

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

**"ESTUDIO TECNICO-ECONOMICO DE ASFALTOS
MODIFICADOS CON BASE POLIMERICA
EMPLEADOS EN LA TECNOLOGIA SMA
(STONE MASTIC ASPHALT)"**

T E S I S

**PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERA QUIMICA
P R E S E N T A :
VERONICA GONZALEZ PEÑA**



MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.

JURADO ASIGNADO SEGÚN EL TEMA:

PRESIDENTE: Prof. EDUARDO ROJO Y DE REGIL.

VOCAL: Prof. MARÍA AMELIA CRUZ ESCÁRCEGA.

SECRETARIO: Prof. CARLOS GALDEANO BIENZOBAS.

1er. SUPLENTE: Prof. ERNESTO PÉREZ SANTANA.

2do. SUPLENTE: Prof. ALEJANDRO ÍÑIGUEZ HERNÁNDEZ.

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)
Eje Central Lázaro Cárdenas No. 152
Colonia San Bartolo Atepehuacan
México, DF**

ASESOR:


Ing. Carlos Galdeano Biezobas

SUSTENTANTE:


Verónica González Peña

A DIOS: por haberme iluminado y amarme desmedidamente.

A MIS PADRES: que me hicieron lo que hoy soy.

A MIS HERMANOS: por su comprensión en los momentos más difíciles.

A MI FAMILIA Y AMIGOS: por su cariño y apoyo.

AL ING. CARLOS GALDEANO B.: por su amistad y su guía.

A LA UNAM Y LA FACULTAD DE QUÍMICA: les prometo dar aún más motivos para sentirse orgullosas de mí.

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES..... | 3 |
| 1.1 Historia del asfalto..... | 3 |
| 1.2 Definiciones..... | 5 |
| 1.3 Importancia del asfalto..... | 7 |
| 1.3.1 Importancia del desarrollo de vías de comunicación..... | 7 |
| 1.3.2 Importancia del asfalto en pavimentos..... | 8 |
| 1.3.3 Importancia del petróleo como fuente de asfaltos..... | 8 |
| CAPÍTULO 2: CLASIFICACIÓN Y PROPIEDADES DE LOS ASFALTOS..... | 10 |
| 2.1 Tipos de asfaltos desde el punto de vista químico..... | 10 |
| 2.1.1 Asfaltos naturales..... | 10 |
| 2.1.2 Asfaltos artificiales..... | 11 |
| 2.2 Clasificación de los asfaltos desde el punto de vista civil..... | 12 |
| 2.2.1 Asfaltos soplados..... | 12 |
| 2.2.2 <i>Cutbacks</i> | 13 |
| 2.2.3 Emulsiones asfálticas..... | 14 |
| 2.3 Características físicas de los asfaltos..... | 15 |
| 2.3.1 Consistencia..... | 15 |
| 2.3.2 Durabilidad o resistencia al envejecimiento..... | 16 |
| 2.3.3 Velocidad de curado..... | 19 |
| 2.3.4 Resistencia a la acción del agua..... | 19 |
| 2.3.5 Ductilidad..... | 20 |
| 2.3.6 Punto de inflamación..... | 20 |
| 2.3.7 Solubilidad..... | 20 |
| 2.3.8 Pérdida por calentamiento..... | 20 |

| | |
|---|----|
| 2.4 Características químicas de los asfaltos..... | 21 |
| 2.4.1 Asfaltenos..... | 22 |
| 2.4.2 Resinas asfálticas..... | 27 |
| 2.4.3 Aceites..... | 28 |

CAPÍTULO 3: MÉTODOS DE FABRICACIÓN Y USOS DE ASFALTOS.....29

| | |
|--|----|
| 3.1 Métodos de obtención de asfaltos..... | 29 |
| 3.1.1 Proceso de destilación..... | 31 |
| 3.1.2 Método de extracción por solventes..... | 31 |
| 3.2 Tecnologías, licenciadores y productores..... | 32 |
| 3.3 Pavimentos asfálticos..... | 32 |
| 3.3.1 Pavimentos flexibles..... | 33 |
| 3.3.2 Pavimentos rígidos..... | 35 |
| 3.4 Otros usos de los asfaltos..... | 37 |
| 3.5 Ventajas que ofrecen los asfaltos como materiales de construcción de pavimentos..... | 38 |

CAPÍTULO 4: MODIFICACIÓN DE ASFALTOS.....39

| | |
|--|----|
| 4.1 Antecedentes históricos de la red nacional de carreteras y organismos reguladores..... | 39 |
| 4.2 Situación de la red nacional de carreteras..... | 42 |
| 4.3 Proyecto de gobierno..... | 44 |
| 4.4 Opciones para cubrir las necesidades de la red nacional de carreteras..... | 47 |
| 4.4.1 <i>Stone Mastic Asphalt</i> : ¿la solución?..... | 47 |
| 4.4.1.1 Fibras Minerales..... | 49 |
| 4.4.1.2 Cal..... | 51 |
| 4.4.1.3 Polímero..... | 52 |
| 4.4.2 <i>Porous Asphalt</i> , ¿otra opción?..... | 57 |
| 4.5 Técnicas para el mantenimiento de carreteras..... | 60 |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE MERCADO Y ESTIMACIONES | |
| ECONÓMICAS..... | 63 |
| 5.1 Análisis de la demanda..... | 63 |
| 5.2 Análisis de la oferta..... | 65 |
| 5.2.1 Productores..... | 65 |
| 5.2.2 Ubicación de las plantas productoras..... | 65 |
| 5.2.3 Materias primas..... | 66 |
| 5.2.4 Capacidad instalada y utilizada..... | 72 |
| 5.2.5 Calidad y propiedades de los asfaltos mexicanos..... | 72 |
| 5.2.6 Precio..... | 76 |
| 5.3 Estimaciones económicas..... | 77 |
| 5.3.1 Cálculo de una carretera de alta especificación con el método de construcción tradicional..... | 77 |
| 5.3.2 Cálculo de una carretera de alta especificación con la técnica de construcción <i>Stone Mastic Asphalt</i> (SMA)..... | 81 |
| 5.3.3 Cálculo de una carretera de alta especificación con el método de construcción <i>Porous Asphalt</i> (PA)..... | 85 |
| 5.3.4 Costo del kilómetro de carretera tipo A4S..... | 90 |
| 5.3.5 Comparación económica de los diferentes tipos de encarpetao..... | 92 |
| | |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 93 |
| | |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 95 |
| | |
| APÉNDICE A: ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS..... | 98 |
| | |
| APÉNDICE B: SITUACIÓN DETALLADA DEL SISTEMA CARRETERO | |
| NACIONAL..... | 104 |

APÉNDICE C: CÁLCULOS ECONÓMICOS.....108
LISTA DE FIGURAS

| FIGURA | TÍTULO | PÁGINA |
|--------|--|--------|
| 2.1 | Representación Gráfica de los Tipos de Agrietamientos Más Comunes | 17 |
| 2.2 | Esquema de los Componentes del Residuo de la Destilación del Crudo | 21 |
| 2.3 | Esquema de Reacción de los Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos | 22 |
| 3.1 | Gráfica de Densidad API del Crudo vs. % de Asfalto Penetración 100 | 30 |
| 4.1 | Longitud de la Red Nacional de Carreteras por Tipo de Camino | 42 |
| 4.2 | Representación de las Moléculas del Copolímero SBS | 54 |
| 5.1 | Consumo Nacional Aparente de Asfaltos | 64 |
| 5.2 | Ubicación de las Refinerías dentro del Territorio Mexicano | 66 |
| 5.3 | Porcentaje de Producción de Asfaltos por Refinería | 67 |
| 5.4 | Exportaciones de los Diferentes Crudos | 68 |
| 5.5 | Distribución de las Reservas Probadas de Petróleo Crudo por Región | 70 |
| 5.6 | Distribución de las Reservas Probadas de Diferentes Productos por Región | 71 |
| 5.7 | Tendencias de la Capacidad de Destilación | 71 |
| 5.8 | Secciones de una Carretera Pavimentada con el Método Tradicional | 78 |
| 5.9 | Secciones de una Carretera Pavimentada por el Método SMA | 81 |
| 5.10 | Secciones de una Carretera Pavimentada con el Método PA | 85 |

LISTA DE TABLAS

| TABLA | TÍTULO | PÁGINA |
|-------|---|--------|
| 4-1 | Logros del Programa Nacional de Autopistas 1989-1994 | 43 |
| 4-2 | Propuesta para la Construcción de Carreteras durante el Periodo 1995-2000 | 46 |
| 4-3 | Propiedades de la Cal Empleada para Modificar Mezclas Asfálticas | 52 |
| 4-4 | Propiedades Típicas del Polímero Empleado para Modificar Mezclas Asfálticas | 56 |
| 4-5 | Propiedades Mecánicas Típicas del Polímero Empleado para Modificar Mezclas Asfálticas | 58 |
| 4-6 | Especificaciones para un Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros | 57 |
| 5-1 | Consumo Nacional Aparente de Asfaltos | 64 |
| 5-2 | Características del Asfalto Rebajado de Fraguado Rápido FR-3 Producido en la Refinería de Salamanca, Gto. | 73 |
| 5-3 | Características del Asfalto Rebajado de Fraguado Rápido FR-6 Producido en la Refinería de Salamanca, Gto. | 73 |
| 5-4 | Características del Cemento Asfáltico No.6 Producido en la Refinería de Salamanca, Gto. | 74 |
| 5-5 | Características del Cemento Asfáltico No.6 Producido en la Refinería de Ciudad Madero, Tamps. | 75 |
| 5-6 | Características del Asfalto de Fraguado Medio FM-1 Producido en la Refinería de Ciudad Madero, Tamps. | 76 |
| 5-7 | Materiales Requeridos para Construir un Kilómetro de Carpeta para una Carretera Tipo A4S | 89 |
| 5-8 | Precios Unitarios Promedio de Materias Primas Utilizadas en la Construcción de Carreteras | 90 |
| 5-9 | Costo Aproximado del Encarpetado y Reencarpetado de un Kilómetro de Carretera Tipo A4S | 91 |

INTRODUCCIÓN

Una carretera es un medio de comunicación de vital importancia, por su extensión y su bajo o nulo costo de tránsito. Una prueba de ello es que el 98% de los pasajeros y el 60% de la carga a nivel nacional se moviliza a través de ellas. Por lo anterior, las carreteras son el medio de transporte más económico y de mayor alcance dentro del país.

Hace apenas unos años, México contrajo acuerdos comerciales con diferentes países con el fin de alcanzar un mayor desarrollo técnico, económico y cultural, por lo que contar con adecuados sistemas de transporte se enfatizó como problemática. La infraestructura carretera además de tener una longitud considerable y de un trazo adecuado, de encontrarse en buen estado con el fin de agilizar el transporte. En México, una carretera dura 3 años en climas templados y 2 años en climas húmedos.

El problema de mantener una carretera en buen estado durante un largo periodo preocupa a varios países. Por esto, en los años sesentas en Alemania, después de años de investigación, se desarrolló una nueva técnica de pavimentación, conocida como *splitmastixasphalt* o *Stone Mastic Asphalt* (SMA), la cual ofrece pavimentos en buen estado por periodos de hasta 20 años. Esta técnica se basa en la modificación de asfaltos con cal, polímero y fibras minerales; sin la necesidad de cambiar el proceso de fabricación. Otra técnica de pavimentación desarrollada años después por países europeos fue la *Porous Asphalt* (PA), la cual es apropiada en lugares de clima húmedo y altas precipitaciones. Esta técnica ofrece los mismos resultados que la tecnología SMA, utilizando los mismos materiales pero en diferentes proporciones.

Los asfaltos presentan la gran desventaja de ser altamente sensibles a la temperatura, llegando a ser muy duros y quebradizos en ambientes fríos, y blandos y fluyentes en ambientes calientes. Los copolímeros tipo SBS (estireno-butadieno-estireno) al ser adicionados junto con la cal y fibra mineral, ofrecen una mayor adhesión y afinidad a las estructuras de asfaltos constituyentes de los asfaltos.

Por todo lo anterior, este trabajo pretende conjuntar tanto conceptos químicos como civiles para entender todo lo que con los materiales asfálticos empleados en pavimentación se involucra. Una vez comprendidos dichos conceptos y estudiados los procesos de obtención de asfaltos y sus usos más comunes, se propondrá utilizar nuevas tecnologías de pavimentación en México, ya que el Gobierno Mexicano planea construir de 1995 al año 2000 más de 5,855 kilómetros de carreteras, en base a un estudio técnico-económico.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 HISTORIA DEL ASFALTO ^(1,2)

El asfalto es uno de los materiales de construcción más versátiles y antiguos del mundo, debido a sus propiedades adhesivas e impermeabilizantes. El asfalto utilizado por los antiguos era un material nativo procedente de yacimientos o lagunas asfálticas, donde el crudo asfáltico subió a la superficie y las fracciones más ligeras se evaporaron naturalmente. El residuo pesado remanente contenía usualmente proporciones diversas de agua, tierra y otras impurezas; pero, mediante métodos de destilación lentos y burdos, se obtuvieron combustibles para lámparas y productos bituminosos para mastique, impermeabilización y pavimentación.

Los yacimientos más extensos de asfalto nativo fueron encontrados hace 4 ó 5 mil años en Irak. Se sabe que existieron varios yacimientos importantes a lo largo de las orillas del Río Eúfrates y del Río Tigris.

¹ Martin J. R. 1963. Pavimentos Asfálticos. Proyecto y Construcción. España: Aguilar S. A. de Ediciones.

² Pfeiffer J. P. 1950. The Properties of Asphaltic Bitumen. Holanda: Elsevier Publishing Company, Inc.

Los egipcios obtuvieron asfalto nativo del Mar Muerto y de un yacimiento situado cerca del Río Jordán, en Líbano, para impermeabilización, momificación y construcción. De la palabra persa *mumiya* (asfalto), se derivaron las palabras momia y momificación.

El asfalto ha sido tan importante para la civilización, que mucho de cuanto se sabe acerca de la antigua Babilonia se debe a la excelente conservación de las edificaciones por el empleo de asfalto como mastique de unión entre los elementos de construcción, como combustible y también como impermeabilizante. El suelo de los palacios, de los baños y de las calles principales estaba pavimentado con una mezcla de arena y asfalto, en forma de ladrillo.

Es interesante notar, que en los ensayos de extracción y cribado de trozos de pavimento procedente de las ruinas se revela que las mezclas de pavimentación utilizadas en la Antigüedad se asemejaban mucho a las actuales mezclas de asfalto y arena.

Existen referencias bíblicas e históricas que mencionan que varios patriarcas y Noé, fueron unos de los primeros fabricantes de barcos y productores de asfalto. Una tabla asiria describe el rito sagrado de como se calafateó el Arca de Noé con asfalto.

La historia moderna de los asfaltos en América comienza con su producción en los Estados Unidos. Estos fueron destilados de crudos en una pequeña refinería que operaba en 1864 en California. Prácticamente todo el crudo fue del tipo asfáltico pesado y una simple destilación, a menudo sin vapor, producía material de buena calidad para la pavimentación. Desde entonces grandes cantidades de asfalto han sido producidas.

Después de la 1ª Guerra Mundial, los pavimentos asfálticos cobraron una mayor importancia, pues la aparición y auge de los automóviles crearon la necesidad de caminos bien pavimentados.

En México a principios de este siglo se inicia la explotación de los pozos de crudo tipo Ébano, del que se obtenían los mejores asfaltos del mundo, siendo exportada la mayor parte de su producción hasta la expropiación petrolera.

1.2 DEFINICIONES

Debido a su uso tan común a lo largo de la historia y de diferentes países, al asfalto y a los materiales relacionados con él, se le han atribuido diferentes definiciones y conceptos. Algunos de ellos varían de ramas a ramas de la ciencia, y otros según su uso coloquial, es por eso, que a continuación se citan diferentes definiciones que algunos organismos dan relacionadas con el tema:

- Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española
 - ◆ **Asfalto:** (Del latín *asphaltus*) sustancia de color negro que constituye la fracción más pesada del petróleo crudo. Se encuentra a veces en grandes depósitos naturales, como el Lago Asfaltites o Mar Muerto; por eso se llamó Betún de Judea. Se utiliza mezclado con arena o gravilla para pavimentar caminos y como revestimiento impermeable de muros y tejados.
 - ◆ **Bitumen:** nombre de varias sustancias compuestas de carbono e hidrógeno.
 - ◆ **Brea:** sustancia viscosa de color rojo oscuro que se obtiene haciendo destilar al fuego la madera de varios árboles de la familia de las coníferas. Se emplea en medicina como pectoral y antiséptico.
- American Society of Testing Materials (ASTM D1079-87a) ⁽³⁾
 - ◆ **Asfaltita:** asfalto natural localizado debajo de la corteza terrestre.
 - ◆ **Asfalteno:** fracción de hidrocarburos de alto peso molecular precipitados a partir del asfalto por un solvente nafta-parafínico específico, a un rango de temperatura y asfalto disuelto determinado.

³ Roofing, Waterproofing, and Bituminous Materials. 1989. USA. American Society of Testing Materials.

- ◆ **Asfalto:** material cementoso de café oscuro a negro, cuyos constituyentes son predominantemente bitúmenes, los cuales se pueden obtener de manera natural o como residuos durante el proceso de refinación de petróleo.
- ◆ **Asfalto de Aire Soplado:** asfalto producido por la inyección de aire a través de asfalto fundido a una temperatura elevada para alcanzar su punto más suave y modificar otras propiedades.
- ◆ **Asfalto de Vapor Soplado:** asfalto producido por la inyección de vapor a asfalto derretido con el fin de modificar sus propiedades.
- ◆ **Bitumen:** substancia cementosa de clase amorfa, de color oscuro a negro (sólida, semisólida o viscosa), natural o fabricada, compuesta principalmente por hidrocarburos de alto peso molecular, soluble en disulfuro de carbono, y localizada en asfaltos, breas, alquitranes y asfaltitas.
- ◆ **Brea Oleosa:** material sólido cementoso aromático de color oscuro o negro, obtenido durante el procesamiento de petróleo, fracciones de petróleo o residuos del mismo.
- ◆ **Material Bituminoso Líquido:** aquel que tiene un volumen definido, pero no su forma. Tiene una viscosidad de 0.1 a 1×10^5 cSt (mm^2/s) a 40°C . Esto no incluye materiales granulares y pulverizados.
- ◆ **Material Bituminoso Sólido:** aquel cuya viscosidad es de 1×10^5 cSt (mm^2/s) a 40°C , o una viscosidad equivalente a una temperatura acordada. Esto incluye materiales granulares y pulverizados.
- ◆ **Roca Asfáltica:** formación rocosa de origen natural, usualmente piedra caliza o de arena, la cual contiene en su masa una cantidad mínima de asfalto.

- Normas Para Muestreo y Pruebas de los Materiales, Equipos y Sistemas ⁽⁴⁾
 - ♦ Asfalto: es un material bituminoso, sólido o semisólido con propiedades aglutinantes y que se licúa gradualmente al calentarse.
 - ♦ Mezcla Asfáltica: fundamentalmente es el producto obtenido durante la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en un pétreo.
 - ♦ Emulsión Asfáltica: son los materiales asfálticos líquidos estables, formados por dos fases inmiscibles, en los que la fase continua de la emulsión esta formada por agua y la fase discontinua por pequeños glóbulos de asfalto.

Para fines del presente trabajo, se considerarán únicamente las definiciones del ASTM, debido a su fundamento y reconocimiento técnico.

1.3 IMPORTANCIA DEL ASFALTO

1.3.1 IMPORTANCIA DEL DESARROLLO DE VÍAS DE COMUNICACIÓN

Un país con un sistema carretero adecuado, tiene mejores posibilidades de desarrollo, ya que ésta es una vía de comunicación muy importante. Una carretera es un enlace vital entre diferentes regiones que ofrece como ventaja principal su alcance y bajo o nulo costo al transitar. Los demás sistemas de transporte no resultan tan económicos, ni tan eficientes como una carretera. Es por esto, que una carretera es indispensable para el desarrollo económico, social, tecnológico y cultural.

⁴ Normas para Muestreo y Pruebas de los Materiales, Equipos y Sistemas 1991. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

1.3.2 IMPORTANCIA DEL ASFALTO EN PAVIMENTOS

Varios factores son responsables del desempeño total de una carretera asfaltada, dentro de los principales podemos mencionar: la calidad del subrasante y de la base, el medio ambiente, la calidad de la construcción y agregados, la calidad del asfalto, la edad de la carretera y la carga vehicular.

La importancia técnica de un pavimento asfáltico radica en la transmisión de las cargas a través de los áridos (arena, grava y piedra triturada, principalmente). El asfalto funciona como agente cementante que fija a los áridos en las posiciones adecuadas para transmitir dichas cargas aplicadas a las capas inferiores donde finalmente se disipan.

1.3.3 IMPORTANCIA DEL PETRÓLEO COMO FUENTE DE ASFALTOS

Existen dos fuentes principales de obtención de asfalto: los yacimientos naturales y el petróleo.

El petróleo es el recurso no renovable más valioso porque a partir de éste obtenemos los principales recursos energéticos y una gran cantidad de materias primas.

El petróleo es una red de compuestos orgánicos e inorgánicos, muchos de los cuales, de manera aislada, nos son todavía desconocidos. Para su caracterización, recurrimos a los llamados pseudocomponentes, que son series de componentes que destilan en un cierto rango de temperatura y a una presión determinada. Son los pseudocomponentes más pesados, llamados asfaltenos, los que componen principalmente a los asfaltos.

Para nuestra fortuna, México cuenta con yacimientos de crudo tan extensos, que han sido y son soporte de la economía nacional. Debido a lo anterior, cualquier producto o subproducto del proceso de refinación de crudo es bastante accesible económicamente. En México, la mayoría de los asfaltos son obtenidos por medio del petróleo, ya que resultan uno de los

materiales de construcción más económicos, debido principalmente a su carácter de residuo de la destilación de crudo.

CAPÍTULO 2

CLASIFICACIÓN Y PROPIEDADES DE LOS ASFALTOS

2.1 TIPOS DE ASFALTOS DESDE EL PUNTO DE VISTA QUÍMICO

2.1.1 ASFALTOS NATURALES ^[5]

Los asfaltos se encuentran en casi todas las partes del mundo de una u otra manera ubicados en estratos geológicos subterráneos, como materiales bituminosos suaves, o como bitúmenes negros y duros en formaciones rocosas muchas veces acompañadas de calizas y demás minerales. Estos bitúmenes suaves parecidos al crudo, se encuentran de manera natural en lugares como en la Isla Trinidad, Venezuela y Canadá. A continuación se menciona la clasificación de los asfaltos naturales:

- Bitúmenes con impurezas inorgánicas:
 - ◆ El tipo Trinidad después de refinarse produce alrededor de un 50 a 57% de bitumen y el remanente es barro coloidal de origen volcánico y algo de materia orgánica inerte.

⁵ Barth, J. E. 1962. Asphalt: Science and Technology. USA: Gordon & Breach Science Publishers

- ◆ Los bitúmenes cubanos (Mariel y Bejucal) después de refinarse alcanzan una pureza del 80 a 90% aproximadamente.
- ◆ En Venezuela, el asfalto tipo Bermúdez posee una pureza de alrededor del 92%.
- Rocas asfálticas: impregnadas generalmente con piedras calizas y arenas alquitradas.
- Asfaltitas: también conocidas como bitúmenes naturales o sólidos, son asfaltos que no contienen impurezas (barro, sales, sedimentos, etc.). Dentro de estas encontramos:
 - ◆ Gilsonita: bitumen duro, negro y quebradizo con diferentes puntos de ablandamiento (de 120°C a 230°C). Es casi completamente soluble en disulfuro de carbono.
 - ◆ Grahamita: material duro y quebradizo de un punto de ablandamiento mayor que la Gilsonita. Es de un 50 a 100% soluble en disulfuro de carbono.
 - ◆ Brea pura (Manjak): es de un 80 a 97% soluble y posee un punto de ablandamiento de alrededor de 180°C.
 - ◆ Pirobitúmenes: estos materiales no presentan punto de ablandamiento pero intumescen con el calor. Estos se pueden ver como materiales en transición entre los bitúmenes de bajos puntos de fusión y los altamente oxigenados.
 - ◆ Wurtzilita: hidrocarburo negro duro con una solubilidad mínima del 10%.
 - ◆ Albertita: ligeramente soluble en disulfuro de carbono.
 - ◆ Elaterita: ligeramente soluble en disulfuro de carbono.
 - ◆ Impsonita: material extremadamente duro y quebradizo prácticamente insoluble en disulfuro de carbono.

La insolubilidad de ciertos materiales en disulfuro de carbono es debida a la presencia de compuestos oxigenados de alto peso molecular, como resinas quetónicas y ésteres.

2.1.2 ASFALTOS ARTIFICIALES ⁽⁵⁾

Estos se clasificaron en tres grandes grupos:

⁵ id.

- Asfaltos petroleros u oleosos: en el crudo localizamos hidrocarburos asfálticos en dispersión coloidal, los llamados asfaltenos. Estos son de suaves a duros con una alta solubilidad en disulfuro de carbono (más del 99%) y se pueden clasificar como bitúmenes puros. Se derivan de destilaciones atmosféricas y al vacío de crudo con un alto contenido de asfaltenos. Los asfaltos también pueden ser obtenidos por métodos de precipitación con propano e hidrocarburos de bajo punto de ebullición, en los procesos de deasfaltado de aceites lubricantes. Este método también produce las llamadas resinas asfálticas.
- Asfaltos craqueados: son derivados del petróleo formados en los procesos de craqueo. Los residuos líquidos alquitranados se pueden reducir a asfaltos pesados por medio de una destilación. Estos materiales pueden variar en composición, y generalmente contienen grupos parafínicos. Los asfaltos craqueados son hidrocarburos asfálticos de una aromaticidad intermedia entre los asfaltos del tipo oleosos y los completamente aromáticos, como son los encontrados en depósitos naturales.
- Alquitrán de hulla, alquitrán agua-gas y breas: su contenido de carbono libre y material insoluble en benceno los distingue de las asfaltitas y los asfaltos oleosos.

2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ASFALTOS DESDE EL PUNTO DE VISTA CIVIL

2.2.1 ASFALTOS SOPLADOS ⁽¹⁾

Inyectando aire a través del residuo durante la última parte del proceso de refinación se pueden obtener asfaltos semisólidos de propiedades específicas. En la fabricación de asfaltos sopladados u oxidados, el proceso de refinación se ve interrumpido cuando el residuo aún es líquido. Entonces se traslada el residuo a un tanque llamado convertidor y se hace pasar aire a través de éste mientras se mantiene a alta temperatura. Este proceso continúa hasta que se

¹ Martin, J. R. 1963 Pavimentos Asfálticos. Proyecto y Construcción España. Aguilar S. A. de Ediciones.

hayan alcanzado las propiedades deseadas. Los asfaltos oxidados son los más rígidos que los empleados en pavimentación y tienen la propiedad de mantener una consistencia adecuada a las temperaturas que deben soportar cuando se exponen a los agentes atmosféricos.

Estos asfaltos no se utilizan normalmente en las mezclas de pavimentación, pero sus propiedades especiales los hacen valiosos para otros procesos industriales. Se emplean como impermeabilizantes, cajas de baterías y revestimientos interiores para automóviles. Se usan mucho como materiales para relleno de juntas en pavimentos de concreto y para sellado inferior de viejos pavimentos bajo los cuales se han producido cavidades.

La adición de un catalizador durante el proceso de oxidación produce un material que conserva su plasticidad a temperaturas muy inferiores a aquellas a las que un asfalto ordinario se fragiliza. El asfalto oxidado catalítico tiene determinadas propiedades de elasticidad que lo hacen en cierto modo asemejarse a la goma y por esto se usa en el revestimiento de canales.

2.2.2 CUTBACKS ⁽⁶⁾

Son materiales asfálticos con diferentes velocidades de curado o fraguado. Se clasifican como:

- Cutbacks de Fraguado Rápido (RC, FR): se llaman así porque se fabrican por la mezcla del asfalto con cierta cantidad de disolvente o material de corte, que se evapora rápidamente después de usarlo, dejando sólo el asfalto. El disolvente utilizado es un material de bajo punto de ebullición, como nafta o gasolina. La cantidad de disolvente que debe emplearse con el asfalto depende del tipo de *cutback* de curado rápido que se desee fabricar. La viscosidad del *cutback* depende también del porcentaje de disolvente empleado en la mezcla; de este modo resulta que un *cutback* FR-0 será de una viscosidad menor que uno FR-5.

⁶ Katz, D. y Beu, K. 1945. Nature of Asphaltic Substances Industrial and Engineering Chemistry 37, 195-200.

- Cutbacks de Fraguado Medio (MC, FM): se fabrican mezclando el asfalto con un disolvente de punto de ebullición intermedio, frecuentemente se utiliza el queroseno, ya que no se evapora tan rápidamente.
- Cutbacks de Fraguado Lento (SC, FL): pueden fabricarse por medio de dos procesos. Primero, mezclando asfalto con gasóleo de alto punto de ebullición; y segundo, controlado el flujo y la temperatura del crudo durante la primera destilación. Generalmente este tipo de materiales son extraídos de los fondos de la torre de destilación, y es posible que no lleguen a fraguar.

2.2.3 EMULSIONES ASFÁLTICAS ⁽¹⁾

Son combinaciones de agua, asfalto y un agente emulsificante. El asfalto es un material insoluble en agua, de manera que las fases siempre están separadas. En una emulsión bien hecha, el diámetro de un glóbulo esférico de asfalto alcanza un tamaño de diez micras, en una emulsión asfáltica no diluida las partículas se tocan entre sí. Para evitar que los glóbulos de asfalto se unan, se adiciona un agente emulsificante que se haya disuelto en el agua, el cual forma una película alrededor del glóbulo. Además del agente emulsificante, muchas veces se recomienda el uso de un agente estabilizante de naturaleza resnosa y proteica que haga aún más difícil la unión.

Dependiendo del agente emulsificante, las emulsiones asfálticas pueden ser aniónicas, si los glóbulos asfálticos tienen carga electronegativa; o catiónicas, si los glóbulos tienen carga electropositiva. Las emulsiones asfálticas pueden ser de rompimiento rápido, lento o medio.

¹ Martín, J. R. 1963 Pavimentos Asfálticos. Proyecto y Construcción. España: Aguilar S. A. de Ediciones.

2.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS ASFALTOS

Las propiedades de los materiales asfálticos empleados en pavimentación se han clasificado de acuerdo con su concepción dentro de la ingeniería civil:

2.3.1 CONSISTENCIA ⁽¹⁾

La consistencia de los materiales asfálticos varía desde la de un líquido muy fluido, solo ligeramente más viscoso que el agua (*cutback* grado 0), a la de un cuerpo semisólido, rígido (asfaltos oxidados). La principal razón por la cual es importante conocer la consistencia de un material asfáltico es con el fin de determinar su poder cementante (denominado comúnmente poder ligante) a la temperatura normal de la carretera. Es un hecho conocido que cuanto más rígido es el asfalto, más fuerte une las piedras (áridos) en una mezcla asfáltica. Actualmente no existe ningún instrumento que mida satisfactoriamente esta consistencia, pero a continuación se citan tres métodos diferentes para su medición:

- **Viscosidad Saybolt-Furoi:** Se emplea para medir materiales asfálticos líquidos. Es el tiempo (segundos) que necesitan 60cm³ de material para fluir a través de un orificio de tamaño dado y a una temperatura específica. Es conveniente variar las temperaturas de medición con el fin de obtener datos más confiables. Cabe recordar, que la viscosidad de un asfalto es una función decreciente de la temperatura.
- **Penetración:** Esta prueba generalmente se lleva a cabo a 25°C, que se toma como una aproximación a la temperatura ambiente. Se realiza permitiendo que una aguja de dimensiones específicas cargada con 100g penetre en el material durante un período de 5seg. La penetración y la consistencia son inversamente proporcionales; es decir, cuanto mayor es la penetración, más blando es el asfalto. Para otras referencias, también se puede realizar la prueba a 0°C, con una carga de 200g durante 60sog; ó a 45°C, con una carga de 50g durante 5seg.

¹ id

- Ensayo del flotador: Se emplea para *cutbacks* tipo FL. Para realizar el ensayo del flotador se coloca el asfalto en un pequeño molde abierto por ambos extremos. A continuación se enfría y se une al fondo de un platillo de aluminio sumergido en agua a 50°C. El tiempo (segundos) necesario para que el agua se abra paso a través del tapón de asfalto, se da como resultado. De este modo, cuanto mayor es el número, más rígido es un asfalto.

La consistencia de un asfalto de pavimentación se ve afectada mucho más por los cambios de temperatura que la de un asfalto oxidado. Esta propiedad la conocemos como susceptibilidad térmica. La susceptibilidad térmica de asfaltos procedentes de diferentes crudos varía en cierta proporción, pero ésta es escasa entre los asfaltos para pavimentación y los oxidados.

El ensayo de punto de reblandecimiento de anillo y bola se emplea generalmente en asfaltos oxidados, ya que es importante que el punto de reblandecimiento de estos materiales sea muy superior a la temperatura que puedan alcanzar expuestos al sol, la cual puede llegar a ser hasta de 65°C. Esto se debe a que dichos materiales se emplean con frecuencia como impermeabilizantes de techos.

2.3.2 DURABILIDAD O RESISTENCIA AL ENVEJECIMIENTO ⁽¹⁾

Para que el asfalto funcione satisfactoriamente como ligante en un pavimento debe de permanecer elástico. Si un asfalto pierde su plasticidad tiende a resquebrajarse y por consecuencia a desprenderse. Este fenómeno se conoce como envejecimiento atmosférico.

El envejecimiento atmosférico de los asfaltos de pavimentación se produce principalmente por oxidación y volatilización. Otros factores que suelen contribuir a su deterioro son las ondas cortas de los rayos de luz (rayos ultravioleta), el envejecimiento propiamente dicho, y, posiblemente, la acción del lavado del agua. Los tipos de agrietamiento que comúnmente son encontrados en las carreteras mexicanas se presentan en la Figura 2.1

¹ Id.

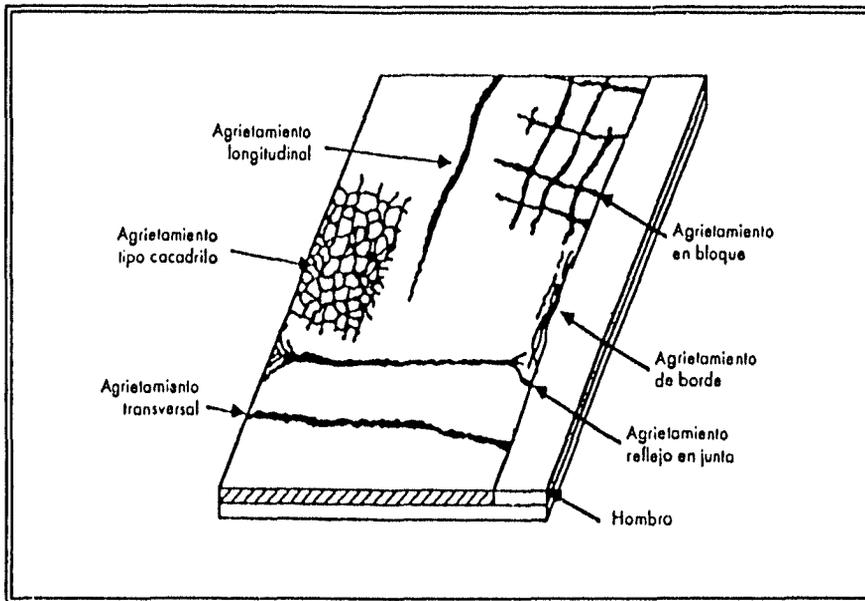


Figura 2.1

Representación Gráfica de los Tipos de Agrietamiento Más Comunes ⁽⁷⁾

Para evitar un fenómeno tan devastador en un pavimento asfáltico, como es el envejecimiento, a continuación se citan algunas de las maneras para evitarlo:

- **Oxidación y volatilización:** La oxidación es el ataque químico al asfalto por el oxígeno del aire. La volatilización es la evaporación de los hidrocarburos más ligeros del asfalto. El efecto de ambos fenómenos produce un endurecimiento progresivo y permanente del asfalto que puede medirse por un ensayo de penetración. Por consiguiente, es más ventajoso emplear un tipo de asfalto más blando, es decir de mayor penetración.

⁷ Fernández Loaiza, C. 1995 Normas Para el Control de Pavimentos (Diseño de Mezclas). Ingeniería Civil. 310, 31-35

- **Efecto de la temperatura:** La elevación de la temperatura del asfalto acelera la oxidación y la volatilización. Empíricamente se ha encontrado que las velocidades de oxidación y volatilización se duplican por cada 10°C de aumento de la temperatura.
- **Efecto de la superficie:** El endurecimiento debido a la oxidación y volatilización es función de la superficie del asfalto expuesta a los agentes atmosféricos. Teóricamente, tanto la absorción de oxígeno como las pérdidas por evaporación, expresadas en cm^3/min , son directamente proporcionales al área de la superficie expuesta a los agentes atmosféricos, e inversamente proporcional al volumen.

Para que la estabilidad sea apropiada, un pavimento asfáltico debe tener un volumen de huecos o espacios de aire mínimo.

- **Acción de la luz:** Se sabe que la luz tiene un efecto destructivo sobre el asfalto. Esta acción sobre el pavimento destruye las moléculas descomponiéndolas en agua y productos solubles en ésta. La ruptura de las moléculas por tal proceso se llama foto-oxidación. Afortunadamente, los rayos sólo destruyen a las capas más superficiales sin afectar a los áridos.
- **Endurecimiento:** Cuando un asfalto se calienta y se deja enfriar después a la temperatura atmosférica, continúa endureciéndose indefinidamente. Esto se debe a una reordenación de las moléculas de asfalto, formando una estructura tipo gel. El efecto de endurecimiento cobra importancia generalmente en pavimentos asfálticos de capas delgadas. Por otra parte, la vegetación extrae agua rápidamente del suelo subyacente, produciendo una contracción de éste, lo que origina grietas en el pavimento.
- **Asfaltos craqueados:** Se ha demostrado que los asfaltos que han sufrido craqueo en el proceso de refinación envejecen bajo los efectos de los agentes atmosféricos mucho más rápidamente que los que no experimentaron este efecto. El asfalto que

no ha experimentado craqueo tiene una superficie más brillante, mientras que uno que lo experimentó presenta una superficie color mate.

2.3.3 VELOCIDAD DE CURADO ⁽¹⁾

Ésta se define como el aumento de consistencia de un asfalto debido a la pérdida progresiva de disolventes en evaporación. Los factores que afectan el tiempo de curado son:

- I. Velocidad de evaporación del disolvente.
- II. Cantidad de disolvente contenido en el *cutback*.
- III. Penetración del asfalto base.

Es claro que cuanto menos disolvente posea un *cutback*, menos tiempo se necesita para curarlo. El tiempo decrece cuando aumenta la penetración o disminuye la dureza del asfalto. Los factores externos más importantes que afectan el tiempo de curado son:

- I. Temperatura.
- II. Superficie (relación superficie-volumen).
- III. Velocidad del viento.

2.3.4 RESISTENCIA A LA ACCIÓN DEL AGUA ⁽¹⁾

La durabilidad de un pavimento asfáltico depende en gran medida de la capacidad del asfalto para adherirse a los áridos en presencia de agua. Cuando un concreto asfáltico es mezclado y colocado en caliente no se recomienda la adición de ningún aditivo, ya que los áridos se mezclan perfectamente antes de la mezcla. Sin embargo, cuando el concreto asfáltico se coloca en frío, la adherencia entre éste y los áridos se puede ver afectada. Generalmente en estos casos, se recomienda es un aditivo que mejore esa adhesión.

⁽¹⁾ Martín, J. R. 1963. Pavimentos Asfálticos: Proyecto y Construcción. España: Aguilar S. A. de Ediciones.

2.3.5 DUCTILIDAD ⁽¹⁾

Se llama ductilidad a la distancia expresada en centímetros que un trozo de asfalto de dimensiones determinadas puede estirarse sin romperse. La sección transversal mínima de la pieza de asfalto es de 1cm². El ensayo normal de ductilidad del asfalto se hace a una temperatura de 25°C y la velocidad de separación de los dos extremos de la pieza es de 5cm/min.

2.3.6 PUNTO DE INFLAMACIÓN ⁽¹⁾

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. 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. Para esta determinación se utiliza ya sea la copa abierta de Tagliabue, para productos de bajo punto de inflamación; o la copa abierta de Cleveland, para productos con punto de inflamación más alto.

2.3.7 SOLUBILIDAD ⁽¹⁾

Es conveniente que sea despreciable el contenido de sal, polvo, carbón o minerales en el asfalto. Estos materiales son insolubles en disulfuro de carbono (CS₂). Frecuentemente, se emplea tetracloruro de carbono (CCl₄) en lugar del disulfuro de carbono, ya que el tetracloruro de carbono no es inflamable.

2.3.8 PÉRDIDA POR CALENTAMIENTO ⁽¹⁾

Este ensayo sirve para determinar si el asfalto está mezclado con materiales más ligeros. Muchos consideran la pérdida por calentamiento como un buen índice de la calidad del asfalto

¹ id.

desde el punto de vista del envejecimiento atmosférico. En el Apéndice A se muestra la clasificación de estas pruebas para materiales asfálticos de construcción.

2.4 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LOS ASFALTOS

Los asfaltos en el crudo se presentan como partículas dispersas coloidales o discretas, o simplemente en solución, dependiendo de la naturaleza del crudo. En la Figura 2.2, podemos observar que los puntos oscuros son los asfaltenos o micelas asfálticas, mientras que los puntos blancos son los aceites o medio oleoso. En la región A (petróleo crudo), las partículas de asfaltenos son relativamente pocas y altamente dispersas. Conforme la destilación del crudo continúa, el contenido de aceite disminuye, y el tamaño de partícula de los asfaltenos aumenta hasta el sistema disperso de partículas -representado por las zonas B, C, D, y E. Esta área (zona E) es donde la concentración de partículas es semejante a la de un pavimento asfáltico. A lo largo de la destilación, el número y tamaño de las partículas aumenta, y la separación entre ellas se hace cada vez menor, resultando una masa bituminosa (zona F), la cual es la que conocemos como asfalto duro.

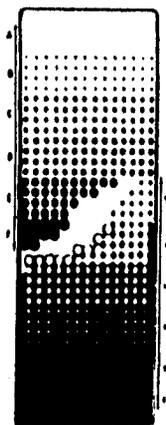


Fig. 2.2

Esquema de los Componentes del Residuo de la Destilación del Crudo ⁽⁵⁾

⁵ Barth, J. E. 1962. Asphalt Science and Technology. USA. Gordon & Breach Science Publishers.

Para poder entender mejor las propiedades químicas de los asfaltos, éstas se desglosaron de acuerdo a sus tres principales componentes: los asfaltenos, las resinas asfálticas y los aceites aromáticos. Cabe mencionar, que los llamados maltenos o petrolenos no son más que la mezcla de las resinas asfálticas y los aceites aromáticos.

2.4.1 ASFALTENOS ⁽⁸⁾

Como se señaló en un principio, un asfalteno es una fracción de hidrocarburos de alto peso molecular precipitado a partir de un asfalto por un solvente nafta-parafínico específico a un rango de temperatura y cantidad de asfalto determinados.

Los asfaltenos son producto de una oxidación progresiva de hidrocarburos policíclicos aromáticos como el ovaleno o el circocaronano. La Figura 2.3 esquematiza la reacción de los hidrocarburos policíclicos aromáticos que originan a los asfaltenos.

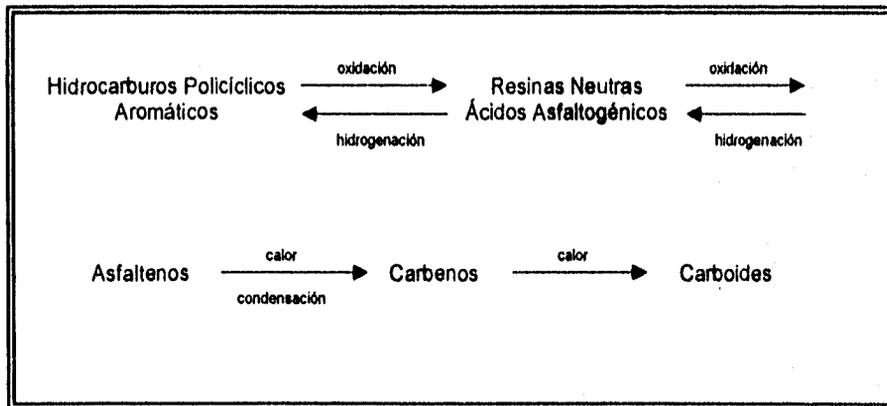


Figura 2.3

Esquema de Reacción de los Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos ⁽⁸⁾

⁸ Rodríguez Gómez, J. L. et al. 1985. Asfaltenos. Tesis de licenciatura inédita. Instituto Politécnico Nacional.

Generalmente, los asfaltenos se nombran de acuerdo al solvente empleado en su precipitación. Actualmente, el solvente más utilizado es el n-heptano.

La composición de los asfaltenos^(1,4,9) depende entre otras cosas de la mezcla orgánica de la cual son producto, de la relación entre los compuestos polares y los compuestos no polares, y las moléculas de alto y bajo peso molecular, así como del solvente empleado para precipitar.

Los asfaltenos están constituidos por cinco partes principales: la fracción ácida, la fracción básica, compuestos neutros de nitrógeno, hidrocarburos saturados e hidrocarburos aromáticos.

Nellensteyn (1930) trabajó durante muchos años con un microscopio electrónico tratando de poder definir la composición química de los asfaltenos. Demostró que los asfaltenos contenían hollín y grafito, y que las resinas asfálticas eran coloides que recubrían de modo protector a las partículas de asfaltenos. Basado en que una molécula con un diámetro de 65 Angstroms correspondía a un peso molecular de 90,000 y a una densidad de 1g/ml, asumió que una partícula de asfalteno con un peso molecular mínimo de 1,000 tendría por los menos 90 moléculas. De ahí que, un asfalteno es un grupo de moléculas cargadas negativamente.

En 1940, Pfeiffer y Saal establecieron que los asfaltenos consistían probablemente en hidrocarburos de alto peso molecular de carácter predominantemente aromático.

Más adelante, en 1950 se concluyó que estructuras alquil-alifáticas y aromáticas eran predominantes en los asfaltenos, mostrando también la ausencia de compuestos nafténicos.

En los años sesentas, Dickie y Yen infirieron que la covalencia de la molécula de asfaltenos se debía a secuencias alternadas de grupos n-alcilo y discos aromáticos condensados.

¹ Martin, J. R. 1963. Pavimentos Asfálticos: Proyecto y Construcción España. Aguilar S. A. de Ediciones.

⁴ Normas para Muestreo y Pruebas de los Materiales, Equipos y Sistemas. 1991. México. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

⁹ Strauz, O. et al. 1992. The Molecular Structure of Asphaltene: An Unfolding Story. Fuel. 71, 1355-1363.

Strauz en los años setentas, realizó estudios del crudo canadiense tipo Athabasca, y dentro de los grupos que logró aislar encontramos: naftalenos, fenantrenos, crisenos y picenos. También, notó la presencia de materia orgánica en los asfaltos, debida a la naturaleza del pozo de extracción. Esta materia orgánica contenía grandes cantidades de sulfuros, ácidos carboxílicos, etc.

Años más tarde, Strauz introdujo una técnica de oxidación catalizada por rutenio para poder aislar los componentes de los asfaltos. Esta técnica llamada RICO (*Ruthenium Ion-Catalysed Oxidation*), es capaz de oxidar selectivamente carbonos aromáticos y removerlos como CO₂, mientras deja los carbonos saturados sin afectar. RICO permite determinar cuantitativamente las cadenas alquilo y los puentes entre los carbonos aromáticos, así como su tamaño de distribución en función de la longitud y número de átomos de carbono.

Después de mucho trabajo, Strauz concluyó que los componentes del asfalto contenido en un crudo de tipo Athabasca son:

- Un 2,5 alquiltolano y su óxido.
- Un 2,6 alquiltiano.
- 2,5 n-alquiltiofenos.
- 2,4 n-alquibencentiofenos.
- 1,9 n-alquidibencentiofenos.
- Un 4,9 n-alquilfluoreno.
- o-di-n-alquibencenos.
- Un éster ácido n-alcanoico.
- Un sistema de anillos nafténicos pentacíclicos.
- Una n-alquilpiridina.
- Una n-alquilquinolina.
- Un naftaleno o-di-n-alquílico.
- Un decalino.
- Octahidrofenantrenos, etc.
- Productos de condensación de algunas de las unidades estructurales mencionadas anteriormente.
- Una deoxifloeritroetioporfirina condensada.

Este modelo hipotético posee una fórmula elemental de $C_{420}H_{496}N_6S_{14}O_4V$, un radio atómico H/C de 1.18 y un peso molecular de 6,191 daltons. El porcentaje en peso es, por lo tanto, de carbono: 81%, hidrógeno: 8%, azufre: 7.3%, nitrógeno: 14%, oxígeno: 1.0%; y, vanadio: 0.8%. En la Figura 2.4 se muestra gráficamente la estructura del asfalteno que constituye el crudo tipo Athabasca. Las letras A, B y C de dicha Figura representan grupos aromáticos extensos

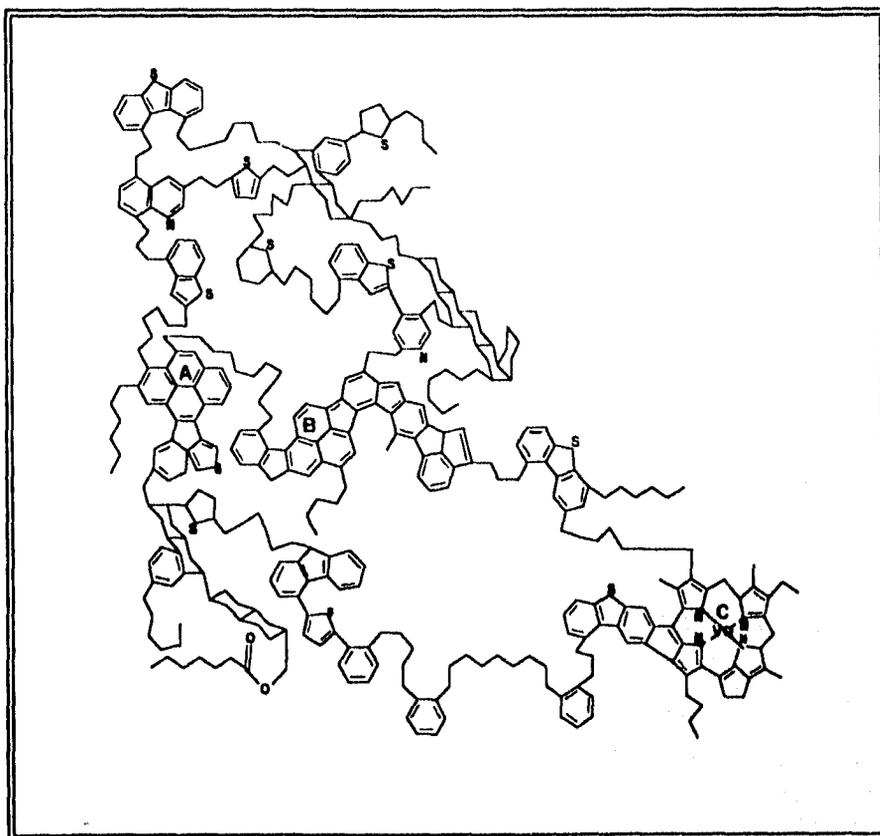


Fig. 2.4

Molécula de Asfalteno del Crudo Tipo Athabasca ¹⁹⁾

¹⁹⁾ Strauz, O. et al. 1992. The Molecular Structure of Asphaltene. An Unfolding Story. *Fuel* 71, 1355-1363.

Dentro de las propiedades físicas de los asfaltenos encontramos que cuando se incrementa la temperatura, estos se reblandecen hasta pasar a la forma líquida y su viscosidad se disminuye, si la temperatura continúa aumentando, el producto puede llegar a descomponerse. Los asfaltenos aumentan su viscosidad a temperatura ambiente debido a que a estas condiciones se ve favorecida la reacción de oxidación. El valor de su polaridad es una función inversamente proporcional a su peso molecular. Aunque la mayoría tienen una forma y tamaño irregular, el rango es de su tamaño de partícula es de 10 a 5,000 Angstroms.

La formación de la mesofase es una de las propiedades físicas más importantes de los asfaltenos. Entendemos por mesofase a la fracción de asfaltenos que después de ser calentados sin que lleguen a gasificarse, se solubiliza en el solvente empleado durante la precipitación. Esta formación puede ser originada por un craqueo, o bien por la liberación de moléculas retenidas en el asfalto.

Algunos de los aspectos químicos más importantes de los asfaltenos⁽⁸⁾ son:

- Oxidación y reducción. Los asfaltenos son el producto de la oxidación progresiva de algunos hidrocarburos. Esta oxidación no termina en los asfaltenos, sino que puede continuar hasta los carbonos y carboides. La reducción de los asfaltenos se puede lograr hasta la obtención de aceites aromáticos.
- Combustión. Al combinarse con el oxígeno pueden formar CO₂ y H₂O, y desprender una gran cantidad de calor.
- Solubilidad. Los asfaltenos son solubles en líquidos cuya tensión superficial es mayor a 24 dinas, tales como la piridina, disulfuro de carbono y tetracloruro de carbono. Son insolubles en gases como metano, etano, propano, etc. Se ha notado también que la materia insoluble en CCl₄ aumenta si los asfaltenos se han expuesto a los rayos solares.
- Reactividad. Los asfaltenos libres de resinas absorbidas se pueden sulfonar fácilmente. Estos se pueden nitrar fácilmente, formando productos indefinidos de la

⁸ Rodríguez Gómez, J. L. et al. Asfaltenos. Tesis inédita para licenciatura. Instituto Politécnico Nacional.

misma naturaleza que el fenilnitrometano. Se pueden oxidar con permanganato para formar ácidos, así como formar complejos con compuestos inorgánicos como el cloruro férrico y bromuro de mercurio. Los asfaltenos no reaccionan con compuestos diazo, y prácticamente no saponifican. También se pueden convertir en resinas mediante una hidrogenación.

2.4.2 RESINAS ASFÁLTICAS ^(5,10)

Las fracciones resinosas son excelentes materiales adhesivos y son los agentes dispersantes o peptizantes de los asfaltenos. Las resinas son usualmente de color café claro a oscuro y pueden fluir cuando se les calienta. Cuando se enfrían, muestran comúnmente una pronunciada fragilidad y son muy sensibles a los cambios de temperatura.

Estos grupos presentan pesos moleculares que dependen de la fracción que se trate. Una cromatografía muestra que su peso molecular oscila entre 800 y 2,000 siendo éste menor al de un asfaleno. Una fórmula condensada hipotética de éstas es $C_{47.7} H_{66.6} O_{0.6} S_{1.19}$.

Son solubles en los líquidos que precipitan a los asfaltenos y se pueden separar del residuo de las mezclas de maltenos por cromatografía. Coprecipitan con los asfaltenos en los procesos de deasfaltado con propano, ya que son fuertemente adsorbidas por los mismos. Las resinas pueden ser obtenidas de los asfaltenos por extracciones exhaustivas con n-pentano. Generalmente, son separadas del residuo de destilación por desorción con cloroformo, después de haberse llevado a cabo una cromatografía a través de una columna de sílica gel y metilciclohexano como solvente.

Las resinas contienen compuestos aromáticos sustituidos con grandes grupos alquilo y un gran número de cadenas laterales unidas a los anillos. La combinación de sus características saturadas y aromáticas, estabiliza la naturaleza coloidal de los asfaltenos en el medio oleoso.

⁵ Barth, J. E. 1962. Asphalt Science and Technology. USA: Gordon & Breach Science Publishers.

¹⁰ Mark, B. et al. 1990. Encyclopedia of Polymer Science and Engineering. USA: John Wiley & Sons

Las resinas asfálticas pueden deshidrogenarse para formar aceites lubricantes, usando catalizadores específicos.

2.4.3 ACEITES ^(5,10)

Son semejantes a los aceites lubricantes pesados. Son la fracción del asfalto de menor peso molecular (de 450 a 600), y sirven como medio de dispersión para los asfaltenos peptizados. Son solubles en éter de petróleo, propano y la mayoría de los solventes orgánicos; y pueden ser separados en saturados, aromáticos y otros tipos de hidrocarburos por medio de una cromatografía de columna, empleando solventes de polaridad variable.

Estructuralmente, consisten en su mayoría de núcleos aromático-nafténicos con una cantidad mayor de cadenas laterales que las resinas asfálticas. Predominan los alquilnaftenos; y las cadenas rectas de alcanos, raramente son presentes. El contenido nafténico presente es de un 15 a un 50%.

⁵ id.

¹⁰ id.

MÉTODOS DE FABRICACIÓN Y USOS DE ASFALTOS

3.1 MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE ASFALTOS

Algunos de los materiales asfálticos, como se había mencionado anteriormente, se obtienen como una fracción de petróleo. La cantidad de asfalto que se puede obtener de un crudo es muy variable y depende directamente de su densidad API, cuanto más baja es la densidad API, mayor es su contenido de asfalto. En la Figura 3.1, se muestra la gráfica densidad API contra porcentaje de asfalto de penetración 100. Ésta puede servir como aproximación para determinar el porcentaje de asfalto de tipo 100 para una densidad API de crudo determinada. La ecuación resultante de la regresión de los datos es:

$$\% \text{ DE ASFALTOS DE PENETRACIÓN 100} = 95.180621 - 2.494601 * \text{DENSIDAD API}$$

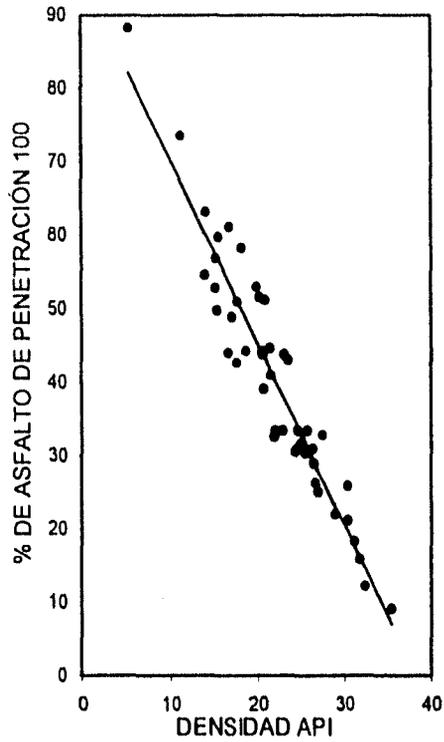


Figura 3.1

Gráfica de Densidad API del Crudo vs. % de Asfalto de Penetración 100 (1)

En la obtención de asfalto se utilizan principalmente dos métodos, los cuales son los siguientes:

¹ Martin, J. R. 1963. Pavimentos Asfálticos: Proyecto y Construcción España: Aguilar, S. A. de Ediciones.

3.1.1 PROCESO DE DESTILACIÓN ⁽¹⁾

La refinación es una operación continua que se realiza primero bombeando el crudo a través de un horno tubular, donde se eleva la temperatura, para después introducirse en una torre de destilación para realizar el primer corte o separación. La torre de destilación es un cilindro vertical que contiene una serie de platos superpuestos. Cuando se inyecta el crudo caliente cerca del centro de la torre, los vapores o fracciones más ligeras se reúnen en los platos superiores y se llevan a un condensador. En los niveles inferiores de la torre de destilación se sitúan los cortes más pesados del crudo, hasta que sólo queda en el fondo de la torre el residuo más pesado que contiene asfalto.

Si se continúa la destilación al vapor y vacío del residuo pesado, se obtienen cortes más pesados de *cutbacks* tipo FR-0, o bien cualquier tipo de asfalto deseado.

Si se aumenta la temperatura del crudo en el horno tubular y el vacío aplicado a la torre, se obtiene un producto final que es un asfalto de baja penetración; inversamente, la disminución de la temperatura del crudo y del vacío aplicado producen un material de penetración más alta; es decir, más blando.

3.1.2 MÉTODO DE EXTRACCIÓN POR SOLVENTES ⁽¹⁾

El método de extracción por solventes en la refinación de asfalto está íntimamente ligado con la fabricación de aceites lubricantes de alta viscosidad que requieren de un cuidadoso control de la temperatura del crudo. Para extraer el asfalto de las fracciones de aceites lubricantes se emplea propano. Usualmente el producto final en este proceso es un asfalto de penetración bastante baja. Para transformar este asfalto de penetración relativamente baja en cualquiera de los otros tipos más blandos es necesario mezclarlo con una pequeña cantidad de material residual blando.

¹ id.

También resulta práctico mezclar ciertos porcentajes de asfalto al residuo de vacío de alta y baja penetración para obtener un material de penetración intermedia.

Los anteriores son los métodos de fabricación de asfaltos que se utilizarán más adelante para hacer la mezcla asfáltica para pavimentación. No es objeto de esta tesis, ahondar en métodos de fabricación de asfaltos que no se utilicen con este fin.

3.2 TECNOLOGÍAS, LICENCIADORES Y PRODUCTORES

Prácticamente no ha habido ninguna evolución en los procesos de fabricación de asfaltos, ya que éstos como se mencionó, se pueden encontrar de manera natural o se pueden obtener como residuos de la destilación del crudo. En México, los asfaltos son abundantes y poseen, en comparación con la producción diaria, una pequeña demanda.

Como es de todos nosotros conocido, los procesos de extracción y refinación de petróleo, se realizan y controlan a través de Petróleos Mexicanos (PEMEX), compañía propiedad del Gobierno Mexicano. Es por esto, que PEMEX se encarga de producir los asfaltos para pavimentos en México que cumplan con las especificaciones requeridas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

3.3 PAVIMENTOS ASFÁLTICOS ⁽¹¹⁾

El uso de los asfaltos con el cual nos encontramos más familiarizados son los pavimentos asfálticos. Estos constituyen un medio de comunicación importante. Además de utilizarse para pavimentar caminos, se emplean para pistas de aterrizaje y suelos industriales, con sus propias especificaciones para cada caso.

¹¹ Guide for Design of Pavement Structures 1986. USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Un pavimento es una capa o conjunto de capas comprendidas entre el subrasante y la superficie de rodamiento y cuya función principal es soportar las cargas rodantes y transmitir las a las terracerías o terraplenes, distribuyéndolas en tal forma que no produzcan deformaciones perjudiciales en ellas.

Los pavimentos se pueden dividir en dos clases generales según sus materiales de construcción: los pavimentos flexibles y los rígidos. Los materiales que componen un pavimento asfáltico incluyen a aquellos utilizados en la fabricación del lecho de la vía, sub-base y aglutinante, ya sea el cemento Portland o el concreto asfáltico.

3.3.1 PAVIMENTOS FLEXIBLES ⁽¹²⁾

Un pavimento flexible se basa en el principio de disipación de las cargas mediante la transmisión de éstas al terreno a través de capas sucesivas de material. En México, las capas con las que cuenta un pavimento flexible son:

- **Terreno natural:** este es el propio del sitio de construcción. Debe estar compactado al 95% en sus últimos 40cm.
- **Subrasante:** es de tipo granular, y se hace con el material del corte del terreno. Se forma con agregados libres de materia orgánica. Su espesor promedio es de 50cm.
- **Sub-base:** consiste en una capa compactada de material granular. Su calidad debe ser mejor que la del subrasante. Prevé la intrusión del subrasante a las capas de la base, minimiza los efectos adversos de la acción de una helada y la acumulación de agua en o debajo del pavimento. De ser el caso, su espesor es de 15 a 60cm y su compactación es del 95%.
- **Base hidráulica:** su función es soportar las cargas rodantes y transmitir las a las terracerías, distribuyéndolas en tal forma que no se produzcan deformaciones

¹² Especificaciones Generales de Construcción. 1974. México: Secretaría de Obras Públicas

perjudiciales en éstas. Consiste generalmente en una mezcla grava-tepetate, el cual es un limo arenoso-arcilloso. La proporción de grava y tepetate se establece experimentalmente, pero comúnmente, es 70% grava y 30% tepetate. El tamaño máximo del material pétreo es de 1.5 pulgadas. Su espesor promedio es de 30cm.

- **Riego de impregnación:** éste se lleva a cabo con asfalto de fraguado medio del número uno (FM-1). Su función es evitar que la base hidráulica pierda su humedad óptima, ya que de caso contrario, el material se disgregará perdiendo así su compactación. La penetración del riego deberá de ser de por lo menos 4mm, y éste se deberá de llevar a cabo de preferencia sobre una base hidráulica seca y a las horas más calurosas del día. La relación de riego de impregnación es de 1.5 l/m^2 y la temperatura a la cual se debe realizar el riego es de 30 a 60°C.
- **Riego de liga:** se lleva a cabo con asfalto de fraguado rápido del número tres (FR-3) a una temperatura de 60 a 80°C. Este riego deberá darse antes de iniciar el tendido de la carpeta asfáltica y/o base negra, dejando transcurrir entre ambas operaciones el tiempo necesario para que el material asfáltico regado adquiera la viscosidad adecuada. La relación de riego de liga es de 1.5 l/m^2 .
- **Base negra o asfáltica:** está constituida por agregados pétreos gruesos, es decir, con una granulometría de 1.5 pulgadas a finos y cemento asfáltico No.6. Su espesor promedio es de 10cm. La proporción entre cemento asfáltico No.6 y agregado es de 11% y 89% del volumen total de la mezcla, respectivamente.
- **Carpeta asfáltica:** es la capa superior. Consiste en una mezcla de agregados pétreos y cemento asfáltico No.6. Su función principal es la de resistir las fuerzas abrasivas del tráfico, proveer una superficie antiderrapante y antirreflejante, y brindar una superficie suave, uniforme y fácil de transitar. El agregado pétreo debe ser de un tamaño máximo de 3/4 de pulgada a finos. Su espesor promedio es de 7cm. El cemento asfáltico No.6 equivale al 11% del volumen total de la mezcla.

- **Riego de sello:** es la aplicación de un material asfáltico, que se cubre con una capa de material pétreo. Protege la carpeta del desgaste y proporciona una superficie antiderrapante. El material pétreo debe pasar un 95% como mínimo la malla de 9.5mm. La proporción de cemento asfáltico No.6 es de 0.7 a 1.0 l/m² y de material pétreo de 8 a 10 l/m².

Es importante señalar, que según la capacidad del terreno se fijan los espesores de cada capa y que lo deseable es que los materiales de construcción posean la menor cantidad de materiales plásticos (arcillas), ya que éstos dan un carácter lubricante a la mezcla que puede producir levantamientos de las capas internas.

Existen diferentes métodos de cálculo de éstas capas; en México, las carreteras se construyen en base a la técnica de cálculo del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Este método calcula la sub-base, base hidráulica, base negra y carpeta asfáltica, e incluye también los riegos de impregnación, de liga y de sello.

Las especificaciones con las cuales deben cumplir los materiales asfálticos empleados en la construcción de pavimentos se muestran en el Apéndice A.

3.3.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS ⁽¹⁾

Aunque las propiedades de algunos de sus materiales cambian con respecto a las de los pavimentos flexibles, su principal diferencia es el uso de cemento Portland. En México, éste tipo de pavimentos son poco utilizados, entre otras cosas por la alta disponibilidad de asfaltos en el país. Sus desventajas se mencionarán más adelante. Los tipos de pavimentos asfálticos

⁽¹⁾ suelen clasificarse como sigue:

a) Mezclas en Planta. Incluye aquellos pavimentos asfálticos en que los áridos (piedra partida, grava y arena) se envuelven en asfalto por medio de un proceso de mezclado mecánico, ya

¹¹ Guide for Design of Pavement Structures 1986. USA: American Association of State Highway and Transportation Officials

¹ Martín, J. R. 1963 Pavimentos Asfálticos. Proyecto y Construcción. España: Aguilar S. A. de Ediciones.

sea con una planta fija, móvil o con una motoniveladora. Se emplea principalmente para tráfico pesado. Estas mezclas se subdividen en:

- Concreto asfáltico en caliente: es uno de los pavimentos asfálticos de mayor calidad y se compone de áridos graduados unidos formando una masa sólida. El asfalto y los áridos se calientan aproximadamente a 150°C y se van dosificando, mezclando y colocando mientras está aún caliente. Éste se utiliza principalmente en autopistas y vías aéreas.
- Concreto asfáltico mezclado en frío: es colocado en frío y se usa generalmente en reparaciones y obras de bajo volumen. Es una combinación de áridos y materiales asfálticos líquidos (*cutbacks*) que se mezclan a temperatura ambiente. Se instala de diferentes formas, las cuales pueden ser fija, móvil y mezcla sobre el camino.

b) Sistemas por Penetración o Estratificados. Son todos los pavimentos que se forman colocando en capas alternadas diferentes los asfaltos y los áridos. Se utilizan en lugares con cualquier tipo de tráfico. Dentro de los anteriores observamos:

- Tratamientos asfálticos superficiales: son aplicaciones de una sola capa de material asfáltico y áridos sobre bases flexibles. Se utilizan generalmente como capa de desgaste en carreteras sometidas a tráfico ligero.
- Tratamientos asfálticos superficiales multicapa: la operación de colocar una capa de asfaltos y una de áridos se repite varias veces. Cada aplicación de asfaltos y áridos es una capa, y en cada capa se emplean áridos de tamaños progresivamente menores.
- Riego de sello: es una aplicación de material asfáltico y áridos en una sola capa sobre una superficie asfáltica existente. Esto tiene como propósito sellar una superficie agrietada contra la filtración de agua, proporcionar un revestimiento no deslizante a un pavimento asfáltico antiguo y obtener una capa de un color determinado según el tipo de árido utilizado.

3.4 OTROS USOS DE LOS ASFALTOS ⁽¹³⁾

a) Impermeabilizantes de techos y cubiertas: éste se podría decir que es el segundo uso más común de los asfaltos. Existen dos técnicas principales para impermeabilizar:

- Con revestimientos prefabricados que se componen de asfalto, fieltro y partículas minerales. En estas cubiertas, el fieltro se impregna con un saturante asfáltico recubriéndose ambas caras del mismo con una capa de asfalto más duro, sobre el que se pegan las partículas minerales. Encontramos también los fieltros asfálticos en rollo con superficie lisa, que se componen de una hoja de fieltro saturado con asfalto y revestidos por ambos lados con un asfalto más duro; y los fieltros asfálticos en rollo con superficie mineral, que se componen de fieltro cubierto con partículas minerales por una o ambas caras.
- Con cubiertas asfálticas construidas *in situ*, que se componen de varias capas de fieltro aplicadas a una cubierta plana o pendiente pequeña. Las capas sucesivas se unen entre sí con asfalto, y sobre la última, se aplica un riego asfáltico que se cubre con grava.

b) Revestimientos para tuberías: hay tres tipos:

- Los sistemas con vendas consisten en una capa de imprimación seguida por una o dos aplicaciones de pasta asfáltica, combinadas con una o dos capas de vendas reforzantes y protectoras. Existen sistemas de vendas simples, dobles y de doble revestimiento y doble venda.
- Los sistemas a base de mastiques se componen de una capa de imprimación seguida de un revestimiento con una mezcla densa, impermeable y esencialmente de huecos de asfalto, áridos y finos de tipo mineral, a la que pueden incorporarse fibra de asbesto.

¹³ The Asphalt Manual. 1969 USA. The Asphalt Institute.

- Los revestimientos para superficies interiores se componen de una capa de imprimación seguida por una capa asfáltica aplicada por centrifugación.

Otros usos de los asfaltos, aunque menos comunes son en canchas y patios de recreo, piscinas y pistas de hielo, en establos, corrales y abrevaderos, autocinemas y aceras.

3.5 VENTAJAS QUE OFRECEN LOS ASFALTOS COMO MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS

Algunas de las razones por las cuales se prefieren los materiales asfálticos en la construcción de pavimentos son:

- Un pavimento asfáltico es un material de construcción versátil, por las diferentes constituciones y los diferentes espesores que puede ofrecer. Estos no implican un proceso de producción dañino al ambiente, sino por el contrario, se pueden reciclar y reutilizar con mucho éxito.
- Los pavimentos asfálticos pueden ser ensanchados, bacheados, y en general, se les puede dar un mantenimiento a bajo costo comparado con los pavimentos rígidos (cemento Portland), ya que el equipo empleado es menor.
- Un pavimento flexible (asfáltico) posee un tiempo de curado corto, lo cual ayuda a no provocar trastornos en el tráfico. Además, no requieren juntas de expansión, no se abultan y proporcionan un tráfico silencioso.
- El asfalto debido a su carácter de residuo, es un material de construcción de bajo costo, que posee una resistencia excelente al acuaplaneo y es antirreflejante.

CAPÍTULO 4

MODIFICACIÓN DE ASFALTOS

4.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA RED NACIONAL DE CARRETERAS Y ORGANISMOS REGULADORES ⁽¹⁴⁾

En México durante 1925, la red carretera se encontraba menos desarrollada que la infraestructura carretera, que a consecuencia de la Revolución se encontraba muy dañada. En este año la infraestructura caminera contaba con 28 mil kilómetros , los cuales abarcaban únicamente brechas y veredas, por las cuales apenas los 40 mil vehículos automotores no podían transitar.

Para abril de 1926, el Presidente Plutarco Elías Calles promulga la Ley de Caminos y Puentes, y determinó que la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, fuera la responsable de ejercer las políticas en materia de carreteras y puentes nacionales.

¹⁴ Programa Nacional de Autopistas 1989-1994. Propósitos y Logros. 1994. México. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Durante los años de 1925 y 1930, la Comisión Nacional de Caminos se encargó de construir 1,420 kilómetros de carreteras. En 1930, termina la fase armada de la Revolución, y resurge la necesidad de comunicarse. Se implementan algunos planes de desarrollo que desgraciadamente se mantuvieron al margen de las necesidades económicas del País. Debido a la densidad de población de aquellos años, sólo se enlazaron el Distrito Federal, Guadalajara, Monterrey, Puebla, Mérida, Tampico, San Luis Potosí, León, Veracruz, Torreón, Aguascalientes y Orizaba.

En diciembre de 1932, el Presidente Pascual Ortiz Rubio fundó el Sistema de Cooperación Federal de los Estados. Con él, cada entidad, apoyada con la Junta Local de Caminos respectiva, y con un sistema financiero basado en la aportación federal y estatal bipartidaria, se realizaron y conservaron nuevos caminos. En ese mismo año se transformó la Comisión Nacional de Caminos en la Dirección Nacional de Caminos, la cual dependía de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas.

Entre 1925 y 1940 fueron construidos 9,500 kilómetros de caminos que comunicaban a 23 ciudades y 50 mil habitantes. Destacan los tramos de México-Ciudad Victoria-Nuevo Laredo, México-Jalapa-Veracruz, México-Toluca-Guadalajara, Chihuahua-Ciudad Juárez, Saltillo-Piedras Negras, Monterrey-Reynosa, y Aguascalientes-San Luis Potosí-Tampico.

De 1940 a 1950, se construyeron 12,500 kilómetros más. De éste periodo destaca la famosa Carretera Panamericana. En 1949, comenzó la construcción de caminos de altas especificaciones con la Autopista México-Cuernavaca, la cual se puso en operación en 1952.

Veinticinco años antes, Italia había construido la primera autopista del mundo. En 1935, Alemania construyó la primera autopista con barrera central. También es en los años treinta, cuando en Estados Unidos se construyen las primeras autopistas, y es hasta 1950, cuando se construyen las de cuota.

Es entre 1950 y 1960, cuando se construyen otros 22,500 kilómetros más de carreteras, y se cubre más del 90% del troncal básico del país. En 1953, se crea Caminos Federales de Ingreso, y en 1963 cambió su nombre por el de Caminos y Puentes Federales de Ingresos y

Servicios Conexos. En los sesentas, se construyen las primeras carreteras directas de cuotas en México.

La estabilidad en el desarrollo económico de México, sostenido durante 41 años, de 1925 a 1966, aunada a sucesos como la expropiación petrolera y la Segunda Guerra Mundial, propiciaron las condiciones para que, a pesar de su arranque tardío en la creación de infraestructura carretera, al cabo de 45 años, en 1970, constara con una longitud satisfactoria de vías terrestres, que le permitieran atender el importante crecimiento del parque vehicular y pasaje que transitaba las carreteras de todo el país.

En 1976, la Secretaría de Obras Públicas (SOP), cambió su nombre y funciones por el de la nueva Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP). Se encargó de las construcciones y conservaciones de los caminos, hasta 1983, cuando se consolidó la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

La crisis económica sufrida por el país entre 1982 y 1988 afectó severamente la infraestructura carretera e impidió su crecimiento, modernización y conservación, además de provocar que la red troncal redujera la calidad de su nivel de servicio. Durante los años ochentas, el gasto en conservación de la red carretera representó el 0.35% de producto interno bruto.

Ante este panorama era urgente incrementar el tamaño de la red y establecer nuevos criterios de administración y conservación mediante procedimientos tecnológicos, apropiados a los recursos y condiciones del país.

En 1925 la población era de un poco más de 7 millones de habitantes en todo el país, y existían 40 mil vehículos automotores; para 1988, el parque vehicular estaba compuesto de 7.4 millones de unidades, de las cuales 5.2 eran automóviles y 2.2 camiones. La tendencias de crecimiento, tanto de población como del número de vehículos, permiten suponer que para el año 2000 existirán cien millones de habitantes y 15 millones de vehículos, aproximadamente.

4.2 SITUACIÓN DE LA RED NACIONAL DE CARRETERAS ⁽¹⁵⁾

En 1994, la longitud que alcanzó la red nacional de carreteras fue de 307,142 kilómetros, de los cuales, el 16% son Federales, el 18% son Estatales, 52% Rurales; y, 14% son Brechas.

El estado superficial de éstos 307,142 kilómetros fue de un 0.08% de terracería, un 48.08% revestido, un 30.67% pavimentado; y, un 21.17% de brechas.

La Figura 4.1 representa gráficamente lo anterior. En esta Figura no se incluyen las brechas, que en 1994 ascendieron a 40,444 kilómetros.

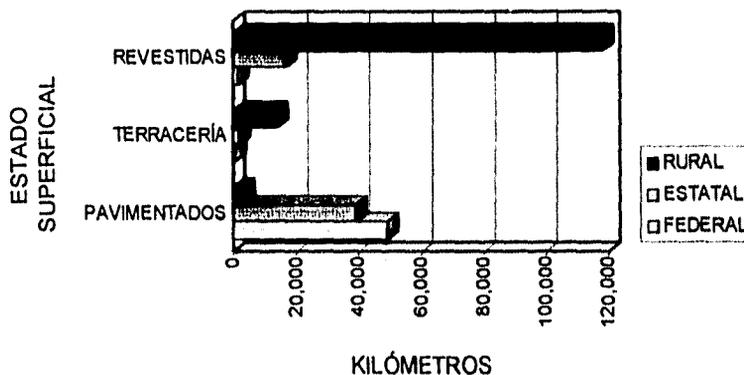


Figura 4.1

Longitud de la Red Nacional de Carreteras por Tipo de Camino ⁽¹⁵⁾

Es importante señalar que una carretera federal, es aquella que se encuentra a disposición del Gobierno Federal; y una carretera estatal, se encuentra regulada por el Gobierno del Estado al cual pertenece.

¹⁵ Salinas de Gortari, C. 1994. Sexto Informe de Gobierno 1988-1994 México: Poder Ejecutivo.

Los datos más detallados acerca de las carreteras con las cuales cuenta el sistema carretero nacional y las inversiones que a éste se han hecho se encuentran en el Apéndice B.

Según el Programa Nacional de Autopistas ⁽¹⁴⁾ se pusieron en operación 6,223 kilómetros de carreteras; y quedaron en construcción 746 kilómetros más. Algunos datos interesantes se presentan en la siguiente Tabla 4-1:

TABLA 4-1 ⁽¹⁴⁾
LOGROS DEL PROGRAMA NACIONAL DE AUTOPISTAS 1989-1994

| | |
|--------------------------------------|----------------------------|
| Longitud Total | 6,969.65 km |
| Longitud en Operación | 6,223.85 km |
| Longitud en Construcción | 746 km |
| Puentes | 337 |
| Pasos a Desnivel | 1,806 |
| Entronques | 288 |
| Túneles | 7 |
| Empleos Directos | 125,800 |
| Empleos Indirectos | 162,789 |
| Número de Concesiones | 44 |
| Tractores Empleados | 2,204 |
| Motoconformadoras | 1,975 |
| Cargadores | 1,814 |
| Camiones de Volteo | 12,965 |
| Pipas | 2,447 |
| Dosificadores de Concreto Hidráulico | 111 |
| Equipos de Compactación | 2,213 |
| Trituradoras | 381 |
| Plantas de Concreto Asfáltico | 153 |
| <i>Volúmenes Extraídos:</i> | |
| Corte | 302,441,277 m ³ |
| Terraplén | 440,524,488 m ³ |
| Sub-base | 18,851,205 m ³ |
| Base | 24,851,409 m ³ |
| Carpeta | 8,610,728 m ³ |
| Alcantarillas | 18,608 |

¹⁴ Programa Nacional de Autopistas 1989-1994. Propósitos y Logros 1994. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Como podremos apreciar esto resultó una labor titánica y un proyecto demasiado ambicioso tanto por parte del Gobierno Federal, como del sector privado.

Después de observar los resultados de la pasada administración, se presenta a continuación el proyecto de gobierno para el periodo 1995-2000. Este es sólo un esbozo del futuro Programa Nacional de Autopistas, el cual para éstas fechas aún no se ha presentado.

4.3 PROYECTO DE GOBIERNO ⁽¹⁶⁾

El Plan Nacional de Desarrollo promete que para el periodo 1995-2000 se dará decidido apoyo a la construcción de caminos rurales y de carreteras alimentadoras, así como a los trabajos ya existentes. Éste es consciente de que la integración efectiva de los grupos menos favorecidos requiere, en primer lugar, contar con un nivel mínimo de infraestructura en caminos, telecomunicaciones y servicios urbanos, como agua potable y drenaje. El crear infraestructura productiva en caminos y obras de diversa índole, aumentan el potencial productivo de las regiones y atacan no sólo los problemas actuales de pobreza, sino que coadyuvan a evitar que éstos se aparezcan o se perpetúen.

Contar con una infraestructura adecuada, moderna y suficiente es un requisito fundamental para el desarrollo económico. La infraestructura condiciona la productividad y la competitividad de la economía y es un factor determinante de la integración de mercados y del desarrollo regional. Nuestro país acusa serias deficiencias en materia de infraestructura. Las más evidentes se ubican en el sector de comunicaciones y transportes. La ampliación, modernización y conservación de las carreteras federales no han podido ser atendidas con la misma velocidad que ha crecido la demanda. Muchas de ellas pasan a través de ciudades medianas e inclusive grandes, por falta de libramientos. Hacen falta mejores accesos terrestres en algunos puertos marítimos y fronterizos. Existen regiones en que no se han construido enlaces transversales para mejorar la comunicación interregional. La red

¹⁶ Zedillo Ponce de León, E. 1995. Plan Nacional de Desarrollo 1995-2000. México: Poder Ejecutivo.

alimentadora presenta también claras insuficiencias, al igual que la red de caminos rurales, cuya extensión y condiciones de servicio son limitadas.

Las condiciones de la infraestructura hacen imperativo un enorme esfuerzo de inversión pública y privada durante los próximos años. Si bien habrá de hacerse un esfuerzo extraordinario para canalizar recursos crecientes hacia la partes de inversión pública del gasto gubernamental, es seguro que esos recursos no serán suficientes, por lo que resulta imprescindible promover un gasto privado mucho mayor en infraestructura básica.

Será necesario modernizar y ampliar las carreteras troncales, sujetando la construcción de nuevos ejes a las necesidades de desarrollo interregional. Se continuará, aunque bajo normas distintas, la construcción de nuevas autopistas con capital privado que sean rentables desde un punto de vista social. Los nuevos esquemas de concesión se basarán en criterios que permitan reducir el monto de las tarifas a usuarios y garantizar un servicio eficiente, de alta calidad y competitivo. Se propiciará una mayor concurrencia de los gobiernos locales y los beneficiarios en la planeación, construcción, mantenimiento y modernización de las carreteras alimentadoras y caminos locales de toda la República.

En base a estudios realizados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, y tomando en cuenta criterios tales como: formar amplios corredores con carreteras de altas especificaciones; mejorar la conectividad de las autopistas, con las redes urbanas y suburbanas, y con los puertos fronterizos y marítimos; ampliar los puntos de enlace intermodal; instalar áreas de servicio a lo largo de la red; emplear tecnología adecuada para la operación de autopistas; interconectar con otros medios de transporte y redes de los países vecinos; y, minimizar el impacto ambiental; se presenta en la Tabla 4-2 la propuesta para la construcción de carreteras para el periodo 1995-2000.

TABLA 4-2 (14)
 PROPUESTA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS DURANTE EL PERIODO
 1995-2000

| PROYECTOS EN EVALUACIÓN: | |
|--|-------------------------|
| San Luis Potosí-Saltillo | 450 kilómetros |
| Allende-Saltillo | 335 kilómetros |
| Linares-Ciudad Victoria-Estación Manuel | 300 kilómetros |
| Entronque San Blas-Villa Unión-Entronque Aeropuerto Mazatlán | 227 kilómetros |
| Acapulco-Zihuatanejo | 223 kilómetros |
| Pirámides-Tehuacán | 210 kilómetros |
| Sonora-San Luis Río Colorado | 200 kilómetros |
| Libramiento Norte de la Ciudad de México | 132 kilómetros |
| San Luis Potosí-Lagos Moreno | 130 kilómetros |
| Zacatecas-Cuencamá | 123 kilómetros |
| Libramiento Sur y Poniente de Querétaro | 90 kilómetros |
| Atizapán-Atzacmulco | 85 kilómetros |
| Abasolo-Ecuandureo | 75 kilómetros |
| Aguascalientes-Zacatecas | 75 kilómetros |
| Ciutzeo-Salamanca | 70 kilómetros |
| Tapachula-Hidalgo | 40 kilómetros |
| Allende-Nava | 12 kilómetros |
| Puente Internacional Reynosa-Mc Allen y Acceso | 8 kilómetros |
| PROYECTOS EN ESTUDIO: | |
| Villahermosa-Champolón | 300 kilómetros |
| Ciudad Victoria-Matamoros | 280 kilómetros |
| Durango-Mazatlán | 270 kilómetros |
| Nuevo Laredo-Piedras Negras-Ciudad Acuña | 240 kilómetros |
| Cosoleacaque-Tehuantepec | 228 kilómetros |
| Tuxpan-Cardel | 225 kilómetros |
| Tuxpan-Tampico | 188 kilómetros |
| Libramiento de Jalapa | 40 kilómetros |
| Libramiento Poniente de Saltillo | 35 kilómetros |
| Villahermosa-Macuspans | 34 kilómetros |
| Libramiento Sur Toluca | 24 kilómetros |
| Diversas obras de colectividad y estatales | 850 kilómetros |
| Diversos libramientos | 300 kilómetros |
| TOTAL | 6,868 kilómetros |

¹⁴ Programa Nacional de Autopistas 1989-1994. Propósitos y Logros. 1994. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

4.4 OPCIONES PARA CUBRIR LAS NECESIDADES DE LA RED NACIONAL DE CARRETERAS

Uno de los propósitos de esta tesis es realizar un estudio técnico sobre las nuevas tecnologías de pavimentación. Éstas han dado resultados asombrosos en diversos países del mundo, y es por eso, que a continuación se proponen:

4.4.1 STONE MASTIC ASPHALT: ¿LA SOLUCIÓN? ⁽¹⁷⁾

Europa ha sido quien en realidad ha dominado la materia y tecnología de los pavimentos asfálticos, ya que invierte mucho dinero y existe una verdadera unión entre el Gobierno y la industria. Mientras que en los Estados Unidos, las carreteras se planean y construyen tomando una vida útil de 20 años, en Europa se hace para 40 años. Aunque países como Estados Unidos se han preocupado por diseñar pavimentos eficientes, Europa cuenta con la gran diferencia de que primero analiza sus posibilidades y después adapta su tecnología a éstas. Francia, por ejemplo, ha impulsado todo este desarrollo estimulando a sus contratistas a realizar innovaciones. Es por esto, que simplemente en Europa existen más de 100 mezclas diferentes para la construcción de pavimentos con asfalto importado de Venezuela, mientras que en México sólo existe una.

Diferentes organizaciones norteamericanas realizaron en 1990 un viaje por Dinamarca, Francia, Alemania, Italia, Suecia y Reino Unido para estudiar sus asfaltos; y algunas de sus observaciones y conclusiones se exponen en éste trabajo.

El *Stone Mastic Asphalt* (SMA) es el resultado de varias investigaciones al respecto. Fue desarrollado en los años sesentas en Alemania y se le conoce como *splittmastixasphalt*. Hoy en día es usado ampliamente en Alemania, Holanda y la península escandinava. El resto de los países europeos utilizan variantes de esta tecnología adaptándola a sus propias necesidades.

¹⁷ European Asphalt Study Tour, 1991. USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Para la construcción del SMA es necesario seleccionar materiales de la más alta calidad. Se utiliza un asfalto de baja penetración, el cual se modifica por la adición de fibras minerales y polímeros, previniendo así el escurrimiento de la mezcla asfáltica durante la construcción. La capa de agregado es generalmente de roca triturada o gravilla.

Para ofrecer resistencia al agrietamiento y derrapamiento, el SMA se tiende sobre un esqueleto pétreo. El contacto entre las piedras del esqueleto provee una fricción interna que a través de la superficie resiste la acción de las cargas. Éste esqueleto pétreo es mezclado con el fino y tendido junto con el mastique compuesto por el asfalto, arena y agregados finos. El mastique es rico en asfalto y sin huecos, ofreciendo una superficie resistente al agrietamiento.

En promedio, la mezcla para hacer el SMA debe tomar en cuenta los siguientes materiales y proporciones: agregado grueso, de un 70 a un 80% total en peso; el agregado menor o fino de un 8 a un 13% en peso; y la arena de un 12 a un 17% en peso del total de los agregados. El peso del contenido de asfalto del SMA es generalmente de un rango de 6.5 a 7.5% del peso de la mezcla.

Las fibras minerales o celulosas se usan ampliamente para estabilizar el ligante rico en la mezcla de SMA y para prevenir la separación durante la producción y tendido.

La técnica del SMA se diseñó para tener únicamente un 3% de huecos de aire. La compactación del terreno es básica para colocar el agregado y toda la mezcla. Debido a que la mezcla no se compacta substancialmente durante la construcción, ésta debe ser rica en asfalto para evitar los huecos, que son un factor importante a la hora de producirse el agrietamiento.

Adicionalmente a sus capacidades estructurales, la superficie del pavimento SMA tiene una textura granular caracterizada por sus depresiones ásperas y largas, ofreciendo una resistencia al acuaplaneo.

Los materiales empleados en esta tecnología, así como sus características y proporciones se exponen a continuación:

4.4.1.1 FIBRAS MINERALES ⁽¹⁷⁾

Son fibras minerales de una longitud máxima de 0.25 pulgadas y un espesor de 0.0002 pulgadas. Están hechas de basalto/diabasa y dolomita/caliza, los cuales se funden a 1,600°C para después centrifugarse y lavarse con agua mediante un proceso patentado. Una vez lavados se recubren con un aglutinante.

Esta fibra mineral funciona como una armadura de la mezcla del concreto asfáltico. Con su adición, aumenta la adhesión del aglutinante, proporcionándole así, estabilidad y una mayor duración.

Éstas se añaden durante la fabricación del concreto asfáltico ya sea contenidas en sacos que son solubles en la mezcla, o mediante un dosificador, el cual es un soplador o ventilador. Como se puede observar, no se requiere la modificación del proceso de obtención de la mezcla asfáltica, y tampoco existe ningún riesgo por exposición a ésta.

Cuando se requieren superficies drenantes (PA), su dosis es de un 8% del peso total de la mezcla; y cuando se emplea la tecnología SMA, un 6% del peso total de la mezcla.

Las ventajas de utilizar una fibra mineral de esta naturaleza en la construcción de caminos son:

- Su total reciclaje cuando se emplea en ambas tecnologías. Si un pavimento del tipo SMA se remueve, retritura, recalienta y retiene, no pierde su carácter SMA.
- Presenta una excelente resistencia térmica.
- Es fácilmente manejable.
- El tiempo de secado de la mezcla es muy corto (de 7 a 8 segundos).

¹⁷ European Asphalt Study Tour. 1991. USA. American Association of State Highway and Transportation Officials.

- No la afecta la temperatura y humedad de la mezcla.
- Se puede emplear tanto en plantas de mezclado en caliente intermitentes (tipo Batch) o de tambor.

El empleo de los sacos reduce el costo de su utilización, pero también se ve reducida su eficiencia, ya que el dosificador permite que la fibra se incorpore homogéneamente en un lapso de 5 a 8 segundos, mientras que en la incorporación por sacos la homogeneidad de la mezcla es dudosa.

Un aditivo de tipo fibroso incrementa el contenido de asfalto hasta un 10% sin presentarse "sangrado", aumenta la calidad del asfalto trabajando a temperaturas de operación normales, produce asfalto poroso sin "sangrado", aumenta el tiempo de vida del asfalto y aumenta el rango de temperatura de operación del mismo.

Según el Departamento de Transportaciones del Estado de Georgia, quien fue el primer organismo norteamericano en experimentar con este tipo de mezclas, las especificaciones con las cuales debe cumplir una fibra mineral empleada en las tecnologías anteriormente señaladas son:

- Deberá estar hecha de basalto virgen o diabasa, el cual deberá estar previamente tratado con un agente de tipo catiónico para mejorar el desempeño de la fibra, así como para incrementar la adhesión entre la superficie de la fibra y el asfalto. Ésta deberá añadirse en las cantidades antes mencionadas con la supervisión de un Ingeniero.
- El análisis de tamaño indicó que la longitud máxima de la fibra deberá ser de 0.25 pulgadas y su espesor promedio máximo de 0.0002 pulgadas.
- De un 90 a un 100% de la fibra deberá pasar por una malla No. 60, y de un 65 a un 100% de la misma por una malla No. 230.

4.4.1.2 CAL¹⁷⁾

Las razones por las cuales se recomienda el uso de cal en las mezclas asfálticas son:

- Por su volumen y alta finura (mayor que el 85% pasa por la malla No.200), la cal un excelente aditivo químico.
- Su alta basicidad ayuda a aumentar la adherencia del asfalto y los agregados (tiene cargas negativas).
- Aumenta la resistencia inicial y durabilidad.
- Reduce el envejecimiento prematuro del asfalto evitando la oxidación.
- No permite la formación de mezclas "tlemas".
- Mejora la resistencia a la humedad reduciendo así el agrietamiento.
- Incrementa la ductilidad a baja temperatura.

La cantidad o concentración de la cal requerida para beneficiar una mezcla de asfalto es dependiente del tipo de agregado y en un menor grado del tipo de asfalto. Se pueden obtener mejoras en la resistencia a la oxidación con niveles de concentración de cal abajo del 10% en peso del cemento asfáltico, y al 0.5% en peso del agregado. Diferentes pruebas hechas demuestran que las concentraciones en el rango de 1 al 2% en peso del agregado son adecuadas para mejorar la sensibilidad de agua.

Las características de la cal empleada en la modificación de asfaltos se presentan en la Tabla 4-3.

¹⁷ European Asphalt Study Tour, 1991. USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.

TABLA 4-3 ⁽¹⁷⁾

PROPIEDADES DE LA CAL EMPLEADA PARA MODIFICAR MEZCLAS ASFÁLTICAS

| PROPIEDAD | VALOR MÁXIMO |
|----------------------------|--------------|
| Hidróxido de calcio | 84% |
| Carbonato de calcio | 6% |
| Hidróxido de magnesio | 2% |
| Óxido de fierro y aluminio | 1% |
| Silica | 3% |
| Humedad | 2% |
| Indeterminado | 1% |
| Pasa malla No. 100 | 97% |
| Pasa malla No. 200 | 90% |

4.4.1.3 POLÍMERO ^(17,18,19)

Los asfaltos tienen la gran desventaja de ser altamente sensibles a la temperatura, llegando a ser muy duros y quebradizos en ambientes fríos; y blandos y fluyentes en ambientes calientes. Se plantea entonces la necesidad de buscar algún material, que disminuya la susceptibilidad térmica de los asfaltos convencionales, proporcione mayor resistencia a las altas temperaturas y aumente la resistencia a la deformación y el cansancio.

En un principio, se trabajó con hule natural, pero no se obtuvieron los resultados deseados en la mayoría de las ocasiones debido a la poca afinidad entre los componentes del hule y los asfaltenos.

¹⁷ id.

¹⁸ Hawley, G. 1993 Diccionario de Química y de Productos Químicos. España: Omega.

¹⁹ Bhowmick, A. K. y De, S. K. 1990. Thermoplastic Elastomers from Rubber-Plastic Blends. Reino Unido: Ellis Horwood

Después de años de experimentación, se logró definir que los elastómeros termoplásticos de tipo radial o lineal (macromoléculas sintéticas compuestas de un gran número de monómeros, que se ablandan cuando se exponen al calor y recuperan su condición original cuando se enfrían a temperatura ambiente), podrían ser mucho más eficientes, ya que debido a su estructura ofrecen una mayor adhesión y afinidad a las estructuras de los asfaltos.

Finalmente, los hules termoplásticos que lograron modificar las tendencias al cambio de los asfaltos fueron los copolímeros de bloque de estireno-butadieno-estireno (SBS). Un copolímero de bloque es una sustancia producida por polimerización selectiva o adición de dos o más monómeros no similares, constituida por secciones comparativamente grandes y separadas entre sí por otros segmentos de naturaleza química diferente.

El polibutadieno (PB), cuya fórmula condensada es $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-)_n$, y poliestireno (PS), con fórmula condensada $[-\text{CH}_2\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-]_n$, forman un sistema separado de fases; en el que a temperatura ambiente, una fase es dura y sólida (PS), y la otra es "hulosa" (PB). Este copolímero de bloque SBS contiene un 25% de estireno, del cual, un 18% se encuentra presente como un bloque de poliestireno. En la Figura 4.2 se representan esquemáticamente las estructuras de los copolímeros lineales y radiales. La red puede ser rota por la aplicación de solventes apropiados o por el calentamiento del copolímero a temperaturas superiores al punto de fusión de los bloques de poliestireno. Ésta puede ser regenerada por la eliminación del solvente o por el enfriamiento del polímero abajo del punto de transición vítrea del poliestireno, produciendo una fuerte red elástica. La red resultante exhibe altos esfuerzos de tensión y se comporta como si las moléculas estuvieran químicamente entrecruzadas o vulcanizadas.

El copolímero SBS no sólo se mezcla con el asfalto, sino que se incorpora a las moléculas que lo constituyen formando lo que conocemos como *composite*. Un *composite* es una mezcla o combinación mecánica a escala macroscópica de dos o más materiales en estado sólido, son esencialmente insolubles y difieren en su naturaleza química.

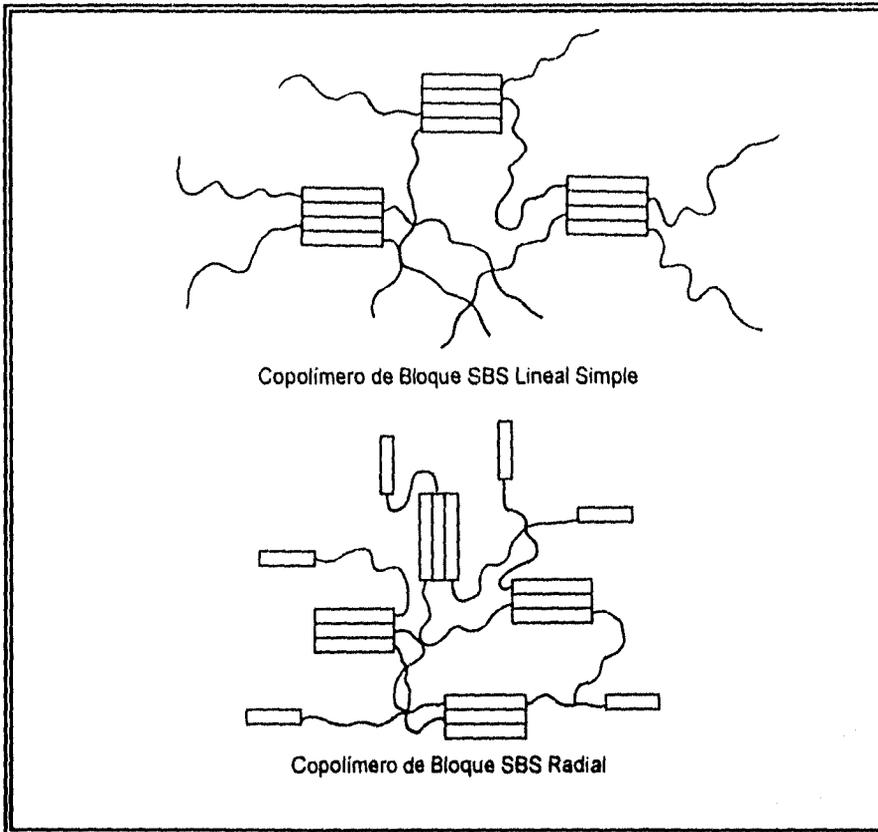


Figura 4.2

Representación de las Moléculas del Copolímero SBS ⁽¹⁷⁾

Algunos cambios morfológicos en el asfalto por la adición de polímero son:

- a) A una concentración definida de copolímero en el asfalto, éste se "hincha" junto con los componentes de menor peso molecular del asfalto y forma inclusiones discretas en una matriz asfáltica enriquecida en componentes de alto peso molecular.

¹⁷ European Asphalt Study Tour 1991 USA: American Association of State Highway and Transportation Officials

b) A una concentración crítica, la fase rica en copolímero forma una red, y las propiedades reológicas cambian rápidamente de un material predominantemente viscoso a uno de características hulosas. La magnitud del cambio reológico depende de la compatibilidad con el asfalto, y sobre todo, de la temperatura.

c) Los diluyentes asfálticos entran preferentemente a la fase PB y la "hinchán", permitiendo que los dominios del PS actúen como sitios de entrecruzamiento.

d) Si la macrofase rica en copolímero forma la fase continua, el compuesto actúa esencialmente como un hule entrecruzado, exhibiendo propiedades elásticas y de completa recuperación después de una deformación. A bajas concentraciones de hule, la fase rica en copolímero está presente como partículas discretas, y el compuesto se comporta como un asfalto con moderado incremento en la respuesta elástica.

e) El comportamiento elástico del agregado a altas temperaturas influye en la oposición y recuperación a la deformación de la mezcla. Este decremento a la deformación permanente provoca un decremento potencial del agrietamiento del pavimento asfáltico.

Las características y especificaciones de dicho polímero se presentan en las Tablas 4-4, 4-5 y 4-6.

El equipo necesario para manejar el polímero es un mezclador con agitador de paletas de baja velocidad. Para altos volúmenes se necesitan mezcladores de mediano esfuerzo cortante, mezcladores de alto esfuerzo cortante y bombas reciclantes de alto esfuerzo cortante.

El polímero debe ser agregado gradual y cuidadosamente al asfalto, mientras éste se encuentre a una temperatura mínima de 180°C y máxima de 200°C. Después de adicionar el mismo, se deberá mantener la temperatura en 180°C, mezclando un mínimo de 4 horas.

TABLA 4-4 ⁽¹⁷⁾
 PROPIEDADES TÍPICAS DEL POLÍMERO EMPLEADO PARA MODIFICAR MEZCLAS
 ASFÁLTICAS

| PROPIEDADES TÍPICAS | VALORES |
|----------------------------------|---------|
| Viscosidad Mooney (ML 1+4 100°C) | 47 |
| Estireno total (%) | 25 |
| Poliestireno en Bloque (%) | 17.5 |
| Gravedad Específica | 0.93 |
| Materia Volátil (% máx) | 0.75 |
| Cenizas (% máx) | 0.2 |
| Ácido Orgánico (% máx) | 0.1 |
| Jabón (% máx) | 0.2 |

TABLA 4-5 ⁽¹⁷⁾
 PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS DEL POLÍMERO EMPLEADO PARA MODIFICAR
 MEZCLAS ASFÁLTICAS

| PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS | ASFALTO CONVENCIONAL | ASFALTO MODIFICADO |
|----------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Penetración, 25°C | 102 | 69 |
| Viscosidad Absoluta, 60°C, cp | 1,800 | 9,635 |
| Viscosidad Cinemática 135°C, cSt | 454 | 1,356 |
| Punto de Ablandamiento, °C | 47 | 58 |
| Ductilidad 4°C, cm | - | 23.3 |
| Dureza | - | 112 |
| Tenacidad | - | 67 |
| Elongación, cm | - | 58 |

¹⁷ European Asphalt Study Tour 1991. USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.

El Departamento de Transportaciones del Estado de Georgia, en Estados Unidos, enlista las siguientes especificaciones con que debe cumplir un cemento asfáltico modificado con polímeros:

TABLA 4-6
ESPECIFICACIONES PARA UN CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON
POLÍMEROS

| PROPIEDAD | VALOR |
|------------------------------------|-------|
| Viscosidad a 60°C, polses, mínima | 5000 |
| Viscosidad a 135°C, cSt, máxima | 2500 |
| Penetración a 25°C, 100g, 5seg, mm | 40-75 |
| Punto de Inflamación, °C, mínimo | 233 |
| Contenido de Cenizas, % máximo | 1.0 |
| Punto de Ablandamiento, °C, mínimo | 57 |

4.4.2 POROUS ASPHALT, ¿OTRA OPCIÓN? ^(17,20)

En México encontramos principalmente seis rangos de precipitación pluvial anual. Los menores a los 250mm abarcan zonas como: Hermosillo, Ciudad Obregón, Culiacán, Ciudad Juárez, Chihuahua y Mexicali. El rango que va de los 250 a 500mm comprende las zonas de: La Paz, Guadalajara, Laredo, Matamoros, Tepic, León, Ciudad de México, Puebla y parte del Estado de Oaxaca. El rango de 500 a 1,000mm de precipitación pluvial anual se presenta en las zonas de: Ensenada, Aguascalientes, Morelos, Ciudad Victoria, Chiapas y la península de Yucatán. El intervalo de 1,500 a 2,000mm se manifiesta en los estados de: Veracruz, Campeche, Tabasco. Por último, las precipitaciones mayores a los 2,000mm se manifiestan en la zona de Villahermosa, Tabasco y San Cristóbal de las Casas, Chiapas.

¹⁷ id.

²⁰ Open-Graded Asphalt Friction Course. 1993. USA: National Asphalt Pavement Association.

Además de los diferentes rangos de precipitación pluvial anual que se encuentran distribuidos a lo largo del territorio nacional, predominan los climas tropical y subtropical, presentando las variaciones de desértico, húmedo, seco y semiárido.

Todo lo anterior podría sugerir, que las mezclas asfálticas se realizan en base a las condiciones climáticas mencionadas, pero muy por el contrario y a nuestro pesar, toda la infraestructura carretera existente se ha construido con una misma mezcla asfáltica. Ésta es una razón más que nos ayuda a comprender el hecho de la mala calidad de los pavimentos y su extremadamente corta duración; pero, una vez comprendido esto, ¿qué hacer?.

El *Porpus Asphalt (PA)* es el equivalente europeo al *Open-Graded Friction Course (OGFC)*, el cual es una tecnología desarrollada para drenar el agua de lluvia de la superficie del pavimento y reducir el acuaplaneo. En Europa, el PA también ayuda a reducir el ruido del tráfico, ya que provee una manera de absorber y disipar el ruido a través de la superficie del pavimento, y es favorable emplearlo aún cuando el acuaplaneo es mínimo. Autoridades francesas han notado que la textura abierta del PA ayuda a disminuir el reflejo de la luz.

En países como Francia, Dinamarca y Suecia la mayoría de las carreteras se construyen con ésta tecnología, mientras que en Alemania se emplea con menor frecuencia con el único objetivo de disminuir el ruido. En los países anteriormente mencionados, ya existen especificaciones de uso y construcción reglamentadas.

Generalizando, los beneficios de utilizar un pavimento tipo PA son los siguientes:

- Minimiza el efecto de acuaplaneo en tiempos de lluvias.
- Reduce el salpiqueo y rocío del agua de lluvia.
- Mejora la visibilidad nocturna de las señales durante época de lluvias.
- Se presentan niveles de ruido menores.

Los primeros beneficios combinan substancialmente el incremento de la seguridad y la reducción de los accidentes de tráfico, especialmente en tiempos de lluvias. Cuando una carpeta friccionante de textura abierta se diseña, construye y mantiene adecuadamente, existe

una excelente drenaje. No se presentan encharcamientos, y por lo tanto, no hay acuaplaneo, ni reflexión de la luz.

Una desventaja o limitación del PA es su incremento potencial al desmoronamiento y agotamiento de la interfase adyacente al pavimento cuando es empleado bajo condiciones climáticas innecesarias.

La principal característica del PA es su alto contenido de huecos de aire, 20% ó más, que ofrece una naturaleza "abierto" necesaria para drenar agua y reducir el ruido. Este contenido de huecos de aire se obtiene por el uso de agregados áridos partidos con bordes bien definidos, o reduciendo la porción de agregados finos en la graduación continua total. La porción de agregados triturados que debe ser retenida en una malla de 9.5mm no debe de contener más del 15% en peso de las partículas alargadas. La porción retenida en una malla de 2.36mm debe representar el 80% o más del peso total del agregado. Es necesario que el agregado no sea pulido para mantener una buena y durable microtextura, así como buenas características friccionantes. La porción de agregados debe ser lo suficientemente resistente a la degradación por ruptura, ya que si éstos son débiles se podrá presentar fragmentación durante el proceso de producción y tendido de la mezcla. Se recomienda el uso de cal como material fino.

El grado de absorción acústica es una función de los huecos de aire y del tamaño máximo de piedra de la superficie. Las piedras de tamaño pequeño producen menos ruido, pero más huecos de aire absorben el ruido de manera más eficiente.

Los asfaltos para una mezcla PA se modifican con materiales del mismo tipo de los empleados en la tecnología SMA (fibras minerales, cal y polímero), aunque en diferentes proporciones.

Las mezclas PA se pueden producir fácilmente tanto en plantas de mezclado tipo Batch, como en las de tipo tambor. La temperatura ideal de producción es menor a la de los asfaltos convencionales y la temperatura óptima se deberá especificar después de evaluar la viscosidad del ligante.

El tiempo de mezclado de las mezclas tipo PA se puede extender de 15 a 30 segundos si se utilizan fibras minerales como aditivos. Es necesario que dichas fibras se encuentren distribuidas lo más uniformemente posible.

El almacenamiento de estas mezclas debe ser reducido al mínimo. Éste no debe exceder los 30 minutos. Un apropiado conteo del tiempo es importante en la producción, transportación e instalación.

El PA debe ser colocado en capas muy delgadas en superficies secas cuando el pavimento y la temperatura ambiente sean de aproximadamente 15°C.

Como complemento para su efectividad, las capas superficiales de PA deben contar con un sistema de drenaje externo o cuneta.

Es necesario hacer recordar que si las condiciones climatológicas no lo requieren, no es necesario pavimentar con la técnica OGFC o PA, ya que se podrían presentar agrietamientos y levantamientos de la carpeta asfáltica, provocando así mayores daños que beneficios.

4.5 TÉCNICAS PARA EL MANTENIMIENTO DE CARRETERAS (21)

El mantenimiento de una carretera es el conjunto de acciones necesarias para conservarla en las mismas condiciones en que fue construida, en todas las partes que la constituyen. Existen diferentes tipos de mantenimiento según el área de la carretera que se trate, o el equipo que ésta requiera. Estos son:

- **Mantenimiento menor:** también es conocido como conservación normal de carreteras. A este lo constituye un conjunto de actividades rutinarias cuyo objetivo es eliminar los

²¹ Strassburger Frías, P. 1995. Técnicas para Mantenimiento de Carreteras. Ingeniería Civil. 315, 15-21.

pequeños defectos y problemas que cotidianamente se presentan, y que de no resolverse, acelerarían el deterioro. Las actividades mencionadas se pueden clasificar en:

- ◆ Superficie de rodamiento y acotamientos. Incluye el calafateo de grietas, renivelación de la carpeta, bacheo, barrido, reparación de terraplenes y remoción de derrumbes.
 - ◆ Obras de drenaje. Abarca la limpieza y desasolve de cunetas y contracunetas; limpieza y desasolve de alcantarillas; reparación de cunetas, contracunetas y lavaderos; reparación de losas y tubos; reparación de guamiciones y zampeados.
 - ◆ Taludes. Incluye afinamientos, recargue y protección, y extracción de derrumbes.
 - ◆ Zonas laterales del derecho de vía. Se realiza el deshierbe, desenraice y limpieza, reparación y/o reposición de cerca, reparación y/o reposición de barrera central, y reparación y/o reposición de defensa metálica.
 - ◆ Señalamiento vertical. Se lleva a cabo la limpieza, reparación y/o reposición y repintado.
 - ◆ Señalamiento horizontal. Abarca el repintado de rayas, limpieza y/o reposición de vialetas, limpieza y/o reposición de "fantasmas".
 - ◆ Estructuras. Se realiza la limpieza y/o reparación menor de puentes, limpieza y/o reparación menor de pasos peatonales.
-
- Mantenimiento mayor: son todas las obras de rehabilitación que en forma periódica o eventual son necesarias para que un camino ofrezca las condiciones adecuadas de servicio. Las actividades principales que constituyen el mantenimiento mayor son la reconstrucción de terraplenes, la rehabilitación de bases, la reconstrucción de carpetas y riegos de sello, la restitución del señalamientos horizontal y las obras de prevención de derrumbes. Estos trabajos resultan necesarios debido al desgaste causado a través del

tiempo por el tráfico vehicular, la erosión natural de las carreteras o el mal diseño y construcción de las mismas.

En el caso de un pavimento construido por el método tradicional, se debe reencarpetar por lo menos cada 2 ó 3 años dependiendo del clima, y mantenimiento menor de una manera constante. Para los pavimentos construidos con las tecnologías SMA y/o PA, solo se requiere de mantenimiento menor, ya que estos tipos de pavimentos duran por lo menos 20 años.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE MERCADO Y ESTIMACIONES ECONÓMICAS

5.1 ANÁLISIS DE LA DEMANDA ^(15, 23, 24)

Se entiende por demanda a la cantidad de bienes y servicios que el mercado requiere o solicita para buscar la satisfacción de una necesidad específica a un precio determinado. La demanda es igual al consumo nacional aparente (CNA), que es la cantidad requerida por un mercado de un bien o servicio determinado. El CNA se obtiene sumando la producción nacional e importaciones y restando las exportaciones.

Como se puede observar en la Tabla 5-1 y Figura 5.1, el Consumo Nacional Aparente ha sido sumamente irregular. Podemos notar también, que a partir del inicio del pasado sexenio se presentó un importante aumento en el mismo. Actualmente, es difícil predecir el comportamiento futuro de este indicador.

¹⁵ Salinas de Gortari, C. 1994. Sexto Informe de Gobierno 1988-1994. México: Poder Ejecutivo.

²³ Baca Urbina, G. 1993. Evaluación de Proyectos. México: Mc Graw-Hill.

²⁴ La Industria Petrolera. 1993. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

La demanda de asfalto se ha caracterizado por satisfecha e insaturada, hecho recalcado por la ausencia de importaciones.

TABLA 5-1⁽²⁴⁾
CONSUMO NACIONAL APARENTE DE ASFALTOS

| AÑO | PRODUCCIÓN | | IMPORTACIONES | CONSUMO NACIONAL APARENTE |
|-------------------|------------|---------------|---------------|---------------------------|
| | BRUTA | EXPORTACIONES | | |
| 1990 | 5,785 | - | - | 5,785 |
| 1991 | 7,825 | - | - | 7,825 |
| 1992 | 8,536 | - | - | 8,536 |
| 1993 | 8,856 | - | - | 8,856 |
| 1994 | 12,485 | - | - | 12,485 |
| 1995 ^e | 11,498 | - | - | 11,498 |

NOTA: Los datos anteriores se reportan en miles de barriles.

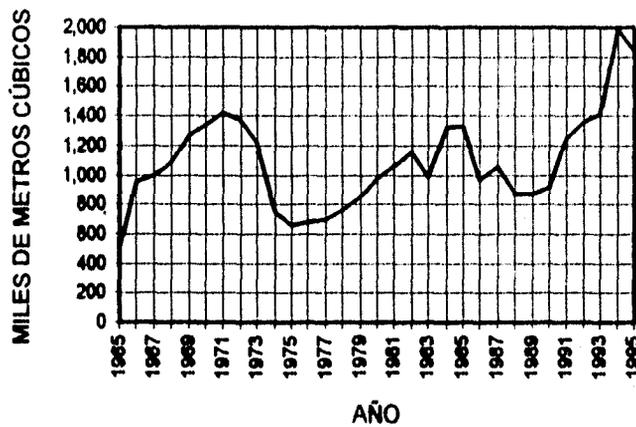


Figura 5.1 *
Consumo Nacional Aparente de Asfaltos ⁽²⁴⁾

²⁴ id.

^e Datos estimados.

* Los datos de 1995 son estimados.

Es importante señalar, que este trabajo no cuenta con datos exactos de los volúmenes de consumo nacional de asfaltos por uso, es decir, cuánto se consume en pavimentación, en mantenimiento de carreteras, en impermeabilizantes, etc.

5.2 ANÁLISIS DE LA OFERTA ⁽²³⁾

La oferta es la cantidad de bienes o servicios que un cierto número de productores están dispuestos a poner a disposición del mercado a un precio determinado.

5.2.1 PRODUCTORES

De acuerdo a la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, el Gobierno Mexicano posee el monopolio de la producción de asfaltos y no existen indicios de que esto vaya a cambiar en el futuro previsible.

5.2.2 UBICACIÓN DE LAS PLANTAS PRODUCTORAS

PEMEX tiene distribuidas refinerías a lo largo del territorio mexicano. Éstas se ubican en Salamanca, Guanajuato; Tula, Hidalgo; Ciudad Madero, Tamaulipas; Salina Cruz, Oaxaca; Cadereyta, Nuevo León; y Minatitlán, Veracruz. La Figura 5.2 ilustra lo anterior.

Actualmente, los asfaltos se producen en las refinerías de Salamanca, Guanajuato; Salina Cruz, Oaxaca; y, Ciudad Madero, Tamaulipas. Los residuos de destilación del crudo de las demás refinerías se mezclan con cortes ligeros generalmente queroseno o un aceite cíclico ligero para obtener combustóleo, empleado para calentar el horno que eleva la temperatura del crudo para ser refinado. El porcentaje de producción de asfaltos por refinería se muestra en la Figura 5.3

²³ Baca Urbina, G. 1993. Evaluación de Proyectos. México. Mc Graw-Hill.

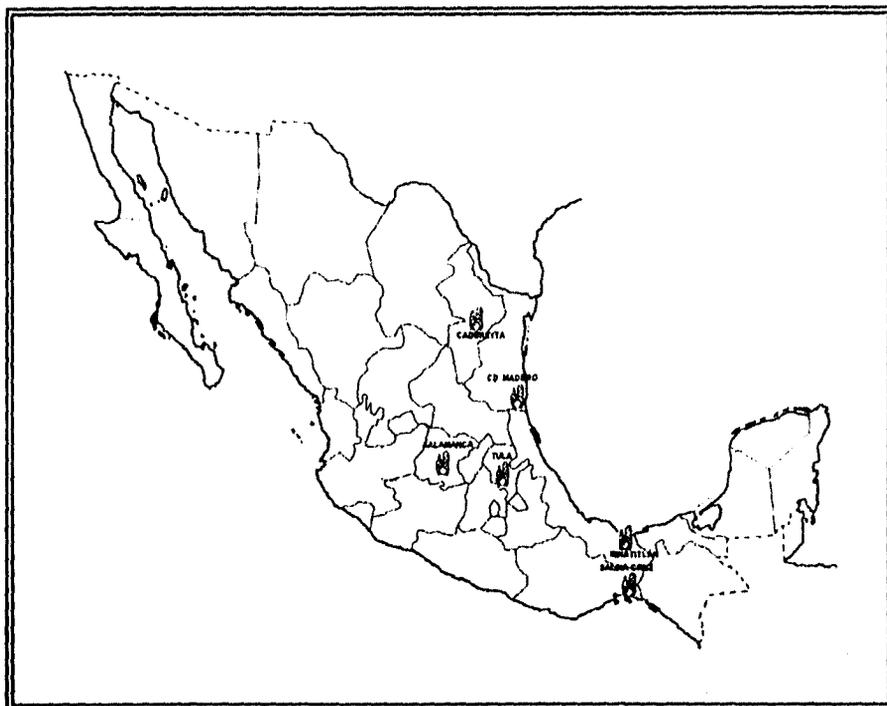


Figura 5.2

Ubicación de las Refinerías dentro del Territorio Mexicano ⁽²⁴⁾

5.2.3 MATERIAS PRIMAS ⁽²⁴⁾

La única materia prima del asfalto es el petróleo. En 1993, México ocupó el sexto lugar a nivel mundial en producción de petróleo crudo, con 2,673,000 barriles diarios; y el onceavo lugar en capacidad de destilación primaria con 1,520,000 barriles diarios.

Dentro del territorio mexicano existe una gran cantidad de yacimientos de petróleo. Estos yacimientos, una vez que son localizados se comienzan a explotar. La propiedades del crudo

²⁴ La Industria Petrolera 1993. México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

extraído varían de yacimiento a yacimiento, por lo que algunos de los crudos anteriormente extraídos como el Pánuco y el Ébano, ya no existen debido a que los yacimientos de los cuales provenían ya fueron prácticamente agotados. En la actualidad, PEMEX extrae los crudos conocidos como Maya, Istmo y Olmeca, siendo éstos los que exporta principalmente. Los crudos procesados en las refinerías, son mezclas de éstos tres y algunos otros.

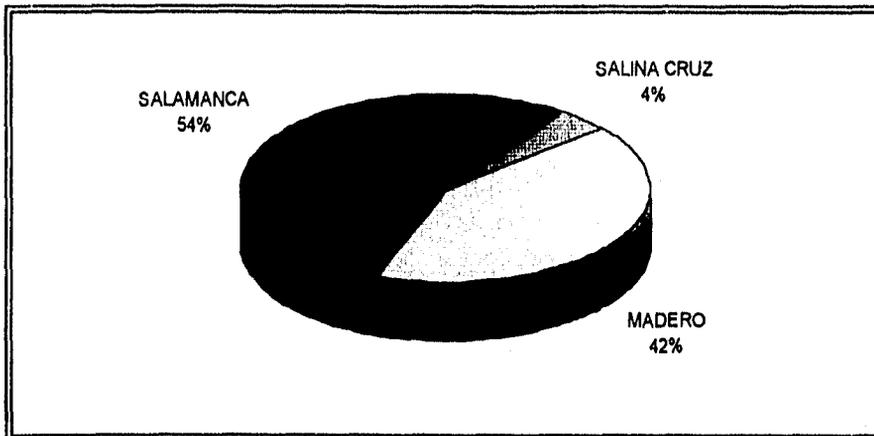


Figura 5.3
Porcentaje de Producción de Asfaltos por Refinería ⁽²⁴⁾

Las principales propiedades de estos crudos son:

1. Crudo Istmo: densidad 33.6°API y 1.3% en peso de azufre.
2. Crudo Maya: densidad 22°API y 3.3% en peso de azufre.
3. Crudo Olmeca: densidad 39.3°API y 0.8% en peso de azufre.

Como es lógico pensar, las características de los crudos son diferentes entre sí, ya que muchas de sus propiedades dependen entre otras cosas del tipo de suelo del cual fueron extraídos, de la zona geográfica, de la profundidad a la cual se hallaba el yacimiento, etc.

²⁴ id.

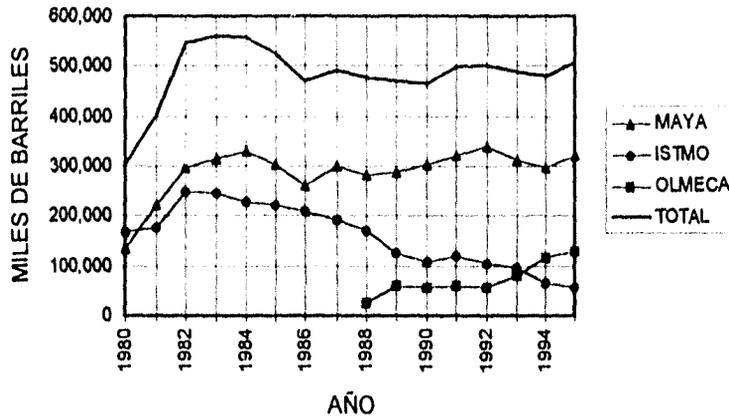


Figura 5.4 *

Exportaciones de los Diferentes Crudos ⁽¹⁵⁾

Tanto los yacimientos de petróleo, como las refinerías y complejos petroquímicos se encuentran extendidos por todo el país. Gracias a la presencia de oleoductos, redes ferroviarias, puertos y redes carreteras, es sencillo transportar tanto el crudo mismo, como sus preciados derivados.

Antes de continuar, es importante definir algunos conceptos involucrados con el tema en desarrollo. Un recurso es el volumen total de hidrocarburos existentes en las rocas del subsuelo, también se conoce como volumen *in situ* o volumen original. Entendemos por reserva a la porción recuperable del recurso. Entre los diferentes tipos de reservas encontramos:

a) **Reserva probada:** Es el volumen de hidrocarburos medido a condiciones atmosféricas, que se pueden producir económicamente con los métodos y sistemas de explotación aplicables en el momento de la evaluación.

* Los datos de 1995 son estimados.

¹⁵ Salinas de Gortari, C. 1994 *Sexto Informe de Gobierno 1988-1994*. México: Poder Ejecutivo.

1. Reserva probada primaria: es el volumen de hidrocarburos que pueden recuperarse sin proporcionar energía adicional al yacimiento.

2. Reserva probada secundaria: es el volumen que se puede recuperar adicionalmente a la reserva probada primaria, suministrando energía adicional al yacimiento por inyección de agua, gas u otros métodos secundarios o de recuperación mojada.

3. Reserva probada perforada: es la que puede extraerse a través de pozos existentes.

4. Reserva probada no perforada: es la que existe en áreas aún no perforadas de un yacimiento.

b) Reserva probable: es el volumen recuperable de hidrocarburos calculado a condiciones atmosféricas en yacimientos en los cuales, métodos geológicos y geofísicos permiten definir que existe más del 50% de probabilidades de obtener técnica y económicamente producción de hidrocarburos.

c) Reserva potencial neta: es el volumen recuperable de hidrocarburos calculado a condiciones atmosféricas, inferido en áreas o provincias en donde la información geológica y geofísica disponible indica la presencia de factores para la generación, acumulación y explotación de hidrocarburos, excluyendo los volúmenes correspondientes a la reserva probada y probable, así como a la producción acumulada (cantidad de hidrocarburos extraídos durante un periodo de tiempo). La diferencia entre la reserva probada y la potencial es su grado de confiabilidad, ya que el volumen de la primera es calculado cuantitativamente y el de la segunda tiene un fundamento cualitativo.

d) Reserva potencial total: es la suma de todos los volúmenes de hidrocarburos correspondientes a las reservas probada, probable, potencial neta y a la producción acumulada.

PEMEX distingue tres regiones de extracción principales que son:

- a) La Región Marina que comprende los distritos de Ciudad del Carmen y Dos Bocas, en 1994 poseía una reserva probada de 20,710 millones de barriles.
- b) La Región Sur que comprende los distritos de Cárdenas, Comalcalco, Reforma, Agua Dulce, Ocosingo y Villahermosa. Durante 1994, su reserva probada ascendía a 8,856 millones de barriles.
- c) Finalmente, la región Norte comprende los distritos de Poza Rica, Altamira, Veracruz y Reynosa, con una reserva probada en 1994 de 14,497 millones de barriles.

La Figura 5.5 muestra la distribución de las reservas nacionales probadas por región durante 1994. La Figura 5.6 muestra a su vez, las reservas nacionales probadas de crudo, condensados y gas natural para cada región en el año de 1994.

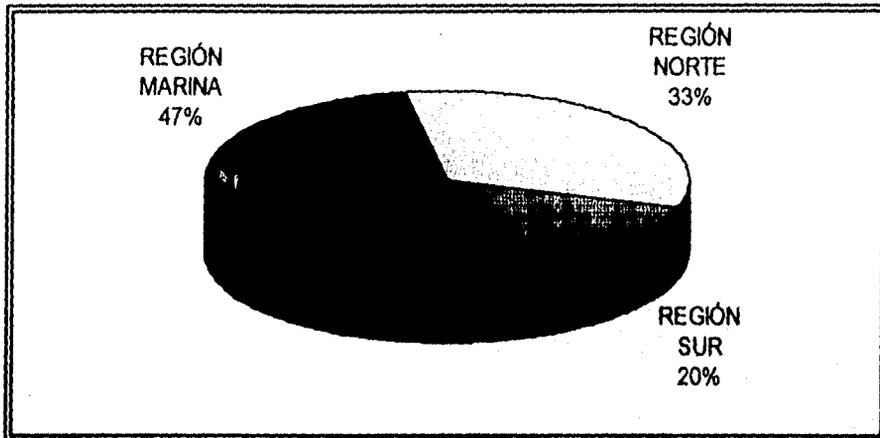


Figura 5.5

Distribución de las Reservas Probadas de Petróleo Crudo por Región ⁽¹⁵⁾

¹⁵ Salinas de Gortari, C. 1994. Sexto Informe de Gobierno 1988-1994. México: Poder Ejecutivo.

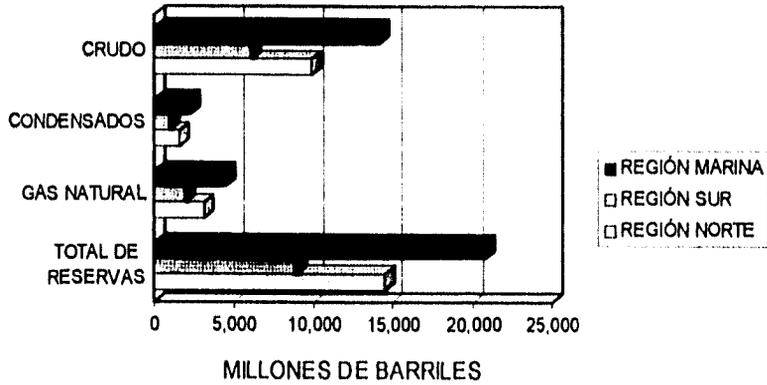


Figura 5.6
Distribución de las Reservas Probadas de Diferentes Productos por Región ⁽¹⁵⁾

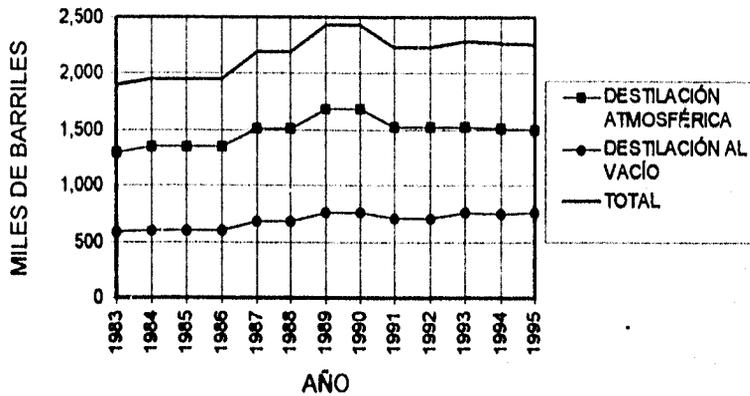


Figura 5.7 *
Tendencias de la Capacidad de Destilación ⁽¹⁵⁾

¹⁵ id.

* Los datos de 1994 y 1995 son estimados.

5.2.4 CAPACIDAD INSTALADA Y UTILIZADA ⁽¹⁵⁾

En la Figura 5.7, se mostró de manera gráfica las tendencias de capacidad de refinación de los últimos años.

Como se puede deducir de la Figura 3.2 el crudo Maya, el más abundante en las refinerías mexicanas, se compone en más de un 40% de asfaltos. Si consideramos la figura anterior (Figura 5.7), es evidente que se tiene una producción mucho menor de asfaltos a la capacidad instalada disponible. Si fuera necesario aumentar la producción de asfaltos varias veces esto sería posible tan solo modificando las condiciones de proceso de las refinerías actuales, por supuesto se sacrificaría la producción de otros petrolíferos de bajo costo como el combustóleo o el diáfano.

Por lo tanto, PEMEX está en condiciones para abastecer la demanda nacional de asfaltos por muchos años aunque ésta aumente considerablemente.

5.2.5 CALIDAD Y PROPIEDADES DE LOS ASFALTOS MEXICANOS

El principal centro de producción de asfaltos es la refinería de Salamanca, Gto., ya que a esta llegan los crudos más pesados, debido principalmente al tren de lubricantes. La refinería de Salina Cruz, Oax. procesa crudos muy ligeros y por lo tanto tiene una muy pequeña producción de asfaltos. En general, estos cumplen con las especificaciones de la SCT.

En la refinería de Salamanca, Guanajuato, se producen los *cutbacks* FR-3 y FR-6; y el cemento asfáltico No.6. Algunos de los datos de producción promedio disponibles se presentan en las siguientes tablas:

¹⁵ id.

TABLA 5-2
 CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO REBAJADO DE FRAGUADO RÁPIDO FR-3
 PRODUCIDO EN LA REFINERÍA DE SALAMANCA, GTO.

| CARACTERÍSTICAS | ASFALTO FR-3 | | |
|---|--------------|--------|----------|
| | MÍNIMO | MÁXIMO | PROMEDIO |
| Peso Específico 20/4°C, g/cm ³ | 0.975 | 0.992 | 0.981 |
| Viscosidad Saybolt-Furoi a 60°C, seg. | 292 | 358 | 321.25 |
| Punto de inflamación, °C | 21 | 21 | 21 |
| Penetración, grados | 115 | 187 | 134.5 |
| Destilación, % del Total Destilado | | | |
| Hasta 217°C | 15.10 | 30.80 | 24.85 |
| Hasta 251°C | 52.30 | 63.40 | 59.00 |
| Hasta 307°C | 84.90 | 89.30 | 87.60 |
| Hasta 352°C | 80.20 | 82.30 | 81.05 |
| % de Agua por Destilación | 0.05 | 0.05 | 0.05 |

TABLA 5-3
 CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO REBAJADO DE FRAGUADO RÁPIDO FR-6
 PRODUCIDO EN LA REFINERÍA DE SALAMANCA, GTO.

| CARACTERÍSTICAS | ASFALTO FR-6 | | |
|--|--------------|--------|----------|
| | MÍNIMO | MÁXIMO | PROMEDIO |
| Punto de inflamación, °C | 294 | 316 | 306 |
| Penetración, grados | 85 | 100 | 90 |
| Viscosidad Saybolt-Furoi a 135°C, seg. | 124 | 257 | 172 |

TABLA 5-4
 CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO ASFÁLTICO No.6 PRODUCIDO EN LA REFINERÍA
 DE SALAMANCA, GTO.

| CARACTERÍSTICAS | CEMENTO ASFÁLTICO No.6 | | |
|---|------------------------|--------|----------|
| | MÍNIMO | MÁXIMO | PROMEDIO |
| Peso Específico 20/4°C | 1.0227 | 1.0288 | 1.02575 |
| Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt | 253.72 | 328 | 290.88 |
| Viscosidad Absoluta a 60°C, Poise | 770.82 | 1635 | 1202.91 |
| Penetración a 25°C, 1/10 mm | 84 | 108 | 95 |
| Punto de Inflamación, °C | 314 | 328 | 320 |
| Ductilidad a 25°C, cm | - | - | >150 |
| Solubilidad en Tricloroetileno, % peso | 99.75 | 99.85 | 99.8 |
| <i>Análisis Después de la Prueba de Película Delgada:</i> | | | |
| Pérdidas por Calentamiento, % peso | 0.031 | 0.04 | 0.0355 |
| Viscosidad Absoluta a 60°C, Poise | 2175 | 3348 | 2761.5 |
| Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt | 345 | 457 | 401 |
| Penetración Retenida, % original | 61.3 | 74.4 | 67.85 |
| Ductilidad a 25°C, cm | - | - | >150 |

TABLA 5-5
 CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO ASFÁLTICO No.6 PRODUCIDO EN LA REFINERÍA
 DE CIUDAD MADERO, TAMPS.

| CARACTERÍSTICAS | CEMENTO ASFÁLTICO No.6 | | |
|---|------------------------|---------|----------|
| | MÍNIMO | MÁXIMO | PROMEDIO |
| Peso Específico 20/4°C | 1.0262 | 1.0339 | 1.03005 |
| Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt | 439.93 | 534.58 | 487.255 |
| Viscosidad Absoluta a 60°C, Poise | 1754.15 | 2336.94 | 2046.545 |
| Penetración a 25°C, 1/10 mm | 80 | 85 | 82.5 |
| Punto de Inflamación, °C | 282 | 306 | 294 |
| Ductilidad a 25°C, cm | - | - | >150 |
| Solubilidad en Tricloroetileno, % peso | 99.8 | 99.89 | 99.845 |
| <i>Análisis Después de la Prueba de Película Delgada:</i> | | | |
| Pérdidas por Calentamiento, % peso | 0.06 | 0.11 | 0.085 |
| Viscosidad Absoluta a 60°C, Poise | 3825.54 | 4981.33 | 4403.435 |
| Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt | 640.7 | 830.81 | 735.755 |
| Penetración Retenida, % original | 67.5 | 75.3 | 71.4 |
| Ductilidad a 25°C, cm | 63.58 | 87 | 75.29 |
| Asfaltenos en nC ₇ , % peso | - | - | 21.9 |
| Saturados, % peso | - | - | 24.4 |
| Aromáticos Polares, % peso | - | - | 6.0 |
| Naftenos Aromáticos, % peso | - | - | 47.7 |

TABLA 5-6
 CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO DE FRAGUADO MEDIO FM-1 PRODUCIDO EN LA
 REFINERÍA DE CIUDAD MADERO, TAMPS.

| CARACTERÍSTICAS PROMEDIO | FM-1 |
|---|---------|
| Peso Específico 20/4°C | 1.0339 |
| Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt | 534.58 |
| Viscosidad Absoluta a 60°C, Poise | 2338.94 |
| Penetración a 25°C, 1/10 mm | 85 |
| Punto de Inflamación, °C | 306 |
| Temperatura de Ablandamiento, °C | 46 |
| Ductilidad a 25°C, cm | >150 |
| Solubilidad en Tricloroetileno, % peso | 99.6 |
| <i>Análisis Después de la Prueba de Película Delgada:</i> | |
| Viscosidad Absoluta a 60°C, Poise | 4981.33 |
| Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt | 830.81 |
| Penetración Retenida, % original | 75.3 |
| Ductilidad a 25°C, cm | 82 |
| Asfaltenos en nC ₇ , % peso | 21.9 |
| Saturados, % peso | 24.4 |
| Aromáticos Polares, % peso | 6.0 |
| Naftenos Aromáticos, % peso | 47.7 |

5.2.6 PRECIO

El precio es la cantidad monetaria a que los productores están dispuestos a vender, y los consumidores a comprar un bien o servicio, cuando la oferta y la demanda están en equilibrio.

En Septiembre de 1995, el precio unitario del Asfalto Rebajado de Fraguado Rápido (FR-3) fue de N\$910.00 el metro cúbico; el precio unitario del Cemento Asfáltico No.6 fue de N\$0.59 el

kilogramo; y, el Asfalto Rebajado de Fraguado Medio (FM-1) tuvo un precio unitario de N\$910.00 el metro cúbico.

Estos precios no incluyen IVA y flete. Normalmente los asfaltos se transportan en pipas de 40m³. Dependiendo de la ubicación de la construcción, el flete puede llegar a ser un componente importante de los gastos.

5.3 ESTIMACIONES ECONÓMICAS

Éstas se realizaron con el fin de ver la viabilidad económica de construir con asfaltos modificados. El método de cálculo empleado fue similar al de las compañía que trabajan en el ramo de la construcción de carreteras.

5.3.1 CÁLCULO DE UNA CARRETERA DE ALTA ESPECIFICACIÓN CON EL MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN TRADICIONAL

Las llamadas carreteras de alta especificación de acuerdo con las normas de la SCT son denominadas con la letra "A". Para efectos de la presente tesis, vamos a considerar una carretera A4S, es decir, una carretera de alta especificación que consta de los siguientes elementos:

- 2 cuerpos.**
- 4 carriles (2 por sentido de circulación).**
- 2 acotamientos externos de 3m de ancho cada uno.**
- 2 acotamientos internos de 1m de ancho cada uno.**
- 1 faja separadora central de 8m de ancho como mínimo.**
- 2 coronas de 11m de ancho cada una.**
- 2 calzadas de 7m de ancho cada una**

La corona es el espacio comprendido por la calzada y los acotamientos interno y externo. Para este caso, ya que se cuenta con dos coronas, el ancho total de una carretera de este tipo es de 22 metros.

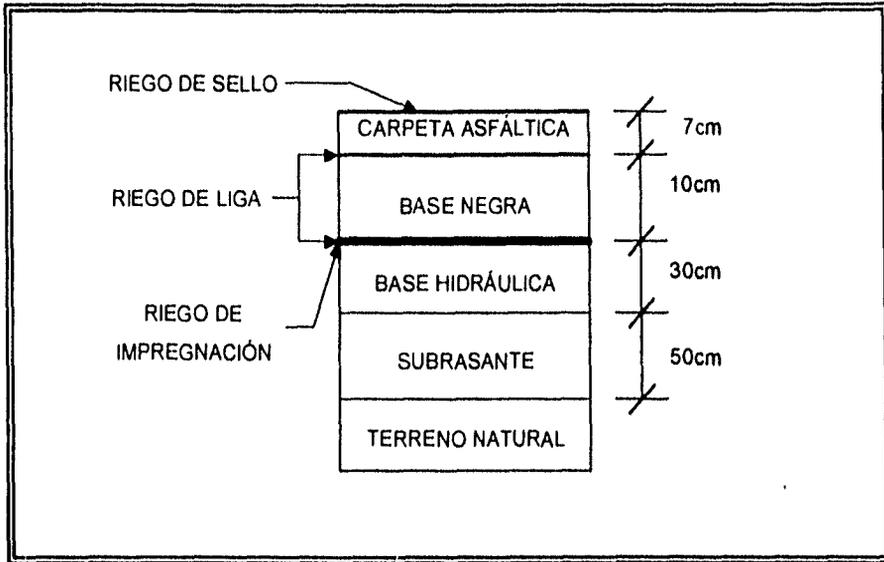


Figura 5.8

Secciones de una Carretera Pavimentada con el Método Tradicional ⁽¹²⁾

La secuencia de cálculo que a continuación se describe es por cada kilómetro de carretera tipo A4S:

a) Área de la carretera

$$\text{Área de la carretera} = (\text{Ancho}) \cdot (\text{Longitud})$$

$$\text{Área de la carretera} = (22\text{m}) \cdot (1,000\text{m})$$

$$\text{Área de la carretera} = 22,000\text{m}^2$$

¹² Especificaciones Generales de Construcción 1974 México Secretaría de Obras Públicas.

b) Volumen del riego de impregnación. El riego de impregnación se realiza con asfalto de fraguado medio del número 1 (FM-1), y este es de 1.5 l/m^2 . Se aplica antes de tenderse el riego de liga.

$$\text{Volumen FM-1} = (\text{Área de la carretera}) * (\text{Riego de impregnación})$$

$$\text{Volumen FM-1} = (22,000\text{m}^2) * (1.5 \text{ l/m}^2)$$

$$\text{Volumen de FM-1 empleado en el riego de impregnación} = 33,000 \text{ l} = 33.0\text{m}^3$$

c) Volumen del riego de liga. El riego de liga se realiza con asfalto de fraguado rápido del número 3 (FR-3), y éste es de 1.5 l/m^2 . Se aplica en la misma proporción antes y después de tenderse la Base Negra.

$$\text{Volumen FR-3} = (\text{Área de la carretera}) * (\text{Riego de liga}) * (\text{Número de aplicaciones})$$

$$\text{Volumen FR-3} = (22,000\text{m}^2) * (1.5 \text{ l/m}^2) * (2)$$

$$\text{Volumen de FR-3 empleado en los riegos de liga} = 66,000 \text{ l} = 66.0\text{m}^3$$

d) Masa total de cemento asfáltico No.6.

$$\text{Densidad cemento asf. No.6} = (\text{Peso esp. promedio cemento asf. No.6}) * (998 \text{ kg/m}^3)$$

$$\text{Densidad cemento asfáltico No.6} = (1.0279) * (998 \text{ kg/m}^3)$$

$$\text{Densidad cemento asfáltico No.6} = 1025.85\text{kg/m}^3$$

1. Base negra. Ésta tiene un espesor promedio de 10cm. Se emplean en su construcción cemento asfáltico No.6 y agregado pétreo. El cemento asfáltico No.6 necesario equivale al 11% del volumen total de la base negra.

$$\text{Volumen de la base negra} = (\text{Área de la carretera}) * (\text{Espesor de la base negra})$$

$$\text{Volumen de la base negra} = (22,000\text{m}^2) * (0.10\text{m})$$

$$\text{Volumen de la base negra} = 2,200\text{m}^3$$

$$\text{Masa de cemento asfáltico No.6} = (\text{Volumen de la base negra}) * (\text{Dosis}) * (\text{Densidad})$$

$$\text{Masa de cemento asfáltico No.6} = (2,200\text{m}^3) * (0.11) * (1025.85\text{kg/m}^3)$$

Masa de cemento asfáltico No.6 empleado en la base negra = 248,256kg

2. Carpeta asfáltica. Posee un espesor promedio de 7cm. La cantidad de cemento asfáltico No.6 empleado en su elaboración es del 11% del volumen total de la carpeta.

Volumen de la carpeta asfáltica = (Área de la carretera) * (Espesor de la carpeta)

Volumen de la carpeta asfáltica = $(22,000\text{m}^2) * (0.07\text{m})$

Volumen de la carpeta asfáltica = $1,540\text{m}^3$

Masa de cemento asf. No.6 = (Volumen de la carpeta asfáltica) * (Dosis) * (Densidad)

Masa de cemento asfáltico No.6 = $(1,540\text{m}^3) * (0.11) * (1025.85\text{kg}/\text{m}^3)$

Masa de cemento asfáltico No.6 empleado en la carpeta = 173,779kg

3. Riego de sello. Se lleva a cabo con 0.75 l/m² en promedio de cemento asfáltico No.6. Ésta es la capa mas superficial del pavimento asfáltico.

Volumen del riego de sello = (Área de la carretera) * (Dosis empleada)

Volumen del riego de sello = $(22,000\text{m}^2) * (0.75 \text{ l}/\text{m}^2)$

Volumen de cemento asfáltico No.6 empleado en el riego de sello = 16,500 l = 16.5m^3

Masa cemento asf. No.6 = (Volumen) * (Densidad)

Masa cemento asfáltico No.6 = $(16.5\text{m}^3) * (1025.85\text{kg}/\text{m}^3)$

Masa cemento asfáltico No.6 = 16,930kg

Masa total de cemento asfáltico No.6 = 248,256kg + 173,779kg + 16,930kg

Masa total de cemento asfáltico No.6 empleada en un pavimento asfáltico = 438,965kg

5.3.2 CÁLCULO DE UNA CARRETERA DE ALTA ESPECIFICACIÓN CON LA TÉCNICA DE CONSTRUCCIÓN *STONE MASTIC ASPHALT* (SMA) ⁽¹⁷⁾

Para una carretera de alta especificación (A4S), que consta con los elementos anteriormente mencionados. La secuencia de cálculo para cada kilómetro es:

a) Área de la carretera

Área de la carretera = (Ancho) * (Longitud)

Área de la carretera = (22m) * (1,000m)

Área de la carretera = 22,000m²

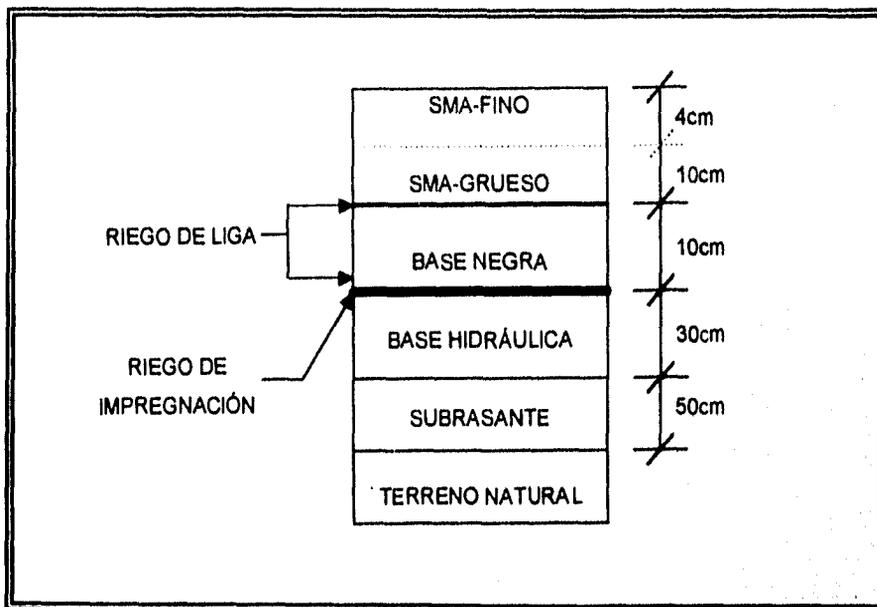


Figura 5.9

Secciones de una Carretera Pavimentada por el Método SMA ⁽¹⁷⁾

¹⁷ European Asphalt Study Tour. 1991. USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.

b) Volumen del riego de impregnación. El riego de impregnación se realiza con asfalto de fraguado medio del número 1 (FM-1), y este es de 1.5 l/m². Se aplica antes de tenderse el riego de liga.

$$\text{Volumen FM-1} = (\text{Área de la carretera}) * (\text{Riego de impregnación})$$

$$\text{Volumen FM-1} = (22,000\text{m}^2) * (1.5 \text{ l/m}^2)$$

$$\text{Volumen de FM-1 empleado en el riego de impregnación} = 33,000 \text{ l} = 33.0\text{m}^3$$

c) Volumen del riego de liga. El riego de liga se realiza con asfalto de fraguado rápido del número 3 (FR-3), y éste es de 1.5 l/m². Se aplica en la misma proporción antes y después de tenderse la base negra.

$$\text{Volumen FR-3} = (\text{Área de la carretera}) * (\text{Riego de liga}) * (\text{Número de aplicaciones})$$

$$\text{Volumen FR-3} = (22,000\text{m}^2) * (1.5 \text{ l/m}^2) * (2)$$

$$\text{Volumen de FR-3 empleado en los riegos de liga} = 66,000 \text{ l} = 66.0\text{m}^3$$

d) Masa total de cemento asfáltico No.6.

$$\text{Densidad cemento asf. No.6} = (\text{Peso esp. promedio cemento asf. No.6}) * (998\text{kg/m}^3)$$

$$\text{Densidad cemento asfáltico No.6} = (1.0279) * (998\text{kg/m}^3)$$

$$\text{Densidad cemento asfáltico No.6} = 1025.85\text{kg/m}^3$$

1. Base negra. Ésta tiene un espesor promedio de 10cm. Se emplean en su construcción cemento asfáltico No.6 y agregado pétreo. El cemento asfáltico No.6 necesario equivale al 11% del volumen total de la base negra.

$$\text{Volumen de la base negra} = (\text{Área de la carretera}) * (\text{Espesor de la base negra})$$

$$\text{Volumen de la base negra} = (22,000\text{m}^2) * (0.10\text{m})$$

$$\text{Volumen de la base negra} = 2,200\text{m}^3$$

$$\text{Masa de cemento asfáltico No.6} = (\text{Volumen de la base negra}) * (\text{Dosis}) * (\text{Densidad})$$

$$\text{Masa de cemento asfáltico No.6} = (2,200\text{m}^3) * (0.11) * (1025.85\text{kg/m}^3)$$

Masa de cemento asfáltico No.6 empleado en la base negra = 248,256kg

2. Capa SMA. Posee un espesor promedio de 14cm. La cantidad de cemento asfáltico No.6 empleado en su elaboración es de un 6.5 a 7.5% del peso volumétrico total de la mezcla, la porción de agregado grueso de un 8 a 13% del peso total de la mezcla, y la porción de agregados finos es de un 70 a 80% del peso total de la mezcla.

Volumen de la capa de SMA = (Área de la carretera) * (Espesor de la capa)

Volumen de la capa de SMA = $(22,000\text{m}^2) * (0.14\text{m})$

Volumen de la capa de SMA = $3,080\text{m}^3$

Peso volumétrico de la mezcla = (Volumen capa SMA) * (2.2 ton/m^3)

Peso volumétrico de la mezcla = $(3,080\text{m}^3) * (2.2\text{ ton/m}^3)$

Peso volumétrico de la mezcla = 6,776ton = 6,776,000kg

Masa de cemento asfáltico No.6 = (Peso volumétrico de la mezcla) * (0.07)

Masa de cemento asfáltico No.6 = $(6,776,000\text{kg}) * (0.07)$

Masa de cemento asfáltico No.6 usado en la capa SMA = 474,320kg

Masa total de cemento asfáltico No.6 = 248,256kg + 474,320kg

Masa total de cemento asfáltico No.6 empleada en un pavimento asfáltico = 722,576kg

e) Masa de polímero. Como se explicó anteriormente se usará un polímero tipo SBS en la preparación de la capa SMA. Éste se dosificará en un 5% del peso del cemento asfáltico empleado en dicha capa.

Masa polímero = (Masa cemento asf. No.6 de capa SMA) * (0.05)

Masa polímero = $(474,320\text{kg}) * (0.05)$

Masa polímero tipo SBS = 23,716kg

f) Cantidad de fibra mineral. La tecnología de construcción SMA emplea fibra mineral en una porción del 6% del peso volumétrico total de la mezcla. Ésta se incorpora junto con el polímero y la cal.

$$\text{Masa fibra mineral} = (\text{Peso volumétrico de la mezcla}) * (0.06)$$

$$\text{Masa fibra mineral} = (6,776,000\text{kg}) * (0.06)$$

$$\text{Masa fibra mineral} = 406,560\text{kg}$$

g) Cantidad de cal. Es de un 1.5% del peso total del agregado, la cantidad usada en las mezclas SMA de cal.

Si se emplea un 7% de cemento asfáltico del No.6 en la fabricación de la mezcla, el peso total del agregado será:

$$\text{Peso total del agregado} = (\text{Peso volumétrico de la mezcla}) * (0.93)$$

$$\text{Peso total del agregado} = (6,776,000\text{kg}) * (0.93)$$

$$\text{Peso total del agregado en la capa SMA} = 6,301,680\text{kg}$$

$$\text{Peso cal} = (\text{Peso total del agregado en la capa SMA}) * (0.015)$$

$$\text{Peso cal} = (6,301,680) * (0.015)$$

$$\text{Cantidad de cal requerida} = 94,530\text{kg}$$

Es importante recordar, que este tipo de construcción no requiere de riego de sello, ya que afectaría directamente la porosidad requerida.

5.3.3 CÁLCULO DE UNA CARRETERA DE ALTA ESPECIFICACIÓN CON EL MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN POROUS ASPHALT (PA) ⁽²⁰⁾

Para una carretera de alta especificación (A4S), que consta con los elementos anteriormente mencionados.

a) Área de la carretera

Área de la carretera = (Ancho) * (Longitud)

Área de la carretera = (22m) * (1.000m)

Área de la carretera = 22,000m²

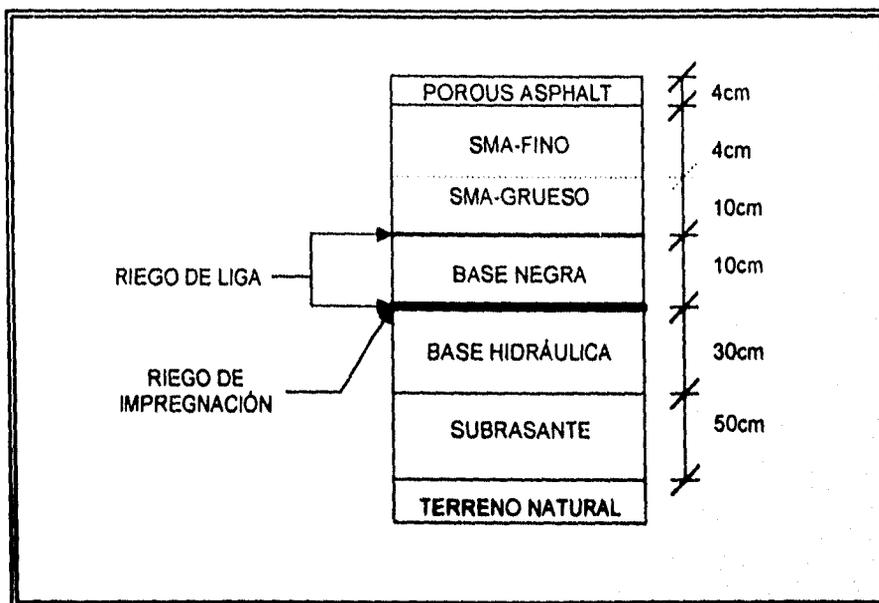


Figura 5.10

Secciones de una Carretera Pavimentada con el Método PA ⁽²⁰⁾

²⁰ Open-Graded Asphalt Friction Course, 1993 USA, National Asphalt Pavement Association.

b) Volumen del riego de impregnación. El riego de impregnación se realiza con asfalto de fraguado medio del número 1 (FM-1), y este es de 1.5 l/m². Se aplica antes de tenderse el riego de liga.

$$\text{Volumen FM-1} = (\text{Área de la carretera}) * (\text{Riego de impregnación})$$

$$\text{Volumen FM-1} = (22,000\text{m}^2) * (1.5 \text{ l/m}^2)$$

$$\text{Volumen de FM-1 empleado en el riego de impregnación} = 33,000 \text{ l} = 33.0\text{m}^3$$

c) Volumen del riego de liga. El riego de liga se realiza con asfalto de fraguado rápido del número 3 (FR-3), y éste es de 1.5 l/m². Se aplica en la misma proporción antes y después de tenderse la base negra.

$$\text{Volumen FR-3} = (\text{Área de la carretera}) * (\text{Riego de liga}) * (\text{Número de aplicaciones})$$

$$\text{Volumen FR-3} = (22,000\text{m}^2) * (1.5 \text{ l/m}^2) * (2)$$

$$\text{Volumen de FR-3 empleado en los riegos de liga} = 66,000 \text{ l} = 66.0\text{m}^3$$

d) Base negra. Ésta tiene un espesor promedio de 10cm. Se emplean en su construcción cemento asfáltico No.6 y agregado pétreo. El cemento asfáltico No.6 necesario equivale al 11% del volumen total de la base negra.

$$\text{Volumen de la base negra} = (\text{Área de la carretera}) * (\text{Espesor de la base negra})$$

$$\text{Volumen de la base negra} = (22,000\text{m}^2) * (0.10\text{m})$$

$$\text{Volumen de la base negra} = 2,200\text{m}^3$$

$$\text{Masa de cemento asfáltico No.6} = (\text{Volumen de la base negra}) * (\text{Dosis}) * (\text{Densidad})$$

$$\text{Masa de cemento asfáltico No.6} = (2,200\text{m}^3) * (0.11) * (1025.85\text{kg/m}^3)$$

$$\text{Masa de cemento asfáltico No.6 empleado en la base negra} = 246,256\text{kg}$$

e) Capa SMA. Posee un espesor promedio de 14cm. La cantidad de cemento asfáltico No.6 empleado en su elaboración es de un 6.5 a 7.5% del peso volumétrico total de la mezcla, la porción de agregado grueso de un 8 a 13% del peso total de la mezcla, y la porción de agregados finos es de un 70 a 80% del peso total de la mezcla.

Volumen de la capa de SMA = (Área de la carretera) * (Espesor de la capa)

Volumen de la capa de SMA = $(22,000\text{m}^2) * (0.14\text{m})$

Volumen de la capa de SMA = $3,080\text{m}^3$

Peso volumétrico de la mezcla = (Volumen capa SMA) * (2.2 ton/m^3)

Peso volumétrico de la mezcla = $(3,080\text{m}^3) * (2.2\text{ ton/m}^3)$

Peso volumétrico de la mezcla = $6,776\text{ton} = 6,776,000\text{kg}$

Masa de cemento asfáltico No.6 = (Peso volumétrico de la mezcla) * (0.07)

Masa de cemento asfáltico No.6 = $(6,776,000\text{kg}) * (0.07)$

Masa de cemento asfáltico No.6 usado en la capa SMA = $474,320\text{kg}$

Peso total del agregado = (Peso volumétrico de la mezcla) * (0.93)

Peso total del agregado = $(6,776,000\text{kg}) * (0.93)$

Peso total del agregado en la capa SMA = $6,301,680\text{kg}$

1. Masa de polímero consumida en la capa SMA. Como se explicó anteriormente se usará un polímero tipo SBS en la preparación de la capa SMA. Éste se dosificará en un 5% del peso del cemento asfáltico empleado en dicha capa.

Masa polímero = (Masa cemento asf. No.6 de capa SMA) * (0.05)

Masa polímero = $(474,320\text{kg}) * (0.05)$

Masa polímero tipo SBS = $23,716\text{kg}$

2. Cantidad de fibra mineral consumida en la capa SMA. La tecnología de construcción SMA emplea fibra mineral en una porción del 6% del peso volumétrico total de la mezcla. Ésta se incorpora junto con el polímero y la cal.

Masa fibra mineral = (Peso volumétrico de la mezcla) * (0.06)

Masa fibra mineral = $(6,776,000\text{kg}) * (0.06)$

Masa fibra mineral = $406,560\text{kg}$

3. Cantidad de cal empleada en la capa SMA. Es de un 1.5% del peso total del agregado, la cantidad usada en las mezclas SMA de cal.

$$\text{Peso cal} = (\text{Peso total del agregado en la capa SMA}) * (0.015)$$

$$\text{Peso cal} = (6,301,680\text{kg}) * (0.015)$$

$$\text{Cantidad de cal requerida} = 94,530\text{kg}$$

f) Capa PA. Ésta posee un espesor aproximado de 4cm. Es la capa más superficial, y no requiere de negro de sello, ya que afectaría directamente la porosidad requerida para drenar el agua. Se emplea en su construcción únicamente agregado grueso y cemento asfáltico No.6, en una proporción de 93% y 7% respectivamente. La cantidad de fibra mineral empleada en esta técnica es del 8% del peso total de la mezcla; 1.5% del peso total del agregado, lo consumido de cal; y, 5% del peso del cemento asfáltico No.6 lo necesario de polímero.

$$\text{Volumen de la capa PA} = (\text{Área}) * (\text{Espesor promedio de la capa PA})$$

$$\text{Volumen de la capa PA} = (22,000\text{m}^2) * (0.04\text{m})$$

$$\text{Volumen de la capa PA} = 880\text{m}^3$$

$$\text{Peso volumétrico de la mezcla} = (\text{Volumen de la capa PA}) * (2.2\text{ton/m}^3)$$

$$\text{Peso volumétrico de la mezcla} = (880\text{m}^3) * (2.2\text{ton/m}^3)$$

$$\text{Peso volumétrico total de la mezcla} = 1,936\text{ton} = 1,936,000\text{kg}$$

$$\text{Peso volumétrico del agregado} = (\text{Peso volumétrico total de la mezcla}) * (0.93)$$

$$\text{Peso volumétrico del agregado} = (1,936,000\text{kg}) * (0.93)$$

$$\text{Peso volumétrico del agregado grueso en la capa PA} = 1,800,500\text{kg}$$

$$\text{Masa de cemento asfáltico No.6} = (\text{Peso volumétrico total de la mezcla}) * (0.07)$$

$$\text{Masa de cemento asfáltico No.6} = (1,936,000\text{kg}) * (0.07)$$

$$\text{Masa de cemento asfáltico No.6 empleada en la capa PA} = 135,520\text{kg}$$

$$\text{Masa de fibra mineral} = (\text{Peso volumétrico total de la mezcla}) * (0.08)$$

$$\text{Masa de fibra mineral} = (1,936,000\text{kg}) * (0.08)$$

Masa de fibra mineral necesaria en la capa PA = 154,880kg

Masa de cal = (Peso volumétrico del agregado grueso en la capa PA) * (0.015)

Masa de cal = (1,800,500kg) * (0.015)

Masa de cal requerida en la capa PA = 27,010kg

Masa de polímero tipo SBS = (Masa de cemento asfáltico No.6, capa PA) * (0.05)

Masa de polímero tipo SBS = (135,520kg) * (0.05)

Masa de polímero tipo SBS consumido en la capa PA = 6,776kg

Los materiales requeridos para la construcción total de un kilómetro de carpeta para una carretera tipo A4S se presentan en la tabla siguiente:

TABLA 5-7
MATERIALES REQUERIDOS PARA CONSTRUIR UN KILÓMETRO DE CARPETA PARA
UNA CARRETERA TIPO A4S

| MATERIAL | PAVIMENTO COMÚN | PAVIMENTO EMPLEANDO LA TECNOLOGÍA SMA | PAVIMENTO EMPLEANDO LA TECNOLOGÍA PA |
|-----------------------------------|------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Asfalto de fraguado medio (FM-1) | 33m ³ | 33m ³ | 33m ³ |
| Asfalto de fraguado rápido (FR-3) | 66m ³ | 66m ³ | 66m ³ |
| Cemento asfáltico No.6 | 438,965kg | 722,576kg | 658,096kg |
| Fibra mineral | - | 406,560kg | 561,440kg |
| Polímero tipo SBS | - | 23,716kg | 30,492kg |
| Cal | - | 94,530kg | 121,540kg |

5.3.4 COSTO DEL KILÓMETRO DE CARRETERA TIPO A4S

Los precios unitarios promedio de algunas de las materias primas para construcción de carreteras se muestran a continuación:

TABLA 5-8
 PRECIOS UNITARIOS PROMEDIO DE MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS EN LA
 CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS

| MATERIA PRIMA | COSTO |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Asfalto de Fraguado Medio (FM-1) | N\$910.00/m ³ |
| Asfalto de Fraguado Rápido (FR-3) | N\$910.00/m ³ |
| Cemento Asfáltico No.6 | N\$0.59/kg |
| Cal | N\$160.00/ton |
| Fibra Mineral | N\$5,850.00/ton |
| Polímero Tipo SBS | N\$5,500.00/ton |
| Malla Metálica para Reencarpetado | N\$26.00/m ² |

NOTA: Precios durante Septiembre de 1995.

La malla metálica es una alternativa empleada para el reencarpetado. Cuando se tiene que reencarpetar una carretera construida por el método tradicional, se debe extender dicha malla metálica, para después tender la nueva carpeta. En lugar de la malla, se puede remover la carpeta asfáltica inservible, y utilizarse como base negra en nuevas carreteras, pero económicamente, resulta menos favorable.

Un costo aproximado del encarpetado y reencarpetado de un kilómetro de carretera tipo A4S sería en este caso:

TABLA 5-9
COSTO APROXIMADO DEL ENCARPETADO Y REENCARPETADO DE UN KILÓMETRO
DE CARRETERA TIPO A4S

| | PRECIO UNITARIO ** | CANTIDAD | IMPORTE |
|--|----------------------------|----------------------|--------------------|
| <i>Carpeta Tradicional:</i> | | | |
| Riego de Liga | N\$2.37/l | 66,000 l | N\$156,420.00 |
| Carpeta Asfáltica Tradicional | N\$375.55/m ³ | 1,540m ³ | N\$578,347.00 |
| Riego de Sello | N\$1.78/l | 16,500 l | N\$29,370.00 |
| TOTAL | | | N\$784,137.00/km |
| <i>Carpeta Tipo SMA:</i> | | | |
| Riego de Liga | N\$2.37/l | 66,000 l | N\$156,420.00 |
| Carpeta Asfáltica SMA | N\$1,508.55/m ³ | 3,080m ³ | N\$4,648,334.00 |
| TOTAL | | | N\$4,802,754.00/km |
| <i>Carpeta Tipo PA:</i> | | | |
| Riego de Liga | N\$2.37/l | 66,000 l | N\$156,420.00 |
| Carpeta Asfáltica SMA | N\$1,508.55/m ³ | 3,080m ³ | N\$4,648,334.00 |
| Carpeta Asfáltica PA | N\$1,640.75/m ² | 880m ² | N\$1,443,660.00 |
| TOTAL | | | N\$6,246,614.00/km |
| <i>Reencarpetao para Mezclas Tradicionales</i> | | | |
| Riego de Liga | N\$2.37/l | 66,000 l | N\$156,420.00 |
| Carpeta Asfáltica Tradicional | N\$375.55/m ³ | 1,540m ³ | N\$578,347.00 |
| Riego de Sello | N\$1.78/l | 16,500 l | N\$29,370.00 |
| Malla Metálica | N\$26.00/m ² | 22,000m ² | N\$572,000.00 |
| TOTAL | | | N\$1,336,137.00/km |

NOTA: Precios para Septiembre de 1995.

** Los cálculos detallados se presentan en el Apéndice C.

5.3.5. COMPARACIÓN ECONÓMICA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ENCARPETADO.

Tomando en cuenta los costos de construcción de cada tipo de encarpado y estimando también, que con el método tradicional se debe reencarpetar cada 3 años en climas templados, se puede calcular el interés real (interés bancario sobre la inflación) máximo para el cual resulta conveniente utilizar SMA en lugar de la técnica tradicional. Esto se hace con el método del valor presente neto. El interés calculado es de 7.4%. Si se cuenta con el capital necesario para construir la carretera con SMA y el rendimiento bancario es superior a 7.4% sobre la inflación, es mejor construir con la técnica tradicional e invertir el resto en el banco. Actualmente, el rendimiento está muy por debajo de esta cantidad y es muy poco probable que la alcance sostenidamente en el futuro. Por esto, el SMA es la mejor opción si se cuenta con el capital necesario.

Con respecto al método de construcción PA se repite el mismo caso que con el SMA, con la diferencia que en climas con muchas precipitaciones y alta humedad, el reencarpado es cada 2 años.

En el caso de carreteras en lugares muy lluviosos, el reencarpamiento se debe hacer cada 2 años y siguiendo el mismo razonamiento que en el párrafo anterior, el PA es más rentable siempre que se cuente con el capital inicial y el interés sobre la inflación no supere el 9.3 %.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El Sistema Carretero moviliza el 98% de los pasajeros y el 60% de la carga a nivel nacional, es por esto que su estado, funcionamiento y desarrollo son de vital importancia para el país. Si México pretende competir en la economía global, debe contar con un sistema carretero a la altura del de sus competidores y socios comerciales.

Basado en lo anterior surgió el presente trabajo que después de haber mostrado aspectos generales de los materiales asfálticos y métodos de pavimentación de carreteras concluye lo siguiente:

1. Un asfalto es un material cementoso de color café oscuro a negro, cuyos constituyentes predominantes son bitúmenes. Éste se puede obtener de manera natural o como residuo durante el proceso de refinación del petróleo.
2. Se prefiere como material de construcción de pavimentos un asfalto, por las diferentes constituciones y espesores que puede ofrecer; por la facilidad de reciclarlo, bachearlo y ensancharlo; por su bajo costo y el del equipo necesario para manejarlo; y porque proporciona un tráfico silencioso.
3. En base al análisis de mercado para los asfaltos, podemos concluir que tomando en cuenta la capacidad de destilación, las reservas nacionales y el consumo nacional aparente queda asentado que PEMEX podrá satisfacer la demanda de asfaltos para un futuro previsible.
4. Las Normas de Calidad de los Materiales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes rigen de manera adecuada los materiales asfálticos producidos en nuestro país, por lo tanto, no es necesaria ninguna modificación, sino vigilar su cumplimiento, ya que el monopolio existente favorece su violación. Una vez señalado y cumplido lo anterior, los asfaltos mexicanos podrían ser un producto más de exportación, ya que las normas mexicanas que los rigen son parecidas a las extranjeras.

5. Es necesario concientizar a las instituciones gubernamentales pertinentes, de que las técnicas de construcción de pavimentos asfálticos son obsoletas y representan un gasto económico a largo plazo mucho mayor, que el de una tecnología de pavimentación nueva.

Se recomienda ampliamente el uso de mezclas con la tecnología SMA para climas templados. Es favorable económica y técnicamente sobre el método de construcción tradicional, ya que brinda duraciones de hasta 20 años con inversiones iniciales mayores a las mezclas tradicionales, pero con gastos de mantenimiento mínimos.

No es admisible, que se continúe produciendo una misma mezcla para los diferentes tipos de clima presentes en el país, ya que esto provoca mayores gastos en el mantenimiento de la infraestructura carretera. Por lo anterior, se recomienda ampliamente el uso de la tecnología de pavimentación *Porous Asphalt (PA)*, para zonas donde las precipitaciones y humedad sean abundantes. Esta tecnología garantiza un periodo en buen estado de 20 años, con una inversión inicial mayor que la de las mezclas fabricadas por el método tradicional, pero con gastos de mantenimiento mayor nulos.

A pesar de todas las ventajas tecnológicas, económicas y durables que ofrecen estas nuevas tecnologías de pavimentación, debemos vencer algunas barreras para implantarlas tales como la dificultad para introducir estas técnicas a nivel ejecutivo, y más aún, a nivel burocrático; contar con el personal adecuado que aprenda, evalúe e implemente los diferentes procesos; el manejo de los equipos requiere de técnicos calificados, especialmente entrenados; y finalmente, los contratistas deben de tomar también en sus manos el control de calidad y no dejarlo sólo en manos de las dependencias del Gobierno.

Es un reto lograr que una implementación normativa de éste tipo pueda tener una continuidad de un sexenio a otro, pero dependerá de nuestro esfuerzo alcanzarlo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Martin, J. R. 1963. Pavimentos Asfálticos: Proyecto y Construcción. España: Aguilar S. A. de Ediciones.
2. Pfeiffer, J. P. 1950. The Properties of Asphaltic Bitumen. Holanda: Elsevier Publishing Company, Inc.
3. Roofing, Waterproofing, and Bituminous Materials. 1989. USA: American Society of Testing Materials (ASTM).
4. Normas para Muestreo y Pruebas de los Materiales, Equipos y Sistemas. 1991. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).
5. Barth, J. E. 1962. Asphalt: Science and Technology. USA: Gordon & Breach Science Publishers.
6. Katz, D. y Beu, K. 1945. Nature of Asphaltic Substances. Industrial and Engineering Chemistry, 37, 195-200.
7. Fernández Loaiza, C. 1995. Normas para el Control de Pavimentos (Diseño de Mezclas). Ingeniería Civil. 310, 31-35.
8. Rodríguez Gómez, J. L. et al. 1985. Asfaltenos. Tesis inédita para licenciatura. Instituto Politécnico Nacional.
9. Strauz, O. et al. 1992. The Molecular Structure of Asphaltene: An Unfolding Story. Fuel, 71, 1355-1363.

10. Mark, B. et al. 1990. Encyclopedia of Polymer Science and Engineering. USA: John Wiley & Sons.
11. Guide for Design of Pavement Structures. 1986. USA: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
12. Especificaciones Generales de Construcción. 1974. México: Secretaría de Obras Públicas (SOP).
13. The Asphalt Manual. 1969. USA: The Asphalt Institute.
14. Programa Nacional de Autopistas 1989-1994: Propósitos y Logros. 1994. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).
15. Salinas de Gortari, C. 1994. Sexto Informe de Gobierno 1988-1994. México: Poder Ejecutivo.
16. Zedillo Ponce de León, E. 1995. Plan Nacional de Desarrollo 1995-2000. México: Poder Ejecutivo.
17. European Asphalt Study Tour. 1991. USA: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
18. Hawley, G. 1993. Diccionario de Química y de Productos Químicos. España: Omega.
19. Bhowmick, A. K. y De S. K. 1990. Thermoplastic Elastomers from Rubber-Plastic Blends. Reino Unido: Ellis Horwood.
20. Open-Graded Asphalt Friction Course. 1993. USA: National Asphalt Pavement Association (NAPA).

21. Strassburger Frías, P. 1995. Técnicas para Mantenimiento de Carreteras. Ingeniería Civil. 315, 15-21.

22. Thickness Design Asphalt Pavements for Highways & Streets. 1991. USA: The Asphalt Institute.

23. Baca Urbina, G. 1993. Evaluación de Proyectos. México: Mc Graw-Hill.

24. La Industria Petrolera. 1993. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

Literature Survey and Documentation in Organic Solid Deposition Problem. 1993. USA: National Institute of Petroleum and Energy Research.

Manual for Asphalt Pavement. 1989. Japón: Japan Road Association.

Robles Ramos, J. A. et al. 1986. Anteproyecto de una Planta de Asfalto Oxidado. Tesis inédita para licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Polymer Modified Asphalt Binders. 1992. USA: American Society of Testing Materials (ASTM).

Anderson, J. et al. 1995. Redacción de Tesis y Trabajos Escolares. (16a. ed.) México: Diana.

Rodríguez Pérez, H. 1973. Obtención de Asfaltos Mejorados para Carpetas Asfálticas a partir de Bases Residuales del Petróleo. Tesis inédita para licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

APÉNDICE A

ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS (4)

Las características con que deben cumplir los materiales asfálticos, las dicta las Normas de Calidad de los Materiales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Éstas son:

TABLA 1-A (4)
CEMENTOS ASFÁLTICOS

| CARACTERÍSTICAS | CEMENTO ASFÁLTICO | | | |
|--|-------------------|--------|-------|-------|
| | No. 3 | No. 6 | No. 7 | No. 8 |
| Penetración, grados (100g, 5seg, 25°C) | 180-200 | 60-100 | 60-70 | 40-50 |
| Viscosidad Saybolt-Furol, s mínimo (135°C) | 60 | 85 | 100 | 120 |
| Punto de Inflamación, °C mínimo (copa abierta de Cleveland) | 220 | 232 | 232 | 232 |
| Punto de Reblandecimiento, °C | 37-43 | 45-52 | 48-56 | 52-60 |
| Ductilidad, mínimo (25°C) | 80 | 100 | 100 | 100 |
| Solubilidad en CCl ₄ , % mínimo | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| <i>Prueba de la Pellicula Delgada (50cm², 5h, 163°C):</i> | | | | |
| Penetración Retenida, % mínimo | 40 | 50 | 54 | 58 |
| Pérdida por Calentamiento, % máximo | 1.4 | 1.0 | 0.8 | 0.6 |

⁴ Normas Para Muestreo y Pruebas de los Materiales, Equipos y Sistemas. 1991. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

TABLA 2-A ⁽⁴⁾
 ASFALTOS REBAJADOS DE FRAGUADO RÁPIDO

| CARACTERÍSTICAS | GRADO | | | | |
|--|--------|--------|---------|---------|---------|
| | FR-0 | FR-1 | FR-2 | FR-3 | FR-4 |
| <i>Pruebas al Material Asfáltico:</i> | | | | | |
| Punto de Inflamación, °C mínimo (copa abierta de Tagliabue) | - | - | 27 | 27 | 27 |
| <i>Viscosidad Saybolt-Furol:</i> | | | | | |
| A 25°C, segundos | 75-150 | - | - | - | - |
| A 50°C, segundos | - | 75-150 | - | - | - |
| A 60°C, segundos | - | - | 100-200 | 250-500 | - |
| A 82°C, segundos | - | - | - | - | 125-250 |
| <i>Destilación, % del Total Destilado (360°C):</i> | | | | | |
| Hasta 190°C, mínimo | 15 | 10 | - | - | - |
| Hasta 225°C, mínimo | 55 | 50 | 40 | 25 | 8 |
| Hasta 260°C, mínimo | 75 | 70 | 65 | 55 | 40 |
| Hasta 315°C, mínimo | 90 | 88 | 87 | 83 | 80 |
| <i>Residuo de la Destilación (360°C):</i> | | | | | |
| % del Volumen Total por Diferencia, mínimo | 50 | 80 | 67 | 73 | 78 |
| % de Agua por Destilación, mínimo | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| <i>Pruebas al Residuo de Destilación:</i> | | | | | |
| Penetración, grados | 80-120 | 80-120 | 80-120 | 80-120 | 80-120 |
| Ductilidad, cm mínimo | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Solubilidad en CCl ₄ , % mínimo | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |

⁴ id.

TABLA 3-A (4)
 ASFALTOS REBAJADOS DE FRAGUADO MEDIO

| CARACTERÍSTICAS | GRADO | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| | FM-0 | FM-1 | FM-2 | FM-3 | FM-4 |
| <i>Pruebas al Material Asfáltico:</i> | | | | | |
| Punto de Inflamación, °C mínimo (copa abierta de Tagliabue) | 38 | 38 | 66 | 66 | 66 |
| <i>Viscosidad Saybolt-Furol:</i> | | | | | |
| A 25°C, segundos | 75-150 | - | - | - | - |
| A 50°C, segundos | - | 75-150 | - | - | - |
| A 60°C, segundos | - | - | 100-200 | 250-500 | - |
| A 82°C, segundos | - | - | - | - | 125-250 |
| <i>Destilación, % del Total Destilado (360°C):</i> | | | | | |
| Hasta 225°C, mínimo | 25 | 20 | 10 | 5 | 0 |
| Hasta 280°C, mínimo | 40-70 | 25-65 | 15-55 | 5-40 | 30 Máx. |
| Hasta 315°C, mínimo | 75-93 | 70-90 | 60-87 | 55-85 | 40-60 |
| <i>Residuo de la Destilación (380 °C):</i> | | | | | |
| % del Volumen Total por Diferencia, mínimo | 50 | 60 | 67 | 73 | 78 |
| % de Agua por Destilación, mínimo | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| <i>Pruebas al Residuo de Destilación:</i> | | | | | |
| Penetración, grados | 120-300 | 120-300 | 120-300 | 120-300 | 120-300 |
| Ductilidad, cm mínimo | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Solubilidad en CCl ₄ , % mínimo | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |

TABLA 4-A (4)
 ASFALTOS REBAJADOS DE FRAGUADO LENTO

| CARACTERÍSTICAS | GRADO | | | | |
|---|--------|--------|---------|---------|---------|
| | FL-0 | FL-1 | FL-2 | FL-3 | FL-4 |
| <i>Pruebas al Material Asfáltico:</i> | | | | | |
| Punto de Inflamación, °C mínimo (copa abierta de Cleveland) | 66 | 66 | 80 | 93 | 107 |
| <i>Viscosidad Saybolt-Furol:</i> | | | | | |
| A 25°C, segundos | 75-150 | - | - | - | - |
| A 50°C, segundos | - | 75-150 | - | - | - |
| A 60°C, segundos | - | - | 100-200 | 250-500 | - |
| A 82°C, segundos | - | - | - | - | 125-250 |
| Destilación, % del Total Destilado (360°C): | 15-40 | 10-30 | 5-25 | 2-15 | 10 Máx. |
| % de Agua por Destilación, máximo | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Residuo Asfáltico de 100 grados de Penetración, % mínimo | 40 | 50 | 60 | 70 | 75 |
| <i>Pruebas al Residuo de Destilación:</i> | | | | | |
| Flotación en el Residuo de Destilación, segundos (25°C) | 15-100 | 20-100 | 25-100 | 50-125 | 60-150 |
| Ductilidad del Residuo Asfáltico de 100 grados de Penetración, cm mínimo (25°C) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Solubilidad en CCl ₄ , % mínimo | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |

4 id.

En las Normas para Muestreo y Pruebas de los Materiales Equipos y Sistemas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes ⁽⁴⁾ se incluyen las técnicas para llevar a cabo las determinaciones experimentales de las propiedades de los asfaltos y demás materiales de construcción de carreteras. A continuación se mencionan las clasificaciones de estas pruebas para materiales asfálticos:

TABLA 5-A ⁽⁴⁾
PRUEBAS EN CEMENTOS ASFÁLTICOS

| PRUEBAS | CLASIFICACIÓN |
|---|---------------|
| Preparación de la Muestra | 011-C.01 |
| Peso Específico Relativo o Densidad | 011-C.02 |
| Viscosidad Saybolt-Furol | 011-C.03 |
| Penetración | 011-C.04 |
| Ductilidad | 011-C.05 |
| Solubilidad en Tetracloruro de Carbono o Tricloroetileno | 011-C.06 |
| Punto de Inflamación | 011-C.07 |
| Punto de Reblandecimiento (Método de Anillo y Esfera) | 011-C.08 |
| Prueba de la Película Delgada y Determinación de la Pérdida por Calentamiento | 011-C.09 |
| Contenido de Agua por Destilación | 011-C.10 |

⁴ id.

TABLA 6-A ⁽⁴⁾
 PRUEBAS EN ASFALTOS REBAJADOS DE FRAGUADO RÁPIDO Y DE FRAGUADO
 MEDIO

| PRUEBAS | CLASIFICACIÓN |
|---|---------------|
| Preparación de la Muestra | 011-D.01 |
| Peso Específico Relativo o Densidad | 011-D.02 |
| Viscosidad Saybolt-Furol | 011-D.03 |
| Punto de Inflamación | 011-D.04 |
| Destilación | 011-D.05 |
| Contenido de Agua por Destilación | 011-D.06 |
| Pruebas en el Residuo de la Destilación | 011-D.07 |

TABLA 7-A ⁽⁴⁾
 PRUEBAS EN ASFALTOS REBAJADOS DE FRAGUADO LENTO

| PRUEBAS | CLASIFICACIÓN |
|---|---------------|
| Preparación de la Muestra | 011-E.01 |
| Peso Específico Relativo o Densidad | 011-E.02 |
| Viscosidad Saybolt-Furol | 011-E.03 |
| Punto de Inflamación | 011-E.04 |
| Destilación | 011-E.05 |
| Contenido de Agua por Destilación | 011-E.06 |
| Prueba de Flotación en el Residuo | 011-E.07 |
| Contenido de Residuo Asfáltico de 100 grados de penetración | 011-E.08 |
| Ductilidad del Residuo Asfáltico de 100 grados de penetración | 011-E.09 |
| Solubilidad en Tetracloruro de Carbono o Tricloroetileno | 011-E.10 |

⁴ id.

APÉNDICE B

SITUACIÓN DETALLADA DEL SISTEMA CARRETERO NACIONAL

A continuación, se presenta la situación detallada del sistemas carretero nacional, es decir, el estado de las carreteras federales, estatales, caminos rurales, algunas estadísticas de ingresos por parte de Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos, y el monto de las inversiones en construcción, modernización y reconstrucción de carreteras, para los últimos años.

TABLA I-B (15)
CARACTERÍSTICAS DE LA RED FEDERAL DE CARRETERAS

| AÑO | TRONCAL FEDERAL | | | | | |
|-------------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|------------|------------|
| | DE CUOTA | | LIBRES | | | |
| | PAVIMENTADOS | | PAVIMENTADOS | | TERRACERÍA | REVESTIDAS |
| | DOS CARRILES | CUATRO CARRILES | DOS CARRILES | CUATRO CARRILES | | |
| 1989 | 320 | 911 | 40,692 | 2,892 | 326 | 1,795 |
| 1990 | 335 | 1,426 | 40,488 | 3,134 | 326 | 1,795 |
| 1991 | 321 | 2,341 | 40,492 | 3,399 | 137 | 1,795 |
| 1992 | 330 | 3,140 | 40,323 | 3,505 | 185 | 1,795 |
| 1993 | 573 | 4,096 | 40,227 | 3,079 | 153 | 1,827 |
| 1994 | 725 | 4,731 | 39,779 | 2,836 | 163 | 726 |
| 1995 ^a | 655 | 5,287 | 39,811 | 3,217 | 91 | 1,079 |

NOTA: Datos reportados en kilómetros.

¹⁵ Salinas de Gortari, C. 1994. *Sexto Informe de Gobierno 1988-1994*. México: Poder Ejecutivo.

^a Datos estimados.

TABLA 2-B ⁽¹⁵⁾
 CARACTERÍSTICAS DE LAS CARRETERAS ESTATALES

| AÑO | ALIMENTADORAS ESTATALES | | | |
|-------|-------------------------|-----------------|------------|------------|
| | PAVIMENTADOS | | TERRACERÍA | REVESTIDAS |
| | DOS CARRILES | CUATRO CARRILES | | |
| 1989 | 33,776 | 962 | 2,594 | 23,158 |
| 1990 | 35,172 | 962 | 2,531 | 22,443 |
| 1991 | 35,921 | 962 | 2,468 | 21,757 |
| 1992 | 36,678 | 962 | 2,230 | 21,866 |
| 1993 | 37,121 | 781 | 2,230 | 21,866 |
| 1994 | 42,088 | 763 | 1,279 | 13,234 |
| 1995* | 38,217 | 776 | 1,564 | 16,371 |

NOTA: Datos reportados en kilómetros.

TABLA 3-B ⁽¹⁵⁾
 CARACTERÍSTICAS DE LOS CAMINOS RURALES

| AÑO | CAMINOS RURALES | | |
|-------|-----------------|------------|------------|
| | PAVIMENTADOS | TERRACERÍA | REVESTIDAS |
| 1989 | 2,408 | 861 | 93,244 |
| 1990 | 2,408 | 861 | 94,234 |
| 1991 | 2,495 | 896 | 96,058 |
| 1992 | 2,495 | 643 | 96,584 |
| 1993 | 2,495 | 643 | 96,973 |
| 1994 | 3,281 | 23,372 | 133,721 |
| 1995* | 2,959 | 13,545 | 118,540 |

NOTA: Datos reportados en kilómetros.

¹⁵ id.

* Datos estimados.

TABLA 4-B ⁽¹⁵⁾
 ESTADÍSTICAS REGISTRADAS POR CAMINOS Y PUENTES FEDERALES DE INGRESOS Y
 SERVICIOS CONEXOS

| AÑO | CAMINOS | | | | |
|-------|--------------|-----------------------------|--|--|---------------------------------|
| | EN OPERACIÓN | LONGITUD TOTAL (KILÓMETROS) | TRÁNSITO DE VEHÍCULOS (MILES DE VEHÍCULOS/AÑO) | INGRESOS POR PEAJE (MILES DE NUEVOS PESOS) | EGRESOS (MILES DE NUEVOS PESOS) |
| 1990 | 14 | 1,831 | 97,652 | 894,426 | 100,230 |
| 1991 | 14 | 1,821 | 95,747 | 1,124,077 | 116,945 |
| 1992 | 14 | 1,871 | 94,501 | 1,335,974 | 173,132 |
| 1993 | 14 | 1,868 | 109,941 | 1,532,666 | 361,695 |
| 1994 | 13 | 1,576 | 84,140 | 1,489,821 | 451,713 |
| 1995* | 11 | 1,656 | 92,196 | 1,921,833 | 586,694 |

TABLA 5-B ⁽¹⁵⁾
 INVERSIONES EN CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS

| AÑO | CONSTRUCCIÓN | | | | |
|-------|--------------|-----------|---------|---------|---------|
| | TOTAL | FEDERAL | CUOTA | ESTATAL | RURAL |
| 1989 | 195,341 | 64,020 | 7,370 | 40,100 | 83,851 |
| 1990 | 475,020 | 78,586 | 189,217 | 138,807 | 68,410 |
| 1991 | 950,703 | 138,415 | 436,340 | 148,143 | 227,805 |
| 1992 | 588,157 | 125,768 | 173,315 | 225,798 | 63,276 |
| 1993 | 1,026,745 | 757,584 | 11,787 | 196,477 | 60,897 |
| 1994 | 2,686,481 | 2,300,060 | 179,400 | 152,428 | 56,573 |
| 1995* | 2,898,257 | 184,963 | 6,426 | 98,272 | 84,123 |

NOTA: Datos reportados en miles de nuevos pesos.

¹⁵ Id.

* Datos estimados.

TABLA 6-B ⁽¹⁵⁾
INVERSIONES EN MODERNIZACIÓN Y RECONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS

| AÑO | MODERNIZACIÓN Y RECONSTRUCCIÓN | | | |
|-------------------|--------------------------------|---------|-----------|--------|
| | TOTAL | FEDERAL | CUOTA | RURAL |
| 1989 | 389,777 | 229,934 | 130,135 | 29,708 |
| 1990 | 1,325,509 | 543,544 | 766,056 | 15,909 |
| 1991 | 5,703,947 | 874,330 | 4,800,512 | 59,105 |
| 1992 | 7,125,412 | 622,011 | 6,430,637 | 4,130 |
| 1993 | 7,669,482 | 459,582 | 7,080,681 | 93,963 |
| 1994 | 7,853,194 | 691,988 | 6,973,800 | 97,761 |
| 1995 ^e | 10,474,251 | 458,833 | 9,493,359 | 96,903 |

NOTA: Datos reportados en miles de nuevos pesos.

TABLA 7-B ⁽¹⁵⁾
INVERSIÓN EN CONSERVACIÓN DE CARRETERAS

| AÑO | CONSERVACIÓN | | | | |
|-------------------|--------------|---------|---------|---------|--------|
| | TOTAL | FEDERAL | CUOTA | ESTATAL | RURAL |
| 1989 | 282,881 | 185,876 | 50,534 | 16,471 | 30,000 |
| 1990 | 244,246 | 149,834 | 50,032 | 15,000 | 29,380 |
| 1991 | 333,430 | 250,342 | 62,084 | 984 | 20,020 |
| 1992 | 236,168 | 172,882 | 54,348 | 1,143 | 7,795 |
| 1993 | 967,340 | 894,323 | 39,854 | 1,612 | 31,551 |
| 1994 | 907,600 | 736,662 | 134,775 | 18,093 | 18,070 |
| 1995 ^e | 923,676 | 830,032 | 78,231 | 11,947 | 16,455 |

NOTA: Datos reportados en miles de nuevos pesos.

¹⁵ id

^e Datos estimados.

CÁLCULOS ECONÓMICOS *

EJEMPLO DEL CÁLCULO DEL COSTO DIRECTO HORA MÁQUINA (HMD)

El costo directo por hora de la maquinaria es un método para colizar y cuantificar los gastos involucrados en un hora de trabajo. Se evalúa para cada máquina involucrada en el proceso de construcción de carreteras. En este caso se ejemplificará el costo directo por hora de una planta de asfalto móvil de una capacidad de 250 toneladas durante el mes de Septiembre de 1995.

Valor de adquisición: N\$13,000,000.00

Valor inicial (Va) : N\$13,000,000.00

Valor de rescate (Vr) : N\$1,950,000.00

Tasa de interés (i) : 25%

Prima de seguro (s) : 2%

Factor de operación: 1.00

Vida económica (Ve) : 10,000horas

Horas por año (Ha) : 2,000horas/año

Factor de mantenimiento (Q) : 1.00

Factor de rendimiento (Fr) : 0.75

Salario integrado por turno (So) : N\$189.85

Horas por turno: 8

* Tanto los métodos de cálculo como los datos fueron proporcionados por compañías dedicadas al ramo de la construcción de carreteras

TABLA 1-C
EJEMPLO DE CÁLCULO DEL COSTO DIRECTO HORA DE MAQUINARIA ACTIVA

| CARGOS FIJOS | | COSTO |
|--|---|--------------------|
| Depreciación ** | $D = (Va - Vr) / Ve$ $D = (13,000,000 - 1,950,000) / 10,000$ | N\$1,105.00 |
| Inversión | $I = [(Va + Vr) * i] / (2 * Ha)$ $I = [(13,000,000 + 1,950,000) * (0.25)] / (2 * 2,000)$ | N\$935.00 |
| Seguros | $S = [(Va + Vr) * s] / (2 * Ha)$ $S = [(13,000,000 + 1,950,000) * (0.02)] / (2 * 2,000)$ | N\$74.75 |
| Mantenimiento | $T = Q * D$ $T = (1.00) * (1,105.00)$ | N\$1,105.00 |
| SUMA DE CARGOS FIJOS POR HORA | | N\$3,219.75 |
| | | |
| CONSUMOS | | COSTO |
| | Diesel para quemadores | N\$77.50 |
| SUMA DE CONSUMOS POR HORA | | N\$77.50 |
| | | |
| OPERACIÓN | | COSTO |
| Horas por turno reales | $H = 8 * Fr$ $H = (8) * (0.75) = 6$ | |
| Operación | $Operación = So / H$ $Operación = (189.85) / (6)$ | N\$31.64 |
| SUMA DE OPERACIÓN POR HORA | | N\$31.64 |
| COSTO DIRECTO HORA DE MAQUINARIA ACTIVA | | N\$3,328.89 |

En este caso el costo directo por hora de la planta de asfalto en funcionamiento es de N\$3,328.89. Este costo no se ve alterado por el tipo de pavimento construido. Así pues, es como se calcula el costo directo por hora para cada uno de los equipos involucrados en la construcción de pavimentos.

** La depreciación para este tipo de maquinaria es a 5 años.

En un principio, esta tesis buscaba calcular en tiempo en el cual se recuperaría la inversión para montar una compañía que se dedicase a la construcción de carreteras tanto por el método tradicional, como con asfaltos modificados; pero este tipo de empresas cuentan con activos fijos amortizados y la inversión en maquinaria para producir asfaltos modificados es mínima.

Un cálculo aproximado del monto de la inversión en fundar una compañía con este giro sería:

TABLA 2-C
CÁLCULO APROXIMADO DE LA INVERSIÓN INICIAL PARA UNA COMPAÑÍA
DEDICADA A LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS ***

| CONCEPTO | PAVIMENTOS TRADICIONALES | PAVIMENTOS MODIFICADOS |
|---|-----------------------------|---------------------------|
| Equipo y Maquinaria de Fabricación, Servicios y Vehículos de Transporte | N\$62,000,000.00 | N\$66,500,000.00 |
| Herramienta Menor | N\$500,000.00 | N\$500,000.00 |
| Gastos de Instalación de Equipos | N\$1,500,000.00 | N\$1,750,000.00 |
| Fletes, Seguros, Impuestos y Gastos Aduanales | N\$23,000,000.00 | N\$24,500,000.00 |
| Subtotal (Activos Fijos Tangibles) | N\$87,000,000.00 | N\$93,250,000.00 |
| Planeación e Integración del Proyecto | N\$70,000.00 | N\$70,000.00 |
| Ingeniería del Proyecto | N\$65,000.00 | N\$65,000.00 |
| Supervisión y Administración del Proyecto | N\$25,000.00 | N\$25,000.00 |
| Gastos de Puesta en Marcha | N\$1,000,000.00 | N\$1,000,000.00 |
| Subtotal (Activos Fijos Intangibles) | N\$1,160,000.00 | N\$1,160,000.00 |
| Imprevistos | N\$10,000,000.00 | N\$11,000,000.00 |
| Total de la Inversión Fija | N\$98,160,000.00 | N\$106,410,000.00 |

*** En pesos constantes de Septiembre de 1995.

Un cálculo aproximado para estimar la recuperación de la inversión en una compañía de este tipo sería estableciendo los kilómetros de carpeta que se necesitarían construir para recuperar dicha inversión. En el caso de mezclas tradicionales, se necesitarían construir alrededor de 130 kilómetros de carpeta asfáltica; y en el caso de asfaltos modificados de 16 a 22 kilómetros de carpeta asfáltica modificada. Es importante recordar que se emplea el mismo equipo para asfaltos modificados SMA o PA.

TABLA 3-C
COSTO DEL m³ DE CARPETA ASFÁLTICA TRADICIONAL
 (Cifras en Nuevos Pesos Constantes al 30 de Septiembre de 1995)

| MATERIAS PRIMAS | UNIDAD | COSTO UNITARIO | CANTIDAD | IMPORTE |
|---|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| Cemento asfáltico No.6 | kg | 0.59 | 112.84 | 66.58 |
| Grava de 3/4" | m ³ | 36.21 | 0.89 | 32.23 |
| MATERIALES AUXILIARES | | | | |
| Agua utilizada en la obra | m ³ | 15.34 | 0.05 | 0.77 |
| Diesel para calentamiento o secado | l | 1.56 | 12.00 | 18.72 |
| MANO DE OBRA | | | | |
| Cabo general | TNO | 111.01 | 0.01 | 0.74 |
| Tomillero | TNO | 119.38 | 0.01 | 1.59 |
| Rastrillero | TNO | 119.38 | 0.04 | 4.78 |
| Herramienta menor | MO | 7.11 | 0.05 | 0.38 |
| EQUIPO Y HERRAMIENTA | | | | |
| Acarreo primer kilómetro para terracerías | m ³ | 2.39 | 0.89 | 2.13 |
| Planta de asfalto | h | 3,328.27 | 0.03 | 105.51 |
| Pavimentadora | h | 317.59 | 0.04 | 12.70 |
| Compactadora 110HP | h | 398.80 | 0.04 | 15.95 |
| Compactadora 123HP | h | 333.52 | 0.04 | 13.34 |
| Acarreo primer kilómetro | m ³ | 2.16 | 0.89 | 1.92 |
| Acarreo kilómetros subsecuentes sin pavimento | m ³ /km | 0.95 | 14.00 | 13.30 |
| COSTO DIRECTO | | | | 290.60 |
| COSTO INDIRECTO | | 24% | | 69.74 |
| | | | | 360.35 |
| FINANCIAMIENTO | | 0% | | 0.00 |
| | | | | 360.35 |
| UTILIDAD | | 4% | | 14.41 |
| | | | | 374.76 |
| INFONAVIT | | | 0.56 | |
| SAR | | | 0.23 | |
| | | | | 375.55 |
| PRECIO UNITARIO (NUEVOS PESOS) | | | N\$ | 375.55 |

TABLA 4-C
COSTO DEL m³ DE CARPETA ASFÁLTICA SMA
 (Cifras en Nuevos Pesos Constantes al 30 de Septiembre de 1995)

| MATERIAS PRIMAS | UNIDAD | COSTO UNITARIO | CANTIDAD | IMPORTE |
|---|--------------------|----------------|------------|-----------------|
| Cemento asfáltico No.6 | kg | 0.59 | 154.00 | 90.86 |
| Grava fina | m ³ | 36.21 | 0.75 | 27.16 |
| Grava gruesa | m ³ | 22.00 | 0.13 | 2.86 |
| Polímero tipo SBS | kg | 5.50 | 7.70 | 42.35 |
| Fibra mineral | kg | 5.85 | 132.00 | 772.20 |
| Calidra | kg | 0.16 | 29.04 | 4.65 |
| MATERIALES AUXILIARES | | | | |
| Agua utilizada en la obra | m ³ | 15.34 | 0.05 | 0.77 |
| Diesel para calentamiento o secado | l | 1.56 | 12.00 | 18.72 |
| MANO DE OBRA | | | | |
| Cabo general | TNO | 111.01 | 0.01 | 0.74 |
| Tornillero | TNO | 119.38 | 0.01 | 1.59 |
| Rastrillero | TNO | 119.38 | 0.04 | 4.78 |
| Herramienta menor | MO | 7.11 | 0.05 | 0.36 |
| EQUIPO Y HERRAMIENTA | | | | |
| Acarreo primer kilómetro para terracerías | m ³ | 2.39 | 0.89 | 2.13 |
| Planta de asfalto | h | 3,328.27 | 0.03 | 105.51 |
| Dosificador de polímero | h | 838.44 | 0.03 | 26.52 |
| Dosificador de fibra mineral | h | 129.04 | 0.03 | 4.09 |
| Silo con dosificador de calidra | h | 210.88 | 0.03 | 6.68 |
| Pavimentadora | h | 317.59 | 0.04 | 12.70 |
| Computadora 110HP | h | 398.80 | 0.04 | 15.95 |
| Compactadora 123HP | h | 333.52 | 0.04 | 13.34 |
| Acarreo primer kilómetro | m ³ | 2.16 | 0.89 | 1.92 |
| Acarreo kilómetros subsecuentes sin pavimento | m ³ /km | 0.95 | 14.00 | 13.30 |
| COSTO DIRECTO | | | | 1,169.16 |
| COSTO INDIRECTO | 24% | | | 280.60 |
| | | | | 1,449.76 |
| FINANCIAMIENTO | 0% | | | 0.00 |
| | | | | 1,449.76 |
| UTILIDAD | 4% | | | 57.99 |
| | | | | 1,507.76 |
| INFONAVIT | | | 0.56 | |
| SAR | | | 0.23 | |
| | | | | 1,508.55 |
| PRECIO UNITARIO (NUEVOS PESOS) | | | N\$ | 1,508.55 |

TABLA 5-C
COSTO DEL m³ DE CARPETA ASFÁLTICA PA
 (Cifras en Nuevos Pesos Constantes al 30 de Septiembre de 1995)

| MATERIAS PRIMAS | UNIDAD | COSTO UNITARIO | CANTIDAD | IMPORTE |
|---|--------------------|----------------|-------------|-----------------|
| Cemento asfáltico No.6 | kg | 0.59 | 135.09 | 79.70 |
| Grava gruesa | m ³ | 22.00 | 0.82 | 17.95 |
| Polímero tipo SBS | kg | 5.50 | 6.75 | 37.15 |
| Fibra mineral | kg | 5.85 | 154.39 | 903.18 |
| Calidra | kg | 0.16 | 28.95 | 4.63 |
| MATERIALES AUXILIARES | | | | |
| Agua utilizada en la obra | m ³ | 15.34 | 0.05 | 0.77 |
| Diesel para calentamiento o secado | l | 1.56 | 12.00 | 18.72 |
| MANO DE OBRA | | | | |
| Cabo general | TNO | 111.01 | 0.01 | 0.74 |
| Tornillero | TNO | 119.38 | 0.01 | 1.59 |
| Rastrillero | TNO | 119.38 | 0.04 | 4.78 |
| Herramienta menor | MO | 7.11 | 0.05 | 0.36 |
| EQUIPO Y HERRAMIENTA | | | | |
| Acarreo primer kilometro para terracerías | m ³ | 2.39 | 0.89 | 2.13 |
| Planta de asfalto | h | 3,328.27 | 0.03 | 105.51 |
| Dosificador de polímero | h | 836.44 | 0.03 | 26.52 |
| Dosificador de fibra mineral | h | 129.04 | 0.03 | 4.09 |
| Silo con dosificador de calidra | h | 210.88 | 0.03 | 6.68 |
| Pavimentadora | h | 317.59 | 0.04 | 12.70 |
| Compatadora 110HP | h | 396.60 | 0.04 | 15.95 |
| Compactadora 123HP | h | 333.52 | 0.04 | 13.34 |
| Acarreo primer kilómetro | m ³ | 2.16 | 0.89 | 1.92 |
| Acarreo kilómetros subsecuentes sin pavimento | m ³ /km | 0.95 | 14.00 | 13.30 |
| COSTO DIRECTO | | | | 1,271.88 |
| COSTO INDIRECTO | | 24% | | 305.20 |
| | | | | 1,576.88 |
| FINANCIAMIENTO | | 0% | | 0.00 |
| | | | | 1,576.88 |
| UTILIDAD | | 4% | | 63.08 |
| | | | | 1,639.96 |
| INFONAVIT | | | 0.56 | |
| SAR | | | 0.23 | |
| | | | | 1,640.75 |
| PRECIO UNITARIO (NUEVOS PESOS) | | | N\$ | 1,640.75 |

TABLA 6-C
COSTO DEL LITRO DE RIEGO DE SELLO
 (Cifras en Nuevos Pesos Constantes al 30 de Septiembre de 1995)

| MATERIAS PRIMAS | UNIDAD | COSTO UNITARIO | CANTIDAD | IMPORTE |
|---------------------------------------|--------|----------------|------------|-------------|
| Cemento asfáltico No.8 | kg | 0.59 | 0.769 | 0.45 |
| EQUIPO Y HERRAMIENTA | | | | |
| Petrolizadora | h | 237.79 | 0.0009 | 0.21 |
| Barredora | h | 128.32 | 0.0008 | 0.10 |
| COSTO DIRECTO | | | | 0.77 |
| COSTO INDIRECTO | | 24% | | 0.18 |
| | | | | 0.96 |
| FINANCIAMIENTO | | 0% | | 0.00 |
| | | | | 0.96 |
| UTILIDAD | | 4% | | 0.04 |
| | | | | 0.99 |
| INFONAVIT | | | 0.56 | |
| SAR | | | 0.23 | |
| | | | | 1.78 |
| PRECIO UNITARIO (NUEVOS PESOS) | | | N\$ | 1.78 |

TABLA 7-C
COSTO DEL LITRO DE RIEGO DE LIGA
 (Cifras en Nuevos Pesos Constantes al 30 de Septiembre de 1995)

| MATERIAS PRIMAS | UNIDAD | COSTO UNITARIO | CANTIDAD | IMPORTE |
|---------------------------------------|--------|----------------|------------|-------------|
| Asfalto de fraguado rápido (FR-3) | l | 0.91 | 1 | 0.91 |
| EQUIPO Y HERRAMIENTA | | | | |
| Petrolizadora | h | 237.79 | 0.0009 | 0.21 |
| Compresor 125HP | h | 113.4 | 0.0009 | 0.10 |
| COSTO DIRECTO | | | | 1.23 |
| COSTO INDIRECTO | | 24% | | 0.29 |
| | | | | 1.52 |
| FINANCIAMIENTO | | 0% | | 0.00 |
| | | | | 1.52 |
| UTILIDAD | | 4% | | 0.06 |
| | | | | 1.58 |
| INFONAVIT | | | 0.56 | |
| SAR | | | 0.23 | |
| | | | | 2.37 |
| PRECIO UNITARIO (NUEVOS PESOS) | | | N\$ | 2.37 |

TABLA 8-C
 COSTO DE UN KILÓMETRO DE CARPETA, PARA CARRETERAS TIPO A4S
 (Cifras en Nuevos Pesos Constantes al 30 de Septiembre de 1995)

| Carpeta tradicional | Precio Unitario | Cantidad | Importe |
|-------------------------------|-----------------|-----------|-------------------|
| Riego de liga | 2.37 | 66,000.00 | 156,420.00 |
| Carpeta asfáltica tradicional | 375.55 | 1,540.00 | 578,347.00 |
| Riego de sello | 1.78 | 16,500.00 | 29,370.00 |
| TOTAL | | | 764,137.00 |

| Reencarpetado para carpeta tradicional | Precio Unitario | Cantidad | Importe |
|--|-----------------|-----------|---------------------|
| Riego de liga | 2.37 | 66,000.00 | 156,420.00 |
| Carpeta asfáltica tradicional | 375.55 | 1,540.00 | 578,347.00 |
| Riego de sello | 1.78 | 16,500.00 | 29,370.00 |
| Malla metálica | 26.00 | 22,000.00 | 572,000.00 |
| TOTAL | | | 1,336,137.00 |

| Carpeta SMA | Precio Unitario | Cantidad | Importe |
|-----------------------|-----------------|-----------|---------------------|
| Riego de liga | 2.37 | 66,000.00 | 156,420.00 |
| Carpeta asfáltica SMA | 1,508.55 | 3,080.00 | 4,648,334.00 |
| TOTAL | | | 4,802,754.00 |

| Carpeta PA | Precio Unitario | Cantidad | Importe |
|-----------------------|-----------------|-----------|---------------------|
| Riego de liga | 2.37 | 66,000.00 | 156,420.00 |
| Carpeta asfáltica SMA | 1,508.55 | 3,080.00 | 4,648,334.00 |
| Carpeta asfáltica PA | 1,640.75 | 880.00 | 1,443,860.00 |
| TOTAL | | | 6,246,614.00 |

TABLA 9-C
 ESTIMACIÓN DEL COSTO DE CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO PARA UNA
 CARRETERA A4S AL CABO DE 20 AÑOS
 (Cifras en Nuevos Pesos Constantes al 30 de Septiembre de 1995)

| AÑO | CLIMA TEMPLADO | | CLIMA HUMEDO | |
|--------------|------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| | MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN TRADICIONAL | MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN SMA | MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN TRADICIONAL | MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN PA |
| Inicial | 764,137.00 | 4,802,754.00 | 764,137.00 | 6,246,614.00 |
| 1 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 0.00 | 0.00 | 1,336,137.00 | 0.00 |
| 3 | 1,336,137.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4 | 0.00 | 0.00 | 1,336,137.00 | 0.00 |
| 5 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 6 | 1,336,137.00 | 0.00 | 1,336,137.00 | 0.00 |
| 7 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 8 | 0.00 | 0.00 | 1,336,137.00 | 0.00 |
| 9 | 1,336,137.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 10 | 0.00 | 0.00 | 1,336,137.00 | 0.00 |
| 11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 12 | 1,336,137.00 | 0.00 | 1,336,137.00 | 0.00 |
| 13 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 14 | 0.00 | 0.00 | 1,336,137.00 | 0.00 |
| 15 | 1,336,137.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 16 | 0.00 | 0.00 | 1,336,137.00 | 0.00 |
| 17 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 18 | 1,336,137.00 | 0.00 | 1,336,137.00 | 0.00 |
| 19 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 20 | 0.00 | 0.00 | 1,336,137.00 | 0.00 |
| TOTAL | 8,780,969.00 | 4,802,754.00 | 14,126,607.00 | 6,246,614.00 |