Internacional sobre Carreteras de Hormigón*. Madrid, España. 1990.
- 51) *Vías de Comunicación*. Ing. Carlos Crespo Villalaz.
México. Editorial Limusa. 1985.