



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“Evaluación del daño por humedad del
concreto asfáltico mediante pruebas de
compresión simple”**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Edmundo Nahúm Lazcano Sánchez

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Alexandra Ossa López



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

Agradecimientos

Agradezco por su apoyo para la realización de esta tesis:

*A Dios y a mis padres por permitirme concluir mis estudios
y estar en las decisiones más importantes de mi vida.*

*A mi tutora la Dra. Alexandra Ossa López por el compromiso, paciencia, comprensión, apoyo,
consejos y disposición en cada uno de los pasos para la elaboración de esta tesis, que sin ella no
hubiera sido posible.*

*Al Instituto de Ingeniería por haberme permitido
realizar este trabajo en sus instalaciones y con sus recursos.*

Al Dr. Mario Flores Guzmán y al Ing. Francisco Armando Rangel Ordóñez por sus consejos

*A la M. en I. Leticia, M. en I. Maribel Trujillo Valladolid, Dr. Alberto Gaxiola y M. en I. Richard
Raúl Josephia Santos*

Los laboratoristas Santiago, Francisco, Joel, Alejandro y Roberto

La empresa Pinfra por la donación del agregado pétreo para la realización de esta tesis

Al Ing. Manuel Gómez Ángeles por su apoyo, amistad y compañía

A mis profesores de la carrera por su apoyo, enseñanzas y consejos en el aula de clases

Y por último, a mi amada esposa y mi hijo, sin los cuales no habría podido concluir esta tesis.

Resumen

En la presente tesis se aborda el tema de cómo afecta la susceptibilidad a la humedad a las mezclas asfálticas y cuál es la respuesta mecánica a la acción de compresión de una probeta elaborada con mezcla asfáltica en caliente y sometida, un tiempo determinado, al efecto que tiene el agua sobre esta. El trabajo se divide en seis etapas: la revisión bibliográfica acerca de la susceptibilidad de las mezclas asfálticas al agua; las pruebas en los materiales que intervienen para la elaboración de la mezcla asfáltica; la elaboración de probetas con la mezcla asfáltica; el método a seguir para el acondicionamiento de probetas; y los ensayos a compresión simple de las probetas.

En la etapa de revisión bibliográfica se examinaron varios textos sobre el tema de la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas, poniendo atención en los aspectos que están involucrados en las mezclas asfálticas para categorizarlas como susceptibles al daño o no y como las pruebas validan esta información.

En la etapa de evaluación de los materiales utilizados para la elaboración de la mezcla asfáltica se hicieron una serie de pruebas para evaluar las propiedades del asfalto y de los agregados pétreos. Se recolectaron muestras aleatorias y representativas del banco de materiales que se encuentran en el Laboratorio de Vías Terrestres de la UNAM.

En la etapa de elaboración de las probetas se hizo el análisis de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Se estableció el criterio para hacer su preparación, mezclado, compactación y acondicionamiento.

En la última etapa de evaluación del comportamiento mecánico, se llevaron a cabo pruebas a compresión simple de las probetas hechas con mezcla asfáltica en caliente, a diferentes porcentajes de vacíos y sometidas al daño por humedad mediante su acondicionamiento por medio de sumersión en agua. Con base en los resultados de las pruebas a compresión simple, se construyeron gráficas de esfuerzo – deformación para cada probeta del grupo de contenido de vacíos, que describen el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica.

Finalmente, los resultados de las pruebas muestran una relación entre la pérdida de resistencia de la mezcla asfáltica por acción de la humedad y el contenido de vacíos. Adicionalmente a esto se busca comparar los resultados de esta prueba con la prueba de tensión indirecta, o mejor conocida como TSR normada por la AASTHO T283 probada en la misma mezcla asfáltica, porque es la prueba con más aceptación para evaluar la susceptibilidad a la humedad en mezclas asfálticas.

Abstract

In this thesis the susceptibility to humidity of asphalt mixtures is studied and how is their mechanical response to the action of a compression load after having been subjected to a certain time to conditions of water saturation. This text is divided into six sections: the bibliographic review about the susceptibility of asphalt mixtures to water; the description of the tests carried out for the characterization of the materials that are used in the preparation of the asphalt mixtures; the procedure for the preparation of asphalt concrete specimens; the method for conditioning the asphalt concrete specimens; and the execution of simple compression tests of the specimens.

In the literature review section several texts related to the moisture susceptibility of the asphalt mixtures were examined, paying attention to the aspects and tests that allow identifying if an asphalt mixture is susceptible to moisture damage

In the second section, to evaluate the characteristics of the materials used to manufacturing the asphalt mixtures, a series of tests were made to evaluate the properties of the asphalt and the mineral aggregates used in this investigation.

At third section analysis of the volumetric properties on the mixture was made and the criteria for its preparation, mixing, compaction and conditioning were established.

In the last section corresponding to the evaluation of the mechanical behavior, simple compression tests were carried out on the asphalt concrete specimens made with hot mixes and compacted to different contents of air voids, which were subjected to moisture damage by a conditioning process that consisted of submerging them in water. Based on the results of the simple compression tests, stress - strain graphs for each specimen were constructed identifying the value of the air void content.

The results of the tests performed showed a relationship between the loss of resistance of the asphalt mixture by the action of moisture and the content of air voids. Additionally, these results were compared with those obtained in a previous investigation where a series of indirect tensile strength tests were developed in similar specimen, following a protocol which is commonly used to study the susceptibility to moisture damage of asphalt mixtures.

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS Y ALCANCES	2
1.2. APORTACIONES	4
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	5
2.1 EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD A TRAVÉS DEL TIEMPO	5
2.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DAÑO POR HUMEDAD	8
2.3 MECANISMO DEL DAÑO POR HUMEDAD	10
2.4 IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE VACÍOS DE AIRE EN LA MEZCLA EN EL DAÑO POR HUMEDAD	11
2.5 TIPOS DE DETERIOROS PRESENTES EN LAS CARPETAS ASFÁLTICAS Y SU RELACIÓN CON LA HUMEDAD	14
2.6 MEZCLA ASFÁLTICA	18
2.7 AGREGADOS PÉTREOS	19
2.8 ASFALTO	24
2.9 ESTRUCTURA GRANULAR DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	32
2.10 PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS	35
2.11 ÓPTIMO DE ASFALTO	37
2.12 EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	38
CAPÍTULO 3. ETAPA EXPERIMENTAL	41
3.1 PRUEBAS EN AGREGADOS PÉTREOS	41
3.2 ANGULARIDAD DEL AGREGADO GRUESO	45
3.3 ANGULARIDAD DEL AGREGADO FINO	47
3.4 PARTÍCULAS PLANAS, ALARGADAS O PLANAS Y ALARGADAS	49
3.5 EQUIVALENTE DE ARENA	51
3.6 PRUEBA DE TENACIDAD	53
3.7 PRUEBA DE DURABILIDAD	55
3.8 PRUEBAS EN CEMENTO ASFÁLTICO	57
3.9 PROPIEDADES GRAVIMÉTRICAS DEL AGREGADO Y REVISIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO	63
3.10 PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO ASFÁLTICO	64
CAPÍTULO 4. PRUEBAS A COMPRESIÓN SIMPLE	78
4.1 EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS	78
4.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	79
CAPÍTULO 5. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	86
CAPÍTULO 6. REFERENCIAS	89

Lista de figuras

FIGURA 1.1.1. ESQUEMA DE TRABAJO.....	3
FIGURA 2.4.1 COMPACTADOR MARSHALL (DER.) Y COMPACTADOR GIRATORIO SUPERPAVE (IZQ.).	12
FIGURA 2.4.2 CLASIFICACIÓN DE MEZCLAS DE ASFALTO SEGÚN LOS VACÍOS	13
FIGURA 2.5.2. EJEMPLO DEL FENÓMENO DENOMINADO “PIEL DE COCODRILO” EN CARPETAS ASFÁLTICAS	15
FIGURA 2.5.3. BACHES GENERADOS POR DESPRENDIMIENTOS DE LA CARPETA ASFÁLTICA	16
FIGURA. 2.6.1 TENDIDO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTO	18
FIGURA 2.7.1 AGREGADOS PÉTREOS SALIENDO DE UNA TRITURADORA (IZQ.) Y VISTA GENERAL DE LA PLANTA DE ASFALTO PINFRA EN IXTAPALUCA. (DER.)	19
FIGURA 2.7.1.1. DIFERENCIAS ENTRE FORMAS ANGULOSAS Y REDONDEADAS.	22
FIGURA 2.8.1 CEMENTO ASFÁLTICO.....	24
FIGURA 2.8.2. DIAGRAMA DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL ASFALTO.	25
FIGURA 2.8.3 REGIONES GEOGRÁFICAS PARA LA UTILIZACIÓN RECOMENDABLE DE CEMENTOS ASFÁLTICOS GRADO PG CON FUNDAMENTO EN LA NORMA N-CMT-4-05-004	26
FIGURA 2.8.4 PRUEBA DE PENETRACIÓN EN ASFALTO.	27
FIGURA 2.8.5 DIMENSIONES DEL EQUIPO UTILIZADO PARA LA PRUEBA Y SU ENSAMBLAJE.	28
FIGURA 2.8.6 DIAGRAMA DE FLUJO PARA DETERMINAR LA CLASIFICACIÓN PG DE UN CEMENTO ASFÁLTICO.	29
FIGURA 2.9 NIVELES DE DISEÑO SEGÚN PROTOCOLO AMAAC.....	32
FIGURA 2.9.1 CURVA DE FULLER	33
FIGURA 2.10.1 DIAGRAMA DE FASES DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA	35
FIGURA 2.11.1 DIAGRAMA DE INCREMENTO EN LA DENSIFICACIÓN EN LA CARPETA ASFÁLTICA.	37
FIGURA 2.12.1 ESQUEMA DE TRABAJO DE LA PRUEBA AASHTO T283	39
FIGURA 2.12.2 ESQUEMA DE TRABAJO DE LA PRUEBA ASTM D1074 Y D1075.	40
FIGURA 3.1.1 PLANTA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DEL GRUPO PINFRA.	42
FIGURA 3.1.2 COSTALES DE AGREGADO ANTES DE SER PROCESADOS EN EL LABORATORIO DE VÍAS TERRESTRES.	42
FIGURA 3.1.3 CURVA GRANULOMÉTRICA	44
FIGURA 3.2.1 SEPARACIÓN DEL AGREGADO GRUESO MEDIANTE TAMIZADO Y CUARTEO DE LA MUESTRA.	45
FIGURA 3.2.2 PARTÍCULAS FRACTURADAS CON BORDES AFILADOS Y SUPERFICIES RUGOSAS CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO DE TRITURACIÓN	46
FIGURA 3.3.1 AGREGADO FINO. ELABORACIÓN PROPIA.....	47
FIGURA 3.3.2 LLENADO DEL CILINDRO PARA LA PRUEBA DE ANGULARIDAD DEL AGREGADO FINO.	48
FIGURA 3.4.1. PARTÍCULAS PLANAS (IZQUIERDA), ALARGADAS (CENTRO) Y QUE NO SON PLANAS NI ALARGADAS (DERECHA). ELABORACIÓN PROPIA.....	50
FIGURA 3.4.2. CALIBRADOR PROPORCIONAL DE LA PRUEBA ASTM D4791.....	51

FIGURA 3.7.1 SULFATO DE SODIO.-----	55
FIGURA 3.8.2. PRUEBA DE PENETRACIÓN EN EL ASFALTO. -----	60
FIGURA 3.8.4. CARTA DE VISCOSIDAD UTILIZADA EN ESTA INVESTIGACIÓN PARA EL ASFALTO CONVENCIONAL ----	62
FIGURA 3.9.1 MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA OBTENCIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA TEÓRICA MÁXIMA. 63	
FIGURA 3.10.1 CRIBADORA MECÁNICA Y CRIBADO POR MEDIOS MANUALES CON MALLAS ESTANDARIZADAS ----	64
FIGURA 3.10.2 LIMPIEZA DE MATERIAL CRIBADO. -----	65
FIGURA 3.10.5 DOSIFICACIÓN DE ASFALTO EN MEZCLA ASFÁLTICA.-----	66
FIGURA 3.10.4 AGREGADO PÉTREO DENTRO DEL HORNO A 155° PARA MEZCLADO-----	66
FIGURA 3.10.6 PROCESOS DE MEZCLADO POR MEDIOS MECÁNICOS -----	67
FIGURA 3.10.7 MEZCLA EN CHAROLAS PARA EL PROCESO DE ENVEJECIMIENTO A CORTO PLAZO. -----	67
FIGURA 3.10.8 MEZCLA ASFALTICA EN MOLDES DENTRO DEL HORNO PARA LLEVAR A TEMPERATURA DE COMPACTACION ELABORACIÓN PROPIA. -----	68
FIGURA 3.10.9 PROGRAMACIÓN DE COMPACTADOR GIRATORIO ELABORACIÓN PROPIA. -----	69
FIGURA 3.10.10 EXTRACCIÓN DE PROBETA DE MEZCLA ASFÁLTICA DEL MOLDE DE COMPACTACIÓN. -----	70
ELABORACIÓN PROPIA. -----	70
FIGURA 3.10.11 EXTRACCIÓN DE NUCLEOS Y CORTE DE NÚCLEOS PARA MEDIDAS FINALES EN PROBETAS. -----	71
FIGURA 3.10.12 PROCEDIMIENTO DE PRUEBA ASTM D3203 PARA OBTENCIÓN DEL CONTENIDO DE VACÍOS DE LA MEZCLA COMPACTADA ELABORACIÓN PROPIA -----	72
FIGURA 3.10.13 MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA OBTENCIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA TEÓRICA MÁXIMA. 73	
FIGURA 3.10.14 PROBETAS DIVIDIDAS EN DOS GRUPOS (SECAS Y HUMEDO) PARA PRUEBA ASTM D1075 ELABORACIÓN PROPIA. -----	75
FIGURA 3.10.15. ACONDICIONAMIENTO DE PROBETAS QUE SE MANTENDRÁN SECAS A 25°C -----	76
ELABORACIÓN PROPIA. -----	76
FIGURA 3.10.16 ACONDICIONAMIENTO DE PROBETAS SUMERGIDAS EN AGUA A 60°C (FOTOS 1 Y 2) Y PROBETAS SUMERGIDAS EN AGUA A 25°C PREVIO A LA PRUEBA DE RESISTENCIA. -----	77
ELABORACIÓN PROPIA. -----	77
FIGURA 4.1.1 COLOCACIÓN, EJECUCIÓN Y FINALIZACIÓN DE LA PRUEBA A COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS DE MEZCLA ASFÁLTICA. ELABORACIÓN PROPIA-----	78
FIGURA 4.2.4 GRÁFICA DEL GRUPO DE PROBETAS DE 7% DE VACÍOS DE AIRE -----	81
FIGURA 4.2.5 GRÁFICA DEL ÍNDICE DE RETENCIÓN DE OS ESPECÍMENES Y LAS CARGAS MÁXIMAS DE CADA GRUPO. 83	
FIGURA 4.2.7 GRÁFICA DE COMPARACIÓN DEL TSR Y EL ISR-----	85

Lista de Tablas

TABLA 2.7.1. NORMAS ASOCIADAS A LA MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES EN LOS AGREGADOS	21
TABLA 2.8.1 PRUEBAS EN CEMENTO ASFALTICO Y SUS NORMAS ASTM.	27
TABLA 2.8.2 PARÁMETROS PARA CLASIFICAR EL CEMENTO ASFALTICO POR GRADO PG PUBLICADOS EN LA NORMA DE SCT N·CMT·4·05·004/18	31
TABLA 2.9.2. CRITERIO SUPERPAVE PARA UNA MEZCLA NOMINAL DE 19 MM	34
TABLA 2.10.1 REQUERIMIENTOS DE SUPERPAVE PARA EL VAM	36
TABLA 2.10.2 REQUERIMIENTOS DE SUPERPAVE PARA EL VFA	36
TABLA 2.12.1 PRUEBAS A LA SENSIBILIDAD A LA HUMEDAD EN ESPECÍMENES COMPACTOS.	38
TABLA 3.1.1 GRANULOMETRÍA UTILIZADA EN EL PROYECTO.	43
TABLA 3.2.1 RESULTADOS DE LA PRUEBA ASTM D5821 PARA DETERMINAR EL PORCENTAJE DE PARTÍCULAS FRACTURADAS EN EL AGREGADO GRUESO.	47
TABLA 3.3.1 CANTIDADES NECESARIAS QUE ESTABLECE LA NORMA PARA LA PRUEBA DE ANGULARIDAD DEL AGREGADO FINO.	47
TABLA 3.3.2 ANGULARIDAD DE AGREGADOS FINOS (MÉTODO A)	49
TABLA 3.4.1 PARTÍCULAS PLANAS, ALARGADAS O PLANAS Y ALARGADAS CON LA RELACIÓN 5:1	50
TABLA 3.5.1 EQUIVALENTE DE ARENA	52
TABLA 3.6.1ABRASIÓN EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES	54
TABLA 3.7.2 INTEMPERISMO ACELERADO A 5 CICLOS	57
TABLA 3.8.1 FICHA TÉCNICA DEL ASFALTO UTILIZADO.	58
TABLA 3.8.2 RESULTADOS DE PRUEBA ASTM D92	59
TABLA 3.8.3 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE PENETRACIÓN	60
TABLA 3.8.4. PRUEBA DE REBLANDECIMIENTO DEL ASFALTO.	62
TABLA 3.9.1 GRAVEDADES ESPECIFICAS BRUTA, APARENTE Y ESPECIFICA.	63
TABLA 3.9.2 DETERMINACIÓN DE GRAVEDAD ESPECIFICA TEÓRICA MÁXIMA GMM	73
TABLA 3.9.3 VALORES DE GMB, GMM, %VA, %VAM Y % VFA	74
TABLA. 3.10.1 CONTENIDO DE VACÍOS DE LAS PROBETAS SEPARADAS EN 4 GRUPOS DE VACÍOS.	75
TABLA 4.2.1 RESULTADOS DE PRUEBAS DE COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS SECAS Y HÚMEDAS	82
TABLA 4.2.3 TABLA DE TSR	84

Capítulo 1. Introducción

Durante décadas, la susceptibilidad al daño por humedad en las mezclas asfálticas, ha sido objeto de varias investigaciones porque se ha comprobado que este tipo de daño provoca diversas patologías que afectan la serviciabilidad¹ de los pavimentos hechos con mezclas asfálticas, haciéndolos inservibles con el paso del tiempo. Las patologías que pueden presentarse, a lo largo de la vida útil de un pavimento, pueden ser deformaciones, roturas, desprendimientos y exudaciones (Bañón Blázquez, 1999).

Algunos investigadores han tratado de comprender la naturaleza física y química de las mezclas asfálticas para refinar o desarrollar una prueba que les permita identificar un procedimiento con la capacidad de correlacionarse con el rendimiento de la mezcla en el campo (Solaimanian, Harvey, Tahmoressi, & Tandon, 2003). En los textos sobre el diseño de las mezclas asfálticas se recomienda evaluar la susceptibilidad al daño por humedad de la mezcla asfáltica utilizando el método de prueba AASTHO T283. Al ser la prueba más popular y reconocida, es realizada en la mayoría de las agencias de los Estados Unidos y fue adoptada por instituciones mexicanas como la prueba “estándar” para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad en las mezclas asfálticas.

Para entender por qué se tomó la decisión de adoptar el método de prueba AASTHO T283 como la prueba estándar para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas se debe conocer el procedimiento completo de la prueba al que se somete la mezcla asfáltica. La prueba empieza por un proceso de saturación con agua de las probetas; posteriormente se someten a ciclos de congelamiento y deshiele. Al terminar de acondicionar las probetas se ejecuta la prueba

¹ La serviciabilidad de un pavimento se define como la habilidad del pavimento de servir al tipo de tráfico que circulan en la vía.

Capítulo 1

de tensión indirecta, llevándolas hasta su destrucción y finalmente de los residuos de la probeta se hace una inspección visual identificando partículas rotas de agregado pétreo.

A causa del proceso mencionado, la AASTHO T283, se cataloga como una prueba muy completa al considerar el nivel de saturación, enfrentar la mezcla a esfuerzos internos y tener una medida de la pérdida de la resistencia por el efecto del agua. Sin embargo, esta prueba se diseñó para probetas de 64 mm de alto, las cuales son el resultado de compactar la mezcla con la metodología Marshall, aunque no es la única prueba que se ha desarrollado con el propósito de evaluar el daño por humedad en las mezclas asfálticas (Solaimanian, Harvey, Tahmoressi, & Tandon, 2003).

El presente trabajo surgió por la necesidad de comprender como el agua afecta a la mezcla asfáltica compactada a diferentes porcentajes de vacíos en el comportamiento mecánico a compresión simple, utilizando la prueba ASTM D1075, actualizada en 2011, y comparando los resultados obtenidos con la prueba AASTHO T283 en el mismo tipo de mezcla asfáltica.

1.1. Objetivos y alcances

Los objetivos principales de este trabajo son evaluar el efecto del agua en el comportamiento mecánico a compresión simple de un concreto asfáltico elaborado a partir de una mezcla asfáltica en caliente (HMA) compactada a diferentes contenidos de vacíos y que ha sido sometida al daño por efecto del agua siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D1075, y comparar los resultados obtenidos con los de la prueba AASTHO T283 en el mismo tipo de mezcla asfáltica.

Para alcanzar los objetivos anteriores se realizaron las siguientes actividades:

Investigación en textos técnicos que explicaran el proceso de diseño de una mezcla asfáltica en caliente (HMA)

Evaluación de las propiedades de los materiales utilizados en la mezcla asfáltica para la fabricación de especímenes de prueba que cumplan con las normas de calidad establecidas por la metodología SUPERPAVE (SUPERior PERFORMANCE PAVement) por la SHRP.

Ejecución de pruebas de compresión simple en especímenes de HMA en estado compacto con diferentes porcentajes de vacíos.

Análisis de la relación existente entre el contenido de vacíos y la pérdida de resistencia de las probetas por efecto del agua.

Comparación de los resultados obtenidos de la norma ASTM D1075 con los de la norma AASTHO T283.

En la figura 1.1.1 se muestra el esquema de trabajo y la forma en que está estructurado el mismo.

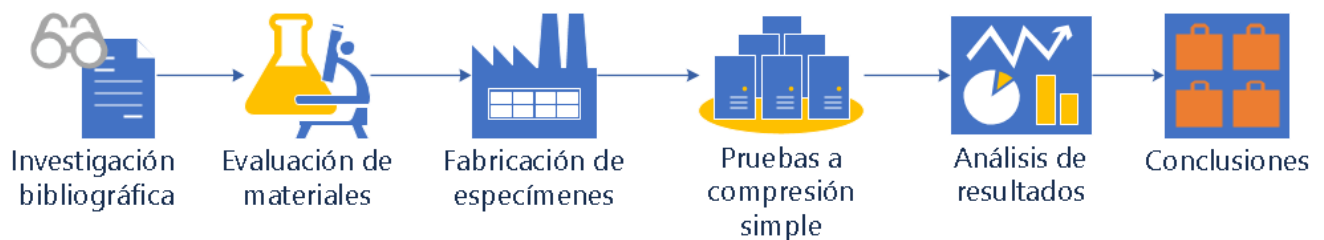


Figura 1.1.1. Esquema de trabajo. Elaboración propia.

1.2. Aportaciones

Se pretende explicar cómo funciona el mecanismo de daño causado por la humedad en la mezcla asfáltica en caliente y describir los procedimientos utilizados en los métodos de prueba para evaluar la susceptibilidad al daño por la humedad. De la misma manera aporta información sobre cómo influye el contenido de vacíos en el comportamiento a compresión simple de las mezclas asfálticas en caliente con resultados experimentales de laboratorio.

Capítulo 2. Antecedentes

2.1 Evaluación de la susceptibilidad a la humedad a través del tiempo

Durante años la evaluación de la susceptibilidad al daño por la humedad ha sido un problema complejo sujeto a numerosos estudios e investigaciones. Dicha evaluación es recomendada por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT), el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP), la Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC), entre otras. Estas organizaciones establecen la evaluación de este aspecto porque se obtiene una medida cualitativa sobre la pérdida de enlace entre el asfalto y el agregado pétreo, así como en algunos casos de la pérdida de la fuerza de cohesión del asfalto (Solaimanian, Harvey, Tahmoressi, & Tandon, 2003).

Para ahondar en la comprensión del efecto del agua sobre las mezclas asfálticas, desde la década de los años veinte han surgido varias investigaciones en las que se observa como la adhesión entre el asfalto y el agregado pétreo disminuye y la cohesión del asfalto se deteriora cuando mantienen contacto con el agua. (Solaimanian, Harvey, Tahmoressi, & Tandon, 2003).

El daño producido por la humedad presente en los pavimentos de carreteras es una razón de preocupación entre los especialistas en pavimentos. Por esto han tratado de unir fuerzas para desarrollar pruebas de laboratorio que distingan entre mezclas asfálticas no susceptibles y susceptibles a este tipo de daño. Las pruebas se clasificaron en dos categorías principales: las mezclas asfálticas sueltas y las mezclas asfálticas compactas.

Las primeras pruebas para evaluar la susceptibilidad en mezclas asfálticas sueltas estaban diseñadas para proporcionar una evaluación subjetiva del potencial de adhesión. Las pruebas en las mezclas asfálticas compactas proveen un parámetro de resistencia antes y después de un acondicionamiento. La prueba de inmersión - compresión fue introducida a finales de 1940 por diferentes investigadores de la American Society of Testing Materials (ASTM). Y se estandarizó a mediados de la década de los años cincuenta. Sin embargo, este ensayo necesitaba por lo menos de especímenes de 102 mm de alto por 102 mm de diámetro y solo un compactador giratorio por amasado podía realizar este tipo de especímenes. Estos equipos eran maquinaria especializada de alto costo en la época y no eran accesibles para la mayoría de los laboratorios (Garnica Anguas, Gómez López , & Delgado Alamilla, 2003).

Hacia la década de los años sesenta las investigaciones de los especialistas mostraron la necesidad de tomar en cuenta los efectos del clima y el tránsito en las pruebas para detectar los daños por la humedad causados en la mezcla asfáltica (Solaimanian, Harvey, Tahmoressi, & Tandon, 2003).

En la década de los años setenta se reconoció la importancia de simular las condiciones en el campo por medio del acondicionamiento de las pruebas en el laboratorio. Hubo dos propuestas para el acondicionamiento de la mezcla, la primera propuesta fue hecha por Jiménez (1974) y consiste en la saturación del espécimen de concreto asfáltico por medio de vacío seguido de la aplicación de presión de poro de manera cíclica. El segundo procedimiento, propuesto por Lottman (1978), considera la saturación del espécimen mediante la aplicación de vacío seguido por ciclos de congelación y acondicionamiento en un baño de agua caliente; posteriormente fue modificado y estandarizado como el procedimiento de prueba AASHTO T283.

La razón para que el procedimiento de prueba AASTHO T283 fuera aceptado en la mayoría de los laboratorios de Estados Unidos y de México, se debe a que su diseño usa las probetas de la metodología Marshall para el diseño de mezclas asfálticas. Esta metodología se encontraba normalizada en la ASTM D1559 desde 1958. Su ventaja principal es la facilidad para fabricar especímenes de 102 mm de diámetro por 64 mm de altura mediante un compactador de percusión llamado compactador Marshall. Este compactador por su forma de operar, la sencillez de armarlo y sobre todo porque era más barato que adquirir un compactador giratorio, fue adoptado por todos los laboratorios para hacer probetas de mezclas asfálticas; sin embargo, en la actualidad la metodología Marshall para el diseño de mezclas asfálticas utiliza las pruebas de estabilidad y flujo que cada vez están más en desuso en algunos países, pero se mantienen los compactadores para realizar algunos tipos de pruebas, ya sea para control de calidad o incluso para la determinación del contenido óptimo de asfalto.

La norma AASTHO T283 en sus últimas ediciones abandonó la forma de compactar con el martillo Marshall y adoptó el modo de compactación con el SGC (SUPERPAVE Gyratory Compactor) volviéndose la prueba que recomienda el método de diseño para mezclas asfálticas SUPERPAVE, para evaluar la susceptibilidad al daño por la humedad; sin embargo en años recientes se ha demostrado que la prueba puede arrojar resultados no concluyentes en la predicción de la susceptibilidad al daño por la humedad (Solaimanian, Harvey, Tahmoressi, & Tandon, 2003).

Con el paso de los años han surgido nuevas propuestas para evaluar la susceptibilidad a la humedad de mezclas asfálticas, ejemplo de esto es la implementación de la rueda de carga sumergida en agua o también conocida como prueba de Hamburgo; y los llamados ensayos con sistemas de acondicionamiento ambiental. Como sustento de estas propuestas se han desarrollado estudios de la química del asfalto para comprender las características superficiales y las interacciones entre fases de los materiales, retomando el concepto de energía superficial libre del asfalto.

Si bien los avances de los estudios y desarrollo de nuevas pruebas para evaluar la susceptibilidad al daño por la humedad pueden contribuir significativamente a la determinación de mezclas asfálticas susceptibles o no a la humedad, los procedimientos de estas pruebas no están calibrados a las condiciones de servicio. También no tienen una medida clara del rendimiento y no se relacionan los resultados de la mezcla asfáltica de los especímenes compactados en el laboratorio con los datos obtenidos en el campo.

Aún en nuestros días es un desafío para los laboratorios desarrollar un procedimiento de prueba altamente confiable y práctico para la determinación del daño por humedad. Esto se debe a que la prueba solo puede ser aceptada cuando el procedimiento para considerar el daño por humedad es calibrada a las condiciones para las que se aplicará. Algunas pruebas han sido calibradas e implementadas a niveles locales, pero no en un amplio espectro de condiciones. Lo anterior se debe a la falta de correlación con el rendimiento de campo, la falta de bases de datos de rendimiento de campo, problemas con las pruebas tales como la variabilidad y la dificultad de operación (Solaimanian, Harvey, Tahmoressi, & Tandon, 2003). Hoy en día continúa la búsqueda de nuevos y confiables procedimientos de prueba para determinar la susceptibilidad al daño por humedad.

2.2 Factores que influyen en el daño por humedad

Para cumplir con los objetivos propuestos en el presente trabajo debe entenderse como daño “... el grado de pérdida de funcionalidad de un sistema.” (S. Caro, 2008); por lo tanto el daño por susceptibilidad a la humedad de un concreto asfáltico se entiende como “... la degradación de las propiedades mecánicas del material, debido a la presencia de humedad en estado líquido o gaseoso.” y “El deterioro funcional progresivo de una mezcla asfáltica por pérdida de la unión adhesiva entre el cemento asfáltico y la superficie del agregado y/o la pérdida de la resistencia cohesiva en el cemento asfáltico, principalmente por la acción del agua” (S. Caro, 2008).

En la revisión de los textos especializados, incluidos experimentos de laboratorio y estudios de campo, se indica que la susceptibilidad al daño por humedad se relaciona principalmente con la fuente de agregados y la calidad del asfalto. Otras variables pueden aumentar o disminuir significativamente el riesgo de susceptibilidad a la humedad para una mezcla utilizada en un proyecto determinado (Solaimanian, Harvey, Tahmoressi, & Tandon, 2003).

Estas variables pueden ser:

- Drenaje
- Estructura del pavimento. Incluye la falta de unión entre las capas de concreto asfáltico, que permite que el agua fluya entre capas no ligadas; la presencia de grietas, que permiten el ingreso de agua al pavimento; la presencia de capas de materiales permeables que favorecen el flujo del agua hacia la capa asfáltica; y la presencia de telas (p. ej. geosintéticos) o capas intermedias que atrapan el agua debajo de la superficie.
- Diseño de mezcla asfáltica. Incluye el contenido de asfalto, graduación y relación de polvo/asfalto. El diseño de la mezcla asfáltica determina el espesor de la película de asfalto en los agregados y la permeabilidad de la mezcla. El uso de ciertos aditivos al asfalto puede reducir la susceptibilidad al daño por humedad de la mezcla.
- Variabilidad de la construcción. Es importante resaltar que la variabilidad de los procesos constructivos como una incorrecta compactación en el campo, crea áreas con altos vacíos de aire y, por lo tanto, alta permeabilidad y baja resistencia. De igual manera, un mal mezclado de la producción en la planta crea segregación de la mezcla alterando su densidad y contenido de asfalto, permitiendo que ingrese el agua y tengan una mayor susceptibilidad a daños por humedad.

- **Clima.** Determina la presencia de agua, ciclos de congelación-descongelación y temperatura del asfalto.
- **Transito.** Aplica esfuerzos a la mezcla, mientras se encuentra en una condición debilitada por la humedad. Se ha demostrado en varios estudios que en núcleos tomados de la parte del pavimento, donde pasan las ruedas de los vehículos, se producen daños por humedad y desprendimiento de la película del asfalto, en comparación de los núcleos que están fuera de la trayectoria de la rueda del paso de los vehículos (Solaimanian, Harvey, Tahmoressi, & Tandon, 2003).

2.3 Mecanismo del daño por humedad

El mecanismo de daño es el proceso durante el cual se reduce la resistencia original del pavimento, cambiando sus condiciones internas y externas. Este es causado por la presencia de humedad en la mezcla asfáltica y funciona en dos pasos:

- **Transporte de la humedad:** Proceso en el que la humedad, en estado líquido o gaseoso, se infiltra por la mezcla asfáltica.
- **Respuesta del pavimento:** Cambia la estructura interna de la mezcla iniciando una pérdida de capacidad de carga del material (S. Caro, 2008).

Estos cambios son producidos o acelerados por:

- **Falla de adhesión** – Pérdida de la película de asfalto de la superficie del agregado.
- **Falla de la cohesión** – Pérdida de la rigidez de la mezcla (S. Caro, 2008).

Cabe destacar que las condiciones ambientales también afectan a los mecanismos de daño por humedad. Por ejemplo, la humedad relativa alta, los periodos de lluvia intensos, ciclos de congelación-descongelación severos y otras condiciones ambientales extremas aumentan la

cantidad de humedad que puede alcanzar el material, por lo tanto, es mayor el potencial de daño. Hay otras condiciones de servicio, como el envejecimiento y la carga dinámica producida por el tráfico, ambas han sido consideradas importantes contribuyentes en daños por humedad (S. Caro, 2008).

2.4 Importancia del contenido de vacíos de aire en la mezcla en el daño por humedad

Lu y Harvey (2006) analizaron más de 63 núcleos de mezclas asfálticas extraídos en pavimentos de California para determinar los parámetros que influyen en el mayor daño por humedad. Su estudio demostró que la lluvia, el contenido de vacíos de aire, la estructura y la edad del pavimento tienen la mayor influencia en el daño por humedad, mientras que la carga repetida y el tránsito acumulado de camiones tienen un efecto marginal (S. Caro, 2008).

Por esta razón varias pruebas de laboratorio especifican el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada, este parámetro tiene un efecto significativo en los resultados de las pruebas al tener una gran variabilidad si las muestras no se compactan con los mismos contenidos de vacíos de aire.

El contenido de vacíos de aire y su distribución en la mezcla asfáltica compactada depende del dispositivo con el que se compacta la mezcla asfáltica, pues de este depende el acomodo entre las partículas de agregado pétreo creando estructuras diferentes a pesar de que el contenido de vacíos de aire total sea el mismo.

Por ejemplo, el compactador Marshall (ver figura 2.4.1 Der.) utiliza un “martillo Marshall” con ciertas especificaciones, este se utiliza para compactar la mezcla por medios de golpes. A diferencia del compactador giratorio (Ver figura 2.4.1 Izq.) que aplica un esfuerzo de amasado con un ángulo de giro constante durante la compactación para simular la compactación en campo.



Figura 2.4.1 Compactador Marshall (Der.) y compactador giratorio SUPERPAVE (Izq.).

(UTEST, 2019) Der.
(Controls Group, 2019) Izq.

Estas dos formas de compactar la mezcla asfáltica producen que los vacíos de aire tengan poca o alta conectividad entre ellos y una diferente distribución y estructura. Cuando hay un alto contenido de vacíos de aire, con poca conectividad entre ellos, permite el desarrollo de altas presiones de poro en una condición saturada y puede causar daño mecánico, debido a la ruptura de la película delgada de asfalto o la formación de microfisuras. Simultáneamente, la humedad también se puede difundir a través de la masilla y desplazar el asfalto por su escasa fuerza de unión (S. Caro, 2008).

El transporte de humedad en un medio poroso, como el de las mezclas de asfalto, está influenciado por la estructura de los vacíos. Por lo tanto, para identificar los modos de transporte de humedad y su relación con el daño por humedad, es importante caracterizar la estructura de los vacíos en mezclas de asfalto (S. Caro, 2008).

Algunas agencias de transporte en Estados Unidos, intentan controlar el daño de la humedad al limitar el contenido de vacíos de aire, lo que a su vez limita el acceso al agua a la mayoría de la mezcla de asfalto. Por ejemplo, el Ministerio de Transporte de Ontario especifica que el contenido

de aire en las capas de asfalto en la superficie debe ser lo más bajo posible para controlar el daño por humedad (Mohamed et al., 1993). Sin embargo, incluso con un bajo contenido de vacíos de aire hay evidencia de daño por infiltración de agua (Mohamed et al., 1993), lo que demuestra que el total del contenido de vacíos de aire no proporciona una medida de la velocidad de transporte de la humedad en asfalto (Arámbula et al., 2007a, Masad et al., 2007).

Hay estudios que muestran la estructura de los vacíos de aire en las mezclas de asfalto en términos de tamaño, distribución, conectividad y tortuosidad² de la trayectoria de flujo. El tamaño y la distribución de los vacíos de aire en las mezclas de asfalto dependen principalmente de las propiedades de los agregados, el diseño de la mezcla y la compactación de la misma. Chen [et al.] (2004) clasificó los vacíos de aire en mezclas de asfalto en tres categorías: eficaces, semi-eficaces e impermeables (Ver figura 2.4.2.).

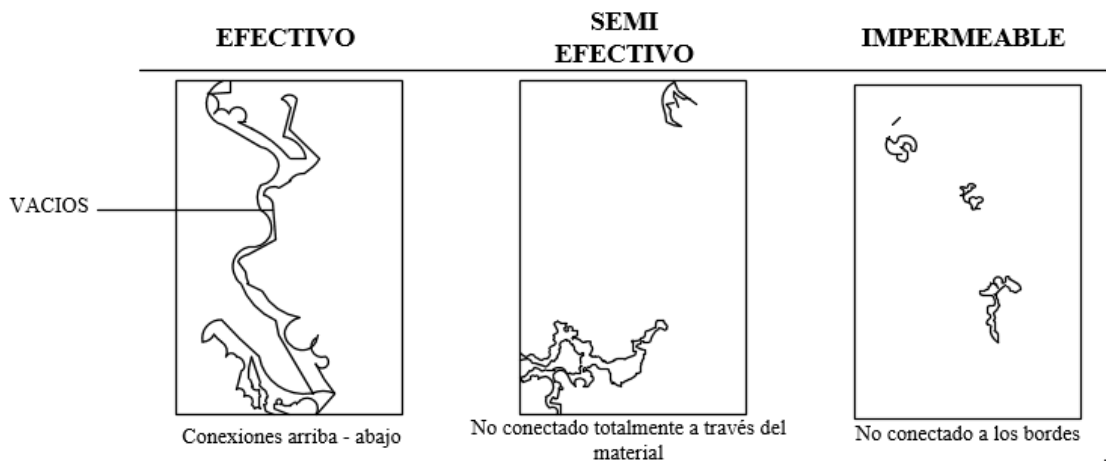


Figura 2.4.2 Clasificación de mezclas de asfalto según los vacíos (S. Caro, 2008).

² Tortuosidad: es la característica que representa las vueltas, recodos, curvas y ondulaciones irregulares, en distintos sentidos.

Sin embargo, la identificación de estos tipos de aberturas en muestras de laboratorio se complica debido a la compleja estructura interna del material y limita la capacidad para explorar su composición interior (S. Caro, 2008).

2.5 Tipos de deterioros presentes en las carpetas asfálticas y su relación con la humedad

En el proceso del diseño de una mezcla asfáltica generalmente se previenen algunos tipos de fallas mediante la evaluación de diferentes aspectos de la mezcla asfáltica, tales como la susceptibilidad al daño por humedad, susceptibilidad al daño por deformación permanente, módulo dinámico y fatiga, con el propósito de prevenir las patologías en la carpeta asfáltica a lo largo de su vida útil.

Estas patologías son:

- **Deformaciones:** Son las que afectan a la geometría de la superficie de rodadura del pavimento, ocasionando que cuando llueva se acumule el agua en el pavimento provocando encharcamientos en la superficie y sometiendo a la carpeta asfáltica a una condición de saturación del agua. Sin embargo, este tipo de fallas son producidas por deformaciones permanentes y no directamente por la humedad en las mezclas. Ejemplo de estas deformaciones son las roderas, hundimientos y firmes ondulados como se puede ver en la figura 2.5.1.



Figura 2.5.1. Ejemplo de roderas en carpetas asfálticas

(Serrano & Bianchini, 2015) (Izq.) (Elaboración propia Der.)

Roturas o grietas: Son la aparición de discontinuidades superficiales y profundas en la estructura del firme provocadas por la fatiga del concreto asfáltico y los cambios térmicos, los cuales permiten que el agua se infiltre al interior del pavimento ocasionando otros problemas. Por ejemplo, grietas longitudinales o transversales, piel de cocodrilo, entre otros (Ver figura 2.5.2.).



Figura 2.5.2. Ejemplo del fenómeno denominado “Piel de cocodrilo” en carpetas asfálticas

Elaboración propia.

- Desprendimientos: Pérdida de material producida por la falta de la adherencia entre las partículas por efecto de la humedad. Esto es causa de una compactación pobre, baja calidad del agregado, alto contenido de finos y contacto del agua con la mezcla asfáltica. Afectan con regularidad a la capa de rodadura, ocasionando erosiones y fragmentación del material. Por ejemplo, el firme brillante, descarnaduras por arranque de gravilla, superficie lisa y pulida, peladuras, baches y desintegración del pavimento (Ver figura 2.5.3).



Figura 2.5.3. Baches generados por desprendimientos de la carpeta asfáltica

Elaboración propia.

Visto lo anterior puede decirse que la presencia de la humedad, aunque en ocasiones no causa el daño directamente, lo agrava favoreciendo la pérdida de rigidez de la mezcla; por la pérdida total o parcial de la unión de enlace entre la superficie del agregado y el cemento asfáltico, es decir, el desprendimiento de la película de asfalto de la superficie del agregado con la presencia de lluvia (factores climáticos) y del tránsito (factores mecánicos).

Para la obtención de mezclas de buena calidad, se deben identificar las mezclas sensibles a la humedad durante el proceso de diseño de la mezcla por medio de pruebas de laboratorio. Estas pueden incluir pruebas en la mezcla suelta para determinar el recubrimiento durante la inmersión en agua o en agua hirviendo y pruebas en la mezcla compactada para evaluar la resistencia o rigidez retenida. Ambas pruebas miden los efectos de la mezcla en la adhesión, cohesión o una combinación de las dos. Sin embargo, las pruebas tienen deficiencias, pues no están relacionados con el rendimiento de la mezcla, exhiben una pobre reproducibilidad entre los laboratorios y no proporcionan una buena indicación de los efectos del tránsito o el clima.

Hay que recordar como los métodos de diseño de pavimentos han evolucionado a lo largo del tiempo. Los primeros eran totalmente empíricos; posteriormente estos métodos se fueron enriqueciendo con las aportaciones de investigaciones de varias instituciones, resultando en métodos mecanístico-empíricos, los cuales se basan en un modelo estructural y en resultados de laboratorio con observaciones de campo.

Uno de los métodos de diseño, y al cual se apega este trabajo, es el resultado del Strategic Highway Research Program (SHRP), conocido como el método SUPERior PERforming asphalt PAVement (SUPERPAVE). Este representa un sistema de especificaciones de los materiales componentes de la mezcla asfáltica, diseño de mezclas asfálticas, junto con su análisis, y la predicción del desempeño de los pavimentos incluyendo equipos de ensayo, métodos de ensayo y criterios (Asphalt Institute, 1996).

2.6 Mezcla asfáltica

Una mezcla asfáltica es la combinación de materiales que se usa para elaborar un sistema trifásico constituido por una fase sólida de agregado pétreo, una fase líquida de cemento asfáltico y una fase gaseosa de aire. Las propiedades mecánicas de la mezcla dependen de las propiedades de cada uno de los componentes y de su proporción relativa en la mezcla. Puede elaborarse en frío o en caliente, en planta o en el lugar (AMAAC, 2013). Esta mezcla de materiales en estado compacto se denomina concreto asfáltico y se usa principalmente para la pavimentación de vías carreteras (Ver figura 2.6.1).



Figura. 2.6.1 Tendido de mezclas asfálticas para la construcción de pavimento
(VISE, 2018)

2.7 Agregados pétreos

Como el concreto asfáltico está compuesto de material asfáltico y agregado mineral se deben realizar pruebas de calidad a estos materiales con el fin de garantizar su durabilidad. Además, es de gran importancia conocer sus propiedades físicas cualitativas y cuantitativas para que pueda aceptarse o no, su uso en una mezcla asfáltica.

El agregado mineral o agregado pétreo está ligado por el material asfáltico. Actúa como un esqueleto que resiste las aplicaciones de la carga repetida y es afectado por sus propiedades individuales e interrelación entre ellos (Asphalt Institute, 1996).

Se recomienda el uso de agregados elaborados, es decir, agregados que han sido triturados (Ver figura 2.7.1), lavados y separados en distintas fracciones según su tamaño, puesto que estos presentan mayor ventaja frente a los encontrados en la naturaleza, porque mejoran sus características de comportamiento mecánico.



Figura 2.7.1 Agregados pétreos saliendo de una trituradora (Izq.) y vista general de la planta de asfalto Pinfra en Ixtapaluca. (Der.)

(Graciano Robles, 2016)(Izq.) (Elaboración propia Der.)

Las pruebas de laboratorio que se realizan para garantizar la calidad de los agregados, son definidas por las instituciones regionales, evaluando en su mayoría los mismos parámetros en el agregado. La SCT en la norma N·CMT·4·04/17 establece los criterios de aceptación o rechazo de los agregados pétreos al igual que la SHRP en su recomendación SUPERPAVE.

El grupo de pruebas que establece SUPERPAVE para evaluar algunas de las propiedades de los agregados son:

1. Propiedades de consenso:

1. Angularidad del agregado grueso.
2. Angularidad del agregado fino.
3. Partículas chatas y alargadas.
4. Contenido de arcilla.

2. Propiedades de fuente:

1. Tenacidad.
2. Durabilidad.
3. Materiales deletéreos.

Estas propiedades se deben medir conforme a las normas establecidas por la ASTM o por la SCT y son presentadas en la tabla 2.7.1:

Propiedades de consenso	Norma SCT	Norma ASTM
Angularidad del agregado grueso	M·MMP·4·04·013	ASTM D5821
Angularidad del agregado fino		ASTM C1252
Partículas planas y alargadas	M·MMP·4·04·005	ASTM D4791
Equivalente de arena (contenido de arcilla)	M·MMP·4·04·004	ASTM D2419
Propiedades de fuente	Norma	
Tenacidad	M·MMP·4·04·008	ASTM C131
Durabilidad	M·MMP·4·04·006	ASTM C88
Materiales deletéreos	-----	-----

Tabla 2.7.1. Normas asociadas a la medición de las propiedades en los agregados.

Además de las mostradas en la tabla 2.7.1., existe otro grupo de pruebas de rutina para conocer las propiedades volumétricas y gravimétricas de los agregados como son las normas ASTM C127 y ASTM C128 o su equivalente en la norma mexicana de la SCT M·MMP·4·04·003/18.

2.7.1 Angularidad del agregado grueso y angularidad del agregado fino

La resistencia de los agregados pétreos depende del esqueleto mineral, que a su vez depende de la fricción interna lograda por el contacto intergranular de las partículas, la aspereza superficial y su forma. Es decir, los agregados pétreos deben tener una textura rugosa, ser equidimensionales y tener buena angularidad para que las partículas se cierren con un área de contacto mayor para que no se deslicen una sobre otras o sean fracturadas resultando en una deformación permanente del pavimento. Esta resistencia al corte de los agregados es observable en las pilas de acopio en donde los materiales triturados producen pilas más empinadas y estables que las redondeadas.

La resistencia al corte aumenta cuando las partículas se oponen al movimiento que ofrecen los agregados y si la masa de agregados es cargada, esta resistencia tiende a ser más fuerte porque la carga tiende a unir los agregados más estrechamente entre sí (Asphalt Institute, 1996).

Especificando la angularidad de los gruesos y finos se pretende que los agregados tengan un alto ángulo de fricción interna (ver figura 2.7.1.1) y así una alta resistencia al corte y al ahuellamiento (formación de roderas) del pavimento. Por regla general son agregados producto de la trituración.

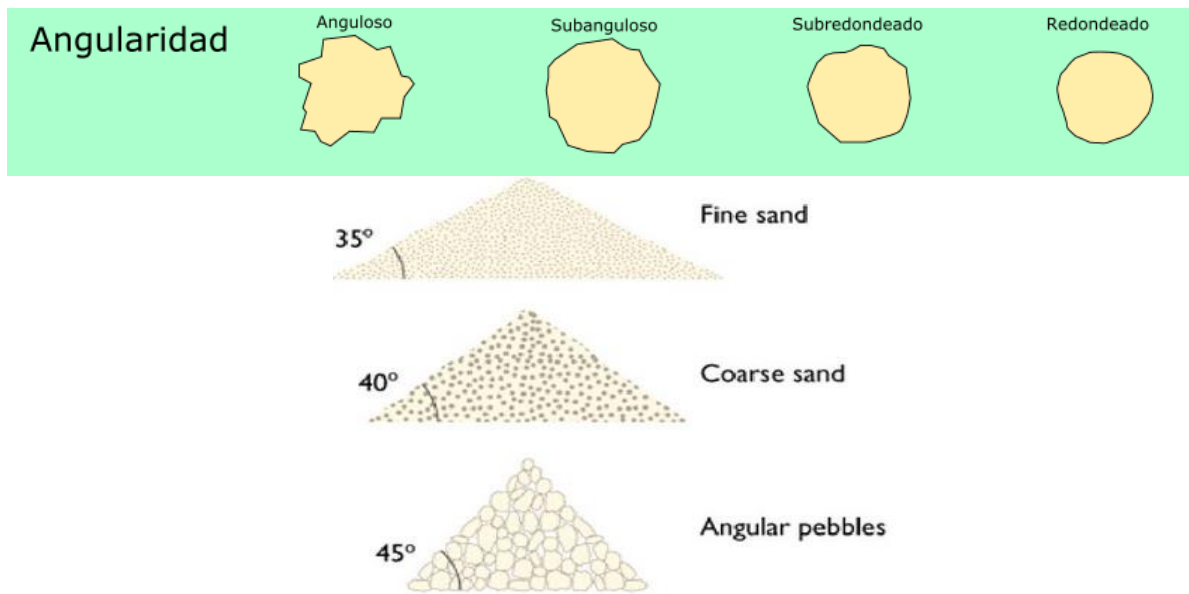


Figura 2.7.1.1. Diferencias entre formas angulosas y redondeadas. (Maldonado Q., 2019)

2.7.2 Partículas planas y alargadas

Las partículas planas y alargadas se refieren a la forma que tienen los agregados pétreos. Esta prueba se realiza con el objetivo de limitar las partículas alargadas donde se asegura que los agregados se fracturaran menos en todas las etapas de la construcción y puesto en servicio el pavimento (Asphalt Institute, 1996).

2.7.3 Contenido de arcilla o equivalente de arena

El propósito de esta prueba es indicar, bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de finos y polvo de arcilla en suelos granulares y agregados finos que pasan por el tamiz de 4.75 mm. El término equivalente de arena expresa el concepto de la mayoría de los suelos granulares y agregados finos. Son mezclas de partículas gruesas, arena, partículas y polvo de arcilla. Este último no deseable debido a que su presencia afecta la unión entre el cemento asfáltico y el agregado. (Asphalt Institute, 1996).

2.7.4 Tenacidad y durabilidad

Es importante determinar las propiedades intrínsecas de los agregados pétreos porque estarán expuestos a los efectos del tránsito y el medio ambiente. Una de las pruebas que ayudan a determinar estas propiedades es la del ensayo de durabilidad que popularmente se conoce como intemperismo acelerado. Esta prueba utiliza el sulfato de sodio o de magnesio para provocar la formación de sales en el interior de los poros de los materiales, provocando su fractura y desintegración de los agregados pétreos con el objetivo de determinar la resistencia potencial de los agregados al intemperismo, lo que constituye uno de los principales factores para la elección de los materiales.

Por otra parte, los agregados deberán soportar los esfuerzos repetitivos provocados por el tránsito sin fracturarse y esto lo mide la prueba de desgaste en la máquina de Los Ángeles la cual somete a los agregados al efecto de impacto y abrasión, y establece valores límite, como factor de rechazo o aceptación del material (Zárate Aquino M. , 2011).

2.8 Asfalto

El asfalto es, según la Norma de la SCT, N.CMT.4.05.001/05

“un material bituminoso de color negro, constituido, principalmente por asfáltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales y al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida.” (Ver figura 2.8.1).



Figura 2.8.1 Cemento asfáltico (National Center for Asphalt Technology, 2019)(Izq.)
(Elaboración propia Der.)

También se conoce como cemento asfáltico y se obtiene del proceso de destilación del petróleo como lo muestra la figura 2.8.2, para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y al ser calentado se licúa, permitiéndole cubrir totalmente las partículas del material pétreo.

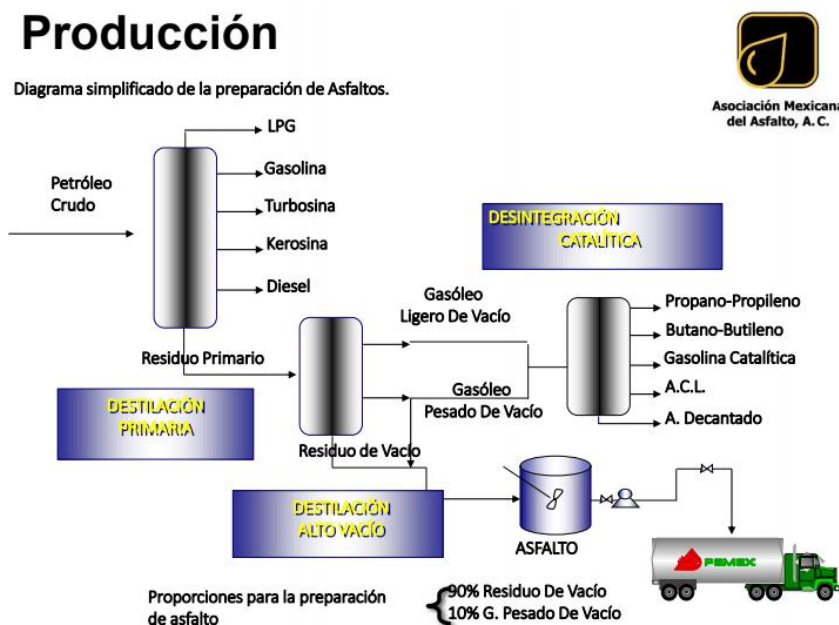


Figura 2.8.2. Diagrama del proceso de obtención del Asfalto.

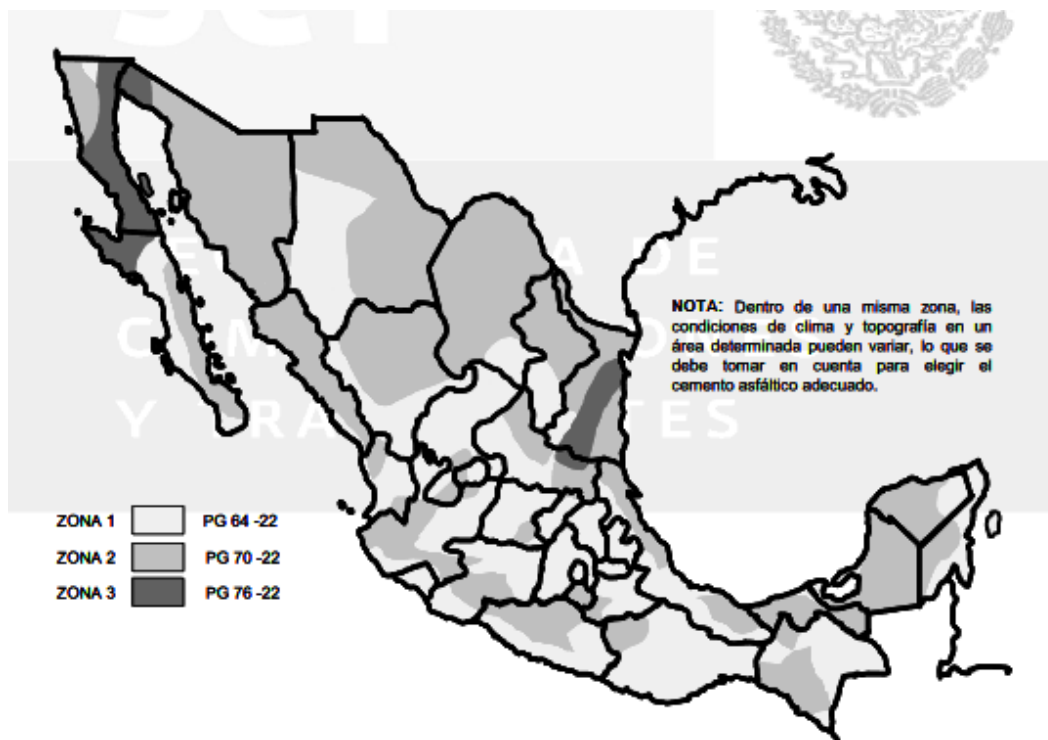
(AMAAC, 2016)

Los principales compuestos químicos del asfalto se conocen popularmente como la fracción SARA del asfalto y son las iniciales de los componentes que se enlistan a continuación:

- Saturados (S)
- Aromáticos (A)
- Resinas (R)
- Asfáltenos (A)

La exposición diaria al medio ambiente produce cambios en las fracciones SARA del asfalto cambiando sus propiedades físico-mecánicas que experimentan las mezclas asfálticas en el pavimento, y al estar compuesto por partículas orgánicas, reacciona con el oxígeno del medio ambiente haciéndose más duro y frágil. Esta oxidación se produce más rápido a altas temperaturas, es por esto que la mayor parte del endurecimiento del asfalto ocurre durante el proceso de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica.

La selección del cemento asfáltico se da en función de la temperatura máxima y mínima que se esperan en el lugar de aplicación de acuerdo a la Norma SCT N-CMT-4-05-004 (AMAAC, 2013). (Ver figura 2.8.3)



*Figura 2.8.3 Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos
Grado PG con fundamento en la norma N-CMT-4-05-004
(SCT, 2008)*

El cemento asfáltico al ser el agente ligante que une las partículas en la mezcla asfáltica, se caracteriza por ser susceptible a los cambios de la temperatura y el tiempo de aplicación de carga, por esto en las normas para realizar pruebas en materiales asfálticos se debe especificar la temperatura y la velocidad de carga.

Las pruebas que se hicieron en la elaboración de este trabajo, para evaluar al cemento asfáltico se presentan en la tabla 2.8.1 con su respectiva norma ASTM.

Prueba	Norma
Penetración	ASTM D5
Punto de reblandecimiento	ASTM D36
Punto de inflamación e ignición	ASTM D92

Tabla 2.8.1 Pruebas en cemento asfáltico y sus normas ASTM.

1. **Penetración.** - La prueba de penetración era utilizada para clasificar los asfaltos en México desde los años 30. Esta prueba determina la consistencia de los cementos asfálticos a una

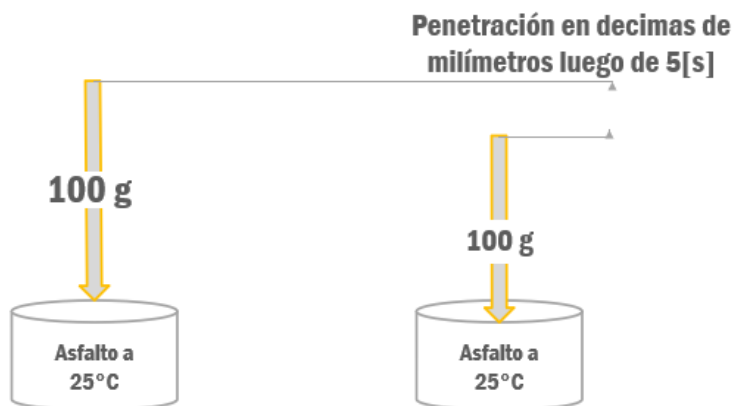
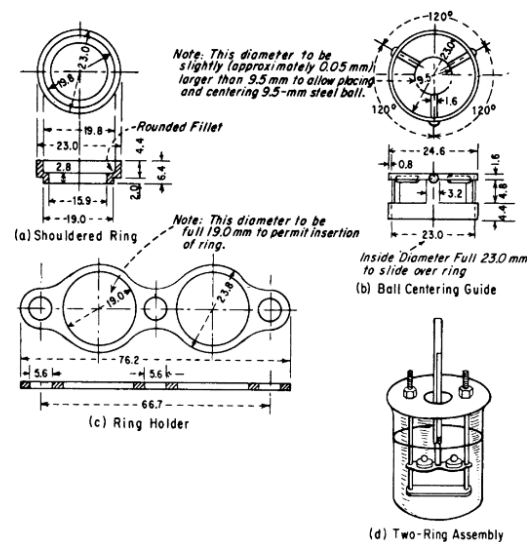


Figura 2.8.4 Prueba de Penetración en asfalto.

Elaboración propia.

temperatura de 25°C, con una carga sostenida de 100 g durante 5 segundos, como el diagrama mostrado en la figura 2.8.4. Estas condiciones la hacen una prueba limitada a evaluar los asfaltos, por esto se desarrollaron otras pruebas para clasificar a los asfaltos como la de viscosidad y la de desempeño.

- Punto de reblandecimiento.** - Esta prueba determina el punto de reblandecimiento del asfalto usando un aparato de dos anillos, con dos balines sumergidos en agua destilada. Aprovecha que el asfalto, al ser un material viscoelástico, se vuelve gradualmente más suave a medida que la temperatura aumenta. Por esto, el punto de reblandecimiento es una medida arbitraria para clasificar asfaltos e indica la tendencia del material a fluir en temperaturas elevadas dando una medida de la trabajabilidad del asfalto para su mezclado y colocación. (Ver figura 2.85).



NOTE 1—All dimensions are in millimetres.
 FIG. 1 Shouldered Ring, Ball-Centering Guide, Ring Holder, and Assembly of Apparatus Showing Two Rings

Figura 2.8.5 Dimensiones del equipo utilizado para la prueba y su ensamblaje.
 (ASTM D36, 2000)

3. **Punto de inflamación e ignición.** - La prueba de punto de inflamación e ignición es una prueba de seguridad hecha al asfalto para medir las temperaturas en las que el asfalto presenta chispas (punto de inflamación) y en la que mantiene una flama (punto de ignición). Esta característica del asfalto ayuda a mantener el asfalto a temperaturas menores que la de estos puntos para transportarlo y almacenarlo de manera segura.

Estas pruebas son básicas para evaluar las principales características del cemento asfáltico. Sin embargo, existen otros aspectos que se deben evaluar mediante pruebas más complejas de desempeño del asfalto, y conllevan a su correcta elección en el diseño de la mezcla asfáltica, como pueden ser las pruebas de grado PG (Performance Grade) presentadas en el siguiente diagrama de la figura 2.8.6 y que se encuentran en la norma de la SCT N·CMT·4·05·004/08 y en la norma ASTM D6373.

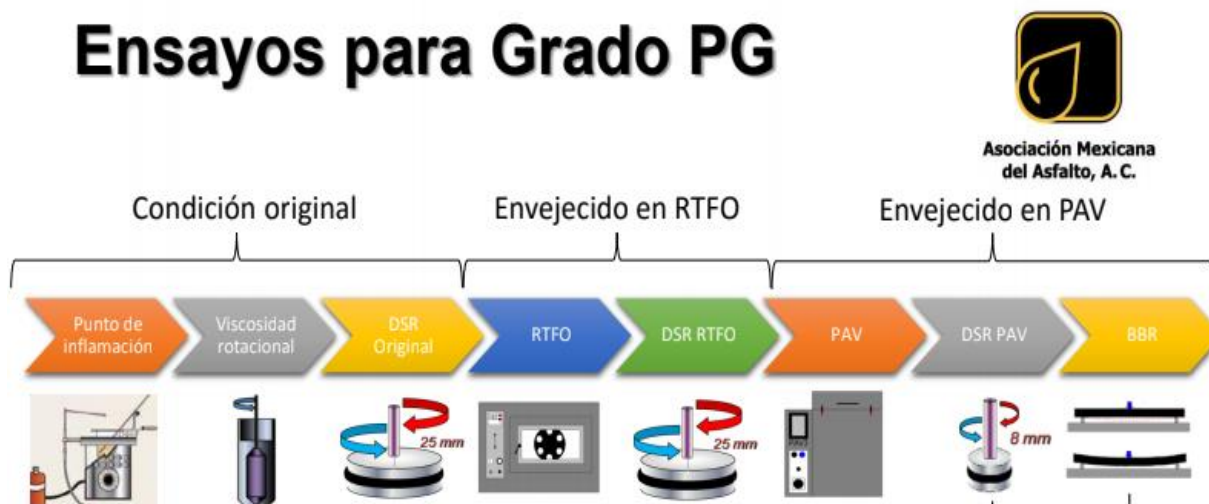


Figura 2.8.6 Diagrama de flujo para determinar la clasificación PG de un cemento asfáltico.

(AMAAC, 2016)

Los ensayos para clasificar un asfalto de acuerdo a su grado PG dan como resultado un rango de temperaturas entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente. El grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una determinada obra en función del clima, la intensidad de tránsito esperada y la velocidad de operación de la carretera durante su vida útil.

Esta serie de ensayos para clasificar los asfaltos de acuerdo a su grado PG tienen el objetivo de predecir el desempeño que el asfalto tendrá en la mezcla y como consecuencia, su comportamiento en el pavimento. Sin embargo, la clasificación por grado PG tiene ciertas deficiencias al momento de evaluar los asfaltos modificados ya que no permite conocer el desempeño que tendrá en la mezcla asfáltica (Sandoval Navarro, 2013).

Para esto la norma de la SCT N·CMT·4·05·004 se actualizó en 2018 e incorpora un parámetro llamado **Jnr** (ver tabla 2.8.2), que se correlaciona con susceptibilidad a la deformación permanente del concreto asfáltico debido a que este tipo de daño depende principalmente de las características del ligante. Con este cambio se complementa clasificación por grado PG.

Requisitos de calidad para cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG) y nivel de ajuste								
GRADO DE DESEMPEÑO (PG)	PG 64		PG 70		PG 76		PG 82	
	-16	-22	-16	-22	-16	-22	-16	-22
Temperatura máxima del pavimento (1), °C	≤64		≤70		≤76		≤82	
Temperatura mínima del pavimento (1) °C	≥-16	≥-22	≥-16	≥-22	≥-16	≥-22	≥-16	≥-22
Cemento asfáltico original								
Punto de inflamación Cleveland (2), °C min.					230			
Viscosidad rotacional 135°C (2) , Pa*s, max.					3			
Punto de reblandecimiento (2), °C, min.	48				55			
Separación, diferencia anillo y esfera (2) °C, max.	-				2			
Recuperación elástica por torsión 25°C (2), % min.	-				35			
Modulo reológico de corte dinámico (2), (G*/senδ) (2) kPa, min.					1.0			
Temperatura de prueba @10 rad/s °C	64		70		76		82	
Después de envejecimiento en horno RTFO (2)								
Perdida por calentamiento (2), % max					1.0			
Recuperación elástica en ductilómetro (5) 25°C,% min.	-				75			
Modulo reológico de corte dinámico (2), (G*/senδ) (2) kPa, min.					2.2			
Temperatura de prueba @10 rad/s °C	64		70		76		82	
Traffic normal "S", Nivel de ajuste (MSCR) (3)					4.0			
Jnr a 3.2 kPa en MSCR (2)(4); kPa-1, max								
Temperatura de prueba °C	64		70		76		82	
Respuesta elástica, RE a 3.2 kPa en MSCR (2)(6), %, min.	-				25			
Traffic alto "H", Nivel de ajuste (MSCR) (3)					2.0			
Jnr a 3.2 kPa en MSCR (2)(4); kPa-1, max								
Temperatura de prueba °C	64		70		76		82	
Respuesta elástica, RE a 3.2 kPa en MSCR (2)(6), %, min.	-				25			
Traffic muy alto "V", Nivel de ajuste (MSCR) (3)					1.0			
Jnr a 3.2 kPa en MSCR (2)(4); kPa-1, max								
Temperatura de prueba °C	64		70		76		82	
Respuesta elástica, RE a 3.2 kPa en MSCR (2)(6), %, min.	-				30			
Traffic Extremadamente alto "E", Nivel de ajuste (MSCR) (3)					0.5			
Jnr a 3.2 kPa en MSCR (2)(4); kPa-1, max								
Temperatura de prueba °C	64		70		76		82	
Respuesta elástica, RE a 3.2 kPa en MSCR (2)(6), %, min.	-				40			
Después de envejecimiento en horno a presión (PAV)								
Temperatura de envejecimiento PAV (2) °C					100			
En climas normales								
En climas desérticos	100				110			
Rigidización (G*/senδ) (2), kPa, máxima	28	25	31	28	34	31	37	34
Temperatura de prueba @10rad/s, °C								
Rigidez de flexión (2) S(t), máximo 300 MPa Valor m, mínimo 0.300 Temperatura de prueba @ 60 s, °C	-6	-12	-6	-12	-6	-12	-6	-12

Tabla 2.8.2 Parámetros para clasificar el cemento asfáltico por grado PG
(SCT N. CMT.4.05.004/18,2018)

2.9 Estructura granular de la mezcla asfáltica

El diseño de la estructura del agregado se realizó de acuerdo con las recomendaciones para el diseño de mezclas asfálticas SUPERPAVE y adoptada por el protocolo AMAAC para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño.

Este protocolo establece 4 tipos de niveles de diseño en función del nivel de tránsito dado por el tipo de carretera o el desempeño deseado que se requiere para la infraestructura, los cuales se caracterizan por evaluar la mezcla con pruebas adicionales al nivel anterior como se muestra en el diagrama de la figura 2.9:



Figura 2.9 Niveles de diseño según Protocolo AMAAC. Basado en (AMAAC, 2013)

Para cubrir los alcances de este trabajo solo se utiliza el nivel 1 de diseño porque termina con la evaluación a la susceptibilidad a la humedad.

Durante este proceso de selección de la granulometría de la mezcla asfáltica, las recomendaciones establecen que se debe cumplir con algunos requerimientos. La metodología establece una carta granulométrica de potencia 0.45 llamada también como curva de Fuller. En el eje de las ordenadas

de esta gráfica se establece el porcentaje que pasa, mientras que en eje de las abscisas se representa el tamiz en milímetros elevado a la potencia de 0.45 como en la figura 2.9.1

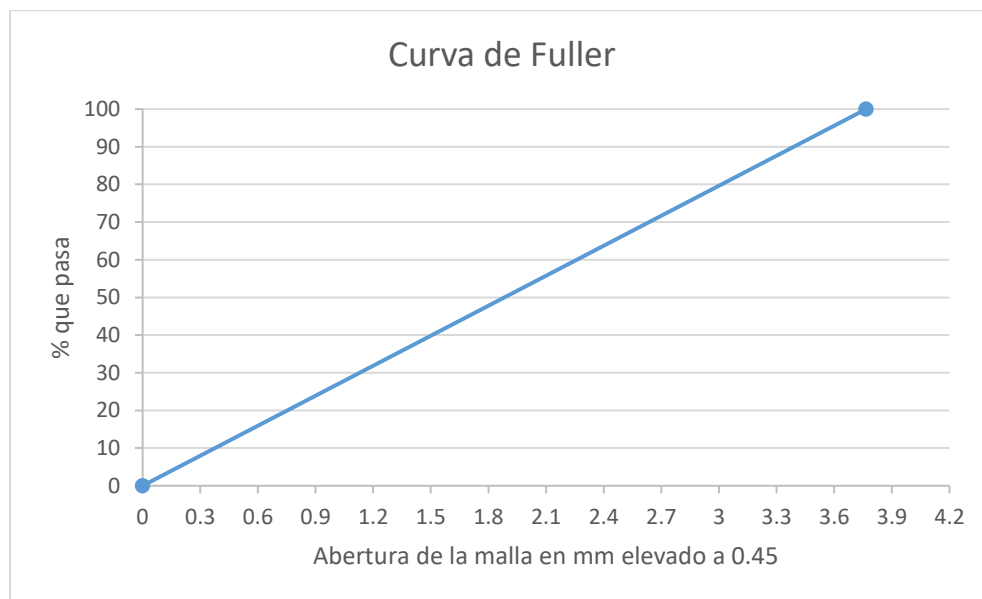


Figura 2.9.1 Curva de Fuller
(Asphalt Institute, 1996)

La granulometría de máxima densidad es una línea recta desde la abscisa del tamaño máximo del agregado de acuerdo a los tamices estandarizados por la ASTM y ordenada al 100% hasta el origen. Esta línea representa la graduación para la cual las partículas del agregado se acomodan entre sí, con el arreglo volumétrico más compacto posible. Este arreglo de partículas se debe evitar para que exista un espacio donde entre una película delgada de asfalto que mantenga unidas las partículas.

Además de esta restricción se emplean otras, llamados puntos de control y zona restringida. Los puntos de control son de paso obligado para la curva y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio y un tamaño de polvo. La zona restringida está entre los tamaños intermedios que debe ser esquivada porque indica una mezcla con mucha arena fina en relación al total de arena. Estos puntos están representados en la figura 2.9.1

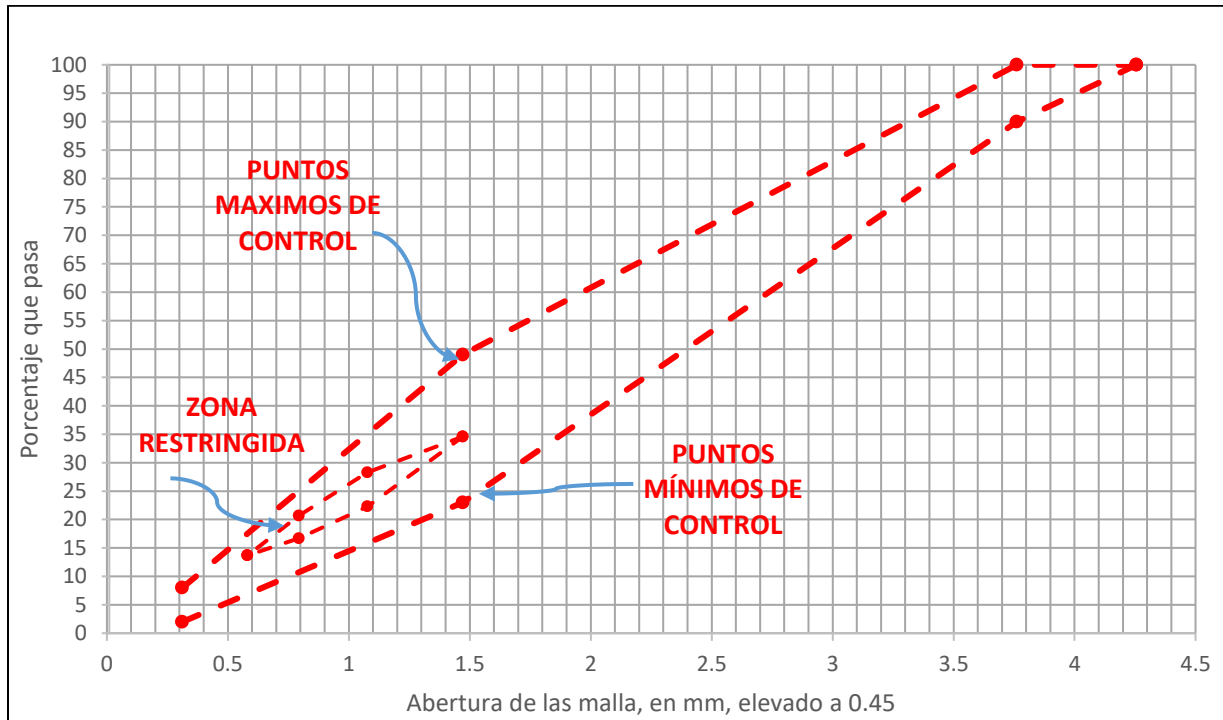


Figura 2.9.1 Puntos máximos, mínimos y zona restringida propuesta por la recomendación SUPERPAVE
(Asphalt Institute, 1996)

De acuerdo a la recomendación de SUPERPAVE (Ver tabla 2.9.2), esta estructura asegura que el agregado desarrollará un esqueleto granular fuerte; permitiendo un suficiente volumen de vacíos de aire para garantizar la durabilidad de la mezcla.

	Tamiz, mm	Mín. %	Máx. %
Puntos de control	25	100	100
	19	90	100
	2.36	23	49
	0.075	2	8
Zona restringida	2.36	34.6	34.6
	1.18	22.3	28.3
	0.6	16.7	20.7
	0.3	13.7	13.7

Tabla 2.9.2. Criterio SUPERPAVE para una mezcla nominal de 19 mm

2.10 Propiedades volumétricas

Al ser un sistema trifásico como lo muestra el diagrama de la figura 2.10.1, las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica deben satisfacer los requerimientos que establece la recomendación SUPERPAVE y son los siguientes:

- Vacíos de aire del 4% en la mezcla asfáltica. Al ser un sistema trifásico, los vacíos de aire en ella son el componente gaseoso en la muestra asfáltica en estado compactado. Siempre se expresa como un porcentaje del total de la muestra.

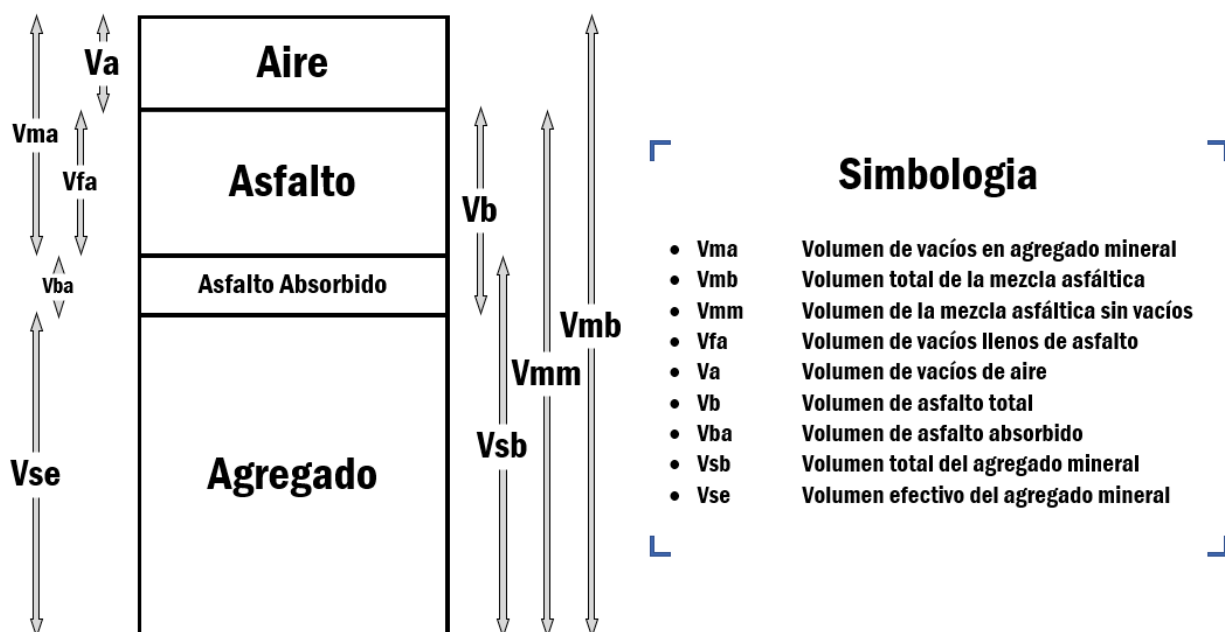


Figura 2.10.1 Diagrama de fases de una mezcla asfáltica (AMAAC, 2013).

- Vacíos del agregado mineral (VAM). Los vacíos de agregado mineral, son el espacio entre los agregados ocupado por el asfalto y el aire en la mezcla asfáltica compactada. Este VAM no considera el asfalto absorbido y por lo tanto su valor representa el espacio mínimo para que la película de asfalto tenga el espesor adecuado y contribuya a la durabilidad del pavimento. Los valores aceptados para el porcentaje de VAM se muestra en la tabla 2.10.1

Máximo tamaño nominal del agregado	Mínimo %de VAM (Vacíos del agregado mineral)
9.5 mm	15
12.5 mm	14
19 mm	13
25 mm	12
37.5 mm	11

Tabla 2.10.1 Requerimientos de SUPERPAVE para el VAM

- Vacíos llenos con asfalto. (VFA) Los vacíos llenos con asfalto son el porcentaje de VAM, que contienen asfalto, es decir, una mezcla con alto porcentaje de VFA produce mezclas inestables. Con bajo porcentaje de VFA se producen mezclas poco durables (AMAAC, 2013). El intervalo de valores aceptados de VFA se presenta en la tabla 2.10.2

Tránsito, en ESAL,s	VFA de diseño, en %
$<3 \times 10^5$	70-80
$<1 \times 10^6$	65-78
$<3 \times 10^6$	65-78
$<1 \times 10^7$	65-75
$<3 \times 10^7$	65-75
$<1 \times 10^8$	65-75
$<3 \times 10^8$	65-75

Tabla 2.10.2 Requerimientos de SUPERPAVE para el VFA

Estos requerimientos de la mezcla ya son considerados en (Trujillo Valladolid, 2017), y están verificados en este trabajo.

2.11 Óptimo de asfalto

El óptimo de asfalto es la cantidad necesaria de asfalto para que cada partícula de agregado esté cubierta con una película delgada del asfalto en el proceso de mezclado y así generar la cohesión necesaria entre partículas, lo suficientemente fuerte, para resistir las cargas a las que se someten (Rangel Galicia, 2015). Para lograr esto, la metodología SUPERPAVE establece cómo calcular la cantidad de asfalto óptima tomando en cuenta las propiedades de la mezcla y lograr un contenido de vacíos de aire del 4%.

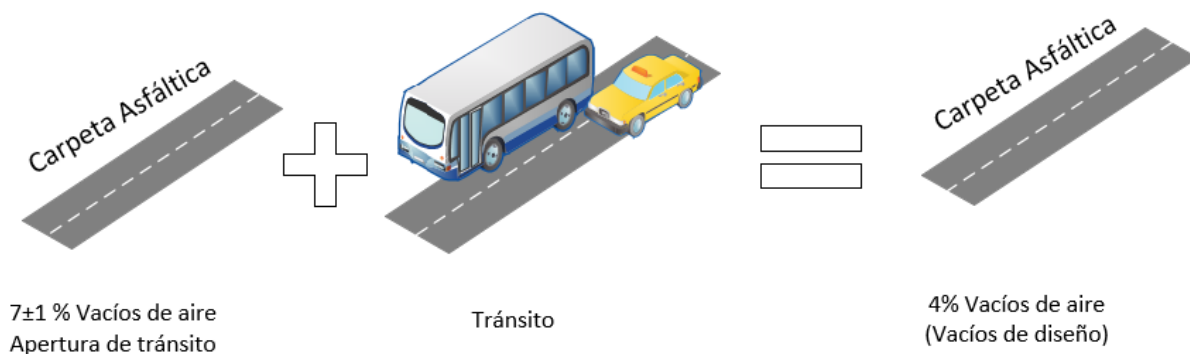


Figura 2.11.1 Diagrama de incremento en la densificación en la carpeta asfáltica.

(Ávila Vázquez, Reyes Coria, & Serrano, 2018)

El contenido de vacíos en una mezcla asfáltica compactada, deben ser suficientes para proveerle de flexibilidad (contracción-expansión) y así absorber los esfuerzos que presenta la carpeta asfáltica, recuperando parcial o totalmente las deformaciones generadas por las cargas del tránsito vehicular (Ver figura 2.11.1). En las capas densas estructurales del pavimento convencional, el porcentaje recomendable de vacíos de aire, en la carpeta terminada, es del orden de 6-8% del total de su volumen total, previo a la apertura al tránsito vehicular. Gradualmente estos espacios de aire se irán reduciendo, durante su vida útil, hasta obtener el contenido de vacíos de aire de diseño (Ávila Vázquez, Reyes Coria, & Serrano, 2018).

2.12 Evaluación del daño por humedad de la mezcla asfáltica

Como se mencionó anteriormente, una de las pruebas para evaluar el daño por humedad de la mezcla asfáltica adoptada por el método SUPERPAVE es el método de la AASHTO T283. Sin embargo, en la tabla 2.12.1 se muestran las pruebas desarrolladas a través del tiempo y que han sido probadas por los investigadores para determinar el daño, no obstante, algunas son más efectivas que otras.

Prueba	ASTM	AASHTO	Otra
Susceptibilidad al daño por vapor			Prueba de California 307 Desarrollado en los últimos años de la década de 1940s
Inmersión- Compresión	D1075	T165	ASTM STP 252 (Goode 1959)
Inmersión de Marshall			Stuart 1986
Congelación y deshielo en pedestal			Kennedy et al. 1982
Tensión Indirecta de Lottman original			NCHRP Report 246 (Lottman 1982); Transportation Research Record 515 (1974)
Tensión Indirecta de Lottman modificada		T283	NCHRP Report 274 (Tunncliff and Root 1984) Tex 531-C
Tunncliff - Root	D4867		NCHRP Report 274 (Tunncliff and Root 1984)
ECS con módulo resiliente			SHRP-A-403 (Al-Swailmi and Terrel 1994)
Pista de Hamburgo			1993 Tex.242-F
Analizador de asfalto del pavimento			
ECS/SPT			NCHRP 9-34 2002-03
Múltiples ciclos de congelamiento- deshielo			

Tabla 2.12.1 Pruebas a la sensibilidad a la humedad en especímenes compactos (Solaimanian, Harvey, Tahmoressi, & Tandon, 2003).

La norma AASHTO T283 regula el procedimiento para realizar la prueba a tensión indirecta de Lottman modificada; esta es la más utilizada y aceptada por los organismos para evaluar la susceptibilidad a la humedad; consiste en hacer dos grupos de especímenes compactados. Uno de estos grupos se acondiciona sometiéndolos a ciclos de saturación, congelación y deshielo, para simular las condiciones climáticas del agua en la mezcla; y el otro grupo se mantiene a temperatura ambiente. Posteriormente se realiza la prueba de tensión indirecta, se someten las probetas a una carga aplicada a un costado de estas. En estos resultados se espera que el grupo de las probetas acondicionadas resistan menos debido al daño producido por el agua, mientras que las probetas sin acondicionar son el grupo de control para medir la resistencia original de la mezcla. Finalmente se calcula el TSR, que es una relación de la resistencia a la tensión indirecta de las probetas acondicionadas y las probetas sin acondicionar (ver figura 2.12.1).

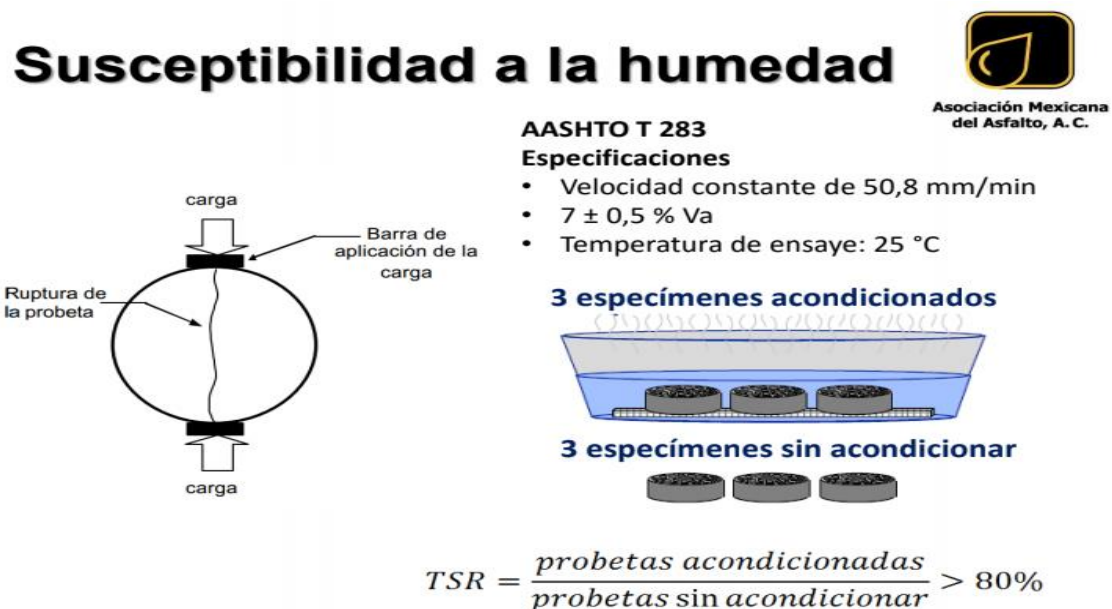


Figura 2.12.1 Esquema de trabajo de la prueba AASHTO T283 (AMAAC, 2016).

La norma ASTM D1075 “Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures” indica el procedimiento para evaluar la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica. Esta prueba consiste en hacer dos grupos de especímenes compactados. El primero se acondiciona sumergiéndolo en agua durante 24 hrs. a una temperatura de 60°C; mientras el segundo se mantiene seco y a temperatura ambiente. Posteriormente se realiza la prueba a compresión simple, a una temperatura de 25°C, con deformación controlada de 0.05 in/min (0.127 cm/min) por pulgada de altura del espécimen midiendo la resistencia máxima de cada probeta. Al igual que en la norma AASTHO T283, se espera que los resultados del grupo de las probetas acondicionadas resistan menos debido al daño producido por el agua. Finalmente se calcula el ISR que es la relación de la resistencia de las probetas acondicionadas y las probetas sin acondicionar (ver figura 2.12.2).

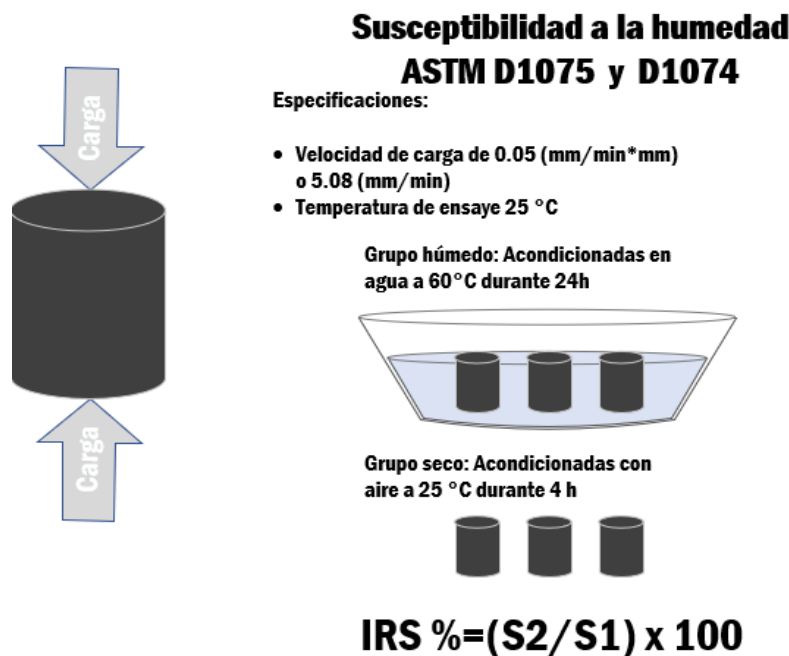


Figura 2.12.2 Esquema de trabajo de la prueba ASTM D1074 Y D1075. Elaboración propia.

Capítulo 3. Etapa experimental

En este capítulo se presentan los resultados de las actividades realizadas durante la etapa experimental, orientadas a comprobar la calidad de la mezcla asfáltica y sus componentes. Para lograrlo se realizó un programa de actividades en el cual se obtuvieron, caracterizaron y almacenaron los agregados pétreos junto con el cemento asfáltico. Se determinaron las propiedades de la mezcla asfáltica para posteriormente elaborar los especímenes. Finalmente se realizaron las pruebas de susceptibilidad a la humedad por compresión simple y sus resultados fueron comparados con las pruebas convencionales realizadas a tensión indirecta. A continuación, se especifica todo el procedimiento detalladamente.

3.1 Pruebas en agregados pétreos

Como se mencionó, el agregado pétreo tiene un papel importante en el correcto funcionamiento de la capa asfáltica pues provee su estructura sólida. La angularidad es una de las propiedades medidas porque depende de esta propiedad garantizar una adecuada fricción entre las partículas, una alta durabilidad y un gran desempeño del pavimento. Las pruebas de origen y de consenso son utilizadas para evaluar la calidad de los agregados, las cuales avalan que la mezcla tenga un alto desempeño del concreto y resistencia en la mezcla.



Figura 3.1.1 Planta de mezclas asfálticas del Grupo Pinfra. Elaboración propia.

Para este trabajo se escogió el agregado pétreo producido en la planta del Grupo Pinfra ubicada en Valle Verde en el municipio de Ixtapaluca, Estado de México (Ver figura 3.1.1). Este agregado es de alta calidad y se obtiene de un banco de basalto andesítico sometido a un proceso de trituración y homogeneización previo a su uso en las mezclas asfálticas (Ver figura 3.1.2).



Figura 3.1.2 Costales de agregado antes de ser procesados en el Laboratorio de Vías Terrestres. Elaboración propia.

En la planta de mezclas asfálticas del Grupo Pinfra, se tomó una muestra representativa para obtener la curva granulométrica del agregado pétreo; esta curva es llamada *curva final* en el proyecto de (Trujillo Valladolid, 2017) (Ver tabla 3.1.1 y figura 3.1.3).

Malla	Abertura, mm	% que pasa	% retenido
2"	50.080		
1 1/2 "	38.100		
1"	25.400	100	0.00
3/4"	19.050	93.5	6.50
1/2"	12.700	82	11.50
3/8"	9.530	71	11.00
1/4"	6.350	57	14.00
N°4	4.750	50	7.00
N°8	2.360	34	16.00
N°16	1.180	22	12.00
N°30	0.600	16	6.00
N°50	0.300	11.5	4.50
N°100	0.149	7.5	4.00
N°200	0.075	3.5	4.00
Filler		0	3.50
			100.00

**Tabla 3.1.1 Granulometría utilizada en el proyecto.
(Trujillo Valladolid, 2017)**

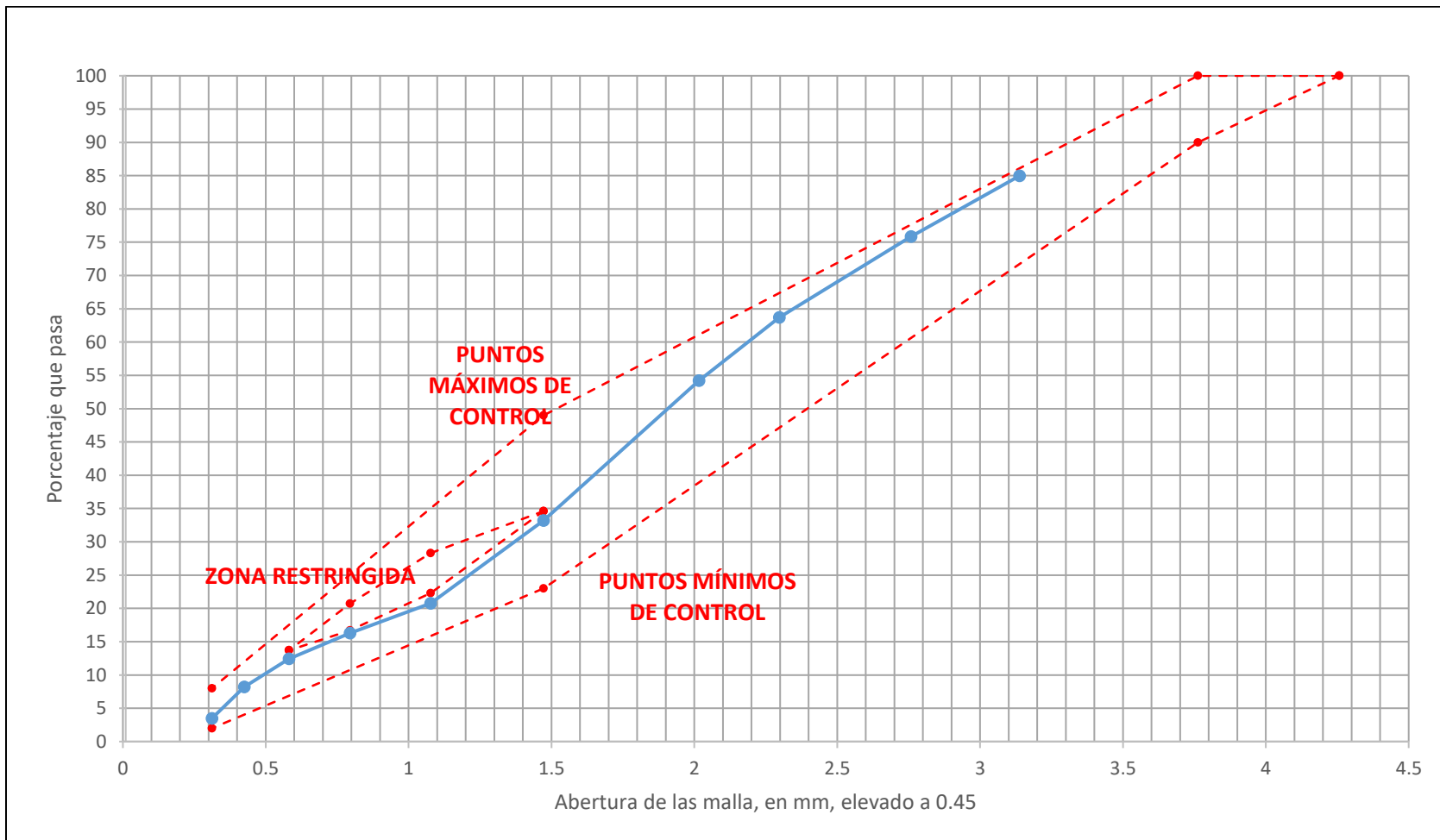


Figura 3.1.3 Curva granulométrica
(Trujillo Valladolid, 2017).

3.2 Angularidad del agregado grueso

La prueba de angularidad del agregado grueso se realizó de acuerdo a la norma ASTM D5821. La prueba comienza seleccionando una muestra representativa de agregado para secarlo y tamizarlo a través de la malla #4. El material retenido es reducido por medio de un cuarteador hasta obtener la muestra, cuidando que no sea menor a lo establecido en la norma (Ver figura 3.2.1). La muestra se debe de lavar y posteriormente se realiza una inspección visual, tomando de guía las figuras presentadas en la norma, donde se verifica cuantas caras fracturadas tiene cada partícula de la muestra (ver figura 3.2.2).



*Figura 3.2.1 Separación del agregado grueso mediante tamizado y cuarteo de la muestra.
Elaboración propia.*



Figura 3.2.2 Partículas fracturadas con bordes afilados y superficies rugosas características del producto de trituración Elaboración propia.

Finalmente, el reporte se muestra en la tabla 3.2.1, donde se observa, de acuerdo con la norma ASTM D5821, que el agregado usado cumple con lo establecido en la recomendación SUPERPAVE.

3.3

	Peso [g]	En % por masa	Resultado	Requerimiento SUPERPAVE
Muestra representativa retenida en Malla #4	1595.6	100	100/100	90/95 mínimo
1 o más caras fracturadas	1595.6	100		
2 o más caras fracturadas	1595.6	100		

Tabla 3.2.1 Resultados de la prueba ASTM D5821 para determinar el porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso.

Angularidad del agregado fino

La angularidad del agregado fino se realizó de acuerdo a norma ASTM C1252, que regula el procedimiento para determinar el contenido de vacíos de aire no compactados del agregado fino ya que este parámetro provee un indicador de la angularidad, esfericidad y rugosidad. Además de ser un indicador del efecto del agregado fino en la trabajabilidad de la mezcla.

La obtención de la muestra se realizó mediante la combinación de las fracciones individuales divididas por tamizado (método A de la norma) como se muestra en la tabla 3.3.1 y la figura 3.3.1.

Tamaño de la fracción individual	Masa [g]
#8 a No 16	44



Figura 3.3.1 Agregado fino. Elaboración propia.

Posteriormente, usando la yema del dedo para bloquear la abertura del embudo, se vertió la mezcla dentro de este. Con la ayuda de una espátula se niveló la mezcla y se retiró el dedo, permitiendo que el material cayera libremente dentro del cilindro de 100 mL. Finalmente se enrasó y se limpió el cilindro, de cualquier agregado no contenido dentro del mismo para finalmente pesarlo (Ver figura 3.3.2).

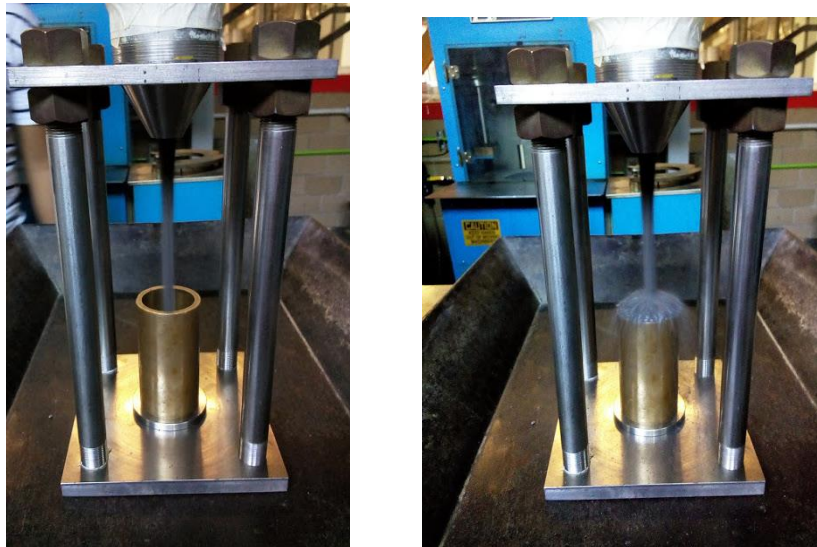


Figura 3.3.2 Llenado del cilindro para la prueba de angularidad del agregado fino.
Elaboración propia.

Con estos datos y la gravedad específica del agregado fino se obtuvo un porcentaje y se comparó con el requerimiento mínimo propuesto por SUPERPAVE. Los resultados de la prueba se observan en la tabla 3.3.2

Muestra	Volumen del cilindro (mL)	Masa Neta del Agregado Fino [g]	Gravedad Especifica del agregado fino	Vacíos no compactados en el material [%]	Peso del cilindro [g]	Peso total de la muestra [g]	Peso de cilindro + muestra [g]	Resultado Promedio [%]	Requerimiento SUPERPAVE [%]	¿Cumple?
1	103.7	138.2	2.563	48.02	622.6	190.1	760.8	48.18	45 mínimo	si
2	103.7	137.3	2.563	48.36	622.6	190.1	759.9			
3	103.7	137.8	2.563	48.17	622.6	190.1	760.4			

Tabla 3.3.2 Angularidad de agregados finos (Método A)

3.4 Partículas planas, alargadas o planas y alargadas

Para la ejecución de la prueba de partículas planas, alargadas o planas y alargadas se utilizó la norma ASTM D4791 (Ver figura 3.4.1). De acuerdo a esta norma, después del muestreo y reducción de la muestra para su lavado y secado, esta debe ser dividida entre lo retenido en la malla $\frac{1}{2}$ hasta lo retenido en la malla #4, es decir, solo el agregado grueso. De cada malla se escogieron 100 partículas y se evaluó cada una con un calibrador proporcional con la proporción 5:1 (Ver figura 3.4.2), de esta manera las partículas se clasificaron en:

- Planas: si de un lado del calibrador se abre igual al ancho de la partícula y si el espesor pasa por la abertura más pequeña.
- Alargadas: si de un lado del calibrador se abre igual a lo largo y si lo ancho puede pasar por la abertura más pequeña.

- Planas y alargadas: si de un lado del calibrador se abre igual a lo largo y el espesor puede pasar por la abertura más pequeña.



Figura 3.4.1. Partículas Planas (Izquierda), Alargadas (Centro) y que no son planas ni alargadas (Derecha). Elaboración propia.

En la tabla 3.4.1 se muestran los resultados de la prueba con relación 5:1 en los diferentes tamaños de partícula y su cumplimiento con el requerimiento de SUPERPAVE.

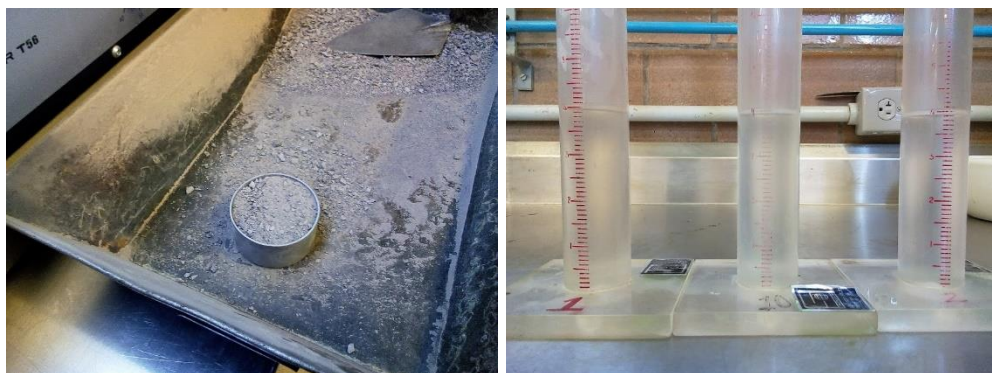
# de malla	# de partículas	Planas %	Alargadas %	Planas y Alargadas %	Requerimiento SUPERPAVE	¿Cumple?
1/2	100	0	0	1	10 Máximo	si
3/8	100	0	0	2	10 Máximo	
1/4	100	0	0	3	10 Máximo	
#4	100	0	0	4	10 Máximo	
<i>Tabla 3.4.1 Partículas planas, alargadas o planas y alargadas con la relación 5:1</i>						



Figura 3.4.2. Calibrador proporcional de la Prueba ASTM D4791. Elaboración propia.

3.5 Equivalente de arena

La prueba de equivalente de arena se hizo de acuerdo a la norma ASTM D2419, cuyo propósito es indicar, bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de arcilla y polvo en suelos granulares y agregados finos que pasan la malla No. 4 (Ver figura 3.5.1).



*Figura 3.5.1 Medida del agregado fino y de solución floculenta
Elaboración propia.*

Después del muestreo y la reducción de la muestra se obtuvo un aproximado de 1500 g de agregado fino. La medida de agregado fino con una solución floculenta, son puestas en un cilindro graduado para ser agitadas manualmente y lavadas con un irrigador para que las arenas pierdan la capa de arcilla que las cubre. Después de un tiempo de reposo, el equivalente de arena se calculó como la relación de altura de la arena y la altura de la arcilla expresada en porcentaje (Ver figura 3.5.2).

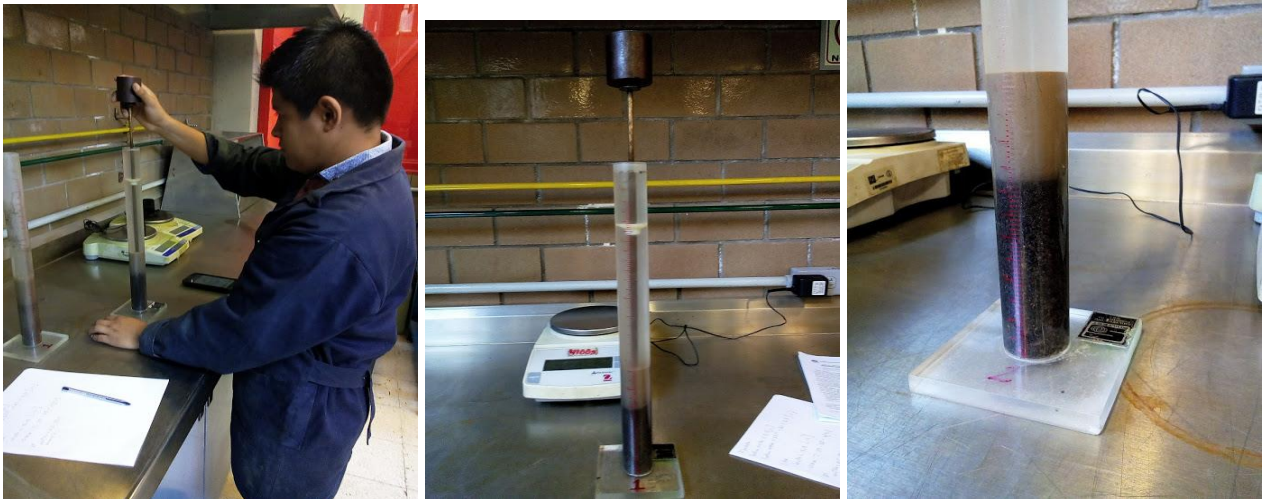


Figura 3.5.2 Lectura del nivel de arena y el nivel de arcilla. Elaboración propia.

Los resultados de la prueba y el cumplimiento con la recomendación SUPERPAVE se observan en la tabla 3.5.1

# de Muestra	1	2	3	4
Lectura de Arena [in]	3.7	4	3.9	3.8
Lectura de Arcilla [in]	5.7	5.9	6.2	5.7
Equiv. De Arena	64.9%	67.8%	62.9%	66.7%
E.A. Reportado	65%	68%	63%	67%
E.A. Promedio	65.8%			
E.A. Reportado	66%	Requerimiento SUPERPAVE		45% mínimo
<i>Tabla 3.5.1 Equivalente de arena</i>				

3.6 Prueba de tenacidad

La prueba de resistencia al desgaste de agregado grueso por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles, cuyo procedimiento se describe en la norma ASTM C131, permite obtener las características de tenacidad del agregado pétreo. La prueba consiste en determinar la degradación que sufre el agregado grueso como resultado de la abrasión, desgaste, impacto y trituración (ver figura 3.6.1).



Figura 3.6.1 Máquina de Los Ángeles y esferas de acero. Elaboración propia.

Posterior al cribado, lavado y secado se del material, de acuerdo a la tabla 3.6.1 se seleccionan 5,000 g de agregado pétreo para introducir la muestra en la máquina de Los Ángeles junto con el número de esferas que establece la norma en la misma tabla y se hizo girar durante 500 ciclos (ver figura 3.6.2).



Figura 3.6.2 Agregado antes y después de la Prueba de Los Ángeles. Elaboración propia.

Finalmente, el agregado se volvió a cribar, lavar y secar para que se pesara y se procediera a calcular la pérdida del material en porcentaje. Los resultados se muestran en la tabla 3.6.1, así como el cumplimiento con la recomendación SUPERPAVE.

Granulometría de tabla 1*	Numero de esferas	Masa inicial de la muestra [g]	Masa final de la muestra [g]	Pérdida por abrasión e impacto [g]	Pérdida por abrasión e impacto [%]	Recomendación SUPERPAVE %
B	11	5,002.10	4,214.00	788.10	16%	35-45 Máximo
C	8	5,000.30	4,103.20	897.10	18%	35-45 Máximo
D	6	5,000.00	4,118.10	881.90	18%	35-45 Máximo

* Table 1 Grading of Test Samples (ASTM C 131, 2003)

Tabla 3.6.1 Abrasión en la máquina de Los Ángeles

3.7 Prueba de durabilidad

La prueba de intemperismo acelerado se hizo de acuerdo a la norma ASTM C88, mide la durabilidad de los agregados usando sulfato de sodio o sulfato de magnesio, en nuestro caso se usó el sulfato de sodio. Esta prueba se realizó mediante la inmersión repetida del agregado en una solución de sulfato de sodio, seguido del secado al horno para deshidratar la sal precipitada en los poros permeables del agregado en varios ciclos. Con este proceso se simula la fuerza expansiva interna provocada por la expansión del agua congelada mediante la hidratación y deshidratación de los cristales del sulfato de sodio (ver figura 3.7.1).

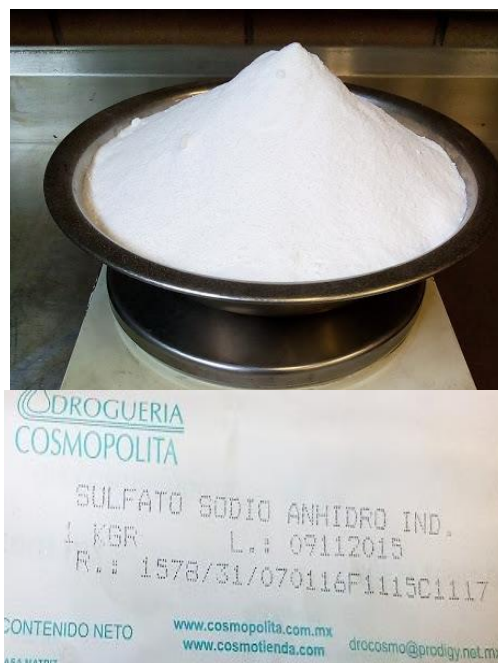


Figura 3.7.1 Sulfato de Sodio. Elaboración propia.

Para empezar esta prueba la muestra se separó de acuerdo al tamaño del agregado por medio del tamizado. Posteriormente se lavó y se secó para empezar el ciclo, sumergiendo el agregado en una solución del sulfato de sodio por 16 horas y terminando el ciclo secando el agregado a 110°C en el horno. Este ciclo se repitió 5 veces siguiendo la recomendación SUPERPAVE y finalmente se lavó para quitar los cristales del sulfato de sodio del agregado y se volvió a meter al horno para secarlo y volverlo a cribar por la malla que le corresponde a cada tamaño de agregado para finalmente separar las partículas que se degradaron por acción de los cristales del sulfato de sodio (ver figura 3.7.2).



Figura 3.7.2 Ciclo de solvencia de agregados conocido como prueba de intemperismo acelerado. Elaboración propia.

Finalmente se calcula la pérdida del material comparando el peso inicial y el peso final de las muestras y se presenta en porcentaje como se muestra en la tabla 3.7.2.

	Mallas Retenido	Peso Inicial [g]	Peso final [g]	Pérdida [g]	Pérdida %	Max. SUPERPAVE %
Fino	#50	100	99	1	1.0%	10-20 máximo
	#30	100	95.4	4.6	4.6%	
	#16	100	97.4	2.6	2.6%	
	#8	100	93.6	6.4	6.4%	
	3/8-#4	100	94.2	5.8	5.8%	
Grueso	3/8-#4	300.1	285.2	14.9	5.0%	
	3/8	1000.9	936.9	64	6.4%	
	1/2					
				Promedio	4.5%	si cumple
<i>Tabla 3.7.2 Intemperismo acelerado a 5 ciclos</i>						

3.8 Pruebas en cemento asfáltico

El asfalto es la parte de la mezcla que une los agregados y se comporta de manera viscoelástica, es decir que a medida que la temperatura del asfalto disminuye, se vuelve más frágil y cuando la temperatura aumenta se hace más líquido.

El asfalto es procedente de la refinería Ing. Antonio M. Amor de Salamanca, Guanajuato y tiene una denominación comercial de Pemex EKBE y con grado SUPERPAVE 64-22, sus características se presentan en la tabla 3.8.1.

Prueba de análisis	Unidades	Método ASTM	Especificación	Resultado
Viscosidad rotacional a 135° C	cP	ASTM D4402	3000 máx.	488
Viscosidad Absoluta a 60 ° C	g/cm. s	ASTM D2171	Informar	2476
Temperatura de inflamación Cleveland copa abierta	°C	ASTM D92	230 min.	318
Solubilidad en tricloroetileno	% peso	ASTM D2042	99 min.	99.96
Módulo de corte dinámico (Asfalto original)	KPa	ASTM D7175	1.00 min.	1.44
Pérdida por calentamiento	% peso	ASTM D2872	1.000 máx.	0.536
Módulo de corte dinámico (Asfalto después de RTFO)	KPa	ASTM D7175	2.20 min.	5.91
Módulo de corte dinámico (Asfalto después de PAV)	KPa	ASTM D7175	5000 máx.	3307
Pendiente de deformación (m)	---	ASTM D6648	0.30 min.	0.3
Rigidez a la deformación (s)	MPa	ASTM D6648	300 máx.	135
Gravedad específica por picnómetro 25 °C	---	n/a -0	Informar	1.034

Tabla 3.8.1 Ficha técnica del asfalto utilizado.

A fin de complementar la información presentada en la tabla anterior, se realizaron pruebas adicionales siguiendo las normas ASTM D92, ASTM D5 y ASTM D36.

La norma ASTM D92 “Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester” describe el procedimiento para determinar el punto de inflamación (chispazos sobre la muestra) e ignición (flama de al menos 5 segundos) del asfalto. Estos puntos se midieron con la ayuda de un aparato de copa abierta de Cleveland manual (Ver figura 3.8.1).

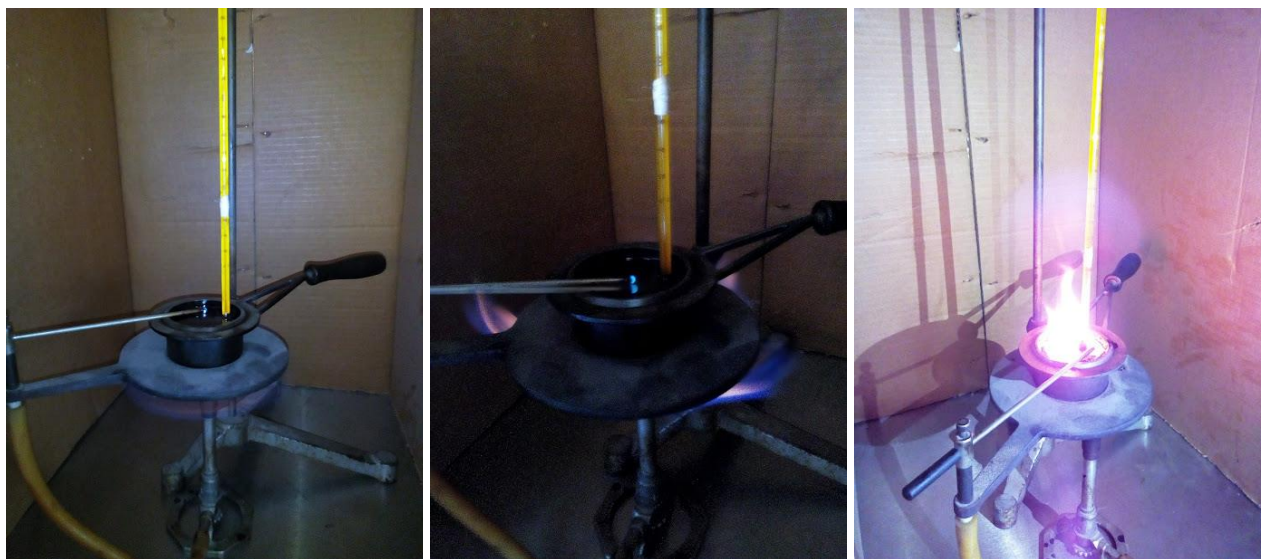


Figura 3.8.1. Prueba ASTM D92 para identificar el punto de inflamación e ignición con la ayuda del aparato de copa abierta de Cleveland manual. Elaboración propia.

Con esta prueba se obtiene una medida de la tendencia del espécimen para formar una mezcla inflamable bajo condiciones controladas del laboratorio. Si los resultados de esta prueba son relativamente bajos puede indicar la contaminación de la muestra con combustibles o aceites que alteran la composición del asfalto.

Los resultados que se obtuvieron en esta prueba se presentan en la tabla 3.8.2.

Punto de inflamación [°C]	300
Punto de ignición [°C]	330

Tabla 3.8.2 Resultados de prueba ASTM D92

El procedimiento descrito en la norma ASTM D5 “Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials” es una prueba en la que se mide la consistencia del asfalto por medio de la penetración en una muestra ambientada a 25°C, causada por una aguja estandarizada y montada en un penetrómetro, con una carga constante de 100 g en un tiempo de 5 segundos (Ver figura 3.8.2).



Figura 3.8.2. Prueba de penetración en el asfalto. Elaboración propia.

Este procedimiento se llevó a cabo 8 veces en 3 muestras de asfalto, para el cálculo del valor de penetración promedio se descartaron las lecturas más bajas y más altas tal como se indica en la tabla 3.8.3.

	Frasco 1	Frasco 2	Frasco 3
Ensayo	Penetración [1/10 mm]	Penetración [1/10 mm]	Penetración [1/10 mm]
1	68	67.5	68
2	70.5	70	70
3	68.5	68	70
4	68.5	70	71
5	68.5	79	78
6	68.5	71	68.5
7	69	67	72
8	69	69	71
	69	69	70
Resultado		69	[1/10 mm]

Tabla 3.8.3 Resultados de la prueba de penetración

La norma ASTM D36 “Standard Test Method for Softening Point of Bitumen”, describe el procedimiento para determinación del punto de reblandecimiento del asfalto. Al igual que la prueba de penetración, esta es una medida de la consistencia del asfalto y de la tendencia del material a fluir en temperaturas elevadas.

El procedimiento para la prueba consiste en poner dos anillos rellenos de asfalto que se calientan a una velocidad controlada sumergidos en agua. Al elevar la temperatura del agua progresivamente los dos balines puestos sobre la muestra se desplazan hasta tocar una placa localizada a 25 mm por debajo de los anillos. El punto de reblandecimiento es la temperatura en la que los anillos tocan esta placa (ver figura 3.8.3).



Figura 3.8.3. Prueba de reblandecimiento. Elaboración propia.

El resultado obtenido de la prueba se observa en la tabla 3.8.4

	Temperatura [°C]
Prueba 1	56.75
Prueba 2	56
Resultado	56.4
<i>Tabla 3.8.4. Prueba de reblandecimiento del asfalto.</i>	

De acuerdo a la recomendación de SUPERPAVE, para el proceso de mezclado se recomienda que el asfalto tenga una viscosidad de 170 ± 20 MPa/s y para el proceso de compactación se recomienda una de 280 ± 30 MPa/s. Observando la carta de viscosidades del asfalto (ver figura 3.8.4) definida previamente por Trujillo Valladolid (2017) se observa que la temperatura óptima para el mezclado es de 155°C y para la compactación es de 145°C .

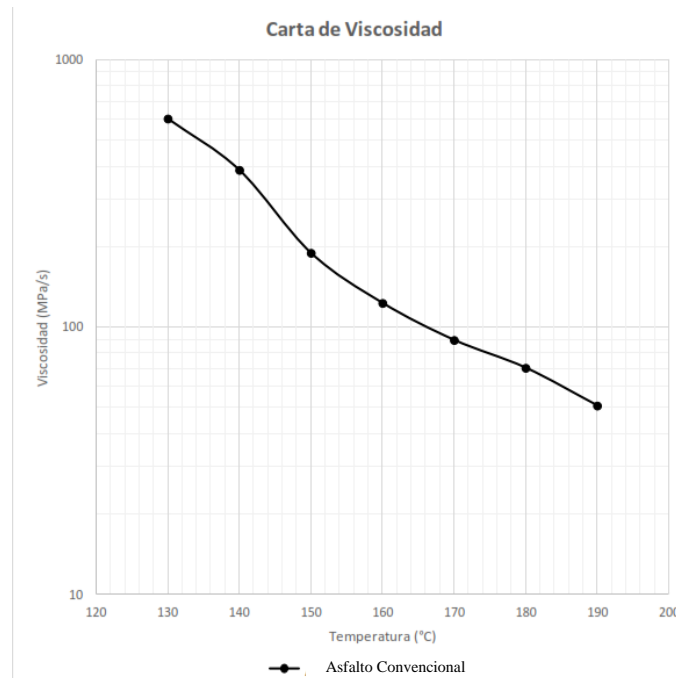


Figura 3.8.4. Carta de viscosidad utilizada en esta investigación para el asfalto convencional
(Trujillo Valladolid, 2017).

3.9 Propiedades gravimétricas del agregado y revisión del contenido óptimo de asfalto

Las propiedades gravimétricas del agregado y el contenido óptimo de asfalto de la mezcla se basaron a partir de los resultados presentados en el reporte de (Trujillo Valladolid, 2017). Estas son definidas para una mezcla de diseño con 4% de contenido de vacíos (V_a) a 100 giros del compactador giratorio.

Las propiedades volumétricas de la mezcla se calculan a partir de los valores de gravedad específica de los agregados grueso y fino (propiedades gravimétricas), siguiendo las normas ASTM C127 y ASTM C128 respectivamente. En la tabla 3.9.1 se presentan los valores ponderados de la Gravedad específica bruta (G_{sb}) y la Gravedad específica aparente (G_{sa}) de los agregados pétreos utilizados. A partir de estos dos valores se estimó la Gravedad específica efectiva (G_{se}) tal como se muestra en la tabla 3.9.1

Gravedad específica	[]
G_{sb}	2.516
G_{sa}	2.675
G_{se} $G_{se} = G_{sb} + 0.8(G_{sa} - G_{sb})$	2.643
<i>Tabla 3.9.1 Gravedades específicas bruta, aparente y específica.</i>	



Figura 3.9.1 Muestra de mezcla asfáltica para obtención de la gravedad específica teórica máxima. Elaboración propia.

3.10 Procedimiento para la elaboración de probetas de concreto asfáltico

Para la elaboración de las probetas de concreto asfáltico primero se cribó el agregado pétreo por medios manuales utilizando un set de mallas ASTM con las diferentes aperturas y por medios mecánicos utilizando una cribadora con rejillas estandarizadas (ver figura 3.10.1).



Figura 3.10.1 Cribadora mecánica y cribado por medios manuales con mallas estandarizadas
Elaboración propia.

Posteriormente al cribado se limpió el material para quitar la basura y los materiales orgánicos del agregado como las hojas y ramas de árboles. Esta limpieza se hizo poniendo el agregado en botes de 20 L y llenándolos con agua hasta que el agua saliera clara (ver figura 3.10.2).



Figura 3.10.2 Limpieza de material cribado.
Elaboración propia.

Después de lavar el agregado se puso a secar en el horno a 110 °C, hasta que estuviera completamente seco (ver figura 3.10.3) y se almacenó en botes. Se dosificó la cantidad necesaria de asfalto y agregado para cada probeta de acuerdo a la granulometría y contenido óptimo de asfalto previamente definidos.



Figura 3.10.3 Dosificación del material para hacer cumplir con la granulometría propuesta.
Elaboración propia.

Después de la dosificación del material (ver figura 3.10.4) se introdujeron en el horno el agregado y el asfalto a temperatura de mezclado de 155°C.



Figura 3.10.4 Agregado pétreo dentro del horno a 155° para mezclado
Elaboración propia.

Previo al proceso de elaboración de una probeta de concreto asfáltico (ver figura 3.10.5 y figura 3.10.6) es necesario acondicionar a temperatura de mezclado los instrumentos (olla, espas, espátulas y recipientes) que estarán en contacto con la mezcla, de tal manera que durante la



Figura 3.10.5 Dosificación de asfalto en mezcla asfáltica. Elaboración propia.

incorporación de materiales no hayan cambios de temperatura que permitan que el asfalto pierda la fluidez que requiere para cubrir completamente al agregado. Es por ello que durante el proceso de mezclado se controla la temperatura de la olla con la ayuda de un mechero Bunsen.



Figura 3.10.6 Procesos de mezclado por medios mecánicos Elaboración propia.

Una vez terminado el proceso de mezclado inicia el curado de la misma y para ello, se vierte la mezcla de la olla de mezclado a charolas lo suficientemente grandes (ver figura 3.10.7) para expandir la mezcla en ellas, las cuales se introducen al horno a 135°C un mínimo de 2 horas y máximo de 4 horas.



Figura 3.10.7 Mezcla en charolas para el proceso de envejecimiento a corto plazo. Elaboración propia.

El proceso de curado también conocido como envejecimiento a corto plazo tiene la finalidad de simular los procesos de acondicionamiento que experimenta la mezcla asfáltica hecha en planta, durante el cual el agregado absorbe el ligante asfáltico, así como de acarreo y el proceso de tendido antes de la compactación. Además, hay investigaciones que sugieren que el tiempo de envejecimiento o curado de una mezcla asfáltica, influye directamente en el desempeño de esta (Corona Ballesteros P. , 2011).

Pasado el tiempo establecido de 2 horas de envejecimiento a corto plazo, se eleva la temperatura del horno a la temperatura de compactación de 145°C por un tiempo no menos de dos horas junto con los moldes del compactador giratorio SUPERPAVE.

Pasado el tiempo de 2 horas a 145°C se vacía la mezcla dentro de los moldes cilíndricos previamente calentados, en tres partes; acomodando la mezcla con una espátula recta y procurando



Figura 3.10.8 Mezcla asfáltica en moldes dentro del horno para llevar a temperatura de compactación Elaboración propia.

que entre toda la mezcla en el molde para posteriormente realizar la compactación con el compactador giratorio (ver figura 3.10.8).

Mientras la mezcla llegaba a la temperatura de compactación se programó el compactador giratorio para compactar la mezcla (ver figura 3.10.9) y para ello se estableció una altura de 202 mm para un diámetro del molde de 150 mm, con la finalidad de obtener una probeta con un contenido de vacíos de aire determinado en la dosificación del material. Es decir, para aumentar el contenido de vacíos en una probeta se redujo la masa total de la mezcla a compactar.



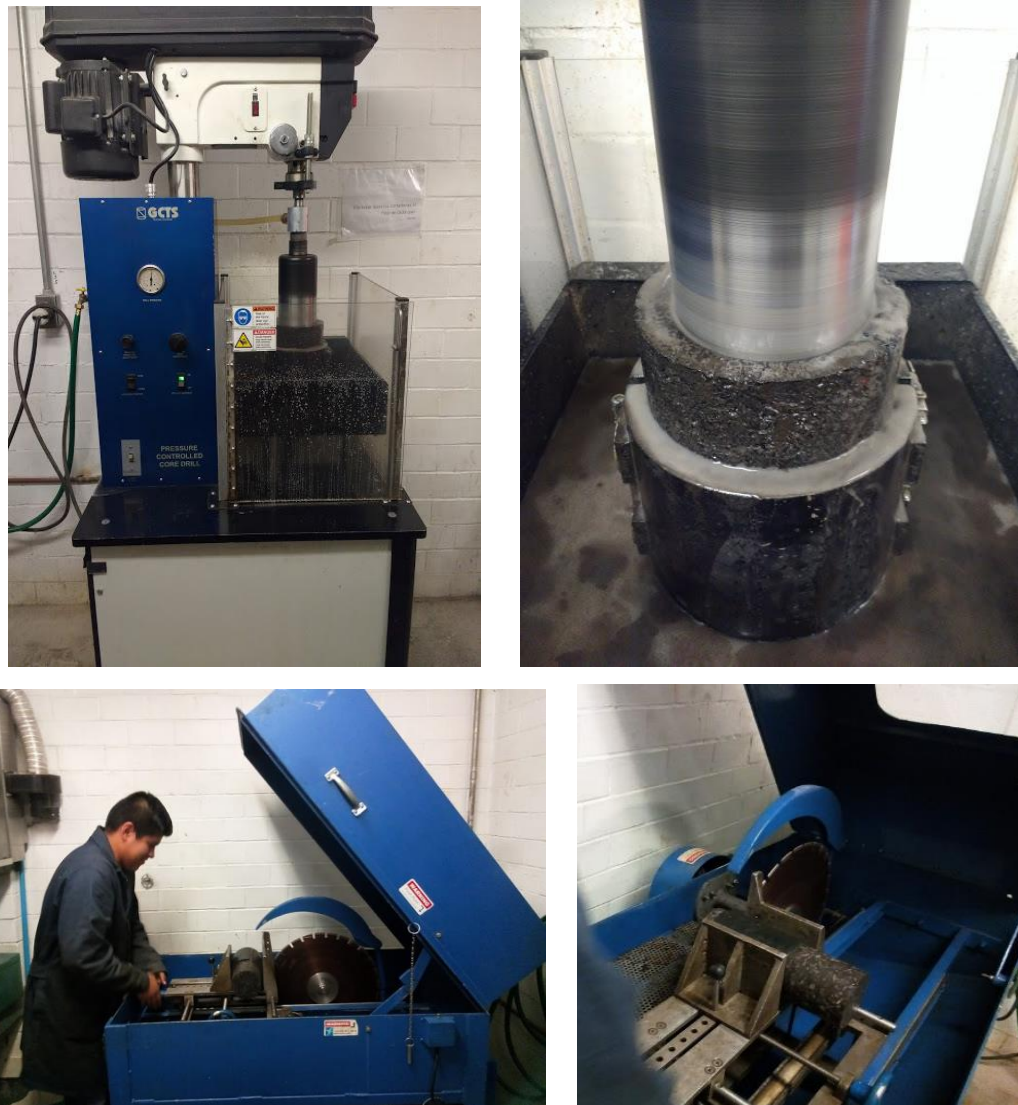
Figura 3.10.9 Programación de compactador giratorio Elaboración propia.

Terminado el proceso de compactación del espécimen se dejó enfriar la probeta dentro del molde durante al menos 2 horas antes de su extracción con la finalidad de evitar que se alterara su compacidad durante este proceso (ver figura 3.10.10).



*Figura 3.10.10 Extracción de probeta de mezcla asfáltica del molde de compactación.
Elaboración propia.*

Finalmente, el espécimen se cortó para extraer un núcleo de 101.6 mm de altura por 101.6 mm de diámetro (ver figura 3.10.11).



*Figura 3.10.11 Extracción de núcleos y corte de núcleos para medidas finales en probetas.
Elaboración propia.*

Una vez cortadas, las probetas se sometieron al método de prueba ASTM D 3203, para obtener el contenido de vacíos de cada una y así clasificar las probetas que no tengan una gran variabilidad en su contenido de vacíos. Este procedimiento consistió en registrar el peso de la probeta seca, el peso de la probeta sumergida en agua, retirar la probeta del agua y finalmente registrar el peso de la probeta superficialmente seca (ver figura 3.10.12).



Figura 3.10.12 Procedimiento de prueba ASTM D3203 para obtención del contenido de vacíos de la mezcla compactada Elaboración propia

Posteriormente se procedió a realizar la prueba de la gravedad específica teórica máxima (Gmm) mediante la norma ASTM D2041 (ver figura 3.10.13) en una muestra de 2500 g de mezcla asfáltica sin compactar.



Figura 3.10.13 Muestra de mezcla asfáltica para obtención de la gravedad específica teórica máxima. Elaboración propia.

La precisión del resultado de esta prueba es importante ya que pequeñas variaciones influyen significativamente en la determinación del contenido de vacíos de la mezcla asfáltica en estado compacto (Gmb). Los resultados de esta prueba se presentan en la tabla 3.9.2

ASTM D2041	
Prueba 1	2.387
Prueba 2	2.357
Prueba 3	2.407
Promedio	2.384

Tabla 3.9.2 Determinación de gravedad específica teórica máxima Gmm

Para fines de este trabajo se hizo variar el contenido de vacíos de aire (V_a) de las probetas de concreto asfáltico hasta obtener 4 grupos de probetas con contenidos de vacíos del 4%, 5%, 6% y 7%. Los valores del contenido de vacíos de aire se estimaron a través de la ec. 3.9.1 donde las

variables de Gmb y Gmm son los valores de la gravedad específica bruta de la mezcla en estado compacto y la gravedad específica teórica máxima respectivamente, ambos obtenidos de acuerdo a la norma ASTM D2726.

$$\% \text{ Vacios de aire} = 100 \left(\frac{\text{gravedad específica bulk}}{\text{gravedad específica teórica máxima}} \right)$$

Ec. 3.9.1. Cálculo de vacíos de aire (AMAAC, 2013).

Posteriormente se obtuvieron los valores de los vacíos de agregado mineral (VAM) y los vacíos llenos con asfalto (VFA), los cuales representan el porcentaje de vacíos VAM que están llenos de asfalto. Los resultados de las propiedades volumétricas y gravimétricas de las probetas elaboradas se presentan en la tabla 3.9.3.

Id de Probeta	Gmb	Gmm*	% Va	%VAM	%VFA
17	2.293	2.384	4	12.2	67.21
18	2.291	2.384	4	12.2	67.21
26	2.291	2.384	4	12.2	67.21
27	2.299	2.384	4	11.9	66.39
3	2.31	2.444	5	13.7	63.50
6	2.33	2.444	5	12.9	61.24
9	2.33	2.444	5	12.9	61.24
19	2.292	2.384	5	12.2	59.02
10	2.297	2.444	6	14.2	57.75
7	2.3	2.444	6	14.1	57.45
15	2.304	2.444	6	13.9	56.83
25	2.265	2.384	6	13.2	54.55
11	2.27	2.444	7	15.2	53.95
14	2.269	2.444	7	15.2	53.95
8	2.275	2.444	7	15.0	53.33
16	2.281	2.444	7	14.8	52.70

* El valor de Gmm = 2.444 en algunas probetas se debe a la variación del agregado proveniente de la misma planta que se utilizó para su elaboración en la fracción de ½"

Tabla 3.9.3 Valores de Gmb, Gmm, %Va, %VAM y % VFA

En la tabla 3.10.1 se presentan las características de las probetas a ensayar, las cuales se clasificaron en 4 grupos con diferente contenido de vacíos.

4% VA		
Probetas	% VA	Tipo
17	3.7	Seca
18	4.3	Seca
26	3.8	Expuesta al agua
27	3.6	Expuesta al agua

6% VA		
Probetas	% VA	Tipo
7	5.6	Seca
15	5.8	Seca
25	5.7	Expuesta al agua
10	5.9	Expuesta al agua

5% VA		
Probetas	% VA	Tipo
6	4.8	Seca
19	4.5	Seca
3	5.2	Expuesta al agua
9	4.8	Expuesta al agua

7% VA		
Probetas	% VA	Tipo
11	6.8	Seca
16	6.9	Seca
14	6.8	Expuesta al agua
8	7.1	Expuesta al agua

Tabla. 3.10.1 Contenido de vacíos de las probetas separadas en 4 grupos de vacíos.

Medido el contenido de vacíos en las probetas se procedió a separarlas en dos grupos: el grupo seco y el grupo húmedo (ver figura 3.10.13).



Figura 3.10.14 Probetas divididas en dos grupos (secas y humedo) para prueba ASTM D1075

Elaboración propia.

Las probetas del grupo seco se acondicionaron a una temperatura de 25°C por 4 horas, previo a las pruebas de compresión simple (ver figura 3.10.14) mientras que las probetas del grupo húmedo se sumergieron completamente en agua por al menos 24 hrs, a una temperatura constante de 60°C. Para finalizar con este acondicionamiento se sumergieron en agua a 25°C por al menos 2 horas para que los especímenes estuvieran a la temperatura de la prueba (ver figura 3.10.15).



Figura 3.10.15. Acondicionamiento de probetas que se mantendrán secas a 25°C
Elaboración propia.



Figura 3.10.16 Acondicionamiento de probetas sumergidas en agua a 60°C (Fotos 1 y 2) y probetas sumergidas en agua a 25°C previo a la prueba de resistencia.

Elaboración propia.

Capítulo 4. Pruebas a compresión simple

4.1 Ejecución de las pruebas

Los dos grupos de especímenes, después de acondicionarlos de acuerdo a la norma ASTM D1075, se sometieron a la prueba de compresión simple para verificar la resistencia de las probetas. Se cuidó la velocidad de carga de 1.3mm/min por cada 25mm de la probeta y que la temperatura de las probetas fuera de 25°C al momento de la prueba (ver figura 4.1.1).



Figura 4.1.1 Colocación, ejecución y finalización de la prueba a compresión simple en probetas de mezcla asfáltica. Elaboración propia

4.2 Resultados y análisis de resultados

Durante la prueba de compresión simple se obtuvieron los registros de las cargas aplicadas en kilogramos y el desplazamiento en milímetros de cada probeta, los cuales fueron procesados para obtener curvas de esfuerzo - deformación unitaria mostradas en las figuras 4.2.1 a 4.2.4.

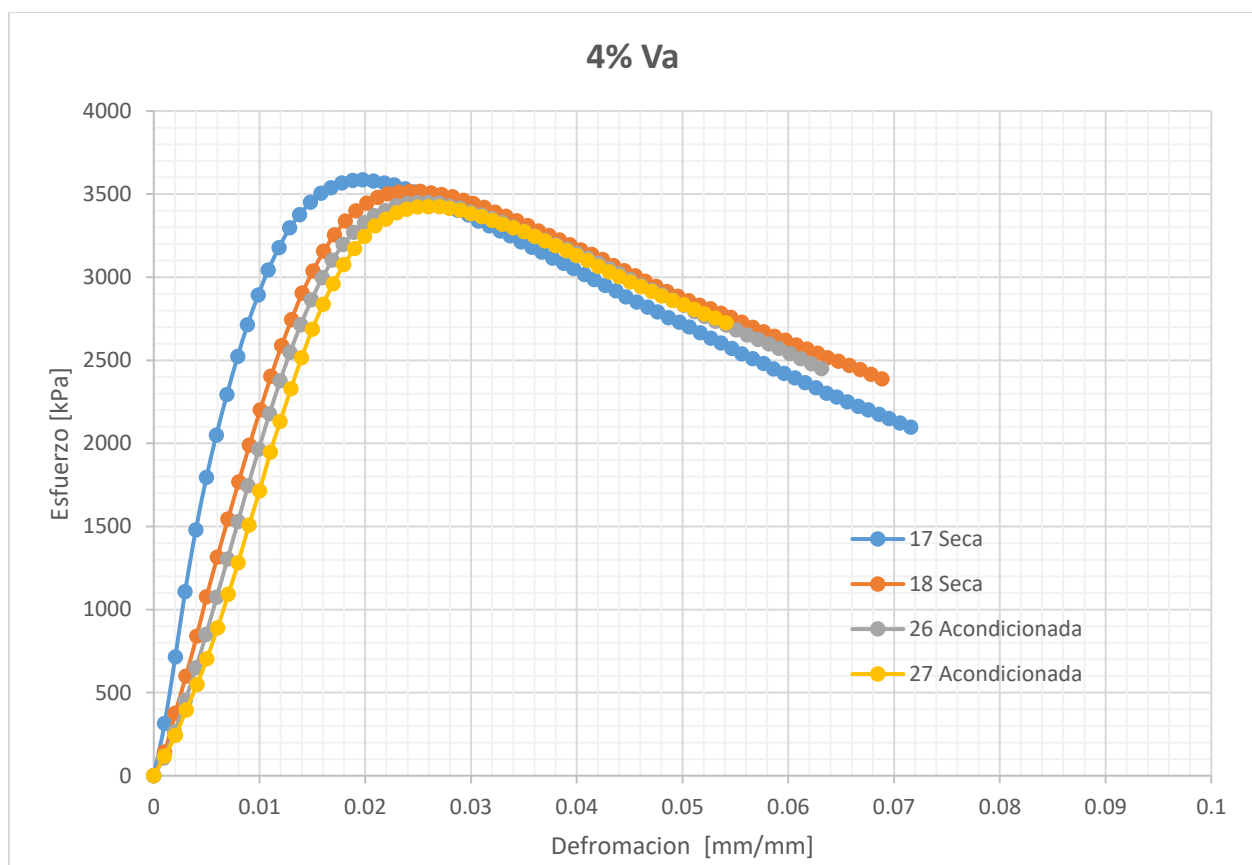


Figura 4.2.1 Gráfica del grupo de probetas de 4% de Vacíos de aire

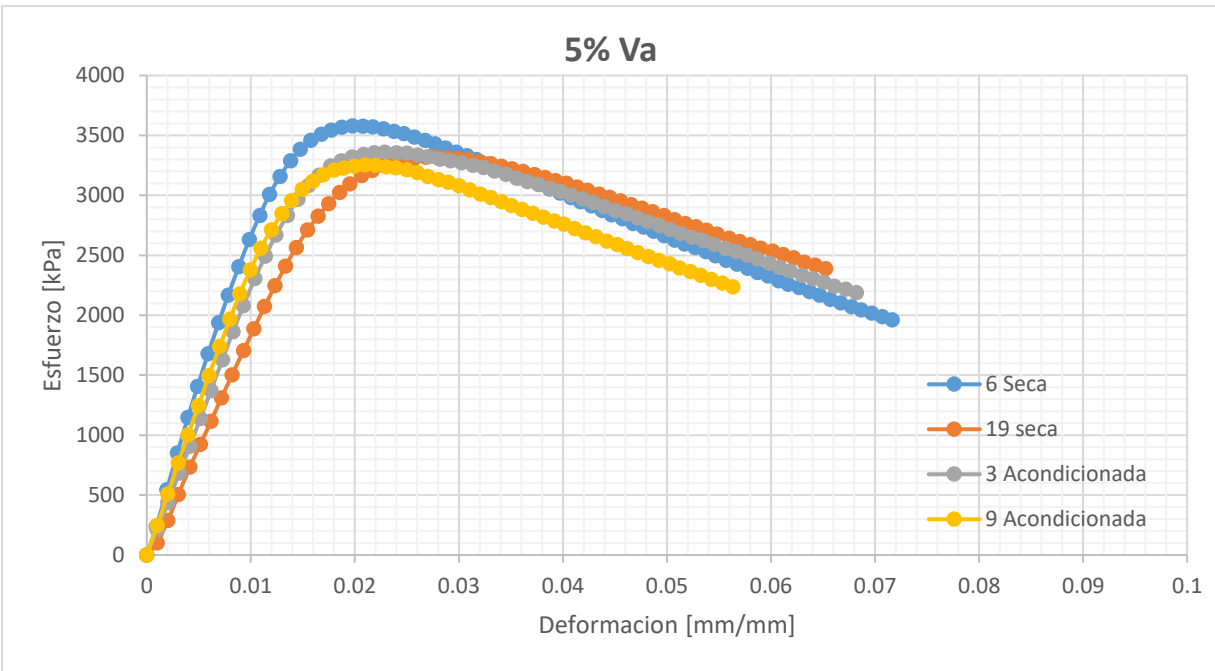


Figura 4.2.2 Gráfica del grupo de probetas de 5% de Vacíos de aire

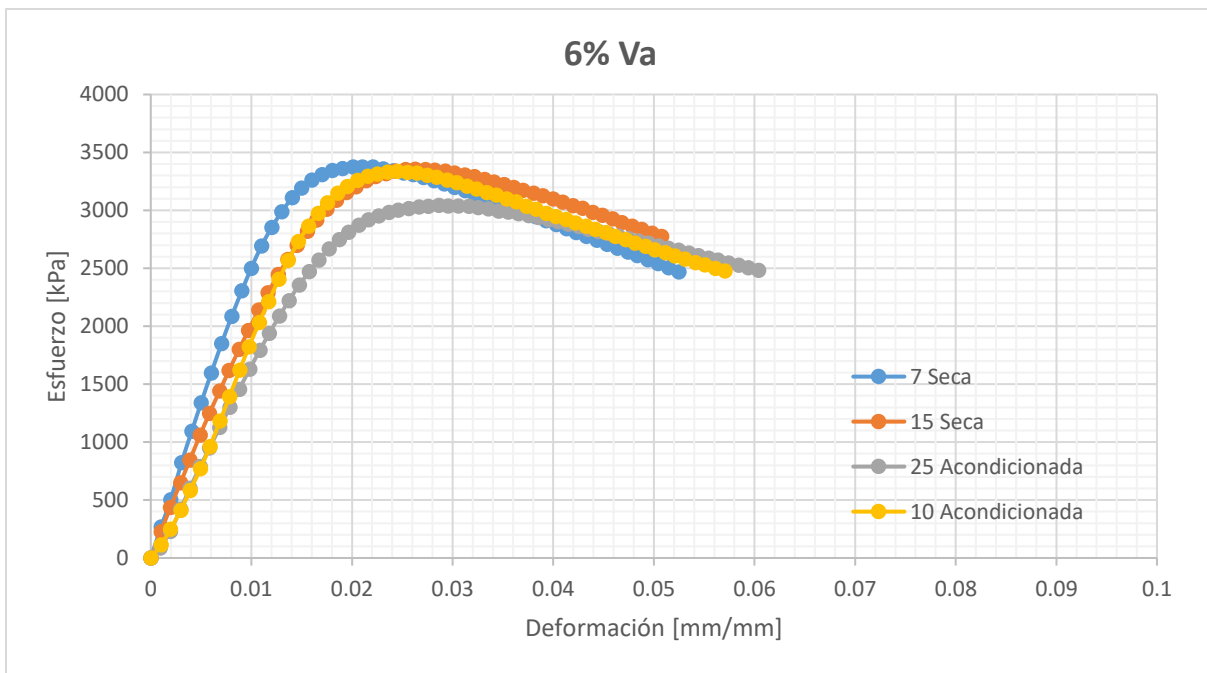


Figura 4.2.3 Gráfica del grupo de probetas de 6% de Vacíos de aire

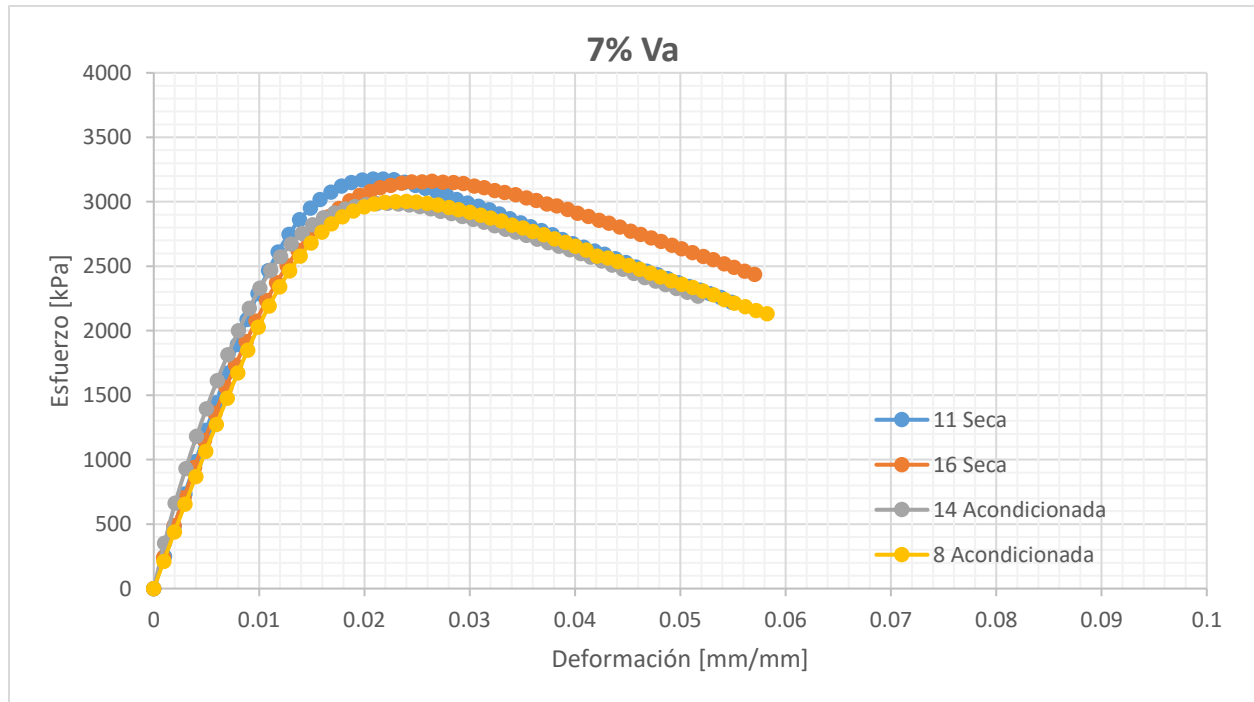


Figura 4.2.4 Gráfica del grupo de probetas de 7% de Vacíos de aire

Para el cálculo de los esfuerzos de cada probeta se tomó en cuenta el cambio de área en la sección transversal que ocurre en la probeta en la medida se deforma, con la ayuda de la ec 4.2.1:

Ec 4.2.1 Formula para la correccion del area por abarrilamiento de probetas

$$\text{Corrección de area} = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 * \left(\frac{h_i}{h_f}\right)$$

Donde:

D es el diametro de la probeta

h_i es la altura inicial de la probeta

h_f es la altura final de la probeta

En las figuras 4.2.1 a 4.2.4 se observa que las probetas secas en los 4 grupos resistieron más que las sometidas al acondicionamiento en agua, por esto se dice que hay un daño por efecto del agua. En la tabla 4.2.1 se presenta la resistencia a la compresión simple de cada una de las probetas evaluadas definida como el valor pico de las curvas esfuerzo-deformación, así como el promedio de cada grupo seco y acondicionado en agua. Se incluye en esta tabla el índice de resistencia retenida IRS (Index of Retained Strength) calculado mediante la ecuación 4.2.2, el cual expresa la pérdida de resistencia a la compresión simple que sufre el material debido a la presencia del agua y es un indicador del daño que sufre la mezcla asfáltica por humedad.

$$IRS \% = \frac{\text{Resistencia a la compresión simple en probetas acondicionadas}}{\text{Resistencia a la compresión simple en probetas secas}}$$

Ec 4.2.2 índice de resistencia retenida

Id de Probeta	% Va promedio	Estado	Esfuerzo Máximo (kPa)	Promedios	Índice de resistencia retenida %
17	4	Seca	3,585.767	3550.70	96.77%
18		Seca	3,515.626		
26		Acondicionada	3,448.763	3436.09	
27		Acondicionada	3,423.412		
6	5	Seca	3,579.227	3450.77	95.87%
19		Seca	3,322.323		
3		Acondicionada	3,255.338	3308.16	
9		Acondicionada	3,360.984		
7	6	Seca	3,375.307	3366.21	94.81%
15		Seca	3,357.120		
10		Acondicionada	3,337.481	3191.34	
25		Acondicionada	3,045.200		
11	7	Seca	3,177.307	3168.43	94.56%
16		Seca	3,159.545		
8		Acondicionada	3,004.669	2996.16	
14		Acondicionada	2,987.651		

Tabla 4.2.1 Resultados de pruebas de compresión simple en probetas secas y húmedas

Los resultados presentados en las figuras 4.2.1 a 4.2.4 y tabla 4.2.2 muestran que existe una pérdida resistencia a la compresión simple de los especímenes acondicionados. Si bien esta pérdida es menor al 5% tiende a crecer en la medida que aumentan los vacíos de aire de las probetas (ver figura 4.2.5).

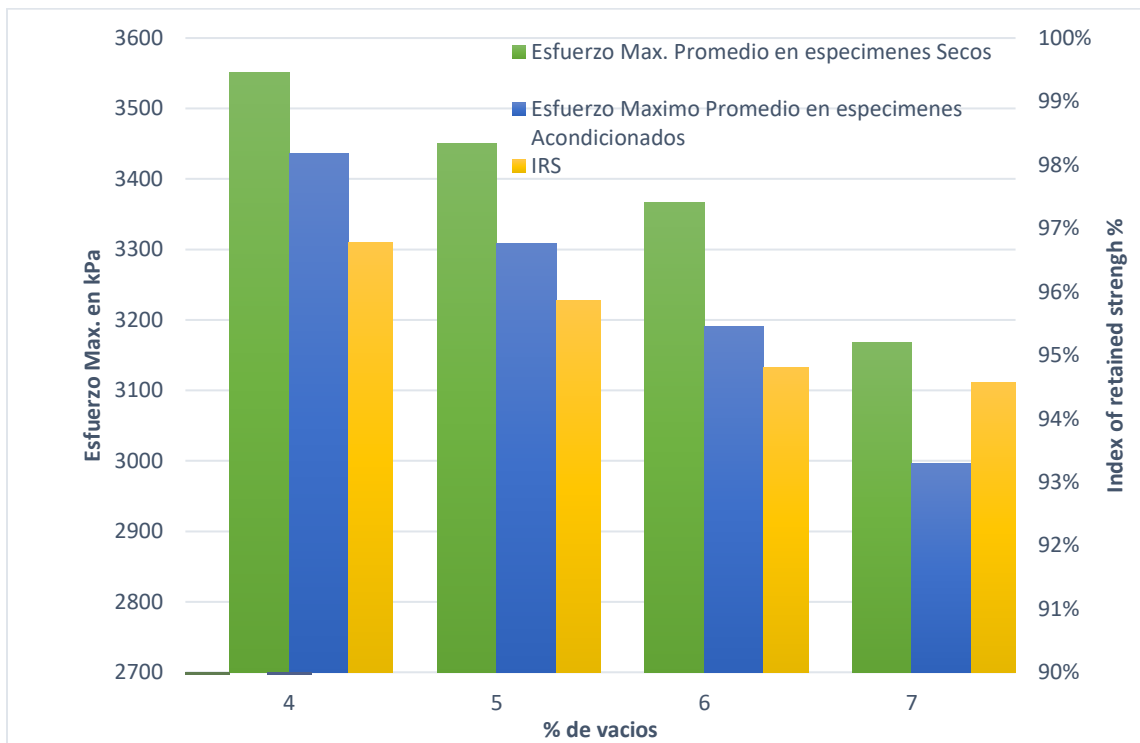


Figura 4.2.5 Gráfica del Índice de Retención de os especímenes y las cargas máximas de cada grupo.

Ahora bien, en la tesis del Ing. Manuel Gómez Ángeles con el título “Evaluación del daño por humedad de concretos asfálticos con diferentes contenidos de vacíos de aire mediante pruebas de tensión indirecta” (Gómez Angeles, 2019), se realizó la prueba de tensión indirecta en la misma mezcla asfáltica y se dividió en los mismos grupos de vacíos, siguiendo la forma tradicional para evaluar la susceptibilidad a la humedad, haciendo uso de la norma AASTHO T283. Gracias a esta tesis podemos comparar los resultados IRS y TSR.

Los resultados obtenidos y presentados en la tabla 4.4 de la Tesis de Manuel Gómez Ángeles se presenta a modo de resumen los resultados de la prueba AASTHO T283 (ver tabla 4.2.3).

Tabla 4.4 Susceptibilidad a la humedad TSR

No. Espécimen	% Va	Estado	RTI Promedio (kPa)	TSR (%)
12	4	No Acondicionado	888.412	89.4%
15		Acondicionado	794.417	
21				
31				
20	5	No Acondicionado	750.175	88.5%
28		Acondicionado	663.799	
35				
17				
22	6	No Acondicionado	747.855	81.9%
29		Acondicionado	612.163	
19				
16				
23	7	No Acondicionado	598.305	79.5%
32		Acondicionado	475.740	
10				
33				

Tabla 4.2.3 Tabla de TSR
(Gómez Angeles, 2019)

Finalmente, en la tabla 4.2.4 y figura 4.2.7 se presentan los resultados de pruebas de pérdida de resistencia debido al daño por humedad en las mezclas asfálticas evaluadas a través de pruebas de tensión indirecta (ASTHO T283) y pruebas de compresión simple (ASTM D1074 y ASTM D1075). Al comparar los resultados de ambas pruebas se puede notar una misma tendencia de pérdida de resistencia en la medida que varían los vacíos de aire, por lo tanto ambas pruebas son válidas para conocer la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas. Sin embargo,

esta pérdida es más notoria en las pruebas de tensión indirecta lo cual puede obedecer a la forma en que se acondiciona el grupo húmedo.

%Va	TSR %	ISR %
4	89.4	96.77
5	88.5	95.87
6	81.9	94.81
7	79.5	94.56

Tabla 4.2.4 Tabla de comparación de TSR e ISR de acuerdo al % Va

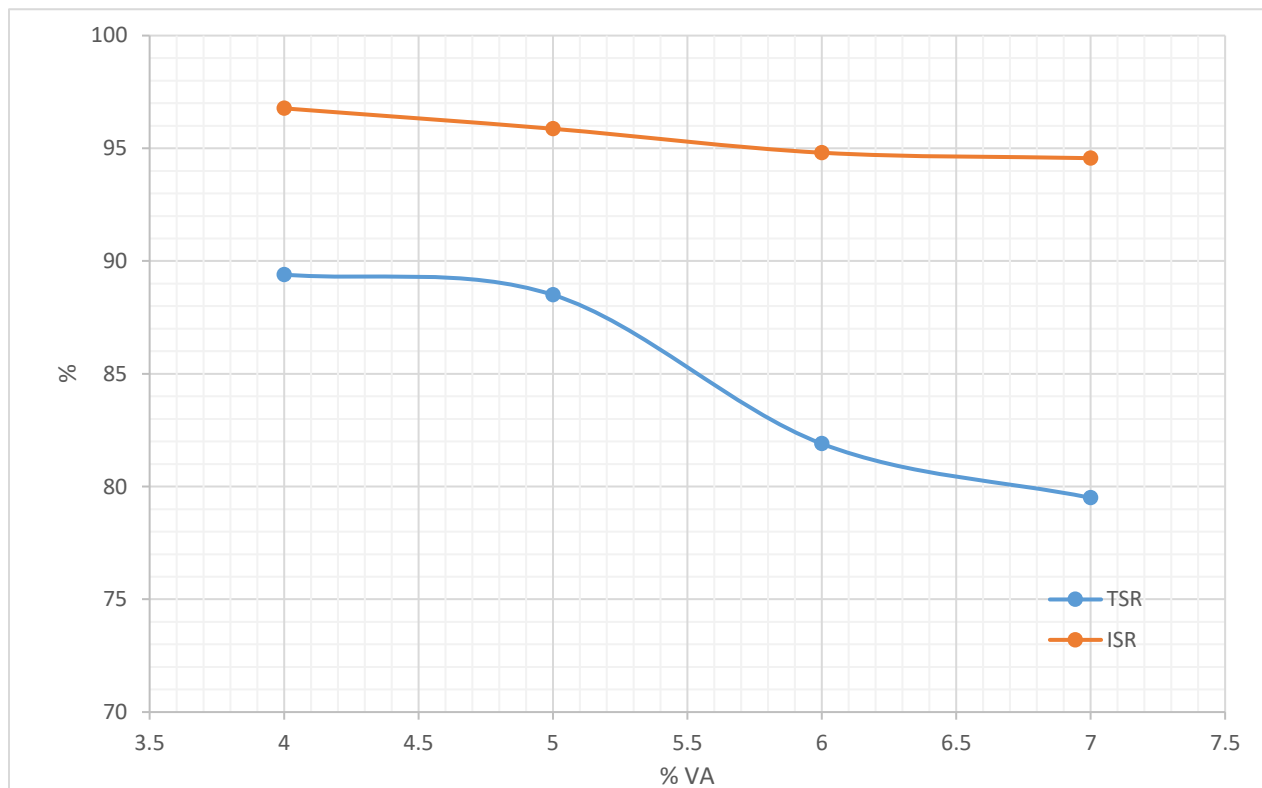


Figura 4.2.7 Gráfica de comparación del TSR y el ISR

Capítulo 5. Comentarios y conclusiones

En la actualidad, México tiene una red carretera nacional de 335,000 kilómetros de los cuales alrededor de 110,000 kilómetros se encuentran pavimentados. Estos kilómetros pavimentados “...deberán de reforzarse y ampliarse para dar cabida a volúmenes mayores de tránsito... adecuar los procedimientos de diseño, construcción y control de calidad.” (Zárate Aquino I. , 2015).

En la cita anterior, Zárate hace un llamado a los ingenieros civiles a seguir con la investigación sobre las mezclas asfálticas para mejorar todos los procesos involucrados en la pavimentación de caminos. Por esto, en este trabajo se hace un análisis de la evaluación del daño por humedad mediante pruebas de compresión siguiendo el procedimiento definido en la norma ASTM D1075 y sus resultados se comparan con los obtenidos con la prueba AASTHO T283 en una investigación previa. Lo anterior, para entender la diferencia entre las dos pruebas y comprender cómo funciona el daño producido por la humedad en concretos asfálticos elaborados con diferentes contenidos de vacíos de aire y contribuir al estado del arte del fenómeno de daño por humedad en capas asfálticas de pavimentos flexibles.

La prueba AASTHO T283 somete a las probetas de concreto asfáltico a condiciones de tensión indirecta mientras que la prueba definida por la norma ASTM D1075 somete a este mismo material a condiciones de compresión simple. La condición de tensión indirecta tiene el propósito de reproducir el estado de tensión crítica para una mezcla bituminosa en el límite inferior de una capa asfáltica (sea capeta o base), provocando un esfuerzo de tensión uniforme en el diámetro del plano de carga vertical agotando la resistencia de la probeta y desencadenando la rotura en el plano diametral de la probeta; sin embargo, esta prueba no es representativa del paso de un vehículo sobre la capa asfáltica. Por otra parte, la compresión axial somete la probeta a una carga aplicada en una de las caras circulares del cilindro hasta que la probeta muestra fisuras verticales que evidencian la existencia de diferentes planos de tensiones perpendiculares a la dirección de

compresión durante el ensayo, causando una probeta “abarrilada”, por lo tanto los esfuerzos generados en las probetas son diferentes por el modo de falla de cada prueba.

De la comparación hecha se concluye que cada método para evaluar el daño por humedad en concretos asfálticos acondiciona la probeta de manera diferente, siendo el método de prueba de la norma AASTHO T283 el más drástico porque perjudica más la resistencia de la mezcla compactada ya que la probeta se acondiciona a una saturación parcial mediante vacío y un ciclo de congelación y descongelación que induce la presencia forzada del agua en los vacíos de aire y la expansión del agua por efecto de la congelación, agravando el daño en la mezcla asfáltica compactada.

Por el contrario, el daño por humedad que el método de prueba definido por la norma ASTM D1075 induce es menor, debido a que la mezcla compactada evita el ciclo de congelación, y sólo considera el acondicionamiento por inmersión en el agua a temperatura de 60 ° C, por un periodo de 24 hrs, atenuando así el daño producido por el agua.

Si bien los resultados de las pruebas ejecutadas mediante la norma AASHTO T283 O ASTM D1075 varían entre sí por las diferentes formas de acondicionar las probetas húmedas y por el modo de falla; en ambos casos demuestran cualitativamente que el daño en las probetas por efecto de la presencia de agua en su interior va en aumento a medida que aumenta el contenido de vacíos de aire. Sin embargo, cuantitativamente en la prueba AASTHO T283 las probetas tienen una pérdida mayor en la resistencia.

El aumento de la pérdida en la resistencia al daño por humedad en la medida que aumenta el contenido de vacíos de aire, es un aspecto que debe tomarse en cuenta al momento de tender una carpeta asfáltica en el campo. Este fenómeno se explica ya que en la medida que aumentan los vacíos de aire el concreto asfáltico es más permeable y por lo tanto se favorece el ingreso del agua al interior del material, permitiendo el debilitamiento en la unión asfalto- agregado y la oxidación

del asfalto, lo que a vez conduce a cambios en sus propiedades mecánicas. En la práctica el contenido de vacíos recomendable de la carpeta densa terminada es del orden de 6 – 8% (Aguilar Moya, 2014) previo a la apertura del tránsito vehicular porque se piensa que gradualmente con el paso de los vehículos se irán reduciendo el vacío entre las partículas durante su vida útil hasta llegar al contenido de vacíos de diseño que es de 4%. Sin embargo, se ha notado que en algunos casos los vacíos de aire no se reducen rápidamente con la apertura del tráfico, por lo tanto, los pavimentos operan con vacíos mayores a los proyectados y de esta manera su resistencia a la fatiga, deformación permanente y daño por humedad difiere de la concebida en el diseño y la vida útil de estos pavimentos decae drásticamente.

La mayoría de las agencias estatales en el mundo han establecido el uso de norma AASTHO T283 para el control de la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas. Así mismo han establecido que el valor de TSR no sea menos al 80 % y en algunos casos al 75%, es decir que la mezcla tenga una pérdida de resistencia del 20 % o 35% respectivamente.

Es importante mencionar que la norma ASTM D1075 desde su publicación en el año 1996 ha sido complicada de implementar ante la dificultad de compactar probetas con la geometría que necesita mediante métodos de amasado, no obstante, en la actualidad con la aparición del compactador giratorio con capacidad de fabricación de probetas de alturas hasta de 18 cm logró que la norma se reaprobará en el año 2005. Sin embargo, siendo su última publicación en el año 2011, fue retirada en agosto de 2019 sin reemplazo debido a que el comité de la ASTM dictaminó que la norma tiene un uso limitado por la industria.

Capítulo 6. Referencias

- Aguilar Moya, J. P. (2014). Caracterización del daño por humedad en mezclas asfálticas. *Construyendo Caminos*, 54-56.
- AMAAC. (2010). *Recomendación AMAAC RA 04/2010 Resistencia de las mezclas asfálticas compactadas al daño inducido por humedad*. México: AMAAC.
- AMAAC. (2013). *Protocolo AMAAC PA-MA01/2013 Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño*. México: AMAAC.
- AMAAC. (2015). Guía de estudio para examen de diseño de mezclas asfálticas. Mexico.
- AMAAC. (Julio de 2016). Introducción al diseño de mezclas. Queretaro, México.
- Asphalt Institute. (1996). *Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de SUPERPAVE*. (S. Angelone, F. Martínez, & H. Osio, Trans.) Argentina: Instituto Panamericano de Carreteras.
- ASTM C1252. (1998). Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading). West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org
- ASTM C127. (2001). Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org
- ASTM C128. (2001). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org

ASTM C131. (2003). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org

ASTM C88. (1999). Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org

ASTM D1074. (2017). Standard Test Method for Compressive Strength of Asphalt Mixtures. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org

ASTM D1075. (2011). Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures. West Conshohocken, PA., PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org

ASTM D2041. (2003). Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org

ASTM D2419. (2002). Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org

ASTM D2726. (2005). Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org

- ASTM D3203. (2000). Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org
- ASTM D36. (2000). Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org
- ASTM D4791. (s.f.). Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org
- ASTM D5. (1997). Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org
- ASTM D5821. (2001). Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org
- ASTM D6373. (1999). Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org
- ASTM D92. (s.f.). Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de www.astm.org
- Ávila Vázquez, E., Reyes Coria, C., & Serrano, E. (2018). Compactación de las mezclas asfálticas en caliente. *Asfáltica*, 26-32.

Bañón Blázquez, L. (1999). *Manual de Carreteras*. Alicante, España.: Universidad de Alicante Escuela Politécnica Superior.

Controls Group. (25 de 04 de 2019). *Fully electro-mechanical gyratory compactor GALILEO*. Obtenido de https://www.controls-group.com/spa/asfaltomezcla-bituminosa-testing-equipment/fully-electro_mechanical-gyratory-compactor-galileo_.php

Corona Ballesteros, I. (2011). *Modulos de resiliencia máximos del concreto asfáltico para el diseño del pavimento, dependientes de la temperatura de mezclado óptima. Segunda parte*. Mazatlán, Sin.

Corona Ballesteros, P. (2011). Módulos de resiliencia máximo del concreto asfaáltico para el diseño del pavimento, dependientes de la temperatura de mezclado óptima, segunda parte". *Septimo congreso mexicano del asfalto* (pág. 11). Mazatlán, Sin.: AMAAC.

Garnica Anguas, P., Gómez López , J. A., & Delgado Alamilla, H. (2003). Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio. San Fandila , Queretaro, México .

Gaxiola Hernández, A. (2017). *Efecto del agua en ls propiedades mecánicas del concreto asfáltico usado en presas*. Ciudad de México: UNAM.

Gómez Angeles, M. (2019). *Evaluación del daño por humedad de concretos asfálticos con diferentes contenidos de vacíos de aire mediante pruebas de tensión indirecta* . Ciudad de México.

Graciano Robles, L. (15 de Septiembre de 2016). *Youtube*. Obtenido de Trituracion de Roca: <https://www.youtube.com/watch?v=41d0vUq1O4I>

-
- Little , D., & Jones IV, D. (2003). Chemical and Mechanical Processes of Moisture Damage in. En *Moisture Sensitivity* (págs. 37-67). San Diego, California: Transportation Research Board of the National Academies.
- Maldonado Q., Y. A. (25 de 04 de 2019). *Geologia Ramas y Aplicaciones*. Obtenido de Rocas sedimentarias: <https://geologiaweb.com/rocas-sedimentarias/>
- Martinez, R. (2018 de Mayo de 2014). Obtenido de Tipos de Fallas en Pavimento Flexible: [:http://fallasenpavimentoflexible.blogspot.com/2014/05/tipos-de-fallas-en-pavimento-flexible.html](http://fallasenpavimentoflexible.blogspot.com/2014/05/tipos-de-fallas-en-pavimento-flexible.html)
- National Center for Asphalt Technology. (25 de 04 de 2019). *Asphalt Binder Technician*. Obtenido de <https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/education/training/industry/asphalt-binder-technician.html>
- Rangel Galicia, D. (2015). *Determinación de la resistencia a la tensión indirecta del concreto asfáltico variando la granulometría y el contenido del ligante*. México, D.F.: UNAM.
- Reyes, F. A., Daza, C. E., & Rondón , H. A. (Julio de 2012). *Redalyc*. Obtenido de Determinacion de las fracciones SARA de asfaltos colombianos envejecidos al medio ambiente empenado cromatografia liquida en columna: <https://www.redalyc.org/pdf/1492/149224285004.pdf>
- S. Caro, E. M. (2008). Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1:mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering*, 81-98. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1080/10298430701792128>

Sandoval Navarro, I. (2013). *AMAAC*. Obtenido de EVOLUCIÓN DEL GRADO PG EN LA CARACTERIZACIÓN DE ASFALTOS: http://www.amaac.org.mx/archivos/eventos/8cma_2013/asfaltos01.pdf

SCT. (16 de Diciembre de 2008). *Calidad de Materiales Asfálticos Grado PG*. México.

Serrano, C., & Bianchini, A. (03 de Junio de 2015). *Interempresas Media, S.L.U. - Grupo Nova Àgora*. Obtenido de Refuerzo de asfalto mediante geomallas para alargar la vida útil de las carreteras: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/138111-Refuerzo-de-asfalto-mediante-geomallas-para-alargar-la-vida-util-de-las-carreteras.html>

Solaimanian, M., Harvey, J., Tahmoressi, M., & Tandon, V. (2003). Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt. En C. o.-A. Requirements (Ed.), *Moisture Sensitivity* (págs. 77-105). San Diego, California: Transportation Research Board of the National Academies.

Trujillo Valladolid, M. (2017). *Evaluacion del comportamiento mecánico de pavimentos fotocatalíticos*. México: UNAM.

UTEST. (25 de 04 de 2019). *Compactadora Automatica Marshall con pedestal de madera, ASTM*. Obtenido de <http://www.utest.com.tr/es/26048/Compactadora-Autom-tica-Marshall-con-Pedestal-de-Madera-ASTM>

WISE. (2018). *Asfaltos, Pavimentos y Triturados*. Obtenido de <https://www.wise.com.mx/services.php?service=paa>

Zárate Aquino, I. (2015). *Diseño de pavimentos flexibles*. México: Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.

Zárate Aquino, M. (2011). *Diseño de pavimentos flexibles. Segunda parte*. México D.F.: Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.