

94



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA



REGISTRO DE PROFESORES
PROGRAMA DE QUÍMICA

APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE HIDROCARBUROS CON ASFALTO PARA SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS

T E S I S
M A N C O M U N A D A

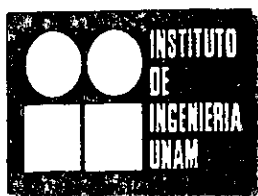
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A N

GUADALUPE BAUTISTA SALAZAR
KHARIM DIMAS SUÁREZ

27/4/00



MÉXICO, D.F.

2000





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Profesores

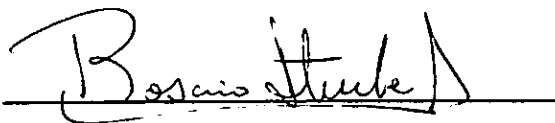
Presidente	Leticia Ma. de los Ángeles Arredondo
Vocal	Carlos Mauricio Castro Acuña
Secretario	Rosario Iturbe Arguelles
1^{er} Suplente	Rodolfo Torres Barrera
2do Suplente	Landy Irene Ramírez Burgos

Sitio donde se desarrollo el tema:

Instituto de Ingeniería, UNAM.

Asesor del tema:

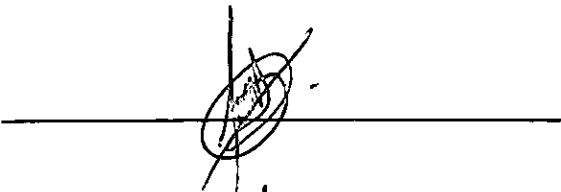
Dra. Rosario Iturbe Arguelles



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rosario Iturbe', is written over a horizontal line.

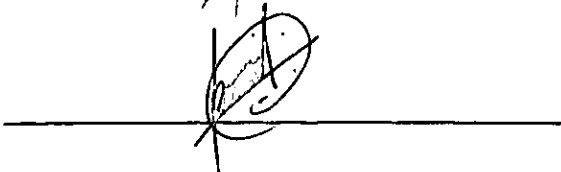
Sustentantes:

Guadalupe Bautista Salazar



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Guadalupe', is written over a horizontal line.

Kharim Dimas Suárez



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Kharim', is written over a horizontal line.

Agradecemos:

A la Universidad por darnos las herramientas que nos permitirán desarrollarnos profesionalmente, esperando corresponderle con ética, y responsabilidad.

A los profesores de la facultad por alentarnos a seguir adelante, y por compartir con nosotros su sabiduría.

Al Instituto de Ingeniería por darnos la oportunidad de concluir una etapa de enseñanza e iniciar otra de trabajo en grupo.

Especialmente agradecemos a la doctora Rosario Iturbe por apoyarnos incondicionalmente y confiar plenamente en nuestro trabajo, pero sobre todo por su valor como persona y por su atención.

Al Ingeniero Armando Rangel por su orientación, apoyo moral y profesional para el desarrollo experimental de esta tesis y sobre todo por brindarnos su amistad.

A nuestros compañeros del grupo de investigación saneamiento de suelos y acuíferos, Darío, Guille, Rosa María, Claudia, Adriana, María, y Alejandrina.

A todos aquellas personas que nos brindaron su apoyo y orientación:

Ing. Santiago Corro (Instituto de Ingeniería)

Ing. Carlos Flores (Instituto de Ingeniería)

Ing. Ray Saucedo (Akzo Nobel, USA)

Ing. Quirino Varela (PEMEX)

Ing. Gustavo Rivera

Ing. Jaqueline Caballero (Planta de asfalto de la Cd. de México)

QFB Leticia Flores (Conjunto Lar)

Dedicatorias.

A mi padre

Por brindarme su apoyo, confianza y por enseñarme con su ejemplo el valor de la vida.

A mi madre.

Por creer y confiar en mí, por darme la nobleza y paciencia para seguir adelante.

A mis hermanos:

Juana, Edith, Vicente y Antonio, porque cada uno de ellos me ha enseñado cosas diferentes, pero sobre todo por su apoyo, cariño y comprensión.

A mis tíos:

Ramón y Telésforo por ser un ejemplo de humildad, nobleza y dedicación para obtener las cosas.

A mis Primos:

Germán y toño, por ser unas grandiosas personas, por su responsabilidad y tenacidad para conseguir lo mejor y por su gran calidad humana.

A mis Sobrinos:

Carlitos y cristy, esperando algún día verlos lograr sus metas.

A mis Amigos:

Maricruz, Por haber llegado en el momento justo para compartir cosas nuevas, alegrías y penas.

Raquel y Rosario por creer y confiar en mi, por haber compartido juntas la carrera y por ser unas grandiosas amigas.

Salud, Estela, Maru, Ari, Ale Vargas, Javier, Oscar Argueta, Oscar Gómez y Antonio Luis por haberme hecho grata mi estancia en la facultad, gracias por brindarme su amistad.

A Kharim:

Por apoyarme y ayudarme siempre y en cada momento, por el gran amor que te tengo , por dejarme ver mis errores y por creer en mi, gracias, Amor.

A todos ustedes gracias por dejarme quererlos y por haberme apoyado siempre.

Guadalupe Bautista Salazar.

A Santiago:

Gracias Dios por haberme permitido compartir mi infancia con mi hermano por dejarme sentirme protegida por él, Gracias a ti porque donde quiera que te encuentres sé que aún sigues pendiente de mí, mientras yo siempre te llevaré en mi corazón.

A mi madre:

Este trabajo quiero dedicarlo especialmente a ti mamá, como un tributo al sacrificio y arduo trabajo que has realizado por mí y por mi hermano para que podamos tener una vida mejor.

Por que nos has ayudado a formar un carácter con el cual podamos afrontar tanto los problemas como los momentos felices de nuestras vidas.

Por los desvelos que pasaste durante mis estudios y que hoy puedes ver cumplida la difícil misión de que tus hijos tracen el camino que regirán nuestras vidas.

Muchas gracias mamá.

A mi hermano:

Por apoyarme en mis estudios y por compartir su vida conmigo.

A Lilia:

Por que representas para mí la hermana que hubiera querido tener.

A Guadalupe:

Por compartir su vida conmigo, por tolerar y a veces aceptar mis errores, y por el amor que ambos nos tenemos.

A Leried, Ricardo y Areli :

Por que ha pesar de que son unos latosos, alegran mi vida.

Al Ing. Ricardo Bernal:

Por brindarme su amistad, y aconsejarme cuando lo necesite.

A mis amigos:

Luis Flores, Francisco Haro, Camilo Pérez, Victor García, Mario Mendieta, Rocío López, Pilar Gaytan, Guadalupe Salinas, Emilio López, Eduardo Navarro, Claudia Guzmán, Noé Fuentes, J. Julián Escalona, Raymundo Juárez, Meibol Vera, Armando González y a todos los demás que por alguna razón no los tengo presentes en mi mente, gracias por brindarme su amistad incondicionalmente.

Kharim Dimas Suárez

ÍNDICE

	Contenido	Página
	Introducción	2
	Objetivos	4
	Capítulo 1: Residuos Peligrosos	
1.1	Residuos peligrosos.....	6
1.2	Panorama de la industria en México.....	22
	Capítulo 2: Emulsiones	
2.1	Tensión superficial e interfacial.....	31
2.2	Emulsiones.....	35
2.3	Características de una emulsión.....	37
2.4	Reología.....	39
2.5	Fase inversa.....	40
2.6	Agentes emulsificantes.....	41
2.7	Selección de emulsificantes.....	43
2.8	Sistemas HLB.....	44
2.9	Adición de ingredientes en una emulsión.....	46
	Capítulo 3: Emulsiones Asfálticas	
3.1	Asfaltos de petróleo.....	49
3.2	Métodos de obtención.....	49

3.3	Tipos de asfalto.....	51
3.4	Emulsión de asfalto.....	54
3.5	Tipos de emulsión.....	56
3.6	Ruptura de las emulsiones.....	58
3.7	Ingredientes de la emulsión.....	61
3.8	Pruebas para las emulsiones asfálticas aceptadas en México por la SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes).....	63

Capítulo 4: Mezcla Asfáltica

4.1	Definición.....	68
4.2	Diseño de mezcla asfáltica en caliente.....	68
4.3	Definiciones.....	69
4.4	Normas ASTM empleadas para el diseño de mezclas asfálticas.....	73
4.5	Análisis de pavimentos con mezcla asfáltica.....	78
4.6	Perfiles de los procedimientos para analizar una mezcla de pavimento compactado.....	80

Capítulo 5: Experimentación

5.1	Elaboración de la emulsión asfáltica.....	86
5.2	Pruebas a las emulsiones asfálticas.....	88
5.3	Modificación del método experimental.....	91
5.4	Prueba de penetración de los materiales bituminosos.....	94
5.5	Preparación de la emulsión asfáltica.....	95

5.6	Método de preparación de la emulsión.....	96
5.7	Diseño de mezclas asfálticas.....	99
Capítulo 6: Resultados y discusión		
6.1	Elaboración de las emulsiones asfálticas.....	109
6.2	Residuo por evaporación.....	109
6.3	Residuo por destilación.....	110
6.4	Destilación para asfaltos rebajados ASTM D 20-91.....	111
6.5	Resultados Refinería Francisco I. Madero.....	117
6.6	Diseño de mezclas asfálticas.....	122
6.7	Pruebas Marshall.....	130
Capítulo 7: Conclusiones		
7.1	Emulsión asfáltica.....	149
7.2	Mezcla asfáltica.....	150
Bibliografía.....		154



Introducción





INTRODUCCIÓN.

"Resolver la crisis ambiental —distinto de disminuir sólo sus efectos— es un problema fundamentalmente político y social porque requiere el establecimiento de una nueva forma de control social sobre las decisiones que hoy se hallan en algunas manos empresariales públicas ó privadas¹.

La contaminación producida por la generación de residuos peligrosos tanto industriales como domésticos constituye un problema de una civilización que ha promovido el crecimiento económico y la industrialización como prototipos de modernización y del progreso económico. Este mal llamado desarrollo se ha realizado, a costa de la extracción y destrucción acelerada de ecosistemas y recursos naturales, con una gran ineficiencia energética, y con el uso excesivo de materiales peligrosos y sustancias tóxicas en procesos productivos que generan consecuentemente un enorme volumen de residuos peligrosos. En el ámbito internacional se ha identificado como prioritaria la eliminación global de los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP's). Los COP's se refieren a los compuestos químicos orgánicos que son tóxicos, capaces de causar graves efectos crónicos (cáncer y afectaciones del sistema endocrino por ejemplo); y que por sus propiedades físico químicas son de una gran persistencia en el ambiente, y pueden ser transportados a grandes distancias por las corrientes atmosféricas; biomagnificarse y bioacumularse en los organismos vivos, en sus tejidos grasos, afectando las cadenas alimenticias de los ecosistemas.

Las naciones unidas han identificado 12 COP's de alta prioridad, que incluye a compuestos organoclorados como las dioxinas y furanos, los bifenilos policlorados, plagicidas organoclorados (DDT, clordano, heptacloro, hexaclorobenceno, aldrin, dieldrin, toxafeno y mirex).

Particularmente en la República Mexicana existe contaminación del suelo debido a la existencia de diversos procesos industriales, por ejemplo en los procesos de refinación y petroquímica que han servido como áreas de confinamiento de toda clase de residuos o

¹ Barry Commoner, En paz con el planeta, 1990.



materiales de desecho provenientes de las diferentes operaciones unitarias, y cuyo ecosistema se ha visto afectado y transformado a lo largo de varios años, debido a que los constituyentes de estos pueden disolverse en agua, penetrar a través de los suelos y llegar a los mantos acuíferos subterráneos; escurrir sobre las cuencas hidráulicas y contaminar las aguas superficiales; moverse por el aire y, así, transferirse a lo largo de la cadena alimenticia y afectar la flora, la fauna y al hombre mismo.

Debido a este problema, actualmente se están empleando diversas técnicas de saneamiento para sitios contaminados como medida correctiva para mitigar o eliminar los problemas derivados de estos residuos o materiales¹¹.

Una alternativa propuesta es la utilización de algunos residuos de hidrocarburos como emulsiones asfálticas o para diseño de mezclas de pavimento asfáltico de acuerdo con normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM) que se han aceptado en México por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) referentes a vías terrestres. La selección de alguna de estas dos técnicas dependerá de aspectos que satisfagan tanto puntos de vista ambientales, técnico — operativos y económicos.

Este trabajo se basa en estudiar y analizar esta propuesta, la cual puede ser de gran beneficio al disminuir la acumulación de residuos y por lo tanto la contaminación.

¹¹ Madrigal Monárrez Ismael. Alternativas de tratamiento para la rehabilitación de sitios contaminados con hidrocarburos en México, UNAM, 1998.



OBJETIVOS:

1. Plantear una metodología que permita obtener una emulsión asfáltica, llevando a cabo una serie de pruebas, en la cuales se manipulen las variables de operación y reactivos así como sus respectivas concentraciones.
2. Efectuar pruebas de diseño de mezclas asfálticas en caliente, empleando el método Marshall.
3. Transformar residuos de hidrocarburos de diversas instalaciones petroleras para darles un uso.



Capítulo 1: Residuos Peligrosos





1. RESIDUOS PELIGROSOS.

1.1 Residuos peligrosos³.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente define como peligroso a todo aquel residuo, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológicas, infecciosas o irritantes, representa un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente. De acuerdo con esta definición, prácticamente cualquier sustancia podría llegar a ser considerada como peligrosa; sin embargo, los factores de mayor importancia para la sociedad serían el infeccioso y la toxicidad. A la sociedad le preocupan los residuos peligrosos en la magnitud en la que éstos ponen en riesgo la salud.

En México el INE (Instituto Nacional de Ecología) como órgano descentralizado de la SEMARNAP (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca) es quien norma, analiza y dictamina en materia de residuos peligrosos, junto con la Secretaría de Salud (SSA) quien establece normas para el uso y manejo de sustancias químicas aunado a ello es responsable de dictaminar los niveles máximos permisibles de exposición y realizar estudios de toxicología al respecto.

Mientras la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STyPS) en coordinación con la secretaría de salud informa y capacita a los trabajadores respecto a los riesgos de las sustancias tóxicas y peligrosas así como medidas para prevenirlos y controlarlos.

El problema de la generación de desechos peligrosos inicia en México con la industrialización amplia del país, es decir alrededor de 1950; y en la zona fronteriza, hace unos 30 años, con el programa de las maquiladoras. Sin embargo, no fue sino hasta 1988 cuando estos residuos fueron considerados por primera vez en la legislación mexicana. Por lo tanto existe un vacío legal de casi 40 años, lo que significa que durante este largo tiempo tirar los desechos peligrosos al basurero municipal, al río o al drenaje más cercano, guardarlos dentro de la fábrica, etcétera, no violaba la ley.



1.1.1 Clasificación de residuos peligrosos.

Los residuos peligrosos pueden presentarse en forma sólida, líquida o gaseosa. De acuerdo con la forma en que se presenta su movilidad y transporte afecta en mayor o menor grado a suelos, acuíferos y organismos.

Los residuos que se clasifican como peligrosos, de acuerdo a la norma **NOM-052-ECOL-93²⁵** que establece las características de los residuos peligrosos y que poseen una o más de las siguientes propiedades:

- ◆ **Corrosivo**
- ◆ **Reactivo**
- ◆ **Explosivo**
- ◆ **Tóxico**
- ◆ **Inflamable**
- ◆ **Biológico infeccioso**

Se deben aplicar los siguientes criterios para la determinación de residuos peligrosos, basándose en lo marcado también en dicha norma:

- ◆ **Corrosividad.** Un residuo se considera peligroso cuando:
 - * En solución acuosa presenta $\text{pH} \leq 2$ o ≥ 12.5 .
 - * En estado líquido es capaz de corroer el acero al carbón (SAE 1020), a una velocidad de 6.35 milímetros por año y una temperatura de 55 °C.

Tales son los casos de las soluciones gastadas y residuos provenientes del latonado usados en el acabado de metales y del cloroacetaldehído proveniente del fondo de la torre purificadora en la producción del acetaldehído.

²⁵ Normas para el manejo y disposición de residuos peligrosos. <http://www.ine.gob.mx>



- ◆ **Toxicidad al ambiente.** Un residuo se considera peligroso por su toxicidad cuando:

Al hacer la prueba de extracción para toxicidad, conforme a la **NOM-CRP-053-ECOL-93²⁵**, y al efectuar los métodos de análisis previstas en las normas correspondientes presentan concentraciones iguales o mayores a los límites señalados.

Es el caso de los lodos de tratamientos de aguas residuales en la producción de baterías de plomo ácido o níquel - cadmio.

- ◆ **Reactividad.-** Un residuo se considera peligroso por su reactividad cuando:

- * Bajo condiciones de golpe, presión, temperatura o espontáneamente se descompone, combina o polimeriza vigorosamente.
- * Es normalmente inestable y se combina o transforma violentamente sin detonación.
- * Reacciona con el agua y forma mezclas potencialmente explosivas o generan gases, vapores o humos en cantidades suficientes para provocar desequilibrio ecológico a daños al ambiente.
- * Posee en su constitución sustancias que cuando se exponen a condiciones de pH adecuadas puede generar gases, vapores o humos en cantidades suficientes que constituyen un riesgo para el ambiente.
- * Es capaz de producir radicales libres.

Tal es el caso del peróxido de benzoilo empleado en la producción de pinturas.

- ◆ **Explosividad.** Un residuo se considera peligroso por su explosividad cuando:

- * Es más sensible a golpes o fricción que el dinitrobenceno.
- * Es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva a 25 °C y una atmósfera de presión (1.033 Kg/ cm²).

En general los solventes gastados no halogenados: cresoles, nitrobenceno y la recuperación de estos solventes y sus mezclas, se consideran explosivos.



- ◆ **Inflamabilidad.** Un residuo se considera peligroso por su inflamabilidad cuando:
 - * En solución acuosa contiene más de 24 % de alcohol en volumen.
 - * Es líquido y tiene un punto de inflamación inferior a 60 ° C.
 - * No es líquido, pero es capaz de causar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos.
 - * Se trata de gases comprimidos inflamables o agentes oxidantes.

Por mencionar algunos, metanol, hexano, isopropanol, metilisobutilcetona, alcohol etílico, acetona, etc.

- ◆ **Biológico Infeccioso.** Un residuo biológico infeccioso se considera peligroso cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades:
 - * Cuando el residuo contiene bacterias, virus u otros microorganismos con capacidad de infección.
 - * Cuando contiene toxinas producidas por microorganismos que causen efectos nocivos a seres vivos.

Un ejemplo de estos son los residuos provenientes de hospitales, laboratorios y consultorios médicos: residuos de sangre humana, residuo de cultivo y cepas de agentes infecciosos.

1.1.2 Industrias que generan residuos peligrosos¹.

Conforme con la información internacional, las industrias que generan mayor cantidad de desechos industriales peligrosos son: petroquímica y manufacturera de productos químicos básicos, actividades minerometalúrgicas, industria de pinturas, lacas y barnices, celulosa y papel y de componentes electrónicos.

En México la industria química es uno de los segmentos más dinámicos de la economía, lo cual se aprecia a través de su contribución al producto interno bruto, equivalente a 226 614 millones de dólares en 1991, y su crecimiento de 3.1 % en el mismo año, comparado



con un 3.7 % del resto de la industria manufacturera (ANIQ 1991). Los tratamientos de superficie son generados de soluciones con altas concentraciones de metales pesados, como es el caso del cromo. En los procesos de templado en los que se emplean cianuros se obtienen residuos altamente peligrosos.

Los procesos petroquímicos generan residuos tóxicos e inflamables. Según el inventario de las actividades de refinación y transformación de la industria petrolera y petroquímica primaria, se ha cuantificado un volumen de 1,710,448 ton/año de residuos industriales generados en sus centros productivos. El 90.5 % de éstos son semi-sólidos, constituidos principalmente por lodos de pretratamiento de agua y los aceites procedentes de fondos de almacenamiento de tanques de crudo y de los sistemas de separación. Con base en su composición, se calcula que aproximadamente el 11% de estos residuos es susceptible de reciclaje, aunque actualmente en México sólo se recicla el 1%.¹²

Los residuos producidos en las actividades de distribución de gasolinas conteniendo tetraetilo de plomo están básicamente constituidos por los sedimentos de los tanques, los cuales no han sido cuantificados aún en nuestro país.

En lo que respecta a la producción de solventes, especialmente en los procesos químicos y petroquímicos sin considerar a las industrias petrolera y maquiladora de exportación, se calcula que se generan 70 millones de litros al año de los siguientes solventes:

- Cloruro de metilo	7,500,000 L
- Dicloroetano	4,000,000 L
- Triclorofluoroetano	70,000 L
- Tricloroetileno	1,500,000 L
- 1,1,1,- tricloroetano	1,300,000 L
- Alcohol isopropilico	54,000,000 L.

¹²Miyasako, E., "Residuos Peligrosos. Legislación, Reglamentación, Normalización y Movimiento Transfronterizo". Memorias 1er. Reunión Anual del Puma, Vol. 1, México, UNAM, Octubre 1992.



1.1.3 Zonas en que se generan residuos peligrosos.

Salvo la zona fronteriza, en la cual el contrabando de desechos industriales peligrosos puede contribuir a aumentar la cantidad de estos desechos que se acumulan localmente, se puede decir que la generación de desechos industriales peligrosos en México debe haber tenido un crecimiento paralelo al desarrollo industrial del país, y por lo tanto, que las zonas de mayor actividad industrial son también aquellas en las que se generan mayores cantidades de desechos industriales peligrosos, esto es:¹³

Zona metropolitana de la ciudad de México	Guanajuato
Coatzacoalcos - Minatitlán, Veracruz	Camargo, Chihuahua
Querétaro - San Juan del Río, Querétaro	Puebla - Texmelucan, Puebla
Tampico - Ciudad Madero - Altamira, Reynosa, Tamaulipas	Lázaro Cárdenas, Michoacán
Zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco	Orizaba - Córdoba - Veracruz - La Cangrejera - Cosoleacaque, Veracruz
San Luis Potosí, San Luis Potosí	Tlaxcala, Tlaxcala
Zona metropolitana de Monterrey, Nuevo León	Cactus, Chiapas
Zona fronteriza	Tula, Hidalgo
Conurbación de la Laguna, Coahuila	Salina Cruz, Oaxaca
Tijuana, BCN	Aguascalientes, Aguascalientes
Salamanca - Celaya - Irapuato - León,	Corredor Industrial Lerma - Toluca, Estado de México
	Ciudad Pemex - La Venta, Tabasco

Esto significa que el problema de los desechos industriales peligrosos en México está básicamente concentrado en el norte y centro del país y que, fuera de ahí, sólo debe existir en las zonas de extracción de petróleo, como Tabasco y Campeche.

¹³ Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas, INE.



1.1.4 Etapas de interacción de los residuos peligrosos con el organismo humano.¹⁴

Existen cuatro formas de interacción de los residuos peligrosos con el organismo humano:

- **Exposición:** Se considera que un individuo está expuesto cuando el residuo peligroso se encuentra en la vecindad inmediata de las vías de ingreso al organismo: respiratoria (inhalación); tegumentaria (absorción a través de la piel y las mucosas) y gastrointestinal (ingestión).
- **Absorción:** consiste en el paso del residuo peligroso a través de las membranas biológicas correspondientes a la circulación sistémica. En la sangre las sustancias que lo componen se solubilizan en el plasma y/o se unen a las proteínas plasmáticas a los glóbulos rojos.
- **Eliminación:** ocurre ya sea por excreción urinaria y/o intestinal y por biotransformación. En términos globales, el metabolismo tiende a generar sustancias menos activas y fácilmente excretables.
- **Acumulación:** de acuerdo con las características fisicoquímicas del residuo, puede llegar a fijarse en ciertos tejidos y acumularse en ellos e interaccionan con las macromoléculas celulares.

El proceso de evaluación de riesgos tienen como objetivo desarrollar una forma cuantitativa de expresar el perjuicio para la salud humana por la presencia de todos los materiales peligrosos que hayan sido identificados en el sitio de estudio. La cual consta de cuatro etapas:

- 1) Identificación del peligro
- 2) Evaluación dosis – respuesta
- 3) Caracterización del riesgo
- 4) Evaluación de la exposición

¹⁴ Lloy, P. J. "The total human exposure to contaminants: a multidisciplinary approach". Environ. Sci. Technol., num. 24, 1990.



La evaluación de la exposición corresponde a la estimulación cualitativa o cuantitativa de la dosis (cantidad de sustancia que ingresa al organismo), frecuencia, duración y ruta a través de la cual se produce el contacto residuo peligroso - organismo; es un componente crucial de los estudios de epidemiología ambiental que buscan establecer relaciones causales entre la exposición a agentes físicos y químicos procedentes de residuos peligrosos y las consecuencias adversas a la salud. El reporte del Consejo Nacional de Ciencia de los Estados Unidos (NRC, 1991) determinó los siguientes cuatro puntos fundamentales para poder realizar la evaluación de la exposición:

- Distribuciones de concentración en tiempo y espacio para diferentes ambientes.
- Poblaciones o grupos de alto o bajo riesgo.
- Contribuciones químicas y físicas de diferentes fuentes.
- Factores que controlan la distribución del contaminante en el ambiente, rutas de transporte y vías de entrada al organismo.

En el caso de exposición a residuos peligrosos, deben considerarse: atmósfera, suelo, agua y alimentos (figura 1.1). Para estimar la exposición personal, se puede medir la dosis potencial, la dosis sanguínea y la dosis en el órgano blanco, que es la biológicamente efectiva — fracción del contaminante o de su(s) metabolito(s) identificado(s) en el sitio de acción, que es donde se producirán efectos sobre la salud—. La dosis sanguínea generalmente se mide a través del monitoreo biológico —exámenes y pruebas de laboratorio—. Este monitoreo tiene limitaciones cuando se habla de evaluar la exposición a residuos peligrosos: una de ellas es cómo manejar las mezclas de residuos cuyos efectos pueden organizarse o potenciarse; la otra es la variabilidad biológica normal del hombre; y por último, este tipo de monitoreo generalmente indica exposiciones recientes (NRC, 1992).

La información acerca de los efectos potenciales en la salud de los residuos peligrosos ha sido obtenida a partir de:

- Estudios experimentales realizados en animales expuestos en forma controlada al residuo peligroso o a las sustancias que hacen peligroso el residuo.



- Evaluación clínica de trabajadores expuestos a dichas sustancias o residuo peligroso en el ambiente laboral.
- El examen a personas que accidentalmente entraron en contacto con el residuo peligroso o residente de lugares empleados previamente como depósito de dichos residuos.
- Estudios epidemiológicos de poblaciones con algún grado de exposición a residuos peligrosos.

A nivel mundial no existe una gran cantidad de estudios epidemiológicos sobre el efecto de los residuos peligrosos sobre la salud. Se conocen bien los efectos inmediatos de las exposiciones humanas ocupacionales, ambientales o accidentales, que van desde dolores de cabeza, irritaciones pulmonares y dérmicas, hasta daño serio en el funcionamiento hepático y sistema nervioso. Los efectos a largo plazo son menos conocidos y existe discusión al respecto; por ejemplo: muertes perinatales, anomalías congénitas y trastornos de la reproducción, cáncer de diversos tipos, como leucemia, cáncer de mama, gastrointestinal y de vejiga, alteraciones inmunológicas ("un tipo de inmunodeficiencia adquirida"), trastornos renales, hepáticos, neurológicos y pulmonares.

1.1.5 Efectos toxicológicos a la salud por hidrocarburos²¹.

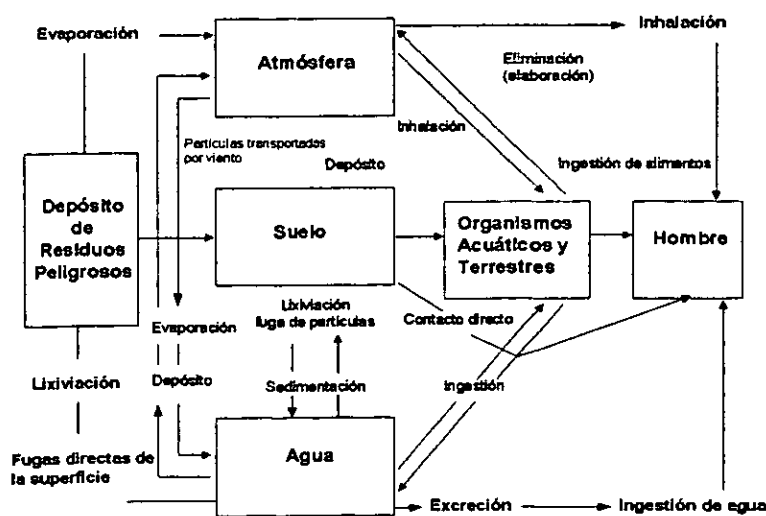


Fig. 1.1. Exposición a residuos peligrosos

En México, los estudios acerca de los efectos sobre la salud en poblaciones expuestas a tóxicos ambientales son mínimos. Los más relevantes son los trabajos sobre plomo (contaminación atmosférica y cerámica vidriada); arsénico (contaminación natural);

plaguicidas (exposición ocupacional); y, flúor (contaminación natural y exposición



ocupacional). Dichos trabajos, si bien son relevantes, no abordan la problemática de los residuos peligrosos; con ello se demuestra qué tan escasos son en México los estudios en torno a este tópico.

Es evidente el riesgo que implican los residuos peligrosos en materia de salud; los datos de la literatura y los resultados de las investigaciones, aun en México, así lo demuestran. Por consiguiente, para solucionar esta problemática habría que trabajar en dos vertientes: la tecnológica y la salud. La primera para instrumentar medidas que remedien los daños ambientales, y la segunda para definir el riesgo asociado a la contaminación por residuos.

- **Toxicidad.** La toxicidad de los hidrocarburos puede ser aguda o crónica. Una toxicidad aguda se define como una exposición a altas concentraciones en un periodo corto de tiempo; la toxicidad crónica se define como la exposición a sustancias peligrosas de baja concentración por un periodo largo. Las manifestaciones a intoxicaciones agudas por la exposición a hidrocarburos se pueden presentar a minutos, horas o en pocos días. Los efectos crónicos toman años en aparecer y son frecuentemente muy difíciles de correlacionar con la exposición original.

Los efectos y síntomas de la exposición a los hidrocarburos son difíciles de cuantificar sobre una base clínica. Primero no existe una división clara entre los efectos agudos y crónicos. Los términos periodo corto y periodo largo son un tanto subjetivos. Segundo, la sensibilidad individual a los hidrocarburos varía enormemente. Tercero, resulta difícil distinguir los síntomas de la exposición a hidrocarburos con los síntomas no relacionados con esta exposición.

Los hidrocarburos ligeros, incluyendo benceno y los alquilbencenos son depresivos al Sistema Nervioso Central (SNC) en concentraciones de 2000 ppm/5 minutos. Los síntomas generales de la depresión del SNC incluyen pérdida de la coordinación, somnolencia, vómito y mareo. Efectos más severos de exposiciones en periodos cortos incluyen pérdida del conocimiento, hemorragia del pulmón y órganos intestinales, y en casos raros la muerte debido a la falta de circulación. Algunos compuestos de las gasolinas, especialmente benceno, están asociados con problemas agudos y crónicos en periodos cortos de exposición.



Los hidrocarburos son buenos solventes de grasas y sustancias no acuosas utilizadas como aditivos en productos comerciales, como desengrasantes. Desafortunadamente, las grasas y sustancias no acuosas también incluyen a los lípidos que componen las células que forman parte a su vez de las membranas de los tejidos. Las células de la piel están bien protegidas por una membrana permeable de queratina, pero el tejido epitelial tal como el que compone la cubierta de la garganta y los pulmones son mucho más sensibles. Es por esto, que la inhalación de vapor de hidrocarburos pueden causar daños a los tejidos del pulmón.

La principal dificultad con el diagnóstico de problemas agudos de salud asociados con la exposición a hidrocarburos es que muchos de los síntomas son esencialmente los mismos de la tensión u otras dolencias relativamente menores: pérdida de la coordinación, mareo, náusea, vómito, diarrea, irritabilidad, pérdida de apetito; son síntomas regularmente comunes que pueden reflejar efectos a la salud sin estar relacionados con la exposición a hidrocarburos.

- **Compuestos aromáticos:** El benceno y sus relativos alquilbencenos son generalmente considerados los más tóxicos de la gasolina (excepto por el metanol, el cuál no es un aditivo de los hidrocarburos). Estos compuestos que pueden llegar a representar más del 50 % en peso de la gasolina Premium sin plomo, utilizada en E.U., pueden provocar tanto efectos tóxicos como agudos en seres humanos.

Los efectos tóxicos incluyen los síntomas típicos de la depresión del SNC resultado de la inhalación de hidrocarburos: dolor de cabeza, náusea. Han sucedido muertes por una simple exposición de 5 a 10 minutos a vapores de benceno con concentraciones de 20,000 ppm. Concentraciones de 3,000 a 7,500 pueden provocar síntomas tóxicos en 1 hr. Exposiciones de 50 a 250 ppm de benceno pueden dar como resultado dolor de cabeza y mareo, la recuperación es rápida exponiéndose al aire fresco. Para exposiciones a concentraciones de 25 ppm no se tienen reportados los efectos. El contacto directo de elevadas concentraciones de benceno con la piel puede causar inflamación y dermatitis.

Los efectos crónicos más importantes a la exposición de benceno por largos períodos son la destrucción de células, la médula de los huesos y cáncer. Los primeros efectos crónicos



son la leucemia reversible (decremento de los glóbulos blancos en la sangre) la anemia (decremento de los glóbulos rojos).

- **Tolueno:** representa aproximadamente del 4 al 7% de la gasolina. El principal riesgo asociado con la inhalación aguda de altos niveles de tolueno es la depresión del SNC. La exposición controlada de seres humanos sujetos a 200 ppm de tolueno por 8 horas produjo fatiga moderada, debilidad, confusión, lagrimeo y comezón en la piel. A 600 ppm se observan efectos adicionales, incluyendo euforia, dolor de cabeza, mareo, pupilas dilatadas y náusea. A 800 ppm los síntomas fueron más severos y requirieron varios días para desaparecer. Se han observado efectos dañinos en humanos después de 20 minutos de exposición a 300 ppm y después de 7 horas a 200 ppm. La irritación de ojos es notable con vapores cuya concentración es varia de 300 a 400 ppm.

- **Xilenos:** componen cerca del 6 al 8 % del peso de las gasolinas, los principales efectos son similares a los de las exposiciones a otros alquilbencenos: depresión del SNC, pérdida de coordinación, náusea, vómito y dolor abdominal. Los xilenos tienen efectos variables sobre el hígado y los riñones así como irritación sobre el tracto gastrointestinal. En estado líquido y gaseoso (vapor) son irritables a la piel y ojos.

Los efectos crónicos de la exposición al xileno se asemejan a la exposición aguda, pero son más severos. Se ha reportado dolor de cabeza, irritación y fatiga, desordenes digestivos y desordenes del sueño. La inhalación de altas concentraciones pueden causar temblores, debilitamiento de la memoria, mareo, vértigo, dolor de cabeza y anorexia.

- **Etilbenceno:** irrita la piel, ojos y tracto respiratorio superior. La absorción sistemática causa depresión de SNC. Se tienen limitados datos sobre los niveles de exposición humana. A 200 ppm el vapor irrita los ojos; a 2000 ppm, la irritación de ojos y el lagrimeo son inmediatas.

- **Alcanos:** los hidrocarburos alifáticos en general, y los alcanos en particular, tienen un efecto narcótico o depresivo sobre el sistema nervioso humano. La absorción puede ser a través de la piel o los pulmones. Los síntomas de una intoxicación con hidrocarburos alifáticos son similares a los de los compuestos aromáticos. Los alcanos son buenos



solventes de lípidos y pueden disolver los lípidos de los tejidos y las células de las membranas si son aspirados por los pulmones.

- **n- Hexano:** es el más tóxico de los alcanos. Comprenden del 11 al 13 % en peso de las gasolinas. La mayor parte de los datos de exposición de trabajadores a vapores del solvente en sus centros de labores y puede ser no directamente comparable con la exposición en suelo y agua contaminada.

Las exposiciones agudas ocurren a través de la inhalación. Los principales síntomas de la exposición son vértigo, dolor de cabeza y náusea. En exposiciones a altas concentraciones tienen un efecto narcótico sobre el SNC. Los efectos pre-narcóticos ocurren en concentraciones de vapor de 1500 a 2500 ppm

La exposición crónica a los vapores de n-hexano causa daño a los nervios musculares. La principal señal clínica de daño a los nervios es el entumecimiento y pérdida de los reflejos musculares. Se desarrolla parálisis con diferentes niveles de gravedad. La recuperación inicia de las 6 a las 12 semanas después de la exposición. Los casos más severos toman años de recuperación.

- **Octano:** se inhala dentro de los pulmones, puede causar rápidamente la muerte debido a un paro cardíaco, parálisis respiratoria y asfixia. El octano tiene un efecto narcótico similar al Hexano. Una prolongada exposición a la piel causa quemaduras y ampollamiento de la misma.

- **Isopropeno:** es un depresivo del SNC. Los efectos de la toxicidad aguda son similares a los efectos de la intoxicación por alcohol, excitación, mareo, dolor de cabeza, náusea, confusión y pérdida de la coordinación. La exposición prolongada provoca pérdida del conocimiento.



1.1.6 Fuentes de contaminación de suelos y acuíferos por hidrocarburos en instalaciones petroleras de México¹¹.

Dentro de las actividades que desarrolla la industria petrolera en México que van desde la extracción del crudo hasta su venta final, las petroquímicas son las que tienen mayor grado de peligrosidad para el medio ambiente, esto en función de sus desechos que aumentan en variedad y toxicidad. En general los residuos petroquímicos al no ser biodegradables, representan un serio y constante peligro para los organismos y los ecosistemas.

Como producto de las actividades petroleras, los suelos son alterados por la construcción de rutas de acceso, remoción de cubierta vegetal o edifica para la instalación de campamentos y actitudes depredatorias sobre recursos bióticos por parte de los que realizan dichas actividades. Las vías de acceso se convierten en vectores de colonización espontánea y de asentamientos irregulares, sin importar los riesgos de fuga y explosión. Esto causa perturbación de los ecosistemas, desaparición de especies vegetales y desplazamiento de especies animales del lugar.

La contaminación de suelos y acuíferos ocasionada por la industria petrolera se presenta durante las actividades de extracción refinación, petroquímica, transporte, distribución, almacenamiento y comercialización. En las actividades de extracción se observan derrames y explosiones de hidrocarburos, acumulación de residuos de perforación y lodos aceitosos. En refinación y en petroquímica se requieren grandes extensiones para la construcción de tanques de almacenamiento, así como plantas industriales de transformación, sistemas para la generación y distribución de fluidos, vapores y de enfriamiento de agua. Se observa un alto consumo de agua, derrames y descarga de residuos de industriales de alta toxicidad y no biodegradables. Además durante el transporte se presentan también riesgos por derrames de residuos peligrosos.

Las redes de los ductos de distribución están siempre sujetas a riesgos de accidentes de diversa índole como derrames, explosiones, incendios y fuga de gas. El almacenamiento en tanques es una situación similar.



Las tuberías, ductos y tanques de almacenamiento de combustibles, generalmente no se revisan con la frecuencia requerida, por lo que no se toman las medidas preventivas necesarias y los casos se atienden una vez que ocurre la ruptura de éstos. Además, las instalaciones petroleras están a la intemperie y gran parte se encuentran en zonas costeras, donde la corrosión acaba con todos los elementos metálicos presentes. Otros derrames de hidrocarburos que ocurren accidentalmente y son menos considerados se refieren a volcaduras de pipas y son parte de las actividades de transporte.

Algunos problemas de contaminación que han sido producto de descargas de residuos se encuentran en zonas pantanosas, donde el nivel freático se eleva en la temporada de lluvias. En estas zonas se hace muy difícil el acceso aún para realizar actividades de prospección.

Otro foco de contaminación del subsuelo en las industrias de refinación y petroquímica son las instalaciones antiguas que no fueron completamente desmanteladas y se han convertido en cementerios industriales. En estos sitios, la contaminación con hidrocarburos es mínima, los principales contaminantes son compuestos inorgánicos, muchos de ellos tóxicos, que se lavan fácilmente por efecto de las lluvias y así penetran al subsuelo.

1.1.7 Alternativas para los residuos peligrosos⁴.

Con los residuos peligrosos se debe preocupar por el pasado: ¿dónde están los residuos que hasta ahora se han generado? ; por el presente: ¿qué se hace con los residuos que se están generando? ; y, por el futuro: ¿qué pasará con los confinamientos que se están instalando? . Es necesario preocuparse por los residuos ya generados y, al mismo tiempo, buscar la instrumentación de programas de minimización. Es decir, hay que incorporar tecnologías para la remediación de sitios, simultáneamente a la incorporación de tecnologías para hacer más eficientes los procesos industriales. Existen compañías nacionales y extranjeras que ofrecen sus productos, sus equipos y sus tecnologías. Como en otros campos, habrá que examinar las actividades curriculares de dichas empresas y se tendrá que certificar el grado de actualización de la tecnología que ofrecen.

Uno de los grandes desafíos que enfrenta el país es la modificación de las tendencias y percepciones sobre el manejo y disposición final de los residuos industriales peligrosos.



Ello implica romper la inercia de conductas que durante años han propiciado el almacenamiento de dichos residuos en los patios de las empresas; su vertimiento en los drenajes o tiraderos municipales de basura y tantas otras modalidades de eliminación ambientalmente inadecuadas.

Se trata pues, de abandonar esas conductas y reemplazarlas por otras en las que su manejo sea respetuoso del ambiente, a partir de un enfoque en el cual se establezca una jerarquía en la administración de residuos peligrosos, basada en la adopción de los siguientes puntos, citadas de acuerdo con la prioridad con que se les asigna:

1. - Reducción de la generación
2. - Reciclado
3. - Tratamiento: físico, químico o biológico
4. - Incineración
5. - Confinamiento controlado

Se entiende que ese orden podrá ajustarse temporalmente a las condiciones particulares tanto de las industrias generadoras de los residuos como de los recursos disponibles para ello, hasta alcanzar la meta de reducir su generación mediante el empleo de tecnologías limpias de producción, acopladas con proceso de reuso y reciclado de los residuos.

Un paso fundamental para lograr el cambio de actitudes de comportamiento de los generadores de los residuos peligrosos consiste en que estos se identifiquen a fin de reducir su generación. Esto puede ser un negocio lucrativo e incluso es posible aumentar su competitividad en los mercados.

Existe un marco normativo que se fortalecerá con la publicación de nuevas normas relativas a la incineración, reciclado y reuso de los residuos peligrosos. Para los industriales que tienen que cumplir con la normatividad, para las empresas consultoras que ofrecen sus servicios en la materia y para las instituciones de investigación y desarrollo tecnológico es importante conocer el marco jurídico completo al que se someterá la administración de los residuos peligrosos, tanto para orientar sus inversiones, como para planear actividades de asesoría y oferta de tecnologías, o promover estudios y programas de capacitación.



Es indudable que los residuos peligrosos no pueden dissociarse de los de las sustancias tóxicas y materiales peligrosos que los conforman, y por lo cual es preciso fomentar en México la evaluación y el control de esos riesgos a lo largo del ciclo de vida integral de dichas sustancias y materiales y no sólo en su fase final, cuando ya se han convertido en residuos peligrosos. El empleo del método de evaluación de riesgos tiene como ventaja ofrecer elementos objetivos para establecer prioridades de acción.

1.2 Panorama de la industria en México²⁶.

La industria utiliza materias primas, energía, capital y trabajo humano para generar bienes socialmente deseables, pero también, sus procesos productivos arrojan al ambiente subproductos indeseables para los cuales, generalmente, no hay precios positivos ni mercados. Entre ellos están las emisiones de contaminantes a la atmósfera, las descargas de aguas residuales y los residuos peligrosos y no peligrosos.

En México, se sabe que hasta 1970 prácticamente no se aplicó ningún criterio ambiental para el desarrollo industrial, aunque había indicios de impactos crecientes, particularmente en términos de contaminación atmosférica y la generación de desechos. Se estima que entre 1950 y 1960 estos efectos se incrementaron conforme la industria fue recomponiéndose, aumentando la presencia de ciertas ramas y tecnologías más contaminantes. Adicionalmente, las afectaciones ambientales derivadas de la industria eran consideradas como efectos locales y eran percibidas a una escala que, se pensaba, no ameritaba una preocupación mayor. En cuanto al uso de recursos naturales, predominaba la idea de su explotación como fuente inagotable y, por tanto, sin necesidad de imponerle restricciones.

Un dato importante es que la presencia de empresas públicas entre las más contaminantes y de mayor riesgo fue cada vez mayor. La ausencia de un marco normativo y de control adecuado y el incumplimiento de las disposiciones existentes, hizo que éstas adquirieran una responsabilidad creciente en el impacto ambiental industrial en comparación con las empresas privadas. Dadas las dimensiones de varias de ellas, como son los casos de CFE y PEMEX, este dato resulta relevante para ser considerado al formular las políticas ambientales.



La promulgación de la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental, en 1971, marca el surgimiento de una normatividad que, aunque estaba más orientada por criterios de salud, incorporaba elementos para el control de emisiones, lo que comprometía a la industria en el logro de procesos cada vez más limpios. Posteriormente, la aparición de un nuevo Código Sanitario, en 1973, introdujo normas más específicas relacionadas con emisiones y descargas industriales y la generación de residuos peligrosos. Se expidieron también reglamentos para la prevención y control de la contaminación atmosférica por humos y polvos, de control de la contaminación de aguas, de prevención y control de la contaminación del mar por desechos y otros ordenamientos que directa o indirectamente se relacionaban con la industria.¹⁵

La industria fue de las actividades más impactadas por la crisis de los 80's y, hacia 1988, el grado de industrialización era inferior al de 1980. Sólo experimentaron un auge, incluso en los años de la crisis más intensa, las que se reorientaron pronto hacia las exportaciones. El cambio más significativo fue el auge exportador de las manufacturas y el crecimiento acelerado de las maquiladoras.

Un hecho relevante es que, al margen de sus dificultades, la industria es en México la parte más productiva de la economía, la que paga los salarios más elevados y la que aporta la mayor parte de los recursos externos. Aunque los servicios juegan ahora un rol cada vez más importante y los índices de industrialización ya no van en ascenso, es indudable que el papel del sector seguirá siendo determinante en el crecimiento económico del país. Por ello su importancia en la configuración de varios de los procesos en curso.

1.2.1 Clasificación de residuos por su estado físico²⁶.

Cualquier proceso de transformación, separación o purificación puede ser dividido en lo que la ingeniería denomina *operaciones unitarias*; muchas de ellas han sido estudiadas extensamente y están claramente definidas y descritas en la literatura técnica. Tales operaciones unitarias se insertan en diferentes procesos industriales manteniendo sus principios básicos, aunque varíe en cada proceso su dinámica y la corriente de materiales.



La caracterización de las operaciones unitarias permite entender la lógica de generación de residuos de manera integrada a los procesos industriales.

Los residuos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- aguas de proceso
- arenas, tierras y polvos
- breas
- cabezas
- colas
- catalizadores gastados
- disolventes
- efluentes tratados
- envases y empaques
- escorias
- líquidos residuales
- lodos de proceso
- lodos de tratamiento
- materiales de relleno contaminados
- sólidos residuales
- soluciones gastadas
- lubricantes gastados
- residuos de proceso
- carbón activado

1.2.2 Inventarios de generación de residuos industriales peligrosos y su distribución espacial²⁶.

La industria contribuye a la generación de contaminantes de manera muy diversa, dependiendo de las características de los procesos y del tipo de insumos y productos. Los residuos generados por la actividad industrial pueden considerarse peligrosos si poseen algunas de las características CRETIB es decir, si presentan propiedades corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas y/o inflamables. Igualmente pueden ser identificadas por sus estados físicos, su composición química, o su descripción genérica (aguas, breas, lubricantes, colas, disolventes, envases, sedimentos, cabezas, carbones activados, catalizadores, jales, lodos, soluciones, tierras y otras). Dependiendo del volumen de generación y su concentración, estos residuos y sustancias peligrosos pueden representar mayores o menores riesgos ambientales.

Se estima que la generación total de residuos peligrosos de origen industrial en México asciende a un volumen aproximado de ocho millones de toneladas anuales (tabla 1.1), lo

¹⁵ Instituto Nacional de Ecología. Programa para la minimización y manejo integral de los residuos industriales peligrosos



que no incluye los jales mineros, residuos que también pueden ser peligrosos y que se producen en grandes cantidades (entre 300,000 y 500,000 toneladas diarias). Por su parte, la infraestructura y los sistemas de manejo en operación son sumamente precarios.

Tabla 1.1 Generación de residuos peligrosos por regiones (1994).

Región	Generación (millones de toneladas/año)	Porcentaje
Franja fronteriza	62	0.78
Norte	2006	25.08
Centro	5067	63.34
Golfo	602	7.52
Sureste	262	3.28
Totales	8000	100.00

Fronteriza: Principales áreas industriales ubicadas en la franja colindante con los Estados Unidos de América

Norte: Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Sonora, Nuevo León, Durango, Nayarit, San Luis Potosí, Sinaloa, Zacatecas, Aguascalientes, Colima, Jalisco.

Centro: Guanajuato, Michoacán, Morelos, Puebla, Querétaro, Estado de México, Tlaxcala, Hidalgo y el Distrito Federal.

Golfo: Tamaulipas, Veracruz y Tabasco.

Sudeste: Campeche, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Yucatán y Quintana Roo.

Es interesante observar que en forma conjunta, la Zona Norte y la Zona Centro generan casi el 90% de los residuos peligrosos del país.¹⁵

Según el tipo de residuo, los aceites y grasas conjuntamente con los disolventes, representan más del 45 % del total de los residuos que se generan en el país. Las resinas, ácidos y bases representan el 10% y los desechos de pinturas y barnices el 8%.

1.2.3 Sitios identificados de disposición inadecuada de residuos peligrosos²⁷.

Tradicionalmente, desde el inicio del proceso de industrialización en México, la industria minera, química básica, petroquímica y de refinación del petróleo, han producido cantidades muy grandes, pero muy difíciles de cuantificar, de residuos peligrosos. En muchos casos éstos han sido depositados abiertamente en el suelo sin ningún tipo de control. Esto ha planteado importantes riesgos a la población o bien generando riesgos de contaminación en acuíferos por la lixiviación de contaminantes.



En México existen áreas industriales consolidadas, en donde se consideran actividades prioritarias desde el punto de vista de generación de residuos peligrosos. Tales el caso de la refinación de petróleo, petroquímica básica y secundaria, industria química y beneficio de minerales.

La inexistencia durante décadas de capacidades de manejo, de normatividad, de inspección y vigilancia así como el desconocimiento sobre el impacto de los pasivos ambientales de residuos peligrosos importantes al ambiente, favoreció la acumulación inadecuada de residuos en importantes zonas y plantas del país.

1.2.4 Legislación²⁸.

La publicación en julio de 1992, de la nueva Ley Federal sobre Metrología y Normalización, ha dado lugar a que las normas y especificaciones técnicas, criterios reglas, acuerdos, manuales, instructivos, circulares, lineamientos y demás disposiciones en todas las materias - incluyendo las relativas a residuos peligrosos -, requieran ser replanteadas con un sustento basado en el análisis costo - beneficio para su establecimiento como Normas Oficiales Mexicanas, que son las únicas que pueden tener carácter obligatorio. La liberalización del comercio, la participación de nuestro país en diversos convenios y acuerdos internacionales, y la necesidad de instrumentar las propuestas asentadas en la Agenda 21 (gestión ambientalmente adecuada de los residuos, en particular de los peligrosos y las sustancias tóxicas, así como la prevención del tráfico internacional ilegal de productos tóxicos o peligrosos), determinan que México deba desarrollar rápidamente, en un futuro próximo, un marco regulatorio y un enfoque estratégico que le permita enfrentar todos estos compromisos.

En lo que respecta a la legislación en materia de residuos peligrosos en México, ésta se basa en:¹⁶

- ◆ La ley general del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.
- ◆ El reglamento de la misma ley en materia de residuos peligrosos.

¹⁶ Carmona, L. M. C., Los problemas ambientales y la legislación ambiental y ecológica en México. México, IJ, UNAM, 1993.



- ♦ Siete normas técnicas ecológicas (NTE's) publicadas en 1988 y 1989 que cubren los criterios de peligrosidad y la operación de confinamientos controlados: NOM-CRP-001/88, NOM-CRP-002/88, NOM-CPR-003/88, NOM-CRP-009/89, NOM-CPR-010/88, NOM-CPR-011/89.

Pese a la técnica y cuidado en las operaciones petroleras, es evidente el daño causado a la ecología, debido a derrames de hidrocarburos así como estanques para recibir los desechos y residuos de hidrocarburos naturales que provienen de la extracción petrolera, y que en muchos casos han permanecido por más de 20 años al punto de haberse solidificado en una amalgama de petróleo, restos de vegetación, lodo, desperdicios de toda naturaleza, que muestran una superficie negra, con el daño ecológico correspondiente.

Un reciclaje apropiado permite alternativas para reutilizar el petróleo recuperado. En el caso de crudos pesados, se pueden procesar para obtener asfaltos mediante una polimerización por emulsión, y en el caso de hidrocarburos ligeros, luego de pasar por una etapa de purificación se pueden incorporar de nuevo al proceso de producción.

En general, puede decirse que la elaboración de un número considerable de normas aplicables a la industria ha constituido, sin duda, uno de los avances más importantes de la política regulatoria ambiental del país. Se han enfrentado los problemas específicos prioritarios impulsando la adaptación a las circunstancias mexicanas de la mejor tecnología de control postproductivo (al final del tubo) disponible. Asimismo, la difusión de las NOM entre los agentes normados y la vigilancia de su cumplimiento han tenido un impacto significativo en la conducta de muchas empresas industriales.

1.2.5 Limitaciones del Marco Normativo²⁸.

A pesar de lo anterior, varios aspectos de la normalización ambiental deben ser objeto de una revisión profunda, entre otras, por las siguientes razones:

- El camino originalmente planteado de buscar que cada empresa adopte la mejor tecnología de control disponible resulta excesivamente lento y complejo, debido a las especificidades tecnológicas de cada familia de procesos productivos, y a los



prolongados tiempos de discusión inherentes a un mecanismo de normalización jurídicamente complejo.

- Hay un alto costo asociado a los estudios requeridos para el diseño de normas aplicables al control de procesos específicos.
- Se promueven soluciones de control remediales y de final del tubo, y no cambios en los procesos productivos u otras alternativas de menor costo y/o mayor eficiencia.
- No se obliga a todos los productores a acatar límites, y algunos permanecen sin normar en tanto no se desarrolle una NOM específica para ellos, lo que inhibe una adecuada protección del ambiente y favorece la discrecionalidad en las funciones de inspección.
- Se establecen límites diferentes para cada industria y para un mismo contaminante en un ecosistema dado que, no reflejan ni internalizan adecuadamente los costos ambientales involucrados.
- Se ignoran los efectos diferenciales que la emisión de un contaminante tiene sobre cada ecosistema receptor.
- No se consideran los efectos de transferencia de contaminantes entre medios.
- Los métodos de medición contemplados en algunas normas se han vuelto obsoletos.

1.2.6 Perspectivas²⁸.

Para superar las limitaciones y vacíos existentes es necesario revisar el marco normativo actual en varios sentidos, tanto para darle un mayor alcance como para corregir sesgos tecnológicos implícitos, con la finalidad de lograr una más eficiente protección del ambiente.

En general se debe procurar condensar, si ello es posible, en una sola norma los límites aplicables a industrias diferentes. El desarrollo de nuevas normas debe contemplar las vinculaciones con otros instrumentos regulatorios y con la normalización voluntaria, así como incorporar los tiempos de ajuste que requieren los sectores afectados. Es necesaria una mayor coordinación entre las normas aplicables a diferentes medios y buscar que, en algunos casos al menos, se avance hacia una normatividad multimedios.



Las normas deben tomar en consideración las tecnologías de proceso, control y medición disponibles y el costo de las mismas, pero bajo ninguna circunstancia es permisible que favorezcan tecnologías particulares ni que se constituyan en un obstáculo para la adopción de tecnologías que pudieran surgir.

Es posible señalar algunos lineamientos deseables para el desarrollo de normas ambientales para la industria:

- Deben ser de observancia generalizada para un número relativamente grande de actores, procesos o actividades.
- De ser posible deben ser aplicables a todos los agentes que contribuyen al problema, y diferenciadas por tipo de ecosistema si ello es conveniente.
- Su aplicación debe ser gradual, para permitir un ajuste menos costoso.
- Los efectos potenciales sobre los medios (agua, aire, suelo, ecosistemas) requieren ser considerados.
- Deben analizarse los efectos derivados que puedan afectar a otros sectores (por ejemplo, considerar los efectos sobre la demanda y disponibilidad de combustibles).
- El tiempo de aplicación debe ser lo más prolongado posible, para dar certeza a los agentes normados.



Capítulo 2: Emulsiones





2. EMULSIONES

2.1. Tensión superficial e interfacial⁵.

Los fenómenos de tensión superficial e interfacial se pueden explicar en función de las fuerzas atractivas de Van der Waals de corto alcance entre las moléculas. Las moléculas que están situadas en el seno de un líquido están sometidas a fuerzas iguales de atracción en todas direcciones, mientras que las que están situadas, por ejemplo, en una interfase líquido - aire experimentan fuerzas atractivas no equilibradas con un empuje resultante hacia el interior (fig. 2.1). Tantas moléculas como sea posible abandonarán la superficie para pasar al interior del líquido, con lo cual la superficie tenderá a contraerse espontáneamente. Por esta razón las gotas de líquido y las burbujas de gas tienden a tomar una forma esférica.

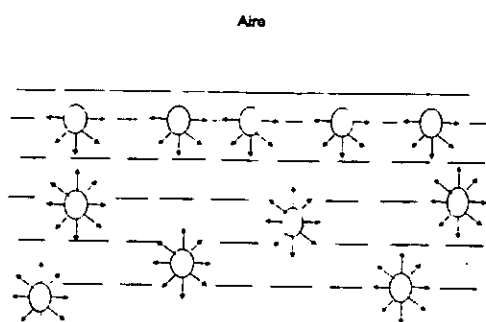


Fig. 2.1 Fuerzas de atracción entre moléculas en la superficie y en el interior de un líquido.

La tensión superficial γ_0 de un líquido se define como la fuerza, en dinas, que actúa perpendicular a cualquier línea de 1 cm de longitud, en la superficie del líquido y tiene las unidades de dina * cm⁻¹. La energía libre superficial de un líquido se define como el trabajo, en ergios, necesario para aumentar 1 cm² de la superficie de un líquido y tiene las unidades equivalentes dimensionalmente a ergios * cm⁻². La tensión y la energía libre superficiales son numéricamente iguales siempre y cuando la viscosidad del líquido no sea muy grande. Las mismas consideraciones son válidas para las interfaces entre dos líquidos inmiscibles. También en este caso hay desequilibrio de fuerzas intermoleculares aunque de menor magnitud.

2.1.1 Agentes de superficie activa¹.

Cuando dos o más fases de bulto se encuentran en un estado de miscibilidad limitada, se definen también regiones de separación (intercaras), los primeros efectos notables sobre



las propiedades de estas regiones heterogéneas fueron los ejercidos por los tensoactivo (surfactantes) que son moléculas con carácter anfifílico capaces de abatir la energía libre de superficie o tensión superficial.

El modelo de mayor aceptación para un anfifilo corresponde a las estructuras moleculares de doble carácter; una porción compatible con el medio ambiente (liofílica) y otra de carácter repulsivo (liofóbica). Si el medio ambiente es de carácter acuoso, la parte compatible con el medio ambiente (hidrofílica), contiene grupos polares o cargas formales, mientras que la parte repulsiva (hidrofóbica) es generalmente de carácter hidrocarbonado. Esta dualidad estructural favorece energéticamente la ubicación de la molécula en la superficie; la parte liofílica hacia el solvente y la parte liofóbica fuera de él. En el caso de los sistemas agua - aceite (todo material parcialmente miscible con agua y/o sus soluciones), la parte hidrofílica estará dirigida a la fase acuosa y la parte hidrofóbica hacia la fase oleosa. El resultado global de esta competencia microscópica se refleja en el fenómeno de adsorción o concentración superficial. Esta propiedad se obtiene indirectamente mediante valores experimentales de abatimiento de tensión superficial vs composición.

Un tensoactivo o surfactante⁴¹ se define como un material que puede reducir la tensión superficial del agua cuando se usa en concentraciones bajas. Los tensoactivos (fig. 2.2) son moléculas que contienen una parte soluble en agua (hidrófila) y otra insoluble en agua (hidrofóbica). La parte hidrofóbica usualmente contiene de 8 a 18 átomos de carbono, y pueden ser compuestos alifáticos, aromáticos o una mezcla de ambos. La procedencia de la parte hidrofóbica son normalmente aceites y grasas naturales, fracciones de petróleo, polímeros sintéticos relativamente cortos o alcoholes sintéticos de alto peso molecular. Los grupos hidrofílicos darán una clasificación principal a los tensoactivos y son iónicos, catiónicos y no iónicos naturales. Los aniónicos hidrófilos son los carboxilatos (jabones), sulfatos y fosfatos. Los

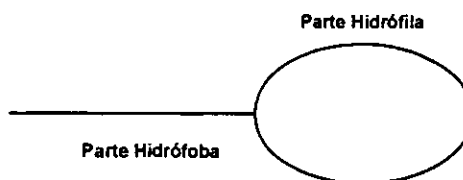


Fig. 2.2 Estructura de una molécula de tensoactivo.



hidrófilos catiónicos son algunos en forma de productos de aminas. Los hidrófilos no iónicos asociados con el agua a otros oxígenos de éter de una cadena de polietilenglicol. Los tensoactivos son moléculas de superficie activa.

La fuerte adsorción (fig. 2.3) de las sustancias a las superficies o interfases en forma de una *capa monomolecular* orientada (o *monocapa*) se llama *actividad superficial*. Las sustancias con actividad superficial (o *surfactantes*) son moléculas que tienen partes polares y no polares (*anfifílicas*). La actividad superficial es un fenómeno dinámico, puesto que el estado final de una superficie o interface representada en un equilibrio entre estas tendencias a la adsorción y la tendencia hacia la disolución completa debido a la agitación térmica de las moléculas⁵.

La tendencia de las moléculas surfactantes a acumularse en la interfase favorece una expansión de la misma, lo cual ha de ser contrarrestado por la tendencia de la interfase a contraerse bajo las fuerzas normales de la tensión interfacial.

2.1.2 Agregados micelares¹.

En los dos casos anteriores: tensión superficial (L/V) y tensión interfacial (L_1/L_2), la condición de saturación de la superficie obliga a los anfífilos a una nueva trayectoria energética. La propuesta de McBain (J.W. Mc Bain 1913) resultó acertada al postular que este tipo molecular procedía, después de saturada la superficie a formar

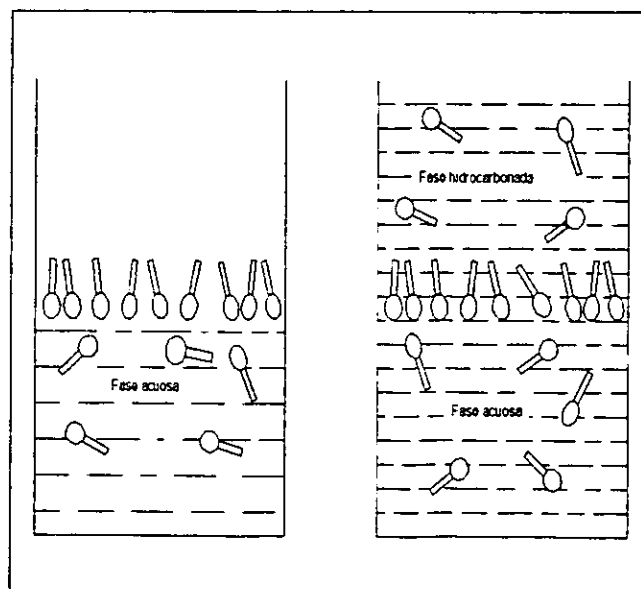


Fig. 2.3 Adsorción de moléculas con actividad superficial en forma de monocapa orientada a interfaces aire/agua y aceite/agua. La parte circular representa la cabeza constituida por un grupo polar hidrofílico y la parte rectangular la cola hidrocarbonada no polar.



agregados en el interior de las fases de bulto; las porciones hidrofílicas constituyen el núcleo del agregado y sus porciones hidrofóbicas la corteza, cuando el medio ambiente es del tipo oleoso. La estructura se interviene cuando el medio ambiente es de tipo acuoso. La condición de temperatura y composición donde se originan estas agrupaciones se conoce como concentración micelar crítica (CMC). La propuesta original de McBain ha sido confirmada mediante determinaciones de presión osmótica, conductividad, ultracentrifugado, dispersión luminosa, resonancia y otras propiedades.

Las soluciones de surfactantes tienen propiedades físicas no usuales. En solución diluida se comportan como electrolitos normales, pero a una concentración dada y bien definida ocurren cambios bruscos en su presión osmótica, conductividad eléctrica y tensión superficial que por ello pueden utilizarse para determinar la CMC⁸ (fig. 2.4).

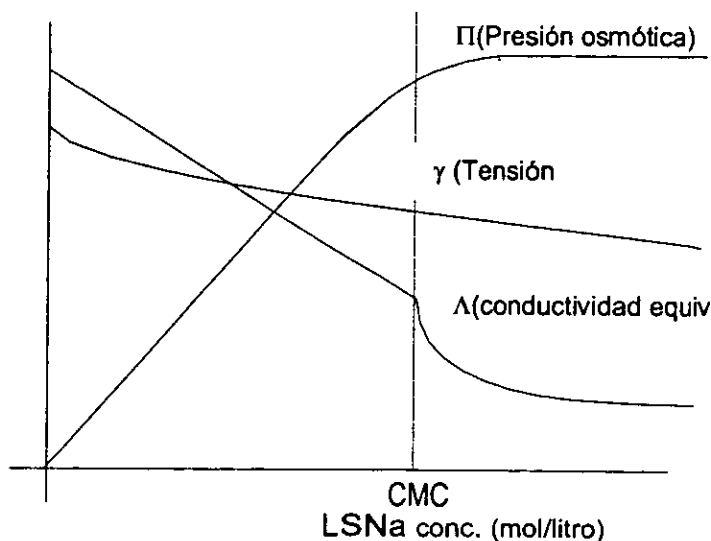


Fig. 2.4 presión osmótica, conductividad equivalente y tensión superficial de Soluciones de lauril sulfonato sódico, en función de la CMC.



2.2 Emulsiones

2.2.1 Definición¹⁰.

Se llama emulsión a una dispersión coloidal* de un líquido en otro inmiscible con él, y puede prepararse agitando una mezcla de los dos líquidos o, preferentemente, pasando la muestra por un molino coloidal llamado homogenizador. Tales emulsiones no suelen ser estables y tienden a asentarse en reposo; para impedirlo, durante su preparación, se añaden pequeñas cantidades de sustancias llamadas agentes emulsificantes o emulsionantes, que sirven para estabilizarlas. Estas son generalmente tensoactivos de varias clases, sulfatos y ácidos sulfónicos de cadena larga o coloides liófilos.

Si se emplea el término aceite para designar a todo líquido inmiscible con el agua, capaz de formar una emulsión con ella, las emulsiones pueden clasificarse en dos tipos que son:

- Emulsiones de aceite en agua (O/W), en las que la fase dispersa es el aceite.
- Las de agua en aceite (W/O) en las que aquélla es la fase dispersa.

El tipo de emulsión que resulta de la agitación de dos líquidos, depende de las proporciones relativas de ambos en la mezcla. En general, el que está en exceso actúa como "fase exterior" o medio y el otro como "fase interior". La proporción exacta de éste, requerida para la formación de un tipo de emulsión es difícil de definir.

El tipo a que corresponde una emulsión particular se deduce de varias formas. Si el agua constituye la fase exterior, toda el agua añadida a la emulsión será fácilmente miscible, más no así el aceite. Análogamente si la fase externa es de aceite, la miscibilidad ocurrirá con el aceite que se agregue, pero no con el agua. Una forma de distinguir las emulsiones, se basa en el hecho de que una pequeña cantidad de electrólito añadido la hará conductora si la fase exterior es agua, pero tendrá poco efecto sobre la conductancia si el medio dispersor es aceite.

*Una dispersión coloidal es una suspensión de partículas divididas finamente en un medio continuo, el tamaño aproximado de estas partículas es de 1 μ .



El tamaño de la fase distribuida es generalmente de 0.1 hasta más de 1μ de diámetro. Las emulsiones pueden separarse en sus líquidos constituyentes por calentamiento, congelación, agitación, centrifugación, por adición apreciable de electrolito como agente salino de la fase dispersa, y por destrucción química del agente emulsificante. La centrifugación se usa generalmente para separar el agua del aceite. Debido a la carga negativa de los glóbulos, los electrólitos que contienen iones positivos divalentes y trivalentes son particularmente efectivos como agentes salinos de la sustancia emulsificada.

La selección de un emulsificante apropiado es esencialmente importante en la producción de una emulsión del tipo requerido, según DAVIES el tipo de emulsión que se forma depende de los valores del HLB (Balance hidrofílico - lipofílico)¹⁷.

Un emulsificante con un valor de HLB bajo forma una emulsión W/O, y los que tienen valores altos de HLB tienden a formar emulsiones O/W. Los emulsificantes con un valor de HLB moderado tienen igual tendencia a formar ambos tipos de emulsión.

La relación de volumen también puede afectar el tipo de emulsión. El exceso de agua favorece la formación de una emulsión O/W.

Además, si la película de interfase lleva una carga eléctrica débil, tiende a formar emulsiones W/O, y las películas altamente cargadas forman emulsiones O/W.

La suposición de que un emulsificante sólo forma un tipo de emulsión es inadmisibles. Esta tendencia básica es afectada por la composición del sistema, por la relación de volumen de las fases, por la secuencia en las cuales se adicionan los componentes, por la temperatura y por factores mecánicos. Si se usan mezclas de emulsificantes, esta relación puede determinar el tipo de emulsión, especialmente si los emulsificantes combinados tienen tendencias opuestas (valores de HLB opuestos).



2.3 Características de una emulsión⁹.

2.3.1 Apariencia.

La apariencia de una emulsión está dada por:

- Diferencia en el índice de refracción en las dos fases.
- Color.
- Presencia de sólidos.

Tabla 2.1 Efecto del tamaño de partícula de la fase dispersa en la apariencia de una emulsión

Tamaño de partícula	Apariencia
Glóbulos macroscópicos	Se distinguen dos fases
Más de 1 μ m	Emulsión blanco - lechosa
De 1 – 0.1 μ m	Emulsión blanca azulada
De 0.1 – 0.05 μ m	Gris semitransparente
Menos de 0.05 μ m	Transparente

La claridad o transparencia se puede obtener teniendo ambas

fases el mismo índice de refracción o dispersando la fase interna en las partículas pequeñas que en la refracción no ocurre, debido al tamaño de la partícula que es mucho más pequeña que la longitud de onda de la luz (tabla 2.1).

2.3.2 Tamaño de partícula.

El tamaño de partícula de una emulsión líquida, depende del método de preparación, energía mecánica aplicada, la diferencia de viscosidad entre las fases y el tipo y cantidad de emulsificante empleado. Las emulsiones que contienen una pequeña cantidad de emulsificante, requieren de mayor energía mecánica y por el contrario si contiene gran cantidad de emulsificante, la energía requerida es mínima. La energía mecánica aplicada es una variable importante, el tamaño de partícula generalmente disminuye con una agitación vigorosa, la diferencia de viscosidad entre las fases disminuye, y también la cantidad de surfactante. En algunos casos se puede conseguir un tamaño fino de partícula mediante la técnica de inversión.

En una emulsión cuando la partícula es grande tiende a coalescer e incrementa aún más el tamaño de partícula. Así, las partículas finas promueven una emulsión estable. La coalescencia se puede retardar mediante un emulsificante o goma los cuales



proporcionan una acción de protección coloidal, incrementando la viscosidad de la fase continua y también aplicando energía mecánica.

El tamaño de partícula se puede reducir mediante:

- Incremento en la cantidad de emulsificante.
- Mejorando el HLB del emulsificante
- Preparando la emulsión mediante la técnica de inversión, aumentando la fase interna.
- Mejorando la agitación.

2.3.3 Estabilidad⁵.

Probablemente la propiedad física más importante de una emulsión es su estabilidad. El término "estabilidad de la emulsión" se utiliza en relación con dos fenómenos esencialmente diferentes, que son cremación o sedimentación y coalescencia.

La cremación o sedimentación, aparece por una diferencia de densidad entre las dos fases y si las partículas de la emulsión también son inicialmente grandes o se desarrollan a un tamaño semejante, este efecto no es responsable del movimiento Browniano⁹. Si no ocurre coalescencia o aglomeración, la emulsión se puede dispersar, y obtener un buen producto con una simple agitación.

Cuando una emulsión se crema, los glóbulos de la fase interna comienzan a agruparse más y más en la capa cremosa y muestra un incremento a la coalescencia, dejando una completa separación de las fases.

Las colisiones entre gotitas pueden producir floculación, que a su vez, puede conducir a la coalescencia con formación de glóbulos mayores. Finalmente, la fase dispersa se convierte en una fase continua separada del medio de dispersión por una sola interfase.

⁹ Movimiento de una partícula que está cambiando de dirección continuamente debido a los choques al azar, bien con las moléculas del medio, otras partículas o las paredes del recipiente. Cada partícula sigue un camino irregular y complicado en forma de zigzag. Cuando las partículas son lo suficientemente grandes, estos desplazamientos al azar se pueden observar directamente y son conocidos con el nombre de movimiento browniano.



El tiempo necesario para que tenga lugar esta separación de fases puede ser desde unos segundos a varios años, según la formulación de la emulsión y las condiciones de preparación .

La coalescencia de las partículas (de una emulsión es frecuentemente irreversible y es un caso de verdadera inestabilidad. Puede ser reversible si se agrega una porción relativamente grande de emulsificante y si además la elección de éste es el correcto, el cual proporcionará una gran facilidad de emulsificación.

2.4. Reología.

La consistencia de una emulsión puede variar considerablemente, de este modo, en el caso de las emulsiones O/W, la viscosidad usualmente es baja y difícilmente perceptible en una solución acuosa verdadera. Por otra parte las emulsiones W/O, alcanzan valores muy altos de viscosidad. Las emulsiones tienen una consistencia parecida a la mantequilla o ungüento, las cuales son frecuentemente el resultado de una estructura de gel líquido - cristalino.

Las emulsiones pueden ser fluidos ligeros o espesos, como pastas o geles y pueden presentar tixotropía o dilatancia. La viscosidad depende entonces de:

- Las características de la fase externa, incluyendo aditivos.
- La relación de volumen de las dos fases.
- El tamaño de partícula.

Por lo que las emulsiones O/W son más aguadas que las emulsiones W/O. La viscosidad de una emulsión es representada por la viscosidad de la fase externa, si esta representa más de la mitad del volumen total.

La viscosidad de la fase continua se puede incrementar con la adición de agentes espesantes o gelantes que son compatibles con el emulsificante. Dichos agentes, particularmente del tipo surfactante, puede simplemente espesar o tener un efecto



tixotrópico. Un producto tixotrópico puede semejarse a un gel en el que si se le cizalla a una velocidad constante, la viscosidad aparente disminuye con el tiempo hasta que alcanza el equilibrio entre la destrucción de la estructura y su formación de nuevo. Si el sistema deformado se deja en reposo, vuelve a adquirir su estructura original. La dilatancia se caracteriza por un aumento de la viscosidad aparente al aumentar la velocidad de deformación.

La viscosidad de las emulsiones se puede incrementar de la siguiente manera:

- Adicionando espesantes tales como, geles de jabón, ésteres de ácidos grasos lipofílicos y gomas, en la fase continua.
- Elevando la proporción de la fase interna.
- Reduciendo el tamaño de partícula.
- Incorporando finas partículas de aire como una tercera fase.

2.5 Fase inversa.

2.5.1 Definición.

La conversión de una emulsión W/O en una O/W, o viceversa, se conoce como fase inversa. Esto puede ocurrir si se incrementa la cantidad de la fase interna. Sin embargo, la emulsión puede romperse en este proceso. La fase inversa puede lograrse relativamente fácil con la mezcla de un componente soluble en agua y en aceite. La fase inversa es un vínculo a la solubilidad del emulsificante en las dos fases.

A cierto HLB ocurre la inversión más fácilmente, cambiando, bajando o subiendo valores de HLB la estabilidad de las emulsiones O/W o W/O incrementa hasta llegar a un máximo y entonces comienza a disminuir. La inversión y especialmente la fase inversa están relacionadas con la temperatura y la elección del emulsificante.



2.5.2 Temperatura de la fase inversa.

El valor de la temperatura de la fase inversa (phase inversion temperature; PIT), indica la temperatura a la cual un emulsificante soluble en agua es transformado en uno soluble en aceite. Cuando el PIT es bajo, el emulsificante usado es más hidrófobo, a un valor de PIT bajo le corresponde un valor bajo de HLB. El PIT se puede determinar por análisis térmico diferencial o eléctricamente.

2.6 Agentes emulsificantes.

El uso de emulsificantes iónicos y no iónicos en una emulsión dependerá del sistema. Generalmente, se usan los emulsificantes no iónicos para preparar emulsiones W/O. La adición de emulsificantes iónicos no tiene resultados efectivos. Los emulsificantes no iónicos también se pueden emplear para preparar emulsiones O/W.

Usualmente, se necesitan grandes cantidades de emulsificantes no cargados para preparar una emulsión estable. En la adición, el uso de dos componentes no iónicos con cadenas de éter de poliglicol de diferente tamaño, generalmente disminuye la concentración del emulsificante. La adición de emulsificantes aniónicos han dado resultados en mezclas de emulsificantes, de los cuales su uso es extenso.

2.6.1 Polaridad:

Una molécula no polar es una molécula cuyos átomos están dispuestos de tal manera que los centros de gravedad de las cargas negativas y positivas no están bien definidos y que vista desde afuera la molécula se consideraría neutra.

Una molécula polar es aquella que posee un doblete eléctrico perfectamente neutralizado dentro de la molécula, pero vista desde afuera, su distribución de cargas no esta definida.



Tabla 2.2 Grupos polares y no polares

Grupos Polares		Grupos no polares	
Hidroxilo	- OH	Laurilo	- C ₁₂ H ₂₅
Carboxilo	- COOH	Oleico	- C ₁₈ H ₃₃
Sulfato	- OSO ₃ H	Estearilo	- C ₁₈ H ₃₇
Sulfonato	- SO ₃ H	Fenilo	- C ₆ H ₅
Amino	- NH ₂		

Ciertas moléculas complejas están compuestas de dos partes: una con un grupo polar y la otra con un grupo no polar. Estos grupos no son absolutamente idénticos, para obtener un excelente emulsificante es necesario que haya una ligera predominancia de uno de los grupos respecto al otro.

2.6.2 Agentes emulsificantes aniónicos.

Su emulsión se considera con carga negativa y el pH de la fase acuosa es generalmente básico. Los más comunes son los jabones, sales de sodio, de ácidos sulfónicos y carboxílicos de cadenas largas, ácidos sulfónicos alquilados.

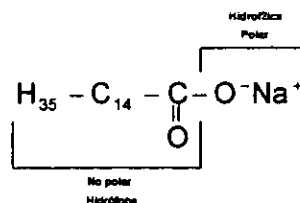


Fig. 2.5 Oleato de Sodio

Ejemplo: oleato de sodio (figura 2.5).

2.6.3 Agentes emulsificantes catiónicos.

Sus emulsiones se les considera con carga positiva y el pH de la fase acuosa es normalmente ácido; se trata generalmente de aminas de cadenas largas, de grupo cloruro o sulfato, ejemplo:



Los emulsificantes iónicos generalmente no se usan solos, pero se emplean para producir emulsiones con efectos especiales. Debido a la baja estabilidad de estas emulsiones son a menudo muy requeridas. Así, los emulsificantes catiónicos producen un cambio en la



carga en la grava, cuando se usan emulsiones con betún en caminos pavimentados. La inestabilidad de estas emulsiones son deseables frecuentemente. Es deseable el subsecuente rompimiento espontáneo de la emulsión ya que el agua puede evaporarse rápidamente de la superficie del camino.

2.6.4 Agentes emulsificantes no iónicos.

Tienen su grupo principal sin carga eléctrica, los cuales sin embargo, son de naturaleza polar: Estos grupos principales están basados en una cadena de óxido de etileno. La gran mayoría de los tensoactivos no iónicos son productos condensados, o de óxido de etileno con un agente hidrofóbico. Este grupo de detergentes es muy amplio y las combinaciones que se pueden llevar a cabo son innumerables. Junto con los aniónicos, son los más utilizados. Se utilizan ampliamente con otro tipo de surfactante, debido a su facilidad de mezclarse, como por ejemplo el alcohol laurico etoxilado.

2.7 Selección de emulsificantes.

La preparación de una emulsión enfrenta el problema de seleccionar cientos de emulsificantes, ya que solo unos cuantos producen la dispersión deseada de los componentes. Los emulsificantes o mezcla de emulsificantes que tienen un efecto óptimo en un sistema dado depende, por una parte en las propiedades físicas del sistema, y por otra parte, en la función al desempeño en la aplicación. Así, la práctica general incluye pruebas con varios emulsificantes. Se pueden tomar en cuenta las siguientes consideraciones para hacer una simple selección, pero también hay que tomar en cuenta que estas reglas tienen ciertas restricciones.

2.7.1 Estructura química.

La estructura química de un emulsificante, está asociada con la estructura química de la fase interna. Por ejemplo se puede emulsificar una grasa con un éster de ácido graso o grasas sulfatadas. Como regla general, los compuestos aromáticos son fáciles de emulsificar con emulsificante cuya sección hidrófoba contenga anillos aromáticos. Sin embargo, los aceites minerales son más fácilmente emulsificados con éteres de



poliglicoles de alquilfenol, con un éter de cadena corta que corresponde a éteres de alcohol poliglicol. Se recomienda emplear frecuentemente para la elección de un emulsificante uno que haya tenido resultados satisfactorios en sustancias emulsificadas con una estructura química similar.

2.7.2 Solubilidad.

A veces el emulsificante es escasamente soluble en la fase interna y soluble en la fase externa, requerimiento que a menudo resulta problemático. Generalmente, los emulsificantes solubles en aceite, tales como las sales de litio, calcio, magnesio o aluminio de cadena larga de alquil carboxílicos o ácidos sulfónicos, forman emulsiones W/O, puesto que los emulsificantes solubles en agua como los metales alcalinos o sales de amonio de los ácidos mencionados están más inclinadas a formar emulsiones O/W.

2.8 Sistemas HLB¹⁷.

Para hacer una buena selección de emulsificantes, GRIFFIN (W.C. Griffin, J. Soc.Cosm.chem.1.311,1949) asignó números adimensionales entre 0 y 20 a cada emulsificante para proporcionar información sobre la solubilidad en agua y aceite. Números entre 0 y 9 que caracteriza a los productos hidrófobos solubles en aceite, mientras que los números entre 11 y 20 se usan para compuestos oleófilos solubles en agua. El equilibrio hidrofílico – hidrófobo (balance hidrofílico – lipofílico, HLB) se sitúa en el centro (10) de la escala. Las sustancias con un valor de HLB de 10 se distribuyen entre las dos fases y de los grupos hidrofílicos (masa molecular M_H) proyectados completamente dentro del agua mientras que el grupo hidrocarbonado hidrófobo (masa molecular M_P) es absorbido en la fase no acuosa.

2.8.1 Asignación de valores de HLB.

De acuerdo a la experiencia con sistemas de HLB, se asignan valores no solo a los emulsificantes, sino también las sustancias que serán emulsificadas. Los valores de HLB requeridos para emulsificar frecuentemente productos se encuentran listados en la tabla 2.3. El significado de esto en la fabricación de la emulsión es como sigue: si el valor de



HLB del producto que es emulsificado es conocido o se puede determinar de la tabla 2.3, el emulsificante o mezcla de emulsificantes seleccionados para preparar una emulsión tiene un valor de HLB el cual es aproximadamente igual al producto que es emulsificado. Se realizan varias pruebas para determinar valores de HLB experimentalmente.

2.8.2 Procedimiento de selección.

Si no hay detalles de las fases que son emulsificadas, se puede llevar a cabo el siguiente procedimiento de selección:

1. Para la determinación de un valor de HLB requerido de la sustancia que es emulsificada puede ser de dos formas, comparando la sustancia en la tabla 2.3 o haciendo pruebas de emulsificación usando una serie de emulsificantes.
2. La selección de emulsificantes o mezcla de emulsificantes teniendo un valor de HLB que prueban los valores de HLB requerido. Si no son conocidos los valores de HLB, estos se pueden estimar de la estructura química.
3. La determinación cualitativa de la solubilidad del emulsificante seleccionado en un tubo de ensaye; una baja solubilidad en la fase interna y una buena solubilidad en la fase externa son requerimientos principales para una adsorción rápida en la interfase entre las fases que son emulsificadas.
4. La determinación de la tensión interfacial entre las fases que serán emulsificadas con y sin 5 g/L de emulsificante; si el resultado indica que tiende a bajar la tensión interfacial, se cumple una condición necesaria para la emulsificación.
5. Los experimentos de la emulsificación son en cilindros de vidrio, para probar la proporción deseada de formación de la emulsión y la estabilidad requerida.
6. Si se requiere una estabilidad para un periodo bastante largo, se puede simular la estabilidad por largos periodos mediante centrifugado.



7. Se pueden realizar pruebas prácticas de gran potencia bajo condiciones requeridas.

Tabla 2.3 Valores de HLB de productos emulsificado frecuentemente.

Producto emulsificado	HLB	Producto emulsificado	HLB
Emulsiones O/W		lauril amina	12
Aceite esencia	12-18	aceite mineral	10-12
Benceno	15	nonil fenol	14
Gasolina	14	diclorobenceno	13
Butil estearato	11	acido oleico	17
Etil benzoato	13	aceite parafina	-
Clorobenceno	13	petróleo	-
Cloroparafina	8	ácido estearico	-
Ciclohexano	15	estireno	-
Dacahidronaftaleno	151	tetracloruro de	-
Di-iso-octil ftalato	3	carbono	-
lanolina	10-11	tolueno	-
lauril alcohol	14.5	vaselina	-
xileno	-		

2.9 Adición de ingredientes en una emulsión.

El orden de adición y la porción puede afectar la aceptabilidad del producto. Una manera apta, es la preparación de una emulsión O/W por la técnica de inversión. La fase aceitosa y el emulsificante son mezclados en un tanque. El agua es entonces, adicionada lentamente en la fase aceitosa con agitación. Cuanta más agua se adicione, la emulsión presenta una apariencia lechosa mientras que aumenta la viscosidad. En algún punto llamado punto de inversión, la viscosidad disminuye repentinamente, en este punto la emulsión cambia de W/O a O/W, más adelante, se puede hacer rápidamente la adición de agua.

La mejor condición para preparar una emulsión líquido - líquido es a temperatura ambiente, y el calor generado debe ser removido. Cuando un sistema de emulsión se



caliente, la solubilidad del emulsificante puede verse alterada, cambiando sus propiedades emulsificantes, la adición debe ser cuidadosa para evitar una reacción química no deseada.



Capítulo 3: ***Emulsiones Asfálticas***





3. EMULSIONES ASFÁLTICAS.

3.1 Asfaltos del petróleo¹⁹

Los materiales asfálticos de construcción son una parte del crudo del petróleo extraído de cientos de miles de pozos en todo el mundo. La cantidad de asfalto que puede contener un crudo de petróleo es muy variable y depende de la densidad API* (American Petroleum Institute) del mismo. Cuanta más baja es la densidad del crudo, mayor es su contenido de asfalto; por ejemplo: un crudo de densidad API 15 produce, aproximadamente, un 60% de asfalto y un 40% de destilados de petróleo más ligeros, tales como gasolina, keroseno, fuel-oil, aceites lubricantes, etc., mientras que un crudo de densidad API 35 puede producir solo un 10% de asfalto y alrededor de un 90% de fracciones más ligeras.

El crudo de petróleo se transporta mediante ductos, camiones - tanque o barcazas a la refinería, donde se separa en sus diversos componentes por un proceso continuo de destilación.

En la obtención del asfalto se utilizan dos procedimientos diferentes: la destilación al vapor y vacío y el método de extracción por solventes. Otro método de refinación empleado para obtener mayor porcentaje de gasolina es el proceso de craking, que produce, por medio de calor y presiones intensas, cambios químicos de los que se obtiene un tipo de material bituminoso poco usado para pavimentación.

3.2 Métodos de obtención.

3.2.1 Proceso de destilación.

El proceso de destilación mediante la refinación al vacío separa el crudo en diversos productos. Los cambios que ocurren dentro de la refinación son de tipo físico; por ello es posible recombinar varios de los productos obtenidos tomados al azar, con lo que resulta una masa homogénea.

* API; Unidad de densidad adoptada por la industria petrolera. $^{\circ}\text{API} = 141.5 / (\text{g}/\text{cm}^3) - 131.5$



El refinado del crudo de petróleo es una operación continua que se realiza bombeando primero el crudo a través de un horno tubular, donde se eleva su temperatura, e introduciendo a continuación en una torre de destilación para el primer corte o separación. En los niveles inferiores de la torre de destilación se sitúan grados o cortes más pesados del crudo, hasta que solo queda en el fondo de la torre el residuo más pesado que contiene el asfalto (fig. 3.1).

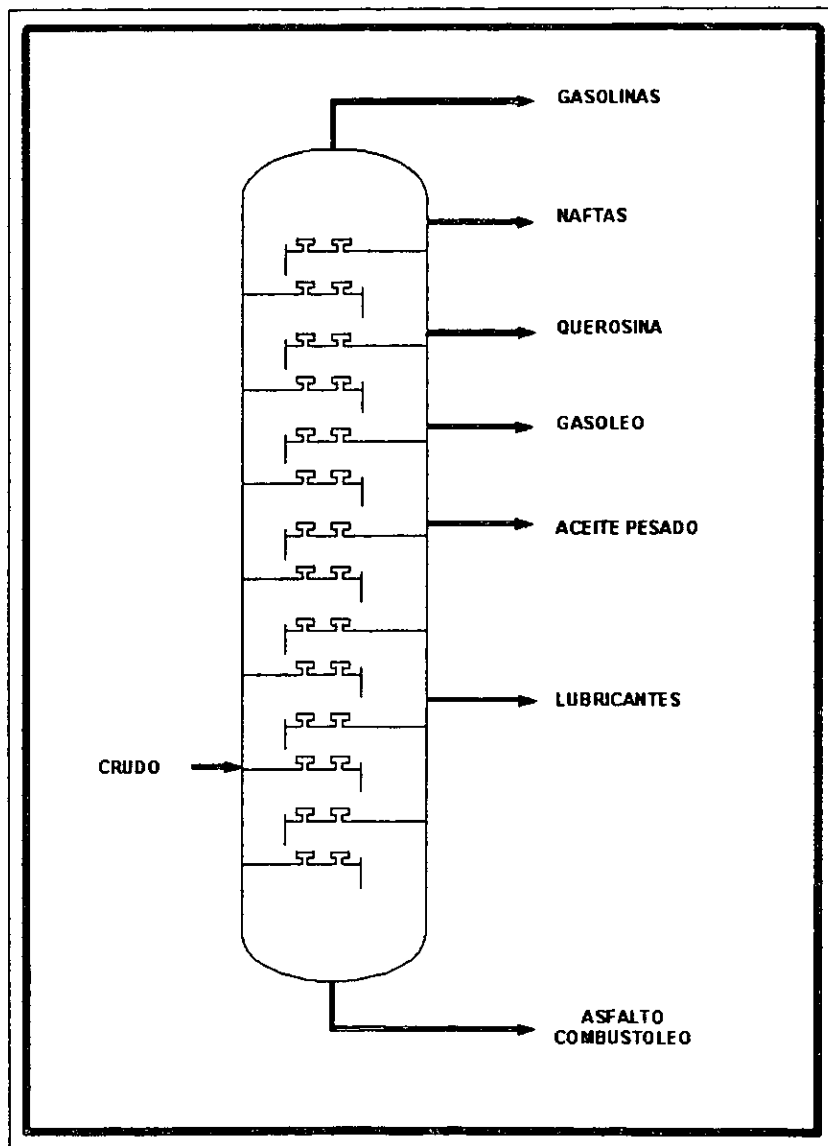


Fig. 3.1 Destilación de crudo, obtención de asfalto.



3.2.2 Método de extracción por solventes

El método de extracción por solventes está íntimamente asociado con la fabricación de aceites lubricantes de alta viscosidad que requieren un cuidadoso control de la temperatura del crudo. Para extraer el asfalto de las fracciones de aceites lubricantes se emplea el 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 mezclarlos con una pequeña cantidad de material residual blando.

También es práctica corriente mezclar ciertos porcentajes de asfalto al vacío de alta y baja penetración para obtener un material de penetración intermedia.

3.3 Tipos de asfalto.

3.3.1 Asfaltos sopladados.

Durante la última parte del proceso de refinación pueden obtenerse asfaltos semi-sólidos de propiedades especiales inyectando aire a través del residuo. En la fabricación de asfaltos sopladados u oxidados, el proceso de destilación se interrumpe en el momento en el que el residuo es todavía líquido. Entonces se traslada el residuo a otro tanque llamado convertidor y se hace pasar aire a través de él mientras se mantiene a alta temperatura. Este procedimiento prosigue hasta que el residuo ha alcanzado las propiedades deseadas. Los asfaltos oxidados son los más rígidos que se fabrican y tienen la propiedad de mantener una consistencia elevada a las temperaturas que debe 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 una multitud de usos industriales. Se emplean en materiales para techados, cajas de baterías, revestimientos interiores para automóviles y pinturas impermeabilizantes. Se usan mucho como materiales para relleno

* Penetración: valor de la profundidad en décimas de milímetro cuando una aguja penetra el asfalto que aplica un peso definido durante un periodo, a la temperatura deseada.



de juntas en pavimento de hormigón y para sellado inferior de viejos pavimentos rígidos 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 hace frágil. El asfalto oxidado catalítico tiene determinadas propiedades de elasticidad que le hacen asemejarse en cierto modo a la goma, y se emplea como revestimiento de canales.

3.3.2 Cutbacks.

Los cutbacks o rebajados asfálticos son productos asfálticos cuyo residuo es un cemento asfáltico y su viscosidad se acondiciona para hacerlo trabajable adicionándole solventes derivados del mismo petróleo. Estos solventes se evaporan después de empleado el rebajado⁶.

Los materiales asfálticos de curado rápido, medio y lento se designan usualmente por sus iniciales en inglés: RC, MC y SC, respectivamente. De este modo las dos primeras letras designan el tipo. El grado o fluidez se indica por una cifra que sigue a las iniciales. Los asfaltos menos viscosos o más fluidos se designan por el número 0, como RC-0, MC-0 y SC-0. Los números 0,1,2,3,4 y 5 designan asfaltos progresivamente menos fluidos o de mayor viscosidad al crecer los números. Además, este número indica un tipo definido de fluidez o viscosidad, independientemente del tipo de cutback.

Los cutbacks de curado Rápido (RC) se llaman así porque se fabrican por mezcla del asfalto con cierta cantidad del disolvente o material de corte, que se evapora rápidamente después de usarlo, dejando solo el asfalto. El disolvente utilizado para mezclarlo con un asfalto y producir un cutback de curado rápido es un material de bajo punto de ebullición, como nafta o gasolina. La cantidad de disolvente que debe mezclarse con el asfalto depende del tipo de cutback de curado rápido que haya de fabricarse; por ejemplo, para conseguir un cutback tipo RC-0, la mezcla del fabricante será de un 45% de disolvente y un 55 % de asfalto. Para fabricar RC-5 sería preciso mezclar, aproximadamente, 15% de disolvente y 85% de asfalto. La viscosidad del cutback depende también del porcentaje de



disolvente empleado en la mezcla; de este modo resulta que el cutback tipo RC-0 será el de viscosidad más baja, y el RC-5, el de viscosidad más alta.

Los cutbacks de curado medio (MC) se fabrican mezclando asfalto con un disolvente de punto de ebullición intermedio, de tipo keroseno. Cuando esta mezcla de materiales se riega sobre una superficie o se mezcla con áridos, el disolvente tipo keroseno no se evapora tan rápidamente como el de tipo de gasolina empleado en la fabricación de los cutbacks tipo RC. De aquí viene la designación curado medio. La relación entre el grado y la viscosidad de los cutbacks de curado medio son las mismas que para los cutbacks de curado rápido.

Los cutbacks de curado lento (SC) pueden fabricarse por cualquiera de estos dos procedimientos. Primero, mezclando asfalto con gas-oil de alto punto de ebullición, y segundo, controlando el caudal y la temperatura del crudo durante la primera destilación. Ya que el gas-oil que entra en la composición del tipo SC es un material semivolátil, necesita un período de curado mucho más largo. De hecho los materiales de tipo SC extraídos del fondo de la torre de destilación son de curado extremadamente lento y pueden no llegar a curar nunca¹⁹.

Los pavimentos asfálticos son combinaciones de agregados minerales[‡] y material asfáltico, de varios espesores y tipos. La carga de las ruedas para las que un pavimento se proyecta determina el espesor del mismo y el tipo de construcción que debe emplearse.

Los pavimentos asfálticos relativamente delgados proporcionan a la estructura que cubren, que es la que realmente soporta las cargas aplicadas, una capa de desgaste e impermeabilización económica. Estos pavimentos delgados, que se usan generalmente para tráfico ligero, no añaden gran resistencia a la estructura del pavimento en conjunto, pero le proporcionan una superficie que permiten la circulación en todo tiempo, y protege a las capas inferiores de la destrucción por el tráfico y los agentes atmosféricos.

[‡] Agregados o áridos. Cualquier material mineral, duro e inerte empleados en la construcción de pavimentos asfálticos. Estos incluyen caliza, basalto, grava, material triturado y arena.



Independientemente del espesor o tipo del pavimento asfáltico, la carga se transmite a través de los áridos, y el asfalto sirve únicamente como agente cementante que fija los áridos en las posiciones adecuadas para transmitir las cargas aplicadas a las capas inferiores, donde se disipan finalmente. Los áridos son por lo general piedra partida, grava, escorias y arena, que se usan, ya combinados unos con otros, de manera aislada.⁶

3.4 Emulsión de asfalto.

Existen dos tipos de emulsiones según la concentración de cada una de esas fases:

- a) Emulsión directa: es aquella en que la fase hidrocarbonada está dispersa en la parte acuosa.
- b) Emulsión inversa: es aquella en donde la fase acuosa está dispersa en la parte hidrocarbonada.

Las de primer tipo son la que más se emplean en la industria caminera.

Una emulsión tiene más facilidad para cubrir los materiales pétreos que los rebajados o cementos asfálticos. El emulsificante define el tipo de emulsión: Las aniónicas con carga del glóbulo negativo y las catiónicas, positivo.

Los emulsificantes catiónicos y aniónicos son compuestos orgánicos de peso molecular relativamente elevado; su parte hidrocarbonada lineal o cíclica es soluble en el asfalto. Los emulsificantes tienen grupos ácidos y los catiónicos grupos amínicos que se encuentran saponificados; su parte polar soluble en el agua e hidrófila.

Una parte del petróleo recuperado a través de la descontaminación de las piscinas se trata para asfalto.

La emulsión asfáltica está formada por un número considerable de pequeñas gotas de asfalto dispersas en el agua. Para evitar la coalescencia de estos glóbulos y mantenerlos en suspensión en el agua, es necesario emplear pequeñas cantidades de un agente emulsificante, que es un compuesto químico compatible tanto con el asfalto como con el agua. Parte de la molécula del agente emulsificante penetra por adsorción en el asfalto, y



el resto queda orientado hacia la superficie. Esta última llamada porción polar de la molécula, forma una superficie de película protectora que mantiene confinados las gotas de asfalto y a la vez les proporciona una carga eléctrica de superficie. Como esta carga es del mismo signo para un determinado agente emulsificante empleado, existe repulsión entre las gotas, que se mantienen en suspensión debido a los movimientos brownianos presentes cuando el tamaño de las gotas no es excesivo. En esta forma se garantiza la estabilidad de la emulsión¹⁸.

Casi todas las emulsiones constan de una fase acuosa o polar y otra oleosa o no polar: Los dos tipos fundamentales de emulsión suelen denominarse aceite en agua (OW) y agua en aceite (W/O).

Conviene aclarar el concepto de polaridad. Es bastante difícil dar una definición exacta de los que son cuerpos polares o apolares; pero se definen, en general, como cuerpos polares los que tienen mayor tendencia a disolverse en agua que en benceno, y como no polares o apolares los que presentan las características inversas.⁷

En el caso de las emulsiones aniónicas, la carga eléctrica es de signo negativo producido al disociarse el naftenato de sodio que se forma por la reacción entre los ácidos nafténicos presentes en el asfalto y la sosa cáustica empleada en el agua como agente emulsificante.

En el caso de las emulsiones catiónicas el proceso de emulsificación es semejante sólo que en éstas el agente es comúnmente un producto aminado que al disociarse proporciona una carga electropositiva en la superficie de las gotas asfálticas.

Además de la diferencia fundamental entre ambas emulsiones, debida a su carga eléctrica, se observa también que las emulsiones aniónicas son de carácter básico por la presencia de los iones OH^- de la sosa cáustica (hidróxido de sodio $\text{Na}^+ \text{OH}^-$), mientras que las emulsiones catiónicas generalmente tienen un carácter ácido debido a la presencia del ion H^+ del ácido clorhídrico ($\text{H}^+ \text{Cl}^-$) que se utiliza normalmente en su fabricación (fig. 3.2).¹⁸

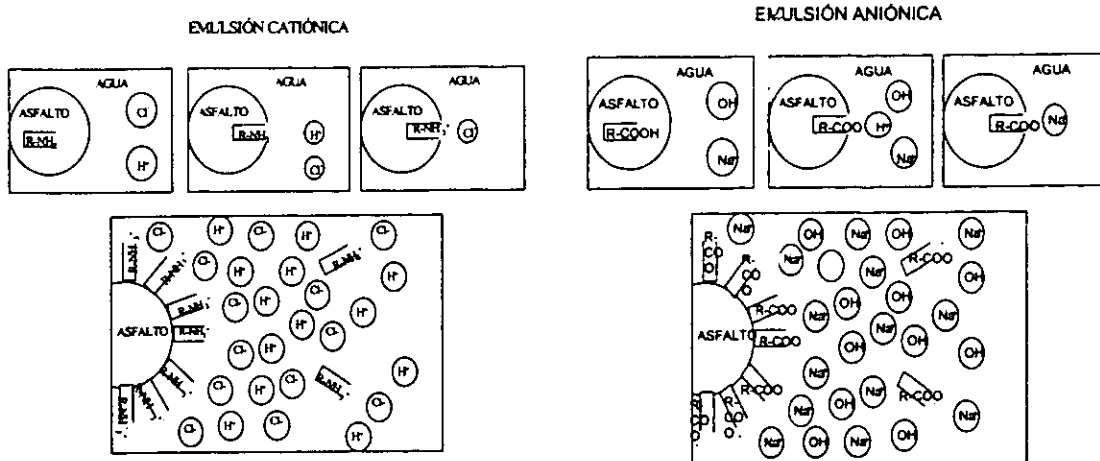


Fig. 3.2 Emulsiones aniónicas y catiónicas

3.5 Tipos de emulsión^{18,33}

Las emulsiones en México tienen dentro de las iónicas, un solo tipo: la de acción lenta; del tipo catiónico, aunque oficialmente sólo existen dos emulsiones de fraguado medio, dos de lento y una superestabilizada, se puede jugar con una gama mucho más amplia que la comercial.

Dentro de las emulsiones medias, es posible tener formulaciones desde 0.4% al 1% de emulsificantes por tonelada de emulsión y después, dentro de cada fórmula, el pH se puede variar de 4.5 a 1.8. Todas las variantes de la emulsión, pueden aplicarse para diseñar la emulsión más adecuada. Lo mismo sucede en el caso de las emulsiones de fraguado lento.

En cada emulsión, existe la posibilidad de que contenga o no solventes, de acuerdo con el tipo de mezclado que se vaya a seguir en la obra, y el tipo de tendido que se va a realizar. La temperatura ambiente también influirá en la selección.

Ya determinado el tipo de emulsión aniónico o catiónico, con o sin solventes, se hallará la más adecuada de acuerdo con la granulometría, finos y equivalentes de arena.

Las aplicaciones principales de la emulsión del asfalto son:

- ◆ Tratamientos superficiales.



- ◆ Parchado y recubrimientos
- ◆ Estabilización

Se puede considerar una emulsión asfáltica como una mezcla entre dos líquidos inmiscibles (asfalto y agua), en la cual el primero de ellos se encuentra disperso en el segundo en forma de pequeñas gotas cuyos diámetros varían por lo general entre 1 y 10 micras. Dependiendo de la carga eléctrica de la superficie de las gotas de asfalto, las emulsiones se clasifican en:

- Aniónicas (con carga electronegativa)
- Catiónicas (con carga electropositiva), y
- No iónicas (sin carga eléctrica).

La primera de ellas ha sido ampliamente empleada en la construcción de pavimentos desde hace muchos años, habiendo alcanzado gran aceptación en México. El último tipo de emulsión asfáltica (no iónica), no ha sido empleado en la construcción de pavimentos.

3.5.1 Tipos de emulsiones aniónicas

Las emulsiones aniónicas se clasifican en distintos tipos, según su estabilidad, es decir, su resistencia a la ruptura, que se determina en general por la cantidad de asfalto que coagula al mezclar la emulsión con una solución de cloruro cálcico.

Se emplean normalmente en la construcción de carreteras tres tipos, llamados de ruptura lenta, media y rápida. Se designan estos tres tipos por las letras **SS**, **MS**, y **RS**, iniciales de las expresiones inglesas *slow setting*, *medium setting* y *rapid setting*.

Aparte de estos tres tipos, se emplean a veces otros especiales en uso con los que se obtiene una estabilidad adicional mediante el empleo de determinados electrólitos u otros cuerpos, obteniendo propiedades diversas en cuanto a ruptura, impermeabilidad de las mezclas, etc.



3.5.2 Tipos de emulsiones catiónicas.

La rapidez de ruptura de las emulsiones catiónicas no es susceptible de regulación, pues la ruptura se produce inmediatamente al contacto con los ácidos. Esto presenta el inconveniente de que es imposible emplear emulsiones catiónicas de asfalto puro para la elaboración de mezclas, pues se produce la ruptura al momento de mezclarlo, quedando el asfalto en presencia de los elementos restantes de la mezcla, es imposible continuar el proceso ya que no hay una buena repartición del ligante en toda la masa de la mezcla.

Por otra parte, las excelentes propiedades de las emulsiones catiónicas hacían muy deseable su empleo en la elaboración de mezclas, se llegó a la solución, actualmente generalizada, de fabricar emulsiones catiónicas, no de betún asfáltico, sino de cutback. De este modo, una vez rota la emulsión, el producto resultante es suficientemente fluido para hacer posibles las operaciones de mezclado.

Estas emulsiones pueden fabricarse con *cutbacks* de los tipos normales pero generalmente se emplean *cutbacks* especiales de viscosidades muy elevadas. Los empleados usualmente sólo contienen un 10% de disolvente tipo kerosene o gas-oil.³⁶

3.6 Ruptura de las emulsiones²³.

En la mayor parte de las ocasiones se emplea la emulsificación exclusivamente como medio para facilitar el transporte y aplicación del asfalto, por lo que es interesante como estudiar la formación de las emulsiones en su ruptura, el proceso por el que el asfalto se separa del agua y vuelve a actuar en estado de pureza.

La ruptura de la emulsión puede producirse por diversos motivos, que son principalmente:



a) Afinidad química de los glóbulos de asfalto cargados eléctricamente por las superficies de carga opuesta.

Las partículas de asfalto de la emulsión aniónica están cargadas negativamente y tienen afinidad por las superficies electropositivas. Por consiguiente, en presencia de áridos[¶] básicos, la emulsión tenderá a romperse por adherencia del asfalto a la piedra. Sin embargo, en las emulsiones aniónicas esta acción carece de fuerza suficiente para producir la ruptura.

En las emulsiones catiónicas, en cambio, el efecto de los áridos electronegativos es muy fuerte y conduce a la ruptura inmediata de la emulsión. La ruptura de las emulsiones catiónicas también se produce inmediatamente en presencia de áridos básicos por un proceso complejo en el que los ácidos de la fase acuosa de la emulsión atacan al carbonato de calcio, produciendo en la superficie de la piedra aniones CO_3^- que reaccionan con las moléculas del emulgente, dando carbonatos de amonio cuaternario sustituidos.

b) Ruptura del equilibrio de la emulsión por evaporación de agua.

Se sabe que la estabilidad de la emulsión está formada por la protección que las moléculas que de el tensoactivo a las partículas de asfalto.

Estas moléculas se fijan en la superficie de las gotas en equilibrio debido a la atracción ejercida por el asfalto sobre la cadena no polar y la ejercida por el agua sobre la parte polar de la molécula. Esta última atracción varía su intensidad con la concentración de álcali en la fase continua, de forma que al eliminarse el agua por evaporación y aumentar esta concentración, las moléculas de emulgente dejan de ser atraídas por la fase acuosa y se hunden por completo en las gotas de asfalto, que pierde su protección, uniéndose con los vecinos y produciéndose la ruptura de la emulsión. A este fenómeno se debe normalmente la ruptura de las emulsiones aniónicas después de su aplicación.

[¶] Material pétreo - árido-. Cualquier material mineral, duro e inerte empleados en la construcción de pavimentos asfálticos. Estos incluyen caliza, basalto, grava, material triturado y arena.



En las emulsiones catiónicas no suele producirse, en la práctica, este fenómeno, por ser mucho más rápida la ruptura por efectos de carga eléctrica. Sin embargo, su influencia se nota en que es mucho más violenta la ruptura en presencia de áridos secos, que absorben el agua, que de áridos húmedos, por lo que muchas veces es conveniente humedecer previamente las superficies a las que han de aplicarse emulsiones de este tipo.

c) Ruptura por dilución.

Si se diluye una emulsión con agua pura, llega a producirse la ruptura por un fenómeno inverso al que produce la ruptura por evaporación de agua. A medida que la alcalinidad de la fase acuosa va disminuyendo por dilución, las moléculas del emulgente van desplazándose hacia ella hasta abandonar por completo el asfalto, cuyas gotas se unen, produciendo la ruptura de la emulsión.

d) Ruptura por adición de electrolitos

La adición de determinadas sales, por ejemplo, el cloruro de calcio, puede producir la ruptura de la emulsión por neutralización de las cargas eléctricas que rodean a las partículas de asfalto por los iones de la sal añadida disociada. En esto se basa el ensayo de estabilidad a la ruptura para las emulsiones aniónicas.

e) Ruptura por congelación.

Se puede producir por alteración de las propiedades del jabón empleado como emulgente. Este fenómeno puede producirse a temperaturas superiores a 0 °C, y se manifiesta con mayor intensidad en los jabones sódicos que los potásicos.

Si el enfriamiento llega al extremo de producir congelación del agua, al producirse el deshielo la emulsión se rompe completamente o presenta gran cantidad de partículas muy gruesas que la hacen inutilizable. Las emulsiones que muestran gran estabilidad a la ruptura por mezcla con solución de cloruro cálcico son también muy resistentes a la ruptura por congelación.



3.7 Ingredientes de la emulsión³⁷.

3.7.1 Cemento asfáltico.

El cemento asfáltico es el ingrediente básico de la emulsión de asfalto y, en la mayoría de los casos, cubre del 55 al 70% de la emulsión.

La mayoría de las emulsiones se hacen con asfaltos en un rango de penetración* de 100-250. En ocasiones, las condiciones climáticas pueden fijar la dureza de un asfalto, por lo tanto, la compatibilidad del agente emulsionado con el cemento asfáltico es esencial para la producción de una emulsión estable.

El asfalto es un coloide integrado por varias fracciones, las principales son asfáltenos y maltenos. El recubrimiento coloidal del asfalto depende de la naturaleza y del porcentaje de químicos en estas fracciones así como de la unión que tengan uno con el otro.

Los asfáltenos son la fase dispersada en el asfalto mientras que los maltenos son la fase continua. La función de los asfáltenos es la de dar dureza mientras que los maltenos proporcionan las características adhesivas y dúctiles del asfalto. Los maltenos presentes tienen una influencia sobre las características del asfalto, sobre todo en la viscosidad. La interacción compleja de las diversas fracciones hace casi imposible predecir exactamente el comportamiento de un asfalto emulsionado. Por esta razón, el control de calidad se mantiene constante en la producción de la emulsión.

Existen varios métodos analíticos para análisis de asfaltos que se usan para separar y evaluar las fracciones del asfalto, pero no existe un acuerdo entre los tecnólogos sobre como afecta cada fracción.

3.7.2 Agua

* Penetración: valor de la profundidad en décimas de milímetro, cuando una aguja penetra el asfalto que aplica un peso definido durante un periodo, a la temperatura deseada.



El segundo ingrediente que se encuentra en mayor proporción es el agua. Su contribución a las características del producto terminado es también importante. El agua moja, disuelve y se adhiere a otras sustancias, además de moderar las reacciones químicas. Todos estos puntos son factores importantes para obtener una buena emulsión. Por otra parte, el agua puede contener minerales que pueden afectar la estabilidad de las emulsiones asfálticas.

El agua tal cual debido a las impurezas que contiene no es recomendable en la solución o suspensión coloidal. Es de especial preocupación la presencia de iones positivos y negativo, ya que afectan notablemente las características de la emulsión, por lo que se recomienda usar agua destilada.

3.7.3 Agentes emulsificantes.

Las características de una emulsión asfáltica dependen mucho del emulsificante, el cual es un agente tensoactivo (comúnmente llamado surfactante), y el cual determina si la emulsión será clasificada como aniónica, catiónica o no iónico. El emulsificante estabiliza la emulsión, mantiene las gotitas de asfalto y cambia la tensión superficial en la interfase, es decir, el área de contacto entre las gotitas de asfalto y el agua.

Los emulsificantes son a menudo iónicos saponificados (ácidos grasos) que han reaccionado con hidróxido de sodio o de potasio.

La mayoría de los emulsificantes catiónicos son aminas grasas que se convierten en jabón debido a que se hacen reaccionar con algún ácido (generalmente ácido clorhídrico). Otro tipo de agente emulsificante es la sal de amonio y produce emulsiones catiónicas solubles en agua.³¹



3.8 Pruebas para las emulsiones asfálticas aceptadas en México por la SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes)⁵⁵.

■ Viscosidad "SAYBOLT – FUROL".

Esta prueba tiene por objeto determinar la viscosidad de las emulsiones asfálticas a las temperaturas de 25 y 50° C, establecidas para determinar la prueba estándar.

■ Residuo por destilación.

Determina las porciones de agua y residuos asfálticos contenidas en la emulsión; el residuo de destilación puede utilizarse para efectuar las pruebas de penetración, ductilidad y solubilidad en solvente.

■ Residuo por evaporación.

Es la forma más rápida de hallar el porcentaje de residuo que tiene la emulsión, a pesar de que se pierden los solventes, mediante evaporación en el horno. El residuo así obtenido tiende a dar valores menores de penetración y ductilidad que en el residuo por destilación.

■ Miscibilidad con cemento "PORTLAND".

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

■ Capacidad de cubrimiento del material pétreo en condiciones de trabajo y resistencia a la acción del agua.

Hay dos clases de adhesividad en las emulsiones: una que actúa inmediatamente, dejando sobre el material una película muy delgada, aún cuando el material mezclado se



someta a un lavado inmediato; se le llama adhesividad activa. La otra se desarrolla con el tiempo y queda anclada cuando se efectúa el fraguado y se llama adhesividad positiva.

El avance actúa en la calidad de los emulsificantes, permite realizar trabajos con materiales muy finos o difíciles. Esto solo es realizable cuando la adhesividad activa es muy débil o nula, pero posteriormente, la adhesividad pasiva se desarrolla amplia y totalmente dejando completamente cubierto al material.

■ **Asentamiento.**

El objeto de esta prueba es obtener un índice de la tendencia que los glóbulos de asfalto tienen para sedimentarse durante un almacenamiento prolongado de las emulsiones asfálticas.

■ **Retenido en malla No. 20.**

El objeto de esta prueba es determinar cuantitativamente el contenido de asfalto presente en forma de glóbulos relativamente grandes y que pueden obstruir el espesor y la uniformidad de la película de asfalto sobre las partículas del agregado pétreo; además de que el tamaño de los glóbulos indican una buena y mala estabilidad de la emulsión para permanecer en ese estado. Los glóbulos grandes indican que la emulsión va a tener una tendencia a sedimentarse y por lo tanto, esto puede causar su rompimiento.

■ **Carga de la partícula.**

Esta prueba es la única capaz de definir si una emulsión es aniónica o catiónica ya que existen emulsiones aniónicas ácidas y lo contrario sucede con algunas catiónicas. Todas las especificaciones deben señalar el tipo de carga para cada emulsión.

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



■ pH.

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

Una misma emulsión se comporta en forma diferente durante la construcción, según tenga un pH de 4.5 o de 2. La primera tendrá buena adherencia, pero su rompimiento será muy rápido; en la segunda, la adherencia se conservará dentro de los límites aceptables, pero su rompimiento será mucho más lento.

3.8.1 Pruebas al residuo de la destilación.

Del residuo de la destilación de las emulsiones asfálticas se la realizan las siguientes pruebas para conocer las propiedades del cemento asfáltico.

■ Prueba de penetración.

Este método describe un procedimiento para determinar la penetración de materiales bituminosos semi-sólidos o sólidos.

El asfalto es un cuerpo semisólido a temperatura ambiente. Aún cuando se caliente para disminuir su viscosidad, por lo que es de suma importancia el conocer la consistencia con el fin de determinar sus cualidades o poder cementante (denominado comúnmente poder ligante) a la temperatura normal en la carretera. Es un hecho conocido que cuanto más rígido es el asfalto, más fuertemente une las piedras en una mezcla asfáltica. Teniendo en cuenta estas consideraciones prácticas, se hace uso de un método que refleja la consistencia a 25 °C, que es, aproximadamente, la temperatura ambiente media. Se llama penetración y se realiza permitiendo que una aguja de dimensiones especificadas cargada con 100 g penetre en el material durante un periodo de 5 seg. Se determina la profundidad a la que la aguja se hunde en el asfalto, medida en décimas de milímetro.



■ **Pruebas de ductilidad y solubilidad.**

Solubilidad: Determina el porcentaje de asfalto soluble en solvente.

La ductilidad de los materiales asfálticos, se mide por la distancia a la cual se pueden estirar antes de romperse.

■ **Determinación de temperatura de reblandecimiento.**

El ablandamiento de los materiales asfálticos, generalmente no se efectúa en un momento o a una temperatura definida. A medida que ésta aumenta en forma gradual e imperceptible, cambian de un estado frágil o excesivamente espeso o de flujo lento, a un estado líquido más blando y menos viscoso.



Capítulo 4: Mezcla Asfáltica





4. MEZCLA ASFÁLTICA

4.1 Definición⁶.

La mezcla asfáltica está constituida por un ligante que envuelve en forma continua a todas las partículas del material pétreo cualquiera que sea su granulometría.

De acuerdo con la Secretaría de Comunicaciones Transportes (SCT) los agregados pétreos para revestimiento, sub-bases o base de un pavimento, son materiales seleccionados, que se emplean en la construcción de estas capas en un pavimento; ya sea que se estabilicen o no, con un producto natural elaborado.

La estabilización de suelos para pavimentos es la consolidación de una capa del pavimento o del material de terracería, tanto desde el punto de vista de la resistencia a la deformación por carga, como la insensibilidad a la acción del agua. Esto se logra mediante la selección adecuada de los materiales por su estructura, la compactación mecánica o el empleo de algún producto cementante. El suelo así tratado, puede servir para sub-base o base; rara vez como carpeta.

4.2 Diseño de mezclas asfálticas en caliente.

Es importante comprender que el método Marshall, como procedimiento empírico, requiere que se cumplan algunas condiciones constructivas y de procedimiento para que el mismo produzca una carpeta asfáltica de calidad aceptable.

Varios parámetros asociados a este método han sido correlacionados empíricamente a carpetas que han tenido una función adecuada a su uso; la densidad, estabilidad y flujo, son algunos de tales parámetros. La importancia del contenido de aire y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral VMA (voids in mineral aggregate), han sido reconocidos desde los años 20's aproximadamente. Otro de los parámetros que ha sido sujeto de una cuidadosa investigación es la temperatura de compactación.



Las propiedades de una mezcla asfáltica presuponen que las partículas duras, arena y grava, se encuentran íntimamente ligadas entre sí por un material visco-elástico cuyas características varían según la temperatura. Hay que mencionar que a temperatura ambiente, por ejemplo a 25 °C, el asfalto posee características adherentes muy pobres, por lo que una mezcla fabricada bajo estas condiciones podría mostrar una densidad inapropiada y tener una resistencia deficiente.

Lo contrario podría indicarse en cuanto a la estabilidad, si la mezcla se llevara a cabo a una temperatura en que la viscosidad del asfalto sea muy baja (muy adherente).

El sentido común debe indicar que una mezcla compactada adecuadamente puede producir que los agregados se encuentren lo más próximo posible entre sí (alta densidad), pero que exista una muy pobre adherencia, que se vería reflejada en cualquier ensayo que implique someter una muestra determinada a una carga, el ensayo Marshall por ejemplo; por lo que en este caso hubiera sido preparada y compactada a las temperaturas apropiadas.

4.3 Definiciones⁴⁵.

El agregado mineral es poroso y puede absorber agua y asfalto a un grado inconstante. Además, la proporción de agua para la absorción de asfalto varía con cada agregado. Existen tres métodos para medir la gravedad específica del agregado que toman en cuenta estas variaciones. Ellos son, la gravedad específica efectiva, de bulto, y aparente, y éstas se definen como sigue:

➤ Gravedad específica

Es la porción de una masa dada de material a 25 °C a la masa de igual volumen de agua a la misma temperatura (fig. 4.1)



➤ **Gravedad específica total, (G_{sb}).**

Es la proporción del peso en aire de una unidad de volumen de agregado (incluyendo los vacíos permeables e impermeables de las partículas, pero no incluye los vacíos entre partículas) a una temperatura dada con respecto al peso en aire de un volumen igual de agua destilada libre de aire a la misma temperatura (tabla 4.1).

➤ **Gravedad específica aparente, (G_{sa}).**

Es la proporción del peso en aire de una unidad de volumen de la parte impermeable de agregado a una temperatura dada respecto al peso en aire de un volumen igual de agua destilada libre de aire a la misma temperatura (tabla 4.1).

➤ **Gravedad específica efectiva, (G_{se}).**

Es la proporción del peso en aire de una unidad volumen de la parte permeable del agregado (no incluyendo vacíos permeables de asfalto) a una temperatura dada con respecto al peso en el aire de un volumen igual de agua destilada libre de aire a la misma temperatura (tabla 4.1).

➤ **Gravedad específica total (saturada y superficialmente saca).**

La porción del peso en aire de una unidad de volumen de agregado, incluso el peso del agua dentro de los vacíos lograda sumergiendo en agua durante 24 h. Aproximadamente (pero no incluye los vacíos entre las partículas) a una temperatura dada comparada con el peso en aire de un volumen igual de agua destilada libre de gas a la misma temperatura.

➤ **Densidad**

Se define como la masa de un metro cúbico de material a 25 °C en unidades del SI de unidades o la masa de un pie cúbico del material a 25 °C.



➤ **Absorción.**

El incremento en el peso del agregado debido al agua en los poros del material, pero no incluye el agua adherida en la superficie de las partículas, expresado como un porcentaje del peso seco. El agregado se considera seco, cuando se ha mantenido a una temperatura de 110 ± 5 °C por suficiente tiempo para remover toda el agua no combinada.

➤ **Vacios en el agregado mineral, (VMA).**

Es el volumen del espacio vacío intergranular entre las partículas de agregado de una mezcla de pavimento compactado que incluye los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, expresado como un por ciento del volumen total de la muestra (tabla 4.1).

➤ **Contenido efectivo de asfalto, (P_{be}).**

Es el volumen del asfalto total de una mezcla de pavimento menos la porción de asfalto que se ha perdido a través de absorción en las partículas de agregado (tabla 4.1).

➤ **Vacios de aire, (V_a).**

Es el volumen total de las pequeñas burbujas de aire entre las partículas de agregado cubiertas a lo largo de una mezcla de pavimento compactado, expresada como por ciento del volumen de una mezcla de pavimento compactado (fig. 4.1).

Tabla 4.1 Influencia del tipo de gravedad específica en la determinación de VMA y vacíos de aire.

Gravedad específica total de la mezcla compactada G_{mb} .	2.436
Densidad de la mezcla compactada, W_r , g/m^3 (lb/ft^3).	2.435 (152.0)
Contenido Asfáltico, por ciento en peso del total de la mezcla.	5.93
Asfalto absorbido por partículas de agregado, W_{ba} Kg por 45 Kg ($lb/100$ lb) agregado.	0.36 (0.8)
Gravedad específica del cemento asfáltico, G .	1.011



Nota: La exactitud de determinaciones de la gravedad específica para el diseño de la mezcla es importante.

Cuando se determinan gravedades específicas con cuatro cifras significativas (tres decimales) se tiene un error en el valor de vacíos de aire de alrededor de 0.8 por ciento. Por consiguiente, el Instituto del Asfalto recomienda el uso de balanzas cuya sensibilidad permita al peso de un lote de la mezcla de 1000 a 5000 gramos con una precisión de 0.1 gramo.

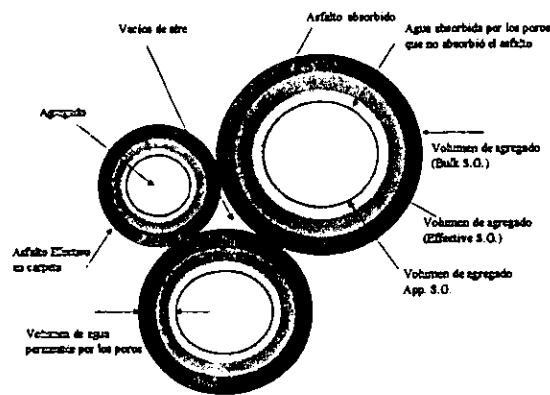


Fig. 4.1 Vacíos de aire y contenido efectivo de asfalto en una mezcla de pavimento compactado.

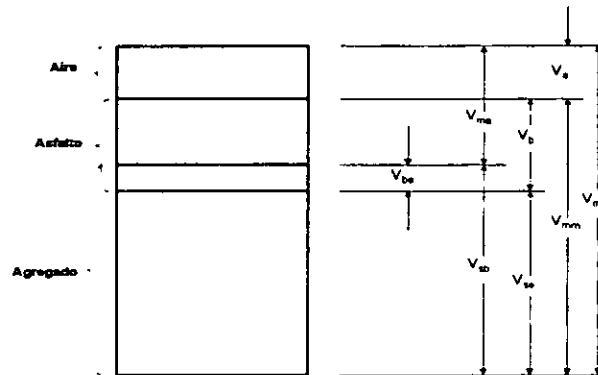


Fig. 4.2 Representación de volúmenes en un espécimen de asfalto compactado.

V_{ma} = Volumen de vacíos en el mineral agregado.

V_{mb} = Volumen de bulto de la mezcla compactada.

V_{mm} = Volumen de vacíos de la muestra compactada.

V_a = Volumen de vacíos de aire.

V_b = Volumen de asfalto



V_{ba} = Volumen de asfalto absorbido

V_{sb} = Volumen de mineral agregado (por gravedad específica total)

V_{se} = Volumen de mineral agregado (por gravedad específica efectiva)

4.4 Normas ASTM empleadas para el diseño de mezclas asfálticas.

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas asfálticas fue formulado por Bruce Marshall que laboraba para el departamento de autopistas del Estado de Mississippi. Más tarde el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos, efectuó diversos estudios de investigaciones y correlaciones, mejorando y adicionando ciertas características a los procedimientos de prueba Marshall y últimamente se han desarrollado criterios de diseño de mezcla. El método Marshall está estandarizado por la ASTM en la norma ASTM D 1559. Resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas usando el aparato Marshall.

4.4.1 Gravedad específica total en mezcla asfáltica compactada (ASTM D-2726)⁴⁸.

Este método cubre la determinación de la gravedad específica total y densidad de especímenes de mezclas bituminosas compactadas.

El espécimen es inmerso en un baño a 25 °C. La masa bajo el agua es registrada, y el espécimen se saca del agua y rápidamente se seca con un paño e inmediatamente se pesa en aire. La diferencia entre las dos masas es empleada para medir la masa de un volumen igual de agua a 25 °C. Se usará factores de corrección para convertir la masa a la de referencia a 25 °C.

Proporciona una guía para la determinación de la masa seca completamente mediante un horno del espécimen. La gravedad específica total es calculada de esas masas. Esa densidad se obtiene multiplicando la gravedad específica del espécimen por la densidad del agua.



Los resultados obtenidos de éste método se puede usar para determinar la unidad de peso de mezclas bituminosas compactadas para obtener el porcentaje de vacíos de aire.

4.4.2 Gravedad específica y absorción del agregado grueso (ASTM C-127)⁵⁰.

Este método de prueba se utiliza en la determinación de gravedad específica y absorción de agregado grueso. La gravedad específica puede expresarse como gravedad específica total, gravedad específica total (SSS, saturado y superficialmente seco), o gravedad específica aparente. La gravedad específica total (SSS) se basa en sumergir al agregado durante 24 h en agua. Este método no se toma en cuenta a los agregados finos.

Una muestra de agregado se sumerge en agua por un tiempo de aproximadamente 24 h para llenar los poros del material. Al cabo de este tiempo se pesa la muestra sumergida en agua se saca la muestra y se seca la superficie, y se pesa. Finalmente la muestra se seca completamente mediante un horno y se vuelve a pesar. Con los datos obtenidos en la prueba es posible entonces obtener tres tipos de gravedades específicas y la absorción.

➤ Importancia y uso.

La gravedad específica total se usa generalmente para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en varias mezclas que lo contengan, incluyendo el concreto con cemento portland, concreto bituminoso, y otras mezclas que se analizan sobre la base de un volumen absoluto. También se usa la gravedad específica total en el cálculo de vacíos en los agregados en el Método de Prueba C 29. La gravedad específica total (SSS) se usa si el agregado está húmedo, tal que, se satisfaga la condición de absorción. Recíprocamente, la gravedad específica total (seco en horno) se usa para los cálculos cuando el agregado está seco.

La gravedad específica aparente pertenece a la densidad relativa, producto de las partículas constitutivas del material sólido, sin incluir el espacio de los poros dentro de las partículas que son accesibles a agua.



Se recomiendan los procedimientos generales descritos en este método de prueba para determinar la absorción de agregados que han tenido condiciones diferentes al de sumergir en agua durante 24-h, tales como agua hirviendo o saturación del vacío. Los valores obtenidos para absorción a través de otros métodos de prueba serán diferentes a los obtenidos por el procedimiento de inmersión en agua, como lo demuestra la gravedad específica total (SSS).

Los poros en agregados ligeros pueden o no volverse a llenar con agua después de la inmersión, de hecho, muchos agregados pueden permanecer sumergidos en agua durante varios días sin satisfacer la mayoría del potencial de absorción de los agregados. Por consiguiente, este método de prueba no se recomienda para usarse con agregados ligeros.

4.4.3 Gravedad específica y absorción del agregado fino (ASTM C-128)⁵¹.

Este método determina la gravedad específica aparente y total así como la absorción de agregados finos.

La gravedad específica total se basa en el peso saturado y superficialmente seco del agregado.

La gravedad específica total, es la característica general usada para el cálculo del volumen ocupado por los agregados en varias mezclas que contiene agregados como cemento portland, concreto bituminoso y otras mezclas que son analizadas sobre la base de un volumen absoluto.

Los valores de absorción son empleados para calcular el cambio del peso de un agregado con agua absorbida en los espacios de los poros dentro de las partículas que las constituyen, comparado con la condición seca. La prueba de absorción en el laboratorio se obtiene después de sumergir el agregado seco durante 24 horas en agua.



4.4.4 Resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas usando el aparato Marshall (ASTM D-1559)⁴⁹.

Este método de prueba cubre las mediciones de la resistencia al flujo plástico de especímenes cilíndricos de mezclas bituminosas para pavimento cargado en la superficie lateral mediante el equipo Marshall.

Además es para uso con mezclas que contienen cemento asfáltico. El espécimen es preparado de acuerdo con el método de prueba de carga máxima y flujo, densidad y vacíos, propiedades que pueden determinarse en especímenes preparados de acuerdo a este procedimiento.

4.4.5 Cálculo de porcentaje de absorción de asfalto por los agregados en una mezcla de pavimento de asfalto (ASTM D-4469)⁵³.

Este método de prueba describe el porcentaje de absorción de asfalto para una mezcla de pavimento seco (expresado como el porcentaje de la masa seca del agregado total en la mezcla de pavimento) que se puede calcular mediante ecuaciones en las cuales se sustituyen los valores medidos para la gravedad específica máxima teórica de una mezcla de pavimento seco, el contenido de asfalto (expresado como el porcentaje de la masa de agregado seco en una mezcla de pavimento seco), la gravedad específica aparente del asfalto y el promedio del peso en la mezcla de pavimento (Nota 1).

Nota 1: Siempre que se refiera a este método de prueba, la frase, "valores promedio ASTM de la gravedad específica total seca del agregado " se refiere al valor promedio de la gravedad específica total seca de los agregados finos y gruesos como se determinan de acuerdo a los métodos de prueba C 127 y C 128. El agregado fino generalmente incluye la porción del polvo mineral de agregado que pasa por la malla No. 200. El valor promedio de la gravedad específica total del agregado total se calculará mediante la ecuación que se menciona en la sección de cálculo de método de prueba C 127.



➤ **Importancia y Uso.**

La cantidad de asfalto absorbido por el agregado contribuye muy poco en la durabilidad de un asfalto de pavimento en servicio, por otra parte proporciona mayor resistencia para desprenderse en presencia de agua.

El porcentaje de absorción de asfalto puede ser un indicador de cambios que pueden ocurrir en la producción de la mezcla en planta ó durante la construcción. El valor calculado porcentaje de absorción puede emplearse para el cálculo del porcentaje de vacíos de aire durante el diseño de mezclas de pavimento.

4.4.6 Máxima gravedad específica y densidad de mezclas bituminosas de pavimentación (ASTM D-2041)⁵⁶.

Esta prueba determina la máxima gravedad específica y densidad de mezclas bituminosas de pavimentación no compactadas a 25 °C.

Una muestra de mezcla asfáltica a temperatura ambiente y sin compactar, es tarada en un tanque de vacío. Se adiciona suficiente agua a una temperatura de 25 ± 4 °C para completar y sumergir la muestra. Se aplica vacío de 5 a 15 minutos, gradualmente se reduce la presión residual en el recipiente a 30 mm de Hg o menos. Al finalizar el periodo de vacío, éste se libera gradualmente. El volumen de la muestra de mezcla para pavimentación se obtiene de dos formas; por inmersión del contenedor a vacío, o llenando completamente el contenedor de vacío con la muestra y pesarlo en aire. A la vez que se pesa, se mide la temperatura y la masa, y se obtiene la densidad. Si se emplea una temperatura distinta a 25 °C se aplica una correlación proveniente de la curva de calibración del equipo.



> Importancia y uso.

- La gravedad específica máxima teórica y la densidad de mezclas para pavimentación son propiedades intrínsecas que se requieren para la composición de las mezclas en términos del tipo y cantidad de agregados y materiales bituminosos.
- Esos valores son empleados para calcular los valores de porcentaje de vacíos de aire en las mezclas compactas bituminosas para pavimentación.
- También esos valores son usados para el cálculo de la cantidad de bitúmen absorbido por la porosidad interna de las partículas individuales de agregado en una mezcla para pavimentación.

4.5 Análisis de pavimentos con mezcla asfáltica compactada.

Los procedimientos analíticos aquí descritos se aplican tanto a mezclas pavimentadas que se han compactado a nivel laboratorio, como en campo. Cuando la mezcla de pavimentación se compacta en el laboratorio, el esfuerzo de compactación proporciona una densidad igual a la densidad de la mezcla que consigue la mezcla final bajo tráfico intenso mediante una compactación por un rodillo durante su construcción.

Aparte de analizar una mezcla de pavimentación compactada mediante vacíos de aire (V_a), vacíos en el material agregado (VMA), y contenido efectivo de asfalto (P_{be}), proporciona además alguna información del probable funcionamiento del pavimento. La eficacia de la compactación durante su construcción o después de años de servicio puede determinarse mediante la comparación de la gravedad específica de un corte de una muestra inalterada de pavimento con la gravedad específica de una muestra compactada en el laboratorio.

Se usan tres diferentes valores de gravedades específicas de agregados para analizar las mezclas de pavimentos, gravedad específica total (G_{sb}), gravedad específica aparente, y gravedad específica efectiva (G_{se}).



El Instituto del Asfalto recomienda que los valores para mezclas de pavimentos compactadas se calculen en términos de la gravedad específica total del agregado (G_{sb}). La gravedad específica total, con una tolerancia por pérdida de la carpeta asfáltica por absorción dentro de las partículas de agregado, o el equivalente a este procedimiento, sea la base para el cálculo de los vacíos de aire en una mezcla asfáltica de pavimento compactado. El contenido efectivo de asfalto (P_{be}) de una mezcla de pavimento es el total de contenido asfáltico menos el total de contenido asfáltico que se pierde por absorción dentro de las partículas de agregado.

Los valores para los vacíos en el agregado mineral (VMA) y los vacíos de aire (V_a) se expresan como porcentaje en volumen de la muestra de la mezcla de pavimento a analizar. Dependiendo de cómo se especifique el contenido de asfalto, el valor del contenido efectivo de asfalto se puede expresar en función del porcentaje en peso del total de la muestra de la mezcla de pavimento analizado, o como porcentaje en peso del agregado en la muestra de la mezcla de pavimento.

Debido a que los vacíos de aire en el agregado mineral son volúmenes cuantitativos y por lo tanto no se pueden pesar, la mezcla de pavimento primero se debe diseñar o analizar sobre un volumen base o conocido. El propósito de este diseño es el de cambiar de una base en peso a una base volumétrica.

La tabla 4.1 ilustra que el tipo de gravedad específica del agregado empleado para el análisis de una muestra de mezcla de pavimentos puede tener un efecto importante en los valores reportados para los vacíos de aire y para los vacíos en el agregado mineral. Estas diferencias son similares de tal manera que satisface los diseños de criterio para los vacíos de aire y los vacíos en el agregado mineral, pero estos valores son incorrectos si se emplea otra gravedad específica. Por consiguiente, las especificaciones para el diseño y construcción de mezclas de pavimentos que se determinen deben estar expresados precisamente cómo vacíos de aire y vacíos del agregado mineral.



4.6 Perfiles de los procedimientos para analizar una mezcla de pavimento compactado.

- (a) Medición de la gravedad específica total del agregado grueso (ASTM C 127) y del agregado fino (ASTM C 128).
- (b) Medición de la gravedad específica del cemento asfáltico (ASTM D 70).
- (c) Calcular la gravedad específica total de la combinación de agregado grueso y fino en la mezcla de pavimento.
- (d) Medición de la gravedad específica máxima de la mezcla de pavimento sin compactar (ASTM D 2041).
- (e) Medición de la gravedad específica total de la mezcla de pavimento compactado (ASTM D 2726).
- (f) Cálculo de la gravedad específica efectiva del agregado.
- (g) Cálculo de la absorción de asfalto del agregado.
- (h) Cálculo del contenido efectivo de asfalto de la mezcla de pavimento.
- (i) Cálculo del por ciento de vacíos en el agregado mineral en la muestra de pavimento compactado.
- (j) Cálculo del por ciento de vacíos de aire en la muestra de pavimento compactado.

4.6.1 Gravedad específica total del agregado.

Cuando el total del agregado consiste de fracciones separadas de agregados gruesos, finos y de relleno las cuales tienen diferentes gravedades específicas, la gravedad específica total se calcula de la siguiente manera:



$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Donde:

G_{sb} = gravedad específica total del total agregado.

P_1, P_2, P_n = porcentaje en peso del agregado 1, 2, n.

G_1, G_2, G_n = gravedades específicas de bulto del agregado 1, 2, n.

La gravedad específica de los rellenos minerales es difícil de determinar con precisión. Sin embargo se puede usar el valor de la gravedad específica total y no produce un error tan grande o de consideración.

4.6.2 Gravedad específica efectiva del agregado.

Cuando una mezcla de pavimento se refiere a la gravedad específica máxima, G_{mm} , la gravedad específica efectiva (G_{se}) de los agregados incluye todos los espacios vacíos en las partículas de agregado, excepto lo que se ha absorbido de asfalto. Se determina de la siguiente manera:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

$$P_b = \frac{\% \text{ cemento asfáltico respecto al agregado (A)}}{1 + \frac{A}{100}}$$

Donde:

G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado.

P_{mm} = por ciento en peso total de la mezcla = 100 %.

P_b = asfalto, por ciento del total de la mezcla.

G_{mm} = gravedad específica máxima de la mezcla de pavimento (libre de vacíos de aire), ASTM D 2041 (Densidad de Rice).

G_b = gravedad específica del asfalto.



Nota: el volumen de la carpeta de asfalto absorbido por un agregado es generalmente pequeño respecto al volumen de agua absorbido. Por consiguiente, el valor de la gravedad específica efectiva de un agregado deberá estar entre los intervalos de la gravedad específica total y la gravedad específica aparente. Cuando el valor de la gravedad específica efectiva este fuera de estos límites, se supone que dicho valor esta incorrecto por lo que se tendrán que verificar los procedimientos experimentales.

4.6.3 Gravedad específica máxima de mezclas con diferente contenido asfáltico.

En el diseño de las mezclas de pavimento con agregados, es necesaria la gravedad específica máxima, G_{mm} , a diferencia del contenido asfáltico para el cálculo de los vacíos de aire para cada por ciento asfáltico utilizado en la experimentación. Se puede determinar la gravedad específica máxima para cada por ciento asfáltico empleado mediante el método de prueba ASTM D 2041.

La gravedad específica máxima para cualquier otro contenido asfáltico se podrá calcular cuando se tengan los valores promedio de las pruebas anteriores y se halla calculado la gravedad específica del agregado. Para fines prácticos, la gravedad específica efectiva del agregado se mantiene constante debido a que la absorción de asfalto no varía de forma apreciable con respecto a las variaciones en él por ciento asfáltico:

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$$

$$P_s = 100 - P_b$$

Donde:

G_{mm} = gravedad específica máxima de la mezcla (libre de aire).

P_{mm} = Por ciento en peso de la mezcla = 100 %.

P_s = agregado, por ciento en peso de la mezcla, $P_s = 100 - P_b$.

P_b = asfalto, por ciento en peso de la mezcla.



G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado.

G_b = gravedad específica del asfalto.

4.6.4 Absorción de asfalto.

La absorción se expresa como porcentaje en peso del agregado ó preferentemente como porcentaje en peso de la mezcla. La absorción de asfalto, P_{ba} , se determina de la siguiente manera:

$$P_{ba} = 100 \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} * G_b$$

Donde:

P_{ba} = asfalto absorbido, como por ciento en peso de agregado.

G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado.

G_{sb} = gravedad específica total del agregado.

G_b = gravedad específica del asfalto.

4.6.5 Contenido de asfalto efectivo de una mezcla de pavimento.

El contenido de asfalto efectivo, P_{be} , de una muestra de pavimento es el contenido asfáltico efectivo menos la cantidad de asfalto perdido por absorción dentro de las partículas del agregado, el cual se determina de la siguiente manera:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} P_s$$

Donde:

P_{be} = contenido de asfalto efectivo, por ciento en peso de la mezcla.

P_b = asfalto, por ciento en peso de la mezcla.

P_{ba} = asfalto absorbido, por ciento en peso del agregado.

P_s = agregado, por ciento en peso de la mezcla.



4.6.6 Por ciento de VMA en una mezcla de pavimento compactado.

Los vacíos en el mineral agregado, VMA, se definen como los espacios vacíos intergranulares entre las partículas de agregado y la muestra de pavimento compactado que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como porcentaje en peso del volumen total. Los VMA se calculan en base a la gravedad específica total del agregado expresado como por ciento del volumen total de la mezcla de pavimento compactado. También, se puede calcular los VMA mediante la extracción de volumen del agregado mediante la gravedad específica total del volumen total de la mezcla de pavimento compactado. Los vacíos en el mineral agregado, VMA, se pueden calcular de la siguiente manera:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} P_s}{G_{sb}}$$

Donde:

VMA = vacíos en el mineral agregado (por ciento del volumen total).

G_{sb} = gravedad específica total del agregado.

G_{mb} = gravedad específica total de la muestra compactada (ASTM D 2726).

P_s = agregado, por ciento en peso de la mezcla.

4.6.7 Cálculo del porcentaje de vacíos de aire en una mezcla compactada.

Los vacíos de aire, P_a , en una mezcla de pavimento compactado, consisten en los pequeños espacios de aire entre las capas de partículas de agregado. El porcentaje vacíos de aire en una mezcla de pavimento compactado se pueden determinar de la siguiente manera:

$$P_a = 100 \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Donde:

P_a = vacíos de aire en una mezcla de pavimento compactado.

G_{mm} = gravedad específica máxima de la mezcla de pavimento.

G_{mb} = gravedad específica total de la mezcla compactado.



Capítulo 5: Experimentación





5. EXPERIMENTACIÓN.

Para cumplir con el objetivo de este trabajo, es necesario realizar una serie de experimentaciones con residuos de hidrocarburos de distintos sitios a fin de probar con que tipo de muestra se puede obtener una emulsión asfáltica.

Del resultado de esta experimentación se clasificarán los residuos que pueden ser utilizados o, si el resultado indica que no se obtiene una emulsión asfáltica, entonces proporcionar opciones alternas.

El desarrollo experimental, consideró tres etapas:

1. Elaboración de una emulsión asfáltica.
2. Pruebas de calidad de las emulsiones asfálticas obtenidas con diferentes muestras de residuos de hidrocarburos, mediante las normas A.S.T.M.
3. Diseño de mezclas asfálticas.

5.1 Elaboración de emulsión asfáltica.

Para la primera etapa se requirieron de las siguientes materias primas:

- 1.- Tensoactivo
- 2.- Agua
- 3.- Residuos de hidrocarburos.

Las muestras de los residuos de hidrocarburos provienen de diversos lugares:

Ex- refinería 18 de Marzo, Atzacapotzalco, México D.F.

Refinería Miguel Hidalgo, Tula, Hidalgo.

Terminal Marítima, Pajaritos, Veracruz.

Terminal, Dos Bocas, Tabasco.

Refinería Francisco I. Madero, Cd. Madero, Tamaulipas.



Las proporciones que se emplearon para la elaboración de la emulsión son las siguientes (tabla 5.1):

Tabla 5.1 Componentes y proporciones para la preparación de una emulsión asfáltica

Materia prima	Porcentajes	
Emulsificante	1.0	2.5
Agua	40	40
Hidrocarburo	60	60

Para la selección del tensoactivo, se adquirieron dos tensoactivos aniónicos: Texapon N-5 (lauril éter sulfato de amonio, fabricante: Henkel de México), Genapol LSS-M (lauril sulfato de amonio, fabricante: Química Hoechst de México); tres catiónicos: Dehyquart A (cloruro de cetil trimetil amonio al 25 %, fabricante: Henkel de México), Dodigen 2808 (cloruro de alquil dimetil bencil amonio al 80 %, fabricante: Química Hoechst de México), Hoes 3996 (cloruro de lauril dimetil hidroxietil amonio al 40 %, fabricante: Química Hoechst de México) y un no iónicos: Emulgator (mezcla de tensoactivos con óxidos de propileno y etileno, fabricante: Hoechst, AG) , ya que como se mencionó en el capítulo 2, el tensoactivo catiónico pertenece a una amina cuaternaria por lo que no es difícil su selección; sin embargo; para elegir el emulsificante aniónico, se realizaron varias pruebas, en las que el único criterio para identificarlo como bueno o malo fue visual, se realizaban pruebas pequeñas de emulsificación con el tensoactivo y se veía si la emulsión se rompía o permanecía estable por algún tiempo (aproximadamente 5 días).

5.1.1 Preparación de la emulsión.

Para preparar la emulsión fueron necesarias varias condiciones de adición de ingredientes. Las variantes fueron las siguientes:

- Adición del residuo de hidrocarburo:
 - ❖ Directamente en el mezclador sin ninguna condición de flujo másico.
 - ❖ Agregado antes de dosificar el tensoactivo.
 - ❖ Dosificado después de agregar el tensoactivo,
 - ❖ Temperatura de operación.



- ❖ Velocidad de agitación,
- ❖ Necesidad de un estabilizante (CaCl_2)

En cada prueba realizada se varió cada una de las condiciones mencionadas anteriormente de tal manera que surgieron seis protocolos de prueba.

Las muestras que se obtuvieron de estas pruebas se almacenaron verificando después cual se separaba y cual no.

5.2 Pruebas a las emulsiones asfálticas.

Las pruebas que se realizaron a las emulsiones asfálticas y que están aprobadas en México por la SCT son:

Nota: solo se realizaron algunas de ellas a las emulsiones que ya se tenían en reserva para ello.

5.2.1 Residuo por evaporación.

Esta prueba es una forma de determinar el contenido de residuo asfáltico de las emulsiones en por ciento, mediante evaporación en el horno. El residuo así obtenido se emplea para dar valores de penetración al material bituminoso, y conocer las propiedades de los materiales asfálticos que componen la emulsión:

Se pesa una cantidad de emulsión ($50 \pm 0.1\text{g}$), se eleva a una temperatura de $163^\circ\text{C} \pm 2.8^\circ\text{C}$ durante dos horas, se saca del horno, se agita y se deja en el horno durante una hora más. El por ciento de residuo por evaporación será la diferencia en peso de la muestra antes y después de haberlo introducido al horno, multiplicado por 100.



5.2.2 Residuo por destilación.

Esta prueba se basa en una destilación de la emulsión para determinar las proporciones de agua y residuo asfáltico contenidas en la emulsión, a diferencia de la prueba de residuo por evaporación esta prueba la determina con más precisión.

Se pesan 200 ± 0.1 g de muestra de la emulsión asfáltica y se destila según la siguiente tabla:

Tabla 5.2 Datos de la prueba de residuo por destilación.

Temperatura (°C)	Tiempo (min)
25 – 121	15 – 20
121 – 215	15 – 20
215 – 260	15
260	15

En donde la temperatura máxima a alcanzar es de 260 °C y el tiempo total empleado para la destilación (fig. 5.1) es de 60 ± 15 minutos, se calcula el porcentaje de agua presente en la muestra.

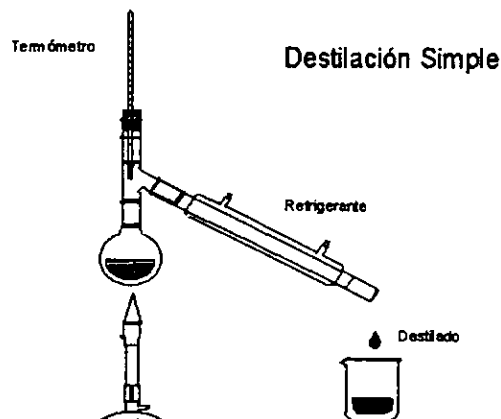


Fig. 5.1 Esquema del proceso de destilación.



5.2.3 Destilación para asfaltos rebajados^N (ASTM Designation: D20 – 91)⁵⁴

Esta prueba se basa en una destilación de asfaltos rebajados para conocer con más precisión el porcentaje de H₂O. Esta prueba se efectuó para las muestras obtenidas de la ex refinería de Atzacapotzalco D.F. y de la Terminal de Pajaritos Veracruz, pues de ellas se tenía la emulsión, sin embargo también se empleó para esta prueba la muestra de la terminal de Dos Bocas, Tabasco, y el inconveniente de la muestra de la refinería de Tula, Hidalgo fue que la muestra era muy fluida y su consistencia no fue la adecuada para poder hacer la prueba ya que, las otras muestras tenían un aspecto más viscoso y el resultado parecía no ser bueno y por tanto no se empleó.

Se pesan 100 ± 0.1 ml. de muestra representativa de los asfaltos rebajados, y se introduce en un matraz volumétrico. Se tapa con un tapón de corcho y se inserta el termómetro para verificar el control de la temperatura (fig. 5.2).

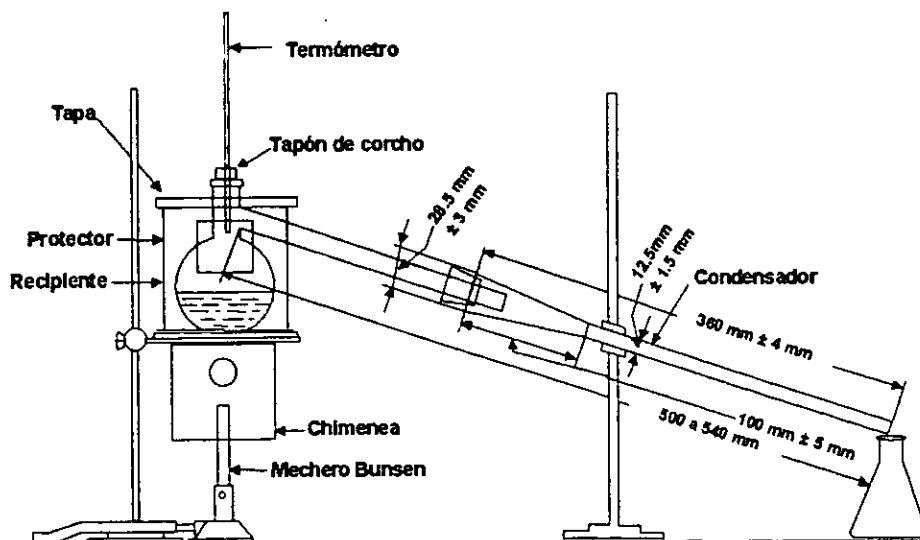


Fig. 5.2 Diagrama de destilación para asfaltos rebajados.

^N Un asfalto rebajado, es nombrado así porque se le agrega un solvente, y de acuerdo con este tipo de solvente, que puede ser ligero, medio o pesado dependerá para que funcione como de fraguado medio, rápido y lento.



5.2.4 Peso específico.

Esta prueba se basa en determinar el peso específico de las emulsiones asfálticas y se realiza a una temperatura de 25 °C, con los picnómetros mostrados en la fig. 5.3.

Nota: esta prueba no se efectuó a las emulsiones asfálticas, sino a las muestras obtenidas de la Refinería de Atzacapotzalco D.F. y de la Terminal de Pajaritos Veracruz.

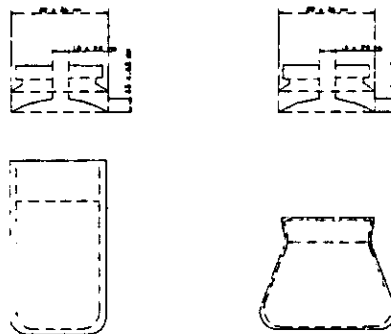


Fig. 5.3 Diseño de Picnómetros para prueba de peso específico.

Debido a que los resultados que se obtienen de las pruebas con las emulsiones no son las esperadas se decide que no puede llevarse a cabo la emulsión de tipo asfáltico ya que el contenido de asfalto en la muestra no es representativo.

5.3 Modificación del método experimental.

Sin tener algún antecedente de las muestras anteriores, se preparó la emulsión, sin saber que estas no servirían para la aplicación en pavimentos, debido a la deficiencia de contenido asfáltico en las muestras así que se decidió cambiar el protocolo de prueba y se modificó de la siguiente forma:

1. Seleccionar un sitio contaminado con hidrocarburos que contengan alguna proporción de asfalto en ellos.



2. Realizar la prueba de destilación para asfaltos rebajados, para determinar el contenido de asfalto presente en la muestra.
3. Realizar la prueba de penetración al residuo de la destilación.

La selección del sitio, fue ubicada de acuerdo a la posibilidad de que alguna planta generara este tipo de residuos con contenido de asfaltos, así que se tomó en consideración la refinería Francisco I. Madero, en Cd. Madero, Tamaulipas.

Las muestras se tomaron de un cauce cercano a la refinería que no sólo contienen residuos de hidrocarburos, sino también contienen algún porcentaje de arena.

5.3.1 Prueba de Residuo por destilación.

Al igual que las demás muestras se le realiza una destilación a la muestra hidrocarbonada como asfaltos rebajados, de la misma forma que en 5.2.3 (fig. 5.4).

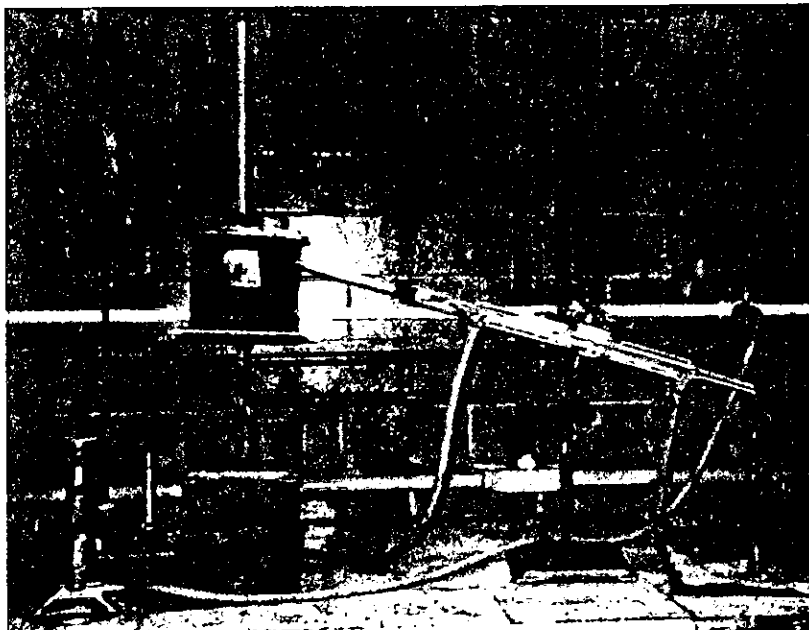


Fig. 5.4 Prueba de destilación para asfaltos rebajados.

5.3.2 Prueba de peso específico.

El método empleado es el realizado en el punto 5.2.4. (fig. 5.5).



Fig. 5.5 Prueba de peso específico.

5.3.3 Contenido de material orgánico por calcinación.

Para saber que porcentaje de arena había en la muestra de hidrocarburos, se llevó a cabo una prueba de calcinación, que consiste en quemar toda la materia orgánica a una temperatura de 600 °C que es a la temperatura en la que ya no se tendría residuo de hidrocarburo (fig. 5.6 y 5.7).

La calcinación del material orgánico de la muestra de hidrocarburos va a mostrar el contenido de arena presente en la muestra y por consecuencia la materia orgánica, esta prueba con el fin de determinar el porcentajes y poder formular la emulsión.



Fig. 5.6 y 5.7 Hornos empleados en la prueba de Incineración, la foto de la izquierda vaporiza el agua y en la derecha, se incinera el asfalto a 600 °C.



5.4 Prueba de penetración de materiales bituminosos.

La prueba siguiente determinará la dureza del asfalto, este valor de penetración indicará para que uso se puede aplicar, es decir, de acuerdo a las especificaciones A.S.T.M. un asfalto con valor de penetración para una carga de 100g por 5 seg., 100-250 para una emulsión de rompimiento rápido y medio, y para rompimiento lento se tiene una penetración de 40 –90.

Este método describe un procedimiento para determinar la penetración de materiales bituminosos semi-sólidos o sólidos (ASTM Designation D5-95).

La muestra se funde y enfría bajo condiciones normales. La penetración se mide por medio del penetrómetro empleando una aguja estandar que se aplica a la muestra. La penetración de un material bituminoso es la distancia en décimas de milímetro que una aguja estandar penetra verticalmente en la muestra, bajo condiciones normales de temperatura, carga y tiempo.

Para realizar la prueba se requiere:

Cualquier tipo de aparato de penetración que permita el movimiento del vástago, sin que se tenga una fricción y que esté perfectamente calibrado para aportar resultados de acuerdo con la descripción del termino "penetración", (fig. 5.8).

Cuando la aguja va a ser montada en la mordaza, el peso del vástago debe ser de $47.5 \pm$ g. Cualquiera que sea el aditamento de montaje, el peso total del vástago con la aguja debe ser de $50 \pm$ g. El baño maría debe mantenerse a una temperatura tal, que no varíe 0.1 °C de la seleccionada para la prueba que en este caso es de 25 °C. El tiempo de penetración es de 5 ± 1 s. y un peso de 100 g.

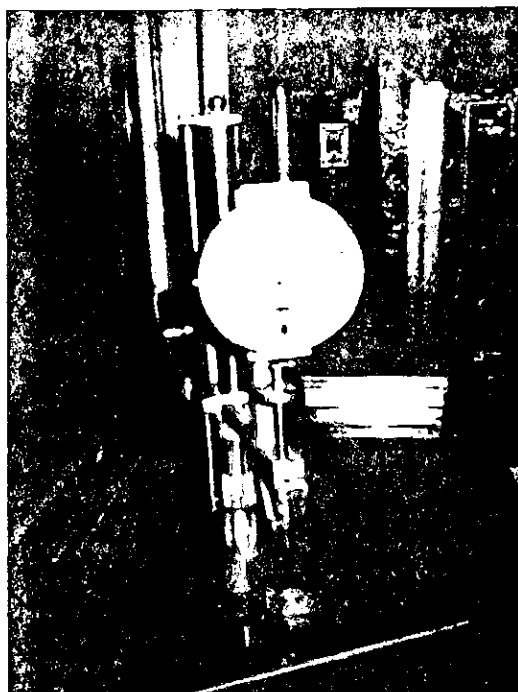


Fig. 5.8 Penetrómetro, empleado en las pruebas de penetración.

5.5 Preparación de la emulsión asfáltica.

Para la preparación de la emulsión se toma en cuenta la prueba de destilación y de la prueba de peso específico resulta que:

98.25 g. de muestra y con una densidad de 1.665 g/ml lo que:

$$\rho(\text{densidad}) = \frac{m(\text{masa})}{V(\text{volumen})}$$

$$V = \frac{98.25 \text{ g.}}{1.665 \text{ g / ml.}} = 59 \text{ ml.}$$

El volumen total de destilado es de 7 ml. y corresponden a 5 ml. de agua y 2 ml. de solventes, esto representa (tabla 5.3):



Tabla 5.3 Distribución en por ciento de la destilación.

52 ml de asfalto + arena		$\frac{52ml}{59mlmuestra} * 100 = 88.13\%$
5 ml de agua		$\frac{5 ml}{59 ml muestra} * 100 = 8.47\%$
2 ml de Solvente		$\frac{2 ml}{59 ml muestra} * 100 = 3.40\%$
Total	59 ml de muestra	100%

De la calcinación del cemento asfáltico se sabe que eeste tiene las siguientes proporciones: 36.01 % Asfalto y 63.99 % Arena

De esta manera el porcentaje en peso de la muestra queda de la siguiente forma (tabla 5.4):

Tabla 5.4 Porcentaje en Peso de la muestra de refinería Fco. I. Madero, Tampico.

Componente	Porcentaje en peso
Asfalto	$\frac{36.29 * 88.13}{100} = 31.73\%$
Arena	$\frac{63.99 * 88.13}{100} = 56.4\%$
Agua	8.48%
Solvente	3.40%

5.6 Método de preparación de la emulsión.

Con los porcentajes anteriores se puede iniciar nuevamente con las pruebas para la preparación de la emulsión.

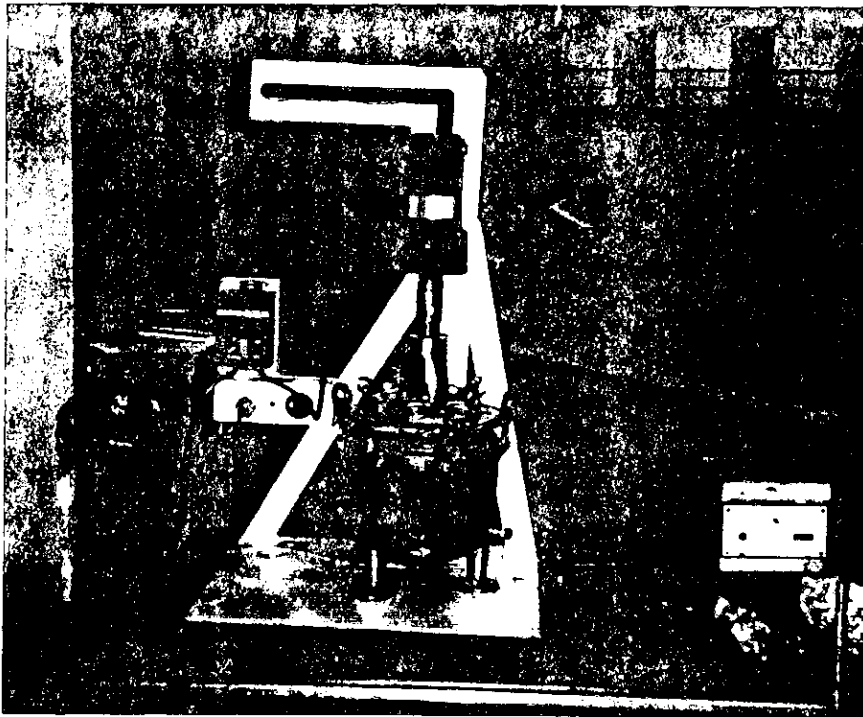


Fig. 5.9 Equipo empleado para la preparación de la Emulsión

5.6.1 Técnica y preparación de soluciones acuosas

No existe literatura que indique la secuencia para la elaboración de las soluciones emulsificantes, pero por lo general se elaboran de la siguiente forma:

- a) Los depósitos donde se prepara la solución acuosa deben ser de preferencia redonda, con un medio de agitación para poder homogeneizar el emulsificante, ácido y agua lo más rápido posible (fig. 5.9).

- b) El agua se debe calentar entre 50 y 60 °C para ayudar al emulsificante a diluirse más rápidamente, sobre todo si es sólido pastoso. Se debe incorporar al agua ya caliente el emulsificante en dos o tres partes, dependiendo de la cantidad del emulsificante y posteriormente el ácido; al estar agregando el ácido se pone a funcionar el agitador para evitar el contacto directo del emulsificante con el ácido, ya que esto provoca una reacción y se expiden humos tóxicos.



- c) Al cabo de 10 minutos se mezcla el concentrado con el total de agua que vaya a emplearse de solución y se agita por un espacio de 30 a 50 minutos, al cabo de este tiempo se verifica el pH de la solución, el cual debe estar dentro del intervalo de aceptación de la solución de que se trate: rápida, media, lenta, etc.
- d) Para la emulsificación del asfalto se utiliza el método mecánico, con el objeto de lograr la dispersión del asfalto en otra fase.

5.6.2 Método mecánico.

En esta emulsificación se usa un molino coloidal, que tiene por función mezclar el asfalto con la solución emulsificadora, con lo que reduce sus partículas a tamaños microscópicos, a este método se le conoce generalmente con el nombre de esfuerzos cortantes; en este método el principal constituyente es la pequeña cantidad de aditivo que se utiliza como emulsificante y que ejecuta la función de superficie activa, que a la vez es la propiedad fisicoquímica del emulsificante que permite que el agua y el asfalto se combinen en una mezcla homogénea y que se proporcione la estabilidad suficiente para evitar que esta partículas se recombinen en forma de masa.

La parte más importante en la dispersión del asfalto es el equipo, el que según el caso debe estar constituido por un molino coloidal, por un derivado del tubo emulsor (fabricación continua), por un mezclador de eje vertical y horizontal (fig. 5.9) girado a 80 o 120 RPM (fabricación discontinua).

Antes de empezar a producir la emulsión, hay que tener presentes las temperaturas del asfalto y solución emulsificante, las cuales deben ser las adecuadas para la buena dispersión del asfalto.

El asfalto a temperatura ambiente no presenta características de fluido newtoniano, por lo que es necesario calentarlo para lograr dichas características, se recomienda trabajarlo a temperaturas que varían entre 120 ± 10 °C.



5.6.3 Importancia de las variables.

Las tres variables a controlar durante la elaboración de una emulsión son:

Temperatura de asfalto como de solución jabonosa.

Velocidad de bombeo de asfalto y solución jabonosa.

Tiempo de dispersión.

Para esto se empleará el mezclador con agitación de 120 r.p.m.

5.7 Diseño de mezclas asfálticas.

Este apartado se refiere al diseño de una mezcla en la que se determine un contenido óptimo de asfalto, que cumpla con ciertos criterios de diseño del ASTM, pero en general la mezcla deberá tener suficiente asfalto para asegurar la durabilidad del pavimento, suficiente estabilidad para satisfacer las demandas de tráfico sin deformación o desplazamiento, suficientes vacíos en la mezcla compactada, para cierta carga de tráfico sin perder estabilidad.

5.7.1 Resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas usando el aparato Marshall (ASTM D 1559).

1 Preparación de la mezcla

Se realiza un muestreo del agregado (basalto) dependiendo de la cantidad de pastillas que se van a realizar y estas dependerán de la cantidad de pruebas que se harán, en este caso fueron cuatro condiciones:

- (a) Mezcla con cemento asfáltico AC-20
- (b) Mezcla con residuo de Hidrocarburo de la Refinería Francisco I. Madero en Tampico.
- (c) Mezcla con residuo de hidrocarburo de la Refinería Francisco I. Madero con aditivo (Chemkrete)
- (d) Mezcla con residuo de hidrocarburo de la refinería Francisco I. Madero con polímero SBS.



Para cada una de estas condiciones, se tuvieron 5 diferentes concentraciones de cemento asfáltico o de residuo de hidrocarburo según sea el caso, que parte de 5.5% al 7.5% con respecto a la cantidad de agregado, de tal manera que por cada condición se prepararán 3 pastillas de la misma concentración obteniendo así 15 pastillas, por cada condición y cada pastilla necesitó aproximadamente 1200g. de agregado, la temperatura de mezclado es de 140 °C

El equipo empleado deberá cumplir con las especificaciones ASTM D 1559 (fig. 5.10)

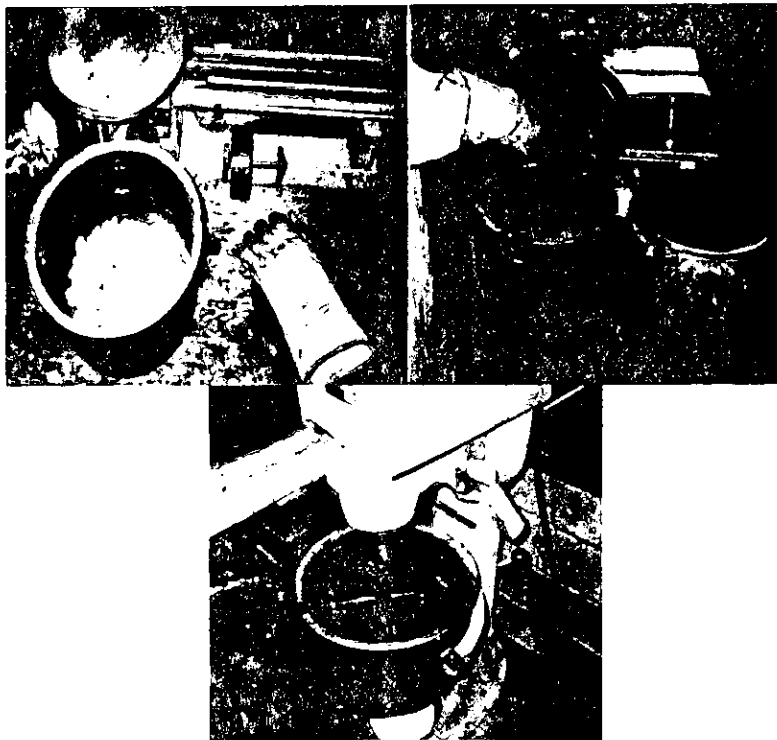


Fig. 5.10 Mezclador con agitación de 80 RPM

2. Compactación de Mezcla.

Equipo necesario para llevar a cabo este procedimiento (fig. 5.10):

- Molde de compactación del espécimen: cilindro de 4 pulgadas de diámetro por 3 pulgadas de altura.
- Base o placa del espécimen.
- Collarín, (Extensión del molde del espécimen).



➤ Equipo de compactación (compactation Hammer)

Para cada espécimen se cortan dos filtros del tamaño de la base que deberán ir por las dos caras del espécimen, es decir se pone un filtro en la base, se ensambla el molde de compactación, se introduce la mezcla que se va a compactar y se pone entonces el otro filtro y posteriormente se ensambla el collarín en el molde de compactación.

Se debe procurar que todo el material se encuentre a la temperatura en la cual se encuentra la mezcla. Para cada espécimen es necesario un molde de compactación que debe estar a temperatura de la mezcla.

El equipo de compactación Hammer (fig. 5.11), dará 75 golpes de un lado y 75 golpes del otro, durante la compactación el operador deberá rotar el molde de compactación, para que sea uniforme la compactación.

Las pastillas que se estén obteniendo deberán identificarse para sus pruebas posteriores.

3. Separación de la pastilla del molde de compactación.

La separación de la pastilla del molde de compactación se realizará mediante un equipo el cual ejercerá una fuerza de empuje en la pastilla mediante un cilindro que junto con el equipo funcionará igual que una prensa (fig. 5.12).



Fig. 5.11 Compactador de Mezclas.

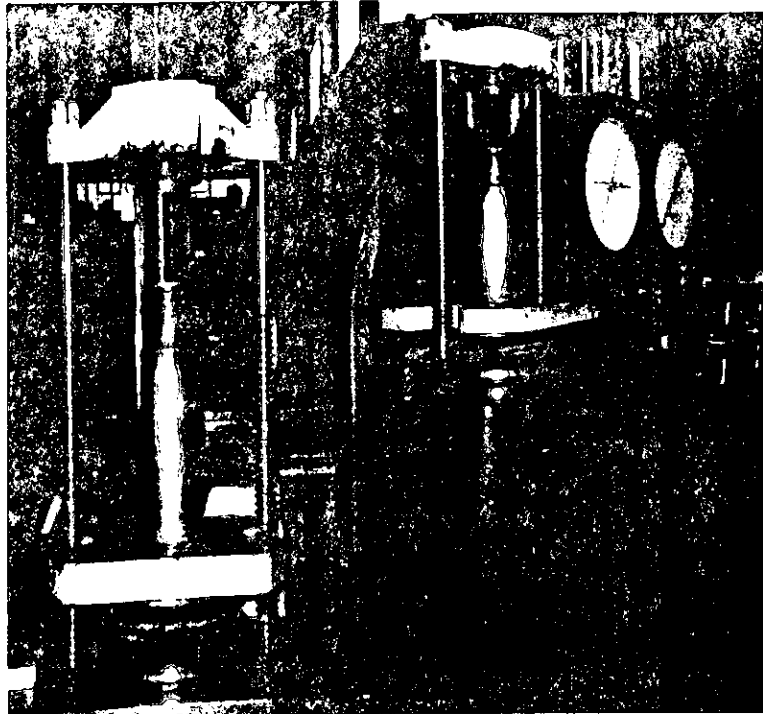


Fig. 5.12 Prensa hidráulica.

4. Prueba de máxima carga y flujo (fig. 5.13).

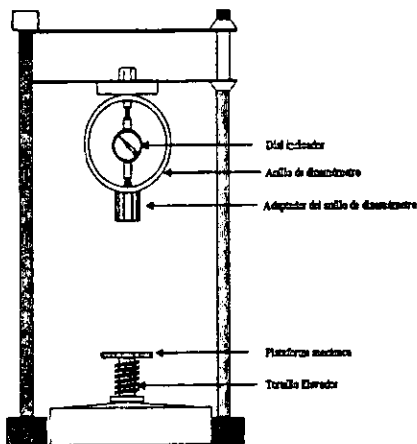


Fig. 5.13 Equipo de compresión Marshall

Esta prueba se basa en recibir una carga en cada uno de los especímenes mediante un equipo de compresión en el que mediante un tornillo realiza un desplazamiento vertical con una velocidad de 2 pulgadas por minuto. Este equipo cuenta con un dinamómetro el cual transmite la carga a un micrómetro dial, graduado en pulgadas.

Antes de efectuarse el procedimiento anterior, los especímenes habrán permanecido en un baño de agua a 60 ± 1 °C durante 30 a 40 min.



5.7.2 Gravedad específica y absorción de agregado grueso (ASTM C-127).

1) Procedimiento.

1. Se prepara una muestra de agregado para su separación por tamaños de la siguiente forma (ASTM D-75):

Tabla 5.5 Tipos de malla

Malla No
¾ - 3/8
3/8 - 4
4 - 8
Pasa 8

2. Secar la muestra de la prueba para mantenerla a peso constante a una temperatura de 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F), dejar las muestras de tamaño máximo nominal de 37.5-mm (1 ½ in) reposar a temperatura ambiente por un tiempo de 1 a 3 h, o hasta que halla alcanzado una temperatura de aproximadamente 50 °C. Posteriormente sumergir el agregado en agua a temperatura del ambiente por un periodo de 24 ± 4 h.

Nota 1: al probar el agregado grueso de tamaño máximo nominal grande se requieren grandes cantidades para la prueba, es conveniente realizar la prueba dos o más veces, y los valores que se obtengan promediarlos para realizar los cálculos necesarios.

3. Remover la muestra del agua y secar con una tela absorbente grande todas las películas visibles de agua. Limpiar las partículas más grandes individualmente. Una corriente de aire puede ayudar en este caso. Tener cuidado de evitar la evaporación de agua de los poros del agregado durante el secado de la superficie. Pesar la muestra superficialmente seca y saturada. Registrar el peso y las posibles variaciones de no más de 0.5 g o 0.05% del peso de la muestra.
4. Después de pesar, poner inmediatamente la muestra saturada y superficialmente seca en el recipiente de la muestra y determinar el peso en agua a 23 ± 1.7 °C (73.4 ± 3 °F),



teniendo una densidad de $997 \pm 2 \text{ kg/m}^3$. Tener cuidado de quitar todo el aire atrapado antes de pesar agitando el recipiente mientras se sumerge.

Nota 2: El recipiente se debe sumergir a una profundidad en la que se cubra completamente la suficiente de la muestra a pesar. El alambre que sostiene al recipiente debe tener un tamaño práctico para minimizar cualquier posible efecto debido a la longitud.

- Secar la muestra para mantenerla a peso constante a una temperatura de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($230 \pm 9 \text{ }^\circ\text{F}$), sacar la muestra y mantenerla a temperatura ambiente por espacio de 1 a 3 h, o hasta que el agregado haya alcanzado una temperatura de aproximadamente $50 \text{ }^\circ\text{C}$, y pesar.

5.7.3 Gravedad específica y absorción de agregados finos ASTM C-128

1. Preparación de la muestra.



Fig. 5.13 humedad del agregado fino.

Obtener aproximadamente un kilogramo de agregado fino de una muestra que pasa la malla No.8., Secarla en un horno durante aproximadamente 6 horas a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Después de este tiempo dejar enfriar a una temperatura manejable, cubrir con agua, por inmersión o por adición de al menos 6 % de humedad con respecto al agregado fino y dejar por un espacio de $24 \pm 4 \text{ h}$.

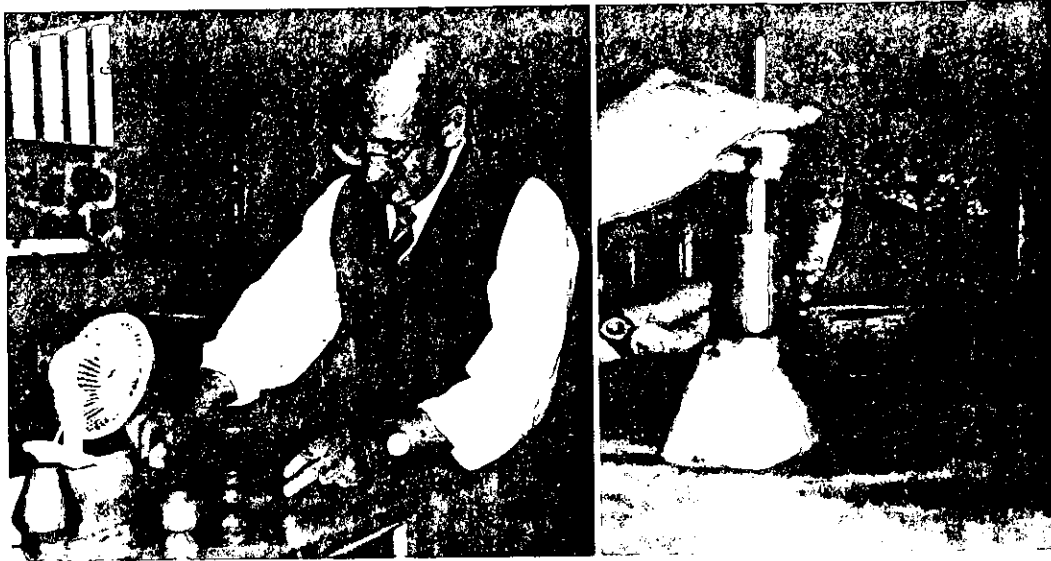


Fig. 5.15 y 5.16 Agregado fino, prueba del cono.

Secar el exceso de agua mediante un ventilador evitando la pérdida de agregados finos, esparciendo por todo el recipiente en el que se encuentre la muestra de agregado fino, para asegurar de su homogeneidad del secado, continuar esta operación hasta la siguiente condición.

* Prueba de cono para la superficie húmeda.

Acomodar el molde cónico en una superficie plana no absorbente de tal forma que la parte de mayor diámetro quede en la parte inferior e introducir una cantidad de muestra de agregado fino hasta aproximadamente la mitad de la capacidad del cono, ahí con el

pistón soltar en la muestra de agregado sin empujarlo para que su propio peso comprima el fino, nuevamente agregar muestra de fino hasta aproximadamente llenar la capacidad del cono y hacer la misma operación con el pistón hasta que esté completamente lleno el cono, en la parte superior seguramente habrá exceso de fino, retirarlo cuidadosamente así como el que se derrame fuera del cono (ver fig. 5.15 y 5.16).



Remover cuidadosamente el cono, el agregado fino mantendrá la forma del molde. Cuando el agregado fino se desmorone ligeramente, esto indica que se ha alcanzado una condición de superficie seca.



Fig. 5.17 Densidad de finos.

4. Procedimiento.

- Llenar parcialmente el picnómetro con agua. Inmediatamente introducir en el picnómetro 500 ± 10 g de agregado fino saturado superficialmente seco y llenarlo con agua adicional aproximadamente 90% de su capacidad (ver fig. 5.17).
 - Mediante una bomba de vacío, sacar todo el aire que contenga el picnómetro.
 - Ajustar a una temperatura de $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$, si es necesario mediante un baño de agua, y finalmente llenar el picnómetro a su capacidad de calibración.
 - Determinar el peso total del picnómetro, muestra y agua.
- Determinar el peso del picnómetro lleno a su capacidad de calibración con agua a 23°C .

5.7.4 Máxima gravedad específica y densidad de mezclas bituminosas de pavimentación (ASTM D-2041)

Procedimiento de prueba.

1. Separar las partículas de la muestra de la mezcla para pavimento manualmente, enfriar la muestra a temperatura ambiente e introducir en un picnómetro calibrado y tarado. Pesar y designar la masa neta de la muestra como A. Agregar suficiente agua a temperatura de aproximadamente de 25°C hasta completar la capacidad máxima del picnómetro.
2. Remover el aire atrapado en la mezcla aplicando vacío hasta una presión residual manométrica de 30 mm de Hg. o menos. Mantener esta presión residual por 10 a 15 minutos agitando el picnómetro en forma mecánica o manual por períodos de 2 min. Al



finalizar el período de vacío, suavemente liberar el vacío, y pesar en aire. Llenar el picnómetro con agua y ajustar el contenido a una temperatura de $25 \pm 1^\circ \text{C}$. Determinar la masa del contenedor y contenido.

5.7.5 Gravedad específica de bulto en mezclas compactadas (ASTM D-2726)

Procedimiento de prueba.

Tamaño del espécimen: se recomienda que el diámetro del espécimen sea por lo menos igual o cuatro veces el tamaño máximo del agregado; y el espesor de por lo menos una o uno medio veces el tamaño del máximo del agregado.

Para especímenes que se sabe que están completamente libres de humedad (es decir especímenes secos que han sido preparados en laboratorio) la secuencia de pruebas es la siguiente: seco, en agua y saturado superficialmente seco.

a) Masa del espécimen seco en aire:

Determinar la masa, pesando el espécimen después de haber permanecido en aire a temperatura ambiente por lo menos 1 h.

b) Masa del espécimen en agua:

Sumergir el espécimen en un baño de agua a 25°C por 3 a 5 min. Entonces determinar la masa por peso en agua. Si la temperatura del espécimen difiere de la temperatura del baño de agua por más de 2°C , el espécimen estará sumergido en el baño de agua por 10 a 15 min.

c) Masa en aire del espécimen saturado superficialmente seco:

Secar la superficie del espécimen rápidamente con un paño y determinar la masa pesando en aire.



Capítulo 6: Resultados y Discusión





6. RESULTADOS.

6.1 Elaboración de las emulsiones asfálticas.

De acuerdo con el procedimiento mencionado en el apartado 5.1.1 referente a la preparación de la emulsión, a continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 6.1 Resultados obtenidos en la elaboración de emulsiones.

Tensoactivo empleado	Composición química	Tipo	Resultados obtenidos
Dehyquart A	Cloruro de cetil trimetil amonio al 25 % de ingrediente activo.	Catiónico	Se forma emulsión con residuo de la terminal en dos bocas, Tabasco y pajaritos Ver. a una temperatura de 75 °C y 40 RPM y con muestra de la exrefinería 18 de Marzo a 60 °C y 75 RPM
Dodigen 2808	Cloruro de alquil demetil bencil amonio al 80 % de ingrediente activo.	Catiónico	Se forma emulsión con Muestra de refinería Miguel Hidalgo a 45 °C y 40 RPM.
HOES 3996	Cloruro de lauril dimetil hidroxietil amonio al 40 % de ingrediente activo.	Catiónico	Se forma emulsión con muestra de refinería Miguel Hidalgo a 45 °C y 40 RPM
Texapon N-5	Lauril éter sulfato de sodio.	Aniónico	No se forma emulsión con ningún residuo..
Genapol LSS-M	Lauril sulfato de sodio.	Aniónico	Se forma emulsión con lodos de la refinería Miguel Hidalgo. 40 RMP, 35 °C
Emulgator	Mezcla de tensoactivos con óxido de propileno y etileno.	No iónico	No se forma emulsión con ningún residuo.



Las emulsiones que no presentaron problema de separación de las fases se emplearon en el laboratorio de vías terrestres para realizar las pruebas correspondientes a las emulsiones asfálticas.

6.2 Residuo por evaporación.

A las muestras de emulsión que obtenidas, se les realizó la prueba de residuo por evaporación para verificar el contenido de agua en la muestra, ya que en la preparación de ésta fué de un 40 % con respecto al total de ingredientes.

Los datos que se obtuvieron fueron los siguientes (tabla 6.2):

Tabla 6.2 Resultados de prueba de residuo por evaporación.

	Peso vaso (PV) g.	Peso teórico de muestra g.	PV + muestra teórico g.	PV + muestra real (A) g.	Peso real g.	PV + muestra evaporada (B) g.	Peso real g.	%agua g.	% residuo g.
Muestra 1	361.9	50±0.1	411.9	411.9	50.0	408.5	46.6	6.80	93.2
Muestra 2	355.0	50±0.1	405.0	405.2	50.2	401.3	46.3	7.80	92.2

En donde el porcentaje de $H_2O = 2 (A - B)$

y el porcentaje de residuo = $100 - \% H_2O$

Las dos muestras a las que se les aplico este procedimiento, revelan ambas un contenido bajo de agua debido a una probable evaporación durante el almacenamiento y para verificar este dato se prosiguió a realizar una prueba más precisa como es el caso del residuo por destilación.

6.3 Residuo por destilación.

Esta prueba se realizó con la misma muestra que las dos anteriores, siendo el resultado el siguiente:



Tabla 6.3 Resultados de prueba de residuo por destilación para una emulsión asfáltica con residuos de hidrocarburos de la ex refinería 18 de Marzo.

Peso del matraz vacío con tapa	540.5 g
Peso del matraz + muestra teórica	$540.5 + 200.0 = 740.5$ g
Peso del matraz + muestra real = (A)	740.9 g
Peso de muestra real	$740.9 - 540.5 = 200.4$ g
Peso del matraz + residuo de destilación = (B)	739.0 g
Residuo de la destilación (g)	$739.0 - 540.5 = 198.5$ g
% H ₂ O = 2 (A - B)	$2 \cdot (740.9 - 739.0) = 3.80$
% destilado = 100 - % H ₂ O	$100 - 3.8 = 96.2$

De los resultados anteriores, se observa que el porcentaje de agua contenida en la emulsión en ambas tablas (6.1 y 6.2) representa una cantidad mínima, la cual no concuerda con el 40 % con el que se preparo la emulsión.

Por lo anterior se concluye que la emulsión resultante de estas pruebas no representa una muestra apta a la cual se le apliquen las restantes pruebas de calidad, ya que, para que esta muestra hubiera tenido los requerimientos deberá tener un residuo de 57, 60 o 65 % en peso mínimo de residuo de la destilación según sea el caso, si es rompimiento rápido, medio o lento.

El siguiente paso es realizar otra prueba al residuo de hidrocarburo, la cual nos dirá si esta muestra será apta para la elaboración de la emulsión.

Se trata de la destilación para asfaltos rebajados para determinar la cantidad de solvente en la muestra y otra de estas pruebas es la del peso específico.

6.4 Destilación para asfaltos rebajados ASTM D 20-91.

6.4.1 Resultados de las pruebas con muestras de residuo de hidrocarburo de la estación de Pajaritos, Veracruz:

a) Prueba de residuo por destilación como asfalto rebajado.



Tabla 6.4 Resultados de la prueba de residuo por destilación como asfaltos rebajados.

Peso del matraz vacío con tapa	194.4 g		
Peso específico de la muestra	0.97 aprox.		
Peso del matraz + muestra teórica	194.4 + 97.0 = 291.4 g		
Peso del matraz + muestra real	291.1 g		
Peso de muestra real	291.1 - 194.4 = 96.70 g		
Temperatura (°C)	Volumen de destilado (ml)	Temperatura (°C)	Volumen de destilado (ml)
120	1.5	294	3.0
130	3.0	302	4.0
180	3.0	304	4.0
200	3.0	310	4.0
214	3.0	320	4.0
248	3.0	330	4.0
260	3.0	340	4.0
280	3.0	345	4.0
Peso del matraz con residuo de destilación	288.2 g		
Peso de la muestra después de la destilación.	A = 288.2 - 194.4 = 93.80 g.		
El % Residuo es (libre de agua)= $(A - B) * \left(\frac{100}{100 - B} \right)$	$(93.8 - 1.5) * \left[\frac{100}{100 - 3} \right] = 93.6\%$		
El % Residuo (fracciones subsecuentes incluyendo el residuo) = $(A) * \left(\frac{100}{100 - B} \right)$	$93.8 * \left[\frac{100}{100 - 3} \right] = 96.7\%$		
A: Peso del residuo en gramos.			
B: Volumen de agua, expresado en gramos, en la fracción destilada a 170 °C			

Del destilado obtenido, se realizó un análisis de componentes presentes en él, mediante una cromatografía.

b) Prueba de Peso específico.

Tabla 6.5 Prueba de peso específico. Muestras de la terminal Pajaritos, Ver.

Peso del picnómetro 2 vacío	35.98 g.	Peso del picnómetro 2 con agua	68.08 g.
-----------------------------	----------	--------------------------------	----------



Tabla 6.5 (Continuación) Prueba de peso específico. Muestras de la terminal Pajaritos, Ver.

Peso del picnómetro 3 vacío	45.92 g.	Peso del picnómetro 3 con agua	77.69 g.
Peso del picnómetro 4 vacío	43.36 g.	Peso del picnómetro 4 con agua	76.92 g.
Temperatura de vaciado de la muestra (°C) = 76		Temperatura de prueba(°C) = 25	
Peso del picnómetro 2 + muestra c/tapa 47.64 g.		Peso del picnómetro 2 + muestra c/agua 66.80g.	
Peso del picnómetro 3 + muestra c/tapa 61.57g.		Peso del picnómetro 3 + muestra c/agua 76.69g.	
Peso del picnómetro 4 + muestra c/tapa 60.00g.		Peso del picnómetro 4 + muestra c/agua 76.04g.	
$\text{Gravedad específica} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$		A = Peso del picnómetro vacío B = Peso del picnómetro lleno con agua C = Peso del picnómetro parcialmente lleno con asfalto D = Peso del picnómetro lleno con asfalto y agua.	
Gravedad específica del picnómetro 2 = 0.906			
Gravedad específica del picnómetro 3 = 0.939			
Gravedad específica del picnómetro 4 = 0.949			
Gravedad específica promedio = 0.931			
Densidad = Gravedad específica * (W _T)			
W _T = Densidad del agua a la temperatura de experimentación (25 °C) = 0.997 g /cm ³			
Densidad de la muestra = 0.928 g/cm ³			

c) Identificación de compuestos en la muestra mediante cromatografía.

Del destilado que se obtuvo en la prueba como asfalto rebajado, se analizó mediante un método de cromatografía para identificar los componentes en el producto (fig. 6.1).

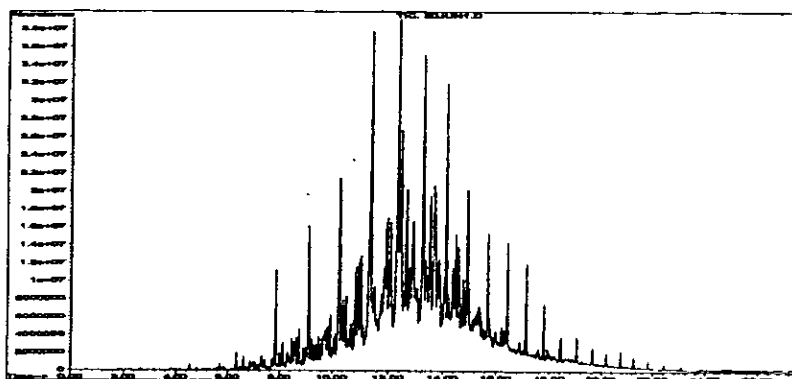


Fig. 6.1 Diagrama de cromatografía del destilado(Pajaritos, Ver.).



Los picos más representativos que se ven en el gráfico anterior son los que enseguida se muestran:

Tabla 6.6 Espectro de la cromatografía del destilado de la muestra de Pajaritos Ver.

Tiempo de retención	% área	Compuesto
7.82	0.83	Decano
9.10	1.83	Undecano
10.25	3.16	Dodecano
11.34	6.23	Tridecano
12.32	6.25	Tetradecano
13.24	4.96	Pentadecano
14.10	4.15	Hexadecano
14.90	3.38	Heptadecano
15.67	1.68	Octadecano
16.4	0.84	Nonadecano
17.11	1.17	Eicosano
17.78	0.61	Tetradecano

De acuerdo a la tabla 6.4, todos los compuestos identificados corresponden a la familia de parafinas que como su nombre manifiesta la cadena más alta corresponde al eicosano que contiene 20 átomos de carbono la cual no representa ningún contenido de asfalto aún en el residuo de destilación.

6.4.2 Empleando muestra de residuos de hidrocarburos de la ex refinería 18 de Marzo en Atzacapotzalco

a) Prueba de residuo por destilación como asfalto rebajado.

Tabla 6.7 Resultados de la prueba de destilación como asfalto rebajado.

Peso del matraz vacío con tapa.	194.6 g.
Peso específico de la muestra	0.97 aprox.
Peso del matraz + muestra teórica	$194.6 + 97.0 = 291.6$ g
Peso del matraz + muestra real	291.6 g
Peso de muestra real	$291.6 - 194.6 = 97.0$ g



Tabla 6.7 (Continuación) Resultados de la prueba de destilación como asfalto rebajado.

Temperatura	Vol. de destilado	Temperatura	Vol. de destilado
130	18.0	304	34.0
230	21.0	310	36.0
248	22.0	320	38.0
260	22.5	330	41.0
280	25.0	340	44.0
294	30.0	345	46.0
302	33.0		
Peso del matraz con residuo de destilación		294.4g.	
Residuo de destilación en gramos.		249.4 – 194.6 = 54.8 g	
El % Residuo es (libre de agua) $(A - B) * \left(\frac{100}{100 - B} \right)$		$(54.8 - 18.0) * \left[\frac{100}{100 - 18.0} \right] = 44.9$	
El % Residuo (fracciones subsecuentes incluyendo el residuo) = $(A) * \left(\frac{100}{100 - B} \right)$		$54.8 * \left[\frac{100}{100 - 18.0} \right] = 66.8 \%$	
A: Peso del residuo			
B: Vol. De destilado a 170 °C			

b) Prueba de peso específico ASTM D 70.

Tabla 6.8 Prueba de peso específico de muestras de la ex- refinería 18 de Marzo.

Peso del picnómetro 2 vacío	35.95 g.	Peso del picnómetro 2 con agua	68.08 g.
Peso del picnómetro 3 vacío	45.88 g.	Peso del picnómetro 3 con agua	77.69 g.
Peso del picnómetro 4 vacío	43.33 g.	Peso del picnómetro 4 con agua	76.92 g.
Temperatura de vaciado de la muestra (°C) 76		Temperatura de prueba(°C) 25	
Peso del picnómetro 2 + muestra c/tapa 53.41 g.		Peso del picnómetro 2 + muestra c/agua 66.50g.	
Peso del picnómetro 3 + muestra c/tapa 58.44 g.		Peso del picnómetro 3 + muestra c/agua 76.53g.	
Peso del picnómetro 4 + muestra c/tapa 57.83 g.		Peso del picnómetro 4 + muestra c/agua 75.71g.	
Gravedad específica = $\frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$		A = Peso del picnómetro vacío B = Peso del picnómetro lleno con agua C = Peso del picnómetro parcialmente lleno con asfalto D = Peso del picnómetro lleno con asfalto y agua.	



Tabla 6.8 (Continuación) Prueba de peso específico de muestras de la ex- refinería 18 de Marzo.

Gravedad específica del picnómetro 2 = 0.917
Gravedad específica del picnómetro 3 = 0.958
Gravedad específica del picnómetro 4 = 0.922
Gravedad específica promedio = 0.932
Densidad = Gravedad específica * (W_T)
W_T = Densidad del agua a la temperatura de experimentación (25 °C) = 0.997 g /cm ³
Densidad Promedio = 0.929 g/cm ³

c) Identificación de compuestos en la muestra mediante cromatografía.

Al igual que la muestra que se obtuvo de la destilación de Pajaritos también a esta se le analizó mediante una cromatografía para identificar los productos en el destilado y el cual despliega los siguientes resultados:

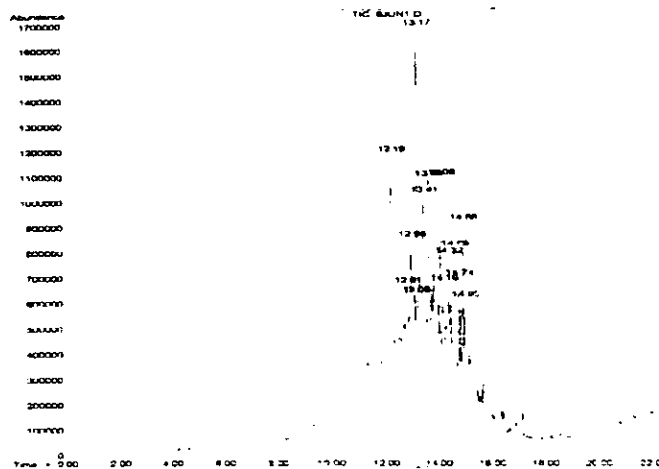


Fig. 6.2 Diagrama de cromatografía del destilado (ex - refinería 18 de Marzo.).

De acuerdo con los resultados de la cromatografía, para el cual se aplicó el método 8015 M1 de EPA, se observa que los picos corresponden a la familia parafinica al igual que la muestra de la terminal en Pajaritos, Veracruz.

El resultado es una muestra orgánica que presenta un perfil semejante al del diesel, por lo tanto no es conveniente emplear ninguna de las dos muestras probadas (Pajaritos y



Azcapotzalco) ya que el contenido de asfalto en estas es no detectado y la condición para realizar una emulsión con fines de pavimentación es precisamente un ligante.

6.5 Resultado Refinería Francisco I. Madero.

Dado que las muestras anteriores no resultaron aprovechables para la aplicación que se pretende, se decidió emplear muestras en las que se conoce que contienen alguna proporción de asfalto y de esta manera proseguir con la preparación de la emulsión.

A continuación se presentan resultados de las pruebas de destilación y peso específico, de las muestras con contenido asfáltico.

6.5.1 Destilación como asfalto rebajado.

Tabla 6.9 Prueba de Residuo por destilación, Muestra de Refinería Fco. I. Madero

Peso del matraz sin tapa	158.7 g.		
Peso del matraz con tapa	199.4g.		
Volumen a emplear en la destilación	100 ml.		
Densidad de la muestra	0.97 g/ml		
Peso de la muestra a emplear	97.0 g.		
Peso del matraz sin tapa + muestra teórica	255.7 g.		
Peso del matraz con tapa + muestra teórica	296.7 g.		
Peso del matraz sin tapa + muestra real	257.0 g.		
Peso del matraz con tapa + muestra real	297.6 g.		
Peso real de la muestra	98.2 g.		
Temperatura (° C)	Vol. Destilado (ml)	Temperatura (°C)	Vol. Destilado (ml)
90 –100	5.0 (4.5 ml de agua)	302	6.0
160	6.0 (5 ml de agua)	304	6.0
200	6.0	310	6.5
214	6.0	320	6.5



Tabla 6.9 (Continuación) Prueba de Residuo por destilación, Muestra de Refinería Fco. I. Madero

Temperatura (°C)	Vol. Destilado (ml)	Temperatura (°C)	Vol. Destilado (ml)
240	6.0	330	6.5
260	6.0	340	6.5
280	6.0	345	6.5
294	6.0		

Observaciones:

La destilación del agua termina a la temperatura de 110 °C y después sólo destila 1.5 ml. que corresponden a solventes que destilan a 320 °C y que podrían ser de una cadena de 18 a 25 átomos de carbono.

Peso del matraz sin tapa + muestra después de la destilación = 249.8 g.

Peso del matraz con tapa + muestra después de la destilación = 290.4 g.

Peso del residuo (A) = 91.0 g.

Volumen total de destilado (B) = 7.0ml.

% Residuo (libre de agua) = $(A-B) * 100 / (100 - B)$
 $(91.02 - 6) * 100 / (100 - 6) = 90.5\%$

% Residuo (fracciones subsecuentes incluyendo el residuo) = $A * 100 / (100 - B)$
 $(91.02 * 100) / (100 - 6) = 96.8 \%$

A: Peso del residuo en gramos
 B: Volumen de destilado a 170 °C.

6.5.2 Peso específico.

Tabla 6.10 Prueba de peso específico. Muestra de refinería Fco. I. Madero

Peso del picnómetro 2 vacío	35.92 g.	Peso del picnómetro 2 con agua	68.08 g.
Peso del picnómetro 3 vacío	45.87 g.	Peso del picnómetro 3 con agua	77.69 g.
Peso del picnómetro 4 vacío	43.28 g.	Peso del picnómetro 4 con agua	76.92 g.
Temperatura de vaciado de la muestra (°C) 76		Temperatura de prueba(°C) 25	
Peso del picnómetro 2 + muestra c/tapa 63.43 g.		Peso del picnómetro 2 + muestra c/agua 79.07g.	
Peso del picnómetro 3 + muestra c/tapa 75.29 g.		Peso del picnómetro 3 + muestra c/agua 89.52g.	
Peso del picnómetro 4 + muestra c/tapa 73.88 g.		Peso del picnómetro 4 + muestra c/agua 89.22g.	



Tabla 6.10 (Continuación) Prueba de peso específico. Muestra de refinería Fco. I. Madero

$\text{Gravedad específica} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$	<p>A = Peso del picnómetro vacío</p> <p>B = Peso del picnómetro lleno con agua</p> <p>C = Peso del picnómetro parcialmente lleno con asfalto</p> <p>D = Peso del picnómetro lleno con asfalto y agua.</p>
Gravedad específica del picnómetro 2 = 1.665	
Gravedad específica del picnómetro 3 = 1.673	
Gravedad específica del picnómetro 4 = 1.672	
Densidad = Gravedad específica * (W_T)	
W _T = Densidad del agua a la temperatura de experimentación (25 °C) = 0.997 g /cm ³	
Densidad Promedio = 1.665 g/cm ³	

Como se puede apreciar en la tabla 6.8 se tiene un residuo libre de agua de 90.34% de la muestra y 93.83% de residuo incluyendo el agua, esto quiere decir existe un porcentaje bajo de solventes, y debido a que este residuo sí tiene un contenido de asfalto, sí se podrá usar la muestra para la preparación de la emulsión, pero como se muestra en la tabla 6.9 el valor de densidad es alto debido al contenido de arena que se tiene en la muestra. Una forma de determinar el contenido de residuo de hidrocarburo es mediante las pruebas con las que se obtienen los datos que a continuación se presentan.

6.5.3 Contenido de material orgánico por calcinación.

La densidad de un asfalto de refinación es de 1.033 aproximadamente y la de la muestra es de 1.665. De este modo, de los 202. 23 g de la muestra, 72.83 g son de componentes orgánicos y 129.4g de arena, lo que corresponde a 36.01 % de asfalto y 63.99 % de arena que corresponde a más de la mitad con respecto al residuo de hidrocarburo.

A este residuo se le aplicó la prueba de penetración con el objeto de ver que tan sólido es ese material a una determinada carga y temperatura, ya que como se sabe, las propiedades físicas de un asfalto varían conforme a la temperatura.



6.5.4 Penetración de materiales bituminosos.

La penetración de un material bituminoso es la distancia en décimas de milímetro que una aguja estándar penetra verticalmente en la muestra, bajo condiciones normalizadas de temperatura carga y peso.

Los resultados obtenidos de esta prueba son los siguientes:

Penetración 25 °C, 100g y 5 seg. (Tabla 6.11).

Tabla 6.11 Valores de penetración de muestra de Refinería Fco. I. Madero

Valores de penetración (mm):
223
226
223
222
225

Con los resultados anteriores y comparándolos con las especificaciones de la SCT se concluye que se puede seguir con la preparación de la emulsión, aunque se tiene poca proporción de materia orgánica en la muestra de residuos de hidrocarburos, se pueden ajustar las proporciones de la preparación de la emulsión.

6.5.5 Emulsión.

De acuerdo a la siguiente tabla se preparó una emulsión con el residuo de hidrocarburo de la refinería Francisco I. Madero

Tabla 6.12 Porcentaje en Peso de la muestra de refinería Fco. I. Madero, Tampico.

Componente	Porcentaje en peso
Asfalto	$\frac{36.29 * 88.13}{100} = 31.7\%$
Arena	$\frac{63.99 * 88.13}{100} = 56.4\%$



Tabla 6.12 (Continuación) Porcentaje en Peso de la muestra de refinería Fco. I. Madero, Tampico.

Componente	Porcentaje en peso
Agua	8.48%
Solvente	3.40%

Con las proporciones de los componentes de la tabla 6.12 se procedió a preparar la emulsión asfáltica con un asfalto puro que sirviera de testigo para comparar con la que se obtuviera con el residuo de hidrocarburo.

Se probaron varios métodos de adición de ingredientes tal como el mostrado en el punto 5.1.1 de tal manera que se fuera descartando cada una de las variables que no resultaran satisfactorias, pero no se llevó a cabo la emulsión, debido a que es necesario un equipo de agitación con altas revoluciones y que además estuviera ejerciendo una fuerza de corte, cosa que no se aplicaba usando el agitador que se tenía para esta prueba.

Debido al problema anterior, se decidió realizar la prueba con una agitación vigorosa de 1200 r.p.m. manteniendo el proceso a una temperatura de 180 °C y con temperatura de solución jabonosa de 40 °C y una dosificación de 10 ml /min para una muestra con un pH de 2 - 4.

Se probaron diferentes tensoactivos aniónicos y catiónicos, de los cuales ninguno resultó debido a que las condiciones seguían siendo inapropiadas para la elaboración de la emulsión.

De acuerdo con el objetivo de la tesis, se requiere obtener una emulsión asfáltica a partir de residuos de hidrocarburos a fin de elaborar mezclas que se puedan aplicar en caminos.

Con los resultados obtenidos, se concluye que dadas las características de las muestras, se requiere de un molino coloidal, debido a la necesidad de hacer las emulsiones con este tipo de equipo se considera no aplicable económicamente y se considera como alternativa probar únicamente con las mezclas asfálticas.

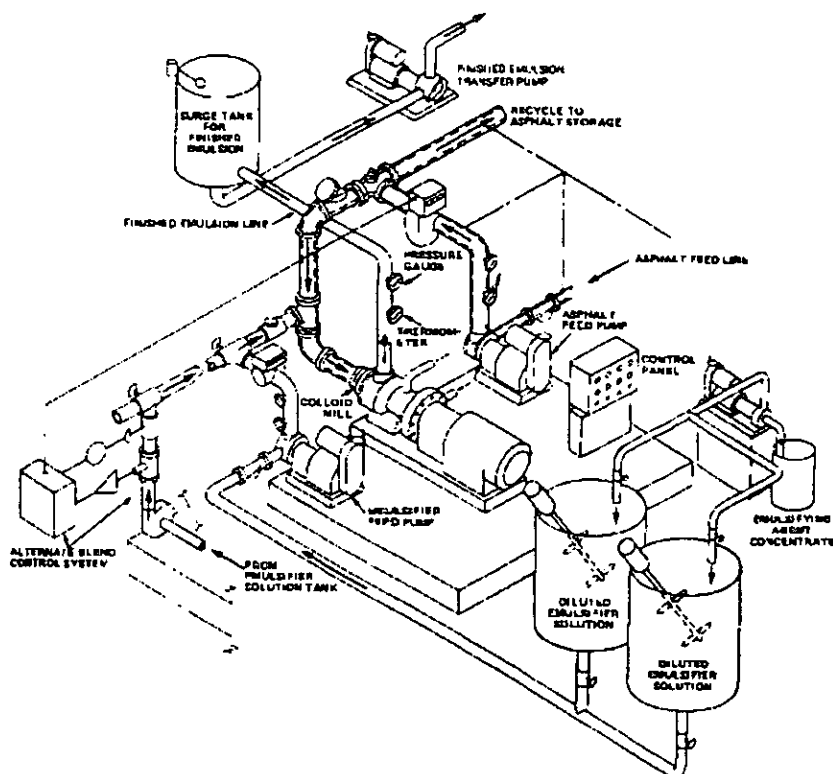


Fig. 6.3 Planta de emulsiones asfálticas empleando un molino coloidal.

6.6 Diseño de mezclas asfálticas.

6.6.1 Densidad de agregados Finos.

Tabla 6.13 Densidad de agregados finos

FECHA	07-Dic-99		14-Dic-99	
OPERADOR	K.D.S. y G.B.S.			
# Matraz	2	5	2	5
Peso de matraz sin material (g).	176.1	230.7	176.3	230.7
Peso del matraz con material (g).	405.0	430.0	363.6	430.0
Peso del material (g). (S)	228.9	199.3	187.3	199.3
Temperatura de prueba (°C)	24.8	24.8	25.0	24.8
Peso del matraz aforado sin material (g). (B)	674.2	730.1	674.2	730.1
Peso del matraz aforado con material (g). (C)	812.8	854.4	788.6	854.4



Tabla 6.14 Prueba de humedad.

Muestra	1	2	PROMEDIO	1	2	PROMEDIO
Peso del material con tara (g). (H)	421.3	458.6		295.3	306.8	
Peso del material seco con tara (g). (S)	412.1	449.0		291.1	302.7	
Peso de la tara (g). (T)	135.9	146.7		135.87	146.71	
Humedad (%).	3.316	3.149	3.232	2.679	2.583	2.631
BSG *	2.457	2.573	2.515	2.505	2.588	2.546
BSGSSD **	2.537	2.656	2.596	2.571	2.656	2.613
ASG ***	2.669	2.806	2.737	2.724	2.822	2.773

La gravedad específica total (BSG) promedio se calculó tomando en cuenta solo los datos más semejantes, de esta manera el BSG resultante es: **2.555**

$$\% \text{Humedad} = (H - S / S - T) * 100$$

$$* \text{Gravedad específica total (BSG)} = A / (B + S - C)$$

$$** \text{Gravedad específica total (saturado y superficialmente seco) (BSGSSD)} = S / (B + S - C)$$

$$*** \text{Gravedad específica aparente (ASG)} = A / (B + A - C)$$

$$\text{Peso del espécimen seco en aire, g. (A)} = S / \text{Humedad} + 1.0$$

6.6.2 Densidad de agregados gruesos.

Tabla 6.15 Densidad de gruesos.

Prueba: Densidad de agregados gruesos										
Fecha	01-Dic-99									
Operador	K.D.S. y G.B.S.									
Muestra	1	2	PROM	3	4	PROM	5	6	7	PROM
Tamaño del material	8 a 4	8 a 4	8 a 4	4 a 3/8	4 a 3/8	4 a 3/8	3/8 a 3/4	3/8 a 3/4	3/8 a 3/4	3/8 a 3/4
Tara recipiente hum. (g).	146.4	146.2		129.2	128.0		131.9	146.2	136.6	
Peso saturado y sumergido en agua, (g). (C)	274.6	264.5		521.4	504.9		596.3	604.5	613.2	
Peso saturado y superficialmente seco (g).	591.6	583.6		993.0	962.2		1112.3	1143.1	1151.5	
Tara de recipiente seco (g).	145.9	145.6		128.5	127.5		131.2	146.2	135.5	
Peso seco en aire (g).	570.7	561.0		962.3	937.2		1089.7	1118.4	1124.6	
A = Peso seco en aire - tara s.	424.8	415.4		833.9	809.7		958.5	972.2	989.1	
B = peso saturado S.S - tara h.	445.2	437.4		863.8	834.2		980.4	996.9	1015.2	



Tabla 6.15 (Continuación) Densidad de gruesos.

Prueba Densidad de agregados gruesos										
Fecha	01-Dic-99									
Operador	K.D.S. y G.B.S.									
Muestra	1	2	PROM	3	4	PROM	5	6	7	PROM
Tamaño del material	8 a 4	8 a 4	8 a 4	4 a 3/8	4 a 3/8	4 a 3/8	3/8 a 3/4	3/8 a 3/4	3/8 a 3/4	3/8 a 3/4
BSG	2.490	2.402	2.446	2.435	2.459	2.447	2.495	2.478	2.461	2.478
BSGSSD	2.609	2.530	2.569	2.523	2.533	2.528	2.552	2.541	2.526	2.534
ASG	2.828	2.752	2.790	2.669	2.656	2.663	2.646	2.644	2.631	2.638
ABSORCIÓN, %	4.795	5.291	5.043	3.596	3.022	3.309	2.288	2.543	2.634	2.588

Gravedad específica total (BSG) = A/(B-C)

Gravedad específica total (saturado y superficialmente seco) (BSGSSD) = B/(B-C)

Gravedad específica aparente (ASG) = A/(A-C)

Absorción % = [(B - A) / A] * 100

6.6.3 Gravedad específica máxima de la mezcla sin compactar.

Tabla 6.16 Gravedad específica máxima de mezcla.

Mezcla de agregado con 6.6% asfalto AC-20			
Temperatura de prueba	24.6 °C	Temperatura de prueba	24.8 °C
Peso de picnómetro vacío (g.)	3479	Peso de picnómetro vacío (g.)	3478
Peso de picnómetro con agua (g.)	7729	Peso de picnómetro con agua (g.)	7729
Peso del picnómetro + mezcla de agregado con 6.6% asfalto (g.)	5081	Peso del picnómetro + mezcla de agregado con 6.6% asfalto (g.)	5075
Peso de la mezcla (g.)	1602	Peso de la mezcla (g.)	1597
Peso del picnómetro con mezcla lleno con agua (g.)	8671	Peso del picnómetro con mezcla lleno con agua (g.)	8659
$GravedadEspecifica = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$		A = Peso del picnómetro vacío (g) B = Peso del picnómetro lleno con agua C = Peso del picnómetro con mezcla D = Peso del picnómetro con mezcla y agua.	
Gravedad Específica (1)=	2.425	Gravedad Específica (1)=	2.393
Promedio Gmm =2.409			



Tabla 6.16 (Continuación) Gravedad específica máxima de mezcla.

Mezcla de agregado con 6.6% Muestra Tampico			
Temperatura de prueba	24.5°C	Temperatura de prueba	24.6 °C
Peso de picnómetro vacío (g.)	3480	Peso de picnómetro vacío (g.)	3480
Peso de picnómetro con agua (g.)	7729	Peso de picnómetro con agua.(g.)	7729
Peso del picnómetro + mezcla de agregado con 6.6% asfalto (g.)	5086	Peso del picnómetro + mezcla de agregado con 6.6% asfalto (g.)	5578
Peso de la mezcla (g.)	1606	Peso de la mezcla (g.)	2098
Peso del picnómetro con mezcla lleno con agua (g)	8689	Peso del picnómetro con mezcla lleno con agua (g.)	8985
$GravedadEspecifica = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$		A = Peso del picnómetro vacío (g) B = Peso del picnómetro lleno con agua C = Peso del picnómetro con mezcla D = Peso del picnómetro con mezcla y agua.	
Gravedad Especifica	2.483	Gravedad Especifica	2.490
Promedio Gmm =2.487			

6.6.4 Gravedad Especifica del agregado

De la granulometría que se obtiene del procedimiento 5.10.2 y de acuerdo con la tabla 5.5, se obtiene los siguientes resultados:

A continuación se presentan los cálculos que se realizan para la obtención de resultados que se presenta más adelante.

Tabla 6.17 Granulometría del agregado.

Malla No	mm	% que pasa	BSG
3/4	19.0	100	2.478
1/2	12.5	85.2	
3/8	9.52	73.4	2.447
1/4	6.35	61.9	
4	4.75	54.4	
8	2.38	40.4	2.446



Tabla 6.17 (Continuación) Granulometría del agregado.

Malla No	mm	% que pasa	BSC
16	1.190	32.1	2.555
30	0.600	25.4	
50	0.300	19.7	
100	0.150	14.3	
200	0.075	9.9	
Gravedad específica, G_{SB} (promedio)			2.498

Empleando la ecuación del apartado 4.6.1 que es la siguiente:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Donde:

G_{sb} = gravedad específica de bulto del total del agregado.

P_1, P_2, P_n = porcentaje en peso del agregado 1, 2, n.

G_1, G_2, G_n = Gravedades específicas de bulto del agregado 1, 2, n.

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{40.4}{2.555} + \frac{14}{2.445} + \frac{19}{2.447} + \frac{26.6}{2.478}} = 2.498$$

$$P_1 = 40.4$$

$$P_2 = 54.4 - 40.4 = 14$$

$$P_3 = 73.4 - 54.4 = 19$$

$$P_4 = 100 - 73.4 = 26.6$$



6.6.5 Gravedad específica efectiva del agregado.

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \qquad P_b = \frac{\% \text{ cemento asfáltico respecto al agregado}(A)}{1 + \frac{A}{100}}$$

G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado.

P_{mm} = porcentaje en peso total de la mezcla = 100%

P_b = porcentaje de asfalto con respecto a la mezcla.

G_{mm} = gravedad específica máxima de la mezcla (libre de vacíos de aire),

G_b = gravedad específica del asfalto

AC-20 = 1.035

Muestra de refinería Fco. I. Madero = 1.665

$$P_b = \frac{6.6}{1 + \frac{6.6}{100}} = 6.19$$

$$G_{se} = \frac{100 - 6.191}{\frac{100}{2.409} - \frac{6.191}{1.035}} = 2.64$$

Muestra de Tampico.

$$P_b = \frac{5.5}{1 + \frac{5.5}{100}} = 5.21$$

$$G_{se} = \frac{100 - 5.21}{\frac{100}{2.487} - \frac{5.21}{1.665}} = 2.556$$

6.6.6 Absorción de asfalto.

La absorción de asfalto, P_{ba} , se determina de la siguiente manera:

$$P_{ba} = 100 \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} * G_b$$



Donde:

P_{ba} = asfalto absorbido, como por ciento en peso de agregado.

G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado.

G_{sb} = gravedad específica de bulto del agregado.

G_b = gravedad específica del asfalto.

Asfalto AC-20:

$$P_{ba} = 100 \frac{2.64 - 2.498}{2.498 * 2.64} * 1.035 = 2.23$$

Muestra de residuo con hidrocarburos:

$$P_{ba} = 100 \frac{2.556 - 2.498}{2.498 * 2.556} * 1.665 = 1.51$$

6.6.7 Contenido efectivo de asfalto de una mezcla de pavimento.

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} P_s$$

Donde:

P_{be} = contenido de asfalto efectivo, por ciento en peso de la mezcla.

P_b = asfalto, por ciento en peso de la mezcla.

P_{ba} = asfalto absorbido, por ciento en peso del agregado.

P_s = agregado, por ciento en peso de la mezcla.

Asfalto AC-20

$$P_{be} = 6.191 - \frac{2.23}{100} 93.81 = 4.09$$

Muestra de residuo con hidrocarburo.

$$P_{be} = 5.21 - \frac{1.51}{100} 94.79 = 3.78$$



6.6.8 Porcentaje de VMA (voids in mineral aggregate) en una mezcla de pavimento compactado.

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} P_s}{G_{sb}}$$

Donde:

VMA = vacíos en el mineral agregado (por ciento del volumen total).

G_{sb} = gravedad específica de bulto del agregado.

G_{mb} = gravedad específica de bulto de la muestra compactada (ASTM D 2726).

P_s = agregado, por ciento en peso de la mezcla.

Muestra AC-20 (5.5% de asfalto por peso de agregado)

$$VMA = 100 - \frac{2.221 * 94.79}{2.498} = 15.72$$

Muestra de residuo con hidrocarburos (5.010 % de muestra por peso de agregado)

$$VMA = 100 - \frac{2.281 * 95.23}{2.498} = 13.04$$

6.6.9 Cálculo del porcentaje de vacíos de aire en una mezcla compactada.

$$P_a = 100 - \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Donde:

P_a = vacíos de aire en una mezcla de pavimento compactado.

G_{mm} = gravedad específica máxima de la mezcla de pavimento.

G_{mb} = gravedad específica de bulto de la mezcla compactado.

Asfalto AC-20 (5.5% de asfalto por peso de agregado)



$$P_a = 100 \frac{2.409 - 2.221}{2.409} = 7.80$$

Muestra de residuo de hidrocarburo (5.01 % de muestra por peso de agregado).

$$P_a = 100 \frac{2.487 - 2.253}{2.487} = 9.41$$

6.7 Pruebas Marshall.

6.7.1 Mezclas.

Tabla 6.16 Mezclas Condición 1

Condición No. 1					
PROCEDENCIA	Planta de Asfalto, Cd. de México.				
Operador	K.D.S. y G.B.S.				
Fecha	24-Nov-99	23-Nov-99	23-Nov-99	24-Nov-99	23-Nov-99
Pastilla No.	1,2,3	3,4,5,	6,7,8	9,10,11	12,13,14
Tara de olla (g).	2578	4869	2579	2578	2578
olla + mat. (g).	6150	8338	6020	6050	6130
Material, g.	3572	3469	3441	3472	3552
Cemento asfáltico, (%)	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
Cemento asfáltico (g).	196.5	208.1	223.7	243.0	266.4
Olla + mat + C.A. (g).	6347	8546	6243	6293	6396
Tara de canaleta, (g).	1768	1769	1768	1768	1768
Peso de pastilla, (g).	1175	1150	1175	1175	1175
Pastilla + canaleta (g).	2943	2919	2943	2943	2943

OBSERVACIONES:

1. El por ciento del cemento asfáltico se calcula con respecto a la cantidad de agregado, (material).
2. Se pesó la olla con el agitador en la condición de 6%.



Capítulo 6. Resultados



Tabla 6.18 Mezclas condición 2.

Condición No. 2					
PROCEDENCIA	Muestra de Tampico				
Operador	K.D.S. y G.B.S.				
Fecha	26-Nov-99	26-Nov-99	26-Nov-99	26-Nov-99	30-Nov-99
Pastilla No.	16,17,18	19,20,21	22,23,24	25,26,27	28,29,30
Tara de olla (g).	2579	2579	2579	2579	2569
olla + mat. (g).	6375	6110	6248	6112	6105
Material (g).	3796	3531	3669	3533	3536
Cemento asfáltico (%).*	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
Cemento asfáltico (g).	208.8	211.9	238.5	247.3	265.2
Muestra cemento asfáltico (g).	579.8	588.3	662.3	686.8	736.5
Olla + mat + C.A. (g).	6954	6698	6910	6798	6841
Tara de canaleta (g).	1765	1765	1765	1765	1765
Peso de pastilla (g).	1175	1175	1175	1175	1175
Pastilla + canaleta (g)	2940	2940	2940	2940	2940
% C.A por peso de agregado.	5.01	5.42	5.83	6.22	6.62

OBSERVACIONES:

1. En los gramos de cemento asfáltico, se toma en cuenta la arena de la muestra de Tampico.
2. * Sin tomar en cuenta a la arena como parte del agregado

Tabla 6.19 Mezclas condición 3.

Condición No. 3					
PROCEDENCIA	Muestra de Tampico				
Operador	K.D.S. y G.B.S.				
Fecha	06-Dic-99	06-Dic-99	06-Dic-99	06-Dic-99	06-Dic-99
Pastilla No.	A,B,C	D,E,F	G,H,I	J,K,L	M,N,O
Tara de olla (g).	2569	2572	2573	2572	2572
olla + mat. (g).	6170	6095	6220	6085	6207
Material (g).	3601	3523	3647	3513	3635
Cemento asfáltico (%)	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
Cemento asfáltico (g).	198.0	211.4	237.1	245.9	272.6
Muestra cemento asfáltico (g).	550.0	587.0	658.3	682.8	757.0
Aditivo chemcret (g).	4.04	4.31	4.84	5.02	5.56
Olla + mat + C.A. (g).	6720	6682	6878	6767	6964
Tara de canaleta (g).	1765	1765	1765	1765	1765
Peso de pastilla (g).	1175	1175	1175	1175	1175



Capítulo 6. Resultados



Tabla 6.19 (Continuación) Mezclas condición 3.

Condición No. 3					
PROCEDENCIA	Muestra de Tampico				
Operador	K.D.S. y G.B.S.				
Pastilla + canaleta (g).	2940	2940	2940	2940	2940
% C.A por peso de agregado.	5.01	5.42	5.83	6.23	6.62

OBSERVACIONES:

1. En los gramos de cemento asfáltico, se toma en cuenta la arena de la muestra de Tampico (36.01% Cemento Asfáltico).
2. Agregar endurecedor al 2.04% sobre 100% de Cemento Asfáltico.

Tabla 6.20 Mezclas condición 4.

Condición No. 4					
PROCEDENCIA	Muestra de Tampico				
Operador	K.D.S. y G.B.S.				
Fecha	10-Dic-99	10-Dic-99	10-Dic-99	10-Dic-99	04-Ene-00
Pastilla No.	1b,2b,3b	4b,5b,6b	7b,8b,9b	10b,11b,12b	13b,14b,15b
Tara de olla (g).	2568	2569	2572	2579	2572.5
olla + mat. (g).	5885	5885	5853	5874	5760
Material (g).	3317	3316	3281	3295	3187.5
Cemento asfáltico (%)	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
Cemento asfáltico (g).	182.4	199.0	213.3	230.7	239.1
Muestra cemento asfáltico (g).	506.6	552.5	592.2	640.5	663.9
Aditivo SBS (g).	9.12	9.95	10.7	11.5	11.9
Olla + mat + C.A. + SBS (g).	6391.6	6437.5	6445.2	6514.5	6435.8
Tara de canaleta (g).	1765	1765	1765	1765	1765
Peso de pastilla (g).	1175	1175	1175	1175	1175
Pastilla + canaleta (g).	2940	2940	2940	2940	2940
% C.A. por peso de agregado.	5.01	5.42	5.83	6.23	6.62

OBSERVACIONES:

1. En los gramos de cemento asfáltico, se toma en cuenta la arena de la muestra de Tampico (36.01% Cemento Asfáltico).
2. Se agregó polímero (SBS) al 5% sobre 100% de Cemento Asfáltico.



6.7.2 Resistencia al flujo plástico empleando el aparato Marshall.

Tabla 6.21 Resultados de la aplicación de norma ASTM D-1559.

Condición 1				Condición 2			
# Pastilla	Lectura de Microm. 0.001	Flujo en 0.01"	Altura del especimen	# Pastilla	Lectura de Microm. 0.001	Flujo en 0.01"	Altura del especimen
1	398	13	7.03	1	235	21	6.65
2	344	10	6.92	2	253	17	6.54
3	416	10	6.83	3	286	22	6.46
4	435	14	6.49	4	478	14	6.61
5	440	18	6.45	5	397	16	6.65
6	560	14	6.22	6	361	14	6.43
7	565	16	6.75	7	326	14	6.73
8	480	16	6.59	8	339	13	6.46
9	591	16	6.58	9	403	15	6.67
10	528	21	6.54	10	354	12	6.75
11	518	19	6.55	11	321	15	6.63
12	498	23	6.37	12	285	13	6.60
13	450	22	6.69	13	228	14	6.76
14	430	20	6.70	14	148	13	7.10
15	394	27	6.66	15	276	10	6.80

Tabla 6.22 Resultados de la aplicación de norma ASTM D-1559.

Condición 3				Condición 4			
# Pastilla	Lectura de Microm. 0.001	Flujo en 0.01"	Altura del especimen	# Pastilla	Lectura de Microm. 0.001	Flujo en 0.01"	Altura del especimen
1	392	15	6.50	1	415	15	7.03
2	312	10	6.73	2	320	10	7.05
3	305	12	6.74	3	424	12	6.94
4	380	18	6.43	4	406	18	6.80
5	390	15	6.42	5	388	15	6.90
6	328	14	6.40	6	523	14	6.60



Tabla 6.22(Continuación) Resultados de la aplicación de norma ASTM D-1559.

Condición 3				Condición 4			
# Pastilla	Lectura de Microm. 0.001"	Flujo en 0.01"	Altura del especimen	# Pastilla	Lectura de Microm. 0.001"	Flujo en 0.01"	Altura del especimen
7	424	15	6.50	7	476	15	6.70
8	320	14	6.94	8	426	14	6.80
9	360	13	6.60	9	449	13	6.80
10	357	10	6.62	10	409	10	6.80
11	400	12	6.63	11	515	12	6.60
12	367	12	6.56	12	496	12	6.50
13	400	13	6.56	13	503	16	6.57
14	322	10	6.68	14	693	12	6.46
15	431	16	6.70	15	586	14	6.53

*Las graduaciones del flujómetro en 0.01 in. (0.25 mm).

6.7.3 Estabilidad del espécimen.

Para calcular la estabilidad es necesario emplear un factor de corrección[†] que involucra la altura del espécimen.

Tabla 6.23 Correlación de estabilidad

cm	correlación	cm	correlación	cm	correlación
2.54	5.56	4.29	2.08	6.03	1.09
2.70	5.00	4.44	1.92	6.19	1.04
2.86	4.55	4.60	1.79	6.35	1.00
3.02	4.17	4.76	1.67	6.51	0.96
3.18	3.85	4.92	1.56	6.67	0.93
3.33	3.57	5.08	1.47	6.38	0.89
3.49	3.33	5.24	1.39	6.98	0.86
3.65	3.03	5.40	1.32	7.14	0.83
3.81	2.78	5.56	1.25	7.30	0.81
3.97	2.50	5.72	1.19	7.46	0.78
4.13	2.27	5.87	1.14	7.62	0.76

[†] ASTM D 1559



Tabla 1 ASTM D 1559

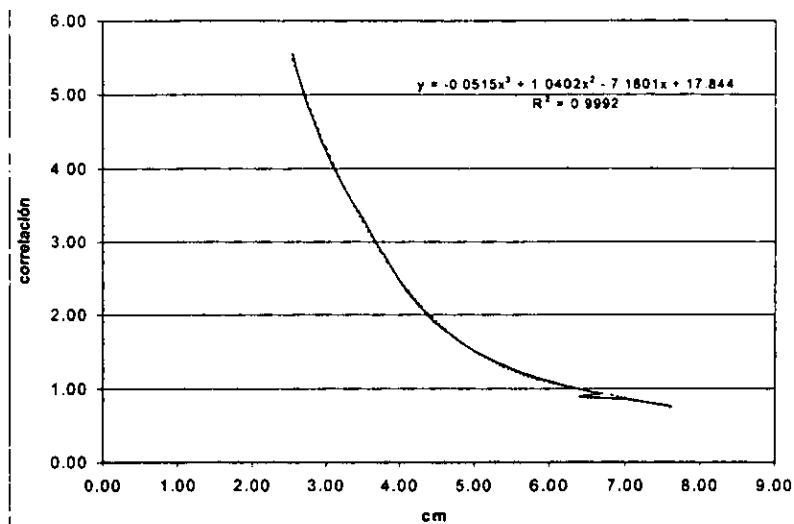


Fig. 6.4 Corrección de estabilidad

De acuerdo con la correlación anterior y con la ecuación obtenida se calcula el factor de correlación siendo;

Y = Factor de correlación
X = Altura de espécimen

La estabilidad corregida se obtiene de la siguiente forma:

$(100 * \text{Lectura del micrómetro} * \text{factor de corrección} * \text{Constante del anillo}) = \text{Estabilidad corregida.}$

Siendo la constante del anillo que se empleó para hacer la prueba es de 3.4019.

Ejemplo.

Para asfalto AC-20 con 5.5 % de asfalto la altura promedio del espécimen es de 6.93, y aplicando la ecuación de correlación;

$$-0.0515(6.93)^3 + 1.0402(6.93)^2 - 7.1801(6.93) + 17.844 = 0.9016$$

La estabilidad corregida será:

$$(100 * 3.98) * 0.9016 * 3.4019 = 1220.73 \text{ Kg.}$$

6.7.3 Tablas de resultados de las pruebas Marshall.

Practica número	% de C.A. por peso de agregado	% de C.A. por peso de matriz	Peso seco en aire (g)	Peso sumergido (g)	Peso sat. y sup. seco (g)	Volumen (cm ³)		P. Vel. (g/cm ³)	Volumenes % del total		Lectura microm. en 0.001"	Altura espécimen (cm)	Factor de corrección	Estabilidad Carveida (Kg)	Flujo en 0.01"	Flujo en (mm)
						En función de vol. desplazado	En función de vol. depositado		Vacos (aire)	V.A.M.						
1			1164	664.4	1194	529.2	2.199	2.199	9.988	18.39	3.98	7.03	0.983	1185	13	3.33
2	5.5	5.21	1180	660.4	1183	522.1	2.221	2.221	9.087	15.56	3.44	6.92	0.903	1057	10	2.57
3			1182	668.3	1198	530.1	2.230	2.230	8.719	15.21	4.16	6.83	0.920	1301	10	2.57
Promedio	5.5		1189	664.4	1192	527.1	2.221	2.221	9.265	15.72	3.86	6.93	0.902	1189	11	3.78
4			1149	653.5	1159	505.4	2.273	2.273	6.345	14.16	4.35	6.49	0.980	1451	14	3.57
5	6.0	5.66	1144	650.8	1154	503.5	2.271	2.271	6.428	14.23	4.40	6.45	0.988	1479	18	4.59
6			1146	658.6	1152	493.7	2.322	2.322	4.326	12.31	5.60	6.22	1.034	1971	14	3.57
Promedio	6.0		1146	654.3	1155	500.9	2.271	2.271	6.700	14.14	4.78	6.39	1.001	1616	15	3.31
7			1172	665.8	1180	513.8	2.280	2.280	5.473	14.30	5.65	6.75	0.934	1795	16	4.08
8	6.5	6.10	1171	664.7	1181	516.2	2.269	2.269	5.929	14.71	4.80	6.59	0.962	1571	16	4.08
9			1172	666.2	1178	511.3	2.293	2.293	4.934	13.81	5.91	6.58	0.964	1938	16	4.08
Promedio	6.5		1172	665.6	1179	513.8	2.293	2.293	5.445	13.83	5.43	6.64	0.953	1789	16	4.32
10			1164	668.4	1170	503.8	2.311	2.311	4.819	13.54	5.28	6.54	0.971	1745	21	5.33
11	7.0	6.54	1174	670.9	1179	508.5	2.308	2.308	4.942	13.65	5.18	6.55	0.969	1708	19	4.83
12			1167	668.5	1172	503.3	2.319	2.319	4.489	13.24	4.96	6.37	1.003	1700	23	5.84
Promedio	7.0		1168	668.8	1174	504.2	2.302	2.302	4.750	13.88	5.15	6.49	0.981	1706	21	5.01
13			1161	652.1	1165	513.0	2.282	2.282	5.038	15.77	4.50	6.89	0.944	1446	22	5.59
14	7.5	6.98	1163	662.3	1169	507.1	2.284	2.284	3.694	14.57	4.30	6.70	0.943	1379	20	5.08
15			1166	656.4	1170	514.0	2.286	2.286	4.786	15.54	3.94	6.66	0.950	1273	27	6.96
Promedio	7.5		1163	658.9	1168	511.4	2.277	2.277	4.508	15.21	4.25	6.88	0.946	1366	23	5.96

Constante de anillos: 3.40

Densidad del cemento asfáltico: 1.04

Observaciones:

Absorción de asfalto: 15.53

Densidad del material pétreo (BSC): 2.488

Densidad de Ríco: 2.41

Material Pátreo:		Basalto triturado		Tamaño máximo:		3/4"		Fecha:		23-Nov-99											
Material astático:		Muestra Tempico		Aditivo empleado:		Ninguno															
Paleta número	% de C.A. por peso de agregado	% de C.A. por peso de matriz	Peso seco en aire (g)	Peso sumergido (g)	Peso sec y emp. seco (g)	Volumen (cm ³)		P. Vol.(g/cm ³)	Volumenes % del total		Lectura aireado en 9.1"	Alura espachinas (cm)	Factor de conexión	Estabilidad Comprimida (Kg)	Flejo en 9.01"	Flejo en (mm)					
						En función de vol. desplazado	En función de vol. desplazado		Vacio (mm)	V.A.U.											
1			1169	661.6	1180	518.8	2.253	2.253	12.264	14.10	235	6.65	0.951	761	21.00	5.33					
2	5.01	4.77	1160	662.9	1172	508.7	2.281	2.281	11.196	13.05	253	6.54	0.871	838	17.00	4.32					
3			1168	667.7	1175	506.8	2.304	2.304	10.302	12.16	266	6.46	0.888	859	22.00	5.59					
Promedio	5.01		1166	664.1	1176	511.4	2.291	2.291	11.264	13.02	258	6.55	0.870	852	20.00	4.93					
4			1167	666.1	1177	510.4	2.285	2.285	10.840	13.23	478	6.61	0.859	1559	14.00	3.56					
5	5.42	5.14	1163	667.1	1174	505.9	2.296	2.296	10.333	12.74	397	6.65	0.951	1285	16.00	4.06					
6			1168	670.8	1174	503.6	2.319	2.319	9.514	11.94	381	6.43	0.892	1218	14.00	3.56					
Promedio	6.42		1166	663.0	1175	506.8	2.294	2.294	10.279	12.89	412	6.56	0.907	1354	14.57	4.04					
7			1169	660.5	1180	513.6	2.277	2.277	10.969	13.87	326	6.73	0.937	1039	14.00	3.56					
8	5.83	5.51	1169	664.7	1174	509.2	2.285	2.285	10.265	13.19	339	6.46	0.886	1137	13.00	3.30					
9			1170	668.5	1180	511.2	2.288	2.288	10.539	13.45	403	6.67	0.948	1300	15.00	3.81					
Promedio	5.83		1169	660.6	1178	511.3	2.282	2.282	10.581	13.29	356	6.62	0.957	1159	14.00	3.46					
10			1164	665.4	1176	512.7	2.270	2.270	11.064	14.45	354	6.75	0.934	1125	12.00	3.05					
11	6.23	5.86	1163	663.8	1175	511.6	2.273	2.273	10.947	14.34	321	6.63	0.955	1043	15.00	3.81					
12			1165	666.4	1176	509.1	2.288	2.288	10.359	13.77	285	6.60	0.960	931	13.00	3.30					
Promedio	6.23		1164	663.2	1176	511.1	2.277	2.277	10.790	14.31	320	6.66	0.950	1033	13.33	3.20					
13			1163	661.1	1182	520.9	2.233	2.233	12.325	16.14	228	6.76	0.932	723	14.00	3.56					
14	6.62	6.21	1158	661.7	1178	516.4	2.243	2.243	11.949	15.78	148	7.10	0.869	438	13.00	3.30					
15			1168	668.9	1184	514.8	2.269	2.269	10.943	14.82	276	6.80	0.925	868	10.00	2.54					
Promedio	6.62		1163	663.9	1181	517.4	2.261	2.261	11.739	13.61	217	6.89	0.909	876	12.33	3.25					
Constante de anillos:												3.4018		Densidad del cemento estático:		1.665		Observaciones:			
Absorción de estático:												12.510		Densidad del material pátreo (BSG):		2.498					
Densidad de Ríce:												2.467									

Material Pétreo: Basalto triturado

Tamaño máximo: 3/4"

Fecha: 10-Dic-89

Aditivo empleado: Chemikrete

Material asfáltico: Muestra Tampico

Aditivo empleado: Chemikrete

Prueba número	% de C.A. por peso de agregado	% de C.A. por peso de mezcla	Peso seco en aire (g)	Peso sumergido (g)	Peso seco y sup. seco (g)	Volumen (cm ³)		P. Vol.(g/cm ³)	Volumen % del total		Lectura microm. en 0.1"	Altura espécimen (cm)	Factor de corrección	Estabilidad Comprim. (kg)	Flujo en 8.01"	Flujo en (mm)
						En función de vol. desplazado	En función de vol. desplazado		Volúmenes (cúb.)	V.A.M.						
1			1162	663.2	1170	506.3	2.298	10.61	12.48	382	6.50	0.979	1305	15	3.81	
2	5.01	4.77	1168	665.3	1182	516.3	2.262	11.91	13.78	312	6.73	0.937	985	10	2.54	
3			1171	662.5	1185	522.4	2.241	12.75	14.58	305	6.74	0.936	971	12	3.05	
Promedio	6.01		1167	663.7	1179	518.0	2.260	11.78	13.60	336	6.66	0.950	1119	12	3.36	
4			1167	666.7	1169	502.1	2.324	9.32	11.75	380	6.43	0.992	1282	18	4.57	
5	5.42	5.14	1171	671.8	1174	502.2	2.332	9.02	11.46	380	6.42	0.984	1318	15	3.81	
6			1167	668.5	1169	500.3	2.332	8.99	11.43	328	6.40	0.998	1113	14	3.56	
Promedio	5.42		1168	669.0	1171	501.8	2.317	9.11	11.55	366	6.42	0.994	1180	16	3.63	
7			1154	659.4	1163	503.2	2.284	10.32	13.24	424	6.50	0.979	1412	15	3.81	
8	5.83	5.51	1168	665.3	1178	510.5	2.287	10.58	13.49	320	6.94	0.900	879	14	3.56	
9			1170	666.4	1180	513.3	2.280	10.65	13.75	360	6.60	0.960	1176	13	3.30	
Promedio	5.83		1164	663.7	1173	509.9	2.280	10.58	13.48	368	6.68	0.946	1222	14	3.54	
10			1168	662.7	1178	515.7	2.265	11.28	14.64	357	6.62	0.957	1162	10	2.54	
11	6.23	5.86	1164	658.2	1174	516.1	2.256	11.62	14.99	400	6.63	0.955	1300	12	3.05	
12			1167	661.9	1178	513.7	2.272	11.00	14.39	367	6.56	0.968	1208	12	3.05	
Promedio	6.23		1166	660.9	1176	514.7	2.263	11.28	14.67	375	6.60	0.960	1238	11	3.37	
13			1180	655.4	1167	512.0	2.266	11.05	14.92	400	6.56	0.968	1317	13	3.30	
14	6.62	6.21	1155	654.8	1166	511.4	2.258	11.36	15.21	322	6.68	0.948	1036	10	2.54	
15			1168	661.7	1176	514.1	2.271	10.84	14.72	431	6.70	0.943	1382	16	4.08	
Promedio	6.62		1161	657.3	1170	512.4	2.271	11.08	14.85	384	6.65	0.952	1232	13	3.06	

Observaciones:

Densidad del cemento asfáltico: 1.685

Densidad del material pétreo (BSG): 2.498

Constante de amilios: 3.4019

Absorción de asfalto: 12.510

Densidad de Ricos: 2.487

Densidad de Ricos:

Material Pétreo:		Basalto triturado		Tamaño máximo:		3/4"		Fecha:		16-Dic-99					
Material asfáltico:		Muestra Tampico		Activo empleado:		Polimero SBS									
Prueba (numero)	% de C.A. por peso de agregado	% de C.A. por peso de mezcla	Peso seco en aire (g)	Peso sumergido (g)	Peso sat. y exp. seco (g)	Volumen (cm ³) En función de vol. desplazado	P. Vol.(g/cm ³) En función de vol. desplazado	Volumen % del total		Lactera mínim. en 0.1"	Alura espesim. (cm)	Factor de corrección	Espesitud corregida (kg)	Flujo en 0.01"	Flujo en (mm)
								Vozos (cm ³)	V.A.M.						
1			1168	664.7	1185	520.6	2.238	12.614	14.64	415	7.03	0.883	1247	15	3.81
2	5.01	4.77	1163	659.3	1187	527.5	2.205	14.139	15.94	320	7.05	0.879	957	10	2.54
3			1163	664.9	1187	521.8	2.229	13.201	15.02	424	6.94	0.800	1288	12	3.05
Promedio	5.01		1164	663.9	1186	523.3		13.385	15.36	386	7.01	0.887	1219	12	3.38
4			1163	657.4	1181	524.0	2.219	13.435	15.76	406	6.80	0.825	1277	18	4.57
5	5.42	5.14	1168	658.3	1189	531.1	2.199	14.180	16.48	388	6.90	0.807	1197	15	3.81
6			1164	666.0	1173	513.7	2.266	11.823	13.99	823	6.80	0.860	1709	14	3.66
Promedio	5.42		1166	663.2	1181	522.9		13.284	15.16	436	6.77	0.831	1289	16	3.48
7			1188	683.9	1182	518.2	2.254	11.862	14.73	476	6.70	0.943	1526	15	3.81
8	5.83	5.51	1168	664.7	1184	519.0	2.250	12.021	14.86	426	6.80	0.825	1340	14	3.56
9			1170	662.7	1182	518.6	2.256	11.791	14.66	449	6.80	0.825	1413	13	3.30
Promedio	5.83		1169	663.6	1182	518.7		11.882	14.70	450	6.77	0.831	1431	14	3.51
10			1166	683.5	1180	516.1	2.259	11.485	14.86	409	6.80	0.825	1287	10	2.54
11	6.23	5.86	1172	667.9	1179	511.5	2.291	10.260	13.68	515	6.80	0.860	1883	12	3.05
12			1171	669.6	1179	509.6	2.297	10.010	13.44	496	6.51	0.877	1648	12	3.05
Promedio	6.23		1169	667.9	1179	512.4		10.985	13.37	473	6.64	0.864	1643	11	3.44
13			1172	667.9	1180	511.8	2.289	10.137	14.05	503	6.57	0.867	1654	16	4.06
14	6.62	6.21	1174	671.6	1178	508.8	2.317	9.028	12.99	693	6.46	0.897	2326	12	3.05
15			1167	680.2	1175	514.3	2.269	10.933	14.81	588	6.53	0.973	1940	14	3.56
Promedio	6.62		1171	668.6	1177	513.9		10.933	13.79	604	6.52	0.878	1829	14	3.28

Constante de emisión: 3.4019 Densidad del cemento asfáltico: 1.885 Observaciones: _____

Absorción de asfalto: 12.510 Densidad del material pétreo (BSG): 2.480 _____

Densidad de fibra: 2.487 _____



6.7.4 Gráficos Marshall.

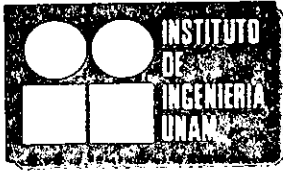
Para realizar un análisis comparativo de las cuatro condiciones propuestas las cuales son:

1. Mezcla con Asfalto AC-20.
2. Residuo de hidrocarburos provenientes de refinería Francisco I. Madero.
3. Residuo de hidrocarburos provenientes de refinería Francisco I. Madero con un aditivo chemcrete (endurecedor)
4. Residuo de hidrocarburos provenientes de refinería Francisco I. Madero con un Polímero SBS.

Dado que lo indica la ASTM es necesario trazar cinco gráficos representativos de los resultados obtenidos del ensayo Marshall, los cuales nos ayudarán a determinar el contenido óptimo de asfalto.

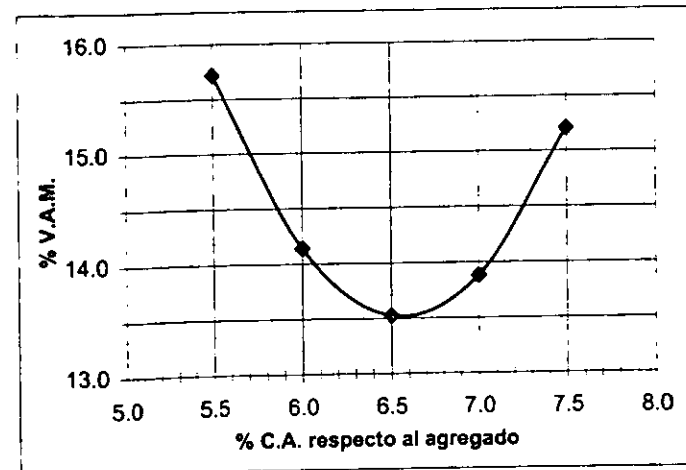
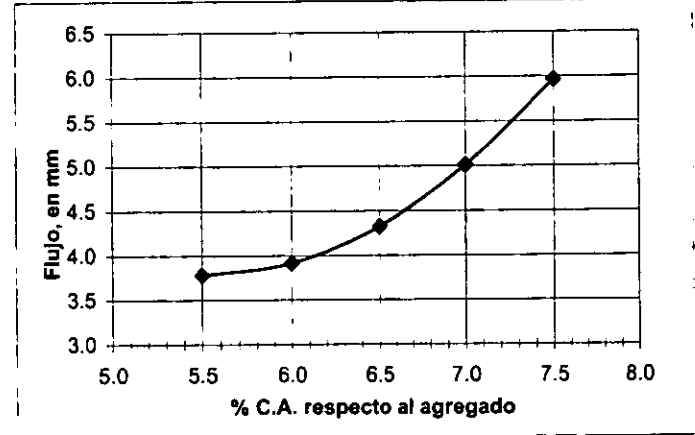
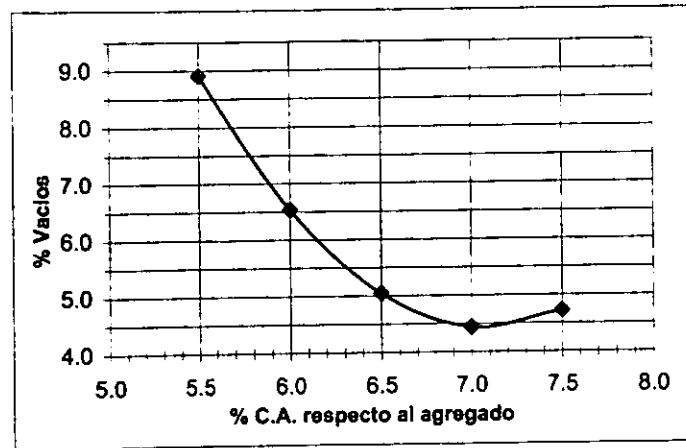
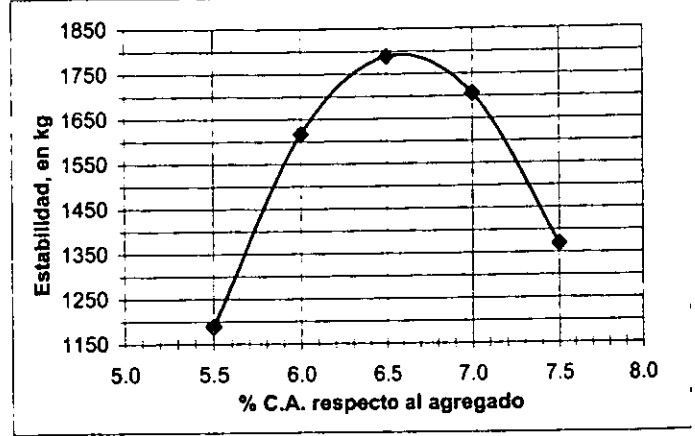
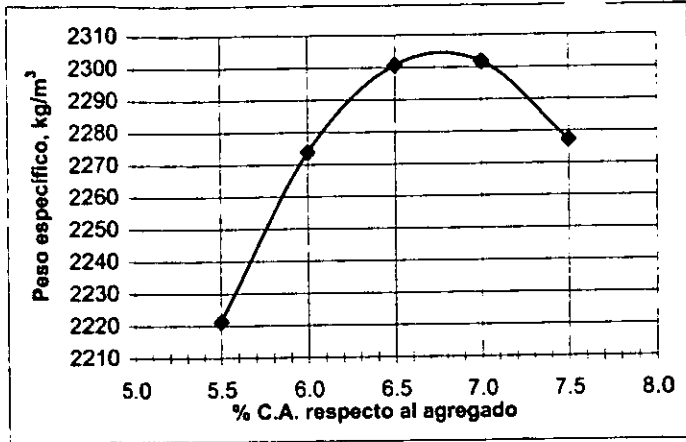
Los gráficos mencionados son los siguientes:

1. Porcentaje de cemento asfáltico con respecto al agregado vs estabilidad
Los valores de estabilidad incrementarán conforme incrementa el contenido de asfalto hasta un máximo, después de este punto la estabilidad disminuye.
2. Porcentaje de cemento asfáltico con respecto al agregado vs flujo
Los valores de flujo incrementan cuando aumenta el contenido de asfalto.
3. Porcentaje de cemento asfáltico con respecto al agregado vs peso específico del espécimen.
La curva del peso específico es similar a la curva de estabilidad, excepto que el máximo peso específico ocurre para un contenido de asfalto ligeramente arriba que el de estabilidad máxima.
4. Porcentaje de cemento asfáltico con respecto al agregado vs vacíos de aire.
El porcentaje de vacíos de aire disminuye con el aumento del contenido de asfalto al final acercándose a un contenido mínimo de vacíos.
5. % de Cemento asfáltico con respecto al agregado vs vacíos en el agregado.
El porcentaje de vacíos en el agregado generalmente disminuye hasta un valor mínimo entonces incrementa con forme aumenta el contenido de asfalto.

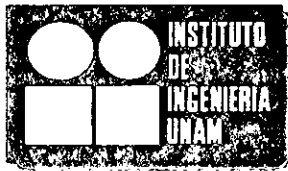


PRUEBAS MARSHALL

Condición 1 (Asfalto AC-20)

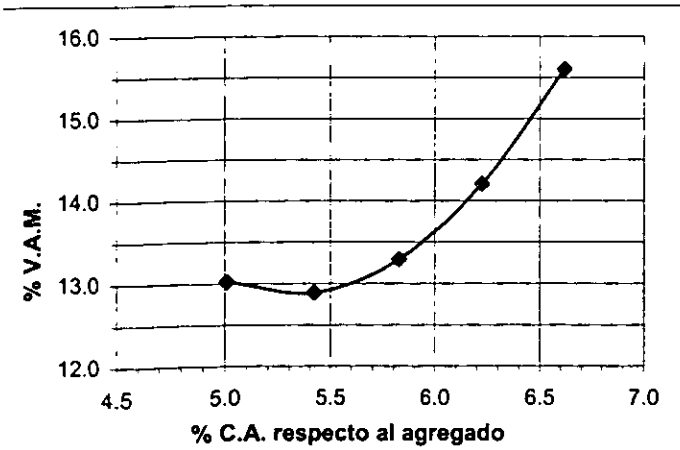
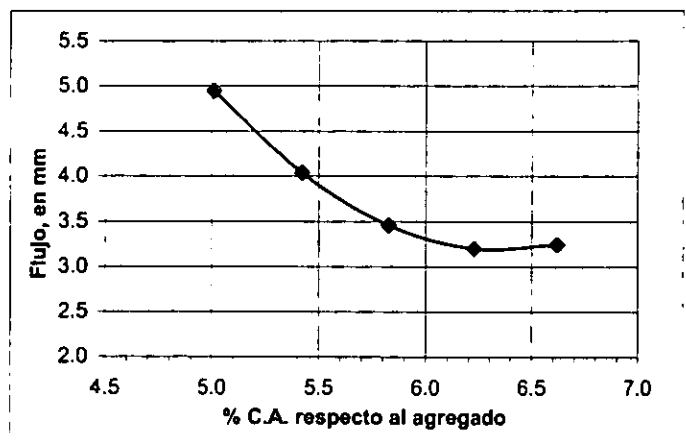
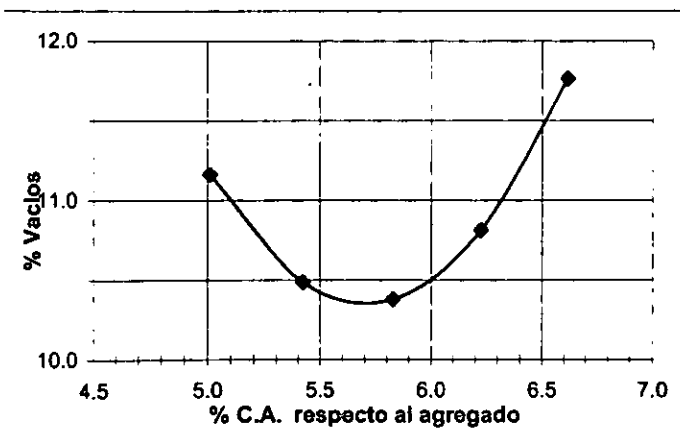
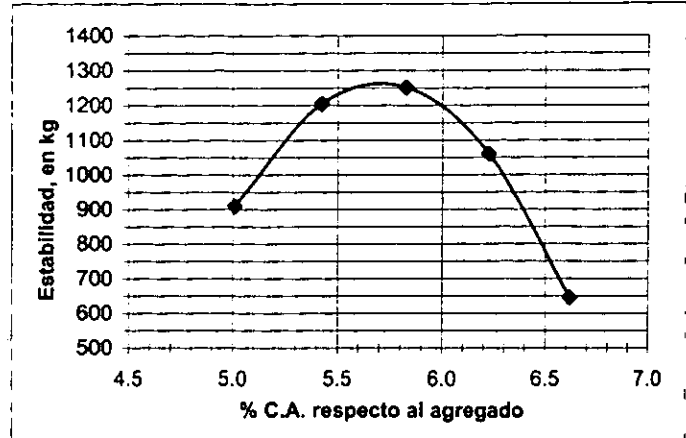
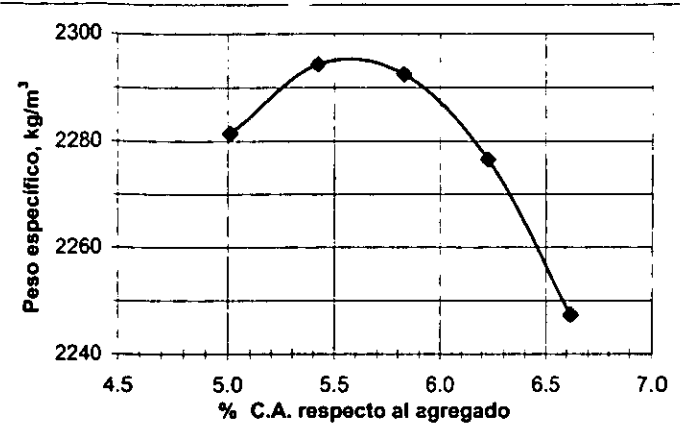


Características	Datos obtenidos	Especificaciones
Contenido óptimo de C.A., en %	6.5	
Peso específico, en kg/m ³	2301	
Vacios, en %	5.04	3 - 5
V.A.M., en %	13.53	14 mín.
Estabilidad, en kg	1789	700 mín.
Flujo, en mm	4.32	2 - 4

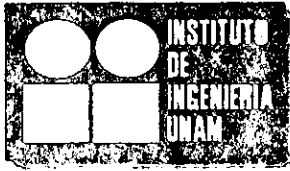


PRUEBAS MARSHALL

Condición 2 (Muestra Tampico)

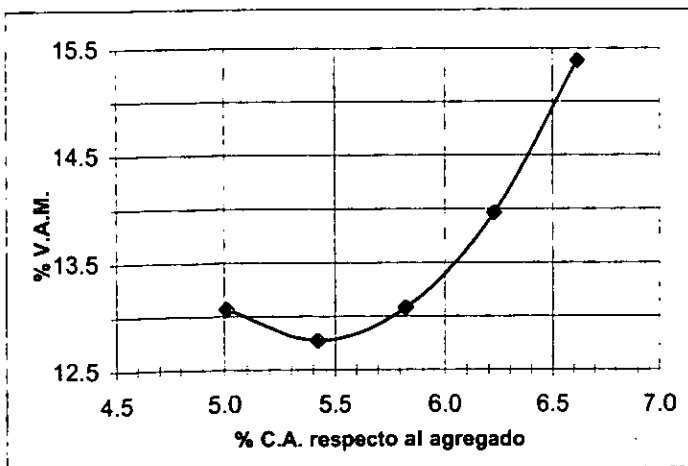
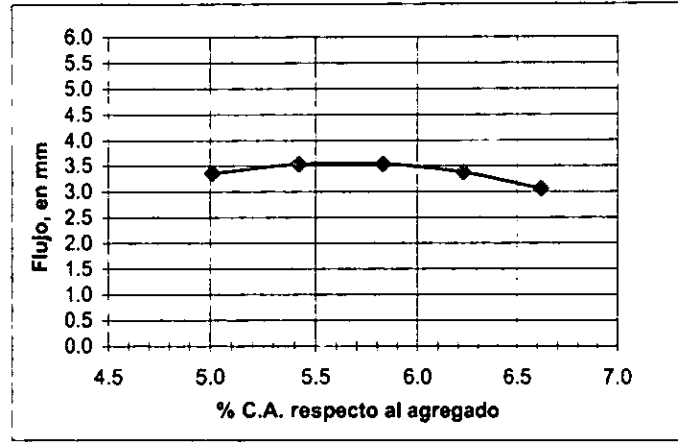
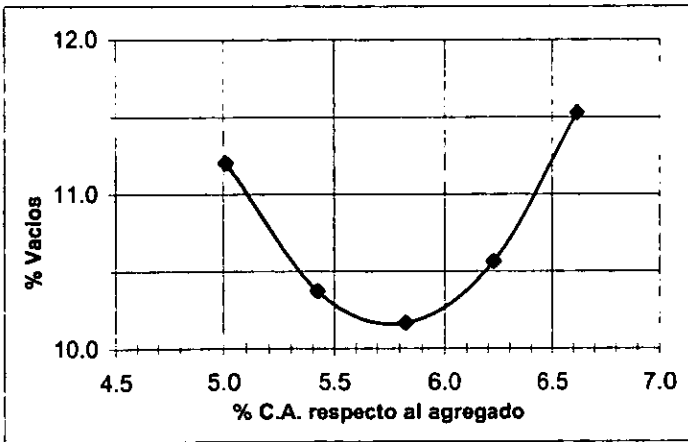
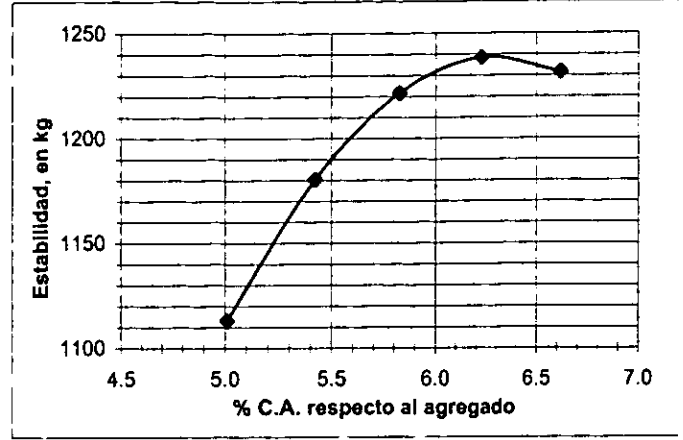
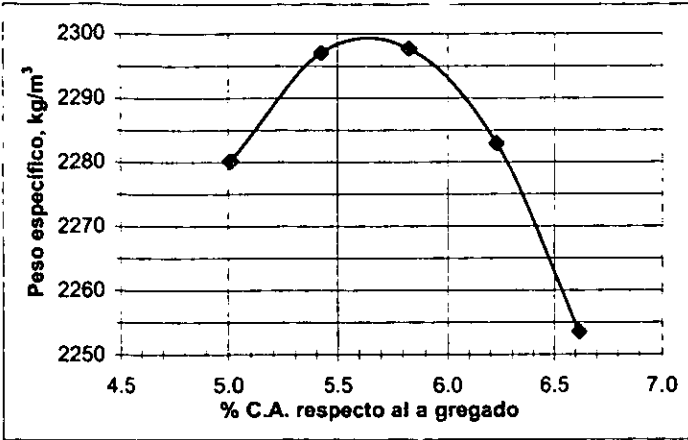


Características	Datos obtenidos	Especificaciones
Contenido óptimo de C.A., en %	5.5	
Peso específico, en kg/m ³	2295	
Vacios, en %	10.42	3 - 5
V.A.M., en %	12.93	14 mín.
Estabilidad, en kg	1233	700 mín.
Flujo, en mm	3.90	2 - 4

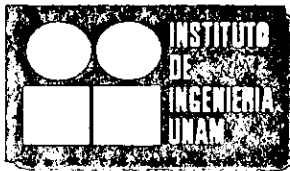


PRUEBAS MARSHALL

Condición 3 (Muestra Tampico + chemcrete)

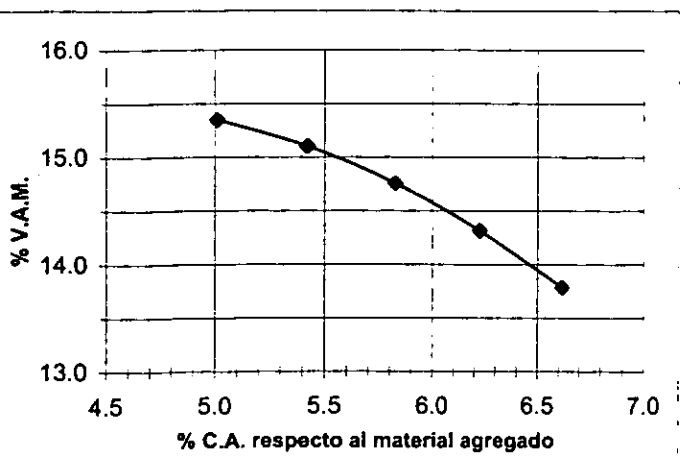
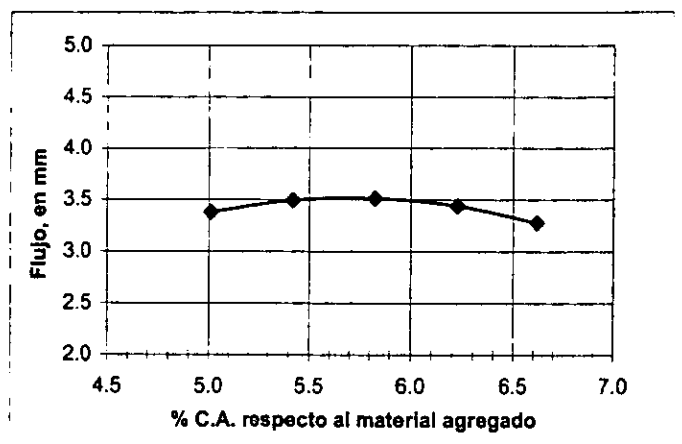
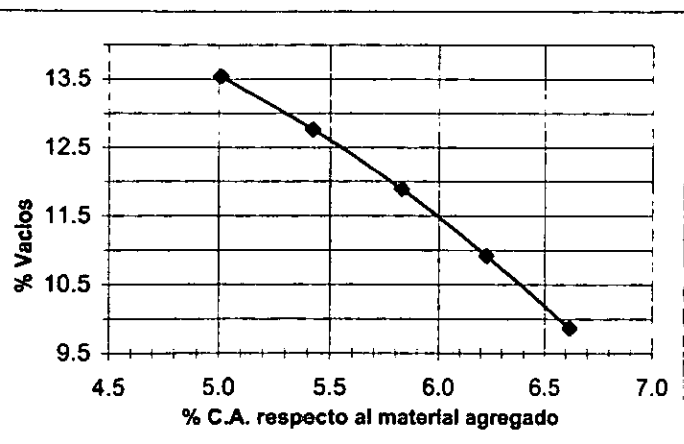
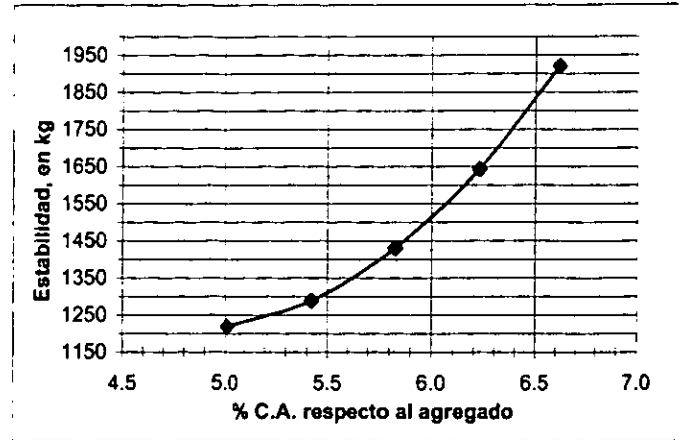
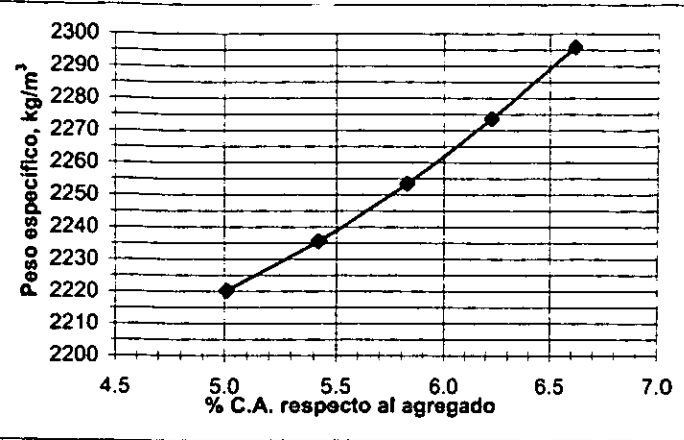


Características	Datos obtenidos	Especificaciones
Contenido óptimo de C.A., en %	5.6	
Peso específico, en kg/m³	2299	
Vacios, en %	10.21	3 - 5
V.A.M., en %	12.84	14 mín.
Estabilidad, en kg	1202	700 mín.
Flujo, en mm	3.55	2 - 4



PRUEBAS MARSHALL

Condición 4 (Muestra Tampico + polímero SBS)



Características	Datos obtenidos	Especificaciones
Contenido óptimo de C.A., en %	6.3	
Peso específico, en kg/m ³	2278	
Vaciós, en %	10.73	3 - 5
V.A.M., en %	14.22	14 min.
Estabilidad, en kg	1690	700 min.
Flujo, en mm	3.28	2 - 4



6.7.5 Determinación del contenido óptimo de asfalto.

El contenido óptimo de la mezcla de pavimento es determinado de las curvas anteriores.

- a) Máxima estabilidad
- b) Máxima unidad de Peso específico
- c) Límite medio del porcentaje de vacíos de aire.

El contenido óptimo de cemento asfáltico es el promedio numérico obtenidos de los puntos anteriores.

Tabla 6.24 Prueba de máxima carga y flujo

Condición 1					
% C.A.	P.E. Kg/m ³	Estabilidad	Flujo	% Vacíos	% V.A.M.
5.50	2221	1189	3.78	8.91	15.72
6.00	2274	1616	3.91	6.53	14.14
6.50	2301	1789	4.32	5.04	13.53
7.00	2302	1706	5.01	4.44	13.88
7.50	2277	1368	5.96	4.72	15.21

Condición 2					
% C.A.	P.E. Kg/m ³	Estabilidad	Flujo	% Vacíos	% V.A.M.
5.01	2281	910	4.94	11.16	13.02
5.42	2294	1205	4.04	10.49	12.89
5.50	2295	1233	3.90	10.42	12.93
5.83	2292	1251	3.46	10.38	13.29
6.23	2277	1061	3.20	10.81	14.21
6.62	2247	646	3.25	11.76	15.60

Condición 3					
% C.A.	P.E. Kg/m ³	Estabilidad	Flujo	% Vacíos	% V.A.M.
5.01	2280	1113	3.36	11.21	13.07
5.42	2297	1180	3.53	10.37	12.77
5.60	2299	1202	3.55	10.21	12.84
5.83	2298	1222	3.53	10.17	13.08
6.23	2283	1238	3.37	10.56	13.96
6.62	2254	1232	3.06	11.53	15.39



Capítulo 6. Resultados



Tabla 6.24 (Continuación) Prueba de máxima carga y flujo.

Condición 4					
% C.A.	P.E Kg/m	Estabilidad	Flujo	% Vacíos	% V.A.M.
5.01	2220	1219	3.38	13.54	15.35
5.42	2236	1289	3.49	12.76	15.10
5.83	2253	1431	3.51	11.89	14.76
6.23	2274	1643	3.44	10.92	14.31
6.30	2278	1690	3.42	10.73	14.22
6.62	2296	1920	3.28	9.87	13.78

Contenido óptimo de C.A. en %

Los valores obtenidos con respecto al contenido óptimo de asfalto serán comparados con los criterios de diseño Marshall tal como se muestra en la parte inferior izquierda de los gráficos Marshall.

Tabla 6.25 Criterios de diseño Marshall.

Método Marshall Criterio de mezcla	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Superficie y base		Superficie y base		Superficie y base	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Compactación, # de golpes por cada lado del espécimen	35		50		75	
Estabilidad, Newtons (lb.)	3336 (750)		5338 (1200)		8006 (1800)	
Flujo, 0.25mm (0.01in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos de aire.	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos de agregado.					14	



De esta manera:

Tabla 6.25 Comparación de datos.

Características	Criterios de		Datos obtenidos			
	Diseño	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	Cond. 4	
Contenido óptimo de cemento asfáltico, (%).		6.5	5.5	5.6	6.3	
Peso específico (Kg/m ³).		2301	2295	2299	2278	
Vacios de aire (%).	3-5	5.04	10.42	10.21	10.73	
Vacios de aire en el material (V.A.M. , %).	14 mín.	13.53	12.93	12.84	14.22	
Estabilidad, (Kg).	700 mín.	1789	1233	1202	1690	
Flujo, (mm).	2-4	4.32	3.90	3.55	3.28	

En la tabla anterior se observa que para la condición 1 como era de esperarse todos los valores obtenidos están dentro de los límites de criterio de diseño ya que se trata de un asfalto de refinería el cual es empleado para pavimento.

En cuanto a las otras tres condiciones, en el porcentaje de vacíos de aire excede al doble de lo que indican los límites de diseño. En el porcentaje de vacíos en el mineral en la condición 4 pasa él límite mínimo pero en las condiciones 2 y 3 no.

En la estabilidad como se puede apreciar en la tabla todas las condiciones superan el límite mínimo del criterio de diseño.

Por lo tanto se tiene un exceso de vacíos y una estabilidad satisfactoria. Generalmente los altos vacíos que generalmente se asocian a una alta permeabilidad, que permite la circulación de aire y agua conduciendo al endurecimiento prematuro del asfalto. Aún cuando la estabilidad es satisfactoria, deberá hacerse un ajuste para reducir los vacíos. Esto generalmente se puede cumplir incrementando el contenido de agregados finos. Además, no hay mucha variación en los valores obtenidos en la estabilidad, vacíos de aire y en el material, cuando es empleada únicamente la muestra, a cuando se le agregan los aditivos (polímero SBS y chemkrete), que en costo significa un ahorro en la adquisición de los aditivos.



Capítulo 7: Conclusiones





7. CONCLUSIONES

Basándose en el objetivo planteado en este trabajo, que es principalmente la posibilidad de emplear residuos con hidrocarburos en una aplicación que proporcione un beneficio, se aplicó una alternativa de uso que es pavimento asfáltico, realizada por dos vías:

1. Emulsión asfáltica
2. Mezcla asfáltica

1. Emulsión asfáltica

Para la emulsión asfáltica se puede decir que es muy importante tomar en cuenta los siguientes aspectos para su elaboración:

- ✗ El equipo(velocidad de agitación y corte).
- ✗ Selección del emulsificante(sal cuaternaria de amonio).
- ✗ Concentración y pH del emulsificante.
- ✗ Aplicar normas ASTM D244 para la calidad de las emulsiones.

En este trabajo no sólo los factores anteriores fueron de importancia ya que se estuvo trabajando con residuos de hidrocarburos con diferentes consistencias y la primera conclusión que se puede mencionar es:

- ☞ No todos los residuos de hidrocarburos se pueden emplear en este tipo de aplicación, debido a que aunque sea posible que todos se obtengan de refinерías, no todos tendrán la misma consistencia y para que se pueda aplicar para pavimento asfáltico es necesario realizar un análisis cromatográfico y verificar que esta muestra de residuos tenga contenido asfáltico.

De acuerdo al perfil cromatográfico de las muestras con las que se trabajó, algunas de ellas no presentaron contenido asfáltico como las provenientes de las refinерías; 18 de Marzo en Azcapotzalco, Miguel Hidalgo en Tula, Hidalgo y la terminal marítima de



Pajaritos, Veracruz; más bien su perfil es semejante al del Diesel por lo tanto por estas circunstancias, aunque sí se obtuvo una emulsión, no fue la correcta para su aplicación en pavimentos. Por otra parte se realizaron tres pruebas que confirmaron que no serviría para pavimentos estas fueron: residuo por evaporación, por destilación y destilación de asfaltos rebajados.

Las emulsiones que se obtuvieron empleando estas muestras sin contenido de asfalto se prepararon con un equipo de agitación a bajas revoluciones (120 RPM) con un tiempo de operación de 2 horas, sin embargo cuando se quiso realizar la prueba de emulsión con una muestra que sí contenía asfalto (muestra de la refinería Francisco I. Madero ubicada en Ciudad Medero en Tamaulipas), no se pudo realizar debido a las siguientes factores:

- ✎ El equipo no fue el adecuado, ya que no se cuenta con los condiciones de velocidad y corte.
- ✎ La muestra de residuo contiene un 63.99 % de arena, obtenido de una prueba de incineración, lo cual implica la necesidad de separarla, lo que hace económicamente inadecuada su aplicación.

Aún así se probó con un equipo que no fue molino coloidal con una agitación de 1200 RPM, pero el corte adecuado no se tuvo y el resultado fue el mismo.

Por otra parte, el empleo de un molino coloidal también conlleva a que la aplicación sea económicamente inoperante.

2. Mezcla Asfáltica.

Otro de los objetivos fue emplear el método de diseño de mezclas asfálticas para aplicar en pavimento.

El contenido de arena en la muestra de hidrocarburo presentó una ventaja en el diseño de mezclas ya que se consideró como parte del agregado con el que se realizó la mezcla, y por tanto no requirió la separación de la arena.



Aquí se aplicaron diversas normas de ASTM en especial la del método Marshall D 1559 que es la prueba a mezclas compactadas para determinar su estabilidad, flujo y vacíos de aire.

Para mejorar la calidad de la muestra de hidrocarburos se agregaron 2 aditivos por separado; endurecedor (chemcreate) y polímero (SBS) los cuales ayudarán a fortalecer la adherencia a los agregados con las propiedades de adhesividad del ligante y así disminuir la susceptibilidad térmica.

De esta forma las muestras probadas fueron (tabla 6.24)

- 1.- Asfalto AC-20
2. Residuo de hidrocarburo
3. Residuo de hidrocarburo con endurecedor
4. Residuo de hidrocarburo con SBS

Los resultados indican lo siguiente:

La primera condición es totalmente aceptable ya que se trata de un asfalto de destilación y son aceptados de acuerdo a los criterios de diseño del ASTM.

En cuanto a las otras tres condiciones, el porcentaje de vacíos en el mineral (V.A.M.) se encuentra dentro del criterio de diseño en la cuarta condición únicamente; sin embargo para las otras tres condiciones los valores no están muy por debajo del criterio establecido.

Por otro lado, el porcentaje de vacíos de aire ninguna de las tres condiciones cumple con el intervalo de criterio de diseño.

Para la prueba de estabilidad, todas las condiciones satisfacen completamente el criterio de diseño.



De lo anterior se concluye que es factible el uso de las condiciones 2,3 y 4 corrigiendo los altos vacíos mediante adición de agregados finos y se aplicaría la condición dos que resulta la más económica, pues no requiere aditivos.

Se propone que esta mezcla asfáltica puede aplicarse en el pavimento como sub-base en el pavimento asfáltico.

Para verificar que no exista riesgo de contaminación por la utilización del residuo como mezcla asfáltica, se realizó una prueba de lixiviación, la cual fue analizada de acuerdo con el método analítico de la EPA (Environmental Protection Agency) en el laboratorio del Instituto de Ingeniería, al producto de la lixiviación se le efectuaron análisis en un laboratorio de análisis químico como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) con el método 8100 de la EPA e hidrocarburos totales del petróleo (TPH's) con el método 418.1 de EPA. Los resultados indican que no existe presencia de ninguno de estos compuestos por lo que no existe riesgo de contaminación al subsuelo por el empleo de la mezcla asfáltica probada.



Bibliografía





Bibliografía

1. UNAM. Programa Universitario de Energía. Recuperación secundaria y mejorada de hidrocarburos. México D.F. 1987
2. Keith Bhoddinott. Superfound Risk Assessment in Soil Contamination Studies.
3. Octavio Rivero Serrano, Margarita Garfías V., Simón Gonzalez Martinez. Residuos Peligrosos. UNAM, Programa Universitario del Medio Ambiente, 1992.
4. SEDESOL. Series monográficas No. 3. Residuos Peligrosos en el Mundo y en México.
5. Shaw, Duncan J. Introduction to colloid and surface chemistry. London: Butterworths, 1996. 186p
6. Gustavo Rivera E., Emulsiones Asfálticas, Representaciones y servicios de ingeniería, México 1977.
7. Kenneth J. Lissant., Emulsion and Emulsion Technology. Edit. Macel Dekker Inc. N.Y. 1989.
8. Toral Ma. Teresa, Fisicoquímica de superficies y sistemas dispersos, Ediciones Urmo, Bilbao, 1973.
9. Raymond e kirk and Donald T. Othmer, Encyclopedia of chemical tecnology V.8 J. Wiley, New York, 1994.
10. Maron, Samuel H., Prutton, carl F. Fundamentos de fisicoquímica, Edit. Limusa, México 1992.
11. Madrigal Monárrez, Ismael. Alternativas de tratamiento para la rehabilitación de sitios contaminados con hidrocarburos en México. UNAM, 1998.
12. Miyasako, E. Residuos Peligrosos. Memorias 1er. Reunión anual del Puma. Vol. 1, México, UNAM, 1992.
13. Instituto Nacional de Ecología. Dirección de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas.
14. Liroy P. J. The total human exposure to contaminants: a multidisciplinary approach. Environ. Sci. Technol. Num. 24, 1990.
15. Instituto Nacional de Ecología. Programa para la minimización y manejo integral de los residuos industriales peligrosos 1996 – 2000.
16. Carmona L. M. C. Los problemas ambientales y la legislación ambiental y ecológica en México. México, IIJ, UNAM, 1993.



17. Rudolf Heusch. Emulsions. Bayer, AG. Leverkusen, Germany.
18. Terrazas, N. Armando. Las Emulsiones Asfálticas Catiónicas. Caminos y Puentes Federales de Ingresos. México, 1963.
19. J., Rogers Martin, Hugh A. W. Pavimentos Asfálticos. Proyecto y construcción. 1963.
20. Harold W. Muncy. Asphalt Emulsions. Philadelphia, Pennsylvania, ASTM 1990.
21. Ponciano Gudalupe, Moreno Roberto, et al. Situación Actual en México. UNAM, Programa Universitario del Medio Ambiente, 1992.
22. Se Combate la Mala Herencia Petrolera. Vistazo. <http://www.vistazo.com.ec/ene09-97/htm/dinero1.htm>
23. Velázquez, Manuel, Asfáltos, Madrid: dossat, 1961.
24. Saneamiento de Sitios Contaminados. <http://www.ine.gob.mx/gacetas/gacetas36/g9536591.htm>
25. Normas para manejo y disposición de residuos peligrosos. <http://www.ine.gob.mx>
26. El sector industrial y la generación de residuos. [Http://www.ine-gob-mx/programas/prog-rip/cap-1.htm](http://www.ine-gob-mx/programas/prog-rip/cap-1.htm)
27. El manejo actual de los residuos: contaminantes y consecuencias. <http://www.ine.gob.mx/programas/prog-rip/cap-2.htm>
28. INE, Programa de normalización ambiental industrial 1997-2000, México, 1997.
29. Suelo. CEPLA- Centro de Producción Limpia. Ofertas Tecnológicas Medioambientales Canadienses. <http://www.Customw.com/ecoweb/notas/re6/cepla/suelo.htm>
30. Agenda Ambiental. <http://www.ine.gob.mx/gacetas/gaceta36/g95366381.htm>
31. Speciality Emulsions. <http://www.bei-emulsions.com/spec-2.htm>
32. The HLB System. <http://www.ici.com/>
33. Taiwan Surfactant. <http://www.taiwnsurfactant.com.tw/tscationic2.htm>
34. Emulsiones. <http://www.cfe.gob.mx/conexión/emulsi.htm>
35. Se combate la mala herencia petrolera. http://www4.vistazo.com.ec/ene09_97/htm/dinero1.htm



36. Emulsiones. <http://members.tripod.com/~fotografia/textos/equipos.htm>
37. The Asphalt institute. A basic asphalt emulsion manual. Manual series No. 19, March, 1979.
38. Incidencia de los agregados. <http://www.geotecnico.com/2agregad.htm>
39. Diseño de mezclas asfálticas en caliente. Nuevas tendencias. <http://www.geotecnico.com/4disasph.htm>
40. Incidencia de los agregados en el comportamiento de las carpetas asfálticas. <http://www.geotecnico.com/suelos/2agregad.htm>
41. Detergent Chemistry: Surfactants. <http://www.chemistry.co.nz/surfactants.htm>
42. Surfactants. <http://hmc.edu/~cacheng/surfaces/mech.html>
43. Recuperación Asistida de Petróleo. <http://members.tripod.com/fotografia/textos/recuperacion.htm>
44. Emulsionantes. <http://milksci.unizar.es/adit/emul.html>
45. ASTM Designation: D 8-94. Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavement.
46. ASTM Designation: D 5-95. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials.
47. ASTM Designation: D-2974. Contenido de material Orgánico por calcinación.
48. ASTM Designation: D 2726-96. Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures.
49. ASTM Designation: D 1559-89. Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus.
50. ASTM Designation: C 127-88. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate.
51. ASTM Designation: C 128-93. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate.
52. ASTM Designation: D 70-82. Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Bituminous Materials.
53. ASTM Designation: D 4469-92. Standard Test Method for Calculating Percent Asphalt Absorption by the Aggregate in an Asphalt Pavement Mixture.
54. ASTM Designation: D 20-91. Standard Test Method for Distillation of Road Tras.



55. ASTM Designation: D 244-95. Standard Test Methods for Emulsified Asphalts.
56. ASTM Designation: D204-95. Standard test Method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures.