



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA AL DAÑO INDUCIDO
POR HUMEDAD DE DIFERENTES MEZCLAS
ASFÁLTICAS COMPACTADAS**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Presenta:

CLAUDIA AGUILAR TAPIA

Director de Tesis

DR. JORGE ALARCÓN IBARRA



Abril 2011

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA AL DAÑO INDUCIDO
POR HUMEDAD DE DIFERENTES MEZCLAS
ASFÁLTICAS COMPACTADAS**

ÍNDICE

CAPÍTULO	PÁGINA
INTRODUCCIÓN	
Capítulo I Pavimentos Flexibles	9
1.1 Definición de pavimento	9
1.2 Descripción de las capas de un pavimento	10
Capítulo II Mezclas Asfálticas	12
2.1 Definición de mezcla asfáltica	12
2.2 Tipos de mezclas asfálticas	13
2.2.1 Tipos de mezclas de acuerdo a la proporción de vacíos	13
2.2.2 Tipos de mezclas según el procedimiento de mezclado	13
2.2.2.1 Mezclas asfálticas en caliente	13
2.2.2.2 Mezclas asfálticas en frío	15
2.2.2.3 Mezclas asfálticas tibias (WMA)	16
2.2.2.4 Mezclas asfálticas por el sistema de riegos	17
2.3 Protocolo de Diseño AMAAC PA-MA-01/2008	18
2.3.1 Contenido	18
2.3.2 Definiciones	19
2.3.3 Criterios de selección del nivel de diseño requerido	22
2.3.4 Selección de los agregados pétreos	23
2.3.5 Selección del cemento asfáltico	28
2.3.6 Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad	28
2.3.7 Susceptibilidad de la mezcla asfáltica al daño inducido por humedad	30
2.3.8 Susceptibilidad a la deformación permanente	31
2.3.9 Módulo dinámico	32

2.3.10	Fatiga	32
2.3.11	Condiciones necesarias para la elaboración y construcción de mezclas asfálticas	33
2.3.12	Control de calidad	35
2.4	Resistencia de las mezclas asfálticas compactas al daño inducido por humedad mediante la Recomendación AMAAC RA-04/2008	38
Capítulo III Agregados Pétreos		47
3.1	Clasificación de las rocas	47
3.2	Definición de agregado pétreo	48
3.3	Tipos de agregados pétreos	48
3.4	Propiedades de los agregados pétreos	49
Capítulo IV Asfalto		52
4.1	Definición	52
4.2	Clasificación del asfalto	52
4.3	Tipos de materiales asfálticos	53
4.3.1	Cementos asfálticos	53
4.3.2	Emulsiones asfálticas	59
4.3.3	Asfaltos rebajados	60
Capítulo V Pruebas de Laboratorio y Resultados		61
5.1	Resultados de las pruebas efectuadas a los Agregados Pétreos	61
5.1.1	Prueba de Granulometría	62
5.1.2	Prueba de Densidad y Absorción	67
5.1.3	Prueba de Equivalente de arena	68
5.1.3	Prueba de Desgaste de los Ángeles	70
5.1.4	Prueba de Caras fracturadas	71
5.1.5	Prueba de Partículas Alargadas y Lajeadas	72
5.2	Pruebas en el Asfalto	75
5.2.1	Prueba de Penetración	75

5.2.2	Prueba de Ductilidad	75
5.2.3	Prueba de Punto de Reblandecimiento	76
Capítulo VI Diseño Volumétrico		78
6.1	Granulometría de Pastillas	78
6.2	Prueba de Densidad Rice	80
6.3	Prueba de Volumetría	82
Capítulo VII Pruebas mediante la recomendación RA-04/2008 (TSR)		86
7.1	Procedimiento de la elaboración de las pastillas	86
7.2	Resultados de las pruebas mediante la recomendación RA-04/2008 (TSR)	91
 ANÁLISIS DE RESULTADOS		 97
CONCLUSIONES		99
BIBLIOGRAFÍA		101

INTRODUCCIÓN

Michoacán se ubica hoy en día como el estado con crecimiento económico más estable del país, de acuerdo con el estudio Perspectivas Económicas realizado por el Tecnológico de Monterrey en el segundo semestre del 2010 y basado en datos publicados por el Instituto Mexicano para la Competitividad, Michoacán fue el segundo estado con mayor inversión en obra pública. La principal actividad económica de Morelia son los servicios, entre los que destacan los financieros, inmobiliarios y turísticos, seguidos por la industria de la construcción, la industria manufacturera y en último término las actividades del sector primario.

Como podemos ver las carreteras y vialidades juegan un papel muy importante en este desarrollo, es por ello que para este 2011 los tres niveles de gobierno aprobaron una inversión superior a los 2,686 mdp en el rubro carretero en el estado, así Michoacán será uno de los estados con mayor inversión en materia de desarrollo y con estos proyectos se pretende un crecimiento en materia de turismo, así como exportación e importación de productos para una mejora económica y de las condiciones de vida de la población en Michoacán.

Estos proyectos generarán un ahorro en los tiempos de viaje tanto de la población en general como de productos y mercancías que se mueven a través de la infraestructura carretera.

Por otra parte debido al gran crecimiento de la ciudad de Morelia, ésta ha rebasado sus límites originales y absorbido diversas localidades contiguas, formándose así una conurbación, lo que ha generado la necesidad de construir un gran número de nuevos libramientos, avenidas y calles para disminuir los tiempos y facilitar el traslado de la población. Esto se ha logrado mediante el uso y colocación de pavimentos asfálticos los cuales han venido presentando una serie de problemas graves como son los agrietamientos y baches, que aparecen al poco tiempo de su colocación y que generan riesgos y costos para los ciudadanos cuyos automóviles sufren averías.

Enfocándonos en Morelia como consecuencia de las precipitaciones, propias del temporal de lluvias y por diversos fenómenos meteorológicos, se incrementaron los baches y agrietamientos de pavimentos en múltiples vialidades de la capital michoacana, y es tan predecible que se presente este problema que incluso el Secretario de Obras Públicas del Ayuntamiento, indicó que durante todo el año la dependencia a su cargo realiza labores de bacheo con un presupuesto de catorce millones de pesos, pero siempre en temporal de lluvias las labores se duplican por la mayor apertura de pozos en las vialidades, provocando

que incluso tramos que han sido reasfaltados en no más de 2 meses presenten nuevamente este problema y necesiten reparación, pero, al llegar la temporada de lluvias el pavimento vuelve a sufrir desprendimiento ocasionando los baches contrastando fuertemente con el periodo de vida útil que debería tener un pavimento de estas características.

Lo que deja ver la mala calidad en los trabajos y en los materiales que se utilizan provocando molestias entre los habitantes, es por ello que se tuvo que crear un seguro de responsabilidad patrimonial que sirve a los ciudadanos para resarcirles los daños

provocados por obras mal ejecutadas en el municipio, en particular, respecto a los baches que atañen a toda la ciudad con un costo de 150 mil pesos anuales.

Esto refleja que el problema que tenemos en Morelia con los baches es tan grave que se tienen que crear programas para las reparaciones constantes de los pavimentos flexibles y de los problemas que estos ocasionan, lo que opaca los nuevos proyectos que se planean en el estado pues sin duda no serán la excepción de esta problemática, debido a que el daño que ocasiona el agua en nuestros pavimentos no se ha podido erradicar, además de que no es el único problema que se tiene.

Básicamente en Morelia se utilizan dos tipos de materiales para la construcción de carreteras, el Tezontle que es escoria volcánica de tipo extrusiva en el cual se pueden tener partículas solidas pero también muy porosas en colores que varían de rojo intenso a casi negro y el Triturado que también es de origen volcánico pero de tipo intrusivo y nos da partículas más sólidas y menos porosas. Es por ello que desde hace tiempo se ha ido dejando de lado el uso del Tezontle en la construcción y reemplazando por los Triturados por que se cree que son materiales más resistentes, sin embargo estos bancos de material tienen problemas de contaminación, es más caro que el Tezontle pues este es cribado y el otro triturado, y además también se tienen problemas de desprendimiento en las carpetas con la presencia de humedad. Por eso se decidió analizar los dos tipos de material para conocer el comportamiento de cada uno y el daño que les provoca el efecto de la humedad, pues sabemos que la calidad de las mezclas depende de la calidad de cada uno de los materiales que las conforman.

Debido a toda la serie de problemas y deficiencias que se han venido presentando y ante la imperiosa necesidad de modernizar integralmente la tecnología y la práctica así como los productos asfálticos que se emplean en obras de infraestructura del transporte en México, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y los Institutos Mexicanos del Petróleo y del Transporte exploraron la posibilidad de integrar un Círculo Tecnológico sobre Asfaltos que contribuyera a fortalecer la competitividad de las empresas mexicanas proveedoras y usuarias de este producto, sobre todo en lo referente a sus aplicaciones en el campo de la infraestructura del transporte.

Este Círculo Tecnológico del Asfalto debía estar representado por instituciones del sector oficial (SCT, PEMEX, IMP, IMT, ASA, CAPUFE, GDF, Gobiernos Estatales y Municipales) y por empresas privadas dedicadas al diseño, construcción y conservación de la infraestructura del transporte, a la operación y conservación de las vialidades y a la producción de aditivos y emulsificantes, así como instituciones educativas y personas físicas especialistas en la materia, para formar una sociedad civil. En una primera asamblea,

nace una comisión para crear la Asociación Mexicana del Asfalto, el 4 de Julio de 1997, y el 7 de agosto del mismo año quedó constituido e integrado el Primer Consejo Directivo.

AMAAC (Asociación Mexicana del Asfalto A.C.) es una agrupación profesional de carácter técnico y científico, y que fue creada principalmente para realizar investigaciones, desarrollo tecnológico, asesoría y capacitación técnica en materia de asfaltos con la finalidad de mejorar la calidad y vida útil de las mezclas asfálticas.

Los objetivos de la AMAAC son:

- Aumentar el uso de los asfaltos
- Mejorar el desarrollo tecnológico en la fabricación y aplicación de los asfaltos
- Apoyar la creación de otras organizaciones relacionadas con el asfalto
- Apoyo en la actualización de normas existentes IMT, NOM, NMX, SCT
- Capacitación mediante conferencias, seminarios, cursos, elaboración de manuales sobre aplicación, fabricación y nuevas tecnologías.

AMAAC desde hace tiempo trabaja en un protocolo donde se indica una serie de pruebas con equipos sofisticados que promueven nuevas técnicas para que los diseños de mezclas asfálticas cumplan con las especificaciones de calidad que requieren los caminos y así mejorar los procedimientos de diseño y construcción. Con el objetivo último de lograr mejores desempeños de estas estructuras que permitan una optimización de los costos de mantenimiento y rehabilitación asociados y, sobre todo, de los costos de operación de los usuarios.

El protocolo AMAAC PA-MA-01/2008 establece cuatro diferentes niveles de diseño para una mezcla asfáltica densa en función de la importancia de la carretera, determinada por el nivel de tránsito esperado en el carril de diseño.

Menciona que para su utilización en pavimentos carreteros, la mezcla asfáltica de alto desempeño debe ser resistente a las deformaciones plásticas, al fenómeno de fatiga y al daño por humedad, superando en comportamiento a las mezclas asfálticas convencionales.

En particular este trabajo se refiere únicamente al estudio de la Resistencia de las Mezclas Asfálticas Compactadas al daño Inducido por Humedad y es la Recomendación AMAAC RA -04/2008, para el cual se analizaron 2 tipos de materiales pétreos de los más utilizados en la colocación de carpetas en la región de Morelia.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar la resistencia al daño inducido por humedad de diferentes mezclas asfálticas compactadas, elaboradas con materiales pétreos utilizados en la región de Morelia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- **Definir y caracterizar los materiales pétreos a emplear**

Se utilizarán materiales cribados y triturados de origen volcánico de la región de Morelia, los cuales se caracterizarán con las pruebas tradicionales para conocer sus propiedades mecánicas.

- **Definir y caracterizar el asfalto a utilizar**

Se utilizará para este estudio un asfalto tipo AC-20, realizando la caracterización por medio de pruebas convencionales.

- **Realizar el diseño volumétrico**

Para llevar a cabo el diseño volumétrico de las mezclas a estudiar se realizarán las pruebas de Densidad Rice y volumetría.

- **Llevar a cabo las Pruebas mediante la Recomendación RA-04/2008 (TSR)**

Por último se realizarán las pruebas de susceptibilidad a la humedad mediante la recomendación RA-04/2008 (TSR).

CAPÍTULO I

PAVIMENTOS FLEXIBLES

1.1 DEFINICIÓN DE PAVIMENTO

El pavimento es la superficie de rodamiento para los distintos tipos de vehículos, y es un término general aplicado a cualquier pavimento cuya superficie esté construida con asfalto. Formado por el agrupamiento de capas de distintos materiales como son una carpeta de rodamiento de agregados minerales recubiertos y sementados con asfaltos; y una ó más bases ó sub-bases, destinados a distribuir y transmitir las cargas aplicadas por el tránsito al cuerpo de terraplén, como se muestra en la figura 1.1.

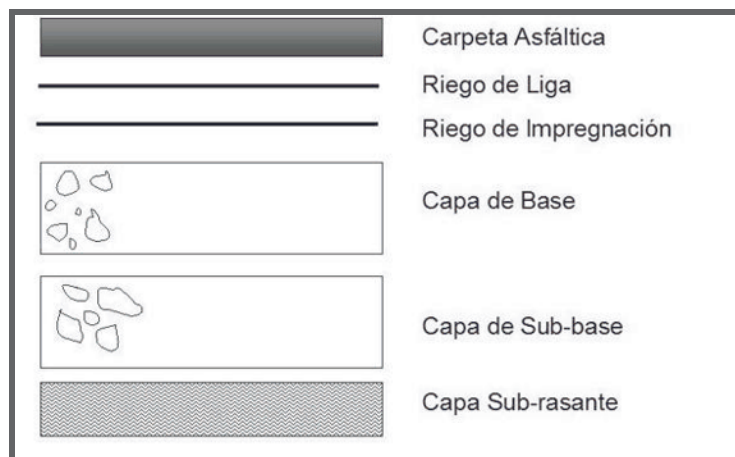


Figura 1.1 Capas que conforman la estructura de un pavimento flexible

1.2 DESCRIPCIÓN DE LAS CAPAS DE UN PAVIMENTO

Un pavimento está formado por diversas capas de mejor calidad y mayor costo cuanto más cercanas se encuentran a la superficie de rodamiento; esto es, principalmente por la mayor intensidad de los esfuerzos que les son transmitidos.

Terracería.

Se llama terracería al conjunto de obras compuestas de cortes y terraplenes, formadas principalmente por la sub-rasante, sub-yacente y el cuerpo del terraplén, constituida generalmente por materiales no seleccionados y se dice que es la subestructura del pavimento.

La sub rasante finalmente soportará todas las cargas del tránsito. En consecuencia la función estructural de un pavimento es soportar la carga de los ejes sobre la superficie y transferir y distribuir la carga a la sub-rasante sin exceder ya sea, la resistencia de la sub rasante, ó la resistencia interna del pavimento en sí mismo.

Capa de Sub-base

La capa de sub-base es la porción de la estructura de pavimento flexible entre la subrasante y la capa de base. La sub-base comúnmente consta de una capa compactada de material granular, ya sea tratada o no tratada, o una capa de suelo tratada con una mezcla conveniente. Además de su posición en el pavimento comúnmente se distingue del material de la capa de base por requerimientos menos estrictos de la especificación para resistencia, tipos de agregados y granulometría. La capa de sub-base se usa en general para aumentar, de una manera económica, la resistencia del pavimento arriba de la provista por los suelos de la sub-rasante, sin embargo, la sub-base puede omitirse, si la estructura requerida de pavimento es relativamente delgada o si los suelos de la sub-rasante son de alta calidad.

Capa de Base

La capa de base es la porción de la estructura de pavimento flexible inmediatamente debajo de la capa superficial. Se construye sobre la capa de sub-base o si esta no se usa, directamente sobre la sub-rasante. Su principal función es como una porción estructural del pavimento y también debe drenar el agua que se introduzca a través de la carpeta o por los acotamientos del pavimento, así como impedir la ascensión capilar. La base comúnmente consta de agregados como piedra triturada, escoria triturada o grava triturada o sin triturar y arena, o la combinación de estos materiales. En general, las especificaciones para materiales de la capa base son considerablemente más estrictas que las de los materiales de sub-base en los requerimientos para resistencia, estabilidad, dureza, tipos de agregados y granulometría.

Riego de impregnación

Es la aplicación de un asfalto rebajado o emulsión asfáltica a la superficie de la base, con objeto de impermeabilizarla y para proporcionar un elemento de liga entre la carpeta y la base.

Riego de liga

Consiste en la aplicación de un material asfáltico sobre una capa de pavimento, con objeto de lograr una buena adherencia con otra capa de mezcla asfáltica que se construya encima.

Carpeta Asfáltica

Enfocándonos en la carpeta asfáltica sabemos que es la parte superior de un pavimento flexible que consiste en una capa de material pétreo cementado con asfalto que se coloca sobre la base. El contenido óptimo de asfalto para una carpeta, es la cantidad de asfalto que se necesita para formar alrededor de la partícula una membrana con un espesor suficiente para resistir los elementos del intemperismo, para que el asfalto no se oxide.

Las funciones de la carpeta asfáltica son las siguientes:

- Proporcionar una superficie de rodamiento que permita un tránsito rápido, cómodo y seguro para los vehículos.
- Impedir la infiltración de agua de lluvia hacia las capas inferiores.
- Resistir la acción de los vehículos.

El pavimento flexible debe proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, resistente a la acción del tránsito, al intemperismo tomando en cuenta que los factores climáticos influyen de gran manera en la vida de un pavimento y a otros agentes perjudiciales, así como transmitir a las terracerías los esfuerzos por las cargas del tránsito. Debe poseer la resistencia apropiada y las características mecánicas convenientes para soportar las cargas impuestas por el tránsito sin falla y con deformaciones que no sean permanentes y que garanticen un tráfico en buenas condiciones.

El estudio de este documento se centra en el daño causado por la humedad en las mezclas asfálticas que se manifiesta en la forma de deterioros causados por la humedad como son los baches.

CAPÍTULO II

MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales entre otros y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico al cuerpo del pavimento para que sean soportadas por este.

2.1 DEFINICIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA

La mezcla asfáltica es un material compuesto, formado por la conjunción de agregados pétreos y un cemento asfáltico, eventualmente con aditivos, cuyas propiedades mecánicas de resistencia, deformación y permeabilidad, estarán condicionadas a su vez por las propiedades particulares de cada componente en la mezcla.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

2.2 TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

De acuerdo a la proporción de vacíos se pueden clasificar de la siguiente forma

2.2.1 Tipos de mezclas de acuerdo a la proporción de vacíos.

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas Cerradas o Densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20 %.

Las mezclas densas se obtienen con el uso de agregados con buena granulometría; el agregado fino llena los huecos que deja la estructura del agregado grueso, el polvo mineral tiende a estabilizar el asfalto y el cemento liga entre sí a las partículas de agregado e impermeabiliza el pavimento. Los espacios de aire permiten la expansión del cemento asfáltico o la compactación del compuesto.

2.2.2 Tipos de mezclas según el procedimiento de mezclado

2.2.2.1 Mezclas Asfálticas en Caliente

Son las elaboradas en caliente, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos, se fabrican a temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos todo esto se realiza en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla.

La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente. Las mezclas asfálticas en caliente se clasifican a su vez en:

- Mezcla asfáltica de granulometría densa

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre treinta y siete punto cinco (37,5) milímetros ($1\frac{1}{2}$ in) y nueve punto cinco (9,5) milímetros ($\frac{3}{8}$ in). Normalmente se utilizan en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos, en los que se requiere una alta resistencia estructural o en renivelaciones y refuerzos de pavimentos existentes.

Requisitos de calidad de materiales pétreos para carpetas asfálticas de granulometría densa

De acuerdo con la SCT el material pétreo que se utilice en la elaboración de carpetas asfálticas de granulometría densa, con mezcla en caliente o en frío, en función de su tamaño nominal y del tránsito esperado en termino del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento (ΣL), cumplirá con lo siguiente:

- Cuando el tránsito esperado (ΣL) sea igual a (1) millón de ejes equivalentes o menor, el material pétreo, según su tamaño nominal cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la Tabla 2.1 así como con los requisitos de calidad de la Tabla 2.2 que marca la norma.

Tabla 2.1 Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L \leq 10^6$)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación	12.5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37.5 (1 1/2)	50 (2)
Porcentaje que pasa						
50	2"	----	----	----	----	100
37.5	1 1/2"	----	----	----	100	90-100
25	1"	----	----	100	90-100	76-90
19	3/4"	----	100	90-100	79-92	66-83
12.5	1/2"	100	90-100	76-89	64-81	53-74
9.5	3/8"	90-100	79-92	67-82	56-75	47-68
6.35	1/4"	76-89	66-81	56-71	47-65	39-59
4.75	Nº 4	68-82	59-74	50-64	42-58	35-53
2.00	Nº 10	48-64	41-55	36-46	30-42	26-38
0.850	Nº 20	33-49	28-42	25-35	21-31	19-28
0.425	Nº 40	23-37	20-32	18-27	15-24	13-21
0.250	Nº 60	17-29	15-25	13-21	11-19	9-16
0.150	Nº 100	12-21	11-18	9-16	8-14	6-12
0.075	Nº 200	7-10	6-9	5-8	4-7	3-6

Tabla 2.2 Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L \leq 10^6$)

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

- **Mezcla asfáltica de granulometría abierta**

Es la mezcla en caliente, uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal entre doce punto cinco (12,5) milímetros ($\frac{1}{2}$ in) y seis punto tres (6,3) milímetros ($\frac{1}{4}$ in). Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, no tienen función estructural y generalmente se construyen sobre una carpeta de granulometría densa, con la finalidad principal de satisfacer los requerimientos de calidad de rodamiento del tránsito, al permitir que el agua de lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, ocupando los vacíos de la carpeta, con lo que se incrementa la fricción de las llantas con la superficie de rodadura, se minimiza el acuaplaneo, se reduce la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos adyacentes y se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal. Las mezclas asfálticas de granulometría abierta no deben colocarse en zonas susceptibles al congelamiento ni donde la precipitación sea menor de seiscientos (600) milímetros por año.

- **Mezcla asfáltica de granulometría discontinua, tipo SMA**

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría discontinua, con tamaño nominal entre diecinueve punto cero (19,0) milímetros ($\frac{3}{4}$ in) y nueve punto cinco (9,5) milímetros ($\frac{3}{8}$ in). Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, aunque también pueden utilizarse en capas inferiores en carreteras de alto tránsito. Cuando son usadas como capas de rodadura su finalidad principal es mejorar las condiciones de circulación de los vehículos respecto a una carpeta asfáltica convencional.

Al tener una elevada macro textura se evita que el agua de lluvia forme una película continua sobre la superficie del pavimento, con lo que se incrementa la fricción de las llantas; se minimiza el acuaplaneo; se reduce la cantidad de agua que se proyecta sobre los vehículos adyacentes; se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal y se reduce el ruido hacia el entorno por la fricción entre las llantas y la superficie de rodadura.

2.2.2.2 Mezclas Asfálticas en Frío

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

Se elaboran en una planta mezcladora móvil y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

Según su función y su composición granulométrica, las carpetas asfálticas con mezcla en frío pueden ser:

- **Mezcla asfáltica de granulometría densa**

Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado y materiales pétreos, con tamaño nominal entre treinta y siete punto cinco (37,5) milímetros (1 ½ in) y nueve punto cinco (9,5) milímetros (¾ in). Normalmente se utiliza en los casos en que la intensidad del tránsito (ΣL) es igual a un (1) millón de ejes equivalentes o menor, en donde no se requiera de una alta resistencia estructural, para la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos y en carpetas para el refuerzo de pavimentos existentes, así como para la reparación de baches.

- **Mortero asfáltico**

Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado, agua y arena con tamaño máximo de dos coma treinta y seis (2,36) milímetros (Nº8). Normalmente se coloca sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, como capa de rodadura.

2.2.2.3 Mezclas Asfálticas Tibias (WMA)

Debido a las responsabilidades socio-ambientales se ha desarrollado la tecnología que rompe paradigmas de la industria de pavimentación mundial, el Warm Mix Asphalt (WMA) o Mezcla Asfáltica Tibia.

El WMA es un producto amigable para el medio ambiente. Esta mezcla reduce la emisión de gases como CO₂, CO y NO₂, lo que mejora la calidad del aire durante su producción y disminuye la exposición de los trabajadores en el proceso. Este producto se maneja poco en el mercado latinoamericano, pero romperá paradigmas al reducir en 30% el consumo de combustible del equipo. También disminuye de manera significativa la evaporación de los aceites del asfalto.

El nuevo producto permite la pavimentación en regiones geográficas y en períodos, que por sus características, exigen rapidez en la ejecución del proceso, sin perder calidad y acabado final, en una época en que es necesario mudar la matriz energética en escala global, donde se persigue la conservación de la energía y la búsqueda de energías renovables.

La Mezcla Asfáltica Tibia surge como respuesta a la necesidad de la industria de construcción de carreteras por encontrar alternativas que aumenten la vida útil y la calidad de los pavimentos, y que maximicen la utilización de los recursos públicos, cada vez más escasos, y de los naturales, que no son renovables.

Principales beneficios del WMA:

- El WMA usualmente utiliza asfalto espumado como ligante en el proceso de calentamiento de la mezcla bituminosa, y las características excepcionales de la

mezcla resultante permiten que se reduzca la temperatura de compactación para un intervalo de 90° a 130°C (mezcla tibia).

- La durabilidad de los pavimentos es potenciada debido a la mejor compactación de la mezcla bituminosa que conduce a un menor volumen de vacíos.
- La mezcla bituminosa a temperaturas más bajas minimiza el envejecimiento del ligante bituminoso por oxidación, preservando su respuesta elástica principalmente en lo que concierne a la fatiga de los revestimientos bituminosos.
- Mejora el manejo de la mezcla bituminosa y facilita/optimiza la compactación de la mezcla bituminosa.
- Reduce el consumo de combustible hasta en 30%.
- Reduce la emisión de gases como CO₂, CO y NO₂, mejorando la calidad del aire durante la producción de la mezcla bituminosa.

2.2.2.4 Mezclas Asfálticas por el Sistema de Riegos

Son las que se construyen mediante la aplicación de uno o dos riegos de un material asfáltico, intercalados con una, dos o tres capas sucesivas de material pétreo triturado de tamaños decrecientes. Las carpetas por el sistema de riegos se clasifican en carpetas de uno, de dos y de tres riegos. Las carpetas de un riego o la última capa de las carpetas de dos o tres riegos, pueden ser premezcladas o no.

Normalmente se colocan sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, nueva o existente, como capa de rodadura con el objeto de proporcionar resistencia al derrapamiento y al pulimento.

Nuestro estudio se enfocará únicamente a las mezclas en caliente de granulometría densa por ser las más utilizadas ya que en la actualidad, la mezcla asfáltica en caliente es un producto de alta tecnología que puede resistir exitosamente las enormes cargas de tránsito en rangos desde plataformas industriales hasta las aeronaves comerciales. Es un producto altamente versátil que puede ser usado en muchas aplicaciones, desde las autopistas interestatales hasta las pistas de los aeropuertos, estacionamientos, pistas de bicicletas y caminos privados.

Es superior de muchas maneras, pero la mayoría de la gente lo prefiere simplemente porque es de construcción rápida, demora mínima de tránsito y es uniforme.

Como ya se mencionó para cualquier país el principal motor del desarrollo son sus carreteras, dado que permiten conectar sus centros de población con zonas comerciales, turísticas, agrícolas y ganaderas. Por la importancia que tienen estas vías de comunicación a nivel nacional e internacional es necesario construirlas con la calidad debida a fin de prolongar su vida útil y por tanto, reducir los costos de mantenimiento y operación.

Es por eso que la ingeniería de pavimentos en México se debate en la actualidad ante la imperiosa necesidad de mejorar los procedimientos de diseño y construcción. Con el objetivo último de lograr mejores desempeños de esas estructuras que permitan una optimización de los costos de mantenimiento y rehabilitación asociados y, sobre todo, de los costos de operación de los usuarios.

En la búsqueda de esos objetivos, las características de calidad de cada uno de los materiales que conforman un pavimento juegan un papel primordial, y de manera especial las relacionadas con la carpeta asfáltica que está directamente expuesta a las agresiones del medio ambiente y del tránsito vehicular.

De tal manera que el protocolo de diseño AMAAC PA-MA-01/2008 puede ser visto como un reflejo de la práctica real y deseada por un gran número de tecnólogos, en México. Es una combinación de la práctica americana en su mayor parte, principalmente basada en el llamado método Superpave, y salpicada por aspectos tomados de la práctica internacional, principalmente la española.

El protocolo AMAAC PA-MA-01/2008 también es un llamado a actualizar nuestra tecnología y nuestros conocimientos, incluyendo los planes de estudio en ingeniería civil, no viéndolo como un cambio brusco de las metodologías tradicionales como el método Marshall, sino como la oportunidad de tomar un nuevo impulso en la investigación y desarrollo tecnológico de la ingeniería de carreteras a través del estudio de los nuevos materiales asfálticos.

Y debido a que con la metodología tradicional de diseño de pavimentos asfálticos en México estos han presentado problemas serios, es importante resaltar que la Normativa actual de la SCT, permite la inclusión de métodos y procedimientos que, aunque no formen parte de ella en la actualidad, estén debidamente sustentados técnicamente y sean aprobados por la autoridad competente. Este protocolo cuenta con el aval de las Direcciones de Servicios Técnicos, Conservación y Carreteras Federales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para ser usado como especificación particular en los proyectos de carreteras.

Aunque muchos de los ensayos que se mencionan son ya de uso extensivo en nuestro país y otros se encuentran en su impulso inicial, en su conjunto representan ese cúmulo de experiencia, conocimiento y tecnología, que se requiere para realmente contribuir a una mejor infraestructura carretera para México.

2.3 PROTOCOLO AMAAC PA-MA-01/2008

Diseño de Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa de Alto Desempeño

2.3.1 Contenido

Este protocolo contiene la metodología necesaria para diseñar una mezcla asfáltica que se utilice en la construcción de pavimentos para carreteras en donde se desee obtener altos niveles de desempeño.

2.3.2 Definiciones

Una **mezcla asfáltica** es una mezcla elaborada con agregados pétreos y un material asfáltico, eventualmente con aditivos, cuyas propiedades mecánicas dependen de las propiedades de cada uno de los componentes de su proporción relativa en mezcla. Puede elaborarse en frío o en caliente, en planta o en el lugar.

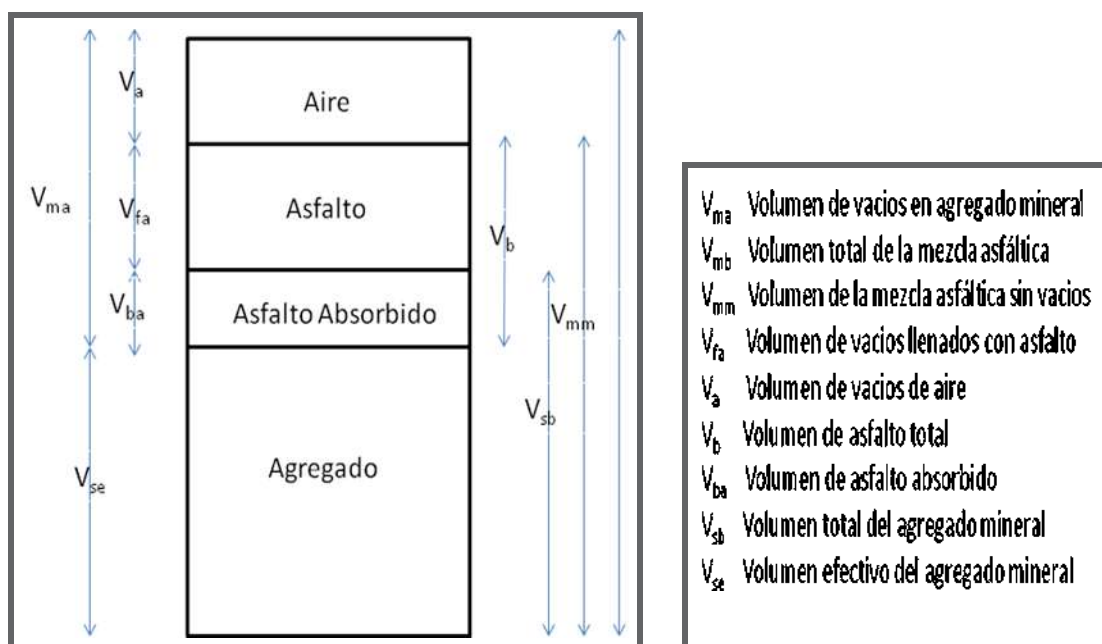


Figura 2.1 Diagrama de fases de una mezcla asfáltica con la definición de sus características volumétricas.

Para fines de diseño, se considera a la **mezcla asfáltica** como un sistema trifásico compuesto por una fase sólida, constituida por el agregado pétreo, una fase líquida, dada por el cemento asfáltico y una fase gaseosa que constituye el aire. La figura 2.1 muestra el diagrama de fases.

Mezcla asfáltica de alto desempeño. Se refiere a la mezcla asfáltica elaborada en caliente resistente a las deformaciones plásticas, al fenómeno de fatiga y al daño por humedad, cuyo comportamiento es superior al de las mezclas asfálticas convencionales.

Gravedad específica bruta (Gsb). Se determina midiendo la masa seca y el volumen bruto de una muestra de agregados (ASTM C-127 o ASTM C-128). El volumen bruto incluye el volumen del sólido del agregado más el volumen de agua contenida en los poros superficiales (Figura 2.2). El volumen bruto se mide para la condición del agregado saturado y superficialmente seco.

Gravedad específica aparente (G_{sa}). Se obtiene midiendo la masa seca y el volumen aparente de la muestra del agregado (ASTM C-127 o ASTM C-128). El volumen aparente sólo incluye el volumen del sólido del agregado y no incluye el volumen de los poros de la superficie.

Gravedad específica efectiva (G_{se}). Se calcula usando la masa seca y volumen efectivo del agregado (Figura 2.2). El volumen efectivo incluye el volumen de los sólidos del agregado y el volumen de los poros de superficie llenos con agua pero no con asfalto. La gravedad específica del agregado no se mide directamente, a diferencia de las gravedades específicas bruta y aparente. Esta se calcula conociendo la gravedad específica teórica máxima de la mezcla (G_{mm}) y el contenido de asfalto (P_b). Solo las gravedades específicas bruta y efectiva son utilizadas para el cálculo de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica. Los volúmenes calculados para cada uno tendrán diferentes significados, y por ende, diferentes valores numéricos.

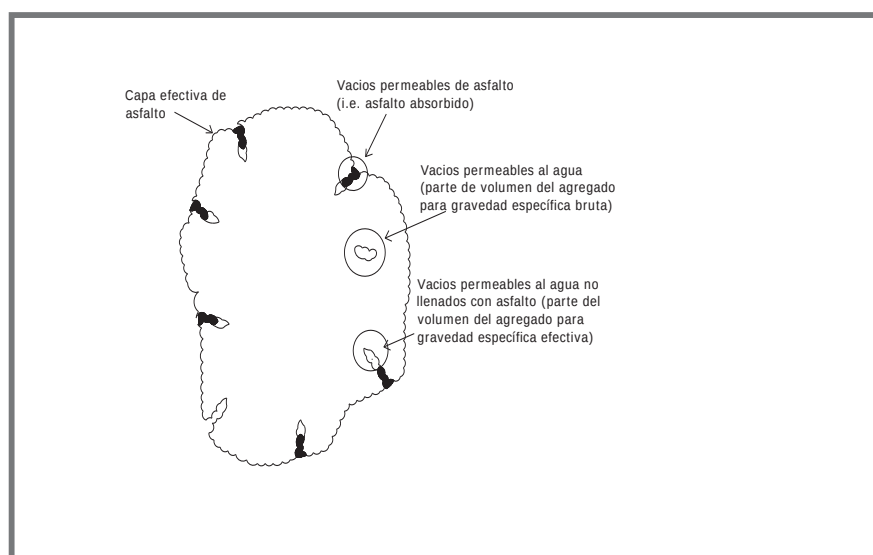


Figura 2.2 Esquema para la determinación de las gravedades específicas en el agregado pétreo.

Gravedad específica del cemento asfáltico (G_b). Es la relación entre la masa de un volumen dado de cemento asfáltico y el peso de igual volumen de agua (ASTM D-70). Generalmente los valores se especifican entre 1.015 y 1.050.

Gravedad específica bruta de la mezcla compacta (G_{mb}). Como el modelo está compuesto de distintos materiales, la gravedad específica de la muestra compactada se llama gravedad específica bruta y corresponde a la densidad de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D-1188 o D-2726).

Gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta (G_{mm}). Para un contenido de asfalto dado, la gravedad específica teórica máxima (G_{mm}) es la masa del agregado mas asfalto, dividido por el volumen de ambos componentes, sin incluir el volumen de los vacíos de aire. La gravedad Como el modelo está compuesto de distintos materiales, la gravedad específica de la muestra compactada se llama gravedad específica bruta teórica

máxima es una propiedad muy útil porque se emplea como referencia para calcular otras importantes propiedades como el contenido de vacíos de aire (V_a). El ensaye para determinar la Gmm se realiza a la mezcla asfáltica en estado suelto (ASTM D-2041).

Contenido de asfalto (Pb). El contenido de asfalto es la concentración de masa de cemento asfáltico. Se expresa como porcentaje de la masa total de la mezcla o como porcentaje de la masa total de agregado. El contenido óptimo de asfalto en una mezcla depende de gran medida de las características del agregado, como la granulometría y la absorción.

Contenido de asfalto efectivo (Pbe). Es la cantidad de masa de cemento asfáltico no absorbido.

Contenido de asfalto absorbido (Pba). Es la concentración de masa del cemento asfáltico absorbido por el agregado. Normalmente se expresa como porcentaje de la masa del agregado.

Contenido de vacíos de aire (V_a). Es la concentración, en volumen, del aire en la muestra de mezcla asfáltica compactada. Los vacíos de aire se expresan siempre como un porcentaje del volumen total de la mezcla.

Vacíos en el agregado mineral (VAM). Es el espacio intergranular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla asfáltica compactada y se expresa como porcentaje del volumen total. Usualmente, no se considera como parte del VAM, el volumen de asfalto absorbido. El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen de asfalto efectivo y el volumen de aire necesarios en la mezcla. Valores mínimos del VAM son necesarios para asegurar un adecuado espesor de película de asfalto que contribuya a la durabilidad de la mezcla.

Vacios llenos con asfalto (VFA). Es el porcentaje de VAM que contienen asfalto. El concepto de VFA es utilizado para asegurar que el porcentaje de asfalto efectivo (Pbe) no sea demasiado pequeño para producir una mezcla poco durable, o demasiado alto como para tener una mezcla demasiado inestable. El rango aceptable de VFA depende del nivel de tránsito. Altos niveles de tránsito requieren menores porcentajes de VFA, debido a que en estas condiciones la resistencia y estabilidad de las mezclas son la mayor preocupación. Bajos niveles de tránsito requieren porcentajes de VFA mayores para garantizar la durabilidad de la mezcla asfáltica. Si los porcentajes de VFA son demasiados altos, la mezcla asfáltica se vuelve susceptible a presentar deformaciones plásticas.

Relación filler-asfalto. Se calcula como la relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que la malla 0.075 (200) y el contenido de asfalto efectivo en porcentaje de peso del total de la mezcla.

Tamaño Nominal (TN). Es la malla inmediata superior a la primera malla que retiene más del 10% de las partículas del agregado, en una serie estándar de tamices.

Tamaño Máximo (TM). Es la malla inmediata superior a la que define el Tamaño Nominal (TN).

Número de giros iniciales (Nini). Es el número de giros necesarios para compactar una mezcla asfáltica hasta alcanzar un porcentaje de la gravedad específica teórica máxima (Gmm) entre el 89 y 91.5%. El Nini oscila entre 6 y 9 giros.

Número de giros de diseño (Ndis). Es el número de giros necesarios en el compactador giratorio para compactar una mezcla asfáltica a la densidad de diseño determinada por el número de ejes equivalentes, donde la mezcla asfáltica alcanza el 96% de la gravedad específica teórica máxima de la mezcla al contenido óptimo de asfalto. El Ndis oscila entre 50 y 125 giros. En términos prácticos significa la compactación que proporcionan los rodillos más el tránsito futuro.

Número de giros al final de la vida útil (Nmax). Es el número de giros necesarios en el compactador giratorio para compactar una mezcla asfáltica al porcentaje de la gravedad específica teórica máxima (Gmm) que corresponde al 98% como mínimo. El Nmax oscila entre 75 y 205 giros. En términos prácticos es el número de giros que produce la máxima compactación que se debe presentar en campo.

2.3.3 Criterios de Selección del Nivel de Diseño Requerido

El método de diseño propuesto por AMAAC, establece diferentes niveles de diseño para una mezcla asfáltica densa en función de la importancia de la carretera determinada por el nivel de tránsito esperado en el carril de diseño. La figura 2.3 ilustra los diferentes niveles de diseño:

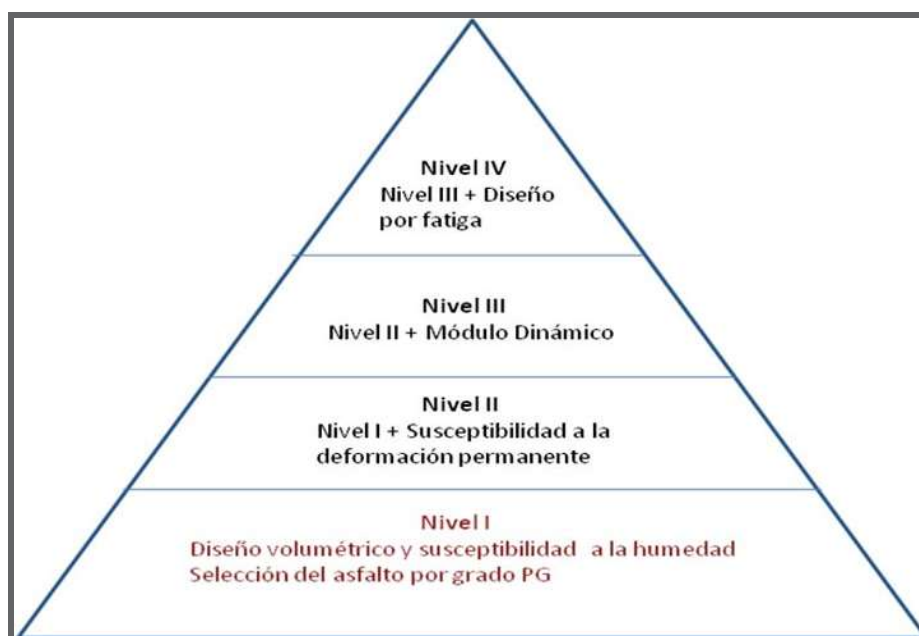


Figura 2.3 Niveles de diseño para mezclas asfálticas.

En la Tabla 2.3 se presenta la recomendación para la selección del nivel de diseño de las mezclas asfálticas de granulometría densa en función del tránsito vehicular.

Tabla 2.3 Niveles de diseño en función del número de ejes equivalentes de 8.2 ton y/o el tipo de proyecto

Designación del Nivel de tránsito	Número de ejes equivalentes	Tipo de carreteras usuales	Ensayes recomendados
Nivel I Tránsito bajo	Menor a 1,000,000	- Carreteras federales tipo D - Carreteras alimentadoras - Carreteras estatales y municipales - Calles urbanas	Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad
Nivel II Tránsito medio	De 1,000,000 a 10,000,000	- Carreteras estatales - Carreteras federales tipo B y C - Vialidades urbanas	- Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad - Susceptibilidad a la deformación permanente
Nivel III Tránsito alto	De 10,000,000 a 30,000,000	- Carreteras federales tipo A - Autopista de cuota	- Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad - Susceptibilidad a la deformación permanente - Módulo dinámico
Nivel IV Tránsito muy alto	Más de 30,000,000	- Carreteras federales troncales - Autopistas de cuota importantes - Vialidades suburbanas en ciudades muy importantes	- Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad - Susceptibilidad a la deformación permanente - Módulo dinámico - Fatiga

2.3.4 Selección de los Agregados Pétreos

Granulometría de la mezcla

La granulometría a utilizar en una mezcla asfáltica se debe seleccionar de acuerdo a la función requerida para la capa asfáltica en la estructura de un pavimento. Con base en las necesidades del proyecto se podrán fabricar cinco tipos de mezcla asfáltica cuya designación es la que muestra la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Designación del tipo de mezcla en función del tamaño nominal

Granulometría por tipo de Mezcla		
Designación de la mezcla mm	Tamaño nominal mm	Tamaño máximo mm
37.5	37.5	50.0
25.0	25.0	37.5
19.0	19.0	25.0
12.5	12.5	19.0
9.5	9.5	12.5

Los requisitos recomendados de granulometría para el caso de una carpeta asfáltica de granulometría densa son los que muestra la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (puntos de control).

Tamaño nominal del material pétreo mm (pulg)						
Designación	Abertura mm	37.5 (1 – 1/2“)	25 (1”)	19 (3/4“)	12.5 (1/2“)	9.5 (3/8“)
		Porcentaje que pasa				
2”	50	100 – 100	-	-	-	-
1 1/2”	37.7	90 – 100	100 – 100	-	-	-
1”	25	- 90	90 – 100	100 – 100	-	-
3/4“	19	-	- 90	90 – 100	100 – 100	-
1/2“	12.5	-	-	- 90	90 – 100	100 – 100
3/8“	9.5	-	-	-	- 90	90 – 100
4	4.75	-	-	-	-	- 90
8	2.36	15 – 41	19 – 45	23 – 49	28 – 58	32 – 67
16	1.18	-	-	-	-	-
30	0.60	-	-	-	-	-
50	0.30	-	-	-	-	-
100	0.15	-	-	-	-	-
200	0.075	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10

A manera de ejemplo, la Figura 2.4 ilustra los límites establecidos para una mezcla con tamaño nominal de 19mm. La escala de la abertura de la malla está elevada a la potencia 0.45. En todos los demás casos se debe construir la gráfica correspondiente.

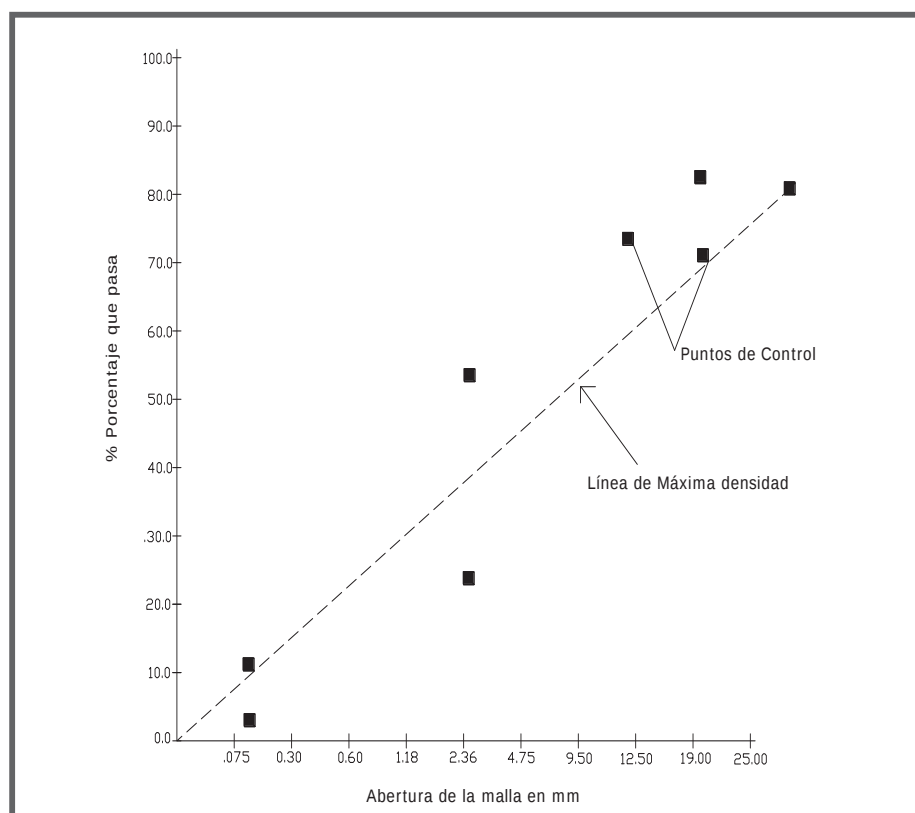


Figura 2.4 Granulometría para Mezclas con Tamaño Máximo Nominal 19mm (3/4")

Recomendaciones generales para la selección del tipo de granulometría requerida por el proyecto.

Tabla 2.6 Definición de Mezclas de Graduación Densa, Gruesa y Fina

Tamaño Nominal de Mezcla	Graduación Gruesa	Graduación Fina
37.5 mm (1 1/2")	< 47% Pasando malla de 9.5	> 47% Pasando malla de 9.5
25.0 mm (1")	< 40% Pasando malla de 4.75	> 40% Pasando malla de 4.75
19.0 mm (3/4")	< 47% Pasando malla de 4.75	> 47% Pasando malla de 4.75
12.5 mm (1/2")	< 39% Pasando malla de 2.36	> 39% Pasando malla de 2.36
9.5 mm (3/8")	< 47% Pasando malla de 2.36	> 47% Pasando malla de 2.36
4.75 mm (Malla número 4)	N/A (Graduación Superpave no estándar)	

Tabla 2.7 Ventajas de las Mezclas de Granulometría Densa, Gruesa y Fina

Graduación Fina	Graduación Gruesa
Menor permeabilidad	Permite espesores gruesos (< 25 mm TN)
Trabajabilidad (< 25 mm TN)	Incrementa la macro textura (<25 mm TN)
Espesores delgados (< 25 mm TN)	Mejor estructura interna (friccionante)
Mayor durabilidad en carreteras de tránsito bajo a medio	Elevada durabilidad en todos los tipos de proyecto
Textura lisa (< 25 mm TN)	

Durante el proceso de diseño se debe verificar que el espesor de la capa asfáltica donde se va a colocar la mezcla se encuentre dentro del rango establecido en la Figura 2.5. En caso de no cumplir con lo estipulado en dicha tabla, se debe cambiar el tamaño máximo de la mezcla.

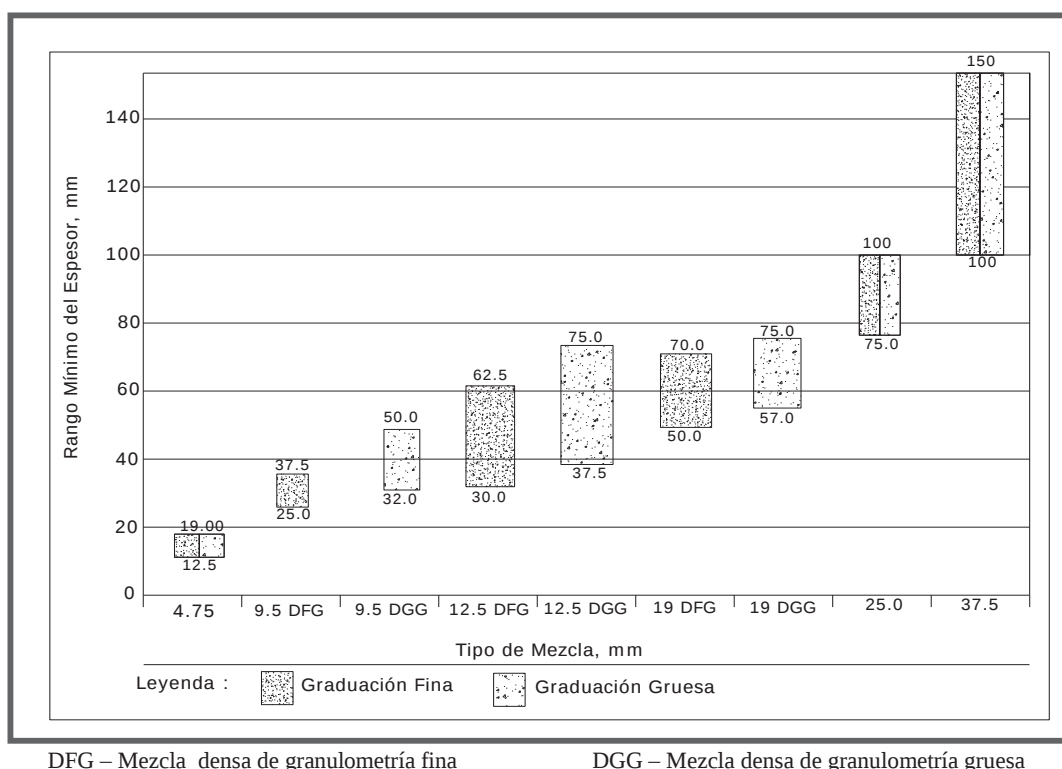


Figura 2.5 Recomendaciones para el rango mínimo del espesor para mezclas de granulometría densa

Una mezcla de granulometría se puede utilizar para cumplir cualquiera o todas las necesidades de los diseñadores de pavimento siguientes:

- **Estructural** (Mezclas finas y gruesas de 37.5, 25 y 19 mm). Este es el propósito principal de las mezclas de granulometría densa y es ante todo una función del espesor de la capa. Sin embargo, los materiales seleccionados pueden mejorar el valor estructural de las mezclas.

- **Fricción** (Mezclas gruesas de 19, 12.5 y 9.5 mm). Esto es una consideración importante para las carpetas de superficie. La fricción es una función de las propiedades del agregado y mezcla.
- **Nivelación** (Mezclas finas de 12.5 y 9.5 mm). Esta mezcla puede utilizarse en capas delgadas o gruesas para rellenar depresiones de las carreteras.
- **Bache** (Mezclas finas y gruesas de 12.5 y 9.5 mm). La mezcla debe reunir los mismos requerimientos que la utilizada para una nueva.

Las mezclas con función estructural de granulometría fina se recomiendan para caminos de tránsito bajo y/o moderado donde no se colocará ningún tipo de tratamiento superficial o capa de desgaste. Para caminos de tránsito de moderado a alto, donde será colocado algún tipo de tratamiento superficial, se recomienda el uso de mezclas con función estructural usando granulometrías gruesas. Sin embargo, se debe evaluar ambos tipos de mezclas densas para colocar la que tenga mejores propiedades volumétricas y un desempeño óptimo en las pruebas de simulación que se describen más adelante.

Para la selección adecuada del tipo de mezcla y los espesores mínimos y máximos, se recomienda consultar la serie informativa 128S “Guía para seleccionar el tipo de Mezcla Asfáltica en Caliente HMA para pavimentos” de las publicaciones de la NAPA (National Asphalt Pavement Association) y traducida por AMAAC.

Calidad de los Agregados Pétreos

Las características físicas básicas que deben cumplir las fracciones gruesa y fina del agregado pétreo seleccionado son las que se indican en las tablas 2.8 y 2.9, respectivamente.

Tabla 2.8 Requisitos de calidad de la fracción gruesa del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa.

Característica	Norma	Especificación
Desgaste de los Ángeles, %	ASTM C131	30 máx. (capas estructurales) 25 máx. (capas de rodadura)
Desgaste Microdeval, %	AASHTO TP 58-99	18 máx. (capas estructurales) 15 máx. (capas de rodadura)
Intemperismo acelerado, %	AASHTO T 104	15 máx. Para sulfato de sodio 20 máx. Para sulfato de magnesio
Caras fracturadas, % (2 caras o más)	ASTM D 5821	90 mín.
Partículas alargadas, %	ASTM D 4791	Relación 3 a 1, 15% máx.
Partículas lajeadas, %	ASTM D 4791	Relación 3 a 1, 15% máx.
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento.	Recomendación AMAAC RA-08/2008	90 mín.

Tabla 2.9 Requisitos de calidad de la fracción fina del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa.

Característica	Norma	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM D 2419	50 mín. (capas estructurales) 55 mín. (capas de rodadura)
Angularidad, %	AASHTO T 304	40 mín.
Azul de metileno, mg/g	Recomendación AMAAC RA-05/2008	15 máx. (capas estructurales) 12 máx. (capas de rodadura)

Se recomienda considerar al menos tres granulometrías diferentes para dosificación y diseño de la mezcla. Las tres granulometrías pueden corresponder a las variaciones esperadas durante la producción en un cierto banco de materiales.

2.3.5 Selección del Cemento Asfáltico.

El cemento asfáltico se debe seleccionar en función de la temperatura máxima y mínima que se esperan en el lugar de aplicación, de acuerdo a la norma de la SCT N-CMT-4-05-004/05 *Calidad de Materiales Asfálticos Grado PG*.

Si el cemento asfáltico seleccionado es convencional, se le determinará su carta de viscosidad usando un Viscosímetro Rotacional de acuerdo a la norma ASTM D-4402. De esta carta se obtendrán las temperaturas de mezclado y compactación adecuadas que corresponderán a los valores de viscosidad que se presentan en la Tabla 2.10. Para cementos asfálticos modificados las temperaturas mencionadas deben ser proporcionadas por el proveedor.

Tabla 2.10 Rangos de viscosidades para seleccionar las temperaturas de mezclado y compactación entre el agregado pétreo y cemento asfáltico convencional.

Característica	Rango de viscosidad, Pa.s
Temperatura de mezclado	0.15 a 0.19
Temperatura de compactación	0.25 a 0.31

2.3.6 Diseño Volumétrico y Susceptibilidad a la Humedad

En esta sección se establecen los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica que se indican en la Tabla 11. El contenido de asfalto óptimo será el necesario para obtener un porcentaje de vacíos de aire (Va) en la mezcla del 4%. Cumpliéndose además los requerimientos indicados en la misma Tabla 2.11.

La fabricación de los especímenes debe realizarse en el Compactador Giratorio de acuerdo con la Recomendación AMAAC RA-06/2008.

Tabla 2.11 Valores de los parámetros volumétricos necesarios para el diseño óptimo de una mezcla asfáltica de granulometría densa.

Requerimientos para el Diseño Volumétrico de la Mezcla										
Nivel de tránsito	Densidad requerida (% de la gravedad especifica teórica máxima – Gmm)			Vacíos del agregado mineral mínimo en % - VMA					Vacíos llenos de asfalto en % (VFA)	Relación filler asfalto
	Nivel de compactación giratoria			Tamaño nominal (mm)						
	Nini	Ndis	Nmáx.	37.5	25	19	12.5	9.5		
I Bajo	≤ 91.5	96	≤ 98	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	70-80	0.6 – 1.2
II Medio	≤ 90.5								65-78	
III Alto	≤ 90.5								65-78	
IV Muv alto	< 89								65-75	

Para la determinación de los parámetros volumétricos de la mezcla se deben emplear las fórmulas de la Tabla 2.12.

Tabla 2.12 Secuencia de cálculo de propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.

Fórmula de la propiedad volumétrica	Significado de las variables
Gravedad específica neta, Gsb $G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}}$	Gsb = Gravedad específica neta para el agregado total P ₁ , P ₂ , P _N = Porcentajes individuales por masa de agregado G ₁ , G ₂ , G _N = Gravedad específica neta individual del agregado
Gravedad específica efectiva, Gse $G_{se} = \frac{P_{mm} + P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} + \frac{P_b}{G_b}}$	G _{se} = Gravedad específica efectiva del agregado G _{mm} = Gravedad específica teórica máxima, obtenida en laboratorio (ASTM D 2041, AASHTO T 209) de mezcla de pavimento (sin vacíos de aire) P _{mm} = Porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100 P _b = Contenido de asfalto con el cual ASTM D 2041/AASHTO T 209 desarrollo el ensayo; el porcentaje por el total de la masa de la mezcla G _b = gravedad específica del asfalto
Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica. Gmm $G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$	G _{mm} = Gravedad específica teórica máxima, de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire) P _{mm} = Porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100 P _s = Contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla. P _b = Contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla G _{se} = Gravedad específica efectiva del agregado G _b = Gravedad específica del asfalto

Fórmula de la propiedad volumétrica	Significado de las variables
$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w}$	G_{mb} = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 o D 2726). W_a = Masa de la probeta en el aire W_w = Masa de la probeta en el agua (sin parafina) W_{ss} = Masa de la probeta saturada y superficialmente seca.
Vacíos en el agregado mineral, VAM $VAM = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}}$	VAM = Vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto) G_{sb} = Gravedad específica neta para el agregado total G_{mb} = Gravedad específica neta de la mezcla P_s = Contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica.
Vacíos en el agregado mineral, VAM. Si la composición de la mezcla es determinada como el porcentaje de la masa del agregado. $VAM = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + P_s}$	VAM = Vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto) G_{mb} = Gravedad específica neta de la mezcla G_{sb} = Gravedad específica neta para el agregado total P_s = Contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica.
Vacíos de aire, V_a $V_a = 1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \times 100$	V_a = Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total. G_{mm} = Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica. G_{mb} = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.
Vacíos llenados con asfalto, $VFA = \frac{VAM - V_a}{VAM} \times 100$	VFA = Vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VAM = Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total V_a = Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.
Asfalto absorbido, P_{ba} $P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \times G_b$	P_{ba} = Asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado G_{sb} = Gravedad específica neta del agregado G_b = Gravedad específica del asfalto
Contenido de asfalto efectivo, P_{be} $P_{be} = P_b \times \frac{P_{ba}}{100} \times P_s$	P_{be} = Contenido de asfalto efectivo, porcentaje del total de la mezcla P_b = Contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla P_{ba} = Asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado

2.3.7 Susceptibilidad de la Mezcla Asfáltica al Daño Inducido por Humedad

El ensaye se debe realizar aplicando la Recomendación AMMAC RA – 04/2008 “Resistencia de las Mezclas Asfálticas al Daño Inducido por Humedad” y para todos los niveles de diseño el valor mínimo aceptable es de TSR = 80%.

2.3.8 Susceptibilidad a la Deformación Permanente

Para revisar la susceptibilidad de la mezcla a la deformación permanente se podrán emplear los ensayos siguientes:

Especificaciones con Rueda Cargada de Hamburgo

El ensayo se debe realizar de acuerdo a la Recomendación AMAAC RA-01/2008, “*Susceptibilidad a la Humedad y a la Deformación Permanente por Rodera de una Mezcla Asfáltica Tendida y Compactada, por medio del Analizador de la Rueda Cargada de Hamburgo (HWT)*”. Las especificaciones se indican en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13 Número mínimo de pasadas para la deformación máxima en la Prueba de Hamburgo

Grado PG superior del asfalto	Mínimo de pasadas para la deformación máxima de 10 mm
PG 64 o inferior	10,000
PG 70	15,000
PG 76 o superior	20,000

Especificaciones con el APA

El ensayo se debe realizar de acuerdo a la Recomendación AMAAC RA-02/2008, “*Susceptibilidad a la Deformación por Rodera de una Mezcla Asfáltica, por medio del Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA)*”.

En la Tabla 2.14 se indican las especificaciones correspondientes en relación con el nivel de tránsito vehicular.

Tabla 2.14 Especificaciones de rodadura máxima con el Analizador de Pavimentos Asfálticos, APA

Nivel de tránsito	Rodadura máxima
Bajo	7.0 mm
Medio	5.5 mm
Alto	4.0 mm
Muy alto	3.0 mm

Especificaciones con el Ensayo de Pista Español

El ensayo se debe realizar de acuerdo a la Recomendación AMAAC RA-03/2008 “*Resistencia a la Deformación Plástica de las Mezclas Asfálticas mediante el ensayo de Pista Español*”. En la Tabla 2.15 se indican las especificaciones correspondientes.

Tabla 2.15 Velocidad máxima de deformación para el diseño de mezclas asfálticas mediante la máquina de pista en mm/min para el intervalo de 105 a 120 minutos.

Grado PG superior del asfalto	Categoría de tránsito			
	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
PG 64 o inferior	20	20	20	15
PG 70	20	20	15	15
PG 76 o superior	20	20	15	12

2.3.9 Módulo Dinámico

El módulo dinámico de una mezcla asfáltica es un parámetro esencial para poder calcular los espesores de carpeta asfáltica en los nuevos métodos de diseño de pavimentos asfálticos. Se recomienda determinarlo con el procedimiento ASTM D 3497 o UNE-EN-12697-25, debiendo reportarlo sistemáticamente. No hay especificaciones en este parámetro.

2.3.10 Fatiga

En el nivel IV de diseño se recomienda que una vez determinada la fórmula de trabajo, se debe determinar la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica, empleando la viga de flexión de 4 puntos, conforme al procedimiento especificado en el método AASHTO T-321 bajo las siguientes condiciones:

- Ciclos a la falla = 2000 microstrain ($\mu\epsilon$),
- Frecuencia = 10 Hz
- Volúmen de vacíos de las probetas = $4 \pm 1.0\%$
- Temperatura de prueba = 20°C
- Método de prueba = AASHTO T-321

Dependiendo del tipo de asfalto usado, las especificaciones correspondientes se muestran en la Tabla 2.16.

Tabla 2.16 Ciclos mínimos a la falla del promedio de tres muestras para la prueba de fatiga a flexión de 4 puntos para la mezcla asfáltica densa.

Tipo de asfalto	Ciclos mínimos a la falla del promedio de tres muestras
Asfalto Convencional AC-20	2,000
Asfaltos modificados o Asfaltos grado PG PG 70 – 22 PG 70 – 28 PG 76 – 22 PG 82 – 22	5,000

2.3.11 Condiciones Necesarias para la Elaboración y Construcción de Mezclas Asfálticas

Clima

No se permitirá la aplicación sobre el pavimento cuya superficie se encuentre mojada. La temperatura de la superficie del pavimento, así como la temperatura ambiental no deben ser menores a 10°C en el momento de la aplicación. Una superficie humedecida en el pavimento es aceptable para la aplicación si se encuentra libre de agua estancada y si se esperan condiciones ambientales favorables.

Planta productora de mezcla asfáltica

La planta de mezcla en caliente debe contar con sistema de recuperación de finos al proceso de mezclado. Además debe tener como mínimo 3 tolvas de alimentación en frío y una para filler. También debe de contar con todos los sistemas de almacenamiento y dosificación de asfalto y demás materiales que requiera la mezcla, como pueden ser los aditivos o material reciclado.

Transporte y almacenamiento

Con el propósito de evitar la alteración de las características de las mezclas asfálticas en caliente antes de su utilización en la obra, se tendrá cuidado en su transporte y almacenamiento, atendiendo los siguientes aspectos:

La mezcla asfáltica en caliente puede ser almacenada por corto tiempo en tolvas metálicas sin orificios, superficie interior lisa y limpia. No se permitirá el almacenamiento en pilas o montones, aún cuando estos se cubran con lonas.

- Si se utilizan silos térmicamente aislados, la mezcla puede ser almacenada hasta por 24 horas sin pérdidas considerables de temperatura y calidad.

- De requerirse largos periodos de almacenamiento, se utilizarán silos que incluyan sistemas de calentamiento que permitan mantener la temperatura de la mezcla, pero cuidando que no es presente sangrado u oxidación de la mezcla.
- La mezcla asfáltica en caliente se transportará en vehículos con caja metálica con superficie interior lisa, sin orificios y que esté siempre limpia y libre de residuos de mezcla asfáltica, para evitar que ésta se adhiera a la caja.
- Antes de cargar el vehículo de transporte, se limpiará su caja y se cubrirá la superficie interior con un lubricante para evitar la adherencia de la mezcla, utilizando para ello una solución de agua y cal, agua jabonosa o algún producto comercial apropiado. En ningún caso se deben usar productos derivados del petróleo como el diesel, debido a problemas ambientales y posibles daños a la mezcla. Una vez hecho lo anterior, se levantará la caja para drenar el exceso de lubricante.
- El vehículo de transporte se llenará con varias descargas sucesivas de la mezcla para minimizar la segregación de los materiales pétreos, acomodándolas desde los extremos de la caja hacia su centro.
- Una vez cargado el vehículo de transporte, se cubrirá la mezcla asfáltica con una lona que la preserve del polvo, materias extrañas y de la pérdida de calor durante el trayecto.
- El tiempo de transporte está en función de la pérdida de temperatura de la mezcla, la que será tendida y compactada a las temperaturas mínimas determinadas como se indica en el inciso E de este documento.
- La temperatura de fabricación de la mezcla no debe incrementarse para que al final de su transporte tenga la temperatura adecuada para el tendido y compactación.
- Un lote estará conformado por 1,300 Ton. Estos lotes podrán ser divididos a su vez en sub-lotes siempre y cuando no excedan las 350 Ton. Este dato es importante para el control de calidad de la mezcla.

Equipo

La máquina pavimentadora, debe tener la capacidad de ser autopropulsada; debe estar especialmente diseñada y construida para aplicar mezcla en caliente. La pavimentadora debe tener depósito-tolva de recepción y banda transportadora para evitar segregación, sistema de calentamiento (de longitud variable), y placa vibrocompactadora. Asimismo, este equipo debe aplicar la capa de mezcla en caliente y nivelar la superficie en una misma acción. Este equipo debe tener la capacidad de aplicar la mezcla en caliente, a una velocidad controlada de 9 a 28 metros/minuto. La aplicación se realizara desde el centro de la corona, realizando un ajuste vertical por medio de sus extensiones para alcanzar el perfil deseado en el pavimento y siguiendo las recomendaciones de las Normas SCT N-CRT-CAR-1-04-006 y N-CSV-CAR-3-02-005.

Preparación de la superficie

La preparación óptima de la superficie será determinada por el contratante y se debe realizar previamente a la aplicación de la mezcla. Si se trata de una superficie que fue previamente fresada, debe estar libre de polvo y se debe realizar un relleno y sellado de

grietas mayores a 5mm, además de cumplir con lo establecido en la Norma SCT-N-CSV-CAR-3-02-005.

Aplicación

La mezcla asfáltica en caliente debe ser aplicada a una temperatura adecuada para lograr al menos el 97% de la densidad de diseño, que corresponde al Gmb, al número de giros Ndes y debe ser colocada inmediatamente después de haberse aplicado el riego de liga sobre toda la superficie de la obra.

Compactación

La compactación debe desarrollarse inmediatamente después de la aplicación de la capa asfáltica, mediante la utilización de un compactador que se encuentre en buen estado y en buenas condiciones de operación, el cual debe estar equipado con un sistema de rocío por agua para prevenir la adherencia entre la mezcla recién extendida y el tambor metálico del equipo. El equipo de compactación debe operarse en el modo estático o vibratorio, según se requiera, ya que una excesiva compactación podría causar la disgregación del material o un inadecuado perfil.

Se recomienda la combinación de los equipos de compactación, tanto rodillos neumáticos como metálicos, según se requiera. La capa asfáltica de rodamiento no debe ser abierta al tránsito si no se ha completado el proceso de compactación y si el material no se encuentra por debajo de los 85°C. La densidad de la mezcla compactada debe ser de al menos el 97% del peso volumétrico de la mezcla compactada en laboratorio y debe ser medida con densímetro nuclear o electromagnético previamente calibrado en la franja de prueba.

2.3.12 Control de Calidad

Para el control de calidad se debe emplear el procedimiento descrito en el Protocolo AMAAC PA-MA-02/2008 *“Control de Calidad para Mezclas Asfálticas de Granulometría densa de alto desempeño”*

Del protocolo AMAAC PA-MA-02/2008 estudiaremos únicamente el capítulo de resistencia de las mezclas asfálticas compactadas al daño inducido por humedad se describe más adelante.

Debido a que en Morelia particularmente los pavimentos flexibles no dan una respuesta adecuada sobre todo en temporada de lluvias y a que los métodos tradicionales de diseño como el Marshall no contemplan el estudio del efecto del agua en los pavimentos se vio la importancia de enfocarnos en el estudio de este tema en particular.

Y el protocolo menciona que la mezcla asfáltica de alto desempeño, es una mezcla especialmente diseñada y construida para resistir deformaciones permanentes, fatiga y tener mayor resistencia a los agentes ambientales.

A continuación se muestran unas imágenes de un tramo de pavimento dañado en la Av. Camelinas por el efecto de la humedad.



Figura 2.6 Tramo de la avenida camelinas donde se observa desprendimiento de material pétreo al poco tiempo de haber terminado su rehabilitación.



Figura 2.7 Tramo bacheado de la avenida camelinas como consecuencia del desprendimiento de agregado pétreo en la carpeta



Figura 2.8 Tramo de la avenida camelinas al finalizar la temporada de lluvias, un problema que se presenta incluso en avenidas principales de nuestra ciudad

2.4 RESISTENCIA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD MEDIANTE LA RECOMENDACIÓN AMAAC RA-04/2008

Contenido

Esta recomendación describe el procedimiento de prueba para determinar en una mezcla asfáltica compactada el daño inducido por humedad, comparando la resistencia a tensión indirecta de una serie de especímenes acondicionados contra otros no acondicionados.

Objetivo de la prueba

Determinar la resistencia al daño inducido por humedad, también conocida como resistencia retenida, de una mezcla asfáltica compactada. La resistencia retenida es importante para establecer si una mezcla asfáltica es susceptible a la acción de la humedad, tal como se solicita en la Norma N-CMT-4-05-003, *Calidad de mezclas asfálticas para carreteras*.

Equipo

El equipo para la ejecución de las pruebas estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes.

Balanza

Con capacidad mínima de 2 kg y aproximación de 0.1 g

Juego de mallas

Fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula con las características indicadas en el Manual de la SCT M-MMP-4-04-002, *Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*.

Cuchara de albañil

De acero galvanizado, de 20 cm de largo y 11 cm de ancho, con mango metálico de sección circular de 13 cm de largo aproximadamente.

Refrigerador

Capaz de mantener una temperatura de hasta $-18 \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Mezclador mecánico

Equipo compuesto de un recipiente con pared aislada térmicamente en su exterior (de ser posible con un sistema de calefacción) y un agitador de paleta con movimiento circular sobre su eje y alrededor del interior del recipiente de acción mecánica, para la elaboración de mezclas asfálticas en laboratorio.

Baño de agua

Con capacidad de mantener la temperatura del agua a $60 \pm 1^\circ\text{C}$.

Bolsas y película plástica

De uso rudo anti-derrames y película plástica para envoltura de los especímenes.

Bomba y recipiente de vacío

Con sus accesorios y recipiente para crear un vacío en su interior de 25 a 60 cm de mercurio.

Charolas

Circulares de 25 cm de diámetro de acero galvanizado o aluminio.

Horno

De ventilación forzada con capacidad de alcanzar temperaturas de hasta $176 \pm 3^\circ\text{C}$

Prensa

Hidráulica, mecánica o neumática con capacidad de carga y de adquisición de datos suficiente para la ejecución del ensaye de tensión indirecta en especímenes cilíndricos de 10 y 15 cm de diámetro por 6.35 cm y 9.5 cm de altura respectivamente.

Mordaza Lottman

Barras de acero con una superficie cóncava de radio de curvatura igual al radio del espécimen por ensayar 100 0 150 mm. La longitud de las barras debe ser mayor que la altura de los especímenes. Estas barras deben ser montadas sobre una base que permita su libre movimiento. En la Figura 2.9 se ilustra este accesorio.



Figura 2.9 Mordaza Lottman

Preparación de la Muestra

El tamaño de los especímenes cilíndricos debe ser de 100 mm. de diámetro por 63.5 ± 2.5 mm. de altura o de 150 mm. de diámetro por 95 ± 5 mm. de altura. Se deben preparar al menos seis especímenes para un ensaye, la mitad para ser ensayados en seco y el resto para ser ensayados después de un acondicionamiento que consiste en la saturación parcial del espécimen acompañado de un ciclo de congelamiento y deshielo.

Muestra preparada en laboratorio

Cuando la mezcla sea fabricada y compactada en laboratorio el procedimiento de preparación de la muestra es el siguiente:

- Se prepara la cantidad necesaria de mezcla lo suficientemente grande para fabricar al menos tres especímenes o alternativamente batchadas con la cantidad de material necesario para fabricar solo un espécimen a la vez.
- Después del mezclado, se coloca la cantidad suficiente de mezcla para un espécimen en una charola y se deja enfriar por temperatura ambiente por dos horas. Posteriormente se colocan las charolas en el horno a $60 \pm 3^\circ\text{C}$ por un periodo de 16 ± 1 hora para su curado. Se debe tener precaución en colocar las charolas lo suficientemente espaciadas para permitir la circulación libre del aire.
- Después del curado, se coloca la mezcla en el horno a temperatura de compactación $\pm 3^\circ\text{C}$ durante 120 ± 10 minutos. Transcurrido este periodo la mezcla se compacta hasta alcanzar un volumen de vacíos (V_a) de 7.0 ± 0.5 %.

La compactación se puede llevar a cabo con el compactador giratorio o con el martillo Marshall (ajustando el número de giros o golpes hasta obtener el V_a deseado). Se recomienda dejar enfriar la mezcla lo suficiente antes de desmoldarla, para no dañar la estructura de la misma, ya que se trata de especímenes débiles por el elevado volumen de vacíos que contienen.

Muestra mezclada en planta y compactada en laboratorio

Cuando la mezcla sea fabricada en campo y compactada en laboratorio el procedimiento de preparación de muestra es el siguiente:

- Se obtiene una muestra de la planta de producción de acuerdo al procedimiento indicado en la Norma ASTM D-979-01.
- La mezcla obtenida de planta no requiere un periodo de curado. Se pasa directamente al horno, en charolas con material para un solo espécimen cada una a temperatura de compactación de $\pm 3^\circ\text{C}$ durante 120 ± 10 minutos. Transcurrido ese periodo la mezcla se compacta hasta alcanzar un volumen de vacíos (V_a) de $7.0 \pm 0.5 \%$. La compactación se puede llevar a cabo con el compactador giratorio o con el martillo Marshall (ajustando el número de giros o golpes hasta obtener el V_a deseado). Se recomienda dejar enfriar la mezcla lo suficiente antes de desmoldarla, para no dañar la estructura de la misma, ya que se trata de especímenes débiles por el elevado volumen de vacíos que contienen.

Muestra mezclada en planta y compactada en campo (testigos de obra)

Para obtener testigos de obra que serán evaluados posteriormente, se debe proceder de la siguiente manera.

- Se seleccionan los sitios más representativos del estado general del pavimento y se extraen los testigos. Cuando se estén evaluando pavimentos con un espesor menor o igual a 63.5 mm, se deben extraer testigos con un diámetro de 150 mm. El número mínimo de testigos que se debe extraer es de seis.
- De ser necesario, se separa la capa de interés del resto con una sierra o cualquier otro método que se considere apropiado. El acondicionamiento de los testigos de obra no considera como requisito el contenido de vacíos establecido para los especímenes preparados en laboratorio.

Procedimiento de Prueba

Además de las mezclas que fueron compactadas, se requiere elaborar al menos dos mezclas más, las cuales deben ser curadas con la misma temperatura y tiempo que las que fueron compactadas después del curado se obtiene la densidad teórica máxima de acuerdo con el procedimiento establecido en la Norma ASTM D-2041-03, *Gravedad teórica máxima específica de mezclas asfálticas*, cuyo valor se registra como G_{mm} .

Se recomienda llevar a cabo el procedimiento descrito a continuación, registrando cada uno de los datos obtenidos en el formato que se ejemplifica en la Tabla 2.17.

Tabla 2.17 Hoja de registro de datos para el ensaye de resistencia al daño inducido por humedad

Proyecto _____									
Aditivo _____		Proporción _____							
Método de compactación _____		Esfuerzo _____							
Fecha de ensaye _____		Operador _____							
Identificación del espécimen									
Diámetro, mm.	D								
Espesor, mm.	t								
Peso en aire, g.	A								
Peso Sat. Superficialmente seco, g.	B								
Peso sumergido, g.	C								
Volúmen (B-C), cc	E								
Gravedad específica bruta (A/E)	G_{mb}								
Gravedad específica teórica máxima	G_{mm}								
Vacíos $(100(G_{mm}-G_{mb})/G_{mm})$	Pa								
Volúmen de vacíos $(PaE/100)$, cc	Va								
Carga, N	P								
Saturación: _____ minutos a _____ kPa de vacío o _____ mm. Hg.									
Espesor, mm.	t'								
Peso Sat. Superficialmente seco, g.	B'								
Volumen de agua absorbida $(B' - A)$, cc	J'								
% Saturación $(100 J' / Va)$	S'								
Carga, N	P'								
Esfuerzo en seco $(2000P/\pi tD)$, kPa	S₁								
Esfuerzo en humedo $(2000P'/\pi tD)$, kPa	S₂								
TSR (S_2/S_1)									
Observaciones									

Evaluación y clasificación de especímenes

Para la clasificación de los especímenes se realizan las siguientes tareas.

- Se determina y registra el diámetro y la altura de cada uno de los especímenes.
- Se determina y se registra la gravedad específica bruta de cada espécimen (G_{mb}) siguiendo el procedimiento descrito en la Norma ASTM D-1188-96, *Gravedad específica bruta de las mezclas asfálticas compactadas usando especímenes con superficie saturada y superficialmente seca*.
- Se calcula el porcentaje de vacíos de aire (P_a), de acuerdo a la fórmula indicada en la Tabla 2.17.
- Se separan los especímenes en dos grupos, con al menos 3 especímenes por grupo. Se debe procurar que los vacíos de aire promedio de ambos grupos sean aproximadamente iguales.
- Uno de los dos grupos de especímenes se acondiciona con el método descrito más adelante.

Acondicionamiento de los especímenes

El procedimiento de acondicionamiento es el que se indica a continuación

- Se coloca cada espécimen en el recipiente de vacío. Se vierte agua hasta que el nivel se encuentre por lo menos 25 mm. por encima de la parte alta del espécimen. Se tapa el recipiente y se aplica un vacío de 13 – 67 kPa de presión absoluta (250 – 660 mm. de mercurio de presión parcial) por un tiempo corto de 5 a 10 minutos. Se retira la presión de vacío y se deja el espécimen sumergido por otros 5 a 10 minutos.
- Se determina el peso saturado y superficialmente seco del espécimen y se registra como B' . El volumen de agua absorbida (J') en centímetros cúbicos se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$J' = B' - A$$

Donde:

J' = Es el volumen de agua absorbida, centímetros cúbicos

B' = Es el peso saturado y superficialmente seco después de la saturación parcial, gramos.

A = Es el peso del espécimen seco en aire, gramos.

- Se determina el grado de saturación (S') comparando el volumen de agua absorbida (J') con el volumen de vacíos (V_a), con base en la siguiente ecuación:

$$S' = \frac{100 J'}{V_a}$$

Donde:

S' = Es el volumen de agua absorbida, centímetros cúbicos

- Si el grado de saturación está entre el 70 y 80% se pasa al siguiente punto. Si el grado de saturación es menor al 70%, se requiere someter el espécimen nuevamente al proceso de saturación. Si el grado de saturación es mayor del 80%, el espécimen ha sido dañado y debe ser descartado.
- Se cubre ajustadamente cada espécimen parcialmente saturado con la película de plástico. Posteriormente colocar cada espécimen cubierto en una bolsa de plástico que contenga 10 ± 0.5 ml de agua y se sella la bolsa. Se colocan las bolsas que contienen los especímenes en el refrigerador a una temperatura de $-18 \pm 3^\circ\text{C}$ por un periodo mínimo de 16 horas.
- Después del periodo dentro del refrigerador, se extraen los especímenes y se colocan en un baño de agua potable a $60 \pm 1^\circ\text{C}$ por un periodo de 24 ± 1 hora. El nivel superior del agua debe estar por lo menos 25 mm por encima del espécimen. Tan pronto como sea posible, después de colocar los especímenes en el baño, se retira la bolsa y la película de plástico de cada espécimen.
- Después de la inmersión de 24 horas, se retiran los especímenes y se colocan en otro baño a $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ por un periodo de 120 ± 10 minutos. Después de este periodo se retiran los especímenes y se ensayan como se describe más adelante.

Ensayo de especímenes

El ensayo de especímenes consiste en la determinación del esfuerzo máximo que es capaz de soportar la mezcla compactada, bajo el ensayo de tensión indirecta a una temperatura de 25°C , para los especímenes acondicionados, como los no acondicionados.

- Los especímenes se dejan en el baño a $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ por un periodo de 120 ± 10 minutos. Se coloca rápidamente cada uno de los especímenes en la mordaza Lottman y se ensayan a tensión indirecta. La configuración de carga es la que se ilustra en la Figura 2.10. Es importante tener todos los cuidados necesarios para asegurar que la carga es aplicada a través del diámetro del espécimen, a una velocidad de carga constante e igual a 50.8 mm. por minuto.
- Se registra la carga máxima aplicada (o tensión indirecta). El ensayo debe continuar hasta que se aprecie una grieta vertical. Se retira el espécimen de la prensa y se jalen

las dos mitades para provocar su separación. Visualmente se determina si el agregado grueso se rompió o solo se separo del asfalto. Se registran las observaciones en el formato mostrado en la Tabla 2.17.



Figura 2.10 Ensayo de especímenes a tensión indirecta

Cálculos y Resultados

- Se calcula la resistencia a tensión indirecta con la expresión que se indica a continuación.

$$S_t = \frac{2000 P}{\pi t D}$$

Donde:

S_t = Es la resistencia a tensión indirecta, kPa

P = Es la carga máxima, N

t = Es el espesor o altura del espécimen, mm

D = Es el diámetro del espécimen, mm

- Se reporta la resistencia de la mezcla asfáltica al daño inducido por humedad como el cociente de la resistencia a tensión indirecta promedio de los especímenes acondicionados

entre la resistencia de los especímenes no acondicionados, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \times 100$$

Donde:

TSR = Es la resistencia al daño inducido por humedad, expresada en %

S_1 = Es la resistencia a tensión indirecta promedio de especímenes no acondicionados, kPa

S_2 = Es la resistencia a tensión indirecta promedio de especímenes acondicionados, kPa

Precauciones

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observan las siguientes

- Que la prueba se realice en un lugar cerrado, bien ventilado, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la contaminación de la muestra de material.
- Que todo el equipo esté perfectamente limpio, para que al realizar la prueba los materiales no se mezclen con agentes extraños que alteren el resultado.
- Que la balanza esté limpia en todas sus partes, bien calibrada y colocada en una superficie horizontal, sin vibraciones que alteren las lecturas.
- Que se respeten tanto los tiempos como las temperaturas durante el acondicionamiento y preparación para ensaye de los especímenes.
- Que las muestras se preparen con la misma proporción de producto y granulometría de los agregados indicados en la fórmula de trabajo.

CAPÍTULO III

AGREGADOS PÉTREOS

Es un hecho de observación que existe una gran variedad de magmas, que dan origen a la gran variedad de rocas que se pueden reconocer en el planeta desde la roca sólida del manto terrestre hasta la arena y la arcilla o barro. Las rocas se clasifican según sus orígenes en rocas sedimentarias, rocas metamórficas y rocas ígneas.

3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS

Las rocas se dividen en tres categorías geológicas como se muestra a continuación:

- Rocas Ígneas (basaltos, granitos, riolitas y andesitas)
- Rocas Sedimentarias (arcillas y limos, caliza y arenisca)
- Rocas Metamórficas (esquistos, gneisses, mármol)

Rocas Ígneas

Son aquellas que se originan por el enfriamiento, puede ocurrir de una manera lenta dentro de la corteza terrestre, dando origen a rocas de grano grueso, conocidas como intrusivas (el granito es un ejemplo de ellas) o bien, de una forma rápida en contacto con la atmósfera, lo que da lugar a rocas de grano fino conocidas con el nombre de rocas extrusivas (como es el caso del basalto).

Por lo general las rocas ígneas son muy duras y abrasivas ya que tienen un gran contenido de sílice (SiO_2).

Rocas Sedimentarias

Son de origen exógeno, es decir se han formado en el exterior de la corteza terrestre son aquellas que provienen del arrastre y consolidación de fragmentos de rocas ígneas ocasionado por la actividad de los elementos naturales como viento, lluvia, glaciales, etc. Los conglomerados, areniscas, calizas entre otras, son ejemplo de este tipo de rocas.

Rocas Metamórficas

Las rocas inicialmente ígneas o sedimentarias se transforman interiormente a profundidad debido a fuertes presiones y temperaturas a las que son sometidas y entonces son metamorfoseadas. Así, las rocas metamórficas son rocas sedimentarias o ígneas que han sido transformadas totalmente por el proceso del metamorfismo.

3.2 DEFINICIÓN DE AGREGADO PÉTREO

Los materiales pétreos que se emplean en la construcción de carpetas asfálticas son suelos granulares inertes que se consiguen en ríos, arroyos de tipo torrencial, depósitos naturales y en los cerros constituidos por rocas andesíticas, basálticas y calizas estos pueden requerir uno o varios tratamientos, tales como disgregación, cribado, trituración y lavado. Para poder ser empleados en la carpeta asfáltica deben cumplir con ciertas características dadas por la granulometría, dureza, forma de la partícula y adherencia con el asfalto.

Se recomienda que las partículas que se utilicen tengan forma esférica, ya que las que son en forma de laja o de aguja pueden romperse muy fácilmente y afectar la granulometría.

3.3 TIPOS DE AGREGADOS PÉTREOS.

El tipo de agregado pétreo se puede determinar, de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, se pueden clasificar en los siguientes tipos:

a) Agregados Naturales.

Son aquellos que se utilizan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final. Su fragmentación se debe al efecto paulatino de los fenómenos naturales tales como el agua, aire y hielo, o a la acción repentina de fuerzas eventuales, erupciones volcánicas y sismos.

b) Agregados de Trituración.

Son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera ó de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales. La fragmentación de la roca se provoca por medios mecánicos artificiales.

c) Agregados Artificiales.

Son los subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y reciclables.

d) Agregados Marginales.

Los agregados marginales engloban a todos los materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes.

La importancia de utilizar el tipo y calidad de los agregados no debe ser subestimada pues los agregados finos y gruesos ocupan comúnmente de 60 a 70% del volumen del pavimento asfáltico.

Los materiales pétreos se dividen en agregados finos que comúnmente consisten en arena natural o material triturado siendo la mayoría de sus partículas menores que 5mm, y los agregados gruesos que consisten en grava o una combinación de gravas o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5mm y generalmente entre 9.5mm y 38mm

3.4 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

Algunas de las propiedades más importantes de los agregados son:

Granulometría: La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por análisis de tamices. El tamaño de la partícula del agregado se determina por medio de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas.

Peso Volumétrico: El peso volumétrico de un agregado, es el peso del agregado que se requiere para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado.

Peso Específico: El peso específico (densidad relativa) de un agregado es la relación de su peso respecto al peso de un volumen absoluto igual de agua (agua desplazada por inmersión). Se usa en ciertos cálculos para proporcionamientos de mezclas y control.

Absorción: La absorción de los agregados se determina con el fin de controlar el contenido neto de agua en el asfalto y se puedan determinar los pesos correctos de cada mezcla.

Para este estudio se analizaron materiales triturados y tezontle que son los más utilizados en la región de Morelia, el triturado que es producto de roca ígnea de tipo extrusiva, y su extracción es a cielo abierto con explosivos (barrenos), de cantos angulares, color gris o negro, son resistentes y se obtienen agregados artificiales como son las gravas y las arenas. Y el tezontle que es de tipo ígnea extrusiva su extracción es con pico, cinceles, marros etc. Es un material poroso, ligero de color rojo o negro y con forma angulosa.

El material triturado fue traído del banco “Supra” que es productor de grava y arena triturada, ubicado sobre la carretera Morelia-Salamanca. Dentro de la descripción geológica corresponde a depósitos de lavas y de tobas de composición andesítica, de origen volcánico, las lavas presentan color gris claro.

El material tezontle fue traído del banco “Cerritos” productor de arena y grava volcánica ubicado sobre la carretera Morelia-Quiroga. Su descripción geológica está poblado con varios conos volcánicos de los que se realiza la explotación, en varios frentes, compuesto predominantemente por material basáltico y piroclástico, (Cenizas y arenas en particular).



Figura 3.1 Parte del proceso de cribado del banco de material “Cerritos”



Figura 3.2 Deposito del material pétreo listo para utilizarse del banco de material “Cerritos”



Figura 3.3 Material triturado del banco “Supra”

CAPÍTULO IV

ASFALTO

4.1 DEFINICIÓN

De acuerdo con la SCT el asfalto también llamado cemento asfáltico, es el último residuo de la destilación del petróleo de color negro, constituido principalmente por asfáltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida. Para poder mezclarlo con los materiales pétreos, éste debe tener una temperatura de 140 °C.

Los materiales asfálticos se emplean en la elaboración de carpetas, mezclas, morteros, riegos y estabilizaciones, ya sea para aglutinar los materiales pétreos utilizados, para ligar o unir diferentes capas del pavimento; o bien para estabilizar bases o sub-bases. También se pueden usar para construir, fabricar o impermeabilizar otras estructuras, tales como algunas obras complementarias de drenaje, entre otras.

4.2 CLASIFICACIÓN DEL ASFALTO

Los materiales asfálticos se clasifican en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, dependiendo del vehículo que se emplee para su incorporación o aplicación, como se muestra en la Tabla 4.1.

TABLA 4.1 Clasificación de los materiales asfálticos

Material asfáltico	Vehículo para su aplicación	Usos más comunes
Cemento asfáltico	Calor	Se utiliza en la elaboración en caliente de carpetas, mezclas, morteros y estabilizaciones, así como elemento base para la fabricación de emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados.
Emulsión asfáltica	Agua	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas, mezclas, morteros, riegos y estabilizaciones.
Asfalto rebajado	Solventes	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas y para la impregnación de sub-bases y bases hidráulicas.

4.3 TIPOS DE MATERIALES ASFÁLTICOS

4.3.1 Cementos Asfálticos

Los cementos asfálticos son los que se obtienen del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo.

Según su viscosidad dinámica a sesenta (60) grados Celsius, los cementos asfálticos se clasifican como se indica en la Tabla 4.2, donde se señalan los usos más comunes de cada uno.

TABLA 4.2 Clasificación de los cementos asfálticos según su viscosidad dinámica a 60°C

Clasificación	Viscosidad a 60°C Pa·s (P [1])	Usos más comunes
AC – 5	50 ± 10 (500 ± 100)	- En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente. - En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen para riegos de impregnación, de liga y poreo con arena, así como en estabilizaciones.
AC – 10	100 ± 20 (1 000 ± 200)	- En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente. - En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos.
AC – 20	200 ± 40 (2 000 ± 400)	- En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente. - En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos.
AC - 30	300 ± 60 (3 000 ± 600)	- En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente. - En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos. - En la elaboración de asfaltos rebajados en general, para utilizarse en carpetas de mezcla en frío, así como en riegos de impregnación.

Los cementos asfálticos también se pueden clasificar de la siguiente manera:

Cementos Asfálticos Grado PG

Son aquellos cuyo comportamiento en los pavimentos está definido por las temperaturas máxima y mínima que se esperan en el lugar de su aplicación, dentro de las cuales se asegura un desempeño (performance) adecuado para resistir deformaciones o agrietamientos por temperaturas bajas o por fatiga, en condiciones de trabajo que se han correlacionado con ensayos especiales y simulaciones de envejecimiento a corto y a largo plazo. Estos ensayos miden propiedades físicas que pueden ser directamente relacionadas, mediante principios de ingeniería, con el comportamiento en obra.

Y deben cumplir con los requisitos que se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Requisitos de calidad para cementos asfálticos clasificados según su viscosidad dinámica a 60° C.

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

Grado de desempeño (pg)

El grado de desempeño o Grado PG es el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente. El Grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una determinada obra, en función del clima dominante y de la magnitud del tránsito a que estará sujeta durante su vida útil.

Un cemento asfáltico clasificado como PG 64-22 tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como sesenta y cuatro (64) grados Celsius y tan bajas como menos veintidós (-22) grados Celsius. Las temperaturas máximas y mínimas se extienden tanto como sea necesario con incrementos estandarizados de seis (6) grados. Sin embargo, generalmente las temperaturas máximas se consideran de sesenta y cuatro (64) a ochenta y ocho (88) grados Celsius y las mínimas, de menos cuarenta (-40) a menos veintidós (-22) grados Celsius.

Los grados PG pueden ser tantos y tan amplios como la gama de temperaturas que se registran en el país, sin embargo, para fines prácticos, es recomendable seleccionar un cemento asfáltico que corresponda a uno de los tres (3) grados PG que se indican en la Figura 4.3.1, de acuerdo con el clima de la zona geográfica donde se le pretenda utilizar, de

entre las zonas en que se ha dividido la República Mexicana que se muestran en la misma Figura, pero considerando que dentro de una misma zona, las condiciones del clima en un área determinada pueden variar, lo que se debe tomar en cuenta para elegir el Grado PG adecuado.

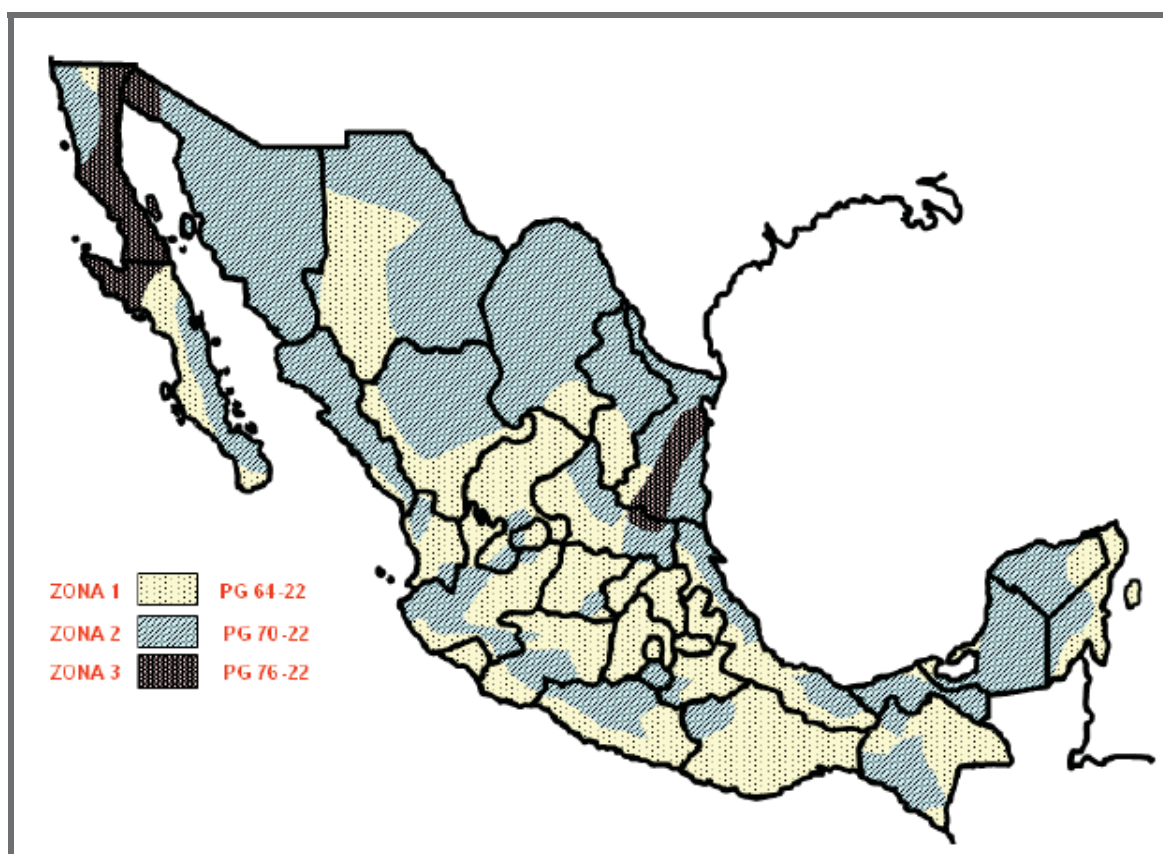


Figura 4.1 Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos grado PG

La temperatura máxima del Grado PG seleccionado según el clima, se ajusta de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de ocho coma dos (8,2) toneladas, acumulados durante un periodo de servicio del pavimento de diez (10) años (ΣL_{10}) y de acuerdo con la velocidad de operación.

Se considera que los cementos asfálticos, cuando se clasifiquen según su desempeño para resistir deformaciones o agrietamientos por temperaturas bajas o por fatiga, en condiciones de trabajo, de acuerdo con las temperaturas máxima y mínima que se esperan en el lugar de su aplicación (Grado PG), han de cumplir con los requisitos de calidad que se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Requisitos de calidad para cementos asfálticos grado PG

Grado de comportamiento	PG 64				PG 70				PG 76		
	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34
Temperatura máxima de diseño del pavimento (promedio de 7 días), ° C	64				70				76		
Temperatura mínima de diseño del pavimento, ° C	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34
Asfalto original											
Punto de inflamación Cleveland ; ° C, min.	230										
Viscosidad dinámica a 135°C; Pa-s, máximo	3										
Modulo reológico de corte dinámico (G/ sen δ) kPa, mínimo	2.2										
Temperatura de prueba a 10 rad/ s; ° C	64				70				76		
Después de envejecimiento en vasija de presión temperatura y aire											
Temperatura de envejecimiento PAV; ° C - En climas normales - En climas desérticos	100 100				100 110				100 110		
Índice de endurecimiento físico, máximo	Reportar										
Rigidización (G° sen δ); kPa, máxima	5000										
Temperatura de prueba a 10 rad/s; ° C	25	22	19	16	28	25	22	19	31	28	25
Rigidez de flexión S(t); MPa, máximo (m=0.3 min)	300										
Temperatura de prueba a 60 s, ° C	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24

Para la elaboración de las pastillas que serán probadas por susceptibilidad a la humedad se decidió utilizar un cemento asfáltico Grado PG 64 por ser la clasificación usual que se le da a un cemento asfáltico AC-20 convencional y así estar del lado de la seguridad.



Figura 4.2 Tanques de almacenamiento del asfalto



Figura 4.3 Extracción del cemento asfáltico que se utilizó para la elaboración de pastillas

4.3.2 Emulsiones Asfálticas

Las emulsiones asfálticas son materiales asfálticos líquidos estables, constituidos por dos fases no miscibles, en los que la fase continua de la emulsión está formada por agua y un agente emulsificante, y la fase discontinua por pequeños glóbulos de cemento asfáltico. Se denominan emulsiones asfálticas aniónicas cuando el agente emulsificante confiere polaridad electronegativa a los glóbulos y emulsiones asfálticas catiónicas, cuando les confiere polaridad electropositiva.

Las emulsiones asfálticas pueden ser de los siguientes tipos:

- **De rompimiento rápido**, que generalmente se utilizan para riegos de liga y carpetas por el sistema de riegos.
- **De rompimiento medio**, que normalmente se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta, especialmente cuando el contenido de finos en la mezcla es igual que dos (2) por ciento o menor, así como en trabajos de conservación tales como bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas.
- **De rompimiento lento**, que comúnmente se utilizan para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas.
- **Para impregnación**, que particularmente se utilizan para impregnaciones de subbases y/o bases hidráulicas.
- Superestables, que principalmente se emplean en estabilizaciones de materiales y en trabajos de recuperación de pavimentos.

Según su contenido de cemento asfáltico en masa, su tipo y polaridad, las emulsiones asfálticas se clasifican como se indica en la Tabla 4.5.

TABLA 4.5 Clasificación de las emulsiones asfálticas

Clasificación	Contenido de cemento asfáltico en masa %	Tipo	Polaridad
EAR-55	55	Rompimiento rápido	Aniónica
EAR-60	60		
EAM-60	60	Rompimiento medio	
EAM-65	65		
EAL-55	55	Rompimiento lento	
EAL-60	60		
EAI-60	60	Para impregnación	
ECR-60	60	Rompimiento rápido	Catiónica
ECR-65	65		
ECR-70	70		
ECM-65	65	Rompimiento medio	
ECL-65	65	Rompimiento lento	
ECI-60	60	Para impregnación	
ECS-60	60	Sobrestabilizada	

4.3.3 Asfaltos Rebajados

Los asfaltos rebajados, que regularmente se utilizan para la elaboración de carpetas de mezcla en frío, así como en impregnaciones de bases y subbases hidráulicas, son los materiales asfálticos líquidos compuestos por cemento asfáltico y un solvente, clasificados según su velocidad de fraguado como se indica en la Tabla 4.6.

TABLA 4.6 Clasificación de los asfaltos rebajado

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

CAPÍTULO V

PRUEBAS DE LABORATORIO

Como se mencionó al principio se tuvieron que caracterizar los agregados, el asfalto y posteriormente las pastillas, con las pruebas que a continuación se mencionan.

Pruebas en los Agregados Pétreos

Se llevaron a cabo mediante la normativa de la SCT las siguientes pruebas para la caracterización de los agregados.

- Granulometría de materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas
- Equivalente de Arena de Materiales Pétreos para Mezclas asfálticas
- Densidad Relativa de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas
- Partículas Alargadas y Lajeadas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas
- Desgaste mediante la Prueba de los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas
- Caras Fracturadas Recomendación ASTM D 5821-95

Pruebas para el Asfalto

Se llevaron a cabo mediante la normativa de la SCT las siguientes pruebas

- Penetración en Cementos y Residuos Asfálticos
- Ductilidad de Cementos y Residuos Asfálticos
- Punto de Reblandecimiento en Cementos Asfálticos

Las cuales se llevaron a cabo en un laboratorio privado de nombre “Prolasa” en el estado de San Luis Potosí.

Para la Mezcla y Pastillas

Para poder elaborar las pastillas que serán probadas por humedad primero es necesario realizar la prueba de volumetría, para poder ajustar el número de vacíos que se requerirán y de igual forma la prueba de Densidad Rice para conocer la Densidad teórica máxima de la mezcla no compactada, una vez hechas estas pruebas tendremos los valores de G_{mb} y G_{mm} que necesitamos.

- Volumetría Norma ASTM D-1188 o D-2726
- Densidad Rice Norma ASTM D-2041-03
- Pruebas de TSR Recomendación AMAAC RA-04/2008

5.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS A LOS AGREGADOS PÉTREOS

Una vez seleccionados los materiales pétreos con los que se iba a trabajar se les realizaron las pruebas que a continuación se muestran.

5.1.1 Prueba de Granulometría

Procedimiento de Prueba de Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

La prueba se realizó de acuerdo al procedimiento que señala la normativa de la SCT, y su objetivo es determinar la composición por tamaños de las partículas del material pétreo empleado en mezclas asfálticas mediante su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas, el procedimiento que se siguió se menciona a continuación.

- 1.- Teniendo seleccionados los materiales que se iban a utilizar “Triturado” y “Tezontle” se vació el material en una superficie limpia y seca para poder comenzar a trabajar, cuidando que estos no tuvieran humedad, de lo contrario se secaban en el sol previamente.
- 2.- Se cuarteo cada material por separado, siguiendo una misma dirección de mezclado y altura para no tener variaciones.
- 3.- Para el llenado del recipiente de 10 dm^3 , se tomaron 2 cuartos opuestos, se retiró el exceso de material con la varilla y se procedió a pesar.
- 4.- Se colocó en una charola y se pasó por las mallas correspondientes cuidando de no tener mucho material para que fuera más rápido y fácil el cribado y se registraron los pesos de cada una de las mallas. Los resultados se muestran a continuación.

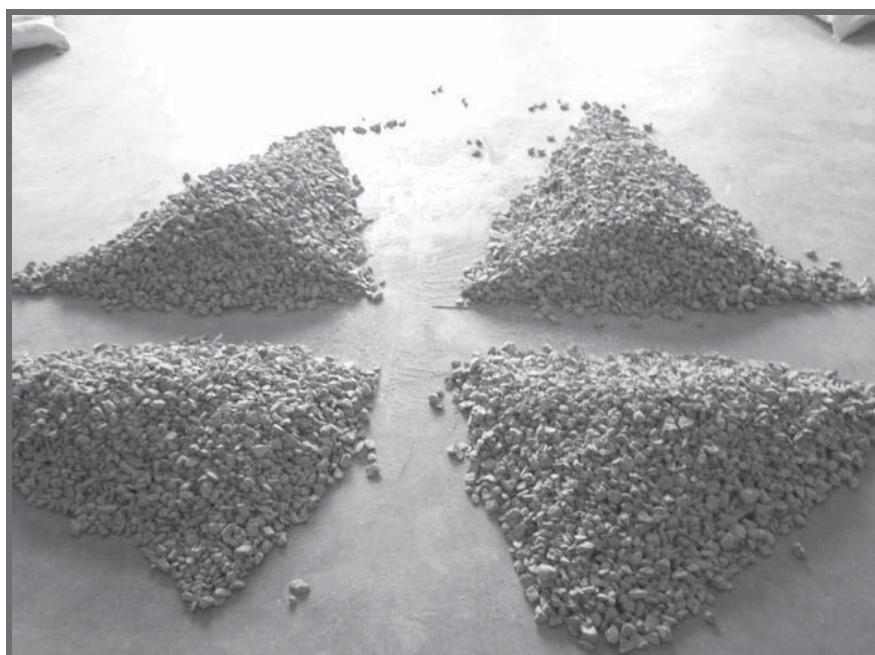


Figura 5.1 Cuarteo de material pétreo

Granulometría de Material Triturado

Tabla 5.1 Análisis granulométrico para la grava

Peso de la muestra (gr)	Peso de la tara (gr)	Peso del material (gr)	Volumen de la tara	P.V.S.S.
9150	2450	6700	4820	1390

Malla	Malla (mm)	Peso retenido parcial	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje acumulativo	% que pasa
2"	50	0	0	0	100
1 1/2"	37.5	0	0	0	100
1"	25	0	0	0	100
3/4"	19	1450	21.64	22	78
1/2"	12.5	3400	50.75	72	28
3/8"	9.5	1510	22.54	95	5
1/4"	6.35	310	4.63	100	0
4	4.75	2.5	0.04	100	0
pasa 4		27.5	0.41		

Tabla 5.2 Análisis granulométrico para el sello

Peso de la muestra (gr)	Peso de la tara (gr)	Peso del material (gr)	Volumen de la tara	P.V.S.S.
9290	2450	6800	4820	1419

Malla	Malla (mm)	Peso retenido parcial	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje retenido acumulativo	% que pasa
2"	50	0	0	0	100
1 1/2"	37.5	0	0	0	100
1"	25	0	0	0	100
3/4"	19	0	0	0	100
1/2"	12.5	0	0	0	100
3/8"	9.5	400	5.85	6	94
1/4"	6.35	4260	62.28	68	32
4	4.75	1770	25.88	94	6
10	2.00	390	5.70	100	0
20	0.850	2.1	0.03	100	0
40	0.425	1	0.01	100	0
60	0.250	0.5	0.0073	100	0
100	0.150	0.8	0.0117	100	0
200	0.075	2.7	0.04	100	0

Tabla 5.3 Análisis granulométrico para la arena

Peso de la muestra (gr)	Peso de la tara (gr)	Peso del material (gr)	Volumen de la tara	P.V.S.S.
10150	2450	7700	4820	1597

Malla	Malla (mm)	Peso retenido parcial	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje retenido acumulativo	% que pasa
2"	50	0	0	0	100
1 1/2"	37.5	0	0	0	100
1"	25	0	0	0	100
3/4"	19	0	0	0	100
1/2"	12.5	0	0	0	100
3/8"	9.5	0	0	0	100
1/4"	6.35	26.0	0.34	0	100
4	4.75	31.7	0.41	0	100
pasa 4		7642.3	99.25		
10	2.00	4220	54.81	55	45
20	0.850	1410	18.31	73	27
40	0.425	670	8.70	82	18
60	0.250	222.2	2.89	85	15
100	0.150	198.6	3	88	12
200	0.075	312.5	4.06	92	8
pasa 200		609	7.91	100	0

Granulometría de Material Tezontle

Tabla 5.4 Análisis granulométrico para la grava

Peso de la muestra (gr)	Peso de la tara (gr)	Peso del material (gr)	Volumen de la tara	P.V.S.S.
7700	2450	5250	4820	1089

Malla	Malla (mm)	Peso retenido parcial	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje retenido acumulativo	% que pasa
2"	50	0	0	0	100
1 1/2"	37.5	0	0	0	100
1"	25	530	10	10	90
3/4"	19	1915	36	47	53
1/2"	12.5	1620	31	77	23
3/8"	9.5	630	12	89	11
1/4"	6.35	310	6	95	5
4	4.75	110	2	97	3
pasa 4		135	3	100	0

Tabla 5.5 Análisis granulométrico para el sello

Peso de la muestra (gr)	Peso de la tara (gr)	Peso del material (gr)	Volumen de la tara	P.V.S.S.
7960	2450	5510	4820	1143

Malla	Malla (mm)	Peso retenido parcial	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje retenido acumulativo	% que pasa
2"	50	0	0	0	100
1 1/2"	37.5	0	0	0	100
1"	25	0	0	0	100
3/4"	19	0	0	0	100
1/2"	12.5	300	5	5	95
3/8"	9.5	570	10	16	84
1/4"	6.35	2375	43	59	41
4	4.75	1625	29	88	12
pasa 4		640	12	100	0
10	2.00	445.4	10.35	99	1
20	0.850	0.8	0.02	99	1
40	0.425	1.1	0.03	99	1
60	0.250	1.1	0.03	99	1
100	0.150	1.6	0.04	99	1
200	0.075	15.9	0.37	99	1
pasa 200		34.1	0.79	100	0

Tabla 5.6 Análisis granulométrico para la arena con grueso

Peso de la muestra (gr)	Peso de la tara (gr)	Peso del material (gr)	Volumen de la tara	P.V.S.S.
8580	2450	6130	4820	1271

Malla	Malla (mm)	Peso retenido parcial	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje retenido acumulativo	% que pasa
2"	50	0	0	0	100
1 1/2"	37.5	0	0	0	100
1"	25	0	0	0	100
3/4"	19	0	0	0	100
1/2"	12.5	0	0	0	100
3/8"	9.5	0	0	0	100
1/4"	6.35	103.5	1.69	2	98
4	4.75	760	12.40	14	86
10	2.00	3640	59.38	73	27
20	0.850	606	9.89	83	17
40	0.425	436.8	7.13	90	10
60	0.250	147	2.40	93	7
100	0.150	101.8	1.66	95	5
200	0.075	208.1	3.39	98	2
pasa 200		126.8	2.07	100.00	0

Tabla 5.7 Análisis granulométrico para la arena con fino

Peso de la muestra (gr)	Peso de la tara (gr)	Peso del material (gr)	Volumen de la tara	P.V.S.S.
8540	2450	6090	4820	1263

Malla	Malla (mm)	Peso retenido parcial	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje retenido acumulativo	% que pasa
2"	50	0	0	0	100
1 1/2"	37.5	0	0	0	100
1"	25	0	0	0	100
3/4"	19	0	0	0	100
1/2"	12.5	0	0	0	100
3/8"	9.5	0	0	0	100
1/4"	6.35	0	0	0	100
4	4.75	386.3	6.34	6	94
10	2.00	2500	41.05	47	53
20	0.850	1260	20.69	68	32
40	0.425	760	12.48	81	19
60	0.250	300	4.93	85	15
100	0.150	302.6	4.97	90	10
200	0.075	315.5	5.18	96	4
pasa 200		265.6	4.36	100	0

5.1.2 Prueba de Densidad y Absorción

Procedimiento de Prueba de Densidad Relativa de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

La prueba se realizó de acuerdo al procedimiento que señala la normativa de la SCT, su objetivo es determinar la densidad relativa de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas con el fin de conocer la masa de sólidos por unidad de volumen de dichos sólidos sin vacíos en cada una de sus fracciones. El procedimiento fue el siguiente:

- 1.- Se separa el material en arenas y gravas, para arenas se utiliza material que pasa la malla 4 y para gravas el que pasa 3/4" y retiene 3/8".
- 2.- Se tomaron fracciones del material que pasa la malla 4, registrando sus pesos como P.W. y se pusieron a secar en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ aproximadamente unas 18 hrs.
- 3.- Una vez transcurrido este tiempo se sacaron y pesaron registrándose el peso como P.S
- 4.- Cuidadosamente se agrego el material al matraz el cual tenía un volumen conocido y se registró el nuevo volumen, con los datos anteriores se calculó la densidad y la absorción.
- 5.- Para las gravas el material se puso a saturar 24 hrs, transcurrido ese tiempo se retiro el agua, se seco superficialmente y se colocó en el picnómetro para obtener las lecturas requeridas, posteriormente el material se seco en el horno y con estos datos se calculó la densidad y absorción. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 5.8 Resultados de las pruebas de densidad y absorción del material triturado

Material	P.W. (gr)	P.S. (gr)	Volumen	Densidad	Absorción	Norma (Para $\sum L > 106$)
Grava	516.11	498.1	195	2.65	3.61	2.4 min
Sello	318.3	305.9	190	2.63	4.05	
Arena	500	491.1	187	2.67	1.81	

Tabla 5.9 Resultados de las pruebas de densidad y absorción del material tezontle

Material	P.W. (gr)	P.S. (gr)	Volumen	Densidad	Absorción	Norma (Para $\sum L > 106$)
Grava	450.9	435.7	203	2.22	3.49	2.4 min
Sello	377.2	363.4	180	2.10	3.80	
Arena c / grueso	500	480.4	175	2.29	4.08	
Arena c / fino	300	292.4	192	2.34	2.60	



Figura 5.2 Prueba de densidad del material tezontle

5.1.3 Prueba de Equivalente de arena

Procedimiento de Prueba de Equivalente de Arena de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

La prueba se realizó de acuerdo al procedimiento que señala la normativa de la SCT su objetivo es determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. El procedimiento es el siguiente:

- 1.- Para esta prueba se utilizó material que pasa la malla 4, el cual se cuarteo previamente y se tomaron los dos cuartos opuestos para después pesar aproximadamente 110 gr., para cada prueba.
- 2.- Previamente ya se tenía una probeta llena hasta 4" con solución para equivalente de arena.
- 3.- Una vez teniendo lista la probeta se vació el material con un embudo y se golpeo ligeramente la probeta para eliminar el aire atrapado.
- 4.- Se dejó reposar aproximadamente 10 minutos, se tapó y se agitó 90 ciclos.
- 5.- Para después retirar el tapón y llenarla con solución hasta 15", se volvió a dejar reposar aproximadamente 20 minutos.
- 6.- Se observó y se tomó la lectura del nivel de finos

7.- Después se introdujo la varilla con el pistón, cuidando de no formar turbulencias hasta que descanso en la arena y se registró la medida.

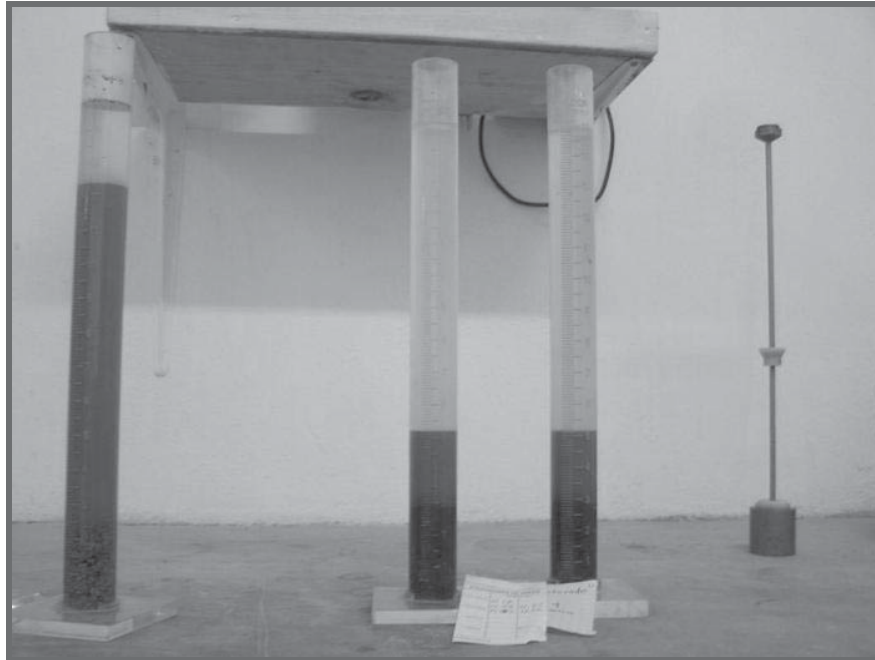


Figura 5.3 Prueba de equivalente de arena del material tezontle

Resultados

Tabla 5.10 Resultados de la prueba de equivalente de arena del material triturado

	Probeta 1	Probeta 2	Norma (Para $\sum L > 106$)
Hora inicial	11:18	11:18	% min 50
Hora final	11:50	11:52	
L. arcilla	4.7	4.6	
L. arena	2.8	2.8	
	60	61	
Prom. E. Arena	60		

Tabla 5.11 Resultados de la prueba de equivalente de arena del material tezontle

	Probeta 1	Probeta 2	Norma (Para $\sum L > 106$)
Hora inicial	11:18	11:20	% min 50
Hora final	11:50	11:52	
L. arcilla	4.5	4.6	
L. arena	4.1	4.1	
	91.1	89.1	
Prom. E. Arena	90		

5.1.4 Prueba de Desgaste de los Ángeles

Procedimiento de Desgaste Mediante la Prueba de los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

La prueba se realizó de acuerdo al procedimiento que señala la normativa de la SCT:

- 1.- El material se revolvió y cuarteó tomando para la prueba los dos cuartos opuestos.
- 2.- Una vez cuarteado se tomó una muestra de aproximadamente 5 kg., y se lavo para eliminar el polvo y se seco en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas aproximadamente.
- 3.- Ya seco el material se peso y registro como P_i y se introdujo en la Máquina de los Ángeles la cual ya estaba limpia y preparada.
- 4.- De acuerdo con la tabla de la norma que se muestra a continuación, tenemos un tipo de muestra B por la composición de nuestro material y nos corresponde colocar un número de esferas de 11.

Tabla 5.12 Composición de la muestra de prueba y cargas abrasivas.

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción g	Carga abrasiva	
	mm	Designación		Número de esferas	Masa total g
A	37,5 - 25	1½" - 1"	1 250 ± 25	12	5 000 ± 25
	25 - 19	1" - ¾"	1 250 ± 25		
	19 - 12,5	¾" - ½"	1 250 ± 10		
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	1 250 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
B	19 - 12,5	¾" - ½"	2 500 ± 10	11	4 584 ± 25
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
C	9,5 - 6,3	⅜" - ¼"	2 500 ± 10	8	3 330 ± 20
	6,3 - 4,75	¼" - N°4	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
D	4,75 - 2	N°4 - N°10	5 000 ± 10	6	2 500 ± 15

5.- Las cuales se pesaron previamente y se revisó el diámetro para verificar que estuviera dentro del rango que marca la norma y que es de 47mm con un peso de entre 390 y 445gr cada una y nos dieron pesos de entre 417 y 418 gramos con ese diámetro.

6.- Checado lo anterior se prendió la Máquina y se hizo funcionar a una velocidad angular de 30 rpm durante 500 revoluciones.

7.- Transcurrido ese tiempo se retira el material de la Máquina y se lava, para posteriormente secarse en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta que ya no presente humedad.

8.- Se deja enfriar la muestra y se le toma el peso que se registra como Pf, y se hacen los cálculos necesarios para obtener el desgaste por trituración.

Tabla 5.13 Resultados de las prueba de desgaste de los ángeles del material triturado y tezontle

Material	Triturado	Tezontle
Pi (grs)	4980	4990
Pf (grs)	3980	4145
% Desgaste	20.16	20.38

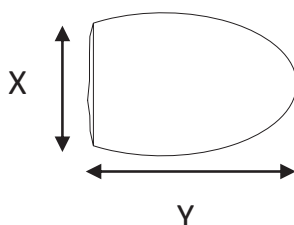
5.1.5 Prueba de Caras Fracturadas

Procedimiento de Prueba de Caras Fracturadas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

La prueba se realizó de acuerdo al procedimiento ASTM D 5821-95 y su objetivo es determinar el porcentaje de partículas fracturadas en materiales pétreos.

- 1.- Se extendió y cuarteo el material y se tomaron los dos cuartos opuestos para trabajar.
- 2.- La muestra fue de aprox. 5 kg, y se utilizó solo el material que pasó la malla #4
- 3.- Se lavó para retirar el polvo y se secó en el horno hasta que ya no tenía presencia de humedad
- 4.- Se extendió la muestra en una superficie limpia, plana y suficientemente grande para permitir la adecuada inspección de las partículas.
- 5.- Hecho lo anterior se sostuvo cada partícula del agregado de tal manera que se vieran sus caras directamente y si la cara constituía mínimo $1/4$ del máximo del área (en corte seccional), de la roca esta se consideraba como cara fracturada.

Una cara es considerada como fracturada si $X \geq .25Y$



- 6.- Se observó cuidadosamente pues se podían clasificar en tres categorías que son:

- Partículas fracturadas si la partícula cumple con el número de caras fracturadas usualmente una o dos.
- Partículas que no cumplen con el criterio
- Partículas cuestionables.

7.- Terminado lo anterior se pesó y registró cada porción de agregado y se procedió a los cálculos para determinar el porcentaje.

8.- la prueba menciona que si más del 15% del total del agregado está en la categoría de cuestionable, se debe repetir la determinación hasta que sea menos del 15%.

Tabla 5.14 Resultados de la prueba de caras fracturadas del material triturado y tezontle

Material	Triturado	Tezontle
F (grs)	1390	585.2
Q(grs)	0	390.3
N	110	518.7
P %	92.67	52.24

5.1.6 Prueba de Partículas Alargadas y Lajeadas

Prueba de Partículas Alargadas y Lajeadas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

La prueba se realizó de acuerdo al procedimiento que señala la normativa de la SCT y su objetivo es determinar el contenido de partículas de forma alargada y lajeada presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas.

- 1.- Se extiende y cuartea el material, y se toma una muestra de los dos cuartos opuestos de aproximadamente 4 kg.
- 2.- Se criba dicho material por la malla #4 y se elimina todo el que pase por está y solo se trabaja con el retenido.
- 3.- Esta prueba se realiza por duplicado por lo que se requieren dos muestras iguales.
- 4.- Se tomó una cantidad considerable de material de aproximadamente 200 piezas y se cribo por las diferentes mallas, registrándose el número de partículas retenido en cada malla y el peso de cada muestra.
- 5.- Para las partículas con forma alargada se verifica que cada pieza pase por la ranura correspondiente del calibrador de longitudes como lo marca la norma y se determina su masa.
- 6.- Y de la misma forma se hace para las partículas con forma de laja en el calibrador de espesores y se determina su masa.

7.- Finalmente con estos datos se calcula el porcentaje de partículas con forma alargada y lajeada.

Tabla 5.15 Resultados de la prueba 1 de partículas alargadas y lajeadas del material triturado

Malla	CA (% de partículas Alargadas)	CP (% de partículas Lajeadas)
4	0	0
1/4	81.32	16.74
3/8	33.23	9.40
1/2	32.51	14.51
3/4	0	0
1 "	0	0

Tabla 5.16 Resultados de la prueba 2 de partículas alargadas y lajeadas del material triturado

Malla	CA (% de partículas Alargadas)	CP (% de partículas Lajeadas)
4	0	0
1/4	73.29	10.95
3/8	41.64	9.62
1/2	31.23	12.90
3/4	0	0
1 "	0	0

Tabla 5.17 Resultados del promedio de la prueba de partículas alargadas y lajeadas del material triturado

Malla	CA (% de partículas Alargadas)	CP (% de partículas Lajeadas)
4	0	0
1/4	77.31	13.85
3/8	37.44	9.51
1/2	31.87	13.71
3/4	0	0
1 "	0	0

Tabla 5.18 Resultados de la prueba 1 de partículas alargadas y lajeadas del material tezontle

Malla	CA (% de partículas Alargadas)	CP (% de partículas Lajeadas)
4	0	0
1/4	12.61	0
3/8	12.68	12.51
1/2	12.94	21.18
3/4	0	0
1 "	0	13.51

Tabla 5.19 Resultados de la prueba 2 de partículas alargadas y lajeadas del material tezontle

Malla	CA (% de partículas Alargadas)	CP (% de partículas Lajeadas)
4	0	0
1/4	15.74	0
3/8	15.65	15.51
1/2	0	23.99
3/4	0	15.48
1 “	0	0

Tabla 5.20 Resultados del promedio de la prueba de partículas alargadas y lajeadas del material tezontle

Malla	CA (% de partículas Alargadas)	CP (% de partículas Lajeadas)
4	0	0
1/4	14.18	0
3/8	14.17	14.01
1/2	6.47	22.59
3/4	0	7.74
1 “	0	6.76

Ya teniendo los resultados de las pruebas del pétreo se realizaron las curvas granulométricas con porcentajes de material propuestos para después ajustarlas y calcular los porcentajes correctos de material y contenido de asfalto por pastilla.

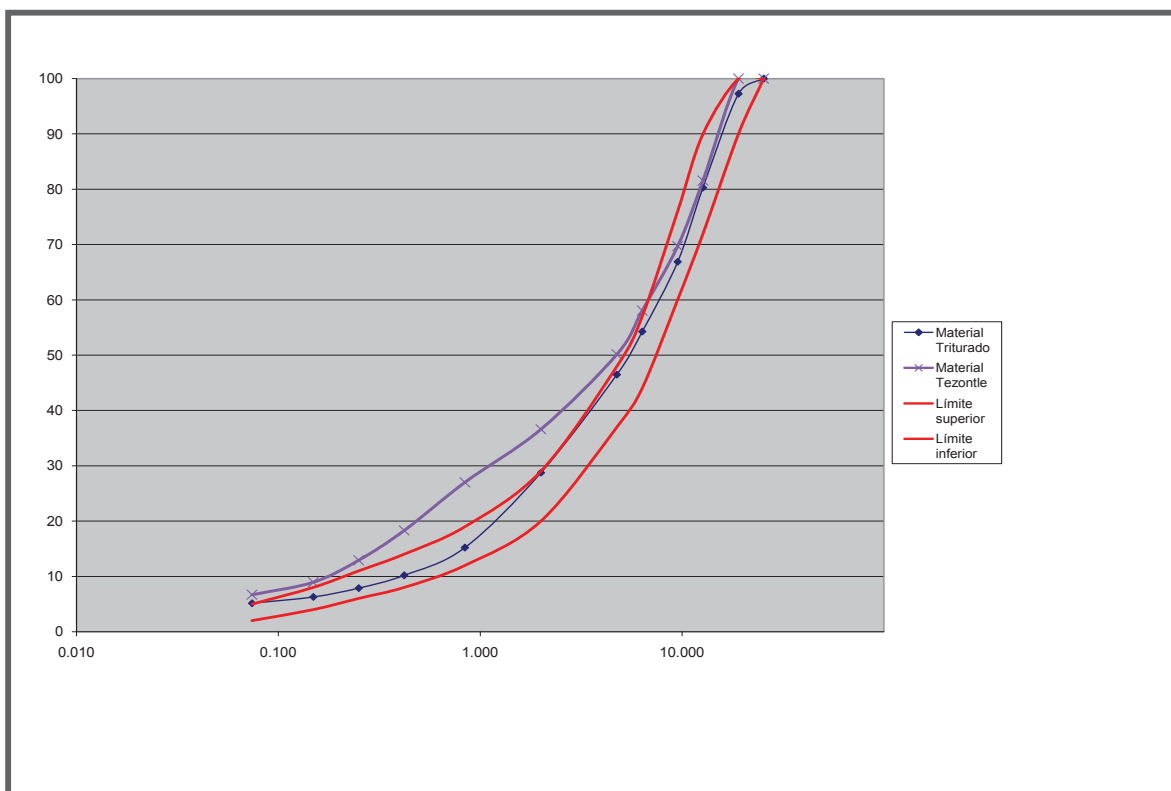


Figura 5.4 Curva granulométrica del material triturado y del tezontle

5.2 PRUEBAS EN EL ASFALTO

5.2.1 Prueba de Penetración

La prueba se realizó de acuerdo a la normativa de la SCT y su objetivo es determinar la consistencia de los cementos asfálticos mediante la penetración vertical de una aguja en una muestra bajo condiciones establecidas de masa, tiempo y temperatura, el procedimiento es el siguiente.

- 1.- Se tomó una muestra de asfalto y se calentó a 120° C por aproximadamente 30 minutos hasta que estuviera totalmente fluido para así vaciarlo en la cápsula de penetración cuidando de que no se formaran burbujas y se dejó enfriar.
- 2.- Se colocó la muestra en un baño de agua a 25° C por 2 horas.
- 3.- Transcurrido este tiempo se saca del baño la cápsula y se coloca sobre la base del penetrómetro y se ajusta la aguja para que toque la superficie de la muestra.
- 4.- Se suelta la aguja durante 5 segundos y se registra la lectura en décimos de milímetro.

5.2.2 Prueba de Ductilidad

Se realizó de acuerdo con la normativa de la SCT con el objetivo de determinar la capacidad de deformarse sin romperse de un cemento asfáltico, el procedimiento es el siguiente:

- 1.- Se calentó el asfalto durante 30 minutos aproximadamente a una temperatura de 120° C para que estuviera fluido.
- 2.- Después se llenaron las briquetas cuidadosamente y se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente.
- 3.- Para colocarlas en un baño de agua a 25° C por 30 minutos, se saca y enrasa la briqueta.
- 4.- Para regresarlas al baño por 90 minutos más.
- 5.- Pasado este tiempo se saca y coloca en el ductilómetro el cual tratará de mantener una temperatura de 25° C durante toda la prueba, y se debe de cuidar que por lo menos las briquetas estén cubiertas con agua 2.5 cm por arriba de su superficie.
- 6.- Se prende el aparato y se pone a una velocidad de 5 cm/min.
- 7.- Y finalmente se tiene que observar la ruptura de la briqueta y registrar el dato.



Figura 5.5 Prueba de ductilidad al asfalto

5.2.3 Prueba de Punto de Reblandecimiento

Se realizó de acuerdo con la normativa de la SCT y su objetivo es estimar la consistencia de los cementos asfálticos, se basa en la determinación de la temperatura a la cual una esfera de acero produce una deformación y el procedimiento es el siguiente:

- 1.- Se calentó el asfalto durante 30 minutos aproximadamente a una temperatura de 120°C para que estuviera fluido.
- 2.- Después se llenaron los anillos cuidadosamente y se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente.
- 3.- Se cortan los excesos de material asfáltico.
- 4.- Se llenó el vaso de vidrio 10 cm con agua potable a una temperatura de $5 \pm 1^{\circ}\text{C}$, y se introducen los anillos.
- 5.- Se coloca en la parrilla y se registra la temperatura para cada anillo en el momento en que el material asfáltico toque la placa inferior del soporte.



Figura 5.6 Prueba de punto de reblandecimiento del asfalto

Tabla 5.21 Resultados de la prueba de penetración, ductilidad y punto de reblandecimiento del asfalto

Prueba	Resultado	Norma (AC-20)
Penetración	110 mm	60 mm mínimo
Ductilidad	100 cm	50 cm mínimo
Punto de Reblandecimiento	40 ° C	48-56

Como podemos observar el asfalto no cumple con los valores que señala la norma, debido a que es un asfalto muy blando.

CAPÍTULO VI

DISEÑO VOLUMÉTRICO

6.1 GRANULOMETRÍA DE PASTILLAS

Con toda la información obtenida se procedió a calcular los porcentajes de material y de asfalto además de fijar el número de giros requeridos para compactar la pastilla para volumetría, que fueron 100. Los porcentajes de material y asfalto finales se muestran a continuación para cada material



Figura 6.1 Charolas con los porcentajes de material pétreo correspondientes para elaborar las pastillas de material triturado

Tabla 6.1 Resultados de los porcentajes de material pétreo para las pastillas de material triturado

MATERIAL TRITURADO				
Pesos de la muestra de prueba				
Peso de la muestra =		1350	Gramos	
% De cada muestra =		38%(grava)	15%(sello)	47%(arena)
Tamaño del tamiz		Agregado 1	Agregado 2	Agregado 3
mm	pulgadas			
50	2"			
37.5	1 1/2"			
25	1"			
19	3/4"	112.9		
12.5	1/2"	261.6		
9.5	3/8"	112.9	12.2	
8.3	1/4"	25.7	125.6	
4.75	#4		52.7	
2.36	#10		12.2	349.0
1.18	#20			114.2
0.6	#40			57.1
0.3	#60			19.0
0.15	#100			19.0
0.075	#200			25.4
Pasa la malla 200				50.8
Totales		513.1	202.7	634.5

Nota: El porcentaje de asfalto que se utilizó para la elaboración de estas pastillas fue de 5.1%, que equivale a 72.6 gr.

Tabla 6.2 Resultados de los porcentajes de material petreo para las pastillas de material tezontle

MATERIAL TEZONTLE					
Pesos de la muestra de prueba					
Peso de la muestra =		1350	gramos		
% De cada muestra =		36% (grava)	15% (sello)	7%(arena c/grueso)	42%(arena c/fino)
Tamaño del tamiz		Agregado 1	Agregado 2	Agregado 3	Agregado 4
mm	pulgadas				
50	2"				
37.5	1 1/2"				
25	1"				
19	3/4"				
12.5	1/2"	374.2	10.1		
9.5	3/8"	63.2	20.3		
8.3	1/4"	24.3	87.1	1.9	
4.75	#4	9.7	60.8	11.3	34.0
2.36	#10	14.6	20.3	55.8	215.5
1.18	#20		2.0	9.5	136.1
0.6	#40		2.0	6.6	73.7
0.3	#60			2.8	28.4
0.15	#100			1.9	28.4
0.075	#200			2.8	28.4
Pasa la malla 200				1.9	22.7
Totales		486.0	202.6	94.5	567.2

Nota: El porcentaje de asfalto que se utilizó para la elaboración de estas pastillas fue de 9%, que equivale a 132.7 gr.



Figura 6.2 Charolas con los porcentajes de material pétreo correspondientes para elaborar las pastillas de material tezontle

6.2 PRUEBA DE DENSIDAD RICE

Se realizó la prueba de densidad rice siguiendo el procedimiento que a continuación se describe.

- 1.- Se pesa el material que fueron 2000 gr para triturado y 2000 gr para tezontle.
- 2.- Se dejó reposar durante 1 hr aproximadamente.
- 3.- Después se colocó en el horno a una temperatura de 135°C durante 2hrs.
- 4.- También se metió el asfalto a calentar a 145°C durante 1 hora, el porcentaje utilizado fue de 9.0% para tezontle y 5.1% para triturado.
- 5.- Transcurrido este tiempo se procedió a mezclar el agregado con el asfalto.
- 6.- Para inmediatamente después separar la mezcla en partículas más pequeñas y que fuera más fácil trabajarla en la cámara de vacío.
- 7.- Se pesa el material con el picnómetro.
- 8.- Ya pesado se le agrega agua hasta que esta llegue más o menos una pulgada por encima del material, se tapo perfectamente y se reguló para que tuviera una presión de 30mm de mercurio por 10 minutos.
- 9.- Posteriormente se obtuvo el peso sumergido en agua, y se calculó el Gmm para cada material.



Figura 6.3 Colocación del material pétreo en el recipiente de vacío durante la prueba de densidad rice



Figura 6.4 Recipiente de vacío armado y encendido durante la realización de la prueba de densidad rice



Figura 6.5 Obtención del peso del material sumergido en agua para la prueba de densidad rice

Tabla 6.3 Resultados de la prueba de densidad rice para material triturado y tezontle

Material	Peso seco de la mezcla suelta (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Peso del Picnómetro (gr)	Gmm
Triturado	2067	1112	23	2.218
Tezontle	2002	1194	23	2.550

6.3 PRUEBA DE VOLUMETRÍA

Una vez obtenido la densidad teórica máxima de la mezcla se hizo la volumetría para cada material, de la cual también se describe el procedimiento.

- 1.- Se Pesó el material 1350 gr para tezontle y 1350 gr para triturado y se dejó reposar una hora antes de meterlo al horno.
- 2.- Después se metió el material al horno aproximadamente 2hrs a 140°C para que el agregado tuviera la temperatura de mezclado.
- 3.- También se colocó el asfalto a la misma temperatura aproximadamente 50 minutos. Para el tezontle el porcentaje fue de 9.0% y para triturado de 5.1%.
- 4.- Luego de este tiempo se mezcló el agregado con el asfalto y se volvió a meter la mezcla al horno a 145°C para la compactación, las charolas de material triturado se dejaron 2 hrs y las de tezontle 4 hrs.

5.- Como el tezontle requería más tiempo se empezó con esas para que salieran primero y nos diera tiempo de compactar mientras estaban las de triturado.

6.- Cuando la mezcla cumplió el tiempo de curado se empezaron a hacer las pastillas compactando a 75 giros pero al momento de sacar la pastilla se disgregó bastante y no se podía tocar porque se desbarataba y entonces la compactación se hizo a 100 giros para poder trabajar con ellas.

7.- Se dejaron enfriar más o menos 17 horas para poder trabajar con las pastillas.

8.- Después se obtuvieron los pesos aire, agua y superficialmente seco.

9.- Al calcular el porcentaje de absorción de la primer pastilla de tezontle este salió de 6.41% y como es muy grande ya que no debe dar mayor de 2, se cubrió la pastilla 2 con estearato de zinc para sacar los pesos y su porcentaje de absorción dio de 3.76%.

10.- A las pastillas de triturado no se les puso nada se pesaron tal cual estaban.

11.- Y finalmente con los pesos obtenidos se calculó el Gmb de cada material.

Tabla 6.4 Resultados de la prueba de volumetría para material tezontle y triturado

Tezontle			Triturado	
Datos	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 1	Prueba 2
Peso seco	1300 gr	1311 gr	1296 gr	1151 gr
Peso sumergido	629 gr	595 gr	743 gr	655 gr
Peso semiseco	1346 gr	1339 gr	1311 gr	1166 gr
Gmb	1.813	1.762	2.282	2.252
% Absorción	6.42	3.76	2.641	2.935

Nota: La pastilla 2 de Tezontle se cubrió con estearato de zinc.

Se observa que la absorción es demasiado grande debido a que hay una gran cantidad de vacíos en la pastilla.



Figura 6.6 Pastilla para volumetria de material tezontle saliendo del compactador giratorio, donde se observa que tiene un gran número de vacíos debido a la segregación del material



Figura 6.7 Pastilla de material tezontle cubierta con estearato de zinc por su gran contenido de absorción

Con estos datos se fijó el número de giros para compactar las pastillas de prueba y se llegó a la conclusión de que ambos materiales se compactarían a 100 giros, con los porcentajes de material y asfalto que ya se tenían. Y así se pudieron calcular los parámetros volumétricos de la mezcla que señala el protocolo y que se muestran a continuación.

Tabla 6.5 Parámetros volumétricos del material triturado y tezontle

Parámetros	Triturado	Tezontle
G_{sb}	2.656	2.254
G_{se}	2.376	2.020
G_{mm}	2.550	2.218
G_{mb}	2.282	1.813
VAM	18.484	26.802
Va	10.533	25.997
VFA	40.23	29.80

CAPÍTULO VII

PRUEBAS MEDIANTE LA RECOMENDACIÓN RA-04/2008 (TSR)

7.1 PROCEDIMIENTO DE LA ELABORACIÓN DE LAS PASTILLAS

Una vez hecho lo anterior se procedió a realizar los especímenes que fueron 6 por cada material, la mitad para ser probados en seco y los restantes con un ciclo de congelamiento y deshielo. Siguiendo los pasos que se describen.

- 1.- Pese las pastillas con los porcentajes requeridos que fueron de 1350 gr para triturado y de 1350 gr para tezontle. Se dejaron reposar 1 hora a temperatura ambiente, se pesó primero las que iba a acondicionar de ambos materiales porque requieren más tiempo.
- 2.- Después se metió el material al horno a $60^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por un periodo de 16 hrs. para que el agregado tuviera la temperatura de mezclado.
- 3.- También se colocó el asfalto a la misma temperatura aproximadamente 50 minutos. Para el tezontle el porcentaje fue de 9.0% equivalente a 132.7 gr y para triturado de 5.1% equivalente a 72.6 gr.
- 4.- Luego de este tiempo se mezcló el agregado con el asfalto y se volvió a meter la mezcla al horno a 145°C para la compactación, durante 2 horas.

5.- Cuando la mezcla cumplió el tiempo de curado se empezaron a hacer las pastillas compactando a 100 giros dejándolas enfriar aproximadamente 24 horas para poder comenzar a trabajar.

6.- Se colocó cada espécimen en el recipiente de vacío aproximadamente 5 minutos con una presión de 256 mm de mercurio de presión parcial para triturado y entre 258-260 para tezontle, consiguiendo la saturación requerida que es de entre 70 y 80%.

7.- Posteriormente se cubrió cada espécimen con una película de plástico y se colocó en una bolsa de plástico con 10 ml de agua para después sellarla y meterla en el refrigerador a una temperatura de $-18 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por un periodo de 18 horas.

8. Transcurrido ese tiempo se retiraron del congelador lo más rápido posible y se les quitó la membrana y se colocaron en el baño de agua potable a $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$ por un periodo de 24 horas.

9.- Después se sacaron para colocarlas en otro baño de agua a $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ por dos horas.

10.- Finalmente se ensayaron en la mordaza Lottman a tensión indirecta, y se dejó continuar el ensaye hasta que se observó una grieta.



Figura 7.1 Mezcla en el horno lista para iniciar con la temperatura de compactación



Figura 7.2 Pastilla de material triturado después de la compactación



Figura 7.3 Pastilla de material triturado saliendo del recipiente de vacío, para darles el grado de saturación requerido



Figura 7.4 Pastillas en bolsas de plástico durante el proceso de congelamiento las cuales permanecerán hay por un periodo de 16 horas mínimo



Figura 7.5 Pastilla congelada antes de entrar al baño de agua tibia que durará 24 hrs.

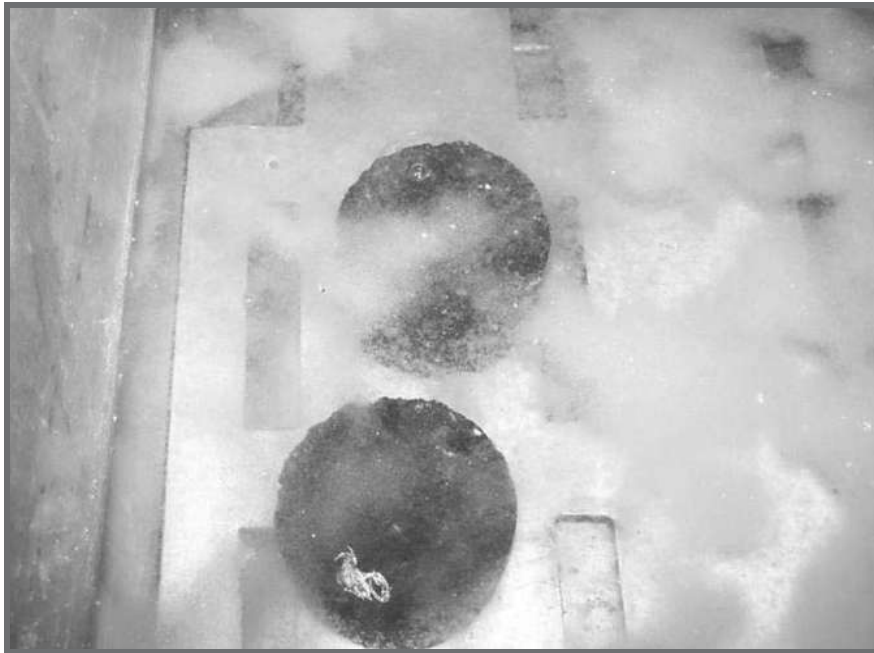


Figura 7.6 Efecto de las pastillas justo al momento de entrar al baño de agua despues de un ciclo de congelamiento



Figura 7.7 Configuración de carga de una pastilla en la Mordaza Lottman



Figura 7.8 Pastilla después de ser probada y sometida a carga hasta observar agrietamiento

7.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS MEDIANTE LA RECOMENDACIÓN RA-04/2008 (TSR)

Tabla 7.1 Resultados del ensayo de simulación de resistencia a tensión indirecta del material triturado

INFORME DE ENSAYOS DE SIMULACIÓN RESISTENCIA A TENSION INDIRECTA									
TRITURADO									
No. De especimen		1	2	3	4	5	6		
TIPO DE ENSAYES		ACONDICIONADAS		SIN ACONDICIONAR					
	Diámetro (mm)	D	98.67	98.04	99.15	99.11	99.30		
	Espesor (mm)	t	80.87	78.35	78.64	77.90	77.88		
	Peso del especimen en seco (gr)	A	1295	1299	1301	1301	1297		
	Peso del especimen sup. Seco (gr)	B	1308	1320	1317	1318	1313		
	Peso del especimen sumergido en agua (gr)	C	728	740	744	739	743		
	Volumen (B-C) cm ³	E	580	580	575	579	570		
	Gravedad específica de la mezcla	Gmb	2.233	2.240	2.263	2.247	2.275		
	Máxima gravedad específica	Gmm	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550		
	% Vacíos de aire (100(G _{mm} -G _{mb})/G _{mm})	Pa	12.441	12.170	11.629	11.883	10.767		
	Volumen del espécimen (cm ³)	E	580	580	575	579	570		
	Volumen de vacíos de aire (PaE/100)(cm ³)	Va	72.157	70.588	66.980	68.804	61.373		
	Peso específico sup. Seco (gr)	B'	1348	1352					
	Volumen absorbido de agua (B'-A)(cm ³)	J'	53	53	49				
	% Volumen absorbido de agua en el volumen de vacíos "SATURACIÓN" (100	S'	73.451	75.083	73.156				
	Carga (N)	P'	1231	2572	1923	2261	3224		
	Resistencia a la tensión acondicionadas y no acondicionadas		436.847	933.290	704.666	1000.171	1180.494		
	Promedio de la resistencia a la tensión acondicionados (2000P'/πD)(Kpa)	S ₂	818.978						
	Promedio de la resistencia a la tensión en seco (2000P'/πD)(Kpa)	S ₁	1090.332						
	TSR (S ₂ /S ₁)		75.113						

Tabla 7.2 Resultados del ensayo de simulación de resistencia a tensión indirecta del material tezontle

INFORME DE ENSAYOS DE SIMULACIÓN RESISTENCIA A TENSION INDIRECTA									
TEZONTLE									
No. De especimen		1	2	3	4	5	6		
TIPO DE ENSAYES		ACONDICIONADAS		SIN ACONDICIONAR					
Diámetro (mm)		D	99.82	99.60	99.35	99.48	99.40	98.04	
Espesor (mm)		t	98.28	98.00	98.79	99.59	95.48	98.68	
Peso del especimen en seco (gr)		A	1291	1296	1288	1284	1298	1295	
Peso del especimen sup. Seco (gr)		B	1351	1330	1316	1312	1326	1314	
Peso del especimen sumergido en agua (gr)		C	623	611	601	561	629	596	
Volumen (B-C) cm ³		E	728	719	715	751	697	718	
Gravedad específica de la mezcla		Gmb	1.773	1.803	1.801	1.710	1.862	1.804	
Máxima gravedad específica		Gmm	2.218	2.218	2.218	2.218	2.218	2.218	
% Vacíos de aire (100(G _{mm} -G _{mb})/G _{mm})		Pa	20.047	18.733	18.783	22.916	16.038	18.683	
Volumen del espécimen (cm ³)		E	728	719	715	751	697	718	
Volumen de vacíos de aire (PaE/100)(cm ³)		Va	145.944	134.690	134.297	172.100	111.788	134.141	
Peso específico sup. Seco (gr)		B'	1397	1390	1398				
Volumen absorbido de agua (B'-A)(cm ³)		J'	106	94	110				
% Volumen absorbido de agua en el volumen de vacíos "SATURACIÓN" (100		S'	72.631	69.790	81.908				
Carga (N)		P'	2029	3032	2619	1069	2903	3292	
Resistencia a la tensión acondicionadas y no acondicionadas			585.657	879.605	755.611	305.541	866.148	963.543	
Promedio de la resistencia a la tensión acondicionados (2000P'/πtD)(Kpa)		S ₂	740.291						
Promedio de la resistencia a la tensión en seco (2000P'/πtD)(Kpa)		S ₁	914.846						
TSR (S ₂ /S ₁)			80.920						

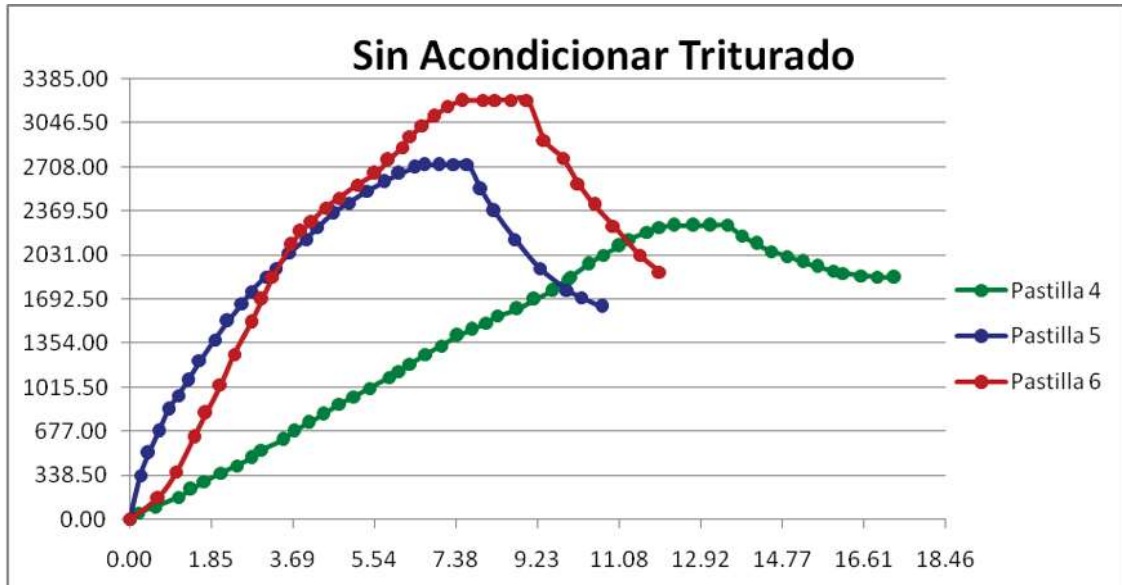


Figura 7.9 Gráfica del comportamiento de las pastillas sin acondicionar del material triturado

Se observa en la gráfica que las pastillas 5 y 6 tuvieron un comportamiento similar, sin embargo una de ellas tuvo un crecimiento mayor en resistencia y la pastilla 4 aunque no es muy diferente en la forma, si lo es en resistencia, lo cual se puede deber a un problema durante el procedimiento.

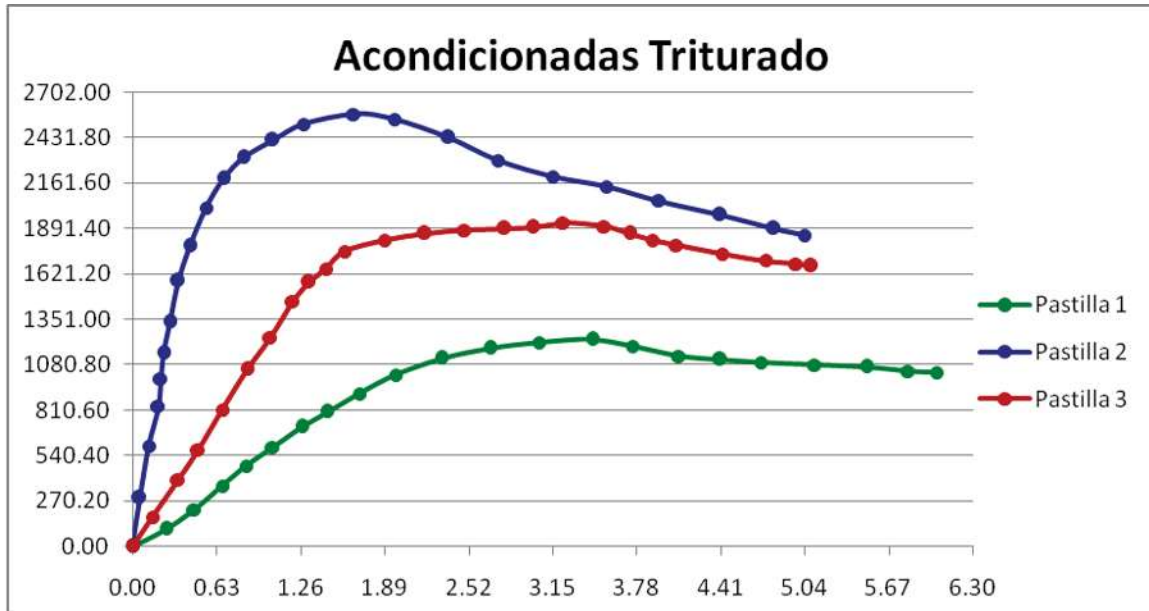


Figura 7.10 Gráfica del comportamiento de las pastillas acondicionadas del material triturado

Una vez acondicionadas su comportamiento es diferente para las tres pastillas pero se observa que la pastilla 2 resistió mucho más que la 1 y la 3 lo que significa que el acondicionamiento no la dañó tanto en comparación con las otras dos, en cambio la pastilla 1 y 3 resistieron la mitad de carga que las no acondicionadas.

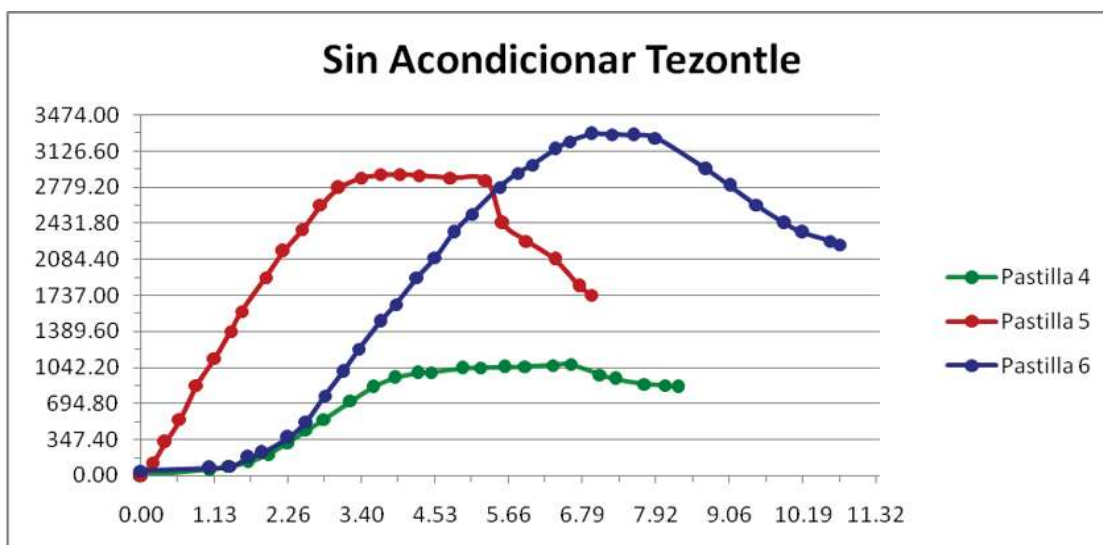


Figura 7.11 Gráfica del comportamiento de las pastillas sin acondicionar del material tezontle

En esta gráfica se observa que en la pastilla 4 definitivamente algo salió mal durante el procedimiento porque su resistencia de carga no es comparable con las otras dos pastillas debido a que el espécimen probablemente estaba dañado, y la pastilla 5 y 6 si presentan el mismo comportamiento, aunque con variación de resistencia.

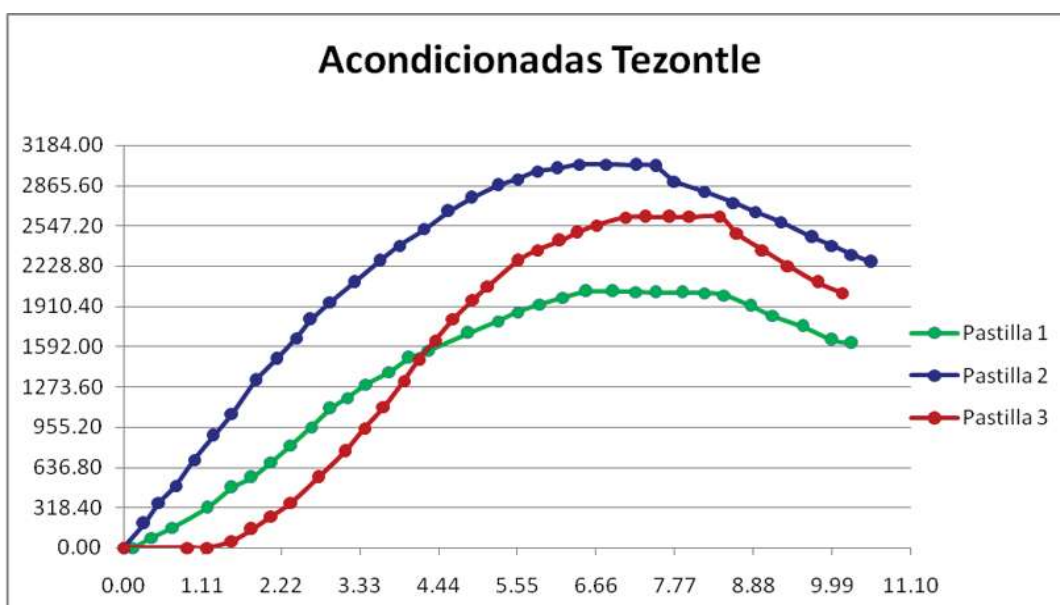


Figura 7.12 Gráfica del comportamiento de las pastillas acondicionadas del material tezontle

Se observa en la gráfica que las tres pastillas acondicionadas tienen el mismo comportamiento, con sus respectivos cambios de resistencia, pero se observa que presentan una resistencia mayor que las pastillas de triturado, lo que significa que el tezontle tiene un comportamiento mejor bajo el efecto de la humedad que el material triturado.

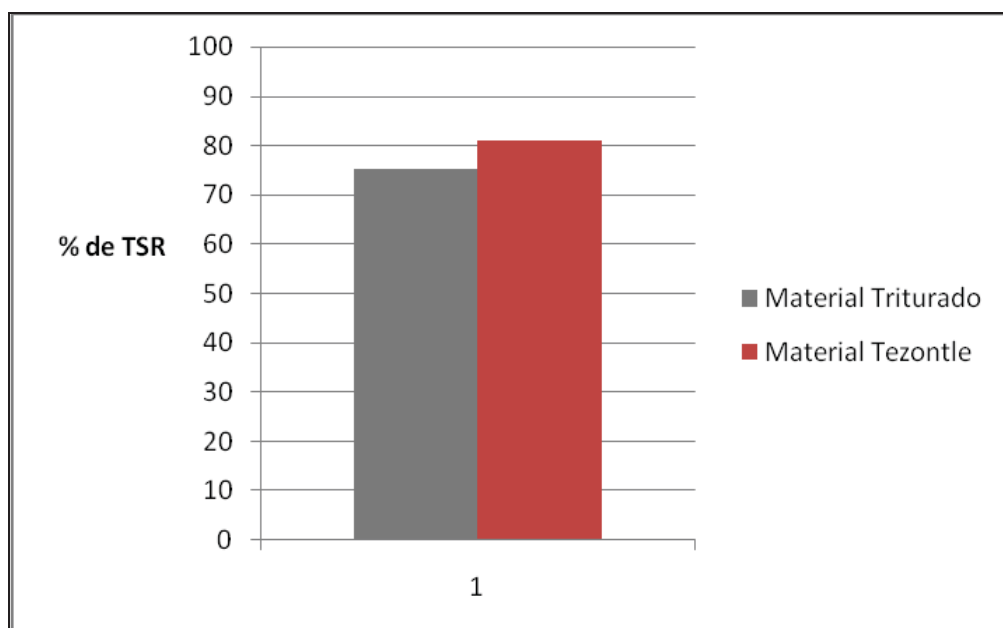


Figura 7.13 Gráfica de resultados de las muestras analizadas mediante el ensaye de TSR

Como se puede observar en la gráfica el material tezontle tiene un porcentaje mayor de resistencia conservada que el material triturado a pesar de que este tipo de material se considera inadecuado para su utilización en mezclas asfálticas porque se cree que es menos resistente que el material triturado, pero desde el punto de vista del ataque de la humedad se observa que es más resistente. Por lo cual sería recomendable ampliar los estudios para determinar si es o no conveniente su uso y sus ventajas o desventajas contra materiales triturados.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

De lo que se ha expuesto en este trabajo y de acuerdo a los resultados obtenidos se puede decir que Morelia es una región donde se encuentran bancos de material productores de grava y arena ya sea triturado o cribado, ambos de origen volcánico. El triturado es de composición andesítica de tipo intrusivo y se tienen partículas muy sólidas y poco porosas, y el tezontle que es escoria volcánica de origen basáltico de tipo extrusiva donde se presentan partículas sólidas más porosas. Los dos tipos de material se sometieron a diferentes pruebas para su caracterización y de las cuales se observa que en granulometría el tezontle cuenta con partículas un poco más grandes que el triturado, sin embargo el triturado tiene mayor densidad que el tezontle, pero en las demás pruebas como; Equivalente de Arena, Desgaste de los Ángeles y Caras Fracturadas, son similares los resultados y se encuentran dentro de lo establecido.

Por lo que se puede concluir que el material triturado y el tezontle son de características parecidas y los dos tipos de material cumplen con lo señalado en las normas de calidad por lo que se pueden utilizar para la elaboración de carpetas asfálticas.

Para el caso del asfalto se analizó un AC-20 producido en Salamanca, y de la caracterización se observó que la prueba de Penetración indica que es un asfalto muy blando ya que dio un valor muy alto, al igual que la de Ductilidad lo que significa que es un asfalto muy deformable.

Por sus características se podría decir que corresponde a un AC-10, el cual se puede utilizar en zonas frías y no es muy recomendable en zonas cálidas o donde se registren temperaturas muy altas ya que se puede tener un aspecto negativo en obra por su gran capacidad para deformarse.

Por lo que respecta al análisis volumétrico se puede concluir que la prueba de Volumetría y Densidad Rice nos permiten conocer parámetros importantes para el diseño de una mezcla asfáltica.

Aunque no son muy conocidas, son relativamente fáciles de hacer, el único problema que se presentó durante el procedimiento de las pruebas para este trabajo es que se utilizó la bomba de vacío y aunque no es muy difícil de manejar, cuando se hace por primera vez, si se complica un poco ya que aparte existe cierto temor a pensar que las cosas pueden salir

mal o que se puede dañar el equipo, a diferencia del compactador giratorio que una vez programado es más fácil de manipular y no se tienen que cuidar tantos aspectos.

La Densidad Rice nos permite conocer la densidad teórica máxima de la mezcla suelta (G_{mm}), es decir la densidad máxima que se puede tener cuando se compacta una pastilla sin aire, y también nos sirve para conocer que porcentaje de absorción de asfalto tenemos.

Y de la prueba de Volumetría se obtiene el (G_{mb}) que es la gravedad específica bruta de la mezcla compacta y nos sirve para determinar el número de giros necesarios para compactar una muestra y así obtener el volumen de vacíos deseado que se espera en campo para conocer su comportamiento.

Para este caso el G_{mm} dio mayor para el tezontle que para el triturado y el G_{mb} es mayor para el triturado que para el tezontle, lo que significa que las pastillas de tezontle absorberán mas asfalto que las de triturado.

Finalmente para probar por TSR se tuvieron que elaborar pastillas y cabe mencionar que es un procedimiento largo y que se requieren de muchos cuidados ya que algún error durante el proceso puede modificar enormemente los resultados. Esta prueba al igual que en las otras se debe cuidar de no exceder los tiempos que la mezcla se expone en el horno ya que se puede calcinar, también se debe cuidar que el agregado y el asfalto tengan la temperatura adecuada para que se mezclen bien, no se debe tardar mucho en hacer la mezcla y compactar, de lo contrario si se llegara a enfriar no quedaría bien compactada, y se debe cuidar de no dañar las pastillas en la bomba de vacío.

Como ya se menciona para esta prueba se utilizó la bomba de vacío, el Compactador Giratorio y la Mordaza Lottman entre otros, esta última a criterio fue la más complicada de manejar ya que te pide bastantes datos y para alguien que no está familiarizado con el proceso si es difícil de manipular.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados que se obtuvieron se observa que el porcentaje de vacíos de aire que se tienen en las pastillas es mucho mayor para el tezontle que para el triturado, por lo que se requiere un porcentaje mayor de asfalto, casi del doble para la elaboración de estas pastillas.

Es decir el tezontle absorbe mucho asfalto y desde el punto de vista económico es negativo porque se tienen mezclas muy costosas, aunque cabe mencionar que el costo del material triturado es más alto que el del tezontle, en realidad se tendría que hacer un estudio más detallado de análisis costo-beneficio para determinar económicamente que tan conveniente es su uso.

Sin embargo desde el punto de vista del ataque de la humedad se observa que el tezontle resiste un poco más que el triturado, cuando se supone que el triturado es mejor, pues en todas las pruebas que se le realizaron no resultó sustancialmente mejor en características que el tezontle.

A pesar de que a simple vista las pastillas elaboradas con material triturado se veían más resistentes, con una mejor consistencia y se disgregaban menos que las de tezontle.

Por otro lado las pastillas que fueron acondicionadas, obviamente si resistieron menor carga que las que no pasaron por ese proceso pues llegaron a soportar de 200 a 400 newtons menos antes de presentar la falla, lo que deja ver el daño que les produce la humedad.

En lo personal creo que está muy bien que se cuente con pruebas adicionales y que se esté investigando cada vez más para mejorar y garantizar que las mezclas tengan un buen comportamiento tanto en presencia de humedad como de otros factores que dañan y disminuyen la vida útil de las mismas.

Aunque en México estas pruebas están en proceso de implementarse y para mucha gente de conocerse creo que si es conveniente que se le dé más difusión para que cada vez más personas vayan conociendo y familiarizándose con este tipo de pruebas.

Aunque durante la vida universitaria sería complicado abarcarlas y mucho más llevarlas a la práctica, sería interesante que por lo menos se mencionaran para saber que existen y que están ahí.

También es importante decir que no solo se trata de conocer este tipo de pruebas sino de entender lo que realmente se está haciendo y lo que se pretende lograr al final, porque suele

pasar que hay personas que incluso ya han trabajado con estas pruebas, piensan que las conocen y en realidad no comprenden bien el procedimiento solo lo siguen, entonces se pueden tener errores y mal interpretar resultados.

Anteriormente se mencionaba que hay que tener muchos cuidados durante el proceso esto porque en mi experiencia tuve varios errores, me tocó repetir pastillas y pruebas que incluso ya conocía y había hecho antes, ya que hubo irregularidades durante el proceso que no contemple y los resultados eran erróneos, por eso es importante mencionar que este tipo de cosas llegan a pasar en un laboratorio donde se supone se tienen más cuidados y se pueden tener controlados mas aspectos como la temperatura, los tiempos etc., entonces que se puede decir en campo donde no se pueden controlar tantas situaciones como en un laboratorio y donde luego se pasan cosas por alto y se piensa que no pasa nada que no afecta, y como se observó en los resultados, por ejemplo si se disminuyó considerablemente la resistencia de una pastilla, que aparentemente se elaboró igual que todas.

Por ello sería conveniente que cada vez se tuviera más conocimiento y experiencia en este tipo de pruebas para garantizar resultados más certeros.

Además también es importante mencionar que no solo se pueden mejorar los procedimientos y técnicas para la elaboración de mezclas asfálticas, sino que también se podría tratar de mejorar la calidad del asfalto que se utiliza y si fuera necesario también de los agregados pétreos porque hay que recordar que la calidad de las mezclas depende de cada uno de los materiales que las conforman.

BIBLIOGRAFÍA

- Publicación: Protocolo AMAAC PA-MA- 01/2008
Titulo: Diseño de Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa de Alto Desempeño
Autor: Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.
- Publicación: Recomendación AMAAC RA 04/2008
Titulo: Resistencia de las Mezclas Asfálticas Compactadas al Daño Inducido por Humedad
Autor: Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.
- Libro: Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales
Titulo: Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas
Fuente: SCT
- Libro: Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales
Titulo: Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas
Fuente: SCT
- Publicación: Revista Técnica Asfáltica, Numero 22, Julio 2010
Titulo: Filosofía del Protocolo AMAAC para Diseño de Mezclas Asfálticas Densas de Alto Desempeño
Autor: Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.
- Publicación: Revista Técnica Asfáltica, Numero 17, Abril 2009
Titulo: Nuevos Desarrollos y Estrategias para Pavimento Asfáltico
Autor: Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.

➤ Tesis

Título: Fallas en Pavimentos Flexibles y Criterios de Diseño

Fuente: Biblioteca de Ingeniería Civil

INTERNET

➤ Nombre del Artículo: Michoacán detonara fortalecimiento de carreteras en el estado

Autor: Sayra Casillas Mendoza

Fuente: www.cambiodemichoacan.com

Fecha: Lunes 3 de Enero de 2011

➤ Nombre del Artículo: Morelia se llena de baches

Autor: Alonso Urrutia

Fuente: Periódico la Jornada

Fecha: Viernes 22 de Octubre de 2010

➤ Título: Pavimentos Flexibles

Departamento: Subdirección de Ingeniería

Autor: Ing. Mario Macías Hernández

Fuente: www.pemex.com