



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TÍTULO:

**ESTADO DEL ARTE EN EL ESTUDIO DE LA ADHERENCIA ENTRE EL
ASFALTO Y EL AGREGADO MINERAL**

AUTOR:

González Larrea, Sebastián

**Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Vila Romaní, Rolando

**Guayaquil, Ecuador
2015**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **Sebastián González Larrea**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

Ing. Vila Romaní, Rolando

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther

Guayaquil, a los 28 días del mes de septiembre del año 2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Sebastián González Larrea**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **Estado del Arte en el Estudio de la Adherencia entre el Asfalto y el Agregado Mineral** previa a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 28 días del mes de septiembre del año 2015

EL AUTOR

Sebastián González Larrea



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

AUTORIZACIÓN

Yo, **Sebastián González Larrea**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Estado del Arte en el Estudio de la Adherencia entre el Asfalto y el Agregado Mineral**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 28 días del mes de septiembre del año 2015

EL AUTOR:

Sebastián González Larrea

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis papas por su esfuerzo para darme una buena educación y por su apoyo incondicional. A mi tutor por su paciencia y su ayuda para poder realizar este trabajo. A mis amigos, porque sin su apoyo y compañía no estaría hasta donde he llegado. A la universidad Católica por haberme dado la formación para poder desenvolverme en el ámbito profesional de manera eficaz y honesta.

DEDICATORIA

A mi familia y amigos

Sebastián González Larrea

ÍNDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1- ANTECEDENTES	1
1.2- OBJETIVO.....	1
1.3- CRITERIOS GENERALES	2
1.4- ALCANCE	3
CAPÍTULO2. ADHERENCIA AGREGADO-ASFALTO.....	4
2.1- GENERALIDADES Y CONCEPTOS	4
2.2- MECANISMOS INVOLUCRADOS EN LA ADHERENCIA AGREGADO-LIGANTE ASFÁLTICO.....	6
2.3- INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO EN LA ADHERENCIA	7
Características del Ligante Asfaltico	7
Composición química	8
Tensión superficial	10
Envoltura y cubrimiento.....	10
Viscosidad.....	11
2.4- INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO MINERAL EN LA ADHERENCIA.....	11
Mineralogía.....	12
Rugosidad superficial	13
Porosidad	13
2.5- PRUEBAS PARA EL CONTROL DE LA ADHERENCIA ENTRE ASFALTOS Y AGREGADOS MINERALES.....	14
2.5.1- Ensayo PATTI (Pull Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers)	14
2.5.2-Prueba de Resistencia Adhesiva del Ligante (Bitumen Bond Strength Test “BBS”)	15
2.5.3-Ensayo DSR Modificado (Modified DSR strain sweep test)	19
2.5.4-Ensayo de pelado (Peeling Test)	20
2.5.5- Otras pruebas para el control de la adherencia	23
2.5.5.1- Ensayos de corte.....	23
2.5.5.2-Ensayo de Torque	31
CAPÍTULO 3. DAÑO POR HUMEDAD EN LA ADHERENCIA AGREGADO-ASFALTO.....	32
3.1- GENERALIDADES Y CONCEPTOS.....	32

3.2- MECANISMOS DE DESTRUCCIÓN (PARA EL <i>STRIPPING</i> O DESVESTIMIENTO).....	34
Desprendimiento	34
Desplazamiento.....	34
Emulsificación espontanea.....	35
Presión de poros	36
Abrasión Hidráulica	36
3.3- PRUEBAS PARA EL CONTROL DEL EFECTO DE LA HUMEDAD .	37
3.3.1- Ensayos a mezclas sueltas	37
3.3.1.1- Inmersión Estática.....	37
3.3.1.2- Ensayo de agua hirviendo de Texas (Texas Boiling Test) ...	43
3.3.1.3- Efecto del agua sobre mezclas asfálticas usando agua hirviendo.....	47
3.3.1.4- Ensayo de Adsorción Neta (SHRP A 341)	48
3.3.1.5- Ensayo de Botella Rotatoria.....	50
3.3.1.6- Método de Riedel-Weber (adhesividad de los ligantes Bituminosos a los agregados finos).....	51
3.3.1.7- Ensayo de Inmersión Total en Agua	56
3.3.1.8- Resistencia al desprendimiento del asfalto de los materiales pétreos en las mezclas asfálticas por acción del agua.....	57
3.3.2- Ensayos a mezclas compactadas	59
3.3.2.1- Ensayo Lottman	59
3.3.2.2- Ensayo Tunncliff – Root (ASTM D 4867).....	60
3.3.2.3- Ensayo Lottman Modificado (AASHTO T 283).....	64
3.3.2.4- Ensayo de inmersión – Compresión.....	65
3.3.2.5- Ensayo de pedestal de congelamiento y descongelamiento de Texas (Texas Freeze – Thaw Pedestal Test).....	73
3.3.2.6- Ensayo de Cántabro retenido.....	75
3.3.2.7- Ensayo de estabilidad Marshall.....	76
3.3.2.8- Ensayo del sistema de condicionamiento ambiental (Environmental Conditioning System, ECS,).....	78
3.3.2.9- Rueda cargada de Hamburgo	94
CAPITULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	97
4.1- CONCLUSIONES.....	97
4.2- RECOMENDACIONES	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

RESUMEN

La adherencia entre el agregado mineral y el ligante asfáltico es un tema que incide en la durabilidad de las mezclas asfálticas, siendo este uno de los problemas más importantes en la vialidad del Ecuador.

Precisamente, el objetivo de este trabajo es recopilar y analizar la información actualizada de manera organizada sobre la adherencia entre el agregado mineral y el asfalto formando parte de una mezcla asfáltica, que permita hacer precisiones sobre el efecto de los factores involucrados y los diferentes métodos de pruebas para su evaluación, destacando la incidencia del agua, para mejorar el control de este fenómeno en la mezcla.

Se considera que en el país, a pesar de realizarse usualmente la prueba de agua hirviendo para la evaluación del daño en agua (ASTM D 3625) y en menor medida la prueba de resistencia retenida por tracción indirecta (ASTM D 4867), la incidencia de la humedad en la poca durabilidad de nuestras capas asfálticas es notoria, lo que nos alerta sobre la necesidad de mejorar o ampliar los criterios de control.

Por otra parte, el papel de los dos componentes involucrados en el fenómeno de adherencia estudiado: asfalto y agregado, también vale la pena estudiarlos en su interacción más simple, o sea, sin considerar el efecto del agua. Esta afirmación se basa en la gran diversidad de fuentes de aprovisionamiento para la obtención de agregados minerales existente en el país, así como la necesidad de investigar el comportamiento de la adherencia del asfalto de la refinería de Esmeraldas respecto a agregados de diferentes composiciones y su comparación con el comportamiento de asfaltos de distintas procedencias.

PALABRAS CLAVES

Adherencia, daño en agua, asfaltos, agregados minerales, mezclas asfálticas, estado del arte.

ABSTRACT

The adhesion between the mineral aggregate and asphalt binder is an issue that affects the durability of asphalt mixtures, this being one of the most important problems in the roads of Ecuador.

The precise purpose of this work is to collect and analyze updated information in an organized manner on the adhesion between the mineral aggregate and asphalt as part of an asphalt mix that allows for clarification of the effect of the factors involved and the different methods tests, highlighting the impact of water, to improve control of this property in the mixture.

It is considered that in the country, although usually done the test of boiling water for the assessment of damages of water (ASTM D 3625) and less resistance test held by indirect tensile strength (ASTM D 4867), the incidence of moisture in the poor durability of our asphalt layers is notorious, which alerts us to the need to improve or expand the control criteria.

Moreover, the role of the two components in the adhesion phenomenon studied: asphalt and aggregate, is also worth studying in its simplest interaction, that is, without considering the effect of water. This statement is based on the diversity of supply sources for obtaining mineral aggregates existing in the country, as well as the need to investigate the behavior of the adhesion of asphalt refinery of Esmeraldas respect to aggregates of different compositions and their comparison the behavior of asphalt from various sources.

KEYWORDS

Adhesion, water damage, asphalt, mineral aggregates, asphalt mixtures, state of the art.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1- ANTECEDENTES

La adherencia entre el agregado mineral y el ligante asfáltico es un tema que incide en la durabilidad de las mezclas asfálticas, siendo este uno de los problemas más importantes en la vialidad del Ecuador.

La falta de adherencia entre el árido y el ligante asfáltico ha sido tema de numerosos análisis tendientes a solucionar o disminuir los deterioros originados en los pavimentos como consecuencia de este fenómeno. La misma genera la formación de desprendimientos, los cuales afectan negativamente a la estructura, ya sea a nivel de superficie de rodadura o favoreciendo el ingreso de los agentes agresivos a las carpetas inferiores del paquete estructural.

El tema de la adherencia entre el ligante y el árido es complejo, interviniendo en su estudio un número considerable de variables. La adhesividad se define como la capacidad de un ligante para quedar fijo en el agregado, al que recubre sin peligro de desplazamiento, incluso en presencia de agua, tránsito y cambios bruscos de temperatura.

Al analizar la adherencia agregado – ligante, existen innumerables métodos; en la gran mayoría de ellos la evaluación se efectúa a partir de una valoración visual del desprendimiento también denominado “stripping”. Esta valoración se lleva a cabo luego de poner en contacto a la mezcla asfáltica con agua bajo condiciones y tiempo determinadas conforme a cada uno de los métodos particulares.

1.2- OBJETIVO

Recopilar y analizar información actualizada de manera organizada sobre la adherencia entre el agregado mineral y el asfalto formando parte de una mezcla asfáltica, que permita hacer precisiones sobre el efecto de los

factores involucrados y los diferentes métodos de pruebas para su evaluación, destacando la incidencia del agua, para mejorar el control de este fenómeno en la mezcla.

1.3- CRITERIOS GENERALES

A través del tiempo se han realizado muchas investigaciones sobre la adhesión y los factores y propiedades que afectan su desempeño en el ámbito de pavimentos asfálticos. La adhesión en si es un campo multidisciplinario involucrando tanto a la ingeniería como a la química física y orgánica de los componentes que están involucrados en ese proceso(Pocius, 1997), que son los agregados y el asfalto.

El asfalto es un material de color oscuro con propiedades ligantes y aglutinantes, conformado por una serie de elementos muy complejos en los que predominan los hidrocarburos. Presenta consistencia semisólida a temperatura ambiente pero a mayor temperatura actúa como un líquido (León et al, 2006). En el programa SHRP, se lo define como un sistema coloidal compuesto por grupos polares que se unen entre sí, para formar una red dispersa en un medio viscoso, que si es muy débil se deforma mucho y si es muy rígido es muy frágil. (Gamba et al, 2004)

El asfalto es el encargado de impermeabilizar al pavimento. Mantiene junto al agregado como un solo cuerpo, actuando como ligante entre el agregado mineral, como capa superficial o como cementante en el cemento asfáltico. El asfalto debe ser lo suficientemente viscoso para resistir el tránsito y que no fluya en secciones no planas, y no debe ser tan viscoso como para romperse debido a la fragilidad.

En un pavimento de hormigón asfáltico, el agregado mineral comprende entre el 94 y 95% del peso de la mezcla, mientras que el asfalto ocupa el otro 5 y 6%. Cualquier aditivo que se use para mejorar la calidad de la mezcla, se la añade al asfalto. El agregado se encuentra en varios tamaños, desde una roca de $\frac{3}{4}$ de pulgada hasta finos pasantes del tamiz 200. Así como el asfalto hace contacto con el agregado para formar la mezcla para

varios tipos de vías, las moléculas del asfalto interactúan directamente con la química y características de la superficie del agregado. La superficie del agregado varía de manera considerable por su composición química, área superficial, distribución y tamaño de poros, y rugosidad. Dependiendo de la clase de agregado, sea este piedra caliza, cascajo, granito, gravauca, basaltos, etc., puede variar su interacción con el asfalto (Curtis, 1992).

1.4- ALCANCE

Con este estudio se pretende establecer el punto de partida para un proyecto de investigación sobre durabilidad de las mezclas asfálticas. En general, las mezclas del país se producen empleando un mismo tipo de cemento asfáltico, el AC-20 procedente de la Refinería de Esmeraldas, pero muchos tipos de agregados minerales con calidades intrínsecas muy disímiles.

Existe una gran cantidad de información en textos y en la web sobre este tema, principalmente en su relación con el agua. Sin embargo, en la descripción de las pruebas se considera justo separar las pruebas desarrolladas netamente para evaluar la adherencia como tal, de aquellas que evalúan la pérdida de adherencia o cohesión en la mezcla asfáltica debido al efecto del agua, aunque en las pruebas del primer grupo siempre pudieran valorarse opciones para medir el efecto del agua.

CAPÍTULO 2. ADHERENCIA AGREGADO-ASFALTO.

2.1- GENERALIDADES Y CONCEPTOS

La adherencia está definida como el proceso en el que partículas diferentes se unen unas a otras mediante fuerzas de ligadura (ASTM D 907-96). La adhesión determina la tendencia de dos materiales distintos a unirse el uno con el otro. También se puede definir como la presencia de fuerzas atracción molecular, en presencia de acciones que tienden a separarlas (Packham, 1992), en el cual el tiempo que permanezcan unidas dependerá de varias propiedades físicas y químicas.

En este caso la adherencia se da entre el cemento asfáltico y el agregado mineral. Este fenómeno está en función de las propiedades tanto del asfalto como de los agregados minerales, como su naturaleza, mineralogía, superficie, su interacción, temperatura de mezclado, tratamientos previos y sollicitaciones aplicadas (Gamba et al, 2004). El asfalto está conformado por una mezcla compleja de compuestos orgánicos de alto peso molecular en los que sobresalen los hidrocarburos. Estos hidrocarburos principalmente compuestos de carbono e hidrogeno, tienen en su composición azufre, nitrógeno, vanadio, níquel, entre otros compuestos y metales pesados. Estos minerales juegan un rol importante en el comportamiento del asfalto y en su desempeño de adherencia. Según su composición, estos hidrocarburos pueden pertenecer a los siguientes grupos:

- Alifáticos saturados o parafínicos
- Nafténicos o cicloparafínicos
- Aromáticos
- Alifáticos no saturados

Las moléculas del asfalto, al ser este mismo una mezcla de gran número de hidrocarburos de distinto peso molecular, poseen diferente carácter soluble y tienden a agruparse según sus características físicas, dando lugar a una

estructura coloidal. Las moléculas más pesadas se agrupan formando una fase dispersa o en suspensión mientras que las más ligeras conforman el medio de dispersión. Estas moléculas pesadas en suspensión son llamadas asfaltenos, mientras que el medio de dispersión son los maltenos (León et al, 2006).

Los asfaltenos son macromoléculas complejas tipo multipolímeros. No hay asfalto que no los contenga, están constituidos por un núcleo formado por compuestos más complicados de mayor peso molecular a los cuales por adsorción se les han añadido más compuestos. Son partículas sólidas cuyo color va desde el color café oscuro hasta el negro sin punto de fusión definido (ECOPETROL, 1997).

El contenido de asfaltenos en un cemento asfáltico varía generalmente entre un 15 y 20%, pero por lo general el contenido de asfaltenos en el asfalto no afecta el comportamiento de este, a pesar de que el crudo pesado y mediano otorga mejores desempeños que el crudo liviano (León et al, 2006).

Los maltenos están compuestos por una mezcla de hidrocarburos cíclicos, saturados y no saturados que contienen en su totalidad la parafina del betún. Cumplen la función de medio de dispersión y mantienen en estado disolución parcial al asfalto. Su cantidad de productos aromáticos debe ser la correcta para que exista una solución coloidal estable y que no tienda a gelificarse, causando pérdida del poder aglomerante del betún (León et al, 2006).

Los maltenos se pueden descomponer tres grupos de compuestos que son: Saturados, resinas o aromáticos polares y los nafteno-aromáticos.

2.2- MECANISMOS INVOLUCRADOS EN LA ADHERENCIA AGREGADO-LIGANTE ASFÁLTICO

Es muy probable que varios mecanismos produzcan adhesión simultáneamente. Estos mecanismos pueden ser clasificados en tres categorías: trabazón mecánica, adherencia fisicoquímica causada por la energía superficial libre de los materiales y el ligamento causado por reacciones químicas interfaciales (Bhasin et al, 2007).

Y las teorías que respaldan estos mecanismos son la teoría mecánica, química, frontera débil y la teoría termodinámica (Kanitpong et al, 2003), (Terrel et al, 1989).

La teoría mecánica indica que la ligadura del agregado está dada por las propiedades físicas del agregado como la porosidad, textura y área superficial. El mezclado fuerza al asfalto dentro de los poros e irregularidades provocando una trabazón (Moraes et al, 2011).

La teoría química sigue que la adherencia se da en base al pH y los grupos funcionales tanto del asfalto como del agregado. Las reacciones químicas entre el asfalto absorbido y el agregado crean la unión. La ligadura se crea por la reorganización de la estructura molecular del asfalto al alcanzar la energía de equilibrio y la ligadura con la superficie del agregado. La teoría del límite débil nos dice que la falla siempre ocurre en el eslabón más débil de la unión en la interface asfalto-agregado. Por último, la teoría termodinámica estudia la atracción entre el agregado, el asfalto y el agua provocado por distintas tensiones superficiales (Moraes et al, 2011).

El mojado de la superficie del agregado o el desvestimiento del asfalto en el agregado es ocasionado por los cambios en la energía libre del sistema. Cambios en la ligadura son causados por la introducción de otros materiales al sistema, como agua o aire.

Estas teorías y mecanismos no son exclusivamente independientes, muchos de ellos están relacionados entre sí y ocurren simultáneamente (Moraes et al, 2011).

2.3- INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO EN LA ADHERENCIA

Características del Ligante Asfáltico

Las características del asfalto pueden influenciar a la adhesión asfalto-agregado y a la cohesión de la masilla. Las propiedades del ligante de asfalto que pueden influir en la unión con el agregado son la química del asfalto, viscosidad, espesor de capa y la energía superficial (Bahia et al, 2007), (Xiao et al, 2007). La fuerza cohesiva de la matriz del asfalto puede ser influenciada por la presencia de humedad y por la naturaleza química del ligante y las técnicas de construcción (Moraes, 2011).

La interacción química entre el asfalto y el agregado es crítica para el entendimiento de la capacidad de las mezclas bituminosas de resistir los daños por humedad (Robertson, 1991). El nitrógeno presente en el asfalto favorece la adhesión con los agregados, y los grupos funcionales controlan sus propiedades ya que determinan la estabilidad de permanecer unidas las superficies para formar una red, con capacidad de resistir tensiones y esfuerzos (Gamba et al, 2004).

Un investigador (Robertson, 1991) observó que los ácidos carboxílicos en el asfalto se adhieren muy bien en el agregado. Pero este grupo químico puede ser removido fácilmente en la presencia del agua. Una razón de este fenómeno es que los ácidos carboxílicos del asfalto contienen sodio y potasio; estos son jabones que se disuelven por la acción del tráfico en presencia del agua. También sugirió que los asfaltos envejecidos tienden a recibir mayor daño por parte de la humedad debido al material ácido del ligante oxidado (Robertson, 1991). En cambio otros expertos (Petersen et al,

1982) observaron que cuando el ligante asfáltico contiene cetonas y nitrógeno, son menos susceptibles al daño por agua.

Composición química

La norma ASTM-D4124-97 detalla el proceso del ensayo de fraccionamiento SARA que utiliza cromatografía líquida en columna con alúmina CG-20 como fase estacionaria. Este ensayo consiste en la separación del bitumen en asfaltenos y maltenos por medio de precipitación con n-heptano y luego el fraccionamiento de los maltenos a través de una columna de alúmina con solventes de polaridad creciente. En la Figura 1. Se muestra un resumen de la descomposición del asfalto mediante este proceso. (Reyes et al, 2012).

- **Asfaltenos**

Los asfaltenos contienen moléculas más pesadas (103 a 105 Unidades de Masa Atómica) del asfalto formadas por hidrocarburos aromáticos con pocas cadenas parafínicas. Estos son responsables de la dureza de los asfaltos. Los asfaltenos son muy adherentes, pero se encuentran rodeados por una cortina de resinas por lo que no intervienen directamente en la adherencia con los materiales pétreos. Su presencia es fundamental en las propiedades mecánicas del asfalto, pues el alto poder de adsorción de las resinas proporciona a su núcleo una alta rigidez (León et al, 2006).

- **Resinas**

Son cuerpos translúcidos, semisólidos y solubles en n-heptano. Como los asfaltenos están compuestos en mayor parte por hidrógeno y carbono y contienen pequeñas cantidades de oxígeno, azufre y nitrógeno. Su adhesividad se debe a su naturaleza polar, su contenido de aromáticos y ácidos nafténicos. De estos provienen las propiedades adhesivas al asfalto y se consideran como un agente estabilizante de los asfaltenos. Su peso molecular es de 1100 UMA (Shell Bitumen, 1991), (León et al, 2006).

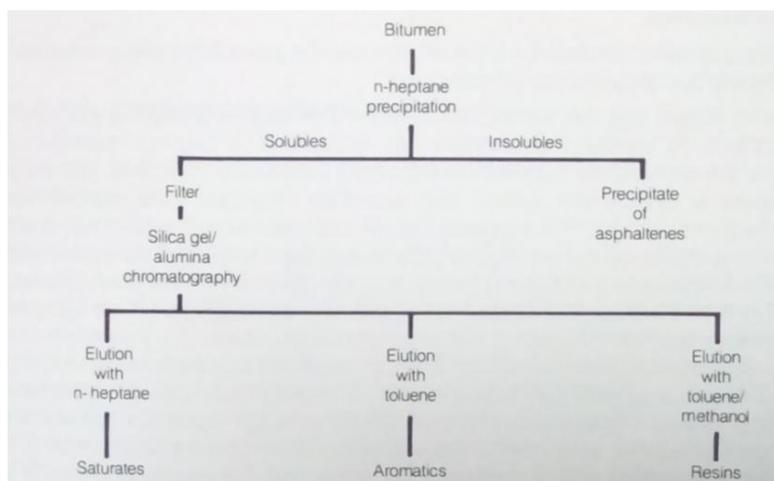
- **Aromáticos**

Los aromáticos comprenden el menor peso molecular de los compuestos nafténico – aromáticos del bitumen y representan en mayor proporción el medio de dispersión de los asfaltenos. Estos son líquidos viscosos color café oscuro y constituyen entre el 40 a 65% del total del asfalto. Su peso molecular se encuentra en el rango de 300 a 2000 UMA, y están compuestas por cadenas de carbono no polares (Shell Bitumen, 1991).

- Saturados

Son aceites viscosos no polares de color blanquecino. Su peso molecular promedio es similar al de los aromáticos y sus componentes incluyen saturados parafínicos y no parafínicos. Comprenden entre el 5 y 20% del asfalto (Shell Bitumen, 1991).

Estos componentes al ser sometidos a un proceso de oxidación se puede observar que se modifican las cantidades de estos componentes. Mediante este fenómeno los aromáticos y saturados se convierten en resinas y estas se convierten en asfaltenos. Por este fenómeno podemos concluir que los asfaltos con gran cantidad de saturados y aromáticos serán más resistente al envejecimiento y más durable, pero así mismo será muy susceptible a deformaciones en temperaturas ordinarias (León et al, 2006).



Fuente: Shell Bitumen, 1991

Figura 1. Esquema de la descomposición mediante el ensayo de fraccionamiento SARA

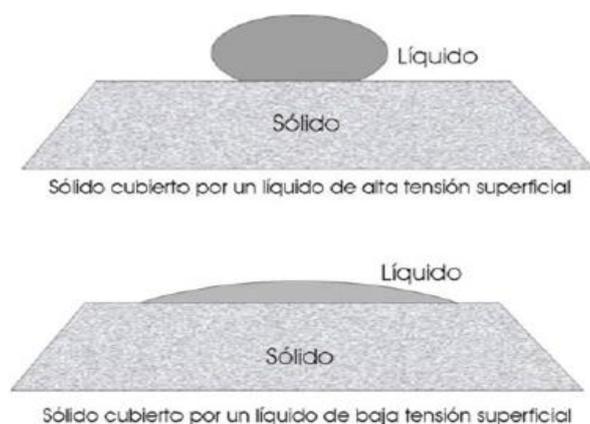
Tensión superficial

Según algunos autores (Gamba et al, 2004) está basada en el desequilibrio de fuerzas que existe en la superficie. Las moléculas del interior son atraídas por la misma fuerza en todas las direcciones, por lo que están en equilibrio. En cambio las moléculas de la superficie son solo atraídas hacia adentro, lo cual hace que se produzca una tensión en la superficie. Este concepto explica el trabajo por unidad de superficie necesario para extender la integrase entre los dos materiales.

Envoltura y cubrimiento

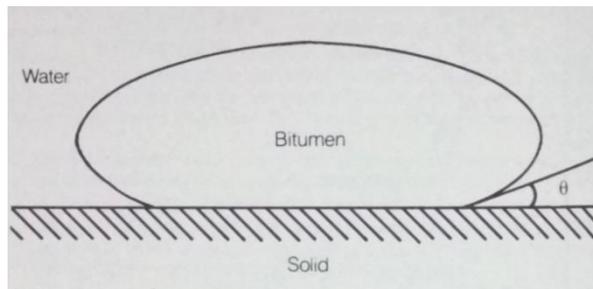
El cubrimiento depende de la atracción molecular entre el ligante y el agregado. La capacidad del ligante de envolver al agregado es mayor mientras disminuye la tensión superficial. La envoltura está relacionada con la capacidad de un líquido de extenderse sobre una superficie sólida, fenómeno llamado extensión. Para que este se produzca, la adhesión del líquido extendido tiene que ser mayor a la cohesión y la tensión superficial de la superficie de soporte debe ser mayor que la del líquido derramado como se muestra en la Figura 2. Mientras mayor sea la tendencia de extensión del líquido mejora las propiedades de la adherencia.

El ángulo de contacto del ligante sobre el árido afecta el cubrimiento que tendrá; mientras mayor sea este ángulo habrá mejor recubrimiento.



Fuente: Gamba et al, 2004.

Figura 2. Efectos de la tensión superficial



Fuente: Shell Bitumen, 1991

Figura 3. Ángulo de contacto de un bitumen sobre un sólido.

Viscosidad

La viscosidad del bitumen juega un rol con el cual nos da a conocer qué tan propenso a pelarse va a ser un ligante. La viscosidad de un líquido es dependiente de la temperatura que posee e indica cuanto será su movilidad molecular y la magnitud de las fuerzas de atracción de los líquidos. Si aumenta la temperatura, disminuyen las fuerzas intermoleculares y la tensión superficial del líquido, dándole a esta mayor capacidad de envoltura (Gamba et al, 2004). Dicho esto; a mayor viscosidad, su resistencia al agua es mayor.

También hay reportes que indican que la resistencia del ligante está directamente relacionada con el espesor de la capa. Muestras con espesor de asfalto más grueso tienden a tener falla cohesiva en condiciones de humedad, mientras que los que poseen un espesor más fino tienen falla adhesiva. Para la energía superficial según la teoría termodinámica, es preferible tener mejor mojado para mejor desempeño (Kanitpong et al, 2003).

2.4- INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO MINERAL EN LA ADHERENCIA

Las propiedades del agregado tienen un mayor impacto en la adhesión que algunas propiedades del ligante. Las características que influyen en el daño

por humedad son la forma y tamaño, tamaño y volumen de poros, área superficial, constituyente química superficial, acidez y alcalinidad, densidad superficial de adsorción y carga superficial o polaridad (Tarrer et al, 1992).

Mineralogía

La composición mineralógica de los agregados es muy importante cuando nos referimos a adherencia. La química de los agregados afecta la adhesión substancialmente; pues varios componentes minerales de los agregados muestran afinidad al material asfáltico. Los agregados poseen cargas superficiales descompensadas, en otras palabras, poseen tensión superficial (Tarrer et al, 1992), (Gamba et al, 2004). Cuando el agregado es revestido con asfalto, este absorbe ciertos componentes del asfalto como los sulfóxidos y ácidos carboxílicos, que tienen una gran afinidad por los agregados. Es decir, cuando los agregados son envueltos en la sustancia de polaridad contraria, se satisface la necesidad de energía y se forma un enlace adhesivo. También se puede mencionar que los hidrocarburos aromáticos tienen mucha menor afinidad a la superficie de los agregados que los grupos polares. Dicho esto, el tipo y cantidad de componentes adsorbidos por los agregados afectan el grado de adherencia que tendrán y que existen varios tipos de agregados generan ligados de distintas resistencias (Robertson, 1991).

Los agregados son comúnmente clasificados como hidrofílicos (es decir, mayor afinidad por el agua que por el ligante asfáltico) o hidrofóbicos (es decir, mayor afinidad por el asfalto que por el agua) (Kanitpong et al, 2003), (Tarrer et al, 1992), (Bhasin, 2006.). Los agregados hidrofílicos son ácidos atendiendo a su naturaleza química, exhibiendo un alto contenido de sílice; mientras que los hidrofóbicos son considerados básicos, con un bajo contenido de sílice. Por ejemplo, la piedra caliza se clasifica como agregado hidrofóbico y el granito se considera hidrofílico; aunque el nivel de dicha condición puede variar de acuerdo a su composición particular (Moraes et al, 2011). No obstante, la conclusión general es que pocos agregados (o ninguno) pueden resistir completamente la acción del agua.

Rugosidad superficial

Superficies rugosas con mayor área de contacto son preferidas para mejor ligadura. Esta propiedad influye tanto en la envoltura como en la resistencia adhesiva. La presencia de humedad y polvo reduce significativamente la fuerza de adhesión, las capas de polvo inhiben el mojado del agregado por el asfalto haciendo que este se adhiera al polvo en vez del agregado, además que la envoltura puede ser obstaculizada por el aire y la humedad acumulada en las grietas de la superficie del agregado (Yoon et al, 1988), (Castan, 1968).

La rugosidad superficial es considerada como un factor positivo, siempre y cuando haya una verdadera unión entre los componentes del pavimento. Además de eso, trae un aumento de la superficie de contacto y por lo tanto produce una menor sollicitación de tracción en la superficie. La rugosidad superficial es conocida como una magnitud muy importante para valorar la calidad de la adherencia con respecto a la superficie (Fritz et al, 1975).

El agregado rugoso aumenta su resistencia al desprendimiento debido a que existe mayor superficie de contacto, pero así mismo puede retener mayor humedad.

Porosidad

La porosidad es otra característica importante del agregado que puede afectar la adsorción de asfalto. La porosidad total, la distribución del tamaño de poros, y la continuidad de los poros determinan el grado y la naturaleza de la absorción. Al calentarse la mezcla asfáltica, el aire que existe en los poros del agregado es expulsado por el calor, y al enfriarse los vacíos absorben el asfalto. Por ejemplo, cuando la superficie del agregado es rugosa pero tiene poros pequeños, el aire queda atrapado y se dificulta la penetración del asfalto en los poros (Lee, 1953), (Gamba et al, 2004).

Se sabe que por lo general no todos los poros del agregado son del mismo tamaño y tampoco tienen la misma distribución. Se dice que hay un rango óptimo de tamaño de poros para la absorción de asfalto. Se han obtenido las

siguientes conclusiones a partir del trabajo de los investigadores, (Lee, 1953), sobre correlaciones de absorción y tamaño de poros:

1. Los poros con un tamaño de poros mayores a 0.5 micrones tienen una influencia directa en la absorción del asfalto. La absorción varía linealmente a partir de este tamaño
2. No se pudo establecer ninguna relación con poros menores de 0.1 micrones y la absorción de asfalto.

2.5- PRUEBAS PARA EL CONTROL DE LA ADHERENCIA ENTRE ASFALTOS Y AGREGADOS MINERALES

2.5.1- Ensayo PATTI (Pull Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers)

Fue desarrollado por el Instituto Nacional de Tecnología y Estándares (National Institute of Standards and Technology, NIST) y fue adoptado por el ASTM como el método D 4541 "Resistencia al Desprendimiento de los Revestimientos Utilizando Probadores de Adhesión Portátiles". El ensayo PATTI utiliza una presión de aire regulada para remover el pistón de ensayo que está adherido a una superficie por un adhesivo específico (Kanitpong et al, 2003). La presión de aire que lleva a la falla al sistema indica la fuerza de adhesividad que posee el material que se está ensayando.

Este método es aplicable para la evaluación del rol que juega la humedad en las propiedades adhesivas y cohesivas de diferentes combinaciones de asfalto/agregado (Kanitpong et al, 2005). Se preparan varias muestras de agregado con diferente mineralogía para ser usados como superficie para ensayar el adhesivo y determinar el comportamiento de la mineralogía con la presencia de diferentes adhesivos y su condición en presencia de agua. Este método es capaz de diferenciar una falla cohesiva de una falla de

adherencia. Pero este ensayo tiene sus desventajas, en cuanto a términos de confiabilidad y preparación de muestras.

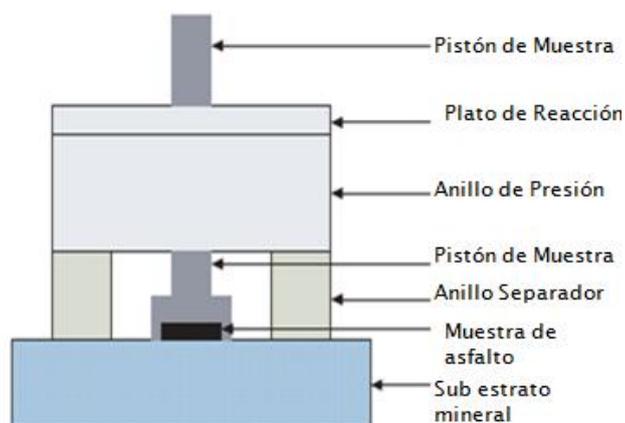
La variabilidad de resultados ha sido estudiada y se encontró que es de aproximadamente un 10%. Este margen de error no fue un factor muy decisivo en cuanto a su uso o no para usarlo en la investigación. En lugar de eso, los requisitos rigurosos para la preparación de las muestras incluyen la preparación de la superficie lisa del agregado, el espesor definido y uniforme de la lámina de asfalto requerida, el condicionamiento en agua y el ensayo.

Estos pasos son una inversión de tiempo y dinero que reducen el beneficio económico del ensayo PATTI (Kanitpong et al, 2003), (Kanitpong et al, 2005). Según la revisión literaria acerca del ensayo PATTI, este es un excelente candidato para medir la adhesión de los asfaltos en el agregado, pero debido a requisitos logísticos asociados con el método de ensayo, se encontró que no era muy viable aplicarlo (Bahia et al, 2007). Por esta razón no se describe esta prueba en su versión original, válida para diferentes tipos de materiales adhesivos, sino en una versión mejorada que se expone a continuación, para asfaltos.

2.5.2-Prueba de Resistencia Adhesiva del Ligante (Bitumen Bond Strength Test “BBS”)

El reto para evaluar cuantitativamente la liga adhesiva entre el asfalto y un agregado mineral en particular es identificar un ensayo repetible, rápido y simple que permita valorar las propiedades adhesivas del sistema asfalto-agregado (Copeland et al, 2007).

Varios investigadores (Youtchef et al, 1997) usaron el ensayo PATTI, originalmente desarrollado por la industria de revestido para medir la susceptibilidad a la humedad de ligantes asfálticos. El ensayo BBS es una versión significativamente modificada del PATTI.



Fuente: Moraes et al, 2010

Figura 4. Partes y materiales para realizar el ensayo BBS

Como se indica en la Figura 4, el ensayo BBS compuesto por un muestreador adhesivo neumático, manguera de presión, un pistón de alado, un plato de reacción y un pistón de muestra. Durante el ensayo, se utiliza una fuerza tirante en el espécimen por el pistón metálico de alado. La falla ocurre cuando el esfuerzo aplicado excede la fuerza cohesiva del ligante o la resistencia de la interface asfalto-agregado. La resistencia al esfuerzo tirante (Pull-off tensile strength, POTS) se calcula con:

$$POTS = \frac{(BP \times A_g) - C}{A_{ps}}$$

Donde

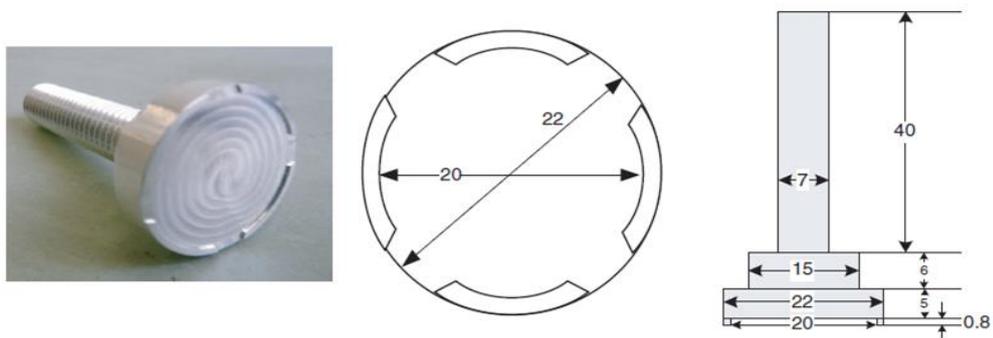
A_g = área de contacto entre el empaque y la placa de reacción (mm^2)

BP= presión de falla

A_{ps} = área del pistón de muestra (mm^2), y

C= constante del pistón de alado

El pistón de muestra, ilustrado en la Figura 5, posee una superficie rugosa para evitar que el asfalto se despegue de su superficie durante el ensayo proveyendo de adherencia y mayor área de contacto entre el pistón y el asfalto. El pistón de muestra del BBS posee un diámetro de 20 mm y tiene un borde circundante para controlar el espesor de la capa. El borde del pistón tiene un espesor de 800 μm (Canestari et al, 2010), (Yoon et al, 1988).



Fuente: Moraes et al, 2010

Figura 5. Dimensiones del pistón de muestra (mm)

Preparación de la muestra de agregado

Se cortan placas de agregado con espesores similares y ambos lados paralelos. Luego de cortarlos y pulirlos, las placas de agregado se sumergen en agua destilada con un limpiador ultrasónico por 60 minutos a 60°C para remover cualquier residuo del proceso de corte y neutralizar la superficie del agregado para llevarla a su condición original. Se realiza un pulido para controlar la rugosidad de la superficie.

Preparación de la muestra de asfalto.

La superficie del agregado y del pistón de muestra se limpia con acetona para remover humedad y polvo que puede afectar la adhesión. Luego se introducen en un horno a 65°C por un mínimo de 30 minutos para remover el agua absorbida de la superficie del agregado y así lograr una mejor unión entre el ligante asfáltico y el agregado. El ligante asfáltico se lo calienta en

un horno a 150°C. Se coloca 0,4-0,5 gramos de asfalto caliente en un molde de silicona que mide aproximadamente 8 mm de diámetro y 2 mm de profundidad, y este se lo deja enfriar para poder retirar la muestra con facilidad. El pistón de muestra se saca del horno y de inmediato se coloca una muestra de ligante asfáltico en la superficie del pistón durante aproximadamente 10 segundos. Luego la placa de agregado se saca del horno, y se presiona firmemente el pistón con la muestra sobre la placa de agregado hasta que el pistón alcance la superficie y no se observe el exceso de asfalto fluyendo del pistón. Los pistones deben ser empujados hacia abajo lo más rectos posibles y se debe evitar cualquier rotación para que no se creen burbujas de aire dentro de la muestra y reducir esfuerzos.

Antes del ensayo las muestras secas se deben dejar en un cuarto temperado por 24 horas. Para probetas en condiciones húmedas primero se dejan las muestras en un cuarto temperado por 1 hora para permitir que la temperatura del sistema pistón-asfalto-agregado se estabilice. Luego se sumergen las muestras en agua a 40°C por un tiempo específico de condicionamiento. Cuando llegan al tiempo especificado, se retiran las muestras del tanque de agua y se dejan en un cuarto temperado por 1 hora más antes de ensayarlos.

Procedimiento del ensayo

La realización del ensayo BBS se resume en los siguientes pasos:

- Antes de comenzar, se debe revisar la conexión de la manguera de presión con el suministro de aire.
- Ajustar la presión de carga a 100 psi/s. Medir la temperatura de la muestra con un termómetro antes de comenzar el ensayo.
- Se coloca el anillo espaciador sobre el pistón de carga para asegurarse que el sistema de jalado este recto y minimizar las excentricidades del pistón de muestra.

- Se coloca el pistón de alado sobre el anillo espaciador y se atornilla el plato de reacción sobre el pistón de alado asegurándose que toque el pistón de alado.
- Se inicia el ensayo aplicando la presión.
- Luego del ensayo, se anota la máxima tensión de alado y se observa el tipo de falla. Si más del 50% de la superficie del agregado está expuesta entonces la falla fue adhesiva. En caso contrario la falla fue cohesiva.

2.5.3-Ensayo DSR Modificado (Modified DSR strain sweep test)

El DSR puede controlar la temperatura, el tiempo y el modo de carga con precisión. Por esta razón el DSR puede ser usado para medir respuestas reológicas de las capas de asfalto adheridas en la superficie del agregado en condiciones húmedas y secas. Recientemente un investigador modificó el procedimiento del ensayo DSR para evaluar las propiedades reológicas de la interface asfalto-agregado antes y después del condicionamiento en agua (Cho, 2008).

Un disco de núcleo de roca de 25 mm de diámetro y 5 mm de espesor, como se muestra en la Figura 6, se usan como sub estrato para adherir asfaltos. El disco y el ligante asfáltico simulan la interface asfalto-agregado en las mezclas asfálticas. El núcleo de roca es pegado en plato metálico del DSR. En la configuración del DSR, se obtiene un paralelismo alineando el disco de roca usando el eje superior del DSR mientras se seca el ligante epóxico. Un vaso de agua, fabricado específicamente para el DSR, se usa para permitir un acceso continuo de agua a la interface. Se miden respuestas reológicas con cargas oscilatorias de 1 a 100% *strain sweep* con una frecuencia de 1.6 Hz, a 40°C, tanto en condiciones secas como húmedas.



Fuente: Cho, 2008

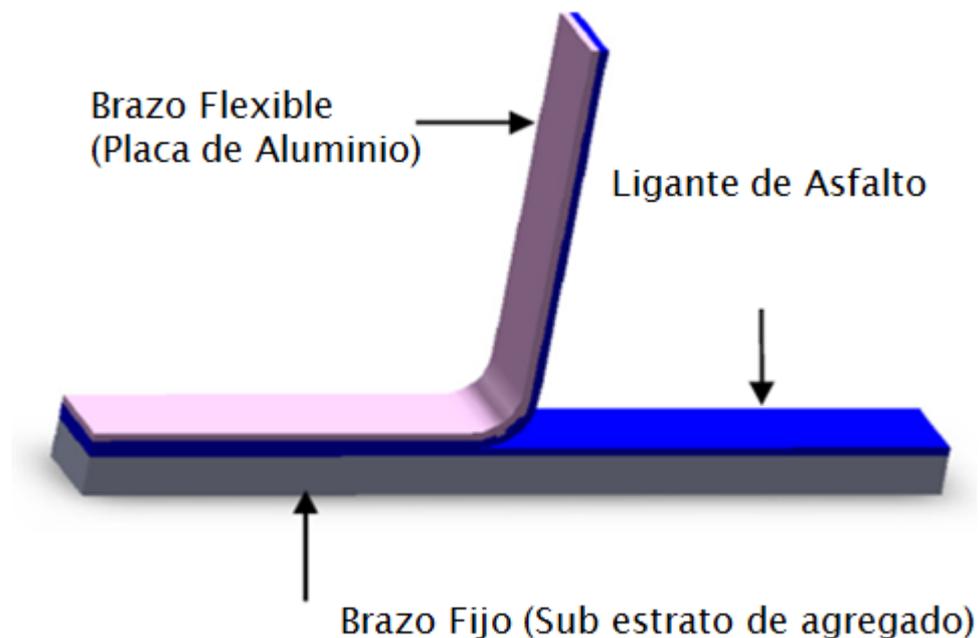
Figura 6. Muestras de discos de agregado y materiales para el ensayo DSR modificado

2.5.4-Ensayo de pelado (Peeling Test)

Este ensayo ha sido estudiado por algunos investigadores (Cui et al, 2014). En el mismo un brazo flexible se pega a un sub estrato (brazo fijo) con un adhesivo (Blackman et al, 2013), (Kinloch et al, 1994). El brazo flexible es arrancado del brazo fijo y la fuerza de pelado es medida. Para este ensayo, el brazo se hace con varios agregados y el asfalto o bitumen actúa como adhesivo. El brazo flexible de pelado consiste en una placa de aluminio de 0.2 mm de espesor (grado: EN AW-1200). Este material seleccionado posee una buena adherencia con el asfalto. El agregado rígido tiene unas dimensiones de 200 mm de largo, 20 mm de ancho y un espesor de 10 mm (Blackman et al, 2013). Puede observarse esquemáticamente la muestra que se usa en la Figura 7.

Preparación de la muestra

El brazo flexible se somete a un *grit-blasting* por ambos lados del brazo con alúmina con tamaño de grano 180/220. Se lava el brazo con agua para remover cualquier residuo de alúmina y se desengrasa con acetona para remover posible presencia de grasa o aceite. La superficie del agregado se limpia con una toalla de papel húmeda para remover partículas de polvo antes del pegado.



Fuente: Cui et al, 2014

Figura 7. Esquema de partes que intervienen en el ensayo de pelado

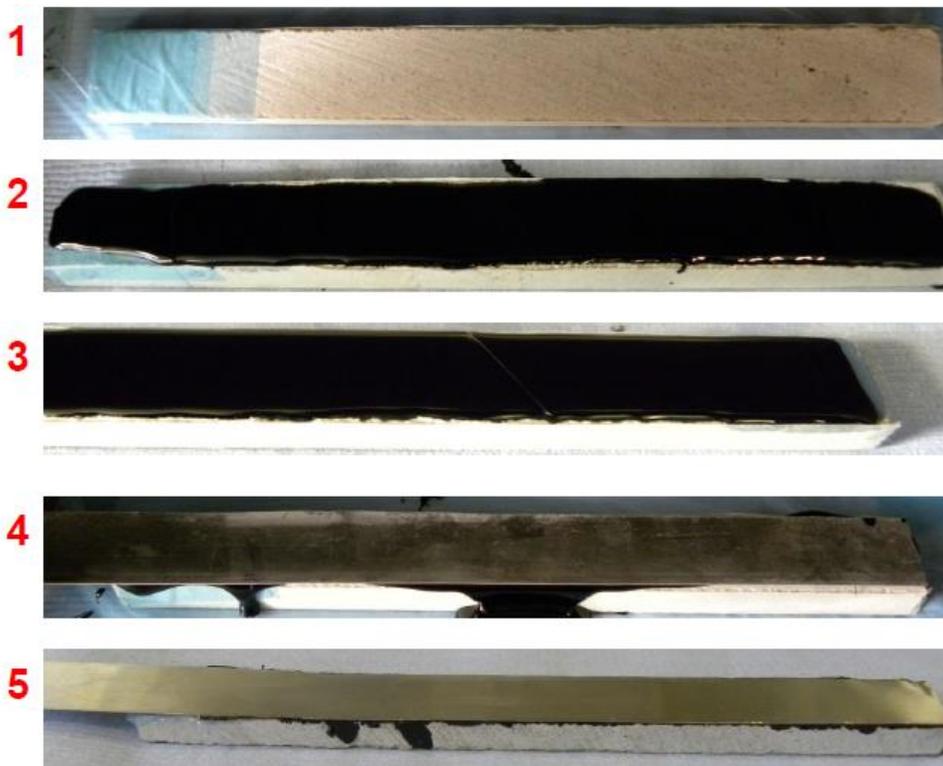
El asfalto se lo precalienta por 30 minutos a 150°C, para que esté listo para verter. Se coloca una capa de 13 µm de politetrafluoroetileno (teflón) a un costado de la superficie del agregado donde se colocara la capa de asfalto (Blackman et al, 2013). El asfalto líquido se vierte uniformemente sobre el agregado. El espesor de la capa de asfalto debe ser controlada para que llegue a 0.25 mm con alambres espaciadores de acero inoxidable. El brazo de pelado de aluminio se coloca en un horno a 150 °C por 5 minutos y luego colocado sobre la capa de asfalto. Se presiona suavemente con una mordaza para controlar el espesor de la capa de asfalto y luego se almacena el espécimen a temperatura ambiente (20±3 °C) por una noche. El exceso de asfalto en los bordes se retira usando una cuchilla. En la Figura 8, se puede observar el proceso de preparación de la muestra.

Condiciones húmedas

Se introduce el espécimen en agua destilada a 20 °C por 10 días, permitiendo que el agua penetre en el agregado y el asfalto, simultáneamente atacando la interface. El espécimen debe ser ensayado luego de unas horas de ser retirado del baño de agua.

Procedimiento del ensayo

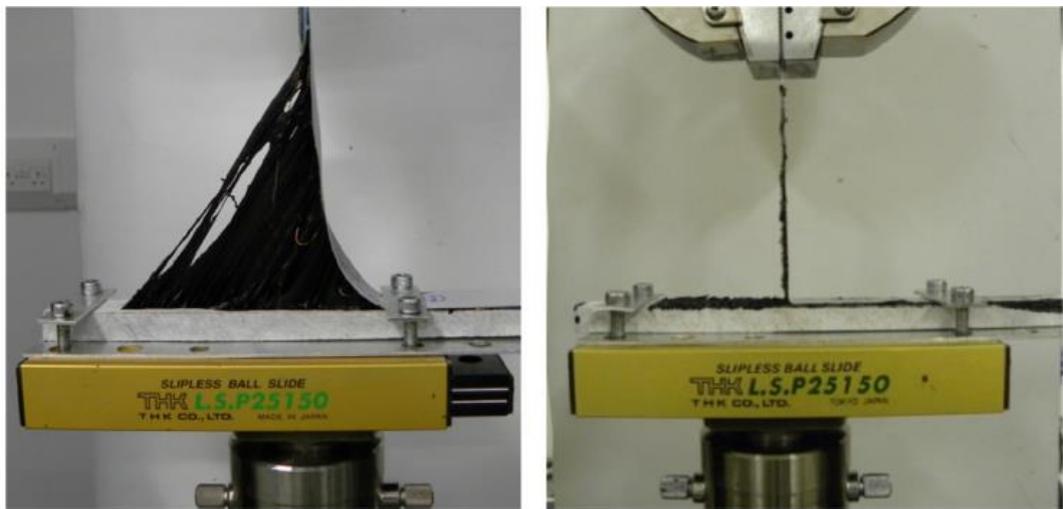
El ensayo de pelado se conduce en un ambiente controlado con temperatura de 20 ± 2 °C y humedad relativa de $50\pm 5\%$. Los especímenes se fijan a una mesa móvil sin fricción usando dos abrazaderas a los extremos que no serán parte del ensayo. Se ajusta el extremo del brazo flexible a la máquina que va a aplicar la fuerza de tensión. Se fija el ángulo de pelado a 90° y la velocidad de ensayo 10 mm/min para asegurar un crecimiento estable de la falla. Ver figuras 8 y 9.



Fuente: Airey, 2011

Figura 8. Pasos para la preparación de la muestra del ensayo de pelado

Se debe ensayar un mínimo de tres especímenes. Se guarda la fuerza con la que comenzó la falla como función del desplazamiento de la placa de aluminio. Después de la región de inicio de falla se definió un intervalo de 60 mm (entre los desplazamientos de 20 y 80 mm) y se calcula la fuerza en esta región. La fuerza de pelado estable, “P”, se usa para determinar los valores de la energía de falla adhesiva, “G_A”.



Fuente: Cui et al, 2014

Figura 9. Posibles resultados durante el ensayo de pelado

2.5.5- Otras pruebas para el control de la adherencia

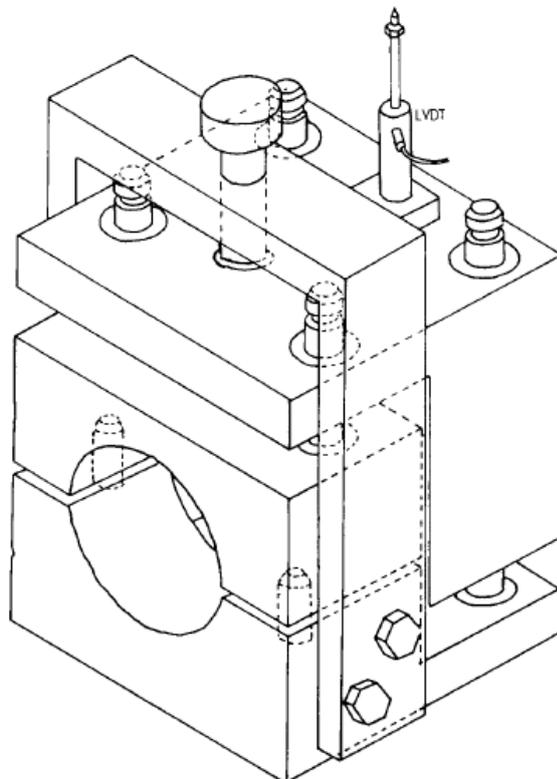
A continuación se presentaran otras pruebas para el control de adherencia que se han desarrollado específicamente para la evaluación de la efectividad de los riegos de liga entre capas asfálticas.

2.5.5.1- Ensayos de corte

En 1978, Uzanet al, usaron el ensayo de corte directo, también llamado molde de corte de interface, para ensayar distintos asfaltos como riego de liga. Se ensayaron dos capas de ligante con dos temperaturas, 25° y 55°C, cinco velocidades de aplicación y cinco presiones verticales. Las muestras

fueron sometidas a un cortante horizontal con desplazamiento constante de 2.5 mm/min. El riego óptimo para temperaturas de 25 y 55°C era de 0.5 L/m² y 1.0 L/m² respectivamente (Uzan et al, 1978).

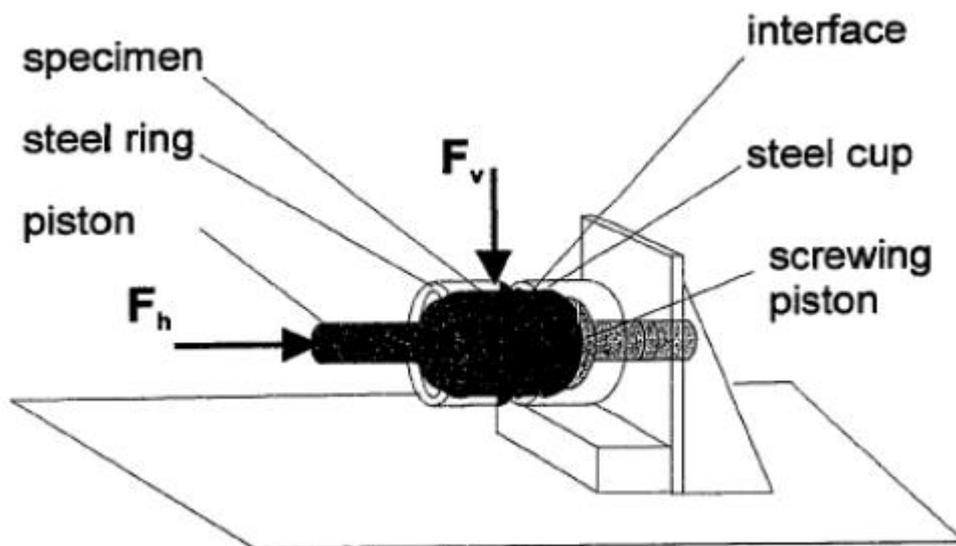
En la Universidad de Tecnología de Delft, Moleenar *et al*, utilizó un ensayo de corte para evaluar la resistencia al corte entre capas de mezcla asfáltica caliente, con distintos tratamientos incluyendo capas intermedias absorbentes de esfuerzos con y sin riego de liga. La máquina de corte, ilustrada en la Figura 10, sostiene en la parte inferior del cilindro compactado inferior y la carga se somete perpendicularmente al eje de los cilindros sobre el cilindro superior para ensayar la resistencia a corte de la interfaz entre las capas. Se somete una carga de estabilidad Marshall a una velocidad constante de 0.85 mm/seg. Se ensayaron cilindros de 4 pulgadas (101.4 mm) de diámetro a 15°C (Moleenar et al, 1986).



Fuente: Moleenar et al, 1986

Figura 10. Esquema del dispositivo de corte de la Universidad de Tecnología de Delft

Romanoschi, estuvo a cargo de un ensayo de corte directo con una carga normal constante en interfaces de asfalto - asfalto para estudiar el comportamiento mecánico de la interface. El ensayo incluía interfaces con y sin liga de riego, con tres temperaturas diferentes (15°C, 25°C y 35°C), y diferentes magnitudes de carga normal en la interface, de aproximadamente 18, 276, 414 y 552 kPa. Para realizar el ensayo se fija el núcleo de asfalto en un anillo dividido de acero asegurándose que el anillo esté ubicado en el extremo de la interface. La otra mitad que sobresale se fija en una copa de acero que está soldada a una placa de acero. Se aplica una carga vertical sobre el anillo metálico, que produce un esfuerzo de corte en la interface, mientras se aplica al mismo tiempo una fuerza horizontal constante, normal a la interface. Se muestra un esquema del aparato en la Figura 11. El máximo esfuerzo cortante que podía ser aplicado era de 663 kPa debido a limitaciones del equipo. (Romanoschi, 1999)



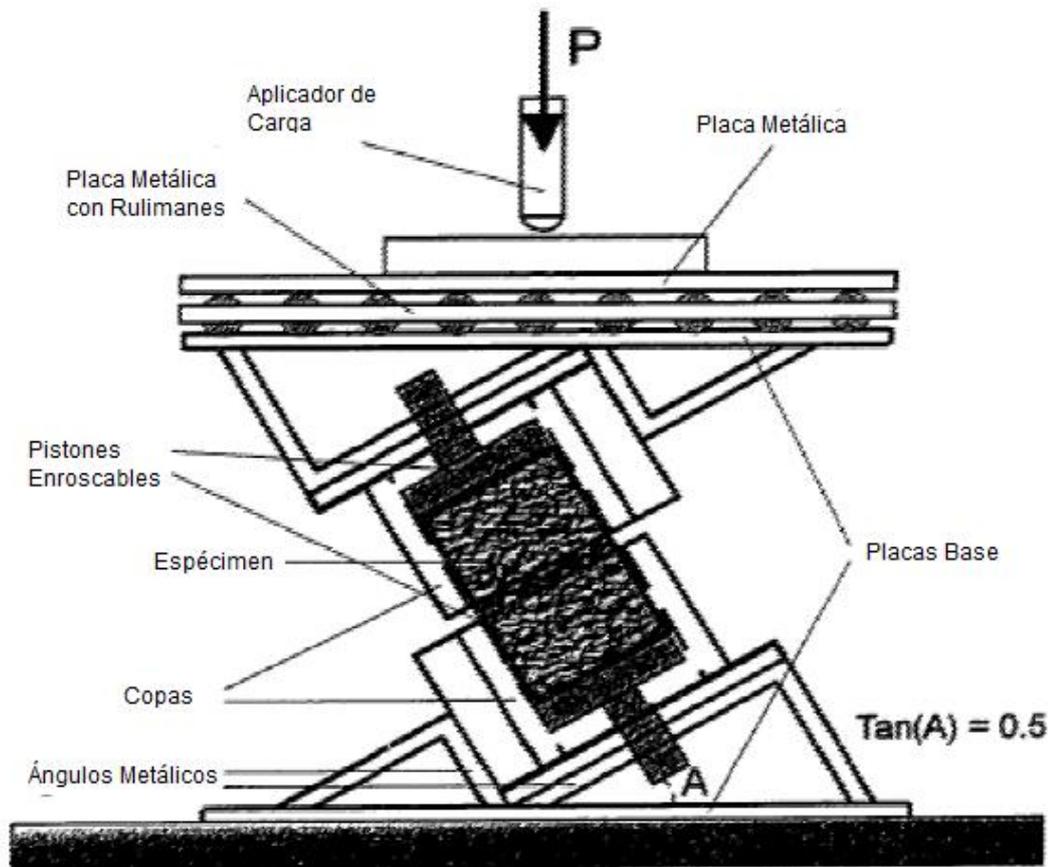
Fuente: Romanoschi, 1999

Figura 11. Esquema del ensayo de corte directo con carga normal

En el mismo estudio Romanoschi (1999) realizó un ensayo de fatiga de interface, creando un dispositivo con su eje inclinado con un ángulo con respecto a la carga aplicada, como se presenta en la Figura 12. Los especímenes se colocan en copas metálicas espaciadas a 5 mm. El

dispositivo está diseñado para que la interface de asfalto siempre este entre las dos copas. Las copas que sostienen los especímenes están fijadas a ángulos metálicos para que las copas estén a un ángulo de 22.5° con respecto a la carga aplicada. Se seleccionó este ángulo debido a que en este ángulo la presión de corte en la interface es la mitad que la presión normal. Esto es importante debido a que este es el rango promedio entre las cargas verticales y horizontales que aplica la carga vehicular a la interface entre asfaltos.

A continuación en la Figura 12 se muestra un esquema de cómo es aplicada la carga normal a la muestra.



Fuente: Romanoschi, 1999

Figura 12. Esquema del dispositivo de fatiga de corte

Los laboratorios Federales de Investigación y Evaluación de Materiales Suizo posee un método estándar y criterios para evaluar la resistencia de la

unión entre capas de asfalto caliente usando núcleos de 6 pulgadas (150 mm) (Roffeet al, 2002). Este método es el SN 671 961 del Estándar Suizo y utiliza el dispositivo conocido como Maquina de Ensayo LPDS (Figura 13). Este es un ensayo de corte simple con una velocidad de carga de 50,8 mm/min. El esfuerzo cortante mínimo es de 15kN para ensayar la unión entre la capa ligante y la superficie de las capas externas y 12Kn para la unión entre la capa ligante y la base de la vía.



Fuente: West et al, 2005

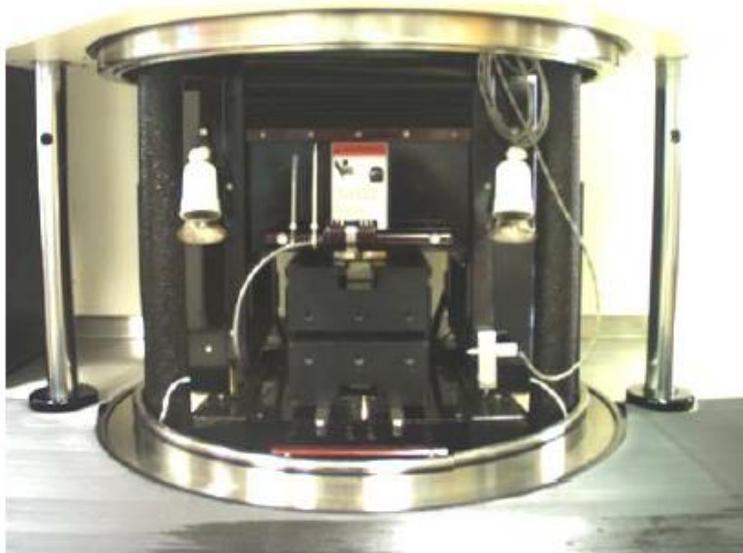
Figura 13. Maquina de ensayo LPDS

También se evaluó la influencia de distintos tipos de liga para riego, ritmo de aplicación, y temperaturas de ensayo en la Resistencia al corte de la interface, usando el ensayador de corte de Superpave (SST). Ver figuras 14 y 15. Se aplica una carga de corte constante de 50 lb/min (222.5 N/min) en el espécimen hasta que falle. Las probetas se ensayaron a 25 y 55°C y para hacerlas se usaron 5 velocidades de riego de 0.0 a 0.9l/m² (Mohammad et al, 2002).



Fuente: West et al, 2005

Figura 14. Caja de corte con la muestra lista



Fuente: West et al, 2005

Figura 15. Caja de corte dentro del SST

En el 2003, Sholar et al, desarrollaron en el Departamento de Transporte de Florida (FDOT) una maquina simple de corte directo (Figura 16) que puede ser usada como máquina de ensayo universal o una prensa Marshall. Primero evaluaron una liga de riego con dos cilindros de metal. Midieron los

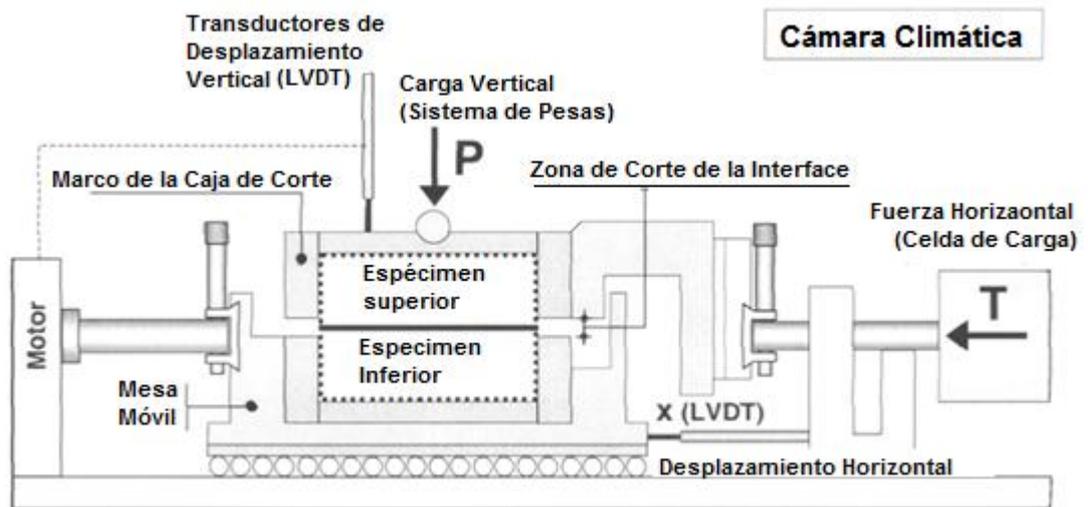
efectos de la temperatura y la velocidad de carga, llegando a una temperatura de 25°C y una velocidad de 50.8mm/min (Sholar et al 2004).



Fuente: West et al, 2005

Figura 16. Dispositivo de ensayo FDOT de resistencia de liga

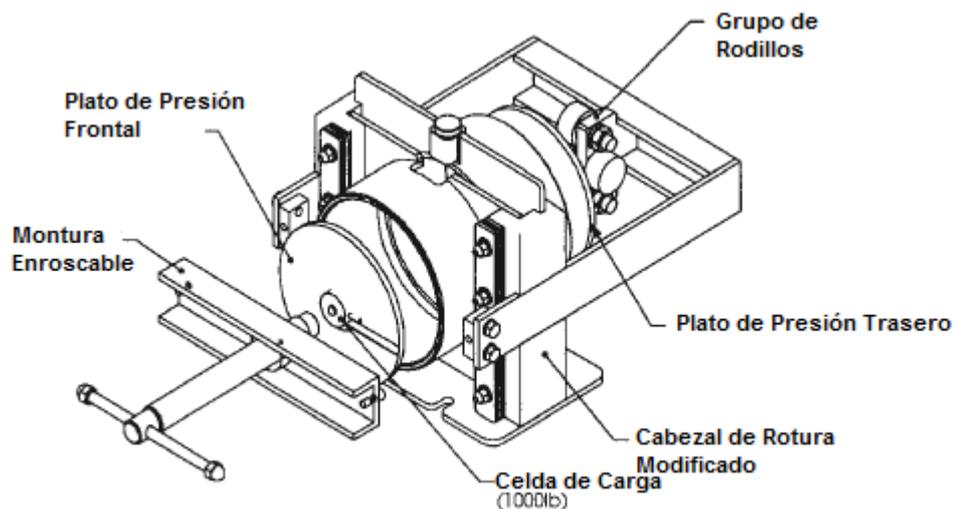
En Italia, Santagata, Canestari, y otros investigadores usaron un aparato conocido como Máquina de ensayo, investigación y análisis de Ancona (Ancona Shear Testing Research and Analisis "ASTRA"), para estudiar los efectos de la temperatura y condición superficial, así como el comportamiento de su resistencia al cortante de la liga de pavimentos de capas múltiples (Santagata et al, 1994), (Canestari et al, 1997), (Santagata et al, 2003). A esta máquina (Figura 17) se le han realizado varias mejoras a través de los últimos años. El ASTRA aplica una carga normal a la muestra durante el proceso de corte con una velocidad de desplazamiento constante de 2.5 mm/min.



Fuente: West et al, 2005

Figura 17. Caja de corte ASTRA para evaluar la resistencia de la liga

El ensayo desarrollado por NCAT para evaluar la resistencia de ligante asfáltico es un ensayo de corte y carga que puede ser realizado en cualquier máquina universal de ensayos o una prensa Marshall. Este ensayo ha pasado por varias mejoras a través de los años, de las cuales una de las más importantes es la capacidad de aplicar una carga horizontal a la muestra. La muestra se carga a una velocidad constante de 50.8 mm/min y la cámara de ensayo se asegura que la muestra tenga una temperatura constante durante el ensayo (West et al, 2005).



Fuente: (West et al, 2005)

Figura 18. Esquema del dispositivo de ensayo de corte NCAT

2.5.5.2-Ensayo de Torque

Este ensayo se desarrolló en Suecia para hacer ensayos de asfalto *in situ*. En este ensayo relativamente fácil, se perfora un núcleo de hormigón asfáltico más profundo que la interfaz que se va a ensayar y se lo deja en su sitio. Se adhiere sobre el núcleo una placa metálica sobre la cual se aplica un torque hasta que ocurra la falla. El torque usado para provocar la falla por corte indica la resistencia de la liga de riego. Este ensayo en general se usa con la capa fina superficial y la capa que le sigue inmediatamente. Existen versiones de laboratorio de este ensayo, que es fundamentalmente el mismo procedimiento, solo que en este caso se retira el núcleo y se coloca en una abrazadera. La abrazadera sostiene la capa inferior por debajo de interfaz mientras que el torque es aplicado en la superficie del núcleo. Se encontró que las superficies pulidas en la interface poseen mejor resistencia al corte que las que no son pulidas. También se encontró que el tiempo de curado no influencia en la resistencia de la interfaz y que el riego de liga tiene una influencia significativa sobre la resistencia al corte a diferencia de las muestras sin liga (Tashman et al, 2006). Ver Figura 19.



Fuente: Tashman et al, 2006

Figura19. Dispositivos para el ensayo de torque en laboratorio

CAPÍTULO 3. DAÑO POR HUMEDAD EN LA ADHERENCIA AGREGADO-ASFALTO.

3.1- GENERALIDADES Y CONCEPTOS

Los factores ambientales como el aire, agua, temperatura pueden tener una influencia importante en la durabilidad de las mezclas de asfalto mientras que en clima moderado y buena calidad de materiales la principal causa de deterioro en la mezcla es la carga vehicular, cuya consecuencia son las grietas por fatiga, el desmoronamiento y ahuellamiento. En cambio, con mal clima estos esfuerzos que sufre el pavimento se intensifican con la presencia de malos materiales y mantenimiento inadecuado; el tráfico y el agua son los elementos principales de la degradación del asfalto, siendo el agua el que causa la pérdida de adherencia en la mezcla. Esta falla prematura de adherencia es conocida como desvestimiento, en la cual causa una pérdida de resistencia ya que el pavimento deja de trabajar como un solo cuerpo. La pérdida de adhesión causa que se pierda completamente la fuerza cohesiva del pavimento (Gorkem et al 2009).

Los factores más influyentes en el daño por humedad del hormigón asfáltico (Sengoz et al, 2007):

- El tipo de agregado, fino y grueso, deben ser examinados y evaluados cuidadosamente para saber cómo influirán en el daño por presencia de agua. Algunos agregados como el granito, la grava y otros materiales silíceos, son muy sensibles ante la presencia de agua y tienden a pelarse cuando se los usa en la mezcla asfáltica. Otros agregados como las calizas son menos susceptibles al daño por humedad. En algunos casos el agregado fino es más susceptible que el agregado grueso y la mayor parte de la desvestimiento ocurre en donde se encuentra el agregado fino.
- El segundo factor es el origen, tipo y proceso de refinado que recibe el petróleo crudo para convertirlo en cemento asfáltico. Muchos

cementos asfálticos son relativamente inertes con respecto al daño por agua. Los distintos tipos de cementos asfálticos no muestran mucha diferencia en el grado de daño por desvestimiento entre ellos, por lo que se puede concluir que el daño por desvestimiento depende mucho más por el tipo de agregado que por el de cemento asfáltico.

- El tercer factor corresponde a las propiedades de la mezcla de hormigón asfáltico. El volumen de vacíos y la permeabilidad de la mezcla, que son resultado del grado de compactación, la cantidad de cemento asfáltico y la gradación del agregado son importantes porque controlan el nivel de saturación de agua y el drenado. Una mezcla con un porcentaje de vacíos mayor al 6%, puede sufrir un daño considerable a causa de la humedad. Se puede hacer una excepción con mezclas de gradación abierta donde el volumen de vacíos es de 15 a 25% donde se puede drenar el agua.
- El espesor de la capa de asfalto también influye en la susceptibilidad de las mezclas calientes de asfalto al daño por humedad porque afecta la durabilidad de la mezcla. Las mezclas gruesas asociadas con mezclas negras flexibles se conocen por tener mayor durabilidad, mientras que las mezclas finas que son asociadas con su fragilidad y un color café, tienden a fisurarse y deshacerse excesivamente. Por consiguiente, tiende a tener un periodo de vida más corto. Los asfaltos con un espesor grueso son menos susceptibles al daño por agua que las mezclas de capa fina.
- Las condiciones climáticas y el peso vehicular definen la cantidad de desvestimiento que tendrá en particular una mezcla. Los daños por humedad ocurren mucho más en los lugares donde cae con mucha frecuencia lluvia o nieve. El volumen y el tipo de tráfico son variables muy importantes. Mientras más pesado sea el tráfico vehicular de camiones, el daño por desvestimiento será mucho mayor.

3.2- MECANISMOS DE DESTRUCCIÓN (PARA EL STRIPPING O DESVESTIMIENTO)

El agua puede causar desvestimiento mediante 5 mecanismos diferentes como: desprendimiento, desplazamiento, emulsificación espontanea, presión de poros y abrasión hidráulica

Desprendimiento

Este fenómeno es la separación de una capa de asfalto por una fina capa de agua, sin necesidad que existan discontinuidades en el revestimiento de asfalto del agregado (Asphalt Institute, 1981), (Majidzadra et al, 1968). Donde ha ocurrido este fenómeno se puede descascarar fácilmente el asfalto del agregado(Asphalt Institute, 1981). En este fenómeno se aplica la teoría termodinámica, en el que considera la adhesión como un fenómeno termodinámico relacionado con las energías superficiales tanto del asfalto como del agregado (Majidzadra et al, 1968).

En el sistema trifásico de agua-agregado-asfalto, el agua reduce la energía superficial libre del sistema en mayor cantidad que el asfalto, provocando una condición termodinámicamente más estable (Majidzadra et al, 1968). Los agregados en su mayoría poseen superficies eléctricamente cargadas, mientras que los asfaltos –compuestos en su mayoría por hidrocarburos de gran peso molecular– tienen poca actividad polar, por lo que la unión que se desarrolla entre el asfalto y el agregado está dada principalmente por bajas fuerzas de dispersión (Department of Scientific and Industrial Research, 1962). En cambio el agua posee moléculas que son altamente polares y tienen mayor atracción con los agregados por fuerzas de orientación más fuertes (Department of Scientific and Industrial Research, 1962).

Desplazamiento

El desvestimiento provocado por desplazamiento es el resultado de la penetración del agua hasta la superficie del agregado a través de grietas o roturas en la capa de asfalto (Asphalt Institute, 1981), (Majidzadra et al, 1968), (Fromm, 1974), (Scott, 1978). Esta brecha puede ser causada por un

recubrimiento incompleto del agregado mineral o por una rotura en la lámina de asfalto (Asphalt Institute, 1981), (Majidzadra et al, 1968), (Department of Scientific and Industrial Research, 1962), (Fromm, 1974). Una rotura en la capa de asfalto puede ser causada cuando la capa de asfalto es fina y esta se rompe en las secciones angulares del agregado debido a las cargas vehiculares. El desvestimiento por desplazamiento también es causado por agujeros en la capa de asfalto después del revestimiento de un agregado con polvo en su superficie (Fromm, 1974). El concepto del desvestimiento por desplazamiento es congruente con la teoría termodinámica como se detalló anteriormente.

También se puede explicar, mediante la teoría química, que los cambios en el pH de las acumulaciones microscópicas de agua sobre la superficie del agregado pueden alterar los grupos polares absorbidos. Esto es; para llegar al equilibrio, el agregado va a atraer más agua que asfalto, provocando una separación física entre el asfalto y el agregado (Scott, 1978).

Emulsificación espontanea

En este fenómeno el asfalto y el agua se combinan formando una emulsión invertida, donde el asfalto es el medio continuo y el agua es el medio discontinuo. La formación de esta emulsión lleva al desvestimiento, y se agrava mucho más cuando existe la presencia de emulsificadores como las arcillas minerales y algunos aditivos para el asfalto (Asphalt Institute, 1981), (Fromm, 1974), (Scott, 1978).

Una emulsión asfáltica normal se produce cuando hay partículas de asfalto suspendidas en agua. Para que suceda esto, necesita agua, asfalto y el agente emulsivo. Este agente emulsivo puede variar dependiendo de los resultados que se quieran lograr. Para lograr una emulsión, se dosifica la cantidad de agua, asfalto y agente emulsivo y se somete a un proceso mecánico para separar el asfalto, reduciéndolo a partículas microscópicas suspendidas en el agua de manera de mezcla coloidal.

Se ha observado que la emulsificación espontánea ocurre cuando las capas de asfalto se sumergen en agua, pero la probabilidad de que se forme una emulsión depende de la naturaleza del asfalto y la presencia de aditivos. Los aditivos o la arcilla presente dentro de la mezcla actúa como agente emulsificante, por lo cual se podría decir que se encuentran todos los materiales necesarios para la creación de una emulsión. La energía mecánica para la emulsificación inversa es la carga vehicular.

Este tipo de desvestimiento puede ser reversible debido a que el agua que causó la emulsificación se puede evaporar, llevando al asfalto a su estado original.

Presión de poros

La presión de poros es un mecanismo de desvestimiento presente en mezclas de altos vacíos donde el agua puede circular libremente a través de vacíos conectados entre sí. Durante la densificación de la mezcla a causa de la carga vehicular, algunos vacíos se impermeabilizan atrapando agua dentro de los mismos. Mayor carga vehicular puede inducir a un exceso de presión de poros en el agua dentro de la mezcla, causando desvestimiento de la capa de asfalto que cubre a los agregados (Asphalt Institute, 1981), (Majidzadra et al, 1968).

Abrasión Hidráulica

El lavado hidráulico es un mecanismo de desvestimiento que ocurre sólo en la superficie del pavimento. Esto se debe al resultado de la acción de las llantas de los vehículos en la superficie de un pavimento saturado. El agua es presionada dentro del pavimento en el frente de las llantas y luego succionada hacia afuera del pavimento por la parte trasera de las llantas. Esto provoca que los finos contenidos en el pavimento se mezclen con el agua y se acelere el proceso de abrasión. Este ciclo de compresión-tensión causa que el agregado se desprenda del pavimento (Asphalt Institute, 1981).

3.3- PRUEBAS PARA EL CONTROL DEL EFECTO DE LA HUMEDAD

Existen dos grupos importantes en los que se pueden clasificar estas pruebas o ensayos: los ensayos a mezclas sueltas y los ensayos a mezclas compactadas.

3.3.1- Ensayos a mezclas sueltas

Son ensayos cortos en comparación a los de mezcla compactada, usan equipos más simples, son menos costosos y su procedimiento es sencillo. Pero no toman en cuenta muchos factores importantes como el tráfico, las características de la mezcla y condiciones ambientales, además que están sujetas a calificaciones subjetivas del laboratorista experto y en gran parte se obtienen solo resultados cualitativos (Solaimanian et al, 2003).

3.3.1.1- Inmersión Estática

Este ensayo fue tomado de la norma canadiense LS-285, se usa para evaluar visualmente cuanto asfalto se ha desprendido del agregado con el uso de aditivos o sin ellos (Ministry of Transportation, Ontario, 2001).

Preparación de la muestra

Se mete el agregado al horno durante 24 horas a 141°C. Luego se retira del horno y se deja enfriar, para luego tamizar y determinar la gradación del agregado. El material pasante del tamiz de 13.2 mm y el retenido del tamiz 4.75 mm (No. 4) es usado para hormigón asfáltico. El agregado pasante del tamiz de 9.5 mm y retenido en el tamiz 4.75 mm (No. 4) es usado para asfaltos diluidos. El retenido de cada tamiz intermedio es almacenado en recipientes por separado.

Si se va a usar agregado lavado, primero se seca y luego se tamiza como se especificó anteriormente. Se lava el agregado profundamente con agua normal y luego se enjuaga con agua destilada. Es conveniente lavar el retenido de cada tamiz por separado. Se seca el agregado superficialmente y se introduce en un horno a 141°C por un periodo de 24 horas.

Después de las 24 horas se enfría el agregado y se deposita en contenedores que estén cerrados herméticamente para evitar que las condiciones de ambiente afecten al agregado hasta ser utilizado en el ensayo.

Se preparan los pesos de agregado antes de realizar el ensayo. Se necesita 100 g de agregado, compuestos por 50 g de retenido del tamiz 9.5 mm, 35 g del retenido del tamiz de 6.7 mm y 15 g del retenido del tamiz 4.75 mm. Luego de pesado el agregado, se lo deposita en las latas de 250 ml con tapas.

Procedimiento

Método A: Cemento asfáltico

Se ajusta la temperatura del horno a $143 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (o la temperatura de mezcla que recomiende el proveedor del cemento asfáltico). Se precalientan los platos de cerámica esmaltada en el horno.

Se colocan 100 g del agregado pre pesado en una bandeja metálica. Se coloca la bandeja con el agregado en el horno de calentado rápido por 10 min. Después de los 10 min la temperatura del agregado debe estar entre los 149° y 177°C .

Se pasa el agregado de la bandeja metálica a un plato de cerámica esmaltada en el horno. Se continúa el proceso de calentado por 15 minutos hasta que se estabilice la temperatura del agregado a 143°C .

Luego de estabilizar la temperatura del agregado, se retira el plato con el agregado del horno, y se le añade 4 ± 0.1 g de asfalto precalentado a 143°C al agregado. Usando la espátula metálica, se mezcla el agregado hasta que quede completamente revestido. El agregado revestido se lo transfiere inmediatamente a la jarra de vidrio de 600 ml. Se mueve la jarra para que la superficie quede pareja y se deja enfriar la muestra a temperatura ambiente.

Una vez enfriado, se sumerge el agregado en agua destilada, llenando hasta $\frac{3}{4}$ de la jarra, sin verter el agua directamente sobre el agregado. Se cubre la jarra con un cuadrado de polietileno que se asegura con una banda elástica. Esto es para evitar que se evapore el agua. La jarra y su contenido se ponen en un baño de agua a $49 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.

Luego de las 24 horas, se retira la jarra con su contenido del baño de agua. No botar el agua ni el contenido que se encuentra dentro de la jarra. Se ilumina la superficie del agua con una lámpara, y se observa el porcentaje de agregado que todavía sigue revestido por asfalto.

Si el revestimiento retenido es menor al 65%, proceder con el Método C.

Método B: Asfaltos líquidos

Se vierte en la jarra de 600 ml los 100 g de agregado con 6 ± 0.1 g de cemento asfáltico que ha sido llevado a la temperatura mínima de mezcla especificada por la Tabla 5 de la Especificación Provincial de Estándares de Ontario, Especificación No. 1102 (ver Figura 20) o en su defecto a las temperaturas de mezcla correspondientes a las normas locales o a las otorgadas por el proveedor del cemento asfáltico, y mezclar con la espátula durante 3 minutos.

Usando la espátula, se retira el material de la jarra y se vierte en el plato de polietileno. La mezcla se cura durante 1 hora a temperatura ambiente.

Después del tiempo de curado, se evalúa visualmente el porcentaje de agregado revestido. Se llena el plato con agua destilada y se lo deja reposar a temperatura ambiente por 24 horas.

**TABLE V
TEMPERATURE RANGE OF LIQUID ASPHALTS FOR SPRAYING AND MIXING**

GRADE	TEMPERATURE °C			
	SPRAYING		MIXING	
	Min.	Max.	Min.	Max.
RC-30, MC-30	30	45	25	45
RC-70, MC-70, SC-70	60	70	55	70
RC-250, MC-250, SC-250	75	90	70	90
RC-800, MC-800, SC-800	90	105	80	105
RC-3000, MC-3000, SC-3000	115	130	110	130
MTO PRIMER	30	45	--	--
M.I.P. (Mixed in Place)	--	--	80	105

Fuente: Ontario Provincial Standard Specification, 1989

Figura 20. Temperaturas correspondientes a la Especificación Provincial de Estándares de Ontario

Luego de las 24 horas, se remueve de la superficie cualquier capa que se encuentre flotando sin tocar el agregado revestido. Se ilumina con la lámpara, y se evalúa el porcentaje de agregado revestido. Cualquier capa fina translúcida color marrón que se encuentre en el agregado es considerada como revestida.

Si el revestimiento retenido es menor al 65%, proceder con el Método C., excepto que el agregado no se calienta.

Método C: Evaluación del agregado

Se ajusta el horno a $143 \pm 2^\circ\text{C}$, se precalienta la bandeja de mezclado, y se deja subir la temperatura del horno de calentado rápido.

Se pesa 100 g de agregado usando los pesos de la gradación estándar de:

Tamaño del tamiz (mm)	% Pasante
12.5	100
9.5	50
6.7	15
4.75	0

El agregado se pone en una bandeja plana de metal y la bandeja con el agregado se introducen en el horno de calentado rápido por 10 min. Luego de los 10 min, la temperatura del agregado debe estar entre 149°C y 177°C.

Luego del periodo de calentado, se traspasa el material a un plato de cerámica esmaltada precalentada y se colocan en un horno convencional. El calentado continúa a 143°C por 15 minutos adicionales para estabilizar la temperatura del agregado.

El cemento asfalto o los aditivos a utilizarse se seleccionan considerando lo siguiente:

- a) El cemento asfáltico usado debe ser una muestra representativa del material bituminoso que se va a usar con el agregado seleccionado.
- b) El origen y clasificación del cemento asfáltico del área donde se seleccionó el agregado a usarse debe ser representativo.
- c) El aditivo a utilizarse debe estar en la lista de aditivos aprobados de las normas locales o nacionales.

Los aditivos por lo general son añadidos al cemento asfáltico con los siguientes incrementos porcentuales, 0.5%, 0.75%, 1.00%, y 1.25%, del peso del cemento asfáltico.

Se calienta un mínimo de 100 g de cemento asfáltico en un contenedor metálico apropiado, se pesa el aditivo con una precisión de 0.1 g y es añadido al cemento asfáltico caliente. Usando una espátula, se mezcla profundamente en el asfalto y se realiza el procedimiento del ensayo como está especificado en el Método A

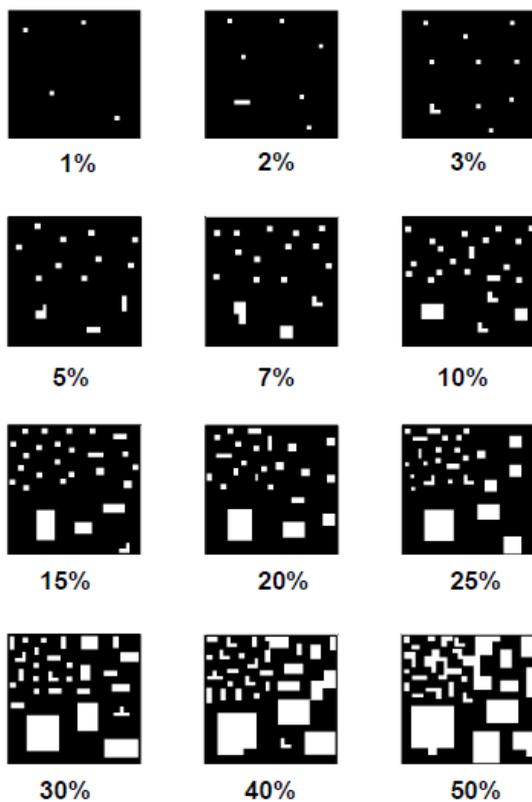
Notas

Si el revestimiento inicial del agregado es menor al 90%, la experiencia ha demostrado que la combinación de asfalto/aditivo que está siendo evaluada tiene una menor posibilidad de llegar al mínimo revestido requerido de 65% luego de 4 días en el horno.

Todos los ensayos deben realizarse con un duplicado.

Cuando lo especifique el dueño de la muestra, el ensayo puede ser realizado agregando 0.5% de NaCl en el agua destilada

Si el agregado es muy anguloso, se puede usar más de 4.0 g de asfalto para asegurarse un revestimiento inicial completo.



Fuente: Ministry of Transportation, Ontario, 2001

Figura21. Carta de estimación visual porcentual de las muestras

3.3.1.2- Ensayo de agua hirviendo de Texas (Texas Boiling Test)

Procedimiento estándar

Este método se usa para estimar la susceptibilidad a la humedad de una mezcla de hormigón asfáltico, estimando visualmente el grado de desvestimiento que tiene la muestra después de someterla a un proceso de hervido en agua destilada. Este proceso también se puede usar para evaluar la efectividad de aditivos anti desvestimiento añadido a mezclas susceptibles al agua (Kennedy et al, 1984).

Materiales

Horno – horno eléctrico capaz de mantener una temperatura de $163^{\circ} \pm 2.8^{\circ}\text{C}$ ($325^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{F}$)

Equipo para mezclar muestras – equipo necesario para hacer la mezcla manual de los materiales, incluyendo bandejas metálicas redondas de distintos tamaños, pequeñas paletas de piedra y espátulas.

Balanza – balanza de 5 kg con precisión de 0.1 g.

Mesa caliente – mesa capaz de mantener una temperatura constante durante el mezclado.

Vaso de precipitados – vaso de 1000 ml, resistente al calor.

Fuente de calor – un mechero o un quemador eléctrico, con soporte para el vaso o para un baño con aceite y una cámara interna capaz de sostener 500 ml de agua destilada y la muestra.

Aparatos varios – cronómetros, palas, guantes, toallas de papel, papel aluminio.

Preparación del espécimen

Selección del contenido de asfalto

Se determina el contenido óptimo de asfalto para la mezcla agregado – asfalto, para lo que se debe seguir un método de diseño. Si se observa que el agregado no está bien revestido o tiene mucho asfalto, se incrementa o disminuye el contenido de asfalto respectivamente hasta que el agregado este bien revestido y no quede exceso de asfalto en el tazón o bandeja de mezclado.

Preparación del agregado

Si se va a evaluar una mezcla, los agregados a utilizar deben ser representativos en origen y tamaño de partícula. Todos los materiales combinados en la mezcla deben tener la misma gradación que tendrían en campo. Si se ensaya un agregado individual, se utiliza la fracción pasante del tamiz de 9.52 mm (3/8”) y el retenido del tamiz de 4.76 mm (No. 4). Si predomina el material pasante del tamiz 4.76 mm (No. 4), se puede ensayar esa fracción fina en el intervalo entre el tamiz No. 40 y No. 80.

Selección de aditivos anti – desvestimiento

En el caso de evaluarse un aditivo, se debe añadir al asfalto o al agregado antes de hacer la mezcla final. En el caso de mezclarlo con el asfalto este debe precalentarse de 135 a 149°C (275 a 300°F). Verter 100 g de asfalto en una lata de 6 onzas (177.44 ml). Añadir la cantidad de aditivo deseada en función de porcentaje del peso del asfalto. Inmediatamente batir con una espátula durante 2 minutos.

Preparación de la mezcla

El cemento asfáltico, con o sin aditivo anti desvestimiento, se calienta a 163° ± 2.8°C (325° ± 5°F) por 24 a 26 horas. Esto causará un endurecimiento en el asfalto muy parecido al que se produce cuando es mezclado en planta. Más importante que eso, el calentado evaluara la estabilidad térmica de los

aditivos anti desvestimiento que se añadan a la mezcla. Para evaluar en su totalidad a la mezcla es necesario usar para el ensayo 300 g de mezcla. Para la evaluación de un componente de agregado 100 g de material debe ser usado. El agregado seco debe ser calentado a $163^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$ entre 1 a 1 hora 30 minutos. Luego de ese tiempo se debe agregar el cemento asfáltico y mezclar manualmente. La mezcla se deja enfriar a temperatura ambiente al menos 2 horas antes de realizar el ensayo.

Procedimiento del ensayo.

Hervido de la mezcla en agua

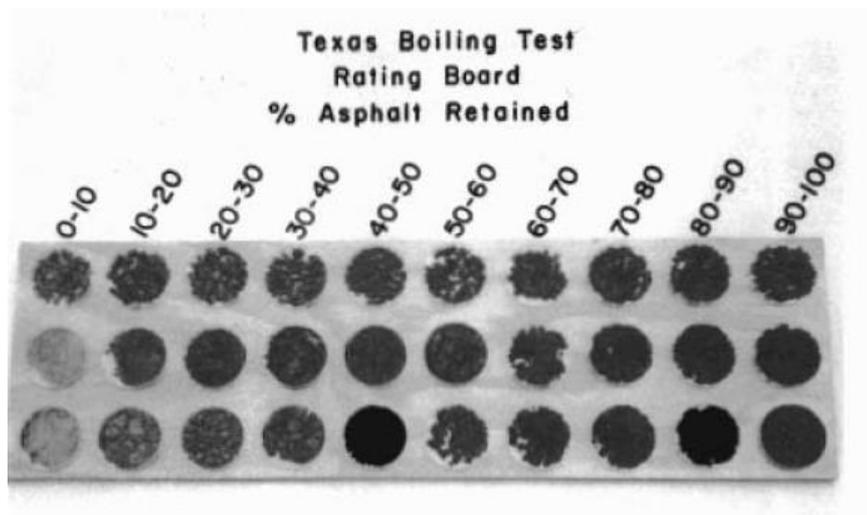
Se llena un vaso de precipitados de 1000 ml hasta la mitad, aproximadamente 500 cc, con agua destilada y se calienta hasta su punto de ebullición. Se añade la mezcla que está a temperatura ambiente al agua caliente, lo que causará que baje la temperatura un poco por debajo de la temperatura de ebullición. Se debe mantener el agua en ebullición durante 10 minutos, meciendo con una vara de vidrio por intervalos de 3 minutos. Durante y después de hervida el agua se debe limpiar el asfalto despegado del agregado de la superficie del agua con una toalla de papel para evitar que se vuelva a adherir al agregado. La mezcla se deja enfriar a temperatura ambiente mientras sigue en el vaso, luego de enfriado se retira el agua del vaso y la mezcla se vacía sobre una toalla de papel y se le permite secarse.

Observación visual

Se estima visualmente el porcentaje de cemento asfáltico retenido luego del hervido con la escala de rangos estándar. No se debe usar una fotografía. La mezcla debe ser revisada un día después de haberla dejado secar debido a que el desvestimiento no es tan evidente cuando la mezcla todavía sigue mojada.

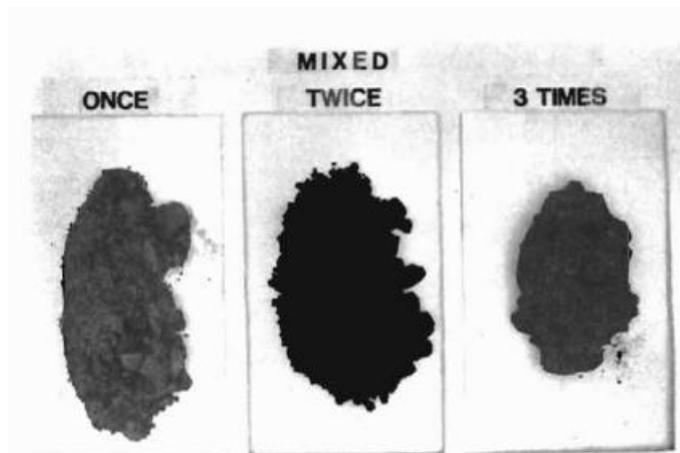
Notas

Los resultados del *boiling test* indicaron que el recalentado y re-mezclado de la mezcla asfalto-agregado incrementaba la cantidad de asfalto retenido. Se preparó un grupo de especímenes para ser mezclados una vez, otro grupo para ser mezclado dos veces y un último grupo para mezclarse tres veces. Los resultados se pueden ver en las siguientes imágenes. Ver figuras 22, 23 y 24.



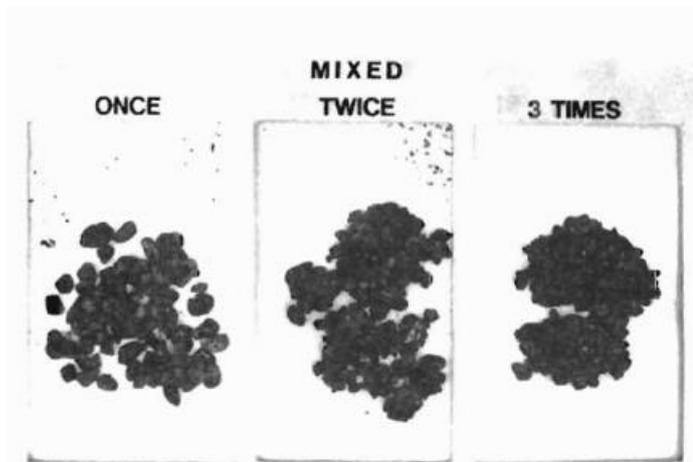
Fuente: Kennedy et al, 1984

Figura 22. Tabla de porcentajes retenidos del Texas boiling test



Fuente: Kennedy et al, 1984

Figura 23. Influencia del número de mezclados en arena fina



Fuente: Kennedy et al, 1984

Figura 24. Influencia del número de mezclados en grava de río

3.3.1.3- Efecto del agua sobre mezclas asfálticas usando agua hirviendo

Según la norma ASTM D 3625 – 96 este es un ensayo rápido para usarse en campo y determinar visualmente la pérdida de adherencia de las mezclas asfálticas sueltas, sometiéndolas a la rápida acción del agua hirviendo.

Preparación de la muestra

Se prepara una muestra de agregado mezclado con asfalto según procedimientos establecidos de laboratorio o si se obtiene en planta, la preparación de la mezcla debe seguir lo establecido la norma D979. La temperatura de la muestra debe ser menor al punto de ebullición del agua, pero no menor a 85°C.

Procedimiento

Se vierte aproximadamente 950 ml de agua destilada en un recipiente de vidrio y se lleva el agua a su punto de ebullición. Se añade 250 g de mezcla en el agua hirviendo y se deja hervir por 10 minutos.

Luego de los 10 minutos se retira el agua de la fuente de calor, y con un papel toalla se limpia la superficie del agua para evitar que el asfalto se vuelva a pegar en el agregado. Luego se retira la muestra del recipiente y se coloca en un papel toalla y se realiza la evaluación visual, cualquier capa fina transparente se considera completamente cubierto. Para comparación se puede hacer un ensayo gemelo y en lugar de poner la muestra sobre papel toalla, se reemplaza el agua caliente por agua fría y se observa la cantidad de agregado que retiene su cubrimiento original.

3.3.1.4- Ensayo de Adsorción Neta (SHRP A 341)

Este ensayo fue desarrollado para evaluar la afinidad del asfalto con el agregado y para determinar qué tan sensible es la interface agregado – asfalto al agua (Curtis et al, 1993). Para este ensayo existen dos métodos, el método de la columna y el método del lote (Stroup-Gardiner et al, 1994).

Método Columna

Materiales

50 g de agregado pasante del tamiz No 4

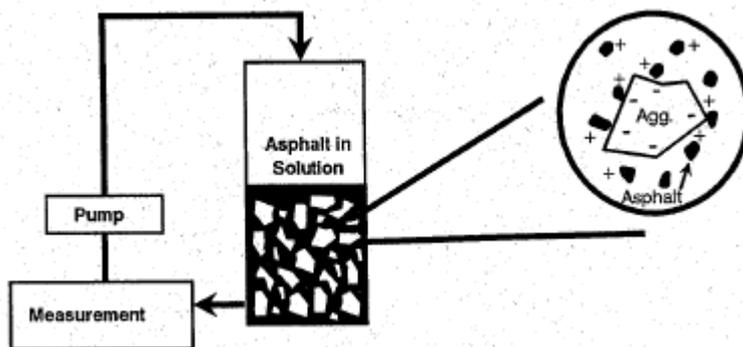
Horno eléctrico que tenga temperatura de 135°C o mayor

Procedimiento

Se realiza el revestimiento del agregado usando una solución de asfalto en tolueno, en un sistema de recirculación que consiste en una columna de cromatografía de temperatura constante donde está contenido el agregado y por ahí fluye constantemente el asfalto. La temperatura de la columna se mantiene a 25°C, y el tiempo de adsorción es de 6 horas. Se usa un juego de 3 columnas ejecutando el ensayo simultáneamente. Se monitorea el cambio de concentración de asfalto determinando visualmente la absorción del asfalto en la solución de tolueno antes y después de la adsorción y después de la des adsorción. La adsorción neta se obtenía sustrayendo la

cantidad de asfalto des adsorbida con agua de la cantidad de asfalto absorbida inicialmente, donde la absorción neta = $Asp - D_w$.

El procedimiento comienza con una concentración inicial de 0.6g/L de asfalto en solución de tolueno. El asfalto se envejece en una fina capa dentro de un horno por 5 horas a 163°C antes del ensayo. Del análisis se retira una muestra de 4 ml al inicio del ensayo para medir la concentración de asfalto en la solución. Después de 6 horas se toma otra muestra de 4 ml de cada columna y se determina la cantidad de asfalto adsorbido. Se induce la des adsorción con la introducción de una solución de agua durante 2 horas. La tercera y última lectura se realiza después de este tiempo. Lecturas son visibles usando un espectrofotómetro de UV y celdas de 1 cm se usaron antes de introducir el agregado y después de 6 horas de adsorción y luego de 2 horas de la des adsorción. Ver Figura 25.



Fuente: Stroup-Gardiner et al, 1994

Figura25.Esquema del ensayo de adsorción neta

Método del Lote

En este método en lugar de usar agregado lavado pasante del tamiz No. 4 y retenido del No. 200, este se desarrolló usando agregado de un solo tamaño. Esto trajo dudas debido a que usar agregado de un solo tamaño no

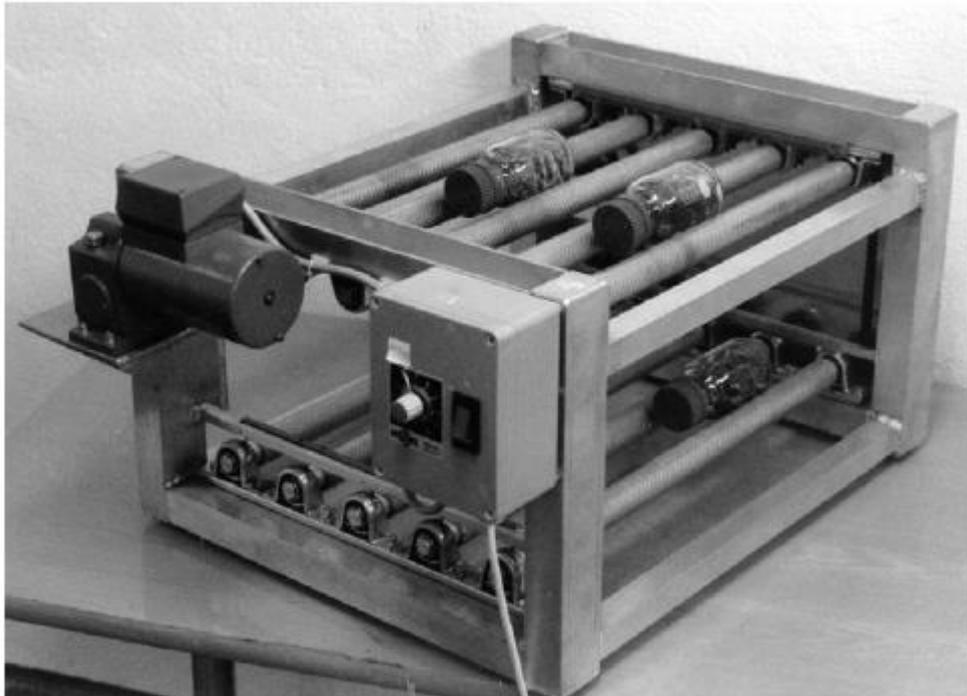
es representativo de toda la química de la gradación completa del agregado. Por lo que se modificó el método para usar toda la gradación usando la misma escala de parámetros usados en el método de la columna.

Esta variación usa la misma cantidad de agregado, solvente y cemento asfáltico, pero los materiales son colocados dentro de un frasco de Erlenmeyer de 300 ml. La mezcla se agita durante 1 hora en una mesa vibratoria orbital, y se deja reposar durante 1 hora más y se retiran 4 ml de solvente para determinar la concentración de asfalto en la mezcla. Se agita la muestra durante 10 minutos más y se deja asentar durante 50 minutos y se toma una segunda lectura. Se deja el frasco reposando toda la noche y se vuelve a repetir el proceso. Se añade agua al frasco, y se repite dos veces el proceso antes de tomar la lectura de desadsorción.

3.3.1.5- Ensayo de Botella Rotatoria

Para este ensayo se usa agregado lavado pasante del tamiz de 8 mm y retenido en el de 5.6 mm. Se calienta el agregado a temperatura de mezcla y se mezcla con 3.4% de asfalto (en función del peso de la mezcla). Antes de mezclar el asfalto con el agregado se le añade un agente de adhesión unos 30 ± 5 minutos antes. Porciones de la mezcla se guardan en recipientes metálicos o en papel silicona a temperatura ambiente durante la noche antes de ensayarlos. Se toman tres muestras de 150 g cada una y se introducen a sus respectivas botellas por partículas individuales o por pequeños grumos. Se añade a las botellas agua destilada fría. Una vara de vidrio se inserta en la botella junto con un tubo de caucho y se fija entre el fondo y la tapa enroscable.

Se colocan las botellas en la máquina de rotación de botellas y se las hace girar a una velocidad de 60 rpm a temperatura ambiente. Ver Figura 26. Cada 6, 24, 48 y 72 horas de rotación se detiene la máquina para observar y estimar el grado de cobertura en cada botella. Se reporta un promedio de lecturas de dos operadores de las 3 botellas (Jørgensen, 2002).



Fuente: Jørgensen, 2002

Figura 26. Máquina de rotación de botellas

3.3.1.6- Método de Riedel-Weber (adhesividad de los ligantes Bituminosos a los agregados finos)

Objetivo

Determinar la adhesividad de los ligantes asfálticos respecto de una arena natural o triturada, cuando la mezcla se somete a la acción de soluciones de carbonato sódico de concentraciones crecientes, es el objetivo de este método que es aplicable a la mayoría de los tipos de ligantes, ya sean asfaltos líquidos, alquitranes, emulsiones asfálticas o asfaltos de penetración.

Equipo y materiales

Tubos de ensayo – Doce (12) tubos de ensayo de 20 mm de diámetro y 200 mm de altura.

Tamices – 600 μm (No.30) y 212 μm (No.70).

Balanza – Suficiente para determinar masas de 200 g, con precisión 0.01 g.

Horno – El horno deberá estar provisto con un dispositivo de termostato y con circulación forzada de aire, y será capaz de mantener la temperatura a $145^\circ \pm 5^\circ \text{C}$ ($293^\circ \pm 9^\circ \text{F}$).

Material auxiliar – Cuarteador de agregados finos, recipiente de porcelana, gradilla (soporte) para tubos de ensayo, vasos de vidrio de 50 cm^3 , pinza de madera, varillas de vidrio, etc.

Las soluciones de carbonato sódico necesarias para el ensayo serán de concentración creciente, desde M/256 para la más diluida, hasta M/1 para la más concentrada. Las soluciones se prepararán con carbonato sódico Na_2CO_3 puro, anhidro, y agua destilada. La concentración molar, M/1, se obtendrá disolviendo 106 g (masa molecular) de carbonato sódico en agua destilada hasta un volumen de 1 litro. Las soluciones de concentración molar M/2, M/4, M/8, etc., se obtendrán diluyendo la solución precedente, o disolviendo la cantidad correspondiente de carbonato sódico en 1 litro de agua destilada, tal como se indica en la Tabla 1 de la norma I.N.V. E – 774 – 07

Tabla 1. Cantidades para preparar un litro de soluciones de ensayo

Molaridad	g de Na_2CO_3 / litro de solución
M/256	0.414
M/128	0.828
M/64	1.656
M/32	3.312
M/16	6.625
M/8	13.23
M/4	26.5
M/2	53.0
M/1	106.0

Fuente: Instituto Nacional de Vías, Norma I.N.V. E – 774 – 07

Figura 27. Soluciones de Carbonato de Sodio Para el Ensayo de Riedel-Webber

Procedimiento

Preparación – Cuando la muestra de agregado recibida en el laboratorio proceda de piedra de cantera o grava sin clasificar, se procederá a su cuarteo y posterior trituración hasta obtener una arena de dicho material. Si la muestra de agregado recibida en el laboratorio es una arena de trituración, se separa por sucesivos cuarteos, el material necesario para el ensayo. La cantidad aproximada de agregado fino necesaria para el ensayo será de 200 g. Se pasa por tamices de 600 μm (No.30) y 212 μm (No.70); el material comprendido entre estos tamaños se recoge como material de ensayo, el cual se lava para eliminar totalmente el polvo que pueda contener. Se seca en horno a temperatura de $145^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ ($293^{\circ} \pm 9^{\circ} \text{F}$), durante 1 hora, aproximadamente, o hasta masa constante.

Preparación de la mezcla agregado-ligante – Cuando el ligante asfáltico que se va a emplear en el ensayo, sea cemento asfáltico, la mezcla se preparará en la proporción de 71 volúmenes de agregado, por 29 volúmenes de ligante asfáltico. La mezcla del agregado con cementos asfálticos se realiza a una temperatura de 140° a 175°C , dependiendo del tipo de ligante.

En esos casos, dicha mezcla se realiza en un recipiente de porcelana, calentado a la temperatura indicada, donde se colocan las cantidades de agregado y ligante asfáltico, correspondientes; se mezclan ambos materiales con una varillas de vidrio hasta conseguir una masa perfectamente homogénea. Una vez preparada la mezcla, se deja enfriar durante 1 hora a temperatura ambiente sin tapar el recipiente de porcelana. Cuando el ligante que se utilice en el ensayo sea emulsión asfáltica, la mezcla será preparada en la proporción de 71 volúmenes de agregado por 95 volúmenes de emulsión al 50% de concentración. La mezcla del agregado con emulsión asfáltica se produce a temperatura ambiente, siguiendo el procedimiento indicado antes para agregado-ligante. Una hora después de preparada la mezcla, se decanta el exceso del líquido y se deja en reposo durante 24 horas sin tapar el recipiente de porcelana.

Ejecución del ensayo – Se pesan en la balanza 11 porciones de la mezcla agregado ligante, cada una de 0.5 g, con aproximación de 0.01 g. Cada una de las porciones de mezcla se introduce en un tubo de ensayo. Los tubos se numeran correlativamente del cero al diez. A continuación, en el tubo de ensayo marcado con el número cero y sobre los 0.5 g de mezcla agregado-ligante, se vierten 6 cm³ de agua destilada, marcando la altura que se alcanza en el tubo. Se sujeta el tubo de ensayo con la pinza de madera y se calienta cuidadosamente sobre la llama de un mechero de gas, hasta la ebullición suave del líquido, que se prolongará durante 1 minuto.

Terminado el período de ebullición, se repondrá el volumen del líquido perdido por evaporación, con una nueva cantidad de agua destilada, decantándola cuidadosamente en el tubo de ensayo, hasta alcanzar la línea marcada en el tubo. Una vez reemplazado dicho volumen, se agita vigorosamente el tubo con su contenido durante 10 segundos. Seguidamente se procede a la observación del aspecto que ofrece la mezcla agregado-ligante en el tubo de ensayo, de acuerdo con los siguientes criterios:

a) El desprendimiento entre el ligante y el agregado se considerará total, cuando prácticamente todos los granos de la arena aparezcan limpios; esto se puede comprobar porque los granos estarán sueltos o porque, al hacer rodar entre los dedos el tubo de ensayo, los granos de arena seguirán libremente la rotación dada al tubo.

Nota: Para confirmación, se puede utilizar como prueba patrón, un tubo de ensayo con agregado sin ligante que contenga 5 o 6 cm³ de agua destilada y, se compara su aspecto o movimiento al rodar el tubo de ensayo entre los dedos.

b) El desprendimiento entre el ligante y el agregado se considerará parcial, cuando los granos de arena aparezcan semi-limpios, manteniendo una cierta cohesión entre ellos; en este caso, los granos de arena todavía envueltos por el ligante permanecen aglomerados en el tubo de ensayo.

c) Para la apreciación de la adhesividad de una mezcla agregado-ligante, después de actuar sobre ella cada solución de ensayo, no se tendrá en cuenta el ligante que aparezca en la superficie del líquido durante la ebullición; sólo debe ser atendido el aspecto que ofrezca la masa de mezcla, que queda en el fondo del tubo. Cuando la prueba preliminar muestre que la adhesividad de la mezcla agregado-ligante es buena, es decir, que no hay desprendimiento total del ligante de los granos de arena, por acción del agua destilada, se vuelve a repetir todo el proceso indicado en este numeral, utilizando ahora el tubo de ensayo marcado con el número 1, vertiendo sobre él 6 cm³ de la solución de carbonato sódico con concentración M/256; se repiten las operaciones de ebullición y reemplazo de volumen evaporado, y se comprueba si se ha producido desprendimiento total.

Si el desprendimiento sólo es parcial, se repetirá todo el proceso, tal como se indicó anteriormente, pero utilizando ahora el tubo de ensayo marcado con el número 2. Se prosigue en esta forma, utilizando las soluciones de carbonato sódico con concentraciones crecientes M/128, M/64, M/32, etc., y los tubos de ensayo marcados con los números 2, 3, 4, etc., que sean necesarias hasta alcanzar el desprendimiento total del ligante, de la superficie del agregado.

Resultados

Expresión de los resultados.- Se expresa como índice de adhesividad (Riedel-Weber), el número correspondiente a la menor de las concentraciones ensayadas con la que se produce un desprendimiento total del ligante bituminoso de la superficie del agregado, de acuerdo con la Figura 28.

Tabla 2. Índice de Riedel- Weber

Solución de Ensayo	Índice de Adhesividad
0	0
M/256	1
M/128	2
M/64	3
M/32	4
M/16	5
M/8	6
M/4	7
M/2	8
M/1	9
Si no hay desprendimiento total con la solución 9	10

Fuente: Instituto Nacional de Vías, Norma I.N.V. E – 774 – 07

Figura 28. Clasificación visual según el desprendimiento observado en el ensayo

Si se produjera un desprendiendo parcial (no total) del ligante asfáltico con alguna de las soluciones referidas en la Tabla 2, se expresará la adhesividad con dos números: el correspondiente a la concentración menor con la que se produce algún desprendimiento y el que produce el desprendimiento total de acuerdo con la tabla. Cuando el agua destilada produce desplazamiento total del ligante asfáltico, el índice de adhesividad es 0. Cuando la solución molar de carbonato sódico M/1 no produce desprendimiento del ligante asfáltico, el índice de adhesividad es 10.

3.3.1.7- Ensayo de Inmersión Total en Agua

Es un ensayo que consiste en piedra triturada de 14 mm de tamaño uniforme revestida con una cantidad conocida de asfalto. El agregado envuelto luego se sumerge en agua destilada a 25°C por 48 horas. Luego de ese tiempo se evalúa visualmente la cantidad de asfalto que se separado del agregado en porcentaje (Shell Bitumen, 1991).

El problema fundamental de este ensayo es su naturaleza subjetiva, cuyos resultados son muy difíciles de reproducir. A menos que el personal esté capacitado y sea muy experimentado. Sin embargo en ciertos casos los

resultados positivos de esta prueba pueden tener pobre desempeño en las vías y pobres resultados en laboratorio puede tener buen desempeño en las vías(Shell Bitumen, 1991).

3.3.1.8- Resistencia al desprendimiento del asfalto de los materiales pétreos en las mezclas asfálticas por acción del agua

Este ensayo obtenido de las recomendaciones del AMAAC (Asociación Mexicana del Asfalto, 2010) sirve para determinar de manera visual la resistencia al desprendimiento del asfalto de materiales pétreos por acción del agua. Esta prueba es un ensayo práctico que permite observar la falta de adhesión en los agregados recubiertos con asfalto caliente no compactado por acción del agua.

Para este ensayo se necesita platos de aluminio, balanza, pinzas, cocineta, termómetros, baño de agua, tamices, horno y cemento asfáltico.

Preparación de la muestra

Si la muestra de material pétreo se ha recibido en el laboratorio saturado, se deja escurrir y secar superficialmente para luego cuartear la muestra y obtener alrededor de 50 kg del material.

Se procede a tamizar el material y se toma el material pasante del tamiz de 12.5 mm (1/2 pulg) y el retenido del tamiz de 9,5 mm (3/8 pulg).

Se lava el material para remover todos finos posibles y se deja remojando el material pétreo en un recipiente con agua durante 24 horas.

El asfalto se lo calienta en un recipiente metálico en un horno a una temperatura de 140 ± 5 °C durante dos horas. La cantidad a usarse será de 5% con respecto al peso del material pétreo.

Se vacía el asfalto caliente en los recipientes metálicos, se registra el peso del asfalto que se añadió en cada recipiente (se recomienda 100g) para luego adicionar el o los aditivos en el caso de utilizarse para mejorar la adherencia utilizando diferentes dosis (se adiciona el aditivo como

porcentaje con respecto a la cantidad de asfalto). Se mezcla el asfalto con el aditivo hasta homogenizar el aditivo en el asfalto usando una varilla de vidrio.

Se coloca los recipientes en un horno a $140 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 1 hora.

Procedimiento de la prueba

Adicionar 30 gramos de asfalto en el plato de aluminio y distribuir uniformemente en toda la superficie del plato mientras este se calienta en una fuente de calor teniendo en cuenta que este no se exceda de 150°C y después enfriarlo a temperatura ambiente

Secar superficialmente 50 partículas de material pétreo y colocarlos sobre el plato de aluminio presionando manualmente y colocar el plato con el material pétreo en un horno durante 24 horas a $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Se retira el plato del horno y se lo coloca en un baño de agua durante 4 días a $55 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Luego de los 4 días poner el plato en otro baño de agua a $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ reposando durante 2 horas.

Se saca el plato del baño y con unas pinzas se despega el material del plato utilizando un movimiento vertical y se observa el área que estuvo en contacto con el asfalto.

Las piedras luego se dividen en 3 grupos:

Completamente desprendida. Menos de 25% de área cubierta del total del área que estuvo en contacto con el asfalto

Parcialmente desprendida. Entre un 25 y 75% de área cubierta del área total que estuvo en contacto con el asfalto

No desprendida. Entre un 75 y 100% de área cubierta del total del área que estuvo en contacto con el asfalto

Cálculos y resultados

Por observación visual, se registra el porcentaje del área con o sin cubrimiento asfáltico de cada partícula de material pétreo de acuerdo con las siguientes condiciones:

Completamente desprendido. Cuenta como 0 unidades

Parcialmente desprendido. Cuenta como 1 unidad

No desprendido. Cuenta como 2 unidades

Se suma todas las unidades y se reporta en forma de porcentaje de cubrimiento total. Este porcentaje puede ir de 0 a 100%, siempre expresándose como enteros.

3.3.2- Ensayos a mezclas compactadas

Estos ensayos, a diferencia de los ensayos de mezcla suelta, se obtienen resultados cuantitativos tomando en cuenta los factores de tráfico, ambientales y características de la mezcla. Pero así mismo estas pruebas necesitan de equipos especializados más caros y necesitan de más tiempo y dinero para realizarse (Solaimanian et al, 2003).

3.3.2.1- Ensayo Lottman

Este ensayo se desarrolló con el fin de evaluar que tan propensa es una mezcla bituminosa de sufrir desvestimiento. El ensayo usa briquetas Marshall de 102x64 mm (4x2.5 pulg.), Hveem de 102x51 mm (4x2 pulg.) o cualquier briqueleta con tamaños similares y compactados por otros métodos incluidos los métodos giratorios. Las briquetas ensayadas son evaluadas en condiciones secas y condiciones húmedas. Las condiciones húmedas a las que se someten los especímenes son un proceso de saturación del 100%, a un ciclo de congelamiento y descongelamiento (efecto a largo plazo) o solo

someterlo a ciclo de baño caliente a 60°C ó 140°F (efecto de corto plazo) antes de ser sometidos a tracción indirecta. El ensayo se lo realiza con las probetas a una temperatura de 12.8°C (55°F) a una deformación constante de 1.65 mm/min (0.065 pulg/min). Luego de este ensayo se obtiene la Razón de Esfuerzo de Tracción (TSR) dividiendo el esfuerzo promedio de las muestras con condicionamiento húmedo para el promedio de las probetas secas o sin condicionamiento. El mínimo TSR sugerido por Lottman es 70%.

3.3.2.2- Ensayo Tunncliff – Root (ASTM D 4867)

Este ensayo es una variación del ensayo Lottman modificando las condiciones a las que se someten las briquetas. En este, las muestras usualmente no se someten a un ciclo de congelamiento, aunque en la normativa esta acción aparece como opcional. Tampoco se envejecen las mezclas antes o después de compactar.

Existe una preferencia general por este ensayo debido a que comparado con el de Lottman, este se realiza en menor tiempo. Pero no tiene tanta severidad del condicionamiento Lottman, que permite que algunas mezclas que no pasan dicho ensayo, lo pasan por el de Tunncliff – Root.

A continuación se detalla el procedimiento de acuerdo a la norma ASTM D 4867.

Preparación de la muestra

Se requieren como mínimo 6 núcleos para realizar este ensayo. Separarlos en dos grupos de 3 para que tengan el mismo promedio de vacíos. Si el espesor de capa es menor a 63.5 mm (2.5 in) usar núcleos de 100 mm (4 in). Para capas más gruesas se puede usar núcleos de 100 (4 in) o 150 mm (6 in).

Para mezclas de laboratorio, se utilizarán muestras de 100 mm de diámetro y 63.5 ± 2.5 mm (2.5 ± 0.1 in) de espesor o de 150 mm (6 in) de diámetro por

95 ± 5 mm (3.75 ± 0.20 in) de espesor. Los especímenes de mayor diámetro deberán usar agregado de 25 mm (1 in) o mayor en la mezcla. Se debe tener suficiente material como para hacer ocho probetas con el contenido de asfalto recomendado para las muestras. Se requerirá material de mezcla extra para establecer la compactación requerida para determinar la gravedad específica máxima de la mezcla, si estos valores no se conocen.

Luego de hacer la mezcla, colocar la mezcla en las bandejas de aluminio y espárzalas hasta que quede con un espesor de 25 mm (1 in). Permitir que se enfríen a temperatura ambiente por 2 ± 0.5 horas. Luego colocar la mezcla en el horno por 16 ± 1 horas para curarla. Luego del curado se lo deja en el horno por 2 horas ± 10 minutos a la temperatura de compactación +/- 3°C (5°F). Para producción en planta, omitir el curado y simplemente llevar a la temperatura de compactación. Compactar los especímenes con un contenido de vacíos de 7 ± 0.5 por ciento.

Después de retirar las muestras de los moldes, almacenarlas en un cuarto con temperatura controlada durante 24 ± 3 horas.

Determinar la gravedad específica máxima de la mezcla suelta como se especifica en el método AASHTO-T166. Medir el diámetro y espesor para determinar la densidad aparente de cada muestra. Calcular el volumen de vacíos de cada muestra. Un grupo será almacenado en una habitación temperada hasta ser ensayada y el otro grupo será sometido a condiciones húmedas antes de ensayarse. El grupo que no será condicionado debe ser sellado en bolsas plásticas o con envoltura plástica.

Condicionamiento de humedad

Poner los especímenes en un contenedor al vacío y llenarlo con agua destilada hasta que se cubran por lo menos 25 mm (1 in) (Figura 29). Aplicar un vacío parcial (13 - 67 kPa 10 – 26 in Hg) en el contenedor por 5 a 10 minutos. Liberar el vacío y permitir que los especímenes sigan sumergidos en el agua por otros 5 a 10 minutos. Determinar la densidad aparente de las

muestras saturadas. Comparar la masa de las muestras saturadas superficialmente secas con la masa de las muestras antes de sumergirlas, es será el volumen de agua absorbida. Comparar el volumen de agua absorbida con el volumen de vacíos para determinar el grado de saturación. El porcentaje de agua absorbida tiene que estar entre 55 a 80 por ciento del volumen original de vacíos. Si es menor a 55 por ciento repetir el proceso de saturación. Si es mayor a 80 por ciento la muestra se ha dañado y debe ser desechada y reemplazada.

Una vez saturadas apropiadamente, envolver bien las muestras con envoltura plástica y colocarlas en una bolsa plástica con 10 ml de agua y sellar la bolsa. Colocar la bolsa en un congelador a $-18 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ($0 \pm 5^{\circ}\text{F}$) por lo menos 16 horas. Remover las bolsas del congelador y colocarlas en un baño de agua a $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($140 \pm 1.8^{\circ}\text{F}$) por 24 ± 1 horas. Luego de colocar en el baño de agua, remover lo más pronto posible la bolsa plástica y la envoltura de las muestras.

Nota: El ciclo de congelamiento es opcional

Procedimiento del ensayo

Luego de remojar las muestras durante 24 horas, retirar las muestras y colocarlas en otro baño a $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ($77 \pm 1^{\circ}\text{F}$) por 2 horas \pm 10 minutos. Las muestras sin condicionamiento, todavía selladas en plástico, también debe ser colocadas en el baño a 25°C por 2 horas.

Retirar un espécimen del baño, medirlo y anotar el espesor, colocarlo en el anillo de carga.

Aplicar la carga a la muestra (Figura 29) a una velocidad constante de 50 mm (2 pulgadas) por minuto. Apuntar la carga máxima y continuar con el ensayo hasta la rotura de la muestra. Retirar la muestra y romperla donde se hizo la grieta. Mirar dentro de la muestra y estimar el porcentaje de agregado desvestido. Apuntar las observaciones.

Cálculos

Calcular el esfuerzo de tracción con la siguiente ecuación

$$S_t = \frac{2P}{\pi tD}$$

Donde:

S_t = Esfuerzo de tracción, Pa (psi)

P= carga máxima, Newtons (libras)

t= espesor de la muestra, mm (pulgadas)

D= diámetro de la muestra, mm (pulgadas)

La razón de esfuerzo a tracción (TSR) se calcula dividiendo el esfuerzo promedio de tracción de todas las muestras condicionadas para las muestras de control sin condicionamiento.

Un TSR de por lo menos 80 por ciento es requerido normalmente para asegurarse que la mezcla no va a estar sujeta a desvestimiento.



Fuente: Multi-Regional Training and Certification, 2006

Figura 29. Preparación, condicionamiento y rotura de las muestras por el ensayo Tunnickliff – Root

3.3.2.3- Ensayo Lottman Modificado (AASHTO T 283)

Este método, tal como se observa en la Figura 30, es muy parecido al Tunnickliff – Root pero con la diferencia de que se incluye en su procedimiento el envejecimiento de la mezcla suelta antes de compactarse (16 horas en horno a 60°C) y la aplicación de un ciclo de congelamiento (15 horas a -18°C) y descongelamiento (24 horas a 60°C) en las muestras previamente saturadas.

	"Original" Lottman (Ref. 5)	Modified Lottman	
		AASHTO T 283	ASTM D 4867
Short-Term Aging	None	Loose mix: 16 hrs @ 60°C Compacted mix: 72-96 hrs @ 25°C	None
Air Voids	3% to 5% *	6% to 8%	6% to 8%
Sample Grouping	Random	Average air voids of two subsets should be equal	Average air voids of two subsets should be equal
Saturation	100% *	55% to 80%	55% to 80%
Freeze	15 hrs @ -18°C	Min. 16 hrs @ -18°C	Optional: 15 hrs @ -18°C
Hot Water Soak	24 hrs @ 60°C	24 hrs @ 60°C	24 hrs @ 60°C
Strength Property	Indirect tension or diametral modulus	Indirect tension	Indirect tension
Loading Rate	1.6 mm/min. @ 13°C	51 mm/min. @ 25°C	51 mm/min. @ 25°C
Precision Statement for a Single Operator	10% for TSR	None	8 psi for indirect tensile strength (wet or dry)

* Not specified, but representative of a typical value encountered.

Fuente: Aschenbrener et al, 1993

Figura 30. Tabla de comparación del Lottman original con las recomendaciones actuales

3.3.2.4- Ensayo de inmersión – Compresión

Este método describe el procedimiento para medir la pérdida de resistencia a la compresión que se produce por la acción del agua sobre las mezclas asfálticas compactadas, preparadas con cementos asfálticos. En el ensayo, se obtiene un índice numérico de la pérdida producida al comparar las resistencias a la compresión simple obtenidas entre probetas recién

moldeadas y curadas al aire y probetas duplicadas sometidas a la acción del agua, en las condiciones que se prescriben en esta norma.

Esta norma no considera los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad de quien la emplee establecer prácticas apropiadas de seguridad y salubridad y determinar la aplicación de limitaciones regulatorias antes de su empleo.

Equipo

Baño de agua – Para la inmersión de las probetas, se debe disponer de un baño de agua con la suficiente capacidad para mantener las probetas totalmente sumergidas durante todo el tiempo que dure la inmersión. El baño debe estar provisto de un equipo de control automático, capaz de regular y mantener la temperatura exigida en el ensayo con un margen de error de $\pm 1^\circ \text{C}$. ($\pm 1.8^\circ \text{F}$). El baño debe estar construido con forro de cobre, acero inoxidable, o cualquier material inalterable en las condiciones del ensayo. Se debe utilizar agua destilada o bien agua tratada para eliminar los electrolitos, la cual se desechará después de cada inmersión, vaciando y limpiando adecuado del baño.

Baño de agua para ajuste de temperatura de prueba – Un baño de agua con control manual o automático de temperatura y con la capacidad adecuada para mantener las probetas a $25^\circ \pm 1^\circ \text{C}$ ($77^\circ \pm 1.8^\circ \text{F}$), antes de la rotura a compresión. Cualquier recipiente adecuado debe tener un tanque de tamaño suficiente para permitir la inmersión total de los especímenes.

Balanza – Una balanza con accesorios adecuados para pesar las probetas al aire y en el agua, para determinar sus densidades, la cantidad de absorción y cualquier cambio que resulte del ensayo de inmersión. Instituto nacional de Vías E 738 - 2

Placas – Placas planas de vidrio o metal para soportar las probetas, tanto durante la inmersión como durante su posterior manejo, para evitar su rotura o deformación.

Especímenes de prueba

Dimensiones de las probetas – Generalmente, las probetas para este ensayo serán cilíndricas, de 101.6 mm (4pulg.) de diámetro y 101.6 ± 2.5 mm (4 ± 0.1 pulg.) de altura. Se admite, sin embargo, que se puedan fabricar probetas cilíndricas de otros tamaños, desde probetas con 50.8 mm (2 pulg.) de diámetro y altura para las más pequeñas, hasta probetas con 203.2 mm (8 pulg.) también de diámetro y altura para las mayores, aunque, debido a que el tamaño de la probeta influye en los resultados del ensayo de resistencia a compresión, se deberán tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La altura de la probeta será igual a su diámetro ± 2.5 %.
- El diámetro de la probeta no será inferior a cuatro veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso empleado.
- En ningún caso, el diámetro de la probeta será inferior a 50.8 mm (2 pulg.).
- Que la velocidad de deformación se mantenga constante durante el ensayo de compresión

Preparación de los agregados – Las distintas fracciones de agregado grueso, fino y llenante necesarias para la mezcla, se prepararán por separado, combinándolas posteriormente para la obtención de la granulometría proyectada. Se recomienda el fraccionamiento de los agregados con los siguientes tamices: 25.0 mm (1 pulg.), 19.0 mm (3/4 pulg.), 9.5 mm (3/8 pulg.), 4.75 mm (No.4), 2.36 mm (No.8), 425 μ m (No.40),

75 μm (No.200). Los agregados deben ser calentados no más de 28° C (50° F) por encima de la temperatura de mezcla del ligante.

Temperaturas de mezcla y compactación – Se obtienen de una curva de susceptibilidad térmica (temperatura vs. viscosidad cinemática) para ligantes no modificados. Si el ligante empleado es un cemento asfáltico, sus temperaturas de mezcla y compactación serán las adecuadas para que su viscosidad en el proceso de mezcla sea de 170 ± 20 cSt (85 ± 10 s SF) y en el de compactación de 280 ± 30 cSt (140 ± 15 s SF). Si se utiliza un alquitrán, las viscosidades respectivas serán de $25 \pm 3^\circ$ Engler para la mezcla y $40 \pm 5^\circ$ Engler para la compactación.

Preparación de las mezclas – Todas las probetas se prepararán individualmente, limitando las cantidades en cada lote a las requeridas para una probeta. La cantidad de ligante calculada se calienta a la temperatura necesaria, en un recipiente que en ningún caso estará en contacto con la llama o placa de calefacción sin interponer la debida protección, agitándolo continuamente mientras dure el calentamiento.

Se podrá optar también por calentar el material bituminoso necesario para el trabajo de una jornada en un recipiente con baño interpuesto de parafina; en este caso, todo el material sobrante de la jornada será desechado. Las cantidades pesadas de cada agregado se mezclarán en seco completamente, calentándose a continuación a la misma temperatura que el ligante. Cuando los agregados y el ligante hayan alcanzado la temperatura de mezcla, se carga el recipiente de mezclado, previamente calentado a una temperatura aproximada a la de los agregados, con la cantidad necesaria de éstos, ya premezclados, pesando a continuación sobre el mismo recipiente la cantidad calculada de ligante e iniciando seguidamente el proceso de mezcla, cuya duración deberá estar comprendida entre 1.5 y 2 minutos.

Se debe evitar una excesiva pérdida de calor durante el tiempo de mezclado, la que se puede disminuir colocando debajo del recipiente de mezcla una

pequeña placa de calefacción, un baño caliente de arena o una lámpara de rayos infrarrojos. Cuando la mezcla se haya completado, la temperatura de esta deberá estar por lo menos 3° C (5° F) por encima de la temperatura de compactación, de otra manera se deberá desechar la mezcla y repetir de nuevo el proceso de mezclado, teniendo las debidas precauciones para mantener la temperatura. La primera mezcla fabricada se utilizará para embadurnar las paletas y paredes de la mezcladora, extrayéndola seguidamente y raspando con una espátula flexible el interior del recipiente y las paletas, no debiendo emplearse en esta operación trapos ni disolventes hasta cuando haya finalizado el trabajo o hubiera que cambiar de ligante. En primer lugar, se fabricará una probeta de prueba, con objeto de calcular la cantidad de mezcla necesaria para conseguir la altura necesaria especificada; si se desea, se puede destinar para esta finalidad la mezcla inicial empleada en embadurnar la mezcladora.

Para las mezclas provenientes de plantas asfálticas en caliente, se tomarán muestras representativas de los lotes y se reducirán hasta obtener un poco más de la cantidad necesaria para la elaboración de las probetas. Se fabrica una probeta de prueba con objeto de calcular la cantidad de mezcla necesaria para lograr la altura especificada anteriormente, en este proceso se debe tener cuidado de no botar el material fino o grueso o ambos a fin de mantener las proporciones de la gradación. La mezcla se deposita en un recipiente apropiado y se procede a su calentamiento en un horno hasta alcanzar la temperatura indicada para el asfalto de la mezcla. Una vez se haya completado el mezclado en el recipiente, la temperatura de la mezcla deberá estar por lo menos 3° C (5° F) por encima de la temperatura de compactación y se inicia inmediatamente la compactación de las probetas o se colocan en un horno por un periodo corto de tiempo para permitir un manejo más eficiente de las muestras, sin embargo las muestras no deben permanecer en el horno por más de una hora

Compactación de las probetas – Las mezclas recién fabricadas se dejarán enfriar en la mezcladora hasta cuando alcancen la temperatura de

compactación indicada anteriormente. Cuando se vaya a realizar el ensayo con mezclas fabricadas anteriormente y frías, se calentarán éstas en una estufa en forma suave y uniforme, hasta la temperatura de compactación correspondiente.

Los moldes y los pistones de compactación se calientan por una hora en un baño de agua manteniendo la temperatura justo por debajo del punto de ebullición del agua o se precalientan en un horno por un período de dos horas manteniendo una temperatura entre 93.3° y 135° C (200° y 275° F); se retiran y se engrasa ligeramente su interior mediante un trapo limpio impregnado con algunas gotas de aceite, colocando finalmente el molde sobre el pistón inferior, intercalando las dos varillas de soporte. Tan pronto como la mezcla haya alcanzado su temperatura de compactación, se vierte aproximadamente la mitad de la misma en el molde, distribuyéndola mediante 25 golpes aplicados con una espátula caliente, aplicando los 15 primeros en la periferia y distribuyendo los restantes al azar; seguidamente, se añade el resto de la mezcla y se aplican en forma similar, otros 25 golpes con la espátula.

En estas operaciones la espátula deberá penetrar lo más profundamente posible en la mezcla, habiéndose encontrado ventajoso el empleo de una espátula con sus bordes redondeados. Finalmente, a la parte superior de la mezcla se le dará un acabado ligeramente cónico o esférico, para facilitar el asentamiento del pistón superior. A continuación, se coloca el pistón superior, y manteniendo todavía las varillas soporte intercaladas, se aplica sobre la mezcla una presión inicial o de asentamiento de 1 MPa (10 kgf/cm²) o de 150 lb/pulg², con objeto de asentar inicialmente la mezcla; se retiran entonces las dos varillas de soporte, para compactar por el sistema de doble émbolo, y se comienza la compactación definitiva de la mezcla mediante la aplicación de una carga creciente, regulando la velocidad lo más uniformemente posible, hasta alcanzar, en un tiempo de 2 a 3 minutos, una presión máxima de 20.7 MPa (210 kgf/cm²) o de 3000 lb/pulg², manteniendo esta presión sobre la mezcla durante 2 minutos. Para las probetas

normalizadas de 101.6 mm (4pulg.) de diámetro, esta presión viene a representar una carga de unos 170 kN.

Las probetas se dejan enfriar dentro del molde durante 2 horas y se extraen a continuación mediante cualquier dispositivo que permita deslizar de una manera suave y uniforme la probeta. Una vez extraídas, se dejarán curar al horno durante un tiempo aproximado de 24 horas antes de ensayarlas, a una temperatura de 60° C (140° F), en el caso de que las probetas requieran un periodo de secado superior a 24 horas, se protegerán de la exposición al aire mediante el uso de recipientes herméticos. Luego de curadas al horno las probetas se dejarán enfriar a temperatura ambiente por un periodo de dos horas.

Determinación de la gravedad específica de los especímenes de prueba

Masa en el aire del espécimen seco – Se determina la masa pesando el espécimen después de que haya permanecido al menos durante 1 hora en el aire, a la temperatura ambiente. Se registra esta masa como A.

Masa en el aire del espécimen saturado y superficie seca – Se seca rápidamente la superficie del espécimen con una toalla húmeda y pésele luego en el aire. Se registra esa masa como B.

Masa del espécimen en agua – Se sumerge el espécimen en un baño con agua a 25° C (77° F) de 4 ± 1 minutos y luego se determina la masa en el agua. Se registra esta masa como C. Si la temperatura del espécimen difiere de la del baño en más de 2° C (3.6° F), el espécimen deberá sumergirse en el baño entre 10 y 15 minutos en cambio de 4 ± 1 minutos. Cada espécimen se debe sumergir y pesar individualmente. Se mide la temperatura del agua y si fuere diferente de $25^{\circ} \pm 1^{\circ}$ C ($77^{\circ} \pm 1.8^{\circ}$ F), se deberá hacer una corrección a la gravedad específica *bulk* para ajustarla a 25° C

Se calcula la gravedad específica *bulk* del espécimen con la siguiente expresión:

$$\text{Gravedad Especifica Bulk} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

A = masa del espécimen seco en el aire, g,

B – C = masa del volumen de agua correspondiente al volumen del espécimen a 25°C.

B = masa en el aire del espécimen saturado y superficie seca, g, y

C = masa del espécimen en agua, g.

Procedimiento

Se dividen las seis probetas en dos grupos de tres, de manera que la gravedad específica promedio de cada uno, sea aproximadamente la misma.

Grupo 1 – Se llevan las tres probetas de este grupo a temperatura de prueba de 25° ± 1° C (77° ± 1.8° F), se almacenan en un baño de aire mantenido a la temperatura de prueba por no menos de 4 horas y se determina su resistencia a la compresión de acuerdo con la norma INV E – 747.

Grupo 2 – Las tres probetas de este grupo se sumergen en un baño de agua regulado a 60° ± 1° C (140° ± 1.8° F) durante 24 horas. Al final de este período se transfieren a un baño de agua regulado a 25° ± 1° C (77° ± 1.8° F) durante dos horas. Se determina a continuación su resistencia a compresión de acuerdo con la norma INV E – 747.

Grupo 2, procedimiento alternativo – Las tres probetas de este grupo se sumergen en un baño de agua regulado a 49° ± 1° C (120.2° ± 1.8° F)

durante cuatro días. Al final de este período se transfieren a un baño de agua regulado a $25^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ C}$ ($77^{\circ} \pm 1.8^{\circ} \text{ F}$) durante dos horas. Se determina a continuación su resistencia a compresión de acuerdo con la norma INV E – 747.

Cálculos

Se calcula el índice numérico de resistencia conservada para evaluar el detrimento de la resistencia por efecto del agua como porcentaje de la resistencia original que tenían antes de la inmersión.

$$\text{Índice de Resistencia Conservada, \%} = \frac{R_2}{R_1} * 100$$

Donde:

R1 = resistencia a compresión de los especímenes secos (Grupo 1), y

R2 = resistencia a compresión de las probetas sumergidas (Grupo 2).

3.3.2.5- Ensayo de pedestal de congelamiento y descongelamiento de Texas (Texas Freeze – Thaw Pedestal Test)

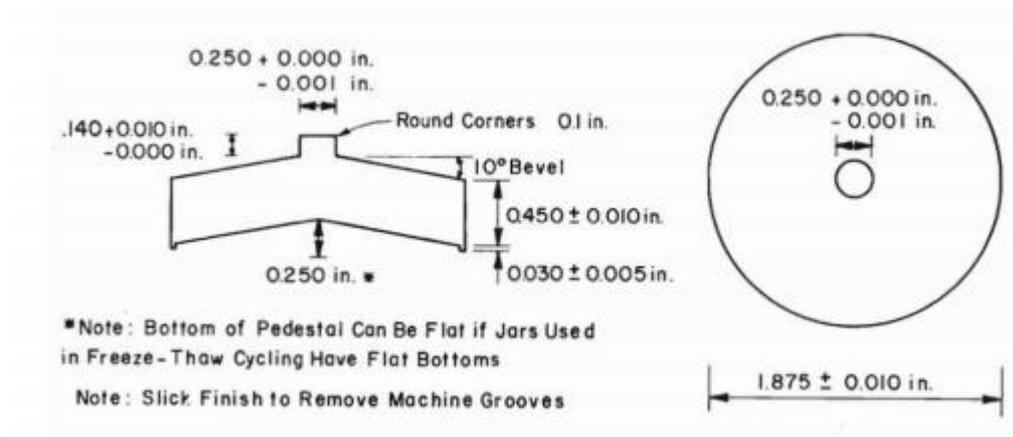
Este ensayo determina la sensibilidad de la mezcla asfáltica de los daños inducidos por la humedad. Se utilizan especímenes de espesor 1.90 cm y 4.13 cm de diámetro (Figura 35), con un peso aproximado de 60 gramos. Para elaborar la probeta es necesario preparar una gradación de piedra triturada pasante del tamiz No. 20 y retenido en el No. 35 con un porcentaje de asfalto del 5%, características geológicas combinadas del agregado hacen que se reduzcan las interacciones de las partículas de agregado y asfalto en la composición, produciendo una mezcla muy permeable en la cual el agua entra con facilidad. En este ensayo se consideran 11 tipos diferentes de agregados que son previamente escogidos de acuerdo a sus

características fisicoquímicas y mineralógicas. Estos agregados son previamente lavados y secados a temperatura de 150°C durante 24 horas.

En la realización de la mezcla cada muestra pesa alrededor de 60 g. se pueden preparar varios especímenes al mismo tiempo. Tanto el agregado como el asfalto se calientan a 150°C por 1 hora. Luego que los materiales estén calientes, verter el asfalto en el agregado y mezclar lo más profundo y rápido posible. Se recalienta la mezcla a 150°C por una hora más, se bate la mezcla y se calienta por otra hora más. Luego se divide la mezcla en muestras de alrededor de 60 g por cada muestra que se desee preparar. Se calientan por una hora y media más y se retiran para dejarlos reposar durante 30 minutos antes de compactar.

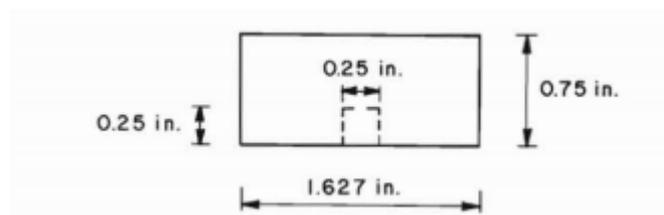
Lo más delicado del procedimiento es la compactación de las probetas. Se calienta 50 a 60 gramos del material a 150°C durante 20 minutos. Se remueve con una cuchara y se deposita en el molde a temperatura ambiente y se compacta con una carga constante de 27.58 Kn por 20 minutos. Este paso debe hacerse en menos de 2 minutos, tiempo después del cual los datos no son confiables. La compactación se realiza haciendo girar suavemente la base y una vez retirada se deja curar durante tres días a temperatura ambiente antes de someterla a los ciclos de congelamiento y descongelamiento.

Se sumerge 0.5 pulgadas de la probeta sobre el pedestal (Figura 34) en un recipiente con agua destilada previamente congelada a -12°C y se deja en el congelador por un lapso de 12 horas. Después de terminado el ciclo de congelamiento se procede al paso de descongelamiento en un baño a temperatura ambiente por 45 minutos. Al fundirse el hielo, la probeta se pasa a un baño a 49°C por 12 horas, y así terminar el ciclo de congelamiento y descongelamiento (*freeze – Thaw*). Se hace un análisis visual para apreciar el apareamiento de grietas. Si estas no se observan, se repite el ciclo hasta su aparición. Y si se presentan, constituyen la falla y por tanto el fin del ensayo (Kennedy et al, 1982).



Fuente: Kennedy et al, 1982

Figura 31. Dimensiones del pedestal



Fuente: Kennedy et al, 1982

Figura 32. Dimensiones de la briqueta

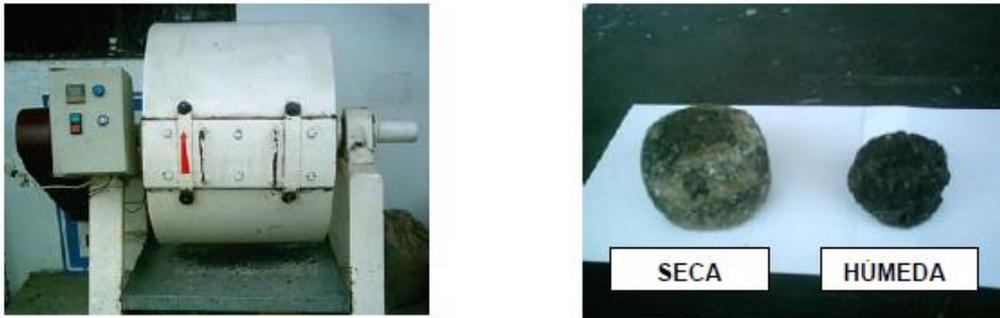
3.3.2.6- Ensayo de Cántabro retenido

El objetivo del ensayo de cántabro es valorar directamente la cohesión y la resistencia a la disgregación de la mezcla, ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tráfico (Shell Bitumen, 1991).

Pero también se lo puede usar para evaluar la sensibilidad al agua de las mezclas asfálticas. Se realizan un mínimo de cinco probetas Marshall, se determina su contenido de vacíos, densidad y desgaste en la máquina de los ángeles, mostrada en la Figura 33, sin la carga abrasiva de las bolas por 300 revoluciones. Al finalizar el ensayo, se saca la probeta, se pesa de nuevo y se calcula el peso de partículas secas perdidas Pl_d . Se condicionan 5 probetas Marshall por 68 horas sumergidas en agua y después 24 horas en

un horno a 25°C. Se introducen dentro de la máquina de los Ángeles por 300 revoluciones y se calcula la masa de partículas mojadas perdidas Pl_w y se usa la siguiente ecuación para obtener el índice de pérdida de partículas (PLI) (Shell Bitumen, 1991).

$$PLI = 100 \times \frac{Pl_w}{Pl_d}$$



Fuente: Vila et al, 2007

Figura 33. Máquina de Los Ángeles y unas muestras ensayadas por el método cántabro

Un ensayo de este tipo fue realizado para evaluación por el daño en agua en el Ecuador en el año 2007

3.3.2.7- Ensayo de estabilidad Marshall

Con este ensayo obtenido del Shell Bitumen Handbook se quiere lograr determinación de la resistencia a la deformación plástica de especímenes cilíndricos de mezclas asfálticas para pavimentación, empleando la prensa Marshall. Para evaluar una susceptibilidad al daño por humedad en la mezcla se debe aplicar un condicionamiento, el cual no existe dentro de ninguna norma definida de para este condicionamiento, pero existen condicionamientos propios de cada empresa para emplear este ensayo y medir susceptibilidad de daño en agua. Uno de estos condicionamientos que es el Shell consiste en emplear 8 briquetas Marshall y dividir las en dos grupos de 4.

Con el primer grupo se procede con el ensayo de estabilidad Marshall normalmente.

Estabilizando la temperatura de las briquetas de 30 a 40 minutos en un baño de agua a $60^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($140^{\circ} \pm 1.8^{\circ}\text{F}$) o durante dos horas en un horno a $60^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($140^{\circ} \pm 1.8^{\circ}\text{F}$). Se limpian las mordazas de la prensa Marshall, se coloca la biqueta y se ajustan los deformímetros con la biqueta y se los encera.

A continuación, como se muestra en la Figura 34, se somete la muestra a una deformación constante de 50.8 mm /min (2 pulg/min) hasta la rotura de la muestra. Se debe registrar el valor máximo del dial de deformación y el dial de carga

Con el segundo grupo se las coloca al vacío en un baño de agua a temperaturas de entre 0° y 1°C para saturar el volumen de poros de la mezcla con agua. Luego de esto se colocan las briquetas en un baño de agua durante 48 horas a 60°C . Luego se determina las estabilidades Marshall de las briquetas condicionadas. Se determina la estabilidad Marshall retenida dividiendo la estabilidad Marshall de las briquetas sin condicionamiento para las que si fueron condicionadas. Un valor de Marshall retenido mayor al 75% es normalmente aceptable (Shell Bitumen, 1991).



Fuente: Vila et al, 2007

Figura 34. Prueba Marshall

3.3.2.8- Ensayo del sistema de condicionamiento ambiental (Environmental Conditioning System, ECS,)

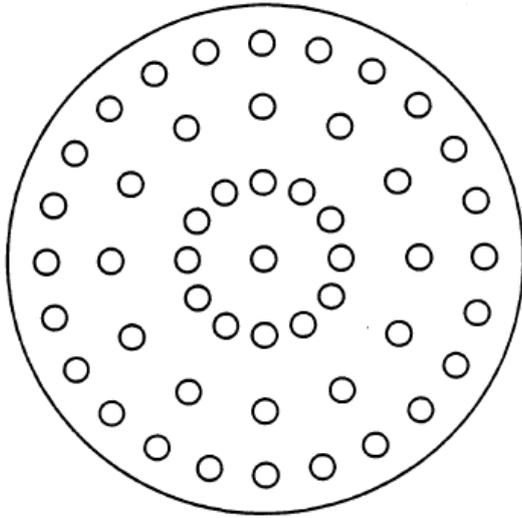
Objetivo

Este procedimiento desarrollado por la Universidad Estatal de Oregon monitorea el daño por agua inducido a briquetas de 102 mm (4 pulg) de diámetro por 102 mm (4 pulg) de altura de hormigón asfáltico. Las muestras se pueden obtener compactando la mezcla en laboratorio con un compactador giratorio u obteniendo núcleos en campo. Este ensayo se realiza para conocer cuantitativamente el efecto del agua en la rigidez y permeabilidad en la mezcla de asfalto – agregado.

Materiales

Sistema de Condicionamiento Ambiental - se necesita una computadora que cumpla con las especificaciones mínimas para poder registrar los datos y controlar el ECS. El ECS debe ser capaz de incrementar la temperatura de la biqueta a 100°C y disminuirlo a -20°C dentro de 2 horas. También debe poder pasar aire y agua destilada a través del espécimen con distintos niveles de vacío. El ECS debe aplicar pulsos estáticos de cargas axiales a la muestra (220 ± 5 N (50 ± 1 lbf)) y pulsos dinámicos de 6700 ± 25 N (1506 ± 5 lbf) con forma de onda de haversine de duración de carga de 0.1 s y un periodo de descanso de 0.9 s entre pulsos de carga. El sistema también debe ser capaz de medir deformaciones axiales, y tener un programa que procese el esfuerzo de compresión y recupere la deformación axial de varios ciclos de carga. El equipo debe ser capaz de aplicar esfuerzos para obtener deformaciones de 50 – 100 micras de deformación en briquetas de hormigón asfáltico.

Máquina de Ensayos – una maquina hidráulica o neumática para ensayar especímenes a compresión que cumpla con las especificaciones de la norma AASHTO T 167



Fuente: Allen, 1994

Figura 36. Discos perforados de teflón

Discos de Teflón Perforados – las perforaciones deben coincidir con los surcos de los platos. Ver Figura 36.

Acople y espaciador – usados para montar 2 transductores variables verticales en el espécimen. Los espaciadores no deben ser mayores a 51 mm para muestras de 102 mm.

Materiales varios:

Membrana de hule de 150 mm por 100 mm de diámetro

Dos anillos en O de 102 mm

Pistola de silicón

Calibradores con capacidad de medición de 150 ± 1 mm

Espátula de Acero

Bomba de Vacío

Agua destilada

Silicón transparente

Aire comprimido

Preparación del espécimen

Se preparan las briquetas haciéndolas en laboratorio o tomando núcleos en campo.

Se debe determinar el contenido de vacíos de la muestra, medir el diámetro y altura de la biqueta y registrar los valores con un valor de ± 1 mm.

Colocar la biqueta dentro de la membrana de caucho de 150 mm de longitud, centrando la biqueta en la membrana para que quede 25 mm de cada lado. Inyectar silicón entre la membrana y la biqueta a media altura. Inyectar suficiente silicón para asegurarse que toda la superficie de la biqueta este bien sellada. Usar una espátula para esparcir el silicón para que quede una superficie y capa uniformes y se lo deja a temperatura ambiente toda la noche o más para asegurarse que se seque el silicón.

Procedimiento

Se coloca un disco de teflón perforado en la superficie del plato con surcos inferior.

Se coloca el espécimen verticalmente sobre el disco de teflón

Se coloca el otro disco de teflón perforado sobre la muestra y encima del disco el plato con los surcos en dirección del disco.

Se sella la membrana que está rodeando al espécimen poniendo encima el anillo en forma de O en los surcos del plato sobre la membrana.

Para asegurarse que el sistema está aislado, se cierra el suministro de aire y agua del sistema seleccionando vacío en la válvula de Agua – Vacío – Aire. Se abre la válvula y se ajusta el regulador de vacío hasta que la presión de adentro y afuera marque 510 ± 25 mm Hg (20 ± 1 pulg Hg). Se cierra la

válvula de aire. Se cierra la válvula del de desviación para que no se salga el aire del espécimen. Se monitorea los manómetros de presión de adentro y afuera del espécimen por 5 minutos. Si ambas lecturas se mantienen iguales, entonces el sistema es hermético, pero si alguno de los dos manómetros disminuye entonces hay que ajustar el sistema antes de proceder.

Se conecta el acople con los espaciadores y los transductores verticales variables al espécimen.

Coefficiente de permeabilidad para flujo de aire

Ingresar y estabilizar la temperatura de la cámara ambiental a $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Abrir la válvula de vacío y seleccionar aire en la válvula de Agua – Vacío – Aire. Encender la válvula de aire. Aplicar el diferencial de presión más bajo, ajustando el regulador de vacío. Registrar el flujo de aire que pasa a través de espécimen. Registrar la lectura del diferencial de presión.

Repetir el paso anterior con tres presiones diferenciales distintas. Las presiones seleccionadas van a variar dependiendo el contenido de vacío del espécimen ensayado.

Los especímenes con menor flujo de aire necesitarán mayor presión. Se debe seleccionar un intervalo constante de diferencial de presiones (ejemplo. 20, 30, 40 y 50 kPa (3, 4.4, 5.8 y 7.3 psi)). Se puede seleccionar cualquier rango de presiones que den como resultado flujos de aire que se puedan medir y que los resultados en un rango de flujos de aire estén dentro del +10% del flujo de aire de las 4 presiones seleccionadas.

Calcular el coeficiente de permeabilidad de flujo de aire del espécimen para cada presión usada y se calcula un promedio de las 4 presiones.

Ensayo de Módulos del ECS

Mantener la temperatura de la cámara a $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Remover los espaciadores del acople.

Aplicar una carga estática de $130 \pm 25 \text{ N}$ ($30 \pm 5 \text{ lbf}$) y una carga axial repetitiva de aproximadamente 2200 N (494 lbf) al espécimen de prueba. La carga repetitiva debe ser aplicada en forma de onda de haversine con la duración de carga de 0.1 s y un periodo de 0.9 s de descanso entre pulsos de carga.

Ajustar el espécimen o el acople hasta que las lecturas de los dos transductores estén dentro del 15% de cada una

Si la deformación es menor a 50 micras, incrementar la magnitud de la carga repetitiva hasta que las deformaciones estén entre 50 y 100 micras. Si la deformación es mayor a 100 reducir la magnitud. Registrar las cargas finales y utilizar el mismo nivel de carga con niveles $\pm 25 \text{ N}$ para los siguientes ensayos de modulo del ECS luego de que se aplique el condicionamiento

Medir y registrar la carga axial pico y las deformaciones verticales recuperables del intervalo de los últimos 5 ciclos de carga. Calcular el modulo del ECS

Nota: no exceder de 250 ciclos de carga al obtener el modulo ECS ya que esto puede dañar el espécimen

Condicionamiento de vacío

Abrir la válvula de desviación (*bypass*).

Abrir la válvula de vacío y cerrar la válvula de desviación. Aplicar un vacío de $510 \pm 25 \text{ mm Hg}$ ($20 \pm 1 \text{ pulg. Hg}$) por $10 \pm 1 \text{ min}$.

Abrir la válvula de de desviación. Cerrar la válvula de vacío.

Mojado

Mantener la temperatura de la cámara a $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Estabilizar la temperatura de la fuente de agua destilada a $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Abrir la válvula de desviación

Seleccionar agua en la válvula Vacío – Agua – Aire. Encender la válvula de vacío y ajustar el regulador hasta que haya un nivel de vacío de 510 ± 25 mm Hg en el manómetro del exterior de la muestra.

Esperar 1 minuto o hasta que el agua destilada llene las tuberías y el sistema. Cerrar la válvula de desviación y permitir que el agua destilada pase a través del espécimen por 30 ± 1 min.

Coefficiente de permeabilidad para flujo de agua

Ajustar el diferencial de presión de vacío a 40 kPa (5.8 psi) ajustando el regulador de vacío. Registrar el flujo de agua a través del espécimen de prueba. Registrar las lecturas del diferencial de presión

Repetir el proceso para 3 presiones adicionales. Las presiones van a variar dependiendo de contenido de vacíos del espécimen ensayado. Las muestras que tengan menor contenido de vacíos necesitarán mayores presiones. Estas presiones 4.11.3 pueden variar de 20 a 40 kPa (3 a 6 psi) de presión diferencial. Se debe seleccionar un intervalo constante de presiones en el que los resultados estén dentro del 10% de las 4 presiones seleccionadas para los flujos de agua.

Se calcula el coeficiente de permeabilidad para cada flujo de agua de cada presión y se calcula el promedio.

Condicionamiento caliente

Abrir la válvula de vacío y ajustar la presión a 254 ± 25 mm Hg (10 ± 1 pulg Hg) en el piezómetro exterior. Ajustar el flujo de agua a 4 ± 1 cm³/min. Cerrar la válvula de desviación.

Ajustar la temperatura de la cámara a $60 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ para $6 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$.

Aplicar una carga axial estática de compresión de 90 ± 5 N (20 ± 1 lbf) y una carga dinámica de 900 ± 25 N (202 ± 5 lbf), en forma de onda de Haversine con una duración de carga de 0.1 s y un periodo de descanso de 0.9 s entre pulsos de carga. La aplicación continua de la carga ocurre durante el condicionamiento caliente. (Por ejemplo, 6 horas a 60°C). Luego de las 6 horas se termina la aplicación de carga.

Luego del condicionamiento caliente y la aplicación de la carga ajustar la temperatura a $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ por lo menos durante 2 horas (pero no más de 6 horas).

Cerrar la válvula de vacío, abrir la válvula de desviación y abrir el sistema a presión atmosférica. Continuar con la aplicación de temperatura de $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Determinar el modulo ECS y el coeficiente de permeabilidad para flujo de agua como se describió anteriormente

Repetir el ciclo de condicionamiento caliente dos veces más de la misma manera.

Nota: si existe una deformación excesiva ($>5\%$) del espécimen luego del ciclo de condicionamiento, terminar el condicionamiento. Registrar toda la información y proceder a la evaluación de desvestimiento. Describir en las notas del espécimen que este fallo durante el condicionamiento.

Condicionamiento frío

Luego de completados los tres ciclos de condicionamiento caliente se procede a realizar este condicionamiento.

Se enciende la válvula de vacío y se ajusta la presión a 250 ± 25 mm Hg (10 ± 1 pulg. Hg) en el manómetro exterior y se ajusta el flujo de agua a 4 ± 1 cm³/min. 4.13.3 Terminar las cargas aplicadas. Revisar que la válvula de desviación esté cerrada.

Ajustar la temperatura de la cámara a $-18 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ por 6 horas ± 5 min, luego se ajusta la temperatura a $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ por lo menos durante 2 horas o más (no más de 6 horas).

Se cierra la válvula de vacío, se abre la válvula de desviación y el sistema se lo abre a presión atmosférica. Se mantiene la temperatura a $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Se determina el coeficiente de permeabilidad para flujo de agua como se especificó anteriormente y el modulo ECS como esta descrito en Ensayo de Modulo ECS.

Aplicar una carga estática de 130 ± 25 N (30 ± 5 lbf) y una carga axial repetitiva de aproximadamente 2200 N (494 lbf) al espécimen de prueba. La carga repetitiva debe ser aplicada en forma de onda de haversine con la duración de carga de 0.1 s y un periodo de 0.9 s de descanso entre pulsos de carga.

Ajustar el espécimen o el acople hasta que las lecturas de los dos transductores estén dentro del 15% de cada una

Si la deformación es menor a 50 micras, incrementar la magnitud de la carga repetitiva hasta que las deformaciones estén entre 50 y 100 micras. Si la deformación es mayor a 100 reducir la magnitud. Registrar las cargas finales y utilizar el mismo nivel de carga con niveles ± 25 N para los siguientes ensayos de modulo del ECS luego de que se aplique el condicionamiento

Medir y registrar la carga axial pico y las deformaciones verticales recuperables del intervalo de los últimos 5 ciclos de carga. Calcular el modulo del ECS.

Evaluación de Desvestimiento y Migración de Ligante

Luego del último ciclo de condicionamiento, remover la muestra de la cámara ambiental. Remover la membrana del espécimen y colocar la muestra en posición diametral entre dos placas de carga de una máquina de ensayo mecánica o hidráulica.

Aplicar suficiente carga para agrietar verticalmente la probeta

Remover el espécimen y separar las dos partes.

Estimar visualmente el porcentaje de desvestimiento que ha ocurrido haciendo una comparación relativa con los patrones standard de desvestimiento.

Estimar el nivel de migración de ligante que ha ocurrido haciendo una comparación relativa con los estándares.

Cálculos.

Se debe calcular lo siguiente:

Área de la sección transversal (m²)

$$A = \frac{\pi d^2}{40000}$$

Donde:

d = diámetro promedio del espécimen de ensayo en cm.

$\pi = 3.14159$

Luego de realizar el ensayo de permeabilidad de aire, calcular lo siguiente:

Coeficiente de permeabilidad para flujo de aire (cm/s)

$$k_a = \frac{QH}{\Delta h A}$$

Donde:

k_a = coeficiente de permeabilidad para flujo de aire, cm/s

Q = flujo de aire a presión promedio que cruza a través del espécimen, cm³/s

H = altura promedio del espécimen, cm

Δh = diferencia de altura piezométrica a través del espécimen, cm

A = área de la sección transversal del espécimen, cm²

Nota: la ecuación anterior es solo aplicable para especímenes de 102 ± 2 mm de diámetro y para temperatura de aire de $25 \pm 30^\circ\text{C}$. Es solo aplicable con las unidades definidas.

Luego de los 5 ciclos de carga especificados en el ensayo se calcula lo siguiente:

Esfuerzo pico por ciclo de carga

$$\sigma_{i-n} = \left\{ \frac{V_{i-n}}{A} \right\}$$

Donde:

V_{i-n} = carga pico aplicada por la máquina de ensayo en el ciclo de carga, en N

i = número de ciclos de condicionamiento aplicados

n = número de ciclos de carga aplicados

Deformación axial recuperable (mm/mm) por ciclo de carga

$$\varepsilon_{i-n} = \frac{\sigma_{ri-n}}{h}$$

Donde:

σ_{ri-n} = deformación vertical recuperable de un ciclo de carga, en mm

h = medida del manómetro, la distancia en la que se miden las deformaciones, mm

nota: la deformación recuperable es la porción de la deformación que desaparece cuando se descarga un espécimen

Modulo ECS (kPa) por ciclo de carga:

$$M_{i-n} = \left[\frac{\sigma_{i-n}}{\varepsilon_{i-n}} \right]$$

Luego de calcular el modulo ECS por cada ciclo de carga, se calcula lo siguiente:

$$M_{Ai} = \frac{\sum_{n=1}^5 (M_{i-n})}{\Delta n}$$

Donde:

Δn = número de ciclo de carga incluido en el cálculo M_{Ai} (para los cinco ciclos de carga, $n=5$)

Luego de realizar el ensayo de permeabilidad por agua calcular lo siguiente:

Coficiente de permeabilidad para flujo de agua (cm/s)

$$k_w = \frac{QH}{\Delta h A}$$

Donde:

k_w = coeficiente de permeabilidad para flujo de aire, cm/s

Q = flujo de agua a presión promedio que cruza a través del espécimen, cm^3/s

H = altura promedio del espécimen, cm

Δh = diferencia de altura piezométrica a través del espécimen, cm

A = área de la sección transversal del espécimen, cm²

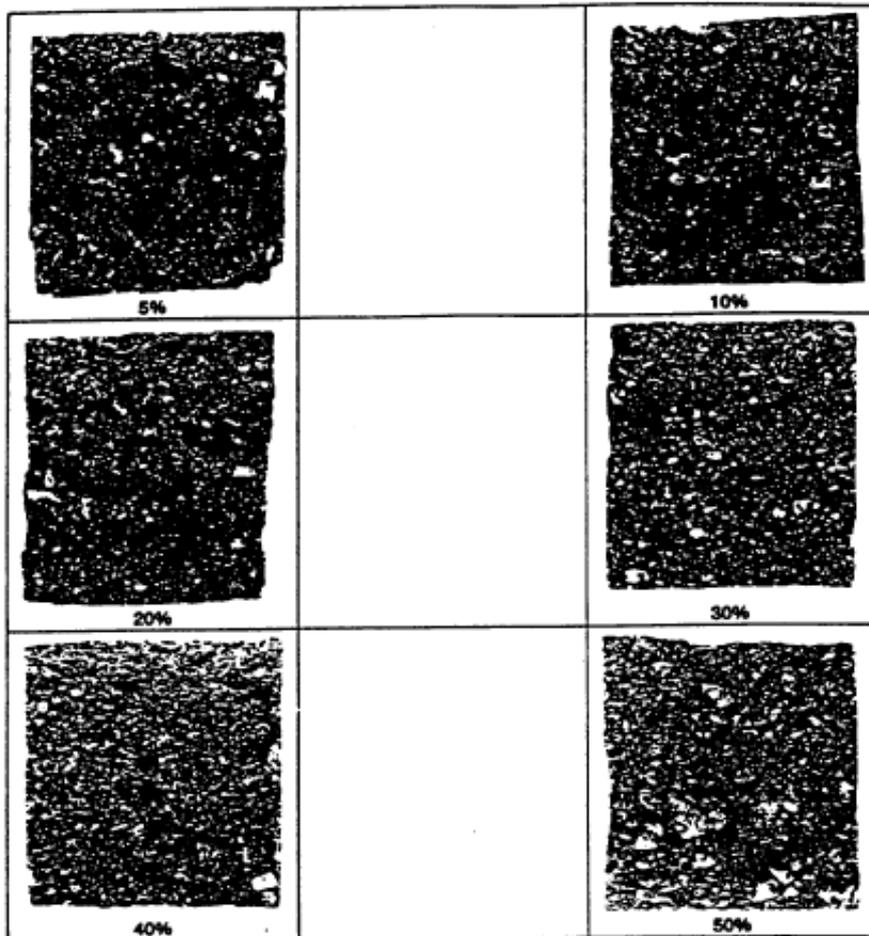
Luego de completar cada ciclo de condicionamiento se calcula lo siguiente

Razón del Módulo ECS

$$MR_i = \left[\frac{M_{Ai}}{M_{AO}} \right]$$

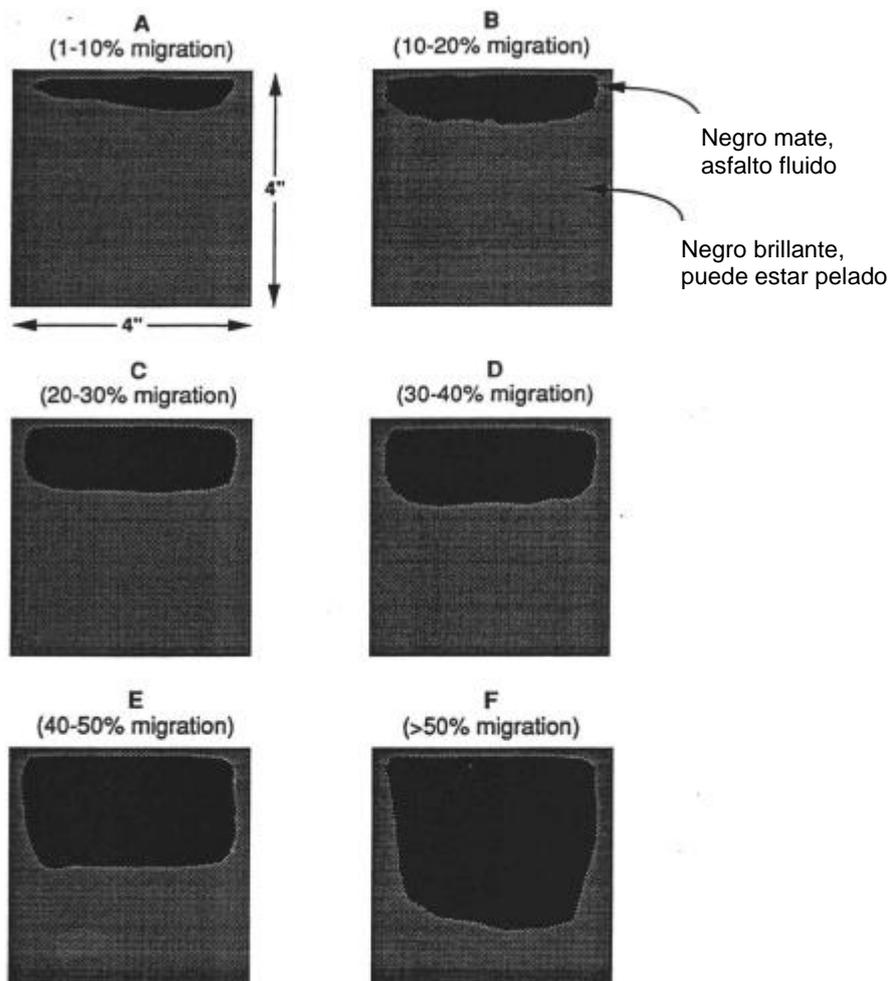
Donde

M_{AO} = modulo ECS inicial, en kPa



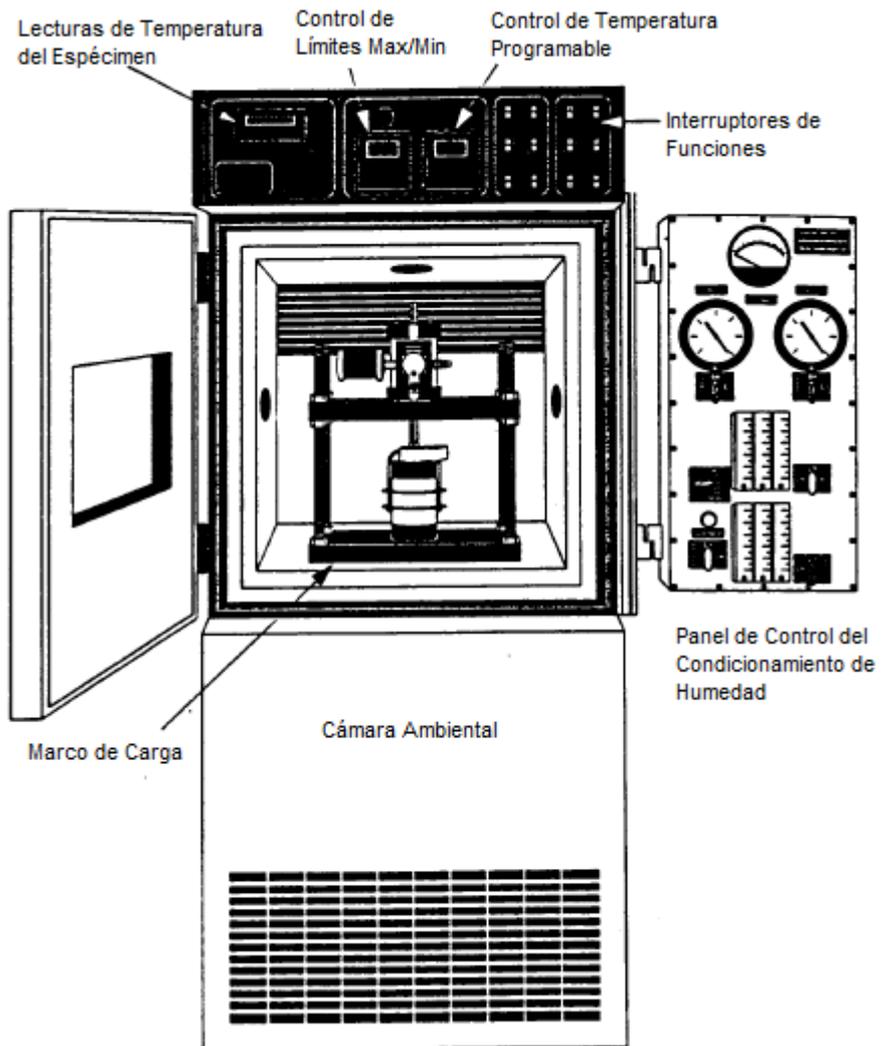
Fuente: Allen, 1994

Figura 37. Rangos estándar de peladura



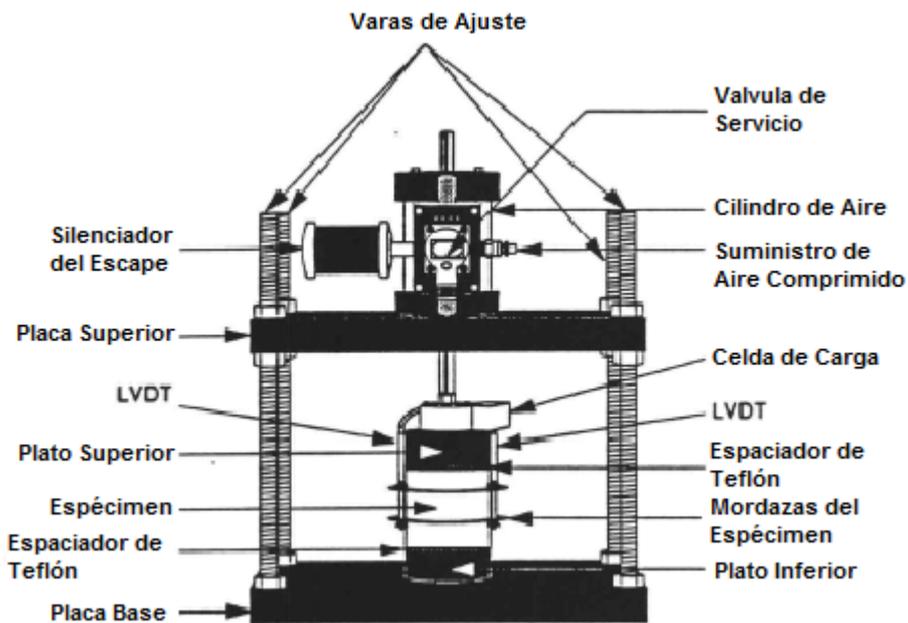
Fuente: Allen, 1994

Figura 38. Estándares de migración de ligante



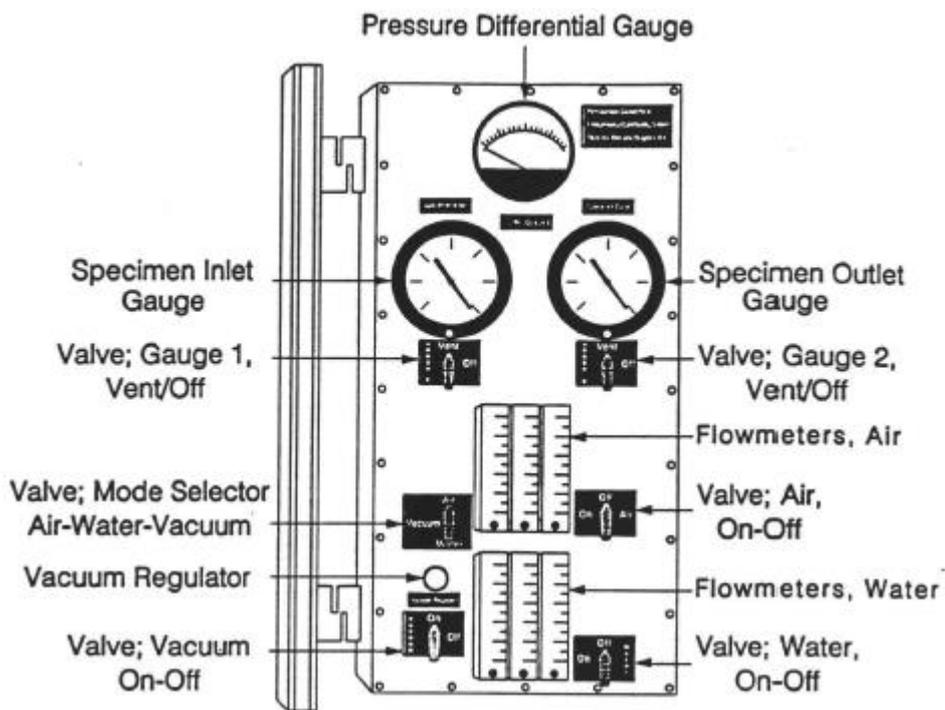
Fuente: Allen, 1994

Figura 39 Sistema de condicionamiento ambiental



Fuente: Allen, 1994

Figura 40. Marco de carga con el espécimen



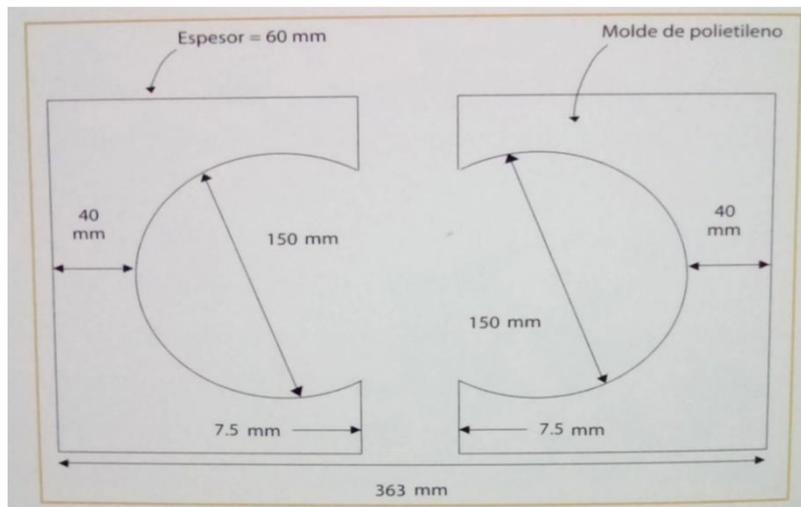
Fuente: Allen, 1994

Figura 41. Panel de control

3.3.2.9- Rueda cargada de Hamburgo

Este ensayo aparece registrado en la norma internacional AASHTO T324-14. Su objetivo es determinar la susceptibilidad a la falla prematura de la mezcla asfáltica debido a la debilidad de la estructura del agregado pétreo, inadecuada rigidez del asfalto o daño por humedad (Asociación Mexicana del Asfalto, A. C., 2011). Este ensayo simula el paso de vehículos sobre la mezcla para poder predecir las deformaciones permanentes esperadas, además que se puede medir la susceptibilidad al agua.

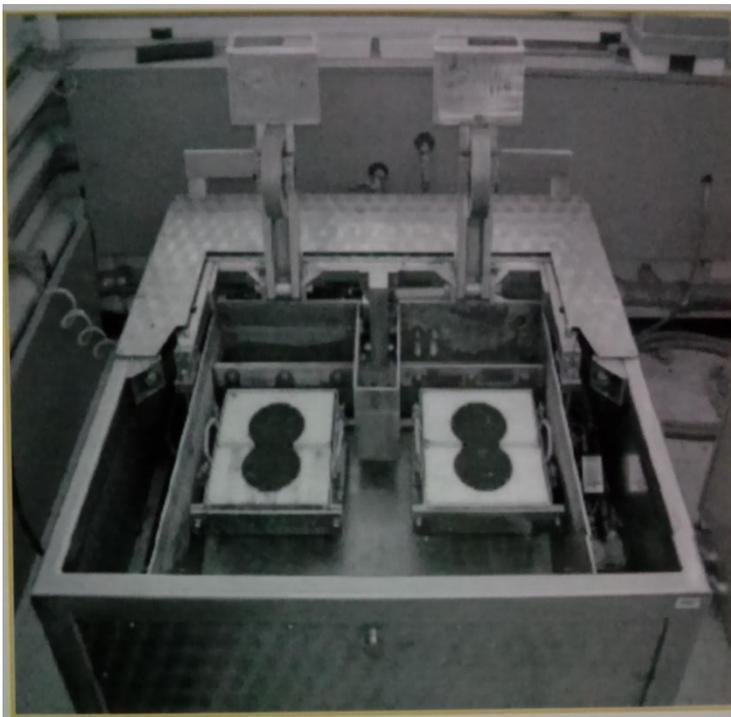
Se necesitan dos especímenes por ensayo. Para especímenes producidos en laboratorio los especímenes deben ser fabricados utilizando el compactador Superpave utilizando moldes de 150 mm de diámetro o en el compactador lineal para especímenes prismáticos. El espesor de estos será el doble del tamaño nominal del agregado (entre 38 y 100 mm). En el caso que sean circulares, las muestras deben ser cortadas las dos briquetas con los moldes de polietileno (Figura 42). Se deben dejar reposar 24 horas antes del ensayo. Deben tener un porcentaje de vacíos de $7 \pm 1\%$ de vacíos.



Fuente: AMAAC (Asociación Mexicana del Asfalto, A. C.), 2011

Figura 42 Moldes de polietileno para los cilindros de 150 mm

La prueba se corre por duplicados. El ensayo dura hasta que se cumplan las 20 000 pasadas o las briquetas lleguen a una deformación de 10 mm. Cada ensayo requiere de 4 briquetas de 150 mm. Se calcula el porcentaje de vacíos de cada espécimen mediante el AASHTO T 269. En el caso que la probeta sea de 150 mm se debe hacer un corte transversal en cada espécimen donde lo indica la Figura. 42 y se los coloca como indica la Figura 43.



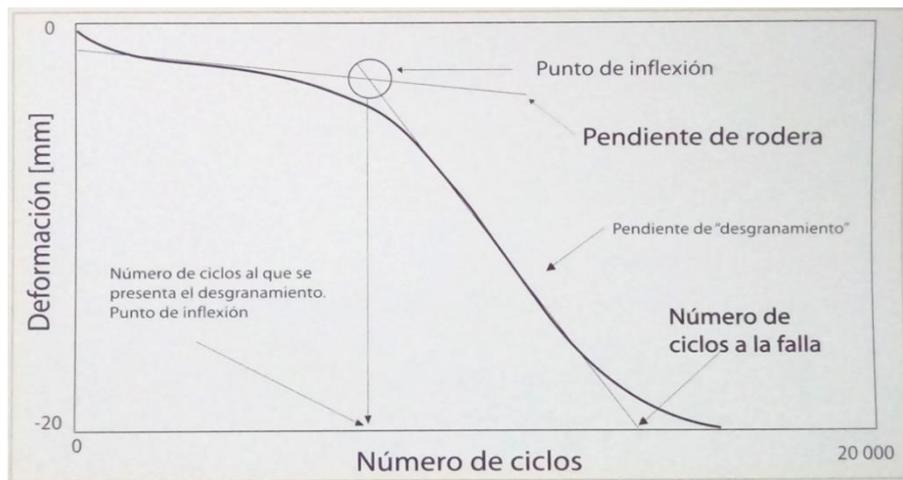
Fuente: AMAAC (Asociación Mexicana del Asfalto, A. C.), 2011

Figura 43 Especímenes listos para ensayar

Se colocan las ruedas sobre los especímenes y se programa la máquina para que comience el llenado de la tina con agua hasta cubrir los especímenes con 20 mm de agua a una temperatura de $50 \pm 1^{\circ}\text{C}$, permitiendo que haya un acondicionamiento por unos 30 minutos.

El ensayo deberá finalizar luego de las 20 000 repeticiones o después que la muestra haya alcanzado la máxima deformación definida anteriormente.

Luego de este ensayo se grafica una curva de numero de ciclos versus deformación como se muestra en la Figura 43 y se registra el punto de inicio del desprendimiento del agregado, el número de ciclos máximo que soporto la muestra y la deformación máxima para cada espécimen.



Fuente: AMAAC (Asociación Mexicana del Asfalto, A. C.), 2011

Figura 44. Curva deformación versus número de ciclos, resultado del ensayo de la rueda de Hamburgo

La grafica se puede dividir por lo general en tres zonas delimitadas por los puntos de inflexión. La primera zona representa un periodo de poscompactación que se refleja en los primeros ciclos, la segunda zona describe la deformación permanente que está sufriendo la muestra y la tercera refleja señales de desgranamiento que aparecen cuando hay susceptibilidad al daño por humedad.

Lo deseable sería que se presenten solo dos puntos de inflexión durante la prueba, lo que significa que la muestra no es susceptible al desgranamiento o desmoronamiento.

CAPITULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1- CONCLUSIONES

Este proyecto es un punto de partida para investigaciones futuras que pretendan ahondar el tema de la adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado mineral, así como el daño en agua en las mezclas asfálticas, puesto que en este se recopilan aspectos teóricos y los métodos de pruebas que se han desarrollado para analizarlos.

Si bien en el Ecuador se realiza usualmente la prueba de agua hirviendo para la evaluación del daño en agua (ASTM D 3625) y en menor medida la prueba de resistencia retenida por tracción indirecta (ASTM D 4867), la incidencia de la humedad en la poca durabilidad de nuestras capas asfálticas es notoria, lo que nos alerta sobre la necesidad de mejorar o ampliar los criterios de control.

El daño por humedad se fundamenta en una pérdida de rigidez o resistencia en la mezcla principalmente por la pérdida de cohesión del mástico asfáltico, fallas en la unión adhesiva entre el agregado y asfalto, e incluso la degradación del agregado. Esta problemática puede reflejarse de manera cuantitativamente diferente en los principales tipos de fallo de las mezclas asfálticas, como son: agrietamientos, deformaciones o desprendimientos. Es decir, pretender garantizar un buen comportamiento en general de una mezcla partiendo del cumplimiento de una resistencia asociada a un solo tipo de esos fallos es a nuestro juicio insuficiente.

Por otra parte, el papel de los dos componentes en el fenómeno de adherencia estudiado: asfalto y agregado, también vale la pena estudiarlos en su interacción más simple, o sea, sin considerar el efecto del agua. Esta afirmación se basa en la gran diversidad de fuentes de aprovisionamiento para la obtención de agregados minerales existente en el país, así como la necesidad de investigar el comportamiento de la adherencia del asfalto de la refinería de Esmeraldas respecto a agregados de diferentes composiciones

y su comparación con el comportamiento de asfaltos de distintas procedencias.

Partiendo de la detección de problemas potenciales, las pruebas descritas servirán además para el estudio y afinamiento de medidas para mejorar la adherencia y evitar sus efectos.

4.2- RECOMENDACIONES

Investigar el posible empleo de alguna prueba para evaluar la adhesión entre el asfalto y el agregado sin la interacción del agua, como las pruebas de corte o torque.

Evaluar con dicha prueba la adhesión del asfalto de la Refinería de Esmeraldas en diferentes tipos de agregados, procedentes de las canteras más representativas del país.

Estudiar la incidencia del envejecimiento de las mezclas en los resultados de las pruebas que se realizan actualmente en el país, es decir, las correspondientes a ASTM D 3625 y ASTM D 4867.

Priorizar en las nuevas adquisiciones de equipos para el Laboratorio de Carreteras de la UCSG una Rueda Cargada de Hamburgo, que pudiera servir para complementar las pruebas de desempeño que se realizan actualmente a las mezclas asfálticas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. (2014). Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA). Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Airey, G. (2011). Adhesion and Moisture Damage Characterisation of Asphalt Mixtures. Seminar (p. 56). Granada: Nottingham Transportation Engineering Centre.

Allen, W. L. (1994). Evaluation Of The Environmental Conditioning System As A Water Sensitivity Test For Asphalt Concrete Mixtures. Oregon: Oregon State University.

AMAAC (Asociación Mexicana del Asfalto, A. C.). (2011). Susceptibilidad a la Humedad y Deformación Permanente por Rodera con en el Analizador de Rueda Cargada de Hamburgo (HWT), en una Mezcla Asfáltica Compactada. Asociación Mexicana del Asfalto, A. C.

Arenas, H. (2006). Tecnología del Cemento Asfáltico (5ta ed.). Cauca, Colombia: Universidad del Cauca.

Aschenbrener, T., & McGennis, R. B. (1993). Investigation Of The Modified Lottman Test To Predict The Stripping Performance Of Pavement In Colorado. Denver: Colorado Department of Transportation.

Asociación Mexicana del Asfalto, A. C. (2010). Resistencia al Desprendimiento del Asfalto de los Materiales Pétreos en las Mezclas Asfálticas por Acción del Agua. AMAAC.

Asphalt Institute. (1981). Cause and Prevention of Stripping in Asphalt Pavements. In A. Institute, Educational Series No. 10. College Park: Asphalt Institute.

ASTM (American Society for Testing and Materials). (2001). Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water. In Annual Book of ASTM Standards (pp. 354-355). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.

ASTM D 907-96a. (2000). Standard Terminology of Adhesives. In A. (. Materials), Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.

Bahia, H; Hanz, K; Kanitpong, K; Wen, H. (2007). Testing Methods to Determine Aggregate/Asphalt Adhesion Properties and Potential Moisture Damage. Madison: Wisconsin Highway Research Program.

Bhasin, A. (2006.). Development of Methods to Quantify Bitumen-Aggregate Adhesion and Loss of Adhesion Due to Water. Texas, USA: Texas A&M University.

Bhasin, A; Little, D.N; Vasconcelos, K.L; Masad, E;. (2007). Surface Free Energy to Identify Moisture Sensitivity of Materials for Asphalt Mixes. Transportation Research Board , 37-45.

Blackman, B., Cui, S., Kinloch, A., & Taylor, A. (2013). The Development of a Novel Test Method to Assess the Durability of Asphalt Road-Pavement Materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives* , 1-10.

Canestari, F., & Bocci, M. (1997). Influence of the Old Pavement Surface Conditions on the Effectiveness of Tack Coat Emulsions. Bordeaux.

Canestrari, F; Cardone, F; Graziani, A; Santagata, F; Bahia, H.U;. (2010). Adhesive and Cohesive Properties of Asphalt-Aggregate Systems Subjected to Moisture Damage. *Road Materials and Pavement Design*, 11, 11–32.

Castan, M. (1968). Rising of Binder to the Surface of an Open-Graded Bituminous Mix. *Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers* , 77–84.

Cho, D. (2008). Study of Asphalt-Aggregate Bond in Simple Simulation Using the Dynamic Shear Rheometer. Madison: University of Wisconsin.

Copeland, A.R; Youtcheff, Jr., J.S; Shenoy, A;. (2007). Moisture Sensitivity of Modified Asphalt Binders: Factors Influencing Bond Strength. *Transportation Research Board* , 18–28.

Cui, S., Blackman, B. R., Kinloch, A. J., & Taylor, A. C. (2014). Durability of asphalt mixtures: Effect of aggregate type and adhesion promoters. *ELSEVIER* , 100-111.

Curtis, C. W. (1992). Investigation of Asphalt-Aggregate Interactions in Asphalt Pavements. Auburn: Auburn University.

Curtis, Christine W; Ensley, Keith; EEPS, Jon. (1993). Fundamental Properties of Asphalt – Aggregate Interactions including adhesion and absorption. Washington, D.C.

Department of Scientific and Industrial Research. (1962). Bituminous Materials in Road Construction. Londres: Road Research Laboratory.

ECOPETROL. (1997). Cartilla Práctica para el Manejo de los Asfaltos Colombianos. In ECOPETROL, Los Asfaltos Colombianos. ICP.

Fritz, H., & Junker, J. (1993). Fundamental properties of Asphalt – Aggregate interactions including adhesion and absorption. Washington D.C.: National Research Council.

Fromm, H. J. (1974). The Mechanisms of Asphalt Stripping from Aggregate Surfaces. *Proc. Assoc. of Asphalt Paving Technologists* , 191-223.

Gamba González, G. A., & Mercado Ortega, J. A. (2004). Concepción de un Ensayo Para Establecer el Efecto de la Presión de Poro en el Deterioro por Humedad de las Mezclas Asfálticas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Gorkem, C., & Sengoz, B. (2009). Predicting Stripping and Moisture Induced Damage of Asphalt Concrete Prepared With Polymer Modified Bitumen and Hydrated Lime. *Construction and Building Materials* , 2227-2236.

Johnson, D., & Freeman, R. (2002). Rehabilitation Techniques for Stripped Asphalt Pavements. Western Transportation Institute.

- Jørgensen, T. (2002). Testing Adhesion Between Bitumen And Aggregate With The Rolling Bottle Test And The Boiling Test. Lisboa: Norwegian Public Roads Administration, Road Technology Department.
- Kanitpong, K; Bahia, H. (2003). Role of Adhesion and Thin Film Tackiness of Asphalt Binders in Moisture Damage of HMA. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 72, 502-528.
- Kanitpong, K; Bahia, H;. (2005). Relating Adhesion and Cohesion of Asphalts to Effect of Moisture on Asphalt Mixtures. *Laboratory Performance. Transportation Research Board* , 33-43.
- Kennedy, T. W., Roberts, F. L., & Anagnos, J. N. (1984). Texas Boiling Test for Evaluating Moisture Suceptibility of Asphalt Mixtures. Austin: Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.
- Kennedy, T. W., Roberts, F. L., Lee, K. W., & Anagnos, J. N. (1982). Texas Freeze-Thaw Pedestal Test for Evaluating Moisture Suceptibility for Asphalt Mixtures. Austin: Center for Transportation Research The University of Texas at Austin.
- Kinloch, A. J., Lau, C. C., & Williams, J. G. (1994). The Peeling of Flexible Laminates. *International Journal of Fracture* , 45-70.
- L.N, Muhammad; Abdur Raqib M.; Huang, B. (2002). "Influence of Asphalt Tack Coat Materials on Interface Shear Strength". *Transportation Research Record*.
- Lee, D. (1953). The Relationship Between Physical and Chemical Properties of Aggregates. *AAPT*, 14.
- León, H., & Arenas, L. (2006). *Tecnología del Cemento Asfáltico (Vol. Quinta Edición)*. Colombia.
- Majidzadra, K., & Brovold, F. N. (1968). State of the Art: Effect of Water on Bitumen-Aggregate Mixtures.
- Meng, J. (2010). *Affinity of Asphalt to Mineral Aggregate: Pull-off Test Evaluation*. Madison: University of Wisconsin.
- Minstry of Transportation. (2001). *Ontario Laboratory Testing Manual*. Ontario: Minstry of Transportation.
- Minstry of Transportation, Ontario. (2001). Test Method LS-285, Method of Test for Stripping by Static Immersion. In O. Minstry of Transportation, *Laboratory Testing Manual* (pp. 1-8). Ontario: Minstry of Transportation, Ontario.
- Mohammad, L. N., Abdur Raqib, M., & Huang, B. (2002). Influence of Asphalt Tack Coat Materials on Interface Shear Strength. *Transportation Research Board*.
- Molenaar, A.A.A; Heerkens, J.C.P; Verhoeven, J.H.M. (1986). "Effects of Stress Absorbing Membrane Interlayers." *Asphalt Paving Technology (Vol. 55)*.
- Moraes, R., Velasquez, R., & Bahía, H. (2010). Measuring Effect Of Moisture On Asphalt-Aggregate Bond With The Bitumen Bond Strength Test. Washington, D.C.: University of Wisconsin - Madison.

Moraes, R., Velasquez, R., & Bahia, H. U. (2011). Measuring the Effect of Moisture on Asphalt-Aggregate Bond with the Bitumen Bond Strength. In T. R. Academies, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (pp. 70-81). Washington: Transportation Research Board of the National Academies.

Multi-Regional Training and Certification. (2006). Hot Mix Asphalt (HMA) Technician Training Manual. Multi-Regional Training and Certification.

Ontario Provincial Standard Specification. (1989). Material Specification For Liquid Asphalt. Ontario: Ontario Provincial Standard Specification.

Packham, D. E. (1992). Handbook of Adhesion. Longman Scientific & Technical.

Petersen, J.C; H. Plancher, E; Ensley, K; Venable, R.L; Miyake, G;. (1982). Chemistry of Asphalt-Aggregate Interaction: Relationship with Pavement Moisture-Damage Prediction Test. Transportation Research Record , 95-104.

Plancher, H., Dorrence, S., & Petersen, J. (1977). Identification of Chemical Types in Asphalts Strongly Absorbed at Asphalt-Aggregate Interface and Their Relative Displacement by Water. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 46, 151-175.

Pocius, A. V. (1997). Adhesion and Adhesive Technology. Cincinnati: Hanser/Gardner Publications, Inc.

Reyes, F. A., Daza, C. E., & Rondón, H. A. (2012). Determinación de las Fracciones SARA de Asfaltos Colombianos Envejecidos al Medio Ambiente Empleando Cromatografía Líquida en Columna. EIA , 47-56.

Robertson, R. (1991). Chemical Properties of Asphalts and Their Relationship to Pavement Performance. Washington, D.C.: National Research Council.

Rodriguez, S; Luz, A; Morales, M; C, Pedro; Pareja, U; A, Carlos. (1999). Fundamentos teóricos de las interacciones fisicoquímicas entre el asfalto y el agregado mineral. Monografía presentada como requisito parcial para optar el título de especialista en Asfaltos para Pavimentos .

Roffe, J. C., & Chaignon, F. (2002). Characterisation Tests on Bond Coats: Worldwide Study, Impact, Tests and Recommendations. Thessaloniki: 3rd International Conference Bituminous Mixtures and Pavements.

Romanoschi, S. (1999). Characterization of Pavement Layer Interfaces. Ph.D. Dissertation . Baton Rouge: Louisiana State University.

Santagata, E; Canestari, F. (2003). Temperature Effects on the Shear Behavior of Tack Coat Emulsions Used in Flexible Pavements. International Journal of Pavement Engineering .

Santagata, E; Canestari, F. (1994). Tensile and Shear Tests of Interfaces in Asphalt Mixtures: a New Perspective on Their Failure Criteria.

Scott, J. A. (1978). Adhesion and Disbonding Mechanisms of Asphalt Used in Highway Construction and Maintenance. Proc. Assoc. of Asphalt Paving Technologists , 19-48.

- Sengoz, B., & Agar, E. (2007). Effect of Asphalt Film Thickness on the Moisture Sensitivity Characteristics of hot-mix Asphalt. *Building and Environment* , 756-765.
- Shell Bitumen U.K. (1991). *The Shell Bitumen Handbook*. Chertsey: Design and Print Partnership Limited.
- Sholar, G.A; Page, G.C.; Musselman, J.A.; Upshaw, P.B.; Moseley, H.L. (2004). "Preliminary Investigation of a Test Method to Evaluate Bond Strength of Bituminous Tack Coats". *Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists*, 73.
- Solaimanian, M., Harvey, J., Tahmoressi, M., & Tandon, V. (2003). Tests Methods dor Determination of Moisture Damage. *National Moisture Sensitivity Seminar*, (pp. 13-15). San Diego.
- Stroup-Gardiner, M., & Newcomb, D. (1994). *Physio-Chemical Evaluation of Asphalt-Aggregate Interactions*. Minneapolis: University of Minnesota.
- Tamayo T, J. (n.d.). Estudio de la degradación de los Agregados Pétreos durante la vida de los Pavimentos. *Ingeniería e Investigación* , 13 – 21.
- Tarrer, A.R; Wagh, V. (1992). *The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding*.
- Tashman, L; Nam, K; Papagiannakis, T;. (2006). Evaluation of the Influence of Tack Coat Construction Factors on the Bond Strength Between Pavement Layers. WCAT Report 06-002, Washington Center for Asphalt Technology.
- Terrel, R., & Shute, J. (1989). *Summary Report on Water Sensitivity*. Washington, D.C: National Research Council.
- Terrel, Ronald L; Saleh, Al-Swailmi;. (1992). *Final Report Water Sensitivity of Asphalt Aggregate Mixtures Test Development*. Washington, D.C.
- Uzan, J., Livneh, M., Eshed, Y. (1978). "Investigation of Adhesion Properties Between Asphalt Concrete Layers." *Asphalt Paving Technology* (Vol. 47).
- Vila Romani, R., & Aulestia Narváez, N. G. (2007). *CRITERIOS PARA MEJORAR LOS CONTROLES RUTINARIOS DE CALIDAD A LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS*. Habana: Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto.
- West, R; Moore, J; Zhang, J;. (2005). Evaluation of Bond Strength Between Pavement Layers. NCAAT Report 05-08, National Center for Asphalt Technology, Auburn.
- Wheath, M. (2007). *Evaluation Of Bond Strength At Asphalt Interfaces*. Manhattan: Kansas State University.
- Xiao, F.P; Amirkhani, S.N; Juang, C.H;. (2007). Rutting Resistance of Rubberized Asphalt Concrete Pavements Containing Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures. *Materials in Civil Engineering*, 19, 475–483.
- Yoon, H.H; Tarrer, A.R;. (1988). *Effect of Aggregate Properties on Stripping*. Washington, D.C: National Research Council.

Youtcheff, J; Aurilio, V;. (1997). Moisture Sensitivity of Asphalt Binders: Evaluation and Modeling of the Pneumatic Adhesion Test Results. 42nd Annual Conference of Canadian Technical Asphalt Association, (pp. 180–200).