



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Permeabilidad del concreto
asfáltico: influencia de la
granulometría y el contenido de
cemento asfáltico**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Leonardo Velasco Luis

DIRECTOR DE TESIS

Dra. Alexandra Ossa López



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/118/15

Señor
LEONARDO VELASCO LUIS
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora DRA. ALEXANDRA OSSA LÓPEZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"PERMEABILIDAD DEL CONCRETO ASFÁLTICO: INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA Y EL CONTENIDO DE CEMENTO ASFÁLTICO"

- I. INTRODUCCIÓN
- II. MARCO TEÓRICO
- III. PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO ASFÁLTICO
- IV. ETAPA EXPERIMENTAL
- V. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 6 de noviembre del 2015.
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

Designación de sinodales de Examen Profesional

Presidente: Ing. Ernesto Rene Mendoza Sanchez

Vocal: Dra. Alexandra Ossa López

Secretario: M.H.D. Norma Legorreta Linares

1er. Suplente: M.I Guillermo Mancilla Urrea

2do. Suplente: M.I Félix Serralde González

Agradecimientos.

Quiero agradecer primero a Dios por permitirme terminar mis estudios profesionales como ingeniero, por estar presente siempre en mi vida y permitirme ser una persona sincera, inteligente, trabajadora y humilde.

A mis padres, Ernesto y Aquilina que han trabajado duro para que pueda seguir estudiando y que me han educado con lo mejor de ellos, a mis hermanos Carlos y Griselda que siempre están a mi lado y siempre estaré con ellos, a mis tíos Delfino, Modesto, Waldo, Fausto y Efraín que me han apoyado y dado lo mejor, a mis abuelos Mateo y Juana que me aman y siempre están en mi corazón, a mis primos que están conmigo y porque nos hemos desarrollado profesionalmente juntos.

A mi novia Ana Victoria que me ha apoyado durante toda la carrera, que me enseña a ser una mejor persona y por todas las aventuras que vivimos juntos.

A La Dra. Alexandra Ossa López en especial porque siempre me brindó su apoyo y dedicación para poder terminar este proyecto.

Al Dr. Osvaldo Flores Castrellón por apoyarme para llevar acabo la etapa de experimentación.

A la Facultad de Ingeniería y al Instituto de Ingeniería por abrirme las puertas y poder llevar acabo la tesis.

A Daniel Rangel Galicia por ser compañero y amigo en este proyecto que empezamos juntos, a mis amigos que siempre han estado a mi lado.

A Alberto por su enseñanza, y dedicación, también al personal del Laboratorio de vías terrestres que nos brindó el apoyo y amistad.

A la Promotora y Operadora de Infraestructura S.A. de C.V. y a la Planta de Asfalto de la Ciudad de México, por la donación de los insumos necesarios para la realización de éste trabajo.

Resumen

En esta investigación se llevaron a cabo pruebas de permeabilidad bajo diferentes condiciones de carga hidráulica, en especímenes de concreto asfáltico mediante en un permeámetro de carga constante. Para la interpretación de estas pruebas, se consideró válida la Ley de Darcy la cual supone que existe un flujo laminar en un medio poroso, saturado, continuo, homogéneo e isótropo.

Un total de 54 especímenes de concreto asfáltico fueron elaborados, para ello se consideraron tres contenidos de cemento asfáltico y nueve propuestas granulométricas.

Los resultados de las pruebas de laboratorio indican que la permeabilidad el concreto asfáltico es mayor en aquellos especímenes que fueron elaborados a partir de mezclas abiertas. Adicionalmente, en todos los casos se detectó una influencia significativa del contenido de arenas y finos, vacíos de aire, así como del contenido de cemento asfáltico en la permeabilidad de los especímenes.

Para asegurar que los materiales utilizados en esta investigación cumplieran con los estándares de calidad requeridos en la elaboración de concreto asfáltico, se hicieron pruebas de consenso, origen y rutina al agregado pétreo y pruebas de caracterización al cemento asfáltico.

Índice

AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN.....	V
ÍNDICE.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABLAS.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	2
ALCANCES.....	2
METODOLOGÍA.....	2
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	3
1.1 CONCRETO Y MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	3
1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	3
1.3 USOS DEL CONCRETO ASFÁLTICO.....	5
1.4 RELACIONES VOLUMÉTRICAS Y GRAVIMÉTRICAS.....	7
1.4.1 RELACIONES GRAVIMÉTRICAS.....	8
1.4.2 RELACIONES VOLUMÉTRICAS.....	10
1.5 PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS.....	10
CAPÍTULO 2 PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO ASFÁLTICO	13
2.1 LEY DE DARCY.....	13
2.2 MÉTODOS PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD, (K).....	14
2.3 DISPOSITIVOS UTILIZADOS EN LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (K)	15
2.3.1 CAMPO.....	15
2.3.2 LABORATORIO.....	18
CAPÍTULO 3. ETAPA EXPERIMENTAL.....	21
3.1. AGREGADO PÉTREO.....	21
3.1.1 PRUEBAS DE CONSENSO.....	21
3.1.2 PRUEBAS DE ORIGEN.....	24
3.1.3 PRUEBAS DE RUTINA.....	25
3.1.4 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.....	27
3.2 CEMENTO ASFÁLTICO.....	28
3.2.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN CEMENTO ASFÁLTICO.....	33
3.3 GRANULOMETRÍA.....	34
3.4 DOSIFICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO.....	38
3.5 GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA.....	39
3.6 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS.....	41
3.6.1 MEZCLADO.....	41
3.6.2 COMPACTACIÓN.....	42
3.6.3 PREPARACIÓN DE LOS ESPECÍMENES.....	43
3.7 OBTENCIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA NETA (GMB).....	43
3.8 CORTE DE LOS ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE PRUEBA.....	44
3.9 ENSAYO DE PERMEABILIDAD.....	45
3.10 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	53
3.10.1 PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LOS ESPECÍMENES ENSAYADOS.....	53

3.10.2 PERMEABILIDAD	56
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.....	60
BIBLIOGRAFIA.....	61

Lista de Figuras

<i>Figura Sección típica de una presa con núcleo de concreto asfáltico (ICOLD, 1982)</i>	<i>1</i>
<i>Figura 1.1 Mezcla asfáltica en caliente</i>	<i>3</i>
<i>Figura 1.2 Adición de agente modificador de la viscosidad al cemento asfáltico.</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1.3 Reparación de bache con mezcla asfáltica fría</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1.4 Mezcla Densa</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1.5 Mezcla Abierta</i>	<i>5</i>
<i>Figura 1.6 Pavimentos en carreteras, aeropuertos y estacionamientos</i>	<i>6</i>
<i>Figura 1.7 Extendido y compactación de concreto asfáltico en el talud de un canal (Orozco R., 2008).....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 1.8 Colocación de concreto asfáltico longitudinalmente en estanque (Orozco R., 2008)</i>	<i>6</i>
<i>Figura 1.9 Construcción de la presa Storglomvath Noruega con núcleo impermeable de concreto asfáltico Hoeg, K. (1993).</i>	<i>7</i>
<i>Figura 1.10 Diagrama de fases de una mezcla asfáltica compactada (Protocolo AMAAC., 2008)</i>	<i>7</i>
<i>Figura 1.11 Esquema del significado de las variables de la Gsb (García, J., 2014)</i>	<i>8</i>
<i>Figura 1.12 Esquema del significado de las variables de la (Gsa) (García, J., 2014).....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 1.13 Esquema del significado de las variables de la (Gse) (García, J., 2014).....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.1 Prueba de carga hidráulica variable.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.2 Prueba de carga constante en permeámetro de pared flexible</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.3 Permeámetro NCAT (Cooley, et al. 1999).....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.4 Modificación del permeámetro NCAT (Cooley, et al 1999)</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.5 Modificación del permeámetro NCAT (Cooley, et al 1999)</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.6 Permeámetro molde de Marshall – sello de parafina (Cooley, et al. 1999)</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.7 Permeámetro molde de Marshall – sello de silicón (Cooley, et al. 1999).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.8 Equipo de laboratorio FDOT (H. Harris, et al 2007)</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.9 Permeámetro carga constante (Maupin, 2000)</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.10 Dispositivo Corelok (Cooley, et al 2002)</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.11 Permeámetro de pared flexible (Daniel, 1994).....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.12 Permeámetro de pared rígida (Daniel, 1994).....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3.1 Banco Triabasa en Ixtapaluca, Edo. De México.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3.2 lavado, cribado y almacenamiento del material.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3.3 Caras redondeadas (derecha) y caras fracturadas (izquierda).....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.4 Equipo para contenido de vacíos no compactados de agregado fino</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.5 Dispositivo calibrador proporcional para medir partículas cortas y alargadas.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.6 Ensayo de equivalente de arena.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.7 Máquina de Abrasión de los Ángeles</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.8 Prueba de intemperismo acelerado.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.9 Densidad de gruesos (Josephia R., 2015).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.10 Procedimiento para gravedad específica de agregados finos (Josephia R., 2015).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.11 Regiones geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su viscosidad dinámica a 60°C y ensayo de la viscosidad dinámica.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.12 Ensayo de la viscosidad cinemática.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.13 Viscosímetro Saybolt-Furol.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.14 Ensayo de penetración del cemento asfáltico</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.15 Ensayo de punto de reblandecimiento</i>	<i>31</i>

Figura 3.16 Ensayo de punto de inflamación	31
Figura 3.17 Reómetro de corte dinámico	32
Figura 3.18 Ensayo de película fina en horno rotatorio.....	32
Figura 3.19 Determinación del peso específico del cemento asfáltico	33
Figura 3.20 Granulometrías propuestas.....	37
Figura 3.21 Vaciado de cemento asfáltico sobre agregado pétreo	39
Figura 3.22 Homogenización en una mezcladora mecánica	39
Figura 3.23 Charola en donde se enfría la mezcla asfáltica.	40
Figura 3.24 Recipiente y bomba para desairar.....	40
Figura 3.25 Condicionamiento de equipo para mezclar, compactar y agregado pétreo	41
Figura 3.26 Llenado de molde para compactar mediante una cuneta.....	42
Figura 3.27 Compactador giratorio SUPERPAVE	42
Figura 3.28 Extracción del espécimen	42
Figura 3.29 Extracción de núcleos de concreto asfáltico	43
Figura 3.30 Equipo con sierra de corte	44
Figura 3.31 Cortes de especímenes	45
Figura 3.32 Esquema del permeámetro (De la rosa M., 2008).....	46
Figura 3.33 Recubrimiento lateral con pasta de silicón.....	47
Figura 3.34 Especimen de concreto asfáltico sellado herméticamente.....	47
Figura 3.35 Colocación de pared acrílica.	48
Figura 3.36 Sellado de la cámara.	48
Figura 3.37 Manguera con la cual se llena la cámara.....	48
Figura 3.38 Ubicación de válvulas.	49
Figura 3.39 Cámaras de saturación.....	49
Figura 3.40 Ubicación de válvulas.	50
Figura 3.41 Monitoreo de buretas.....	50
Figura 3.42 Ejemplo para tener una carga efectiva de 1 kg/cm^2	51
Figura 3.43 Flujo de agua ascendente a través del espécimen	51
Figura 3.44 Vacíos de aire	54
Figura 3.45 Vacíos de agregado mineral.....	55
Figura 3.46 Vacíos llenos de cemento asfáltico.....	55
Figura 3.47 Propuestas granulometrías, coeficiente de permeabilidad vs carga cm.	58
Figura 3.48. Coeficiente de permeabilidad k y contenido de arena-fino	58
Figura 3.49 Vacíos de aire y coeficiente de permeabilidad	59

Lista de tablas

<i>Tabla 3.1 Resumen de la caracterización del agregado pétreo (Martínez O., 2014)</i>	27
<i>Tabla 3.2 Resumen de la caracterización del agregado pétreo</i>	27
<i>Tabla 3.3 Gravedades específicas del agregado grueso (Martínez O., 2014)</i>	27
<i>Tabla 3.4 Gravedades específicas del agregado fino</i>	28
<i>Tabla 3.5 Resultados de los ensayos de laboratorio</i>	33
<i>Tabla 3.6 Granulometría de Fuller</i>	34
<i>Tabla 3.7 Granulometría 1 y 2</i>	35
<i>Tabla 3.8 Granulometrías 3 y 4</i>	35
<i>Tabla 3.9 Granulometría 5 y 6</i>	36
<i>Tabla 3.10 Granulometría 7 y 8</i>	36
<i>Tabla 3.11 Resumen de valores obtenidos para la clasificación (SUCS)</i>	38
<i>Tabla 3.12 Clasificación SUCS de las granulometrías</i>	38
<i>Tabla 3.13 Contenido de cemento asfáltico</i>	38
<i>Tabla 3.14 Densidad teórica máxima (Gmm)</i>	41
<i>Tabla 3.15 Resultados de gravedades específicas netas</i>	44
<i>Tabla 3.16 Ejemplo de la prueba saturada en una propuesta abierta.</i>	52
<i>Tabla 3.17 Propiedades volumétricas con un contenido de cemento asfáltico de 5.7%</i>	53
<i>Tabla 3.18 Propiedades volumétricas con un contenido de cemento asfáltico de 6.0%</i>	53
<i>Tabla 3.19 Propiedades volumétricas con un contenido de cemento asfáltico de 6.3%</i>	54
<i>Tabla 3.20 Resultados de pruebas de permeabilidad</i>	56

Introducción

El cemento asfáltico es tal vez uno de los materiales de construcción más antiguos utilizados por el hombre debido a sus propiedades impermeabilizantes y adhesivas principalmente.

Tradicionalmente, los cementos asfálticos han sido utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas destinadas a la construcción de pavimentos autopistas, carreteras, estacionamientos, entre otros. No obstante, el uso de estos materiales en la construcción de barreras impermeables tales como canales, presas, y lagunas artificiales, data de hace más de 40 años.

De acuerdo a ICOLD (1982) a la fecha de elaboración de este boletín, a nivel mundial se habían construido más de 100 presas de enrocamiento con núcleo de concreto asfáltico con características similares a las que se ilustran en la Figura y con alturas hasta de 150 metros. A la fecha, la construcción de este tipo de presas sigue en aumento a nivel mundial, no obstante en México aún no se construyen presas de este tipo.

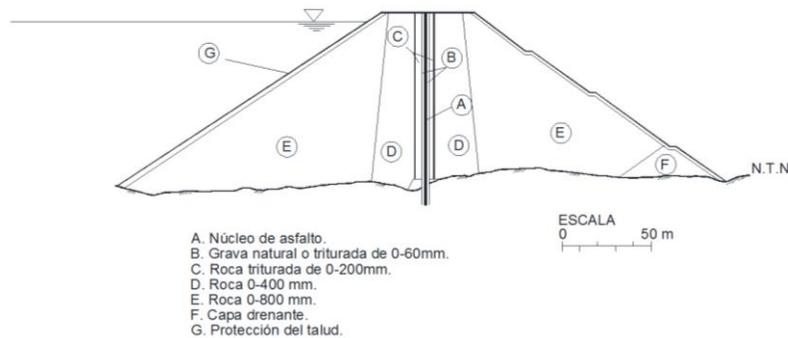


Figura Sección típica de una presa con núcleo de concreto asfáltico (ICOLD, 1982)

El diseño volumétrico del concreto asfáltico dependerá de la utilización que se le dé a este material. En pavimentos se podrán diseñar mezclas asfálticas destinadas a la construcción de capas drenantes, permeables y poco permeables, y en todos los casos se buscará que el material presente un comportamiento mecánico y una durabilidad tales que se satisfagan los requerimientos que impone el paso de vehículos al material bajo ciertas condiciones ambientales.

Para el caso de las barreras impermeables el diseño volumétrico de la mezcla asfáltica se basará principalmente en obtener un material que en estado compacto presente una baja permeabilidad (menor a 10^{-7} cm/s) y una durabilidad aceptable.

Objetivos

Evaluar la influencia del contenido de cemento asfáltico y la distribución granulométrica de los agregados pétreos en la permeabilidad de núcleos de concreto asfáltico.

Alcances

Para lograr el objetivo propuesto, se plantean los siguientes alcances:

- I. Elaborar diferentes mezclas asfálticas a partir de diferentes combinaciones granulométricas y contenidos de cemento asfáltico.
- II. Evaluar la permeabilidad de los especímenes de concreto asfáltico bajo diferentes condiciones de carga hidráulica, mediante un permeámetro de carga constante.

Metodología

La metodología a seguir consiste en las siguientes actividades:

- Caracterización del cemento asfáltico y agregado pétreo
- Determinación de distribuciones granulométricas y contenidos de cemento asfáltico a utilizar en la elaboración de las mezclas asfálticas.
- Fabricación de especímenes de concreto asfáltico
- Ejecución de pruebas de permeabilidad en especímenes de concreto asfáltico
- Análisis e interpretación de resultados de pruebas de permeabilidad
- Conclusiones

Capítulo 1. Marco teórico

1.1 Concreto y mezclas asfálticas

El concreto asfáltico es un material producto de la solidificación de la mezcla de un ligante asfáltico y un agregado mineral. El cemento asfáltico convencional o modificado, actúa como un agente ligante que aglutina las partículas en una masa cohesiva. El agregado mineral, ligado por el material asfáltico, actúa como un esqueleto pétreo que aporta resistencia y rigidez al sistema. El comportamiento del concreto asfáltico se afecta por las propiedades individuales de cada componente, y por la interrelación de estos dos materiales. En la literatura técnica es común usar los términos concreto y mezcla asfáltica indistintamente para referirse a este material ya sea en estado compacto o suelto, no obstante esto puede generar alguna confusión.

1.2 Clasificación de las mezclas asfálticas

Existen varias clasificaciones de mezclas asfálticas, las cuales dependen del parámetro considerado para establecer las diferencias; así por ejemplo, pueden usarse como parámetros de clasificación el tamaño de los agregados pétreos, el porcentaje de vacíos, la temperatura o la estructura de los agregados. A continuación se hace una clasificación general de las mezclas asfálticas:

Por temperatura de colocación y compactación

Mezclas en Caliente: Son elaboradas mediante la incorporación de cemento asfáltico y agregado pétreo a temperaturas entre 150 y 160 °C. Su colocación se realiza a temperaturas mayores a 100 °C para poder extender y compactar adecuadamente Figura 1.1.



Figura 1.1 Mezcla asfáltica en caliente

Mezclas tibias: son elaboradas utilizando un agente modificador de la viscosidad del cemento asfáltico haciendo posible producir y colocar concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores (de 20°C a 40°C) a las mezclas en caliente. En la Figura 1.2 se muestra el proceso de adición de un agente modificador de la viscosidad al cemento asfáltico.



Figura 1.2 Adición de agente modificador de la viscosidad al cemento asfáltico.

Mezclas en Frio: son elaboradas en frio utilizando emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados y materiales, la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente, la Figura 1.3 muestra una aplicación de este tipo de mezcla.



Figura 1.3 Reparación de bache con mezcla asfáltica fría

Por la proporción de vacíos de aire

Mezclas densas: la proporción de vacíos de aire no supera el 6%, la Figura 1.4 muestra una mezcla densa.

Mezclas semi-densas: la proporción de vacíos de aire esta entre el 6% y el 10%.



Figura 1.4 Mezcla Densa

Mezclas abiertas: los vacíos de aire son mayores a 12%, la Figura 1.5 muestra una mezcla abierta.
Mezclas porosas: la proporción de vacíos de aire es superior al 20%.



Figura 1.5 Mezcla Abierta

Por el tamaño máximo del agregado pétreo

Mezclas gruesas: Son mezclas de granulometría continua y homogénea, elaboradas con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal que excede los 10 mm.

Mezclas finas: son mezclas formadas básicamente por un agregado fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico.

Por la granulometría del agregado

Mezclas continuas: Son mezclas cuya granulometría presenta diferentes tamaños de agregados.

Mezclas discontinuas: en estas mezclas asfálticas se utiliza una granulometría con tamaños de agregados limitados.

1.3 Usos del concreto asfáltico

Pavimentos

El concreto asfáltico es usado principalmente en la construcción de la estructura del pavimento de carreteras, pistas y plataformas de aeropuertos, y estacionamientos, específicamente en las capas de base y carpetas tal como se ilustra en la Figura 1.6. Lo anterior, debido a que es un material cuya elaboración y mantenimiento se puede llevar a cabo con cierta facilidad, y a que posee características mecánicas y físicas que satisfacen los requerimientos de resistencia y permeabilidad que deben tener este tipo de estructuras. Los concretos asfálticos utilizados para este fin suelen presentar vacíos de aire entre el 4% al 6%. Sin embargo, en este tipo de aplicaciones también es común encontrar capas de concreto asfáltico colocadas en la superficie del pavimento, cuya función es la de favorecer el drenaje superficial de la carretera es por ello que presentan relaciones de vacíos mayores al 10%.



Figura 1.6 Pavimentos en carreteras, aeropuertos y estacionamientos

Estructuras hidráulicas

El concreto asfáltico es utilizado en la construcción de estructuras hidráulicas tales como canales, diques, lagunas artificiales y presas de enrocamiento (núcleo y cara aguas arriba) principalmente como elemento impermeabilizante, tal como se ilustra en las Figuras 1.7 al 1.9. Los concretos asfálticos utilizados para este fin suelen presentar vacíos de aire menores al 3%.



Figura 1.7 Extendido y compactación de concreto asfáltico en el talud de un canal (Orozco R., 2008)



Figura 1.8 Colocación de concreto asfáltico longitudinalmente en estanque (Orozco R., 2008)



Figura 1.9 Construcción de la presa Storglomvath Noruega con núcleo impermeable de concreto asfáltico Hoeg, K. (1993).

1.4 Relaciones volumétricas y gravimétricas

En el diseño y elaboración de una mezcla asfáltica se considera dicho material como un sistema trifásico formado por una fase líquida (cemento asfáltico), una fase sólida (agregado mineral) y otra gaseosa (aire) tal como se muestra en la Figura 1.10, cuyas relaciones volumétricas y gravimetrías, se describen a continuación:

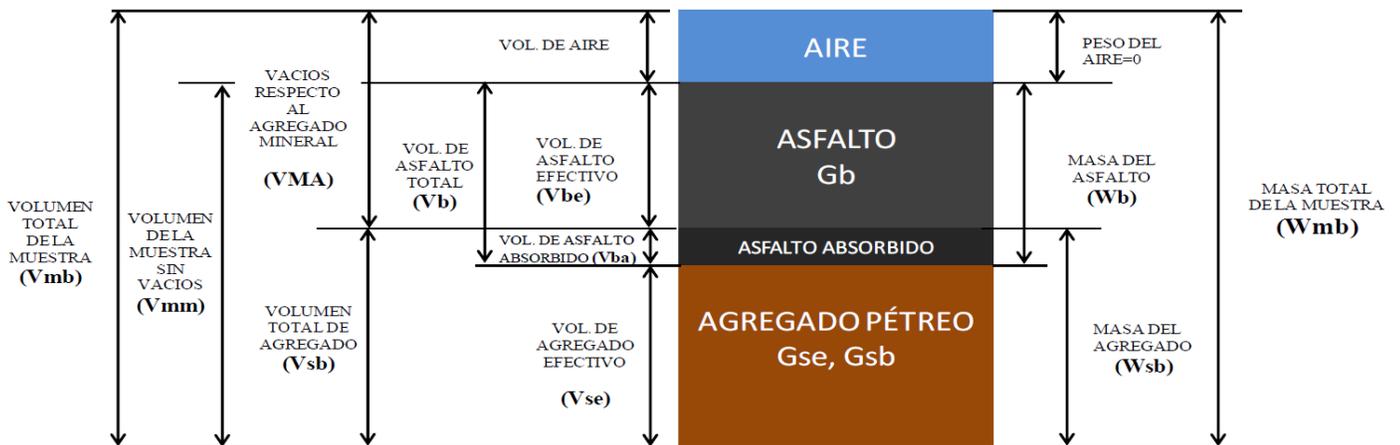


Figura 1.10 Diagrama de fases de una mezcla asfáltica compactada (Protocolo AMAAC., 2008)

Dónde:

- V_{mb} = volumen total de la mezcla compactada.
- V_{mm} = volumen de la mezcla sin vacíos.
- V_{MA} = volumen de vacíos en el agregado mineral.
- V_{sb} = volumen total del agregado.
- V_{se} = volumen efectivo de agregado.
- V_{be} = volumen efectivo de cemento asfáltico.
- V_{ba} = volumen de cemento asfáltico absorbido.
- V_{aire} = volumen de aire.
- W_{mb} = masa total de la mezcla compactada.
- W_a = masa del aire.

W_b = masa del cemento asfáltico.

W_{sb} = masa total del agregado.

1.4.1 Relaciones gravimétricas

Se define como gravedad específica del concreto asfáltico (mezcla compacta) a la relación entre la masa de un volumen de un material dado y la masa de agua de igual volumen; ambas determinadas a la misma temperatura. A continuación, se describen las relaciones gravimétricas empleadas en el diseño volumétrico y elaboración de una mezcla asfáltica.

Gravedad específica neta, (G_{sb})

Es la relación entre la masa en el aire de un volumen neto de agregado (considera solo el volumen de los poros permeables al agua) y la masa de igual volumen de agua; ambos a la misma temperatura. Ver Figura 1.11

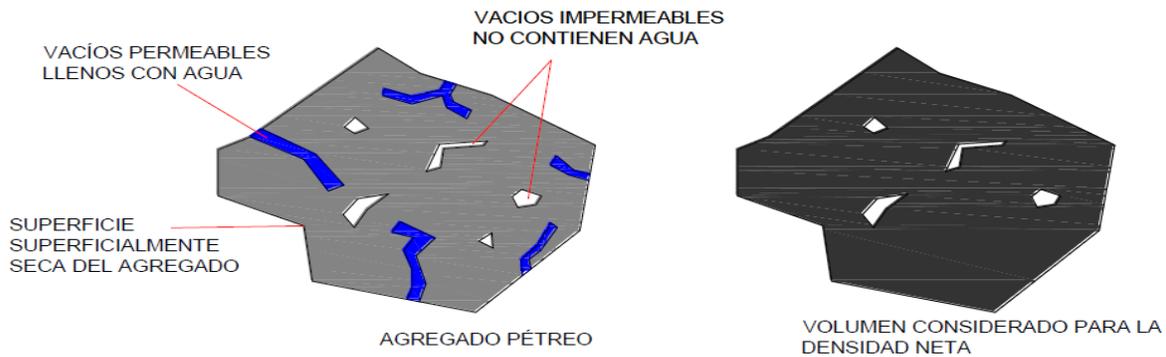


Figura 1.11 Esquema del significado de las variables de la G_{sb} (García, J., 2014)

Cuando el agregado total se compone de fracciones separadas de agregados grueso, fino y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas. Por lo tanto, la gravedad específica total de la combinación de agregados se calcula usando la siguiente ecuación.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad \text{ec. (1.1)}$$

Dónde:

G_{sb} : gravedad específica total de la combinación de agregado seleccionado

P_1, P_2, \dots, P_n : porcentajes individuales por masa de agregado seleccionado

G_1, G_2, \dots, G_n : gravedad específica total individual del agregado

Gravedad específica aparente, (G_{sa})

Es la relación entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado, considerando sólo el volumen del sólido del agregado, y la masa de igual volumen de agua destilada, ambos a la misma temperatura (ec. 1.2). Ver Figura 1.12

Dónde:

G_{sa} : gravedad específica aparente de la combinación de agregado seleccionado
 P_1, P_2, \dots, P_n : porcentajes individuales por masa de agregado seleccionado
 G_1, G_2, \dots, G_n : gravedad específica aparente individual del agregado

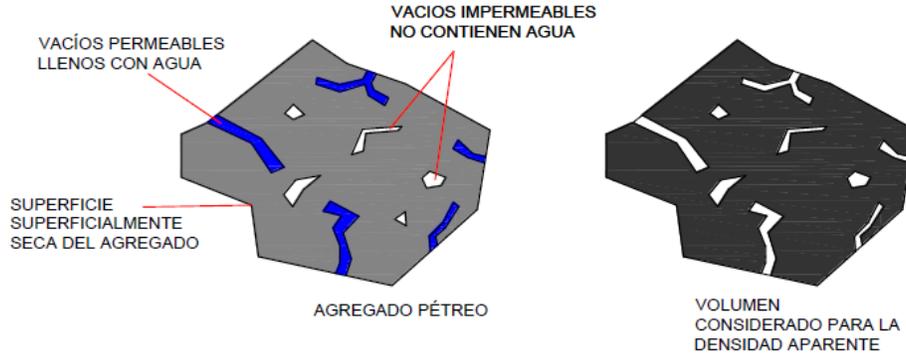


Figura 1.12 Esquema del significado de las variables de la (G_{sa}) (García, J., 2014)

Al igual que con la gravedad específica total, la gravedad específica aparente para la combinación de agregado seleccionado se calcula mediante la ecuación:

$$G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad \text{ec. (1.2)}$$

Gravedad específica efectiva del agregado, (G_{se})

Es la relación entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado, considerando solo el volumen de poros permeables al agua no llenos con cemento asfáltico, y la masa de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura. Ver Figura 1.13

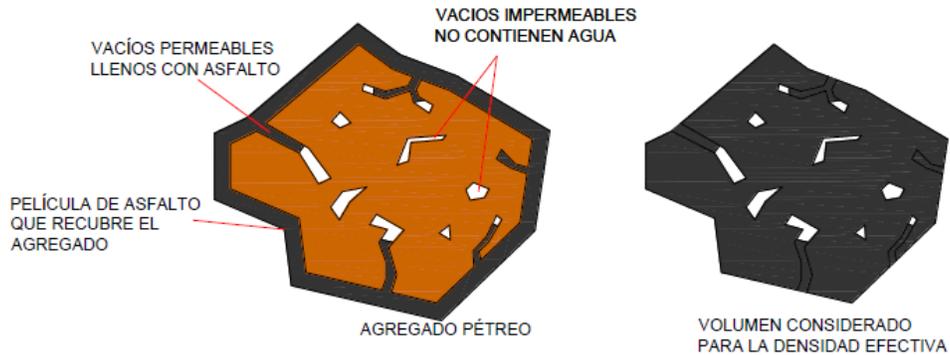


Figura 1.13 Esquema del significado de las variables de la (G_{se}) (García, J., 2014)

La gravedad específica efectiva, se calcula con la siguiente:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_{mb}}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_{mb}}{G_b}} \quad \text{ec. (1.3)}$$

Gravedad específica del cemento asfáltico, (Gb)

Es la relación de masa en el aire de un volumen de cemento asfáltico y la masa de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura.

Gravedad específica teórica máxima, (Gmm)

Es la relación entre la masa de un volumen dado de mezcla asfáltica sin vacíos de aire y la masa de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura. También se llama gravedad específica RICE, en reconocimiento al investigador James Rice, quien desarrolló el método de prueba (Garnica *et al.*, 2005)

La gravedad específica teórica máxima, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad \text{ec. (1.4)}$$

1.4.2 Relaciones volumétricas

La mezcla asfáltica debe de analizarse con base al volumen, por tanto, es importante definir y entender cada uno de los volúmenes del diagrama de fases. A continuación se presentan las definiciones de cada uno de ellos:

- Volumen de cemento asfáltico efectivo, V_{be} . Es el volumen de cemento asfáltico que envuelve a las partículas de agregado, no incluye el cemento asfáltico absorbido por los poros del agregado.
- Volumen del cemento asfáltico absorbido, V_{ba} . Es el volumen de cemento asfáltico que es absorbido por los poros externos de agregado.
- Volumen total del agregado, V_{sb} . Es el volumen de la parte sólida del agregado e incluye los poros permeables al agua.
- Volumen efectivo del agregado, V_{se} . Es el volumen del sólido más el de los poros permeables al agua, no incluye el volumen de los poros llenos de asfalto.
- Volumen aparente del agregado, V_{sa} . El volumen del sólido del agregado, que no incluye el volumen de los poros permeables al agua.
- Volumen de aire, V_{aire} . Es el volumen de los espacios pequeños de aire que existe entre las partículas de agregado que están cubiertas por cemento asfáltico.
- Volumen total de la mezcla V_{mb} . Es el volumen de la mezcla compacta que incluye los vacíos de aire, agregado mineral y cemento asfáltico

1.5 Parámetros volumétricos

Vacíos de aire, (Va)

Es la relación entre el volumen de aire y el volumen total de una mezcla asfáltica, se expresa en porcentaje (ec. 1.5).

$$V_a = \frac{V_{aire}}{V_{mb}} * 100 \quad \text{ec. (1.5)}$$

Vacíos en el agregado mineral, (VAM)

Es el volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas de agregado en una mezcla asfáltica compactada. Se expresa como porcentaje ya que es la relación entre el volumen de cemento asfáltico efectivo más el volumen de aire y el volumen total de la mezcla compacta (ec. 1.6).

$$VAM = \frac{V_{be} + V_{aire}}{V_{mb}} * 100 \quad \text{ec. (1.6)}$$

Vacíos llenos con cemento asfáltico (VFA)

Es la porción del volumen de espacio vacío intergranular (VAM) que es ocupado por el cemento asfáltico efectivo. Se expresa en porcentaje ya que es la relación entre el volumen de cemento asfáltico efectivo y el volumen de vacíos en el agregado mineral de una mezcla compactada (ec. 1.7).

$$VFA = \frac{V_{be}}{V_{be} + V_{aire}} = \frac{V_{be}}{VMA} = \frac{VMA - V_a}{VMA} * 100 \quad \text{ec. (1.7)}$$

Contenido de cemento asfáltico

Es la relación entre la masa de cemento asfáltico y la masa total de la mezcla compactada.

$$CA = \frac{W_b}{W_{mb}} * 100 \quad \text{ec. (1.8)}$$

Masa de cemento asfáltico efectivo (W_{be})

Es la masa de cemento asfáltico que envuelve a las partículas de agregado, no incluye el cemento asfáltico absorbido por los poros del agregado.

$$W_{be} = V_{be} * G_b * \gamma_w \quad \text{ec. (1.9)}$$

Dónde:

γ_w = peso específico del agua, 1g/cm³

Masa de cemento asfáltico absorbido (W_{ba})

Es la masa de cemento asfáltico que es absorbido por los poros externos de agregado.

$$W_{ba} = V_{ba} * G_b * \gamma_w \quad \text{ec. (1.10)}$$

Dónde:

γ_w = peso específico del agua, 1g/cm³

Contenido de cemento asfáltico efectivo

Es la relación entre la masa de cemento asfáltico efectivo y la masa total de la mezcla compactada. Se expresa como porcentaje:

$$CAe = \frac{W_{be}}{W_{mb}} * 100 \quad \text{ec.(1.11)}$$

Contenido de cemento asfáltico efectivo absorbido

Es la relación entre la masa de cemento asfáltico absorbido y la masa total del agregado de la mezcla asfáltica compactada. Se expresa como porcentaje:

$$CAa = \frac{W_{ba}}{W_{sb}} * 100 \quad \text{ec.(1.12)}$$

Capítulo 2 Permeabilidad en el concreto asfáltico

La permeabilidad es la propiedad que tiene un cuerpo para permitir el paso de un fluido a través de él, sin que se altere su estructura interna. La conductividad hidráulica o permeabilidad del concreto asfáltico está definida generalmente bajo la ley de Darcy, depende principalmente de los siguientes aspectos (Vardanega, 2014):

- Volumen de vacíos de aire interconectados
- Tamaño, orientación y distribución de los agregados
- Contenido de cemento asfáltico
- La viscosidad del agua que varía con la temperatura

2.1 Ley de Darcy

La permeabilidad del concreto asfáltico es una propiedad importante en el diseño de pavimentos y barreras impermeables ya que la presencia de agua por periodos largos en su interior, puede afectar de manera significativa su desempeño al presentarse el fenómeno de stripping (separación del cemento asfáltico y el agregado pétreo).

Fue en el año de 1856 que el ingeniero Henry Darcy fue elegido para diseñar la red de abastecimiento de la ciudad de Dijon, Francia. En la cual diseñó filtros de arena para purificar agua, por ello se centró en un término llamado el coeficiente de permeabilidad. Los resultados de su trabajo fueron presentados en un anexo y desde entonces, se convirtieron en la base de los estudios físico-matemáticos posteriores sobre el flujo del agua subterránea.

La ley de Darcy supone que el flujo a través del material en este caso concreto asfáltico es laminar, por lo cual hay una relación entre el caudal que recorre el líquido con el gradiente hidráulico y la sección como se indica en la (ec. 2.1).

$$Q = k * i * A = k \left(\frac{\Delta h}{L} \right) * A \quad \text{ec. (2.1)}$$

Dónde:

Q= caudal

K= coeficiente de permeabilidad que depende de cada material.

i= gradiente hidráulico

A= área de la sección transversal

L= longitud de él espécimen

Δh = diferencia de potencial entre h_1 y h_2

De acuerdo a la ley de Darcy el coeficiente de permeabilidad puede ser representado por la ecuación 3.2, y representa la velocidad de flujo producida por un gradiente hidráulico unitario.

$$k = \frac{Q \cdot L}{h \cdot A \cdot t} \quad \text{ec. (3.2)}$$

Dónde:

k= coeficiente de permeabilidad

Q= caudal

L= longitud del espécimen

h= carga de presión

A= área de la sección transversal del espécimen.

t= tiempo durante el cual se mide Q.

2.2 Métodos para determinar el coeficiente de permeabilidad, (k)

Para determinar el coeficiente de permeabilidad del concreto asfáltico, pueden ser utilizados dos métodos, la prueba de carga o gradiente hidráulico variable (falling-head test) y la prueba de carga o gradiente hidráulico constante (constant head test).

En la prueba de carga variable (falling-head test) mide la pérdida de carga hidráulica a través del tiempo entre dos puntos 1 y 2 (ver Figura 2.1) y consiste en hacer pasar agua a través de una muestra de concreto asfáltico y registrar la altura de agua a diferentes tiempos. De acuerdo a la Ley de Darcy, el coeficiente de permeabilidad puede ser representado mediante la ecuación 2.3.

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} * \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad \text{ec. (2.3)}$$

Dónde:

k= coeficiente de permeabilidad.

a= área de tubo vertical.

L= longitud del espécimen.

H1= altura de agua al inicio de la prueba.

H2= altura del agua al final de la prueba.

A= área de la sección transversal del espécimen.

At= tiempo transcurrido entre las lecturas 1 y 2.

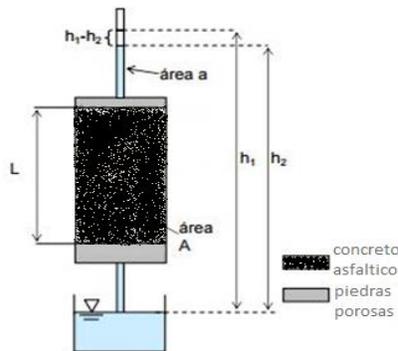


Figura 2.1 Prueba de carga hidráulica variable

Por otra parte, la prueba de carga constante (constant head method) mide la velocidad el flujo mientras que se mantiene una carga constante de agua. Puede ser representado como (ec. 2.4):

$$k = \frac{V * L}{h * A * t} \quad \text{ec. (2.4)}$$

Dónde:

k= coeficiente de permeabilidad.

V= volumen total de la descarga.

L= longitud del espécimen.

h= carga de presión.

A= área de la sección transversal del espécimen.

t= tiempo durante el cual se mide V.

El ensayo de permeabilidad se lleva a cabo en una muestra de longitud L y área A.

Consiste en hacer pasar el flujo de agua a través de un material en un tiempo determinado t, en donde los niveles de agua a la entra y salida del permeámetro pueden mantenerse constantes por medio de compuertas. La carga h dependerá solamente de la diferencia entre los niveles de agua.

El agua a la salida es recogida en una probeta graduada para medir la cantidad descarga Q, en la Figura 2.2 se puede observar dicho ensayo.

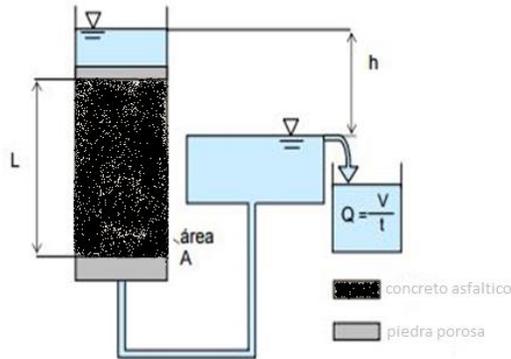


Figura 2.2 Prueba de carga constante en permeámetro de pared flexible

2.3 Dispositivos utilizados en la determinación del coeficiente de permeabilidad (k)

El coeficiente de permeabilidad del concreto asfáltico, se puede determinar directamente a través de pruebas de campo o laboratorio.

2.3.1 Campo

Permeámetro NCAT (National Center for Asphalt Technology)

Este dispositivo de medición funciona a carga variable y fue construido por NCAT el cual consta de un tubo vertical que tiene tres diámetros diferentes como se muestra en la Figura 2.3 y con una base de goma flexible a la cual se le coloca una resina para que el contacto entre la goma y el pavimento sea hermético. Estos diámetros están colocados de menor a mayor para tener observar

el fenómeno de permeabilidad. Cuando existe una permeabilidad baja se puede observar que el agua se moverá lentamente hacia abajo en el primer diámetro del tubo vertical y cuando existe una permeabilidad alta el agua bajara rápidamente por los dos primeros diámetros y en el tercero se podrá ver un flujo lento. Esto niveles permiten medir fácilmente la permeabilidad.

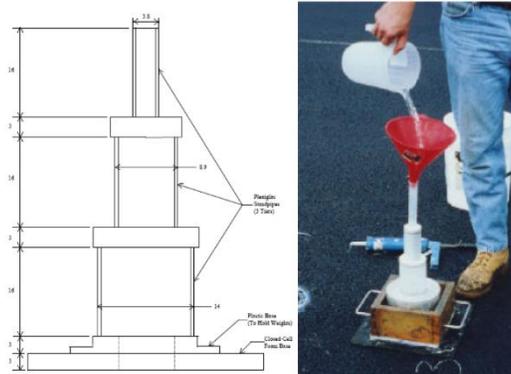


Figura 2.3 Permeámetro NCAT (Cooley, et al. 1999)

Permeámetro NCAT modificado por WPI (Worcester Polytechnic Institute)

Este es una versión del permeámetro de NCAT con modificaciones desarrolladas por Worcester Polytechnic Institute. El diseño es el mismo excepto que el mecanismo de sellado es diferente ya que se usa una base de plástico que se adapta a la textura del pavimento a si sobre esta base de plástico se coloca un base de rosquillas que pesa 110 lb, que sujeta los tubos verticales para que el sellado sea hermético. Ver Figura 2.4

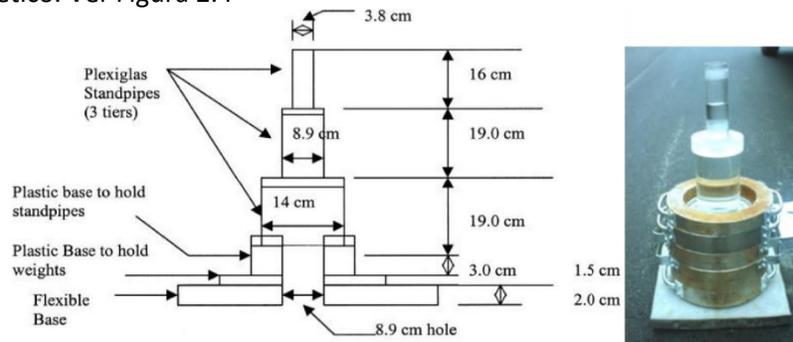


Figura 2.4 Modificación del permeámetro NCAT (Cooley, et al 1999)

Modificación del permeámetro NCAT – tubo vertical individual

Este es un permeámetro ligeramente modificado por NCAT, el cual tiene un único tubo vertical unido a una placa base. En este diseño se aumentó el diámetro de la placa base para crear un mejor sellado entre la base y el pavimento. Se utiliza una masilla de silicona y caucho sobre la placa base y la base se presiona hacia el pavimento para crear un sello hermético como se muestra en la Figura 2.5.



Figura 2.5 Modificación del permeámetro NCAT (Cooley, et al 1999)

Permeámetro molde de Marshall – sello de parafina/silicón

Este dispositivo también de carga variable funciona con un molde Marshall de seis pulgadas con una tapa de plástico que se une a la parte superior del molde tal como se muestra en las Figura 2.6 y 2.7.

La tapa tiene un agujero para que un tubo vertical pueda adaptarse, cuenta con un anillo 50 mm mayor que el molde Marshall el cual se utiliza en el proceso de sellado entre el molde y el pavimento o la superficie de un canal de concreto asfáltico. En el proceso de sellado se vierte parafina caliente o silicón en el molde Marshall y el anillo. La parafina o el silicón fluyen en los huecos de la superficie del concreto asfáltico sellándolos al endurecer.



Figura 2.6 Permeámetro molde de Marshall – sello de parafina (Cooley, et al. 1999)



Figura 2.7 Permeámetro molde de Marshall – sello de silicón (Cooley, et al. 1999)

2.3.2 Laboratorio

Permeámetro FDOT (Florida Department of Transportation)

Este permeámetro originalmente desarrollado por FDOT es el dispositivo adoptado por la ASTM (PS 129-01) para normar el procedimiento de determinación de la permeabilidad en mezclas asfálticas. El aparato consta de un tubo vertical, dos anillos de presión expandibles, un cilindro de seis pulgadas, una membrana de látex, una válvula de liberación de agua y una bomba de aire manual con un manómetro como se muestra en la Figura 2.8. Para iniciar el ensayo se tiene que saturar la muestra, a continuación la muestra se coloca dentro de la cámara donde la membrana de látex se impregna de cera y presuriza lateralmente para evitar que el agua viaje a través de las paredes de la muestra. La toma de agua se llena y se abre la válvula después para permitir el ingreso de agua en el espécimen de concreto asfáltico. Durante la prueba se registra diferentes niveles de carga hidráulica y sus respectivos tiempos, con los cuales finalmente se estima la permeabilidad del material.

Mediante algunas modificaciones este tipo de permeámetros también puede ser utilizado para llevar a cabo estimaciones de los valores la permeabilidad mediante la aplicación de carga hidráulica constante, tal como se ilustra en la Figura 2.9.

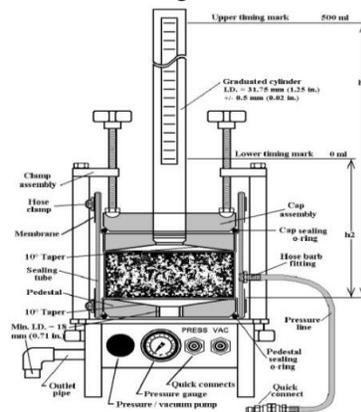


Figura 2.8 Equipo de laboratorio FDOT (H. Harris, et al 2007)



Figura 2.9 Permeámetro carga constante (Maupin, 2000)

Dispositivo Corelok

En este dispositivo (ver Figura 2.10) permite estimar la permeabilidad de un concreto asfáltico a través de cuantificación del porcentaje de porosidad de un espécimen. Dado que la porosidad es una función directa del porcentaje de vacíos de aire, éste dispositivo es utilizado frecuentemente para el control de calidad de concretos asfálticos.



Figura 2.10 Dispositivo Corelok (Cooley, et al 2002)

Permeámetros de pared flexible

En la Figura 2.11 se muestra un esquema del permeámetro de pared flexible. El permeámetro consta de dos piedras porosas y una membrana flexible que está confinando al espécimen. La cámara se encuentra presurizada lo que provoca la unión entre la membrana de látex y el espécimen disminuyendo la posibilidad de que el agua fluya entre la pared y el espécimen.

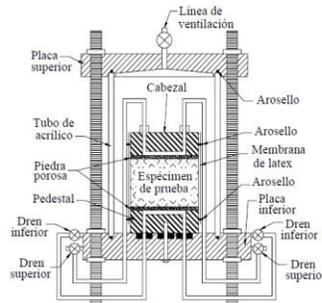


Figura 2.11 Permeámetro de pared flexible (Daniel, 1994)

Las pruebas de permeabilidad en concretos asfálticos mediante un permeámetro de pared flexible. En esta norma se mencionan las diferentes pruebas que se pueden llevar a cabo bajo la ley de Darcy.

Permeámetros de pared rígida

Este tipo de permeámetros (ver Figura 2.12) funciona de manera similar a los de pared flexible, no obstante su característica principal es que no permite la aplicación de una presión de confinamiento en el espécimen, por lo tanto el proceso de sellado para evitar que el agua fluya a través de sus paredes debe hacerse a través de la aplicación de ceras incluso de cemento asfáltico, lo cual puede representar una desventaja.

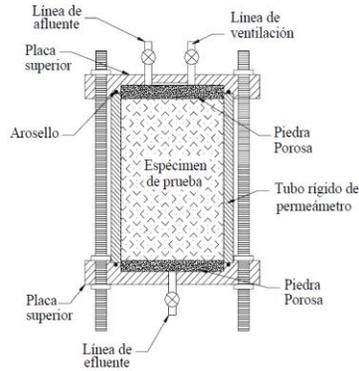


Figura 2.12 Permeámetro de pared rígida (Daniel, 1994)

Capítulo 3. Etapa experimental

3.1. Agregado pétreo

El agregado pétreo utilizado en esta investigación es un basalto triturado obtenido a partir de la explotación a cielo abierto del banco de materiales Tribasa, ubicado en Ixtapaluca km 28, Estado de México. Dicho banco se encuentra a cargo de Grupo Corporativo Interestatal. El material es utilizado en el Distrito Federal y zonas conurbadas, fundamentalmente para proyectos de pavimentación. Ver Figura 3.1



Figura 3.1 Banco Triabasa en Ixtapaluca, Edo. De México

Dicho material fue cribado, lavado y almacenado (ver Figura 3.2) para luego ser usado en la elaboración de las diferentes combinaciones de mezclas asfálticas estudiadas en esta investigación.



Figura 3.2 lavado, cribado y almacenamiento del material

3.1.1 Pruebas de consenso.

Para asegurar que el material pétreo cumpla los estándares de calidad en un concreto asfáltico es necesario que el agregado deba satisfacer las propiedades de consenso que de acuerdo a Delgado

et al. (2006), son aquellas consideradas por los investigadores de SHRP críticas para alcanzar un buen desempeño del concreto asfáltico. Estas propiedades son:

- Angularidad del agregado grueso (ASTM D 5821)
- Angularidad del agregado fino (ASTM C 1252)
- Partículas alargadas y planas (ASTM D 4791)
- Equivalente de arena (ASTM D 2419)

Angularidad del agregado grueso.

De acuerdo a la norma ASTM D 5821 este ensayo se realiza con materiales retenidos por la malla No. 4 (4.75mm). Normalmente desarrollado en gravas que necesitan triturarse para obtener caras fracturadas. Una cara fracturada es una cara que expone el interior de la partícula de grava. La importancia de esta prueba es la evaluación de la resistencia al corte mediante el incremento de la fricción entre partículas de las mezclas del agregado. Se considera una cara fracturada si tiene un área mínima proyectada que es tan grande como la de máxima área proyectada de la partícula y la cara contiene aristas definidas; esto excluye las pequeñas irregularidades. En la Figura 3.3 muestra la diferencia entre una cara fracturada entre los agregados de canto rodado y los agregados triturados.

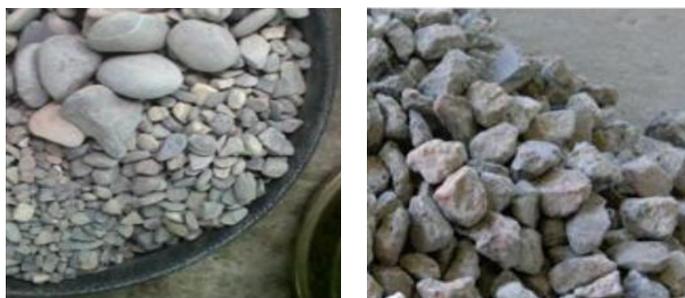


Figura 3.3 Caras redondeadas (derecha) y caras fracturadas (izquierda)

Angularidad del agregado fino

Este ensayo se realiza bajo la norma ASTM C 1252 en agregados que pasan la malla No. 4 (4.75 mm) del agregado destinado para una mezcla asfáltica. El objetivo de este ensayo es obtener la relación de vacíos de la parte fina de un agregado en el estado más suelto. Valores de vacíos menores indican formas más redondeadas y altos contenidos de vacíos indica valores de caras fracturadas. De esta forma se tiene un índice que asegura un alto nivel de fricción interna y resistencia a las deformaciones permanentes.

El ensayo consiste en verter una muestra de agregado que pasa la malla No. 4 por un embudo que posterior mete es colocado en una boquilla donde descargara el material sobre un cilindro calibrado ver Figura 3.4, el ensayo se debe realizar teniendo ya una granulometría y la gravedad específica neta del agregado (G_{sb}).



Figura 3.4 Equipo para contenido de vacíos no compactados de agregado fino

Partículas alargadas y planas

Este ensayo se realiza en agregados mayores al tamiz No. 4 (4.75 mm) bajo el procedimiento de la norma ASTM 4791. Este método cubre la determinación de la forma de la partícula, textura superficial y gradación. Provee un medio para verificar el cumplimiento con las especificaciones que limitan tales partículas. En porcentaje de partículas planas o alargadas no es una media completa de la forma de la partícula del agregado. Este ensayo se relaciona con la degradación o rompimiento de las partículas de agregado durante la producción y compactación de la mezcla. Para esta prueba se utiliza un dispositivo de calibración para identificar las partículas planas o alargadas ensayando cada partícula como se muestra en la Figura 3.5. El cálculo para el porcentaje de partículas planas y alargadas se calcula por peso o por número de partículas.



Figura 3.5 Dispositivo calibrador proporcional para medir partículas cortas y alargadas

Equivalente de arena

Este ensayo es una medida de la cantidad de contaminación de limo o arcilla en el agregado fino menor de 4.75 mm bajo la norma ASTM D 2419 dicha prueba se ilustra en la Figura 3.6. En este método se asigna un valor empírico a la cantidad relativa, Finura y características del material fino presente en una muestra formada por un suelo granular que pasa la malla No 4 (4.75 mm). El término “Equivalente de arena” quiere decir que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezclas de partículas gruesas, arenas y generalmente finos. Con esta prueba se puede estimar rápidamente en el campo la calidad de los agregados en la producción o colocación.



Figura 3.6 Ensayo de equivalente de arena

3.1.2 Pruebas de origen

Estas pruebas son aquellas pruebas frecuentemente utilizadas para valorar la procedencia de los agregados. Estas pruebas son:

- Tenacidad (Mediante la prueba de Desgaste de los Ángeles) (ASTM C131)
- Durabilidad (Intemperismo acelerado) (ASTM C88)

Desgaste de los ángeles

Los ensayos se realizan sobre partículas de agregado grueso menor 1 ½" (37.5 mm) para resistencia a la degradación usando la máquina de abrasión de los Ángeles como se muestra en la Figura 3.7. Esta prueba es una medida de la degradación de los agregados minerales de granulometría estándar de una combinación de acciones que involucran abrasión o desgaste, molienda e impacto en una cámara hueca en donde se introduce dicho mineral, el cual es impactado por cierto número de esferas de acero. La cámara gira ciertas revoluciones provocando una acción de desgaste y molienda. Después del número de revoluciones los contenidos son retirados de la cámara y es cribado para medir la degradación como pérdida de porcentaje. Los resultados nos permiten verificar la comparación para ser usadas indistintamente entre agregados de diferente origen, composición o estructura.



Figura 3.7 Maquina de Abrasión de los Ángeles

Intemperismo acelerado

Este ensayo se realiza bajo el procedimiento de la norma ASTM C88. Se realiza mediante la aplicación de periodos de inmersión en una solución de sulfato de sodio y secado en horno. El secado y la inmersión se consideran un ciclo de intemperismo. La prueba se lleva a cabo al someter a varios ciclos de saturación y secado los diferentes tamaños de agregados gruesos (gravas) de una muestra de materiales pétreos y después medir la diferencia de masa antes y después de haber sido sometido a este tratamiento Figura 3.8

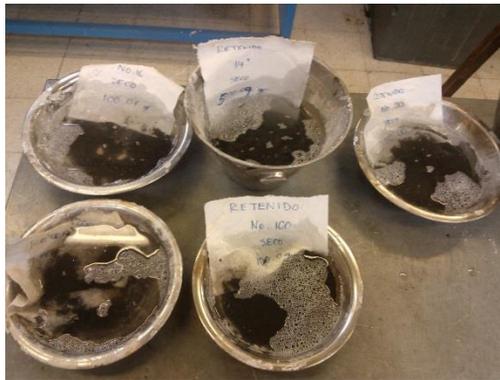


Figura 3.8 Prueba de intemperismo acelerado

3.1.3 Pruebas de rutina

Gravedad específica y absorción (ASTM C 127 y ASTM C 128)

La densidad relativa (gravedad específica) es la característica generalmente usada para el cálculo de volumen ocupado por el agregado en varias mezclas que contienen agregados incluyendo concreto asfáltico, concreto hidráulico, y otras mezclas que son proporcionadas o analizadas con base en el volumen absoluto. Por definición, la gravedad específica de un agregado es la relación del peso por unidad de volumen de un material respecto del mismo volumen de agua a

aproximadamente 23°C. Este método de prueba cubre la determinación de la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso o fino según sea el caso (no incluye el volumen de vacíos entre las partículas), la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado grueso o fino. Esquema se presenta en la Figura 3.9.



Figura 3.9 Densidad de gruesos (Josephia R., 2015)

La absorción, es el incremento en masa del agregado debido a la penetración de agua en los poros de las partículas durante un período de tiempo preestablecido, pero no incluye el agua adherida a la superficie exterior de las partículas, expresada como un porcentaje de la masa seca. La Figura 3.10 muestra dicha prueba.



Figura 3.10 Procedimiento para gravedad específica de agregados finos (Josephia R., 2015)

3.1.4 Resultados de la caracterización de agregados

En las tablas 3.1 a 3.4 se presentan los resultados de las pruebas de origen, consenso y rutina que se efectuaron en el laboratorio al agregado pétreo.

Tabla 3.1 Resumen de la caracterización del agregado pétreo (Martínez O., 2014)

Pruebas de consenso				
Ensayo	Resultado	Especificación de la SCT	Superpave	Norma ASTM
Angularidad del agregado grueso [%]	100/100	-	95/90 mínimo	D 5821
Angularidad del agregado fino [%]	42.37	-	45 mínimo	C 1252
Forma de la partícula [%]	2	35 máximo	10 máximo	D 4791
Equivalente de arena [%]	68.63	50 mínimo	45 mínimo	D 2419

Tabla 3.2 Resumen de la caracterización del agregado pétreo

Pruebas de origen				
Ensayo	Resultado	Especificación de la SCT	Superpave	Norma ASTM
Desgaste de Los Ángeles [%]	13.38	30 máximo	35 máximo	C 131
Intemperismo acelerado de Agregado Grueso	0.0475	-	10 % máximo	C 88

Tabla 3.3 Gravedades específicas del agregado grueso (Martínez O., 2014)

Prueba de rutina						
Tamaño de la partícula		Gsb (Neta del agregado)	Gss (Saturada superficialmente seca)	Gsa (Aparente del agregado)	Absorción de agua [%]	Norma ASTM
Pulgadas	mm					
1/2"	12.5	2.608	2.649	2.27	1.586	C 127
3/8"	9.5	2.613	2.654	2.726	1.586	
1/4"	6.3	2.608	2.653	2.729	1.691	
# 4	4.75	2.602	2.647	2.723	1.697	C 128

Tabla 3.4 Gravedades específicas del agregado fino

Prueba de rutina					
Tamaño de la partícula		Propuesta de granulometría	Gsb (Neta del agregado)	Absorción de agua [%]	Norma ASTM
Pulgadas	mm				
No. 8 a Filler	2.36 a Filler	1	2.59	2.03	C 128
		2	2.613	1.57	
		3	2.613	2.08	
		4	2.625	2.04	
		5	2.631	2.05	
		6	2.629	2.01	
		7	2.63	2.59	
		8	2.643	1.62	
		Fuller	2.648	1.4	

3.2 Cemento asfáltico

El cemento asfáltico que se utilizó en esta investigación fue EKBE PG 64-22 procedente de la refinería de Tula en el estado de Hidalgo. A continuación se describen las pruebas realizadas para su caracterización.

Viscosidad dinámica

Este ensayo obtiene la viscosidad dinámica del cemento asfáltico para determinar en qué tipo de regiones climatológicas debe utilizarse, por ejemplo una cemento asfáltico AC-20 con una viscosidad 200 ± 40 Pa.s (2000 ± 400 Poises) es utilizado en la elaboración de carpetas en mezclas en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 2 ver Figura 3.11. La prueba consiste en tomar el tiempo que tarda en pasar 20 ml de cemento asfáltico a través de un tubo capilar al vacío, bajo condiciones de presión y temperatura establecidas Figura 3.11.



Figura 3.11 Regiones geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su viscosidad dinámica a 60°C y ensayo de la viscosidad dinámica

Viscosidad cinemática

Este ensayo determina la viscosidad cinemática en cementos asfálticos a temperatura de mezclado 135°C. Esta prueba permite verificar que con la temperatura de mezclado de cementos asfálticos convencionales, se alcance una viscosidad adecuada para que se logre la cobertura total del agregado por el ligante asfáltico

Consiste en medir el tiempo requerido para que un volumen fijo de líquido fluya, por capilaridad, a través de un viscosímetro, como es que se muestra en la Figura 3.12. Para obtener la viscosidad cinemática se multiplica el tiempo de flujo en segundos por el factor de calibración del viscosímetro.



Figura 3.12 Ensayo de la viscosidad cinemática

Viscosidad segundos Saybolt-Furol

La medida de la viscosidad de un cemento asfáltico es la consistencia o la resistencia para fluir. Esta prueba tiene por objeto determinar la viscosidad "Saybolt-Furol" de los cementos asfálticos a las temperaturas de 135°C. Esta prueba consiste en determinar el tiempo que tardan en pasar 60 cm³ de cemento asfáltico a través de un orificio Furol, instalado en un tubo de viscosidad Saybolt. En el Figura 3.13 se ilustra dicho ensayo.



Figura 3.13 Viscosímetro Saybolt-Furol

Penetración

Este ensayo permite determinar el grado de penetración del cemento asfáltico el cual es una indicación de la consistencia del material.

La prueba se realiza con una aguja normalizada de 100 g, a 25 °C durante 5 segundos. La aguja penetra verticalmente en la muestra bajo condiciones normalizadas de temperatura, carga y tiempo. Se determina la penetración por la profundidad a la que la aguja se hunde en el asfalto medida en decimas de milímetros. En la Figura 3.14 se ilustra el ensayo.



Figura 3.14 Ensayo de penetración del cemento asfáltico

Punto de reblandecimiento

Esta prueba permite determinar la temperatura a la cual el asfalto empieza a fluir. El ensayo se basa en la determinación de la temperatura a la cual una esfera de acero produce una deformación de 25 mm, en una muestra de asfalto sostenida en un anillo horizontal, que se calienta gradualmente dentro de un baño de agua, como se ilustra en la Figura 3.15.



Figura 3.15 Ensayo de punto de reblandecimiento

Punto de inflamación

En este ensayo de seguridad nos permite conocer cuál es la temperatura mínima a la cual el cemento asfáltico produce flamas instantáneas al estar en contacto con una llama directamente. La prueba consiste en colocar una muestra de cemento asfáltico en una copa de Cleveland como se ilustra en la Figura 3.16 donde se incrementa la temperatura paulatinamente hasta lograr que se produzcan flamas instantáneas al pasar las llamas de un encendedor. La temperatura a la cual se provoca este fenómeno se denomina punto de inflamación.



Figura 3.16 Ensayo de punto de inflamación

Determinación del módulo de corte y ángulo de fase

Este instrumento es utilizado para medir el módulo de corte complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ^*) del cemento asfáltico. (G^*) es una medida de la resistencia total de un material a la deformación cuando se somete repetitivamente al corte. El mismo tiene dos componentes: una elástica (recuperable) y otra viscosa (no recuperable). (δ^*) es un indicador de las proporciones de las deformaciones recuperable y no recuperable. El equipo requiere una muestra de cemento asfáltico de geometría circular a una esfera de torsión cíclica a temperatura controlada mediante un reómetro de corte. El equipo nos permite medir la deformación que se presenta al aplicar una fuerza de torsión dada Figura 3.17.



Figura 3.17 Reómetro de corte dinámico

Residuo de película delgada en horno rotatorio

La prueba consiste en simular el envejecimiento u oxidación de un cemento asfáltico durante las operaciones de mezclado y colocación para prever el desempeño de la carpeta a corto plazo.

El procedimiento de ensayo requiere de un horno eléctrico con base circular giratoria como se muestra en la Figura 3.18. La base circular sujeta envases de muestra que rotan alrededor de su centro. Se aplicará flujo de aire dentro de cada envase de muestra con una boquilla ubicada en la parte inferior de la base rotatoria. Una vez terminado este proceso se inicia de nuevo con los diferentes ensayos para así comparar los resultados en estado original y envejecido.



Figura 3.18 Ensayo de película fina en horno rotatorio

Gravedad específica del cemento asfáltico

Esta prueba se emplea para poder determinar los vacíos en las mezclas asfálticas compactadas y endurecidas. El peso específico es la relación de peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas especificadas. Así, un peso específico de 1,05 significa que el material es 1,05 veces más pesado que el agua a la temperatura fijada. En la Figura 3.19 se muestra el recipiente utilizado para este procedimiento.

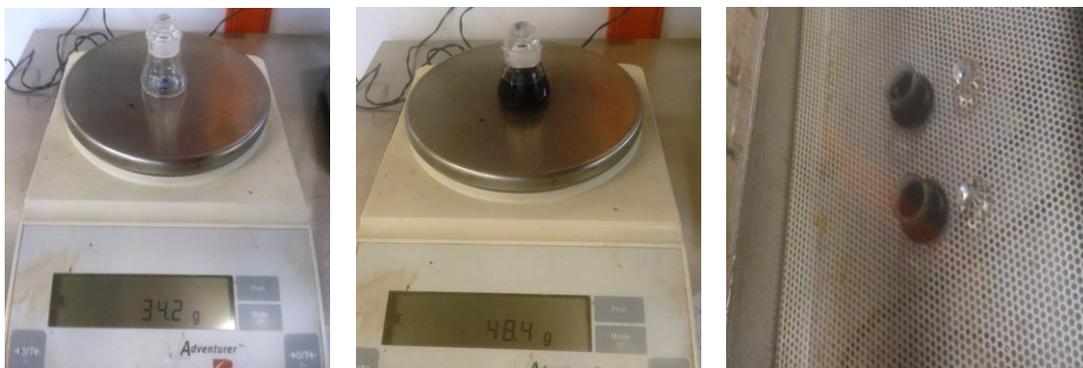


Figura 3.19 Determinación del peso específico del cemento asfáltico

3.2.1 Resultados de la caracterización cemento asfáltico

En la tabla 3.5 se muestran los resultados de los ensayos realizados por Josephia (2015). Se comparan los resultados con los límites e intervalos que establece la metodología Superpave y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. También se indican las normas ASTM para cada ensayo.

Tabla 3.5 Resultados de los ensayos de laboratorio

Ensayo	Resultado	Especificación de la SCT	Superpave	Norma ASTM
Viscosidad dinámica a 60 °C [Pa*s]	232	200 ± 40	-	D-2171
Viscosidad cinemática a 135 °C [1 mm ² /s = 1 centiske]	375	300	-	D-2170
Punto de reblandecimiento [°C]	48	48-56	-	D-36
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s [10 ⁻¹ mm]	72	60 mínimo	-	D-5
Punto de inflamación, Copa abierta de Cleveland [°C]	239	232 mínimo	-	D-92
Viscosidad Saybolt-Furol a 135 °C [s]	231	120 mínimo	-	D-88
Gravedad específica a 25 °C	1.025	-	-	D-70
Película delgada en el horno rotatorio [%]	0.53	1 máximo		D-2872
Del residuo de la prueba de la película delgada				
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s [10-1 mm]	40	-	-	D-5
Punto de reblandecimiento [°C]	55.2	-	-	D-36

3.3 Granulometría

En este trabajo se utilizaron nueve granulometrías propuestas por (Gaxiola, et al., 2014) en un trabajo previo a esta investigación, las cuales presentan composiciones de gravas arenas y finos diferentes tal como se indica en las Tablas 3.6 a 3.10 y Figur. a 3.20

Al agregado pétreo se le clasifico mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como se puede observar en las tablas 3.11 y 3.12.

El tamaño máximo nominal del agregado es la abertura del menor tamiz donde se retiene más del 10% del material. El tamaño máximo es el siguiente tamiz mayor que el tamaño máximo nominal. Las granulometrías propuestas tienen un tamaño máximo de 3/4" [19 mm] y un tamaño máximo nominal de 1/2" [12.5 mm].

Tabla 3.6 Granulometría de Fuller

Abertura de tamices		Granulometría de Fuller para n = 45		
		Porcentaje de gravas	Porcentaje de arenas	porcentaje de finos
Pulgadas	Milímetros			
3/4"	19	-	-	-
1/2"	12.5	17.17		
3/8"	9.5	9.622		
1/4"	6.3	12.35		
No. 4	4.75	7.26		
No. 8	2.36		14.47	
No. 16	1.18		10.48	
No. 30	0.6		7.51	
No. 50	0.3		5.66	
No. 100	0.15		4.14	
No. 200	0.075		3.03	
Filler	-			8.29
total=		46.40	45.30	8.29

Tabla 3.7 Granulometría 1 y 2

Abertura de tamices		Propuesta 1			Propuesta 2		Porcentaje de finos
		Porcentaje de gravas	Porcentaje de arenas	Porcentaje de finos	Porcentaje de gravas	Porcentaje de arenas	
Pulgadas	Milímetros						
3/4"	19	-	-	-	-	-	-
1/2"	12.5	40			30		
3/8"	9.5	20			20		
1/4"	6.3	20			20		
No. 4	4.75	8			10		
No. 8	2.36		6			8	
No. 16	1.18		1			3	
No. 30	0.6		1			2	
No. 50	0.3		1			2	
No. 100	0.15		1			2	
No. 200	0.075		1			2	
Filler	-			1			1
total=		88	11	1	80	19	1

Tabla 3.8 Granulometrías 3 y 4

Abertura de tamices		Propuesta 3			Propuesta 4		Porcentaje de finos
		Porcentaje de gravas	Porcentaje de arenas	Porcentaje de finos	Porcentaje de gravas	Porcentaje de arenas	
Pulgadas	Milímetros						
3/4"	19	-	-	-	-	-	-
1/2"	12.5	22			10		
3/8"	9.5	16			20		
1/4"	6.3	22			20		
No. 4	4.75	10			10		
No. 8	2.36		10			12	
No. 16	1.18		6			12	
No. 30	0.6		4			5	
No. 50	0.3		3			3	
No. 100	0.15		2			2	
No. 200	0.075		3			3	
Filler	-			2			3
total=		70	28	2	60	37	3

Tabla 3.9 Granulometría 5 y 6

Abertura de tamices		Propuesta 5			Propuesta 6		
		Porcentaje de gravas	Porcentaje de arenas	Porcentaje de finos	Porcentaje de gravas	Porcentaje de arenas	Porcentaje de finos
Pulgadas	Milímetros						
3/4"	19	-	-	-	-	-	-
1/2"	12.5	22			24		
3/8"	9.5	13			13		
1/4"	6.3	15			15		
No. 4	4.75	7			7		
No. 8	2.36		13			13	
No. 16	1.18		9			9	
No. 30	0.6		6			6	
No. 50	0.3		4			4	
No. 100	0.15		3			3	
No. 200	0.075		2			2	
Filler	-			6			4
total=		57	37	6	59	37	4

Tabla 3.10 Granulometría 7 y 8

Abertura de tamices		Propuesta 7			Propuesta 8		
		Porcentaje de gravas	Porcentaje de arenas	Porcentaje de finos	Porcentaje de gravas	Porcentaje de arenas	Porcentaje de finos
Pulgadas	Milímetros						
3/4"	19	-	-	-	-	-	-
1/2"	12.5	23			20		
3/8"	9.5	13			12		
1/4"	6.3	15			15		
No. 4	4.75	7			8		
No. 8	2.36		13			14	
No. 16	1.18		9			9	
No. 30	0.6		6			7	
No. 50	0.3		4			5	
No. 100	0.15		3			4	
No. 200	0.075		2			3	
Filler	-			5			3
total=		58	37	5	55	42	3

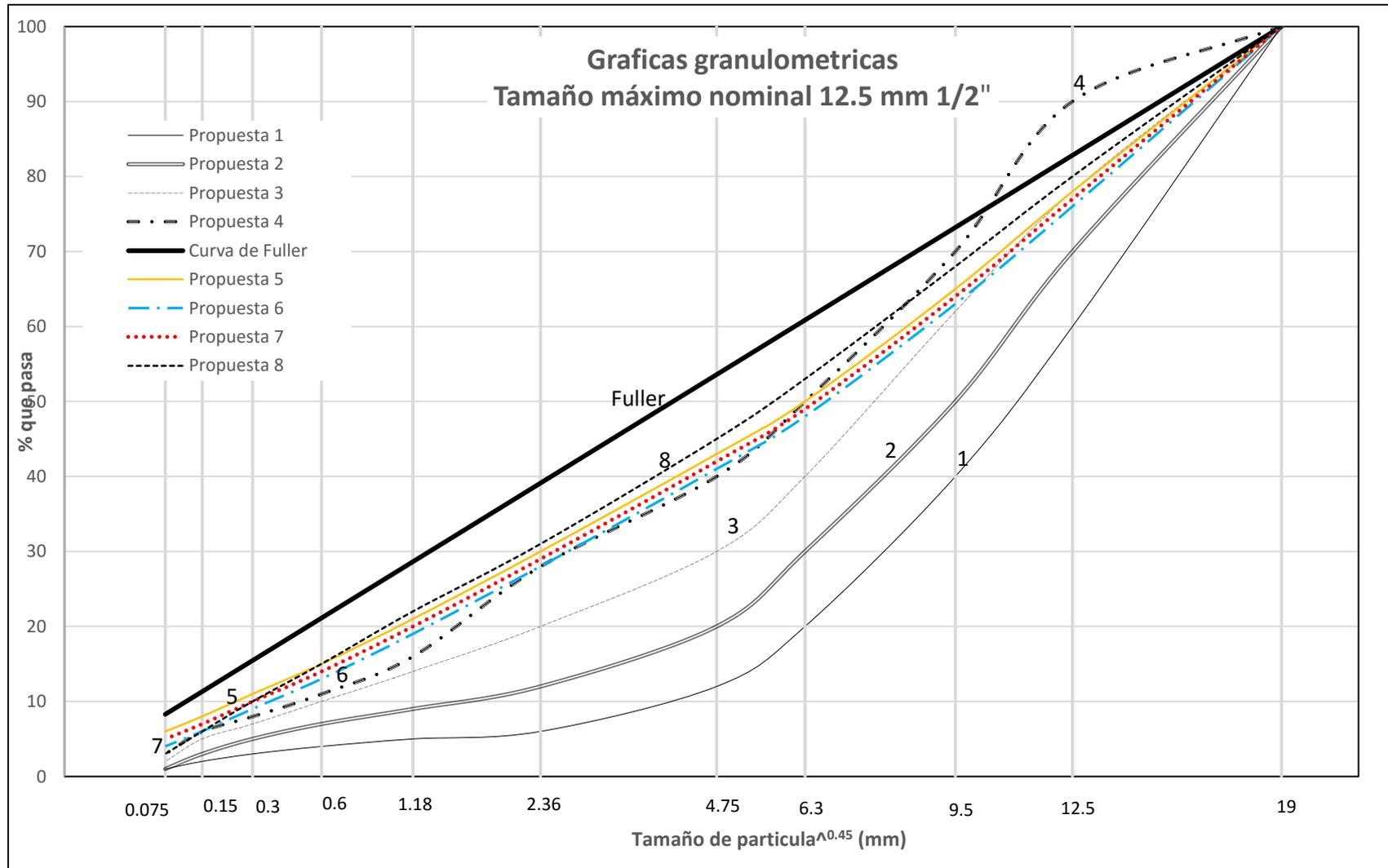


Figura 3.20 Granulometrías propuestas

A continuación en las Tablas 3.11 y 3.12, se presentan los resultados de clasificación mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) de las granulometrías mostradas en la Figura 3.20 realizada por Rangel (2015).

Tabla 3.11 Resumen de valores obtenidos para la clasificación (SUCS)

Granulometrías	1	2	3	4	5	6	7	8	Fuller (9)
D ₆₀	12.5	11.13	9.26	8.03	8.52	8.93	8.73	7.89	6.28
D ₃₀	8.71	6.3	4.75	2.82	2.36	2.79	2.58	2.25	1.36
D ₁₀	4.12	1.61	0.6	0.51	0.26	0.39	0.3	0.3	0.12
Cc	1.47	2.21	4.06	1.94	2.51	2.24	2.54	2.14	2.45
Cu	3.03	6.91	15.43	15.75	32.77	22.9	29.1	26.3	52.33
% retenido #4	88	80	70	60	57	59	58	55	46.41
Arenas y finos	12	20	30	40	43	41	42	45	53.59
% pasa #200	1	1	2	3	6	4	5	3	8.29

Tabla 3.12 Clasificación SUCS de las granulometrías

Granulometrías								
1	2	3	4	5	6	7	8	Fuller (9)
GP	GW	GP	GW	GW	GW	GW	GW	SW
Grava limpia mal graduada	Grava limpia bien graduada	Grava limpia mal graduada	Grava limpia bien graduada	Grava intermedia bien graduada	Grava limpia bien graduada	Grava intermedia bien graduada	Grava limpia bien graduada	Arena bien graduada a con grava

3.4 Dosificación del cemento asfáltico

La determinación del contenido de cemento asfáltico óptimo de un concreto asfáltico, depende de varios criterios, uno de ellos es asegurar que las partículas del agregado queden completamente cubiertas para generar la suficiente cohesión en el concreto y resistir a las cargas que serán aplicadas, no obstante otros aspectos influyen significativamente en dicha determinación y varían en función de la aplicación que se le vaya a dar al material (p.e barrera impermeable, pavimento, etc). Si bien esta investigación no se enfocó en determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico de cada una de las granulometrías estudiadas, se propusieron tres contenidos de cemento asfáltico, definidos con respecto a la masa del agregado, los cuales se indican en la Tabla 3.13

Tabla 3.13 Contenido de cemento asfáltico

Contenido	%
1	5.7
2	6.0
3	6.3

3.5 Gravedad específica teórica máxima

La gravedad específica teórica máxima “densidad de rice” se determinó con el método de prueba ASTM D 2041, la prueba se realizó para las granulometrías propuestas. A continuación se describe el procedimiento del ensayo.

- Una vez que el agregado pétreo haya tenido un tratamiento (lavado, secado, cribado) en el laboratorio, se procede a seleccionar una de las granulometrías propuestas para empezar.
- Después de dosificar la propuesta se vacía el cemento asfáltico a una temperatura de 160°C en una olla junto al agregado pétreo previamente precalentado a una temperatura de 150° C durante 1 minutos como se muestra en la Figura 3.21.



Figura 3.21 Vaciado de cemento asfáltico sobre agregado pétreo

- A continuación esta mezcla se homogeniza en una mezcladora mecánica como se muestra en la Figura 3.22 hasta por 10 minutos de a una temperatura de 145°C



Figura 3.22 Homogenización en una mezcladora mecánica

- La mezcla homogenizada es vaciada en una charola como la que se muestra en la Figura 3.23, donde es enfriada a temperatura ambiente con la ayuda de palas tratando de mantenerla en estado suelto.



Figura 3.23 Charola en donde se enfría la mezcla asfáltica.

- Cuando la mezcla asfáltica se encuentra a temperatura ambiente se procede a determinar su masa seca.
- La mezcla es sumergida en un recipiente con agua a una temperatura de 25°C y después se pesa junto con el recipiente.
Se aplica un proceso de desaireación al agua en la cual se encuentra sumergida la mezcla, mediante una bomba de vacío a 25 mm Hg durante 15 minutos. En la Figura 3.24 se muestra el recipiente y la bomba para desairar
- Después de esto se determina la masa del recipiente con la mezcla y el agua desairada a 25°C.



Figura 3.24 Recipiente y bomba para desairar

- Por último se determina la densidad teórica máxima de la mezcla mediante la ecuación:

$$G_{mm} = \frac{A}{A+B-C} \quad \text{ec. (3.3)}$$

Dónde:

G_{mm} : gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta.

A: masa de la mezcla asfáltica seca [g].

B: masa del recipiente sumergido [g].

C: masa del recipiente con muestra sumergido [g].

En la Tabla 3.14 se presenta los resultados de todas las mezclas evaluadas donde es muy claro que los valores de G_{mm} disminuyen cuando aumenta el contenido de cemento asfáltico.

Para garantizar un resultado preciso, se realizó el ensayo al menos 3 veces por cada mezcla estudiada.

Tabla 3.14 Densidad teórica máxima (Gmm)

	Gmm	Contenido de cemento asfáltico [%]		
		5.7	6.0	6.3
Granulometría	Fuller	2.435	2.425	2.419
	1	2.463	2.444	2.44
	2	2.448	2.443	2.421
	3	2.443	2.434	2.418
	4	2.436	2.431	2.415
	5	2.435	2.425	2.416
	6	2.434	2.427	2.418
	7	2.442	2.419	2.412
	8	2.449	2.432	2.424

3.6 Elaboración de especímenes cilíndricos

3.6.1 Mezclado

El proceso de mezclado se llevó a cabo siguiendo el mismo proceso descrito en el numeral 3.5. Al final de este proceso la mezcla homogenizada se vació con la ayuda de una recipiente en forma de cuneta procurando un distribución adecuada del material, en moldes cilíndricos previamente precalentados al horno a una temperatura de 150° C por un periodo de 5 horas, ver Figuras 3.25 y 3.26.



Figura 3.25 Condicionamiento de equipo para mezclar, compactar y agregado pétreo



Figura 3.26 Llenado de molde para compactar mediante una cuneta.

3.6.2 Compactación

En esta etapa de del proceso de elaboración de especímenes, se dejó reposar la mezcla al interior de los moldes cilíndricos hasta que alcanzaran una temperatura de 130 °C, para luego someterla a un proceso de compactación con compactador giratorio, el cual mediante un proceso de amasado del material logra densificar de manera similar al proceso que se lleva a cabo en campo. El equipo fue programado para aplicar una presión de 600 KPa y 50 giros bajo un ángulo de inclinación de 1.25°. Bajo estas condiciones se obtuvieron cilindros de concreto asfáltico de 15 cm de diámetro y 20 cm \pm 1 cm de altura de diferente masa. En la Figura 3.27 se muestra el equipo compactador.



Figura 3.27 Compactador giratorio SUPERPAVE

Al finalizar el proceso de compactación, el molde fue retirado del dispositivo y posteriormente, luego de un periodo de reposo se extrajeron los especímenes, tal como se muestra en la Figura 3.28.



Figura 3.28 Extracción del espécimen

3.6.3 Preparación de los especímenes

Luego de un periodo de reposo de al menos 24 horas, se procedió a realizar un corte circular de los especímenes, mediante la extracción de núcleos con el fin de eliminar el material que estuvo en contacto con los moldes durante el proceso de compactación, el cual sufre una mayor densificación. En la Figura 3.29 se muestra la cortadora mecánica con la cual obtuvieron cilindros de 10.1 cm de diámetro.



Figura 3.29 Extracción de núcleos de concreto asfáltico

3.7 Obtención de la gravedad específica neta (G_{mb})

Para determinar este parámetro previamente se hicieron pruebas de absorción a los especímenes de concreto asfáltico bajo el procedimiento que indica la norma ASTM D 2726. A aquellos especímenes con valores de absorción menores al 2% se les determinaron los valores de la gravedad específica neta utilizando la ecuación 3.4, tal como lo indica la misma norma. Por otra parte, a los especímenes con absorciones mayores al 2%, luego de ser secados al horno se les aplicó un recubrimiento de estearato de zinc y posteriormente se les determinó los valores de la gravedad específica neta bajo la norma la norma ASTM D 1188 utilizando la ecuación 3.5.

$$G_{mb} = \frac{A}{B-C} \quad \text{ec. (3.4)}$$

Dónde:

A: masa del espécimen seco (g)

B: masa en el aire del espécimen saturado superficialmente seco (g)

C: masa del espécimen sumergido en agua a 25 °C (g)

Norma ASTM D 1188

$$G_{mb} = \frac{A}{D-E-\left(\frac{D-A}{F}\right)} \quad \text{ec. (3.5)}$$

Dónde:

A: masa al aire del espécimen (g)

D: masa al aire del espécimen más estearato de zinc (g)

E: masa del espécimen con estearato de zinc sumergido en agua a 25 °C (g)

F: gravedad específica del estearato de zinc (1.019 g/cm³).

En la Tabla 3.15 se presentan los resultados de la gravedad específica neta (G_{mb}) de cada uno de los núcleos de concreto asfáltico.

Tabla 3.15 Resultados de gravedades específicas netas

Granulometrías									
(Gmb)									
Contenido de cemento asfáltico [%]	Fuller	1	2	3	4	5	6	7	8
5.7	2.414	1.887	2.071	2.265	2.309	2.419	2.388	2.405	2.404
6	2.407	2.1.944	2.096	2.264	2.313	2.413	2.385	2.399	2.403
6.3	2.403	1.965	2.054	2.276	2.325	2.409	2.384	2.393	2.397

3.8 Corte de los especímenes cilíndricos de prueba

Para lograr la geometría requerida de los especímenes de prueba se realizaron cortes diametrales mediante una cortadora mecánica (ver Figura 3.30) a fin de obtener nuevos especímenes con dimensiones de 10.1 cm de diámetro y 4.5 a 5.1 cm aproximadamente. De cada espécimen original se obtuvieron 3 muestras una superior, central e inferior siendo la central la que se tomó para el ensayo, tal como se indica en la Figura 3.31. Un total de 54 especímenes de prueba fueron elaborados.



Figura 3.30 Equipo con sierra de corte



Figura 3.31 Cortes de especímenes

3.9 Ensayo de permeabilidad

En esta investigación se estimaron los valores de permeabilidad de especímenes de concreto asfáltico elaborados a partir de nueve propuestas granulométricas y tres contenidos de cemento asfáltico, mediante el permeámetro de pared flexible y de carga constante del Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería.

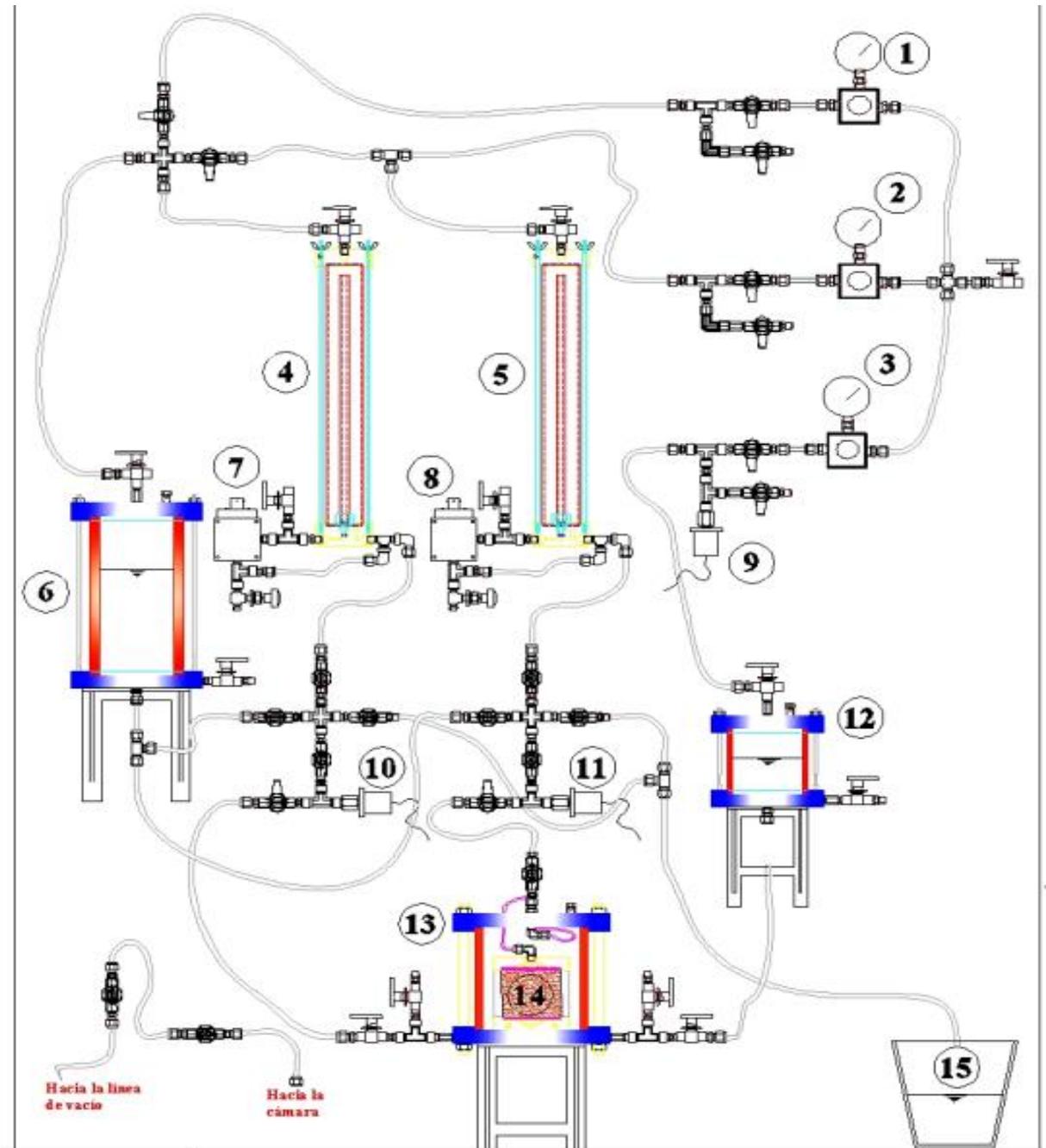
Equipo

Permeámetro de carga de pared flexible y carga constante similar al ilustrado en la Figura 3.32 constituido por una cámara para contener el espécimen de concreto asfáltico y el fluido de confinamiento durante el ensayo, con capacidad de resistir la presión de confinamiento y contrapresión de la prueba, con un sistema de válvulas interconectadas que transportan aire a presión transferida a tuberías saturadas con agua. Cuenta con dos buretas que alimentan el flujo interno de la probeta y también los volúmenes de agua que entran salen o circulan a través de la muestra. La presión transferida del aire al agua que satura la muestra se mide por medio de sensores colocados estratégicamente. El volumen de agua que pasa a través de las buretas se mide por medio de sensores de cambio volumétrico que dan mediciones de hasta milésima de cm^3 (De la Rosa J., 2008).

A continuación se indican los pasos que se siguieron para el montaje, saturación y determinación de los valores de permeabilidad de los especímenes de concreto asfáltico elaborados a partir de diferentes distribuciones granulométricas y contenidos de cemento asfáltico.

Montaje

- Determinación de las dimensiones de los especímenes de concreto asfáltico.
- Recubrimiento lateral de los especímenes con pasta de silicón como se muestra en la Figura 3.33 para tener un sello entre dicho espécimen y la membrana.



1	Regulador contrapresión inferior.	6	Depósito de agua.	11	Sensor contrapresión superior.
2	Regulador contrapresión superior.	7	Sensor cambio volumétrico inf.	12	Interfaz aire-agua.
3	Regulador presión confinamiento.	8	Sensor cambio volumétrico sup.	13	Cámara que aloja la muestra.
4	Bureta flujo inferior.	9	Sensor presión confinamiento.	14	Muestra de suelo.
5	Bureta flujo superior.	10	Sensor contrapresión inferior.	15	Depósito de agua.

Figura 3.32 Esquema del permeámetro (De la rosa M., 2008)



Figura 3.33 Recubrimiento lateral con pasta de silicón

- Montaje del arreglo de piedras porosas superior e inferior y del espécimen de concreto asfáltico sobre el pedestal del permeámetro.
- Recubrimiento del arreglo de piedras porosas y espécimen de concreto asfáltico con la membrana flexible, la cual se sujetó a ambas piedras mediante dos ligas de hule a fin de lograr un sello hermético en dicho arreglo, tal como se muestra en la Figura 3.34.

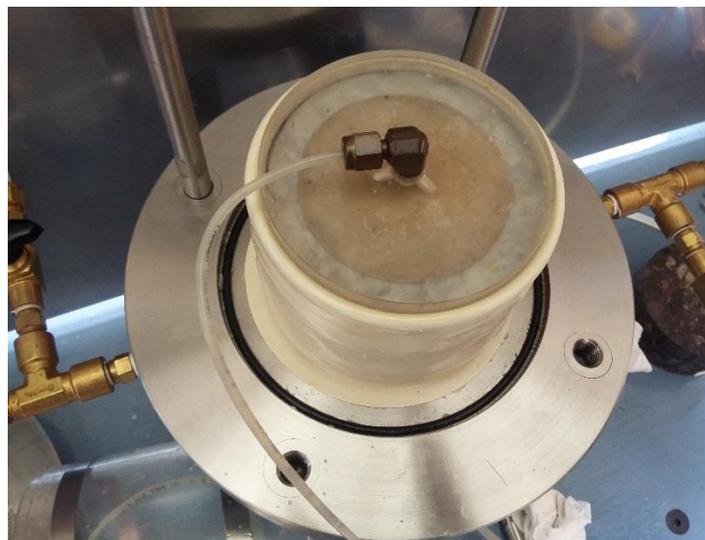


Figura 3.34 Especimen de concreto asfaltico sellado herméticamente

- Colocación de la cámara acrílica sobre el espécimen como se muestra en la Figura 3.35.
- Sellado de la cámara que aloja el espécimen de concreto asfáltico, con la cubierta metálica para lograr un sello hermético como se observa en la Figura 3.36

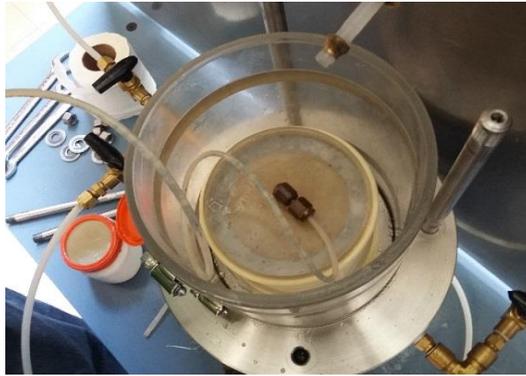


Figura 3.35 Colocación de pared acrílica.



Figura 3.36 Sellado de la cámara.

- Llenado de la cámara con agua destilada por la parte inferior mediante una manguera como se muestra en la Figura 3.37.



Figura 3.37 Manguera con la cual se llena la cámara

- Cierre de todas las válvulas de contra presión. Aplicar un confinamiento de 6.0 kg/cm^2 , abrir lentamente la válvula que ejercerá presión alrededor de la membrana, para asegurar

el sello hermético al espécimen a si también verificar que no existan fugas, tal y como lo muestra la Figura 3.38

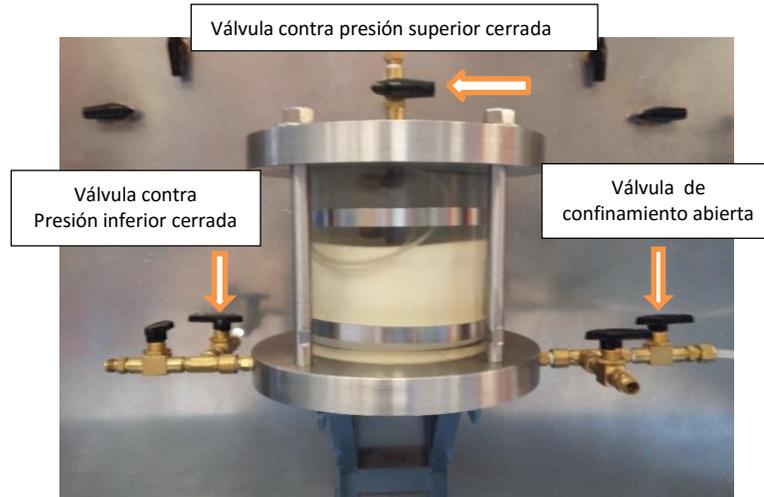


Figura 3.38 Ubicación de válvulas.

- Dejar aplicado el confinamiento, para continuar con la saturación.

Saturación

- Los especímenes con contenidos de vacíos aire menores al 3%, previamente se saturaron parcialmente, mediante la aplicación de una presión de confinamiento de 6.0 kg/cm^2 , por un periodo de 72 horas en cámaras herméticas llenas de agua, como se muestra en la Figura 3.39.



Figura 3.39 Cámaras de saturación.

- Montaje de los especímenes en el permeámetro de carga constante y ajuste de la carga hidráulica de saturación mediante los reguladores de presión inferior y superior a 5.5 kg/cm^2 , asegurando que la presión de confinamiento sea ligeramente mayor que las contrapresiones para evitar el hinchamiento de la membrana.

- Apertura de las válvulas de contrapresión inferior y superior una vez se tiene fijada la carga de 5.5 kg/cm^2 , como se indica en la Figura 3.40. Lo anterior, con el fin de dar pasó al agua hacia los especímenes.

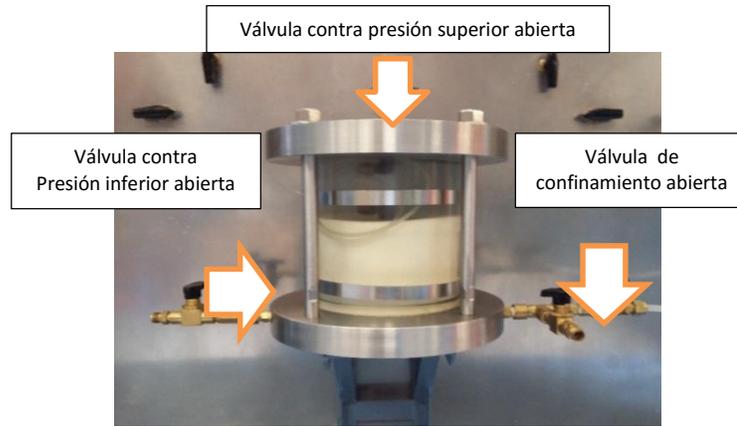


Figura 3.40 Ubicación de válvulas.

- Monitoreo de los sensores de cambio volumétrico y de las buretas graduadas (ver Figura 3.41) los cuales registran el flujo del agua a través de los especímenes durante la etapa de saturación. Se considera que el material está saturado cuando las lecturas de las buretas y los sensores de cambio volumétrico, se mantienen sin cambio en un periodo de al menos 24 horas

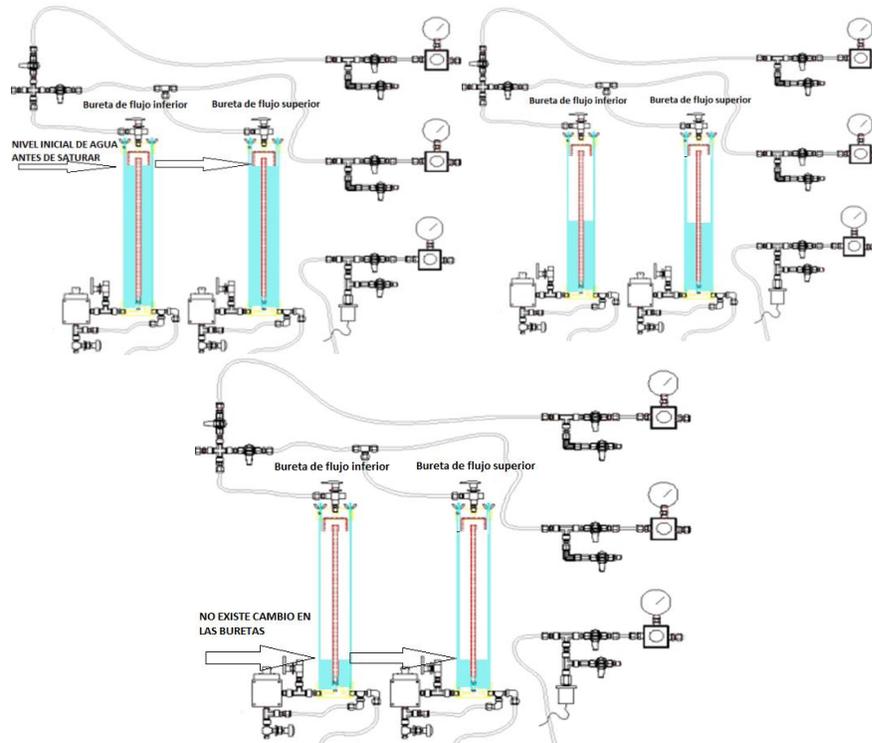


Figura 3.41 Monitoreo de buretas

- Cierre de las válvulas de contrapresión y confinamiento una vez saturado el espécimen.

Ensayo

- Manteniendo el mismo valor de confinamiento de cámara, se ajustan los reguladores de contrapresión, permitiendo que exista una diferencia de presión entre ellos para que de esta forma que existe un flujo que pase a través del espécimen. En la Figura 3.42 se muestra como el regulador de presión inferior marca 4 kg/cm^2 y el superior 3 kg/cm^2 así la carga efectiva es de 1 kg/cm^2 y al abrir las válvulas de contrapresión el flujo del agua será ascendente como se indica en la Figura 3.43.



Figura 3.42 Ejemplo para tener una carga efectiva de 1 kg/cm^2

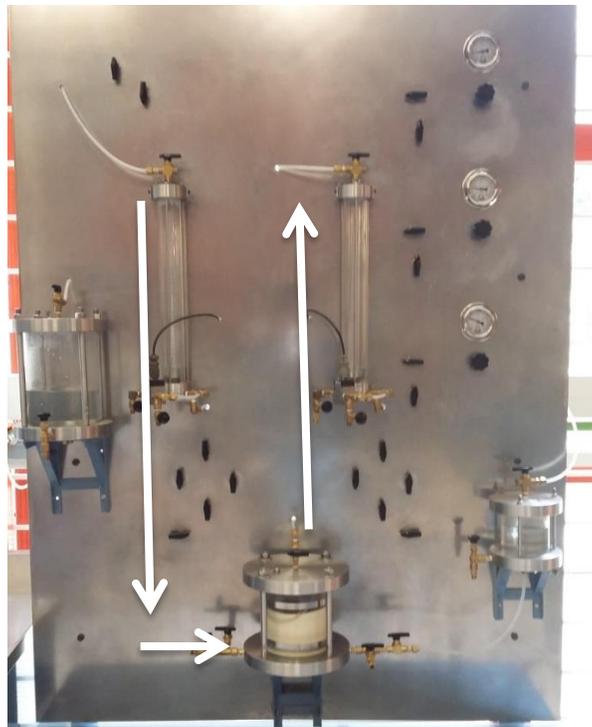


Figura 3.43 Flujo de agua ascendente a través del espécimen

- Definición y ajuste de la carga efectiva de prueba, se deberá tomar nota del nivel inicial de las buretas (Li) tal como se muestra en la Tabla 3.14.
- Apertura de las válvulas de contrapresión y monitoreo de los niveles de buretas (Lf) en el tiempo.
- Determinación de la permeabilidad de los especímenes de concreto mediante la ecuación 2.4.

Tabla 3.16 Ejemplo de la prueba saturada en una propuesta abierta.

Carga (cm)	carga (Kg/cm ²)	Tiempo (s)	Bureta inferior					Bureta superior					K _{prom} (cm/seg)
			Li (cm)	Lf (cm)	Diferencia (cm)	Volumen (cm ³)	K (cm/s)	Li (cm)	Lf (cm)	Diferencia (cm)	Volumen (cm ³)	K (cm/s)	
100	0.1	111.094	24	12.2	11.8	5.015	2.7E-05	4	17.6	13.6	5.168	2.8E-05	2.8E-05
100	0.1	123.757	24	10.5	13.5	5.7375	2.8E-05	4	19.5	15.5	5.89	2.9E-05	
100	0.1	115.198	24	11.1	12.9	5.4825	2.9E-05	4	18.5	14.5	5.51	2.9E-05	
100	0.1	78.639	24	14.6	9.4	3.995	3.1E-05	4	13.9	9.9	3.762	2.9E-05	
300	0.3	40.808	24	6.7	17.3	7.3525	3.6E-05	4	23.5	19.5	7.41	3.7E-05	3.6E-05
300	0.3	35.064	24	9.1	14.9	6.3325	3.6E-05	4	20.9	16.9	6.422	3.7E-05	
300	0.3	33.111	24	9.9	14.1	5.9925	3.6E-05	4	19.8	15.8	6.004	3.7E-05	
300	0.3	27.521	24	12.4	11.6	4.93	3.6E-05	4	17.2	13.2	5.016	3.7E-05	
500	0.5	21.096	24	9.1	14.9	6.3325	3.6E-05	4	20.8	16.8	6.384	3.7E-05	3.8E-05
500	0.5	16.791	24	11.5	12.5	5.3125	3.8E-05	4	18.2	14.2	5.396	3.9E-05	
500	0.5	17.056	24	11.4	12.6	5.355	3.8E-05	4	18.3	14.3	5.434	3.8E-05	
500	0.5	18.101	24	10.9	13.1	5.5675	3.7E-05	4	19.1	15.1	5.738	3.8E-05	
1000	1	9.728	24	10.4	13.6	5.78	3.6E-05	4	19.4	15.4	5.852	3.6E-05	3.5E-05
1000	1	11.449	24	8.9	15.1	6.4175	3.4E-05	4	21.1	17.1	6.498	3.4E-05	
1000	1	10.88	24	9.9	14.1	5.9925	3.3E-05	4	20	16	6.08	3.4E-05	
1000	1	7.272	24	14.4	9.6	4.08	3.4E-05	4	15	11	4.18	3.5E-05	

Para los especímenes elaborados mediante las propuestas granulométricas 1, 2, 3, 4 se aplicaron cargas de 0.1, 0.3, 0.5, 1 kg/cm² respectivamente, mientras que para los demás se aplicaron cargas de 0.5, 1, 1.5, 2 kg/cm² debido a que son las mezclas más densas.

Las pruebas para determinar el coeficiente de permeabilidad en cada espécimen, fueron llevadas a cabo cuatro veces para cada carga hidráulica con el fin de corroborar los resultados, tal como se ve en la Tabla 3.16.

3.10 Presentación y análisis de resultados

3.10.1 Propiedades volumétricas de los especímenes ensayados

En las Tablas 3.17 a 3.19 y Figuras 3.44 a 3.46, se presentan los resultados de los vacíos de aire (Va), vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos llenos de cemento asfáltico (VAF) de los diferentes concretos asfálticos estudiados. Dichos resultados indican que los valores de vacíos de aire y vacíos en el agregado mineral disminuyen con el contenido de cemento asfáltico y en la medida que las granulometrías cambian de abiertas a densas. Así mismo, los valores de los vacíos llenos de cemento asfáltico tienden a ser mayores, en la medida que se aumenta el contenido de cemento asfáltico y la granulometría de la mezcla cambia de abierta a densa.

Tabla 3.17 Propiedades volumétricas con un contenido de cemento asfáltico de 5.7%

Propuestas granulométricas	Propiedades volumétricas		
	Va	VAM	VAF
5	0.65	13.2	95.08
Fuller	0.87	13.7	93.62
7	1.51	13.74	88.96
8	1.82	13.97	86.96
6	1.88	14.33	86.82
4	5.20	17.26	69.87
3	7.28	18.65	60.93
2	15.92	25.63	37.87
1	23.38	31.73	26.29

Tabla 3.18 Propiedades volumétricas con un contenido de cemento asfáltico de 6.0%

Propuestas granulométricas	Propiedades volumétricas		
	Va	VAM	VAF
5	0.47	13.74	96.51
Fuller	0.75	14.28	94.74
7	0.81	14.22	94.28
8	1.17	14.28	91.77
6	1.74	14.72	88.14
4	4.84	17.38	72.12
3	6.98	18.95	63.13
2	15.22	25.86	41.15
1	20.45	29.89	31.55

Tabla 3.19 Propiedades volumétricas con un contenido de cemento asfáltico de 6.3%

Propuestas granulométricas	Propiedades volumétricas		
	Va	VAM	VAF
5	0.29	14.17	97.91
Fuller	0.65	14.68	95.55
7	0.79	14.72	94.60
8	1.11	14.79	92.43
6	1.42	15.03	90.54
4	3.72	17.22	78.36
3	5.89	18.8	68.64
2	15.14	26.7	43.28
1	19.47	29.36	33.68

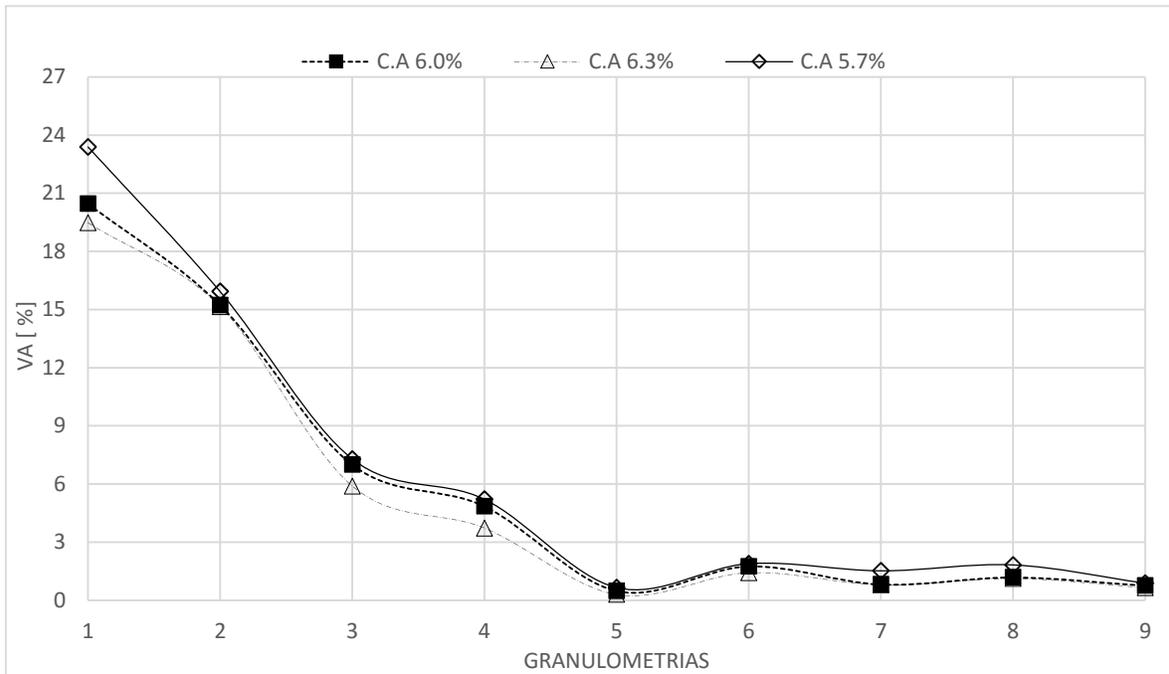


Figura 3.44 Vacíos de aire

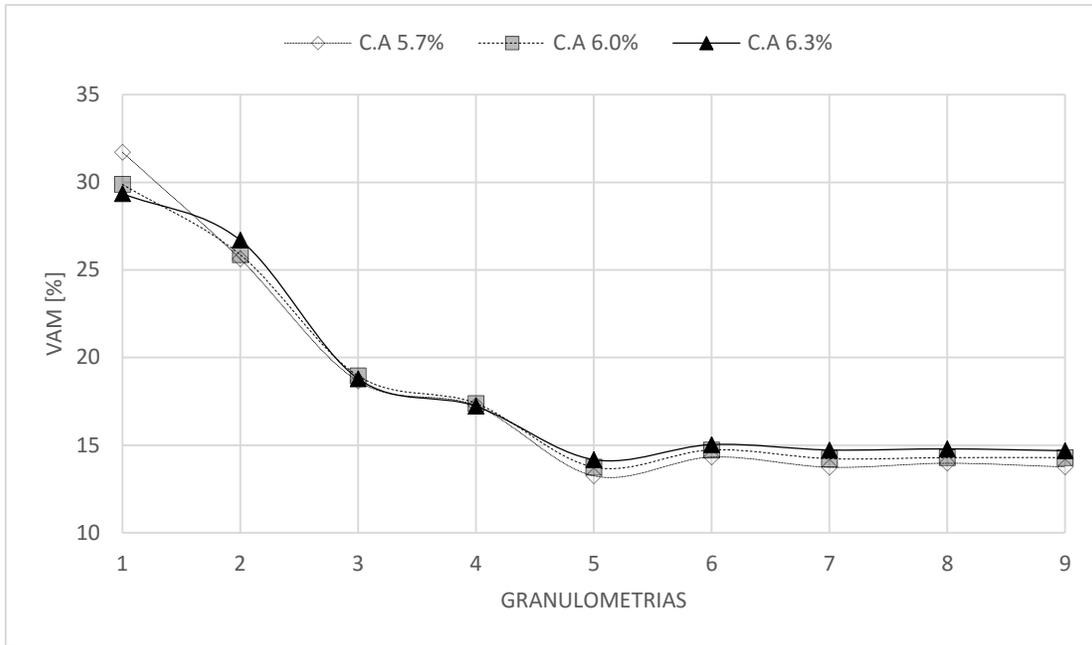


Figura 3.45 Vacíos de agregado mineral

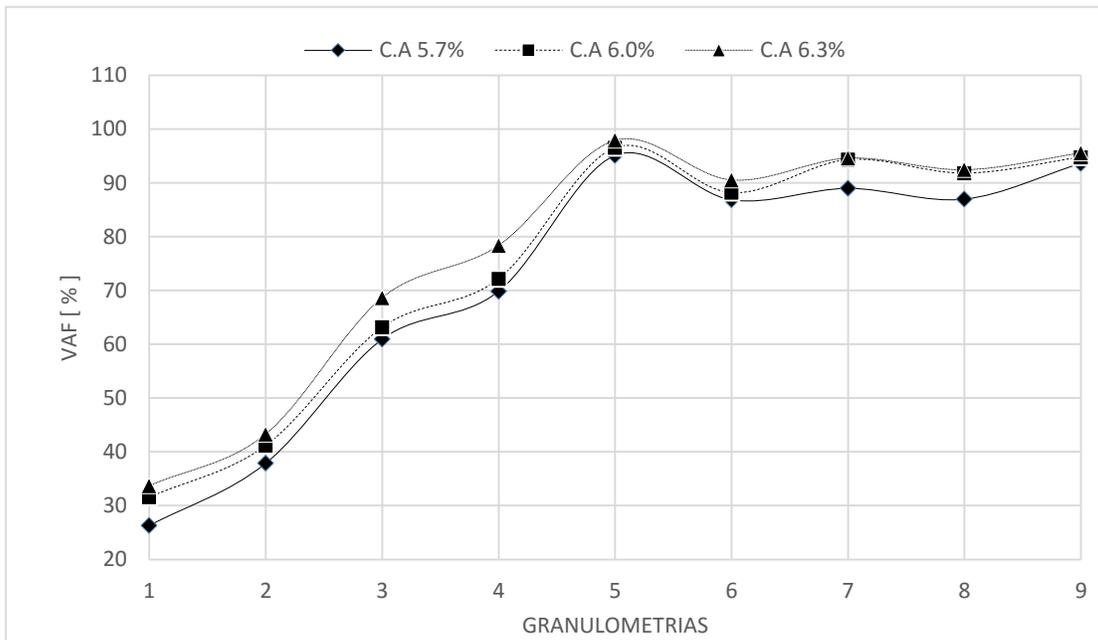


Figura 3.46 Vacíos llenos de cemento asfáltico

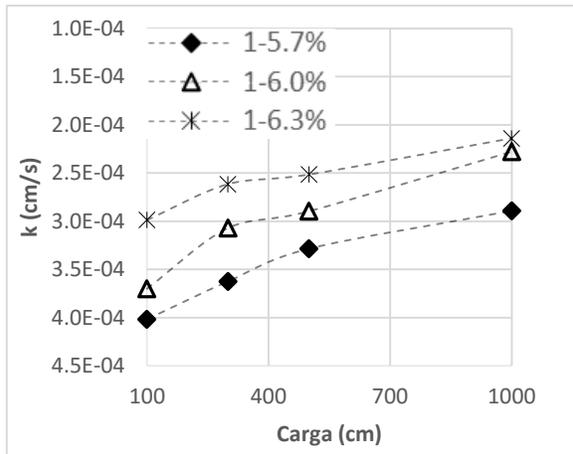
3.10.2 Permeabilidad

En la Tabla 3.20 se presentan un resumen de los resultados de pruebas de permeabilidad llevadas a cabo en especímenes de concreto asfáltico elaborado a partir de nueve propuestas granulométricas que variaron de abiertas a densas, tres diferentes contenidos de cemento asfáltico y diferentes condiciones de carga hidráulica. Tal como se indica, a los especímenes de concreto asfáltico elaborados a partir de granulometrías abiertas se les aplicaron gradientes hidráulicos que variaron entre 100 y 1000 cm de columna de agua, mientras que a los especímenes elaborados a partir de granulometrías densas se les aplicaron gradientes hidráulicos entre 500 y 2000 cm de columna de agua. Los valores del coeficiente de permeabilidad registrados fueron del orden de $1E-4$ y $1E-5$ para los especímenes elaborados a partir de las granulometrías abiertas y de $1E-6$ para las densas. Dada las características del equipo del permeámetro utilizado no se pudo evaluar la permeabilidad de aquellos especímenes elaborados con las propuestas granulométricas, 5, 7,8 y Fuller, y 6 para un contenido de cemento asfáltico de 6.3%.

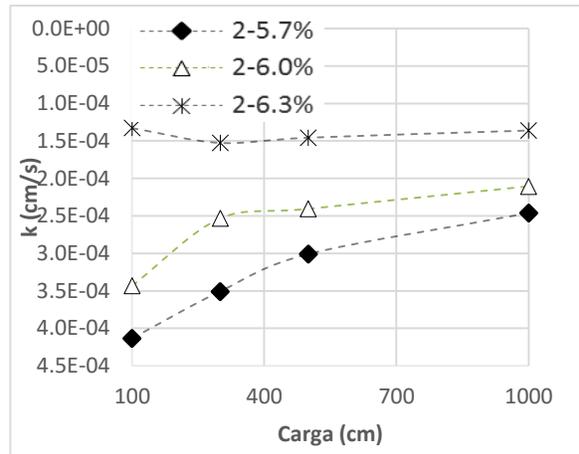
Tabla 3.20 Resultados de pruebas de permeabilidad

Propuesta	Carga (cm)	k (cm/s)		
		Contenido de cemento asfáltico (%)		
		5.7	6.0	6.3
1	100	4.02E-04	3.70E-04	2.99E-04
	300	3.62E-04	3.07E-04	2.62E-04
	500	3.29E-04	2.90E-04	2.52E-04
	1000	2.89E-04	2.28E-04	2.14E-04
2	100	3.66E-04	3.43E-04	1.33E-04
	300	2.94E-04	2.53E-04	1.53E-04
	500	2.35E-04	2.41E-04	1.46E-04
	1000	2.02E-04	2.11E-04	1.36E-04
3	100	1.44E-04	9.75E-05	1.79E-05
	300	1.26E-04	1.01E-04	2.17E-05
	500	1.15E-04	8.38E-05	2.65E-05
	1000	9.78E-05	7.20E-05	3.08E-05
4	500	4.64E-05	2.56E-05	1.79E-05
	1000	3.78E-05	2.35E-05	1.37E-05
	1500	3.48E-05	2.21E-05	1.27E-05
	2000	3.26E-05	2.13E-05	1.06E-05
6	500	4.62E-06	3.85E-06	No se observó flujo de agua
	1000	4.20E-06	3.64E-06	
	1500	4.11E-06	3.79E-06	
	2000	4.10E-06	3.98E-06	
5	No se observó flujo de agua			
7	No se observó flujo de agua			
8	No se observó flujo de agua			
Fuller	No se observó flujo de agua			

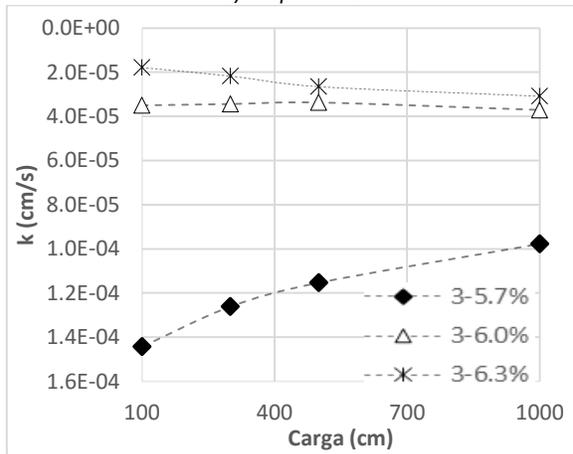
Tal como se indica en la Tabla 3.20 y Figura 3.45, los valores de los coeficientes de permeabilidad obtenidos para diferentes condiciones de carga hidráulica, en términos generales tienden a conservar el mismo orden de magnitud, lo cual valida la hipótesis de que en el comportamiento hidráulico de los especímenes ensayados, es válida la ley de Darcy. Así mismo, se observa que los especímenes de concreto asfáltico tienden a ser menos permeables en la media que aumenta el contenido de cemento asfáltico y la granulometría de la mezcla asfáltica se hace más densa.



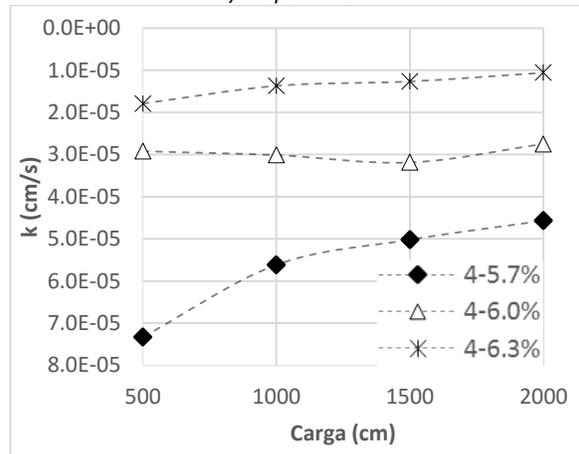
a) Propuesta 1



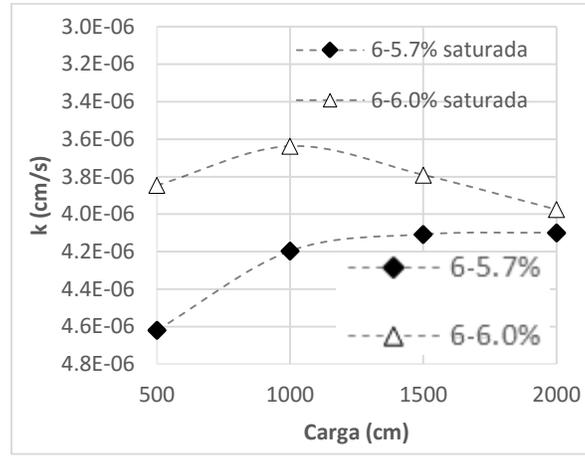
b) Propuesta 2



c) Propuesta 3



d) Propuesta 4



e) Propuesta 6

Figura 3.47 Propuestas granulométricas, coeficiente de permeabilidad vs carga cm.

En este sentido cabe mencionar que existe una estrecha relación entre el coeficiente de permeabilidad y el porcentaje que pasa la malla # 4 de las granulometrías utilizadas en la elaboración de especímenes. Tal como se muestra en la Figura 3.46, en la media que es menor el contenido de arenas y finos en la mezcla, mayor es la permeabilidad del espécimen en estado compacto. Es importante mencionar, que de los especímenes ensayados, solo presentaron flujo de agua aquellos cuyos granulometrías presentaban contenidos de arenas y finos (pasa malla #4) menores o iguales al 41%. No obstante, en los especímenes elaborados con la propuesta granulométrica 6, no se presentó flujo de agua en su interior, cuando estos fueron elaborados con contenido de cemento asfáltico de 6.3%, debido a una disminución en el porcentaje de vacíos de aire del material.

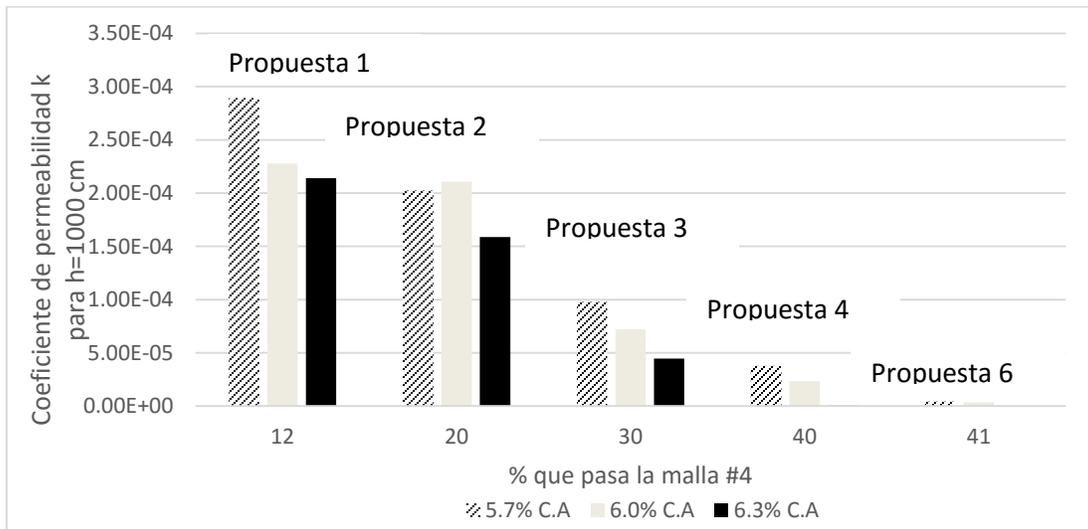


Figura 3.48. Coeficiente de permeabilidad k y contenido de arena-fino

Por último en la Figura 3.49 se presentan los valores del coeficiente de permeabilidad para una carga hidráulica de 100 cm y los valores de los vacíos de aire de cada uno de los especímenes de

concreto asfáltico ensayados. En esta figura se observa como la relación entre ambos parámetros describe una tendencia de disminución de la permeabilidad con el contenido de vacíos del espécimen, así como con el aumento del contenido de cemento asfáltico tal como se mencionó anteriormente.

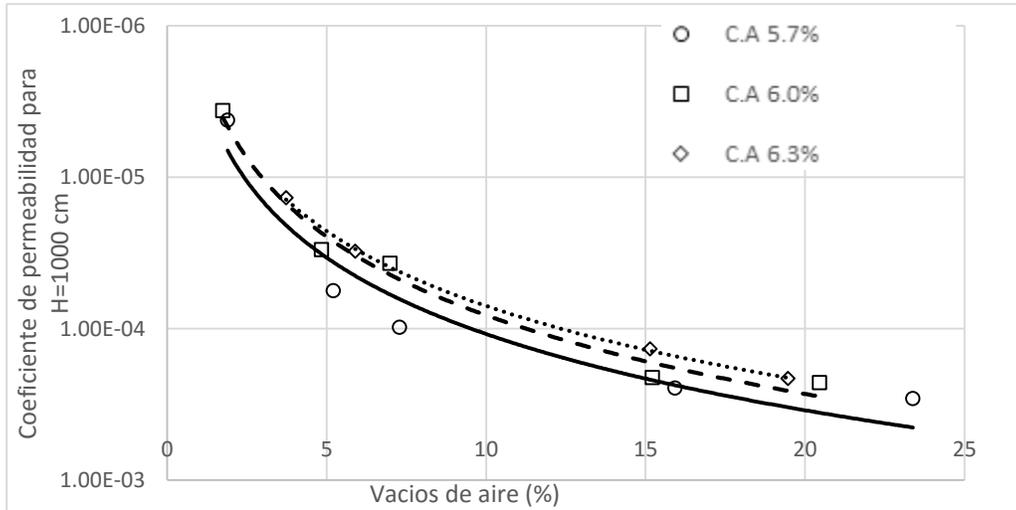


Figura 3.49 Vacíos de aire y coeficiente de permeabilidad

Capítulo 4. Conclusiones

En esta investigación se estudió la influencia de la granulometría y el contenido de cemento asfáltico en la permeabilidad del concreto asfáltico. Para ello, se fabricaron 54 especímenes de concreto asfáltico a partir de 9 propuestas granulométricas y 3 contenidos de cemento asfáltico a los cuales se les evaluó el coeficiente de permeabilidad a través de un permeámetro de carga constante a diferentes cargas hidráulicas. Los resultados de este estudio permitieron formular las siguientes conclusiones generales:

- El comportamiento hidráulico de los especímenes de concreto asfáltico estudiados se ajusta a la Ley de Darcy.
- La permeabilidad de los especímenes de concreto asfáltico tiende a disminuir en la medida que aumenta el contenido de cemento asfáltico y la granulometría de la mezcla asfáltica se hace más densa. Los especímenes elaborados a partir de propuestas granulométricas abiertas (1, 2,3 y 4) presentaron valores de permeabilidad del orden de $1 \text{ E-}04$ y $1 \text{ E-}05$ mientras que los especímenes elaborados a partir de la propuesta 6 presentaron valores de permeabilidad del orden de $1 \text{ E-}06$.
- Existe una estrecha relación entre el coeficiente de permeabilidad y el porcentaje que pasa la malla # 4 de las granulometrías utilizadas en la elaboración de especímenes, en la media que es menor el contenido de arenas y finos en la mezcla, mayor es la permeabilidad del espécimen en estado compacto. Aquellos especímenes en los que no se observó flujo de agua presentaron contenido de arenas y finos mayores al 41 %.
- La permeabilidad del concreto asfáltico está estrechamente ligada las propiedades volumétricas de este material. La relación entre ambos parámetros indica una tendencia creciente de la permeabilidad con el aumento de los vacíos de aire del material.
- La permeabilidad del concreto asfáltico es un parámetro importante que debe tomarse en cuenta en el diseño de mezclas asfálticas destinadas tanto a la construcción de barreras impermeables como en carreteras, en el primer caso es claro que este parámetro es un objetivo en el diseño. No obstante en carreteras se hacen suposiciones de las condiciones de permeabilidad dado el tipo de granulometría que se adopte ya sea densa o abierta, no obstante tal como se mostró en este trabajo de investigación, la permeabilidad del concreto asfáltico, no sólo es sensible a la distribución granulométrica de los agregados sino también al contenido de cemento asfáltico.

BIBLIOGRAFIA

- ASTM. (2005). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM designation C 136-05.
- ASTM. (2005). *Standard Test Method for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as influenced by Particle Shape, Surface Texture and Grading)*. ASTM designation C 1252-03.
- ASTM. (2013). *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. ASTM designation D 5.
- ASTM. (2014). *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. ASTM designation D 36.
- ASTM. (2009). *Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method)*. ASTM designation D 70.
- ASTM. (2013). *Standard Test Method for Saybolt Viscosity*. ASTM designation D 88.
- ASTM. (2012). *Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester*. ASTM designation D 92.
- ASTM. (2005). *Standard Test Method for Specific Gravity of Soils by Water Pycnometer*. ASTM designation D 854.
- ASTM. (2007). *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples*. ASTM designation ASTM D 1188.
- ASTM. (2003). *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. ASTM designation D 2041.
- ASTM. (1995). *Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens)*. ASTM designation D 2170.
- ASTM. (2000). *Standard Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer*. ASTM designation D 2171.
- ASTM. (2005). *Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*. ASTM designation D 2419.
- ASTM. (2003). *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Nonabsorptive Compacted Bituminous Mixture*. ASTM designation D 2726.
- ASTM. (2012). *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*. ASTM designation D 2872.

- ASTM. (2005). *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures using Rotational Viscometer*. ASTM designation D 4402-02.
- ASTM. (2005). *Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*. ASTM designation D 4791-99.
- ASTM. (2005). *Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate*. ASTM designation D 5821-01.
- ASTM. (2008). *Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. ASTM designation D 7175-08.
- ASTM, (2005). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. ASTM designation C 131-03.
- ASTM, (2005). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM designation C 128-04a.
- ASTM, (2005). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. ASTM designation C 127-04.
- ASTM, (2005). *Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*. ASTM designation D 5084-00.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2002). *Calidad de mezclas asfálticas para carreteras*. Norma N·CMT·4·05·003/02.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2002). *Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Norma M·MMP·4·04·002/02.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2006). *Calidad de Materiales Asfálticos*. Norma N·CMT·4·05·001/06.
- Strategic Highway Research Program (SHRP). (1995). *Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de SUPERPAVE*. EE.UU: SHRP.
- The Asphalt Institute. (1976). *Asphalt in hydraulics*. Manual series No. 12. College park, Maryland, USA.
- Wang, W. (2008). *Research on the Suitability of Asphalt Concrete as Water Barrier in Dams and Dikes*. PhD Thesis, University of Oslo, Norway.
- McLaughlin, J. F., and Goetz, W. H. (1955). *Permeability, void content, and durability of bituminous concrete*. Highw. Res. Board Proc., 34,274–286.

- Creegan, P. y Monismith, C. *Asphalt Concrete Water Barriers for embankment Dams*. American Society of Civil Engineers. ISBN 0-7844-0141, 1996.
- Christopher H. Harris. (2007). *Hot Mix Asphalt Permeability: Tester Size Effects and Anisotropy*. (Masters of Science In Civil and Environmental Engineering). The Virginia Polytechnic Institute. State University.
- P. J. Vardanega. (2014). *State of the Art: Permeability of Asphalt Concrete*. JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING.
- Orozco. R. V. (2008). *Aplicación del concreto asfáltico en canales y presas*. Academia de Ingeniería. México, D.F. 34 p.
- Cisneros, J. (2014). *Análisis Sísmico en Presas de Enrocamiento con Núcleo de Concreto Asfáltico*. Informe final de investigación para optar al título de Maestro en Ingeniería Civil. Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatenco, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. 118 p.
- Rangel, G. (2015). *Determinación de la Resistencia a la Tensión Indirecta del Concreto Asfáltico Variando la Granulometría y el Contenido de Ligante*. informe final de investigación para obtener título de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. 70 p.
-
- Garnica P. et al. (2005). *Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas*. Publicación Técnica No 267, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.
- Gaxiola, A., Ossa, A., González, J., Flores, O. y Almaral J. L. (2014). *Estudio de la permeabilidad de mezclas asfálticas para presas*. XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. SMIG. México.
- ICOLD. (1982). *Bituminous concrete facings for earth and rockfill dams*. Boletín 32a: 25 p.
- Instituto del Asfalto. (2001). *Superpave mix design*. Superpave series No. 2 (SP-2). 3er. Ed: p. 32-33.
- Josephia, R. R. (2015). *Caracterización de Mezclas Asfálticas Tibias*. Informe final de investigación para optar al título de Maestro en Ingeniería Civil. Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatenco, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. 126 p.
- Martínez, O. (2014). *Comportamiento de las Mezclas Asfálticas a Diferentes Niveles de Compactación*. Informe final de investigación para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. 119 p.
- Pujol, A. (2010). *Presas con Núcleo de Asfalto*. Red Ingeniería SRL. VI Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos. Neuquén, Argentina.

- Garcia, J. L. (2014). *Empleo de residuos de Concreto y demolición*. Informe final de investigación para optar al título de Maestro en Ingeniería Civil. Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatenco, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. 126 p.54-68
- De la Rosa, M. (2008). *Diseño, instrumentación y puesta en servicio de un permeámetro de carga constante*. Informe final de investigación para optar al título de Maestro en Ciencias con Especialidad en Mecánica de Suelos. Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatenco, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. 91 p.40-60