



FACULTAD DE INGENIERIA
Maestría en Ingeniería Civil

Trabajo de Grado

ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL DAÑO POR HUMEDAD DE
UNA MEZCLA ASFÁLTICA PARA RODADURA EMPLEANDO
ASFALTOS SUMERGIDOS

Presentado por:
Carlos Andrés Cubillos Estrella
Camila Eugenia Núñez Galeano

Director
Fredy Reyes Lizcano

Asesora
Ana Sofía Figueroa Infante

Bogotá D.C.
Octubre de 2013

APROBACIÓN

El Trabajo de Grado “ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL DAÑO POR HUMEDAD DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA PARA RODADURA EMPLEANDO ASFALTOS SUMERGIDOS”, desarrollado por los estudiantes Carlos Andrés Cubillos Estrella y Camila Eugenia Núñez Galeano, en cumplimiento a uno de los requisitos dispuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, para optar el Título de Magister en Ingeniería Civil, fue aprobado por:

Director

Freddy Alberto Reyes Lizcano

Asesora

Ana Sofía Figueroa Infante

Jurado 1

Hugo Alexander Rondón Quintana

Jurado 2

Oscar Javier Reyes Ortiz

ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL DAÑO POR HUMEDAD DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA PARA RODADURA EMPLEANDO ASFALTOS SUMERGIDOS

Carlos Andrés Cubillos Estrella
Camila Eugenia Núñez Galeano

La Pontificia Universidad Javeriana no es responsable por los conceptos emitidos por los autores-investigadores del presente trabajo, por lo cual son responsabilidad absoluta de sus autores y no comprometen la idoneidad de la institución ni de sus valores.

*A mis padres, Cristo Núñez y Nergida Galeano, por su amor incondicional,
por su ejemplo de lucha y constancia, por hacer de mí la mujer que soy
hoy en día, por apoyarme en todo momento, por sus consejos, sus valores
y por sus motivaciones. Mi triunfo es el de ustedes.*

CAMILA EUGENIA NUÑEZ GALEANO

A Dios por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarlo cada día más. A mi madre, María Estrella, por ser la persona que me ha acompañado durante todo mi trayecto estudiantil y de vida. A mi padre, Carlos Cubillos, quien con sus consejos ha sabido guiarme para culminar mi carrera profesional. A mis hermanas Adriana y Raquel y mi sobrino Samuel, por ser el apoyo y motor que impulsó mi camino. A KMA Construcciones S.A. por su respaldo incondicional en todo el proceso académico, gracias por apoyarme en esta meta para mi vida profesional.

A Camila Núñez, porque gracias al equipo que formamos logramos llegar hasta el final del camino, gracias por tu incondicional amistad. A mis profesores por su tiempo, apoyo y por la sabiduría que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional.

CARLOS ANDRÉS CUBILLOS ESTRELLA

*“Cuando quieres algo, todo el universo conspira para que realices tu deseo”
Paulo Coelho*

AGRADECIMIENTO

Los autores desean expresar sus más sinceras muestras de agradecimiento:

Ph.D Fredy Reyes, Ms.C. Ana Sofía Figueroa, Ms.C. Wilmar Fernández y PhD. Carlos Rodríguez por cada una de las orientaciones y dedicaciones en el desarrollo de esta investigación.

Al laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana, en forma muy especial a Leonardo Romero, José Rubio, Yovana Ojeda y Óscar Montes, por su cooperación, apoyo y tiempo que nos brindaron durante toda la etapa experimental de este trabajo.

No podemos olvidar a nuestros amigos que fueron un apoyo incondicional, queremos agradecer especialmente a José Ángel Serpa, Luis Carlos Lopera, Natalia Eugenia Marín, Diego Andrés Baracaldo, Nathalia Hencker y Julián Cornejo Rodríguez.

RESUMEN

El presente Trabajo de Grado tuvo como finalidad determinar la susceptibilidad al daño por humedad, de una mezcla elaborada con asfalto 80-100 producido por Ecopetrol, el cual fue previamente sumergido bajo agua en condiciones y periodos de inmersión controlados, generando un “envejecimiento” en el ligante. Este envejecimiento es el que se buscó determinar, para encontrar cuál es el daño que se produce en la mezcla; esta determinación se planteó realizar mediante el uso de la metodología formulada en el Ensayo de Tracción Indirecta (TSR – por sus siglas en inglés) e implementar una nueva metodología de un equipo que está en proceso de investigación conocido como medidor de sensibilidad de humedad inducida (MIST – por sus siglas en inglés); estas dos pruebas determinan el daño que genera el agua en la mezcla.

Ahora bien, para determinar el comportamiento de la mezcla en uso, se planteó pruebas de desempeño mecánico: módulos dinámicos, fatiga y ahuellamiento. Con estos resultados se compararon con los ensayos de susceptibilidad a la humedad para determinar su comportamiento. Adicionalmente a los ensayos mencionados, se realizó un análisis visual de las muestras elaboradas en laboratorio en diferentes periodos de inmersión, este estudio se desarrolló mediante la toma de imágenes escaneadas directamente de la muestra y analizadas mediante el software IPAS® desarrollado por el instituto MARC de la Universidad de Wisconsin, el cual permite determinar la estructura de la mezcla y obtener los puntos de contacto entre los agregados lo cual conforma la estructura o esqueleto de la muestra en ese punto.

Para esta investigación se pudo determinar que el ligante asfáltico al ser sometido a periodos de inmersión en agua, perdió propiedades en un 26% generando una degradación en el comportamiento mecánico de la mezcla en uso, esta degradación se debe al cambio en las propiedades químicas, físicas y reológicas que se evidencio en el ligante, por ejemplo la variación de los asfaltenos fue de un 35,55% en 21 meses de inmersión.

Palabras Clave

MIST, TSR, envejecimiento ligante, SUPERPAVE, IPAS®, daño por humedad, stripping

ABSTRACT

The objective of this paper is to assess the damage susceptibility of the asphalt 80-100 - produced by Ecopetrol – when exposed to humid conditions. The asphalt has been submerged in water under controlled conditions and time periods and as a result, the binder has aged. We seek to understand how the damage sustained by the asphalt mixture behaves under such conditions. To achieve this, we will use the (Tensile Strength Ratio) TSR methodology. Furthermore, we will support our research through a new methodology known as MIST - (Moisture Induced Sensitivity Test). These two test trials will enable us to determine the damage generated in the mixture due to the water exposure.

To determine the behavior of the mixture under use, we developed mechanical performance tests aimed to evaluate the life expectancy given the road conditions. These tests include dynamic modules, fatigue and rutting. We compared the test results to the humid susceptibility tests to determine the damage behavior. Furthermore, we conducted a visual analysis of the controlled samples exposed to different periods of water immersion. The analysis will be supported by scanned sample images analyzed by the IPAS software developed by the MARC Institute from the University of Wisconsin. This software will help us to determine the mixture structure as well as to obtain the aggregate contact points that conform the structure of the sample in that point.

We were able to determine that the binder lost 26% of its properties when exposed to water immersion. As a result of the water exposure, the asphalt suffered a mechanical behavioral degradation, both in chemical and physical properties, evidenced in the aged binder. For example, the asphaltenes varied in 35.55% in 21 months.

Keywords

MIST, TSR, binder aging, SUPERPAVE, IPAS®, moisture damage, stripping

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	<i>Objetivo General</i>	3
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	3
2	MARCO CONCEPTUAL Y DE ANTECEDENTES	4
2.1	STRIPPING (DESPRENDIMIENTO).....	4
2.2	DAÑO POR HUMEDAD	9
2.3	MIST (MEDIDOR DE SENSIBILIDAD DE HUMEDAD INDUCIDA).....	13
2.4	ENVEJECIMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	14
2.4.1	<i>Los factores extrínsecos del envejecimiento</i>	14
2.4.2	<i>Los factores intrínsecos del envejecimiento</i>	15
2.5	AHUELLAMIENTO	15
2.6	FATIGA EN MEZCLA ASFÁLTICA	18
2.7	MODÚLOS DINÁMICOS DE MEZCLA ASFÁLTICA.....	21
2.8	ANÁLISIS DE IMÁGENES EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA	23
3	MATERIALES Y MÉTODOS	25
3.1	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	25
3.1.1	<i>Ligante Asfáltico</i>	25
3.1.2	<i>Agregados Pétreos</i>	26
3.1.3	<i>Mezcla Asfáltica</i>	27
3.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL	29
3.2.1	<i>Ensayos para determinar el efecto de la humedad</i>	31
3.2.1.1	Ensayo MIST (Medidor de sensibilidad de humedad inducida)	31
3.2.1.2	Ensayo TSR.....	34
3.2.2	<i>Ensayos para determinar el comportamiento mecánico</i>	35
3.2.2.1	Ensayo de ahuellamiento	35
3.2.2.2	Ensayo de fatiga	36
3.2.2.3	Módulo dinámico.....	37
3.2.3	<i>Análisis de imágenes a través del programa IPAS®</i>	38

4	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	42
4.1	ENSAYO TSR (TENSILE STRENGTH RATIO).....	42
4.2	ENSAYO MIST (MOISTURE INDUCED SENSITIVITY TEST).....	44
4.2.1	<i>Ensayo MIST 4% de vacíos de aire.....</i>	44
4.2.2	<i>Ensayo MIST 7% de vacíos de aire.....</i>	47
4.2.3	<i>Resultado comparativo entre TSR – MIST 4% - MIST 7%.....</i>	48
4.3	ENSAYO MÓDULO DINÁMICO EN MEZCLA ASFÁLTICA – MTS.....	53
4.3.1	<i>Curvas maestras de módulos dinámicos de mezcla asfáltica</i>	53
4.4	ENSAYO DE AHUELLAMIENTO.....	58
4.5	ENSAYO DE FATIGA TRAPEZOIDAL	64
4.6	ANÁLISIS DE IMÁGENES MEDIANTE EL SOFTWARE IPAS®	66
4.7	RELACIÓN ENTRE HUMEDAD Y ENSAYOS MECÁNICOS DE MEZCLA Y FÍSICOS, QUÍMICOS Y REOLÓGICOS DE LIGANTE	71
5	CONCLUSIONES	82
6	RECOMENDACIONES	85
7	BIBLIOGRAFÍA	86
	ANEXOS.....	95

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Ensayos para determinar el stripping en mezclas asfálticas en caliente	5
Tabla 2. Valores mínimos de TSR para los ensayos de determinación de stripping	7
Tabla 3. Factores que contribuyen con el daño por humedad de las mezclas asfálticas en caliente ..	8
Tabla 4. Factores que afectan el ahuellamiento en mezclas asfálticas	16
Tabla 5. Ensayos realizados sobre el cemento asfáltico en cada uno de los periodos de inmersión	25
Tabla 6. Resumen de fracciones de la separación por cromatografía	26
Tabla 7. Resumen caracterización reológica con DSR.....	26
Tabla 8. Ensayos realizados sobre el agregado pétreo.....	27
Tabla 9. Granulometría de diseño para la mezcla asfáltica MDC-2.....	28
Tabla 10. Propiedades de la mezcla de agregados pétreos	28
Tabla 11. Resumen de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica MDC-2.....	28
Tabla 12. Ensayos con su respectiva norma.....	30
Tabla 13. Parámetros aplicados al ensayo MIST según norma ASTM D7870-13 (aprobada en junio de 2013)	31
Tabla 14. Parámetros aplicados al ensayo MIST.....	33
Tabla 15. Módulo dinámico a 25°C y 10Hz	54
Tabla 16. Comportamiento de la fracción asfaltenos.....	54
Tabla 17. Resultados de ahuellamiento a 105 min	60
Tabla 18. Resumen de parámetros de las leyes de fatiga Original, 12 meses y 21 meses.....	64
Tabla 19. Relación # contactos/ # agregados MIST Seco	69
Tabla 20. Relación # contactos/ # agregados MIST húmedo	70
Tabla 21. Relación # contactos/ # agregados TSR seco	70
Tabla 22. Relación # contactos/ # agregados TSR húmedo.....	70
Tabla 23. Variación de los ensayos desempeño de la mezcla, realizados en los diferentes periodos de inmersión	81
Tabla 24. Variación de los ensayos del ligante asfáltico, realizados en los diferentes periodos de inmersión	81

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Láminas de vidrio para disposición de las muestras. (Atencia H., 2011)	29
Figura 2. Láminas y el tanque donde se sumergió el asfalto.	30
Figura 3. Plan de ensayos en la investigación	31
Figura 4. Equipo de acondicionamiento MIST.	32
Figura 5. Condición seca y húmeda para el ensayo MIST.....	33
Figura 6. Prensa de carga que se empleó para el ensayo TSR y MIST.	33
Figura 7. Probeta fallada en la prensa de carga para el ensayo de TSR y MIST.	34
Figura 8. Saturación para el ensayo de TSR.	35
Figura 9. Equipo de ahuellamiento norma INVÍAS – PUJ.....	35
Figura 10. Probeta de ahuellamiento.	36
Figura 11. Probetas de forma trapezoidal para el ensayo de fatiga.....	36
Figura 12. Molde para elaborar las probetas trapezoidales- PUJ	37
Figura 13. Banco de fatiga (PUJ).....	37
Figura 14. Probeta para módulo dinámico – PUJ	38
Figura 15. Montaje de ensayo de módulo dinámico – MTS®	38
Figura 16. Seccionamiento patrón de las muestras de mezcla asfáltica.....	39
Figura 17. Procesamiento de imágenes en el programa IPAS®.	40
Figura 18. Control de la imagen en el programa IPAS®	40
Figura 19. Análisis de imágenes en el programa IPAS®.....	41
Figura 20. Comparativo de daño por humedad en TSR	43
Figura 21. Comparativo de carga máxima en TSR.....	44
Figura 22. Comparativo de daño por humedad en MIST 4%	45
Figura 23. Comparativo de carga máxima en MIST 4%	46
Figura 24. Comparativo de daño por humedad en MIST 7%	47
Figura 25. Comparativo de carga máxima en MIST 7%	48
Figura 26. Comparativo de daño por humedad entre TSR-MIST4%-MIST7%	49
Figura 27. Desprendimiento de agregados en pruebas de daño por humedad.	49
Figura 28. Comparativo de carga máxima muestras húmedas entre TSR-MIST4%-MIST7%.....	51

Figura 29. Comparativo de carga máxima muestras secas entre TSR-MIST4%-MIST7%	52
Figura 30. Consolidado curvas maestras de módulo dinámico de mezcla asfáltica entre 1 y 100 Hz.	55
Figura 31. Comportamiento de las fracciones SARA en los periodos de inmersión	56
Figura 32. Comparativo ahuellamiento vs tiempo - muestras 0 a 21 meses.....	59
Figura 33. Comparativo ahuellamiento vs tiempo - muestras desde original hasta 9 meses.....	61
Figura 34. Comparativo ahuellamiento vs tiempo - muestras desde 12 meses hasta 21 meses.....	61
Figura 35. Muestras de ahuellamiento en los diferentes periodos de inmersión, desintegradas	64
Figura 36. Comparación leyes de fatiga original, 12 meses, 21 meses	65
Figura 37. Consolidado # de contactos MIST 7%.....	67
Figura 38. Consolidado # de contactos TSR 7%	68
Figura 39. Consolidado relación MIST 7% y TSR 7%.....	69
Figura 40. Relación entre Penetración Vs TSR	71
Figura 41. Relación entre Viscosidad Brookfield Vs. TSR	71
Figura 42. Relación entre viscosidad Brookfield Vs. MIST 4%	72
Figura 43. Relación entre módulo complejo ligante Vs. TSR.....	72
Figura 44. Relación entre # contactos TSR Vs. TSR.....	73
Figura 45. Relación entre # contactos MIST Vs. MIST 4%	73
Figura 46. Relación entre Penetración Vs. ahuellamiento a 105 min.....	74
Figura 47. Relación penetración Vs. módulo dinámico de mezcla.....	76
Figura 48. Relación viscosidad Brookfield Vs. módulo dinámico de mezcla.....	76
Figura 49. Relación asfaltenos Vs. módulo dinámico de mezcla	77
Figura 50. Relación módulo complejo del ligante Vs. módulo dinámico de mezcla	77
Figura 51. Relación ángulo de fase del ligante Vs. módulo dinámico de mezcla.....	78
Figura 52. Relación de tracción indirecta TSR Vs. módulo dinámico de mezcla	78
Figura 53. Relación de tracción indirecta MIST 7% vacíos de aire Vs. módulo dinámico de mezcla.	79

1 INTRODUCCIÓN

El presente proyecto está enmarcado dentro de una investigación doctoral llamada: *“Estudio de la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas a partir del ensayo MIST y su relación con el desempeño mecánico”*. En consecuencia, dentro de la Maestría en Ingeniería Civil se han realizado distintos trabajos de grados en los últimos periodos académicos que sirven de referencia a los futuros investigadores dentro del mismo marco de estudio.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

El tema a abordar en este trabajo hace parte de un proyecto de investigación de tesis doctoral de la Pontificia Universidad Javeriana, el cual tiene como objetivo conocer el *“Efecto del agua en el fenómeno de stripping en los pavimentos”* en ejecución con la Universidad de Wisconsin y dentro del proyecto de doctorado *“Estudio de la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas a partir del ensayo MIST y su relación con el desempeño mecánico”*.

Los estudios que se han realizado frente a este tema han demostrado que la principal causa del deterioro de las mezclas asfálticas en servicio es el proceso de oxidación (envejecimiento oxidativo), el cual es ocasionado por agentes como: agua, rayos UVB y UVA, temperatura, tráfico y cargas. Sin embargo, el problema aún se encuentra en proceso de estudio, ya que en muchos casos es una combinación de uno o varios factores. En este contexto, es importante tener en cuenta que existe la necesidad de investigar y profundizar en el envejecimiento de mezclas asfálticas oxidadas, puesto que los asfaltos experimentan un notable deterioro antes de alcanzar su vida útil estimada, por lo que se pretende determinar los factores asociados con éste fenómeno (Reyes & Millán, 2009).

La sensibilidad al agua en mezclas asfálticas en muchos países ha sido reconocida como uno de los mayores problemas que se presentan en los pavimentos asfálticos, pero no existe una normatividad en la cual se simule de una forma más real el comportamiento en servicio de una mezcla asfáltica y que

logre determinar la susceptibilidad a la humedad; con la metodología de diseño SUPERPAVE® este parámetro se tiene en cuenta a la hora de diseñar. Actualmente en Colombia, existen dos maneras de medir la sensibilidad al agua: la primera, de carácter visual y la segunda, como prueba mecánica llamada el Ensayo TSR referencia a la norma AASHTO 283 (Solaimanian, *et al.* 2007).

Como lo plantea (Bahia & Ahmad, 1999) la presencia de agua y vapores de agua en la mezcla son los mayores factores que afectan la utilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica. En consecuencia, el principal daño que genera el agua al interior de la mezcla es la pérdida de adherencia entre el ligante y el agregado y una disminución entre la cohesión de las mismas. Al respecto Rondón *et al* (2008) afirma que las mezclas asfálticas, en presencia de agua, generan una pérdida de adherencia entre el agregado pétreo y el ligante bituminoso, incrementando el flujo y una disminución en la relación estabilidad/flujo de la mezcla asfáltica, analizada bajo los parámetros Marshall.

Al respecto Salgado, *et al.* (2006) menciona que “para mejorar la previsión de las degradaciones que pueden ser generadas en los pavimentos, los ensayos de laboratorio deben necesariamente tomar en cuenta el efecto del agua en sus estructuras. Estas medidas preventivas son imperativas a los responsables por las obras de pavimentación ejecutadas en países tropicales portadores de un clima ecuatorial húmedo, que poseen elevadas precipitaciones pluviométricas y temperatura media a lo largo del año”; teniendo en cuenta lo anterior, es necesario ahondar en el conocimiento de nuestros materiales y en el desempeño de los mismos dentro de las mezclas asfálticas.

Como lo concluye Limón *et al* (2009), “de momento no se puede recomendar un solo método para evaluar la sensibilidad al agua de las mezclas asfálticas. Los resultados que arrojan en algunos casos pueden suscitar polémica dado que unos métodos pueden dar algunas mezclas como aceptables y otros pueden rechazar las mismas mezclas”.

En este sentido, el presente Proyecto de Investigación busca dar un aporte significativo al estado del conocimiento y al análisis de la detección y prevención del daño causado por el agua, en los materiales de una estructura de pavimento, teniendo en cuenta que es uno de los problemas que más afecta la servicialidad de nuestras vías. De igual forma, es importante tener en cuenta, que se optó por utilizar un

diseño SUPERPAVE® con granulometría MDC-2 tipo INVÍAS, debido a que es la granulometría de mayor uso en los proyectos de infraestructura vial del país.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

- Establecer la influencia de la humedad en el desempeño mecánico de mezclas asfálticas elaboradas con asfalto 80-100, sumergido en agua.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar el efecto de la humedad en las mezclas asfálticas con diferentes periodos de inmersión en los ensayos TSR (Tensile Strength Ratio) Y MIST (Moisture Induced Sensitivity Test).
- Establecer el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas mediante los ensayos de fatiga, ahuellamiento y módulo dinámico para diferentes periodos de inmersión.
- Analizar el efecto de la humedad en las mezclas asfálticas utilizando imágenes mediante el software IPAS®.

2 MARCO CONCEPTUAL Y DE ANTECEDENTES

Para la elaboración del marco conceptual se realizó una revisión bibliográfica que permitiera conocer los métodos disponibles para la evaluación de la susceptibilidad a la humedad y el desempeño mecánico en los ensayos de ahuellamiento, fatiga y módulo dinámico, así como también los estudios que han realizado el análisis de imágenes a través del programa IPAS®.

2.1 STRIPPING (Desprendimiento)

Durante las últimas seis décadas, se ha buscado un protocolo en el laboratorio para definir el comportamiento de la mezcla asfáltica al fenómeno del stripping y el tema ha sido bastante complejo e impredecible (Solaimanian, *et al*, 2003). Desde el año 1920 se han realizado pruebas para el análisis del mismo; al principio se realizó con mezclas sueltas, posteriormente los estudios fueron dirigidos hacia las mezclas compactas, la primera prueba realizada fue la de compresión-inmersión convirtiendo a mediados de 1950 en un estándar para la ASTM.

Posteriormente, en las décadas de lo 60s y 70s los investigadores Johnson en 1969, Schmidt y Graf en 1972, Jiménez en 1974 y Lottman en 1978 realizaron pruebas para predecir la susceptibilidad a la humedad, simulando las condiciones reales de campo a través del condicionamiento acelerado en el laboratorio. Jiménez utilizó la saturación al vacío, seguido de la aplicación cíclica de presión de poro para lograr este propósito, mientras que Lottman, utilizó la saturación al vacío seguido de acondicionamiento de agua de baño helado y caliente.

Fue Lottman quien realizó el protocolo de laboratorio de prueba que presentó en 1978, el cual fue un gran avance en el procedimiento de un ensayo coherente para predecir el daño por humedad inducido en la mezcla asfáltica. El protocolo presentado por Lottman fue modificado posteriormente por Tunnicliff y estandarizado como AASHTO T-283 o ensayo de relación de tracción indirecta en mezclas asfálticas. Esta prueba fue estudiada en el proyecto denominado “NCHRP 9-13” con diferentes

parámetros para determinar los resultados en condiciones variables, el cual ha sido desarrollado por el Programa de Investigación de la carretera Nacional de Cooperativas (NCHRP).

Después de la modificación del ensayo de Lottman no hubo cambios significativos en los procedimientos de prueba de daño por humedad, hasta que el Strategic Highway Research Program (SHRP) patrocinó una investigación que tenía como objetivo el desarrollo de nuevas pruebas de sensibilidad a la humedad; como resultado, se creó el sistema de acondicionamiento ambiental (ECS) planteado por Al-Swahili y Terral en 1992 y al mismo tiempo se desarrolló el ensayo de la rueda de Hamburgo (HWTD). Según la literatura, Choubane *et al.* (2000), propone realizar una modificación al ensayo el cual consiste en incluir una saturación al vacío durante 30 minutos con 610 mm de mercurio, lo que representa un nivel de saturación entre 85 y 95 por ciento; así mismo, un ciclo de congelación-descongelación. En el informe de Kiggundu & Roberts (1988) se enumeran las pruebas que se han desarrollado para determinar el stripping, tal como se muestra en la Tabla 1. Cabe aclarar que para el presente estudio de investigación se empleó el ensayo de relación de tracción indirecta de AASHTO T-283.

Tabla 1. Ensayos para determinar el stripping en mezclas asfálticas en caliente

MÉTODO	ASTM/AASHTO/OTRA	IMPORTANCIA DE USO	TOLERANCIA DESIGNADA ASTM/AASHTO/OTRA
Ensayo de inmersión compresión	D1075, T165	Alta	50% (ASTM/AASHTO)
Ensayo de tracción indirecta	Ninguna	Varias versiones en uso	No
• Versión de Lottman	T283-85 (partes)	Medio	21.4 – 26%
• Versión de Tunnicliff/Root	T283-85 (partes) Esfuerzos ASTM completado en Junio de 1988	Medio a Alto	23%
Ensayo Marshall sumergido	No hay un estándar pero	Muy bajo	Precisión o tolerancia localizada
• Evaluación húmeda	ASTM tiene un proyecto		
• Evaluación seca	preparado		
Ensayo de módulo resiliente	Ninguno pero puede usarse ASTM D 4123	Bajo a Medio	No establecido
Método del golpe doble	Ninguno – bajo prueba en Arizona	Muy bajo	No documentado

Fuente: (Kiggundu & Roberts, 1988).

Para el ensayo de inmersión compresión se utilizaron probetas circulares de 4" de diámetro x 4" de altura, elaboradas con la norma ASTM 1074, éstas se dividieron en dos grupos (secos y húmedos) con una temperatura de 25°C y con tasas de deformación de 0.2 a 2.0 pulgadas por minuto. El valor mínimo

de la relación de resistencia es de 75 por ciento, esta prueba tuvo un alto uso, pero se evidenció baja confiabilidad para resultados exactos.

Por su parte, el ensayo Lottman, está referenciado según el informe NCHRP 246. Esta prueba emplea muestras de 4x2.5 pulgadas Marshall, 4x2 pulgadas Hveem y también se puede elaborar con el compactador giratorio. Las muestras se dividen en dos grupos (húmedas y secas) y se acondicionan al estado húmedo; posteriormente, se someten a un ciclo de congelamiento – descongelación. La prueba se realiza con una temperatura de 12,8°C a una velocidad de deformación de 0.065 por minuto. El TSR mínimo sugerido por Lottman es 70 por ciento. Por otra parte, el Ensayo Tunni-cliff / Root está actualmente en consideración para la normalización mediante la norma ASTM. De igual forma, se le realizaron varias modificaciones al ensayo de Lottman en los siguientes parámetros:

- Tasa de Carga (2 in / min) en comparación con 0.065 in / min.
- La temperatura de prueba a 25°C en comparación con 12,8°C.
- Pre-saturación de 55 a 80 por ciento en comparación con un nivel ilimitado en el ensayo de Lottman.
- Ausencia de un ciclo de congelación.

Por su parte, el ensayo de Prueba de Inmersión Marshall se emplea para las muestras elaboradas con diseño Marshall y se utiliza para condición seca y húmeda. Las pruebas son por lo general a 60°C usando una tasa de deformación de 2 pulgadas por minuto para ambas condiciones. El valor mínimo de aceptación es de 75 por ciento. Por último, está el módulo resiliente, el cual utiliza probetas compactadas de tamaño variable, que se ponen a prueba a lo largo del plano diametral, mediante el uso de una onda de tensión pulsante, mientras se están grabando las deformaciones a lo largo de los extremos por transductores diferenciales lineales variables (LVDT). Ambos conjuntos de humedad (acondicionado y seco) se evalúan y el módulo medio se divide por el módulo de medios secos que producen una relación de módulo elástico. La relación mínima sugerida es de 70 por ciento. En la revisión bibliográfica se encontraron los valores mínimos de aceptación de los ensayos mencionados anteriormente. (Ver Tabla 2).

Caro & Álvarez (2011) consideran el stripping como la manifestación más común en la mezcla con pavimentos flexibles, debido al deterioro que se presenta causado por la presencia del agua en el interior de la misma y ocurre cuando se separa el ligante asfáltico del agregado pétreo. Cabe destacar, que se han realizado múltiples investigaciones para estudiar las causas, los mecanismos y el uso de aditivos para reducir al mínimo o evitar la separación e involucra aspecto físico, químico, mecánico y termodinámico. Sin embargo, muy pocos documentos están disponibles en la literatura para identificar y evaluar este fenómeno (Rondón & Moreno, 2010). Fenómeno que fue identificado en la década de los treinta (Caro, *et al.* 2008).

Tabla 2. Valores mínimos de TSR para los ensayos de determinación de stripping

MÉTODO DE ENSAYO	ÍNDICE MÍNIMO DE ENSAYO	% DE ÉXITO
Lottman (NCHRP 246)	TSR=70%	67
	TSR=80%	76
Tunncliff-Root (NCHRP 274)	TSR=70%	60
	TSR=80%	67
	TSR=70-80%	67
Compresión Inmersión (ASTM D1075)	Radio de resistencia=75%	47
Ensayo de "hervido 10 minutos"	Recubrimiento retenido 85-90%	58
Ensayo de "tira" dinámica de Nevada	Pérdida de peso (no menor a 25%)	36

Fuente: (Kiggundu & Roberts, 1988)

Al respecto Tarefder, *et al.* (2003) afirma que el agua genera pérdida de resistencia en la interface entre el ligante asfáltico y el agregado pétreo, generando que la tasa de acumulación de la deformación permanente aumente como consecuencia de la pérdida de cohesión de la mezcla por humedad. Kanitpong y Bahía (2008) reportan en su investigación que la adherencia entre el ligante y el agregado pétreo depende de la mineralogía de este último. Rondón y Moreno (2010) señalan que el asfalto en presencia de agua modifica su consistencia y aumenta su rigidez. Lo anterior causa contracción del ligante sin cambio de volumen dentro de la mezcla asfáltica, dando como resultado un desprendimiento del asfalto con el agregado.

Por otra parte, Airey (2003) afirma que los principales factores que afectan la durabilidad de mezclas asfálticas, asumiendo que se encuentran bien construidas, son la edad de envejecimiento y el daño por humedad. Generalmente las investigaciones realizadas de stripping evalúan la influencia y el tipo de agregado pétreo, la influencia del "mastic" y en menor proporción se han realizado mediciones para evaluar el impacto del agua en el ligante asfáltico, debido a que éste ocurre cuando el agua penetra

entre la superficie del agregado y la película de asfalto, y teniendo en cuenta la mayor afinidad del agua con el pétreo, la unión se rompe. (Infante, *et al.* 2012).

Hasta el momento es muy poca la importancia que se le ha dado al ligante, debido a que siempre se ha considerado un material impermeable, que tiene una baja reacción ante agentes químicos, como el oxígeno presente en el agua, aunque estos compuestos son capaces de cambiar las propiedades físicas y químicas del ligante, como por ejemplo la oxidación y el endurecimiento. En la actualidad se han realizado investigaciones como la de Atencia (2011) y la de Cortes (2012) que han estudiado el comportamiento del ligante en su condición física, química y reológicas, encontrando cambios considerables en el desempeño del ligante; estudios que aportan material fundamental al momento de analizar el fenómeno de daño por humedad en la mezcla asfáltica.

Existen otros procesos en los cuales tiene incidencia el fenómeno estudiado como son: el diseño de mezcla, la producción en planta, el clima y el proceso constructivo, entre otros. (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Factores que contribuyen con el daño por humedad de las mezclas asfálticas en caliente

DISEÑO DE LA MEZCLA	<ul style="list-style-type: none"> - Química del asfalto y agregados - Contenido de asfalto - Vacíos con aire - Aditivos
PRODUCCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> - Porcentaje de recubrimiento de agregados y calidad del material que pasa el tamiz 200 - Temperatura en planta - Exceso de humedad en los agregados - Presencia de arcilla
CONSTRUCCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> - Compactación - Alta permeabilidad - Segregación de la mezcla - Cambios del diseño de la mezcla respecto al sitio de Colocación
CLIMA	<ul style="list-style-type: none"> - Áreas muy lluviosas - Ciclos de congelamiento y descongelamiento - Separación del vapor de agua
OTROS FACTORES	<ul style="list-style-type: none"> - Drenaje superficial - Drenaje sub superficial - Estrategias de rehabilitación-sellos de materiales marginales sobre las mezclas asfálticas en caliente - Paso de altas cargas vehiculares (tracto mulas)

Estos mecanismos pueden actuar individualmente o juntos hasta causar fallas por adhesión en mezclas asfálticas.

Fuente: («Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements», 2003)

2.2 DAÑO POR HUMEDAD

El primer estudio en analizar el daño que causa la humedad a la estructura del pavimento fue realizado por McAdam en 1916 el cual concluyó que: *“si el agua atraviesa una vía cualquiera que sea su espesor, pierde su soporte y se rompe”*. De igual forma, en el proyecto “NCHR 9-34”, se llevó a cabo el desarrollo de un procedimiento de prueba de laboratorio mejorado, para predecir la susceptibilidad al daño por humedad en una mezcla asfáltica a través de la integración del Sistema de Acondicionamiento Ambiental (ECS) y simples pruebas de desempeño SUPERPAVE®. El ECS se desarrolló bajo la Strategic Highway Research Program (SHRP) para predecir la sensibilidad a la humedad de una mezcla asfáltica bajo condiciones de temperatura, saturación, y la carga dinámica, posteriormente fue estandarizado como AASHTO TP34, *“Determinación de Sensibilidad a la humedad de las mezclas bituminosas compactado sometido a condiciones de clima caliente y frío.”* (Solaimanian, et al. 2007)

Aschenbrener (2002), realizó un estudio en los Estados Unidos, sobre los daños de humedad en mezclas asfálticas en caliente, y encontró que un total de 44 estados han sufrido graves daños por humedad en sus pavimentos. Como medida a la reducción del daño de la humedad, el 82% de las agencias estatales de carreteras de la nación requieren algún tipo de tratamiento anti-stripping, debido a la gran cantidad de pavimentos deteriorados en los EE.UU. causados por humedad, se han hecho intentos para identificar los mecanismos de causa y para desarrollar procedimientos de ensayo que podrían estimar la susceptibilidad a la humedad en las mezclas asfálticas. En este contexto, es importante tener en cuenta que la calidad del pavimento depende de una adecuada selección de materiales resistentes al daño por humedad, de esta manera la presencia de agua en el pavimento puede acelerar el daño o reducir la vida útil del mismo. (Infante, et al. 2012). Así mismo, puede provocar deformaciones, causando el debilitamiento de la unión de asfalto-agregado, lo que lleva a la formación de baches, y agrietamientos. (Kringos & Scarpas, 2008).

Al respecto Angelo & Anderson (2003) menciona que el : *“Daño de la humedad es la pérdida de adherencia entre el asfalto y el agregado o en algunos casos la pérdida de la fuerza de cohesión del*

asfalto. *El Daño por humedad puede manifestarse a través de mecanismos de falla diferentes. Estos incluyen grietas, fatiga, ahuellamiento y baches*”.

Por su parte Kiggundu & Roberts (1988) define el daño por humedad como: *“el deterioro funcional progresivo de una mezcla asfáltica por la pérdida de adhesión entre el cemento asfáltico y la superficie de agregado y/o la pérdida de resistencia cohesiva del cemento asfáltico principalmente ante la acción del agua”*. Los daños por humedad finalmente afectan la cohesión (fuerza de atracción en un mismo material) y la adhesión (fuerza de atracción entre partículas de diferentes materiales).

Desde 1974, se manifestaba la preocupación por esta problemática, tal como lo señala Fromm (1974), *“el principal problema es entender cómo el agua penetra en la película de asfalto”*; algunos otros fenómenos, tales como el desplazamiento, desprendimiento y la acumulación de la presión de poro, son efectos que conducen al fallo adhesivo y cohesivo de la pavimentos de asfalto.

De igual forma, Little & Jones (2003) mencionan que existen mecanismos que contribuyen al daño por humedad, tales como: desprendimiento, desplazamiento, emulsificación espontánea, presión de poro, ruptura del ligante y socavación. Para que esto ocurra, el agua tiene que penetrar en la película de asfalto, estos mecanismos pueden actuar individualmente o juntos para causar daños dentro de la mezcla.

Para Little & Jones (2003), el desprendimiento se entiende como la separación del ligante del agregado por una fina capa de agua sin una ruptura evidente de la misma, lo cual indica una pérdida de adherencia, la que habitualmente se produce cuando se presenta discontinuidad. De esta manera, se entiende que a medida que aumenta la tensión superficial disminuye la adherencia. Kiggundu & Robert (1988), lo define como: *“la separación microscópica de una película de asfalto del agregado de una superficie por una capa delgada de agua”*. Otro aporte importante a tener en cuenta es el brindado por Majildzadeh y Brovold (1968), quienes definen *“el desprendimiento como la separación de la película de asfalto del agregado sin ruptura de aquella. Cuando ocurre este desprendimiento hay una pérdida de adhesión entre el ligante y el agregado, el agua se deposita en la interfaz agregado-ligante y ocasiona desprendimiento de la misma”*.

En cuanto al desplazamiento, precisa Kiggundu & Robert (1988): *“es causado por la eliminación de la película de asfalto de la superficie de agregado por el agua”*. Por su parte, Taylor & Khosla (1983) refieren que el desplazamiento: *“se produce debido a la presencia de un discontinuidad o interrupción en la película de asfalto, tales como poros y la rotura de película, donde el asfalto, agregado y agua libre están en contacto.”* Y según Majildzadeh & Brovold (1968) este problema *“se presenta por la penetración del agua hasta la superficie del agregado a través de una fisura en la película del agregado. Es una perforación que permite el ingreso del agua y la depositación de ésta en la interfaz agregado-asfalto que en realidad corresponde al desplazamiento de la película de asfalto”*. En el desplazamiento implica que el asfalto se encuentre en la superficie del agregado a través de la rotura del ligante. El proceso de desplazamiento también puede ser el resultado de cambios en el PH del agua en la superficie del agregado que entra a través del punto de interrupción. Como consecuencia, para alcanzar nuevamente el equilibrio atrae más agua y conduce a la separación física del asfalto del agregado (Little & Jones, 2003).

Ahora bien, haciendo referencia a la emulsión espontánea, Fromm (1974) observó que se produce cuando las capas de asfalto se sumergen en agua y la tasa de emulsificación depende de la naturaleza del asfalto y la presencia de aditivos; es decir, que la adhesión entre el agregado y el asfalto se pierde completamente. Lo anterior hace referencia a que el asfalto se puede combinar con el agua y conformar una emulsión invertida de gotas de agua en el cemento asfáltico y, por lo tanto, se puede generar un desprendimiento de la película de asfalto, cuando las formas de emulsión llegan a la superficie del agregado.

Frente a la presión de poros, Kiggundu & Robert (1988) mencionan que: *“este mecanismo precipita a partir de la presencia de agua en la estructura de poros de la mezcla asfáltica, lugares en los que la segregación es prevalente en los límites de la capa cuando se producen cargas de tráfico pesado y durante ciclos de congelación-descongelación”*. En consecuencia, el aumento en la presión de poros, se produce cuando el pavimento está en una condición de saturación, debido a la presencia de humedad dentro de la mezcla asfáltica y con la acumulación de la misma, las micro-grietas comienzan a crecer y eventualmente la ruptura de la película de asfalto (Kim, et al. 2009). Según Karlson (2005) esto, *“surge cuando los vacíos de aire se disminuyen debido a las cargas de tráfico, ocasionando que el agua en los*

huecos se comprima para crear una presión en el asfalto, una vez que esta llega al máximo hace que se cree internamente una rotura donde el agua pueda infiltrarse hasta la superficie del agregado”.

En la ruptura de la película, generalmente el agregado tiene caras fracturadas y afiladas que se generan con el proceso de trituración. Esta característica combinada con una película de asfalto muy delgada y las cargas de tránsito repetidas, facilita el ingreso del agua hasta el agregado (Infante, *et al.* 2012). Se debe a varias razones, incluyendo recubrimiento incompleto de la superficie del agregado, la carga de tráfico y de congelación-descongelación que se produce en el pavimento (Kim et al., 2009).

Referente a la socavación, esto ocurre en superficies saturadas en las que el paso de los vehículos genera una presión que incrementa la succión del agua atrapada en los vacíos (Infante, *et al.* 2012). Este concepto lo relacionan con osmosis, el cual surge por la presencia de soluciones de sal en los poros de los agregados (Fromm, 1974).

En la investigación realizada por Caro & Álvarez (2011), se determinó el índice de daño por humedad (IDH) de diferentes sistemas de cemento asfáltico – agregado, resultado al que se concluyó a través de variables intrínsecas como la energía superficial libre de agregados pétreos y cementos asfálticos, y las buenas condiciones de adhesión en estado seco y baja susceptibilidad a la pérdida de adhesión por la presencia de agua. El Departamento de Transporte (KDOT) de Kansas está empleando el ensayo KT-56 que mide el daño por humedad el cual es similar al ensayo de la AASHTO T-283, de acuerdo con el procedimiento esta prueba toma 4 días en total y se emplean sólo dos pruebas de falla (Shiwakoti, 2008).

A su vez, las mezclas de asfalto pierden su resistencia y durabilidad debido al daño por humedad, esta falla puede producirse debido a la pérdida de unión entre el cemento de asfalto o la masilla (cemento asfáltico además de la carga mineral menos 74 micras y el agregado más pequeño) y el agregado fino y grueso. Cuando el agua penetra, la masilla se debilita de modo que es más susceptible a daños durante la carga de tráfico cíclico (Shiwakoti, 2008).

2.3 MIST (MEDIDOR DE SENSIBILIDAD DE HUMEDAD INDUCIDA)

En el año 2005 el Departamento del Transporte de Mississippi (MDOT) realizó la investigación Laboratory Accelerated Stripping Simulator for Hot Mix Asphalt, dirigida por (Buchanan & Moore, 2005), el estudio consistió en la evaluación de HMA de gradación gruesa, utilizando metodología Superpave, para este estudio tres condiciones de antistripping fueron evaluadas: ninguno, cal hidratada y agente antistripping líquido adicionándole cal hidratada (Morlife R 2200). Dos ligantes asfálticos se evaluaron: PG 67-22 (asfalto puro) y PG 76-22 (polímero asfalto modificado). Con el compactador giratorio SUPERPAVE®, las muestras de HMA se compactaron a una altura de 95 mm a 7 por ciento de vacíos de aire. Posteriormente, las muestras se acondicionaron en el dispositivo MIST, al completar el proceso de las muestras, se determinó la resistencia a la tracción y se compararon con la resistencia a la tracción de las muestras secas, determinando la "Resistencia de mezclas de pavimentación bituminosas a Stripping - método de vacío de saturación" (MT-63). Las mediciones de turbidez y el pH se hicieron también del agua antes, durante y después de la prueba para las muestras. Además, las mezclas se ensayaron usando el ensayo de ebullición (MT-59) para comparar los resultados obtenidos a partir del MIST.

Como conclusión Buchanan & Moore (2005) indicaron: *“en resumen, el método de prueba MT-59 no es una prueba precisa en la identificación de stripping de mezclas HMA. La prueba no es lo suficientemente grave como para identificar las mezclas que son susceptibles al stripping. El equipo MIST muestra potencial para medir el stripping de HMA. Los datos obtenidos de la relación de cambio en la turbidez indican claramente que alguna forma de stripping se está produciendo durante la prueba. Una investigación adicional para el MIST se debe realizar para determinar los parámetros de prueba. Sin embargo, antes de seguir investigando se debe continuar con varias modificaciones al MIST para mejorar su funcionamiento y la capacidad de evaluación de stripping”.*

Del mismo modo, Buchanan & Moore (2005) indican que el equipo MIST es un prototipo fabricado por INSTROTEK Inc. en abril de 2002 y fue desarrollado para proporcionar un método racional para la evaluación de la susceptibilidad a la humedad en HMA. Además, fue diseñado para que en menos de 3 horas se simule el *stripping*, debido a que el equipo controla la temperatura y genera una presión de

poro en la mezcla, simulando las condiciones de campo existentes, tales como elevada temperatura en servicio, tráfico y humedad (Ver Figura 4).

2.4 ENVEJECIMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

La bibliografía revisada frente a este tema hace referencia a que el envejecimiento cambia la estructura molecular de los asfaltos y que a su vez éstos alteran las propiedades de la mezcla asfáltica, tales como el módulo complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) principalmente. Para conocer este efecto, es necesario evaluar las propiedades mecánicas, físicas, químicas y reológicas de las muestras envejecidas y originales, como lo hicieron las investigaciones antecesoras de Atencia (2011), Cortes (2012), Parra & Cepeda (2012), Ardila & Granados (2012). De acuerdo con Bell (1989), el envejecimiento de las mezclas asfálticas es un fenómeno producido por la interacción de variables intrínsecas y extrínsecas, que producen un efecto de endurecimiento (rigidez) en la mezcla. A continuación se resumen estos factores.

2.4.1 Los factores extrínsecos del envejecimiento

Los principales factores externos son la temperatura, las condiciones de fabricación y transporte; la temperatura de fabricación para una mezcla asfáltica oscila entre 150 y 170 grados centígrados, lo cual significa más volatilización de compuestos livianos y mayor oxidación. De acuerdo con Bianchetto (2006), esta variable en mención se debe manejar con cuidado, ya que si sobrepasa las temperaturas límites se producirá un envejecimiento prematuro del asfalto, reduciendo la vida de servicio de la mezcla asfáltica. Los factores climáticos también juegan un papel importante durante el periodo de servicio, ya que son los responsables principales del envejecimiento a largo plazo, de esta manera los climas cálidos y con elevadas radiaciones solares, favorecen el envejecimiento. Por su parte, el agua propende al desprendimiento de la película de ligante, lo que causa una degradación del material y facilita la acción de los factores que influyen el envejecimiento (Bianchetto, 2006). Otro factor que interviene, es el efecto de las radiaciones solares, el cual según Cortes *et al* (2010), debido a esto la estructura molecular de una mezcla asfáltica puede cambiar y así mismo acelerar los procesos de envejecimiento térmico o alterar la susceptibilidad al agua de las mezclas.

2.4.2 Los factores intrínsecos del envejecimiento

La Volatilización de fracciones livianas, Bianchetto (2006) las entiende como *“la pérdida de los componentes más ligeros, los malténicos, por efectos de la temperatura (planta asfáltica, clima en servicio) y de las condiciones de exposición”*. La volatilización ocurre en la fracción más liviana (saturados); los aceites parafínicos (aromáticos) se convierten en aceites resinosos (resinas) y estos a su vez en asfaltenos. (Cortes V., 2012). La Oxidación (absorción y difusión de oxígeno) Huang & Zeng (2007) la definen como: *“el contacto con la atmósfera el asfalto se oxida, formando grupos polares (hidroxilos, carbonilos, carboxílicos) que contienen O₂ y que tienden a asociarse en compuestos de alto peso molecular, incrementando su consistencia y perdiendo flexibilidad”*. Sumado a lo anterior, la Tixotropía y sinéresis, según Bianchetto (2006) se debe principalmente: *“a una lenta reorientación molecular y cristalización de compuestos resinosos, es una propiedad específica de algunos fluidos no newtonianos y pseudoplásticos consiste en que estos pierden su resistencia, o disminuyen su viscosidad al someterlos a una tensión cortante (cizalla) a medida que pasa el tiempo”*.

2.5 AHUELLAMIENTO

De acuerdo con Collop (1995), Sousa, *et al.* (1994), Archilla (2006), el fenómeno del ahuellamiento es uno de los principales mecanismos de daño de capas asfálticas en estructuras de pavimentos flexibles que puede generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento y ocurre en cualquier capa de la estructura. Según Archilla (2006), se presenta debido a la densificación primordialmente durante la construcción y por la formación de deformaciones de corte durante la vida útil del pavimento. De acuerdo con la literatura, los principales factores que afectan la resistencia a la deformación permanente de mezclas asfálticas son: (1) carga, (2) temperatura, velocidad de carga y humedad, (3) densidad y compactación, (4) tamaño, tipo, forma y granulometría del agregado, (5) tipo de ligante asfáltico. Según Sousa, *et al.* (1994), determinó la influencia que tiene el cambio de los factores sobre el aumento o disminución de las deformaciones permanentes, tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Factores que afectan el ahuellamiento en mezclas asfálticas

	FACTOR	CAMBIO EN EL FACTOR	EFFECTO SOBRE LA RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO
Agregados pétreos	Textura superficial	Liso a rugoso	Incrementa
	Forma	Redonda a regula	Incrementa
	Tamaño	Incremento en tamaño máximo	Incrementa
Ligante Asfáltico	Rigidez	Incremento	Incrementa
Mezcla	Contenido del ligante	Incremento	Disminuye
	Contenido de vacíos	Incremento	Disminuye
	Grado de compactación	Incremento	Incrementa
	Temperatura	Incremento	Disminuye
Condiciones de campo	Esfuerzo o deformación	Incremento	Disminuye
	Repeticiones de carga	Incremento	Disminuye
	Agua	Seco a húmedo	Disminuye

Fuente: (Sousa, *et al.*, 1994).

Según Rondón *et al* (2012), la deformación permanente es el deterioro representado por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original, el cual representa la acumulación de pequeñas deformaciones producidas con cada aplicación de carga y es irre recuperable. Hua y White (2002) concluyen que el tipo y forma de la llanta de los vehículos tienen alta influencia sobre el fenómeno de ahuellamiento, ya que la distribución de carga al pavimento es diferente dependiendo del tipo de llanta que se emplee. En este mismo estudio se determinó que el incremento de ahuellamiento en vías en Estados Unidos en los últimos años se atribuye principalmente al aumento en las presiones de contacto, ejes de carga y volúmenes de tráfico. Los equipos desarrollados con el fin de estudiar este proceso, difieren según su procedencia en sus características, pudiendo algunos realizar el ensayo en aire (condición seca) o en condición húmeda (probetas sumergidas en agua).

Algunos de los equipos más utilizados en el mundo para medir este fenómeno en pequeña escala es el Asphalt Pavement Analyzer (APA), Wheel – Track de Hamburgo y French Pavement Rutting Tester (FPRT). Según Chen & Zu (2009), el APA fue desarrollado originalmente en 1985 y nombrado como Georgia Loaded Ehell Tester y se utiliza para evaluar el ahuellamiento, fatiga y resistencia a la humedad de mezclas asfálticas en caliente (HMA); generalmente se emplea un desplazamiento vertical medida a 8000 ciclos de carga para evaluar la resistencia de ahuellamiento en mezclas asfálticas, con una carga cíclica de 445 KN y el rango de temperatura entre 40.6 y 64 grados Celsius.

Otro aporte a tener en cuenta es el ensayo Wheel - Track de Hamburgo, el cual fue desarrollado por Helmut Wind Incorporated de Hamburgo Alemania en 1970, tomando como idea principal un modelo de origen británico. Este estudio está normatizado en EE.UU. por la norma AASHTO T 324-04 Standard Method of test of Hamburg Wheel- Track, y es principalmente usado para medir la susceptibilidad de mezclas asfálticas a la humedad, el cual consiste en una probeta de mezcla asfáltica, en la que se sumerge en agua a 50 grados Celsius y se deforma al paso repetido de una carga rodante de acero de 703 N que simula a una llanta vehicular. (Rondón, *et al.* 2012). Por su parte, en el ensayo de FPRT se aplica una carga a una probeta soportada y embebida por un elemento metálico, donde la presión de contacto del neumático en movimiento es de 0.7 Mpa y la temperatura es de 45 grados Celsius (Szydlo & Mackiewicz, 2005).

Por su parte, el estudio Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT) fue desarrollado a mediados de los años 80 a partir de modificaciones introducidas a un modelo diseñado por C. R. Benedict de Benedict Slurry Seals Inc., con el fin de ensayar lechadas de asfalto (slurry seals) para generar un instrumento que permitiera realizar pruebas de medición de la deformación permanente en laboratorio, así como el control de calidad en obra de mezclas asfálticas en caliente. El ensayo simula el movimiento vehicular de ida y vuelta (1 ciclo), con una carga de 445 N, empleando una rueda metálica que se apoya con una manguera neumática a 690 Kpa. La temperatura de la operación varía entre los 35°C y los 60°C, con una velocidad de la rueda de 55.55 cm/s (33 ciclos/min), sobre un recorrido de 33 cm.

El Equipo para ensayo de Pista de Laboratorio, desarrollado por el Centro de Carteras de España (CEDEX), permite determinar la resistencia a la deformación permanente de mezclas asfálticas de una mezcla bituminosa y consiste en someter una probeta de la mezcla bituminosa, al paso alternativo de una rueda metálica de 20 cm de diámetro, recubierta con 20 mm de caucho con una dureza de 80 en la escala Dunlop, en condiciones determinadas de presión, temperatura y frecuencia del paso de la rueda, las que son de 900 ± 25 KN/m², $60 \pm 1^\circ$ C y 42 ± 1 pasadas de vaivén por minuto respectivamente, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida durante los 120 minutos que dura el ensayo.

Con relación a lo anterior, la máquina ahuelladora de la Pontificia Universidad Javeriana intenta simular las características de carga, al que será sometido el pavimento durante su periodo de servicio; fue creada originalmente para evaluar el comportamiento de mezclas asfálticas frente al ahuellamiento, con el paso del tiempo se ha modificado esta máquina adicionándole una nueva variable “el agua” a la deformación permanente, resultando un daño complejo a la estructura. (Moreno, 2011).

2.6 FATIGA EN MEZCLA ASFÁLTICA

El primer estudio sobre la fatiga, se realizó sobre materiales metálicos alrededor del año 1829 en Alemania, después de observar el fallo en cadena de estructuras de soporte en minas, sometidas a cargas que usualmente eran consideradas seguras, esta situación despertó el interés por el estudio de piezas sometidas a cargas cíclicas. Más tarde, tuvo especial relevancia con el advenimiento del transporte ferroviario (Cuellar, 2003). Wöhler (1871) dio un impulso trascendental al conocimiento del fenómeno de fatiga, luego de realizar numerosos ensayos bajo diversas condiciones de carga para determinar la causa de la rotura prematura de los ejes ferroviarios. Fruto de sus estudios resultaron las caracterizaciones sobre comportamiento a fatiga en términos de amplitud de tensión vs número de ciclos de vida, así como el concepto de resistencia límite de fatiga.

Es importante tener en cuenta, que uno de los principales daños que se le presenta a una mezcla asfáltica en servicio, es por fatiga el cual ocurre en las capas ligadas de pavimento flexible y se presenta cuando se generan valores elevados de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica, producto de las cargas repetitivas tal como lo enuncia Hsu y Tseng (1996), Masad, *et al.* (1998). Según la literatura, la definición para el fenómeno de fatiga de mezclas asfálticas es un proceso de cambio estructural permanente y progresivo, que ocurre en un punto del material sujeto a esfuerzos y deformaciones de amplitudes variables y tiene como resultado la aparición de fisuras que conducen luego a una fractura total del material, debido a la aplicación de un número determinado de repeticiones o ciclos. (Rondón, *et al.* 2012). De acuerdo con Di Benedetto *et al* (2004), se reconocen dos fases de daño: la primera, conocida como la fase de iniciación, en la cual hay aparición de microfisuras, generando disminución en la rigidez de la estructura, la segunda fase, llamada de propagación, hay

unión de microfisuras ocasionando que éstas sean cada vez mayores y que se propaguen rápidamente. De acuerdo con el mismo autor, los principales factores a la respuesta a la fatiga en las mezclas asfálticas, son los siguientes:

- Método de compactación de la muestra.
- Modo de carga y tipo de ensayo aplicado.
- Parámetros de diseño de la mezcla.
- Variables asociadas al ambiente.

Según Brown & Selig (1991) *“la rigidez de una mezcla asfáltica afecta su comportamiento a la fatiga. Una mezcla asfáltica muy rígida in situ no presenta un buen comportamiento a la fatiga, pero experimenta una alta resistencia al ahuellamiento. Una mezcla asfáltica de baja rigidez ofrece buen comportamiento a la fatiga, pero no se comporta bien al ahuellamiento. Por tanto, debe existir un equilibrio en la rigidez de la mezcla asfáltica que garantice el buen comportamiento de la misma frente a estos dos mecanismos de falla en pavimentos flexibles”*. Otro aporte importante en su época, fue el estudio realizado hacia la mitad de la década de los noventa, Harvey, *et al.* (1995), donde se llevó a cabo un exhaustivo trabajo cuyo propósito principal fue evaluar el efecto del contenido de asfalto y de vacíos de aire sobre la rigidez y el comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto asfáltico de uso general en las carreteras de California (Estados Unidos), con el fin de presentar recomendaciones que mejoraran el desempeño a la fatiga de los pavimentos de concreto asfáltico construidos en el estado de California.

Con relación a lo anterior, los ensayos para determinar este fenómeno, consisten en someter una muestra de geometría específica a cargas repetitivas, para determinar el número de ciclos soportados antes de la falla, según la literatura a esto se le denomina la ley de fatiga. (Epps & Monismith, 1972). De acuerdo con Rao Tangella *et al* (1990), los métodos de ensayo que se emplean para medir el comportamiento de la fatiga, pueden agruparse en las siguientes categorías:

- Ensayos de flexión simple.
- Ensayos de flexión con apoyos.
- Ensayos axiales directos.
- Ensayos diametrales.

- Ensayos triaxiales.
- Ensayos de pistas

Uno de los equipos que se puede emplear es el Nottingham Asphalt Tester (NAT) y se usa para probetas cilíndricas, ensayadas a esfuerzo controlado. Otro es el equipo desarrollado en el Laboratorio Central de Puentes y Carreteras de Francia (Banco de Fatiga), que ensaya probetas trapezoidales a deformación controlada; para el último caso, según Rondón *et al* (2012), el criterio de falla se basa en la amplitud de la deformación y la pérdida de 50% de la rigidez a un millón de ciclos y la amplitud de deformación se considera constante. En Bogotá, se emplea este ensayo en el diseño racional de pavimentos y es utilizado solo por la Pontificia Universidad Javeriana, la Universidad de los Andes, la Universidad Militar, la Universidad de La Salle, entre otras; ya que dichas instituciones cuentan con este banco de fatiga en las instalaciones físicas de los laboratorios. Por otro lado, los resultados de estos ensayos no han podido ser implementados, debido a la poca disponibilidad del mismo, por ser un ensayo costoso y demorado (el ensayo dura aproximadamente un mes para obtener una curva de fatiga). Y se emplea la siguiente ecuación:

$$N_f = \left[\frac{\varepsilon_{cal}}{k * \varepsilon_6(\theta)} \right]^{\frac{1}{b}}$$

Ecuación 1. Ecuación para determinar el número de ciclos de falla a fatiga.

ε_{cal} , es la deformación calculada de la estructura, equivalente al circuito de carga.

$\varepsilon_6(\theta)$, es la deformación causante de la falla de la muestra en 10^6 aplicaciones de carga.

b , es la pendiente de la curva de fatiga.

k , Es un factor de cambio de traslación del laboratorio al ensayo de pista.

Según Rondón *et al* (2012), los valores para el parámetro $1/b$ varía desde 3.4 hasta 9.

Es importante resaltar dos parámetros para el diseño racional de pavimentos: El primero tiene que ver con la pendiente de fatiga “ b ”, la cual indica una medida de la vida esperada de la mezcla asfáltica por su resistencia a la fatiga y el segundo es el valor de deformación ε_6 definido para un millón de repeticiones.

Existen otros tipos de ensayos que se emplean a nivel mundial, realizados a escala real, donde se muestra una buena representación en condiciones de campo. Algunos de los equipos más utilizados se encuentra el Texas Mobile Load Simulator (TxMLS), una buena descripción sobre este ensayo se encuentra en (Chen & Hugo, 1998), otro que se utiliza con frecuencia es el National Airport Pavement Test Facility (NAPTF), ubicado en el Aeropuerto Internacional de Atlanta, New Jersey (Estados Unidos), el cual simula el servicio de una estructura de pavimento en un aeropuerto.

2.7 MODÚLOS DINÁMICOS DE MEZCLA ASFÁLTICA

El módulo dinámico de la mezcla asfáltica, es una propiedad importante del material en cualquier procedimiento de diseño y análisis de pavimentos flexibles. La rigidez de la mezcla se ha constituido como un elemento fundamental en el diseño de pavimentos, que caracteriza de manera racional el comportamiento esfuerzo – deformación, de los materiales que conforman la estructura. El módulo dinámico se fundamenta por la temperatura, razón de carga, envejecimiento y características de la mezcla como la viscosidad, el contenido del ligante, la granulometría del agregado y vacíos. Éste a su vez, depende del tiempo, como de la temperatura, ya que proporciona información de cuánto se deforma el material bajo una carga dada a una temperatura específica y está relacionado a la fisura generada por la fatiga, la deformación permanente y a la propagación de una carga en una capa asfáltica.

Para facilitar el análisis del módulo dinámico de una mezcla asfáltica, se desarrolló el concepto de la curva maestra, su construcción consistió en realizar ensayos de módulos dinámicos a diferentes temperaturas y frecuencias de carga, luego se seleccionó una temperatura estándar de referencia. Por su parte, para la presente investigación, se empleó una temperatura estándar de referencia de 25°C y, posteriormente, los datos de otras temperaturas son desplazados con respecto a la frecuencia, hasta que las curvas se fusionan en una única función suavizada. El modelo utilizado para calcular la curva maestra fue el CAM modificado (Ver Ecuación 2) como lo expone (Zeng, *et al.* 2001). La dependencia de la temperatura en cementos asfálticos, en términos de la variación del $\log a(T)$ es una función del

tiempo, puede ser matemáticamente modelada utilizando la ecuación WLF (William-Landel-Ferry) a temperaturas altas.

$$E^* = E_e^* + \frac{E_g^* - E_e^*}{[1 + (f_c/a_T f)^k]^{-m_e/k}}$$

Ecuación 2. Modelo para calcular curva maestra de módulo dinámico a una temperatura de referencia

E^* = Módulo dinámico

E_e^* = Módulo complejo de equilibrio, cuando $E_e^* = E^*(f \rightarrow 0)$

E_g^* = Módulo complejo, cuando $E_g^* = E^*(f \rightarrow \infty)$

f_c = Parámetro de ubicación con dimensiones de frecuencia

$a_T f$ = Frecuencia reducida, en función de la temperatura y la deformación

k, m_e = Parámetros de forma dimensional

La ecuación de William-Landel-Ferry ha sido extensamente utilizada para caracterizar el factor de desplazamiento por temperatura de los cementos asfálticos. Los autores han encontrado que esta ecuación puede describir exactamente el factor de desplazamiento de cementos asfálticos más allá de las características de temperatura, esto es llamado temperatura definida o de referencia, (T_d):

$$\text{Log } a(T) = \frac{-C_1(T - T_d)}{C_2 + T - T_d}$$

Ecuación 3. Correlación de WLF para calcular el desplazamiento horizontal de la curva en función de la frecuencia

$a(T)$ = Factor de desplazamiento horizontal.

T = Temperatura, °C (Tiempo de envejecimiento para esta investigación).

T_d = Temperatura de referencia (Tiempo de referencia para esta investigación).

C_1, C_2 = Constantes empíricas. Para SHRP $C_1=19$ y $C_2=92$

La aplicación del principio de superposición tiempo-temperatura en la construcción de curvas maestras y en la determinación del factor de desplazamiento es una poderosa herramienta de investigación, la cual claramente separa la dependencia del tiempo y la temperatura en cementos asfálticos (Christensen & Anderson, 1992).

2.8 ANALISIS DE IMÁGENES EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA

Al realizar un análisis a la microestructura de una mezcla asfáltica, se toma como estudio sus componentes: agregados, el asfalto y los porcentaje de vacíos, el cual es un sistema bastante complejo tal como lo demuestra Zhu *et al* (2000). Los métodos utilizados para capturar la estructura interna de las mezclas asfálticas pueden ser destructivos o no. En los métodos destructivos, la muestra puede ser cortada o bien en las direcciones vertical u horizontal para obtener una superficie lisa y ser analizada. En la actualidad, el análisis de imágenes 2D (como es el caso del presente estudio) se limita al cálculo de índices simples, como el número de contactos y de agregados, orientación, de igual forma resulta económicamente más rentable en comparación al emplear una imagen en 3D.

Según la revisión bibliográfica acerca de los estudios realizados sobre el análisis de la microestructura en una mezcla asfáltica, se encontró que Sepehr *et al* (1994) llevaron a cabo una investigación sobre el análisis de una microestructura idealizada, empleando elementos finitos a una estructura de pavimento, concluyendo que la influencia de las propiedades de la microestructura influye en el comportamiento macroscópico de la mezcla. Con el paso del tiempo, se han implementado equipos para capturar las imágenes con una excelente resolución y poder generar un modelo más real como es el caso de Masad *et al.* (1998), en el que se llevó a cabo un análisis de la microestructura con muestras compactadas de laboratorio y de campo, a través de una cámara digital para determinar la orientación global y la segregación y la anisotropía de las mezclas de asfálticas. Sin embargo, Tashman, *et al.* (2001), implementaron un nuevo método a través de tomografía computarizada de rayos X, con el fin de caracterizar mezclas asfálticas el cual puede distinguir las diferentes fases en un material de una manera no destructiva, teniendo en cuenta la distribución de vacíos, la segregación y los puntos de contacto.

Un reciente estudio realizado por Bahia, *et al.* (2012) en la Universidad de Wisconsin – Madison, ha introducido un software avanzado de análisis de imágenes de 2D representación de los agregados y el asfalto en una mezcla denominado IPAS® que es empleada para el procesamiento de imágenes y análisis de la misma. Con la implementación del programa anterior, se encontró una investigación de

Sefidmazgi (2011), la cual concluye que este nuevo método puede ser utilizado para el diseño de mezcla con una selección óptima de agregados, aditivos y asfalto y puede detectar eficazmente las variaciones debidas a condiciones de compactación, incluyendo método de compactación, la temperatura y la presión.

En el estudio de la evaluación de contacto agregado–agregado que realizó Álvarez, *et al* (2012), mediante el análisis de imágenes empleando mezclas drenantes con tomografía computarizada con rayos X y metodología de diseño de mezcla especificada por TxDOT, definieron imágenes de secciones transversales paralelas y espaciadas a 1mm, especímenes cilíndricos de diámetro 150 mm, alturas de 110 mm y 115 mm, en un compactador giratorio, luego éstas fueron analizadas con el software IPAS®, el cual cuantificó el número de puntos de contacto generados entre las partículas de agregado grueso. La principal conclusión que se determinó fue la necesidad de realizar más investigaciones de este tipo, con el objetivo de mejorar la caracterización macroscópica agregado-agregado y que los especímenes tengan mayor homogeneidad en su estructura interna.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

La caracterización de los materiales que se emplearon para el desarrollo del presente trabajo de grado, fue extraída de los trabajos realizados previamente y que pertenecen a esta investigación, a continuación se muestra un resumen del ligante asfáltico y los agregados pétreos.

3.1.1 Ligante Asfáltico

El cemento asfáltico empleado en la presente investigación es procesado en la refinera de Ecopetrol, clasificado por el ensayo de penetración como 80-100, el cual pasó por un proceso de inmersión bajo el agua durante los siguientes periodos: Original 0 meses, 3 meses, 6 meses, 9 meses, determinado en Atencia (2011) y Cortes (2012) para los siguientes meses: 12 meses, 15 meses, 18 meses y 21 meses. En dicha investigación se desarrolla el diseño para tanques y recipientes, disposición de muestras y exposición al agua para cada uno de los asfaltos empleados en el presente trabajo. La caracterización se realizó a través de la normativa nacional, propuesta por el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2007a), la cual fue extraída de Atencia (2011) y Cortes (2012); para conocer las propiedades del ligante en los diferentes periodos de inmersión mencionados anteriormente las muestras se sometieron a los ensayos mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Ensayos realizados sobre el cemento asfáltico en cada uno de los periodos de inmersión

CARACTERÍSTICA EVALUADA	UNIDAD	NORMA INV	ESPECIFICACIÓN INVÍAS		RESULTADOS							
			MÍN.	MÁX.	0M	3M	6M	9M	12M	15M	18M	21M
Penetración	0,1 mm	E-706-07	80	100	83,2	58,7	48	43,1	47,1	46,6	46,5	46,5
Índice de Penetración	-	E-724-07	-1	+1	0,26	-0,31	-0,56	-0,57	-0,81	-0,70	-0,63	-0,59
Punto de Ablandamiento	°C	E-712-07	-	-	50,6	52	53	54,2	52,2	52,7	53	53,3
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)	cm	E-702-07	100	-	>144	97,0	101,7	93,7	95,1	94,2	93,2	92,5
Punto de Ignición Copa Abierta de Cleveland	°C	E-709-07	230	-	358	370,0	370,8	370,8	370,7	-	-	-
Gravedad Específica	-	E-707-07	-	-	1,007	1,039	-	1,034	-	-	-	-

CARACTERÍSTICA EVALUADA	UNIDAD	NORMA INV	ESPECIFICACIÓN INVÍAS		RESULTADOS							
			MÍN.	MÁX.	0M	3M	6M	9M	12M	15M	18M	21M
Viscosidad Absoluta a 60°C	Pa. S	E-716-07	100	-	121	209	237,6	330,6	-	-	-	-
Viscosidad Brookfield a 135°C	Pa. S	E-717-07	-	-	0,381	0,430	0,480	0,520	0,527	0,564	0,584	0,619

Fuente: (Atencia H., 2011), (Cortes V., 2012)

En la Tabla 6, se presenta el resumen del análisis por cromatografía de columna SARA según procedimiento descrito en la norma ASTM-D-4121.

Tabla 6. Resumen de fracciones de la separación por cromatografía

FRACCIÓN	ASFALTO 80 -100 (%)							
	0 M	3 M	6 M	9 M	12 M	15 M	18 M	21 M
Saturados	18,34	19,28	18,08	17,62	17,87	18,01	16,71	17,44
Aromáticos	30,49	24,88	27,62	26,52	28,87	26,99	26,40	25,96
Resinas	40,40	41,85	41,34	41,78	28,48	42,71	43,97	43,44
Asfaltenos	9,62	9,29	10,96	12,51	12,08	11,93	12,47	13,04
Índice Coloidal	0,3944	0,4278	0,4212	0,4630	0,4206	0,4260	0,4148	0,4392
Índice Solubilidad	5,8618	5,8171	5,3034	4,6281	5,7548	5,1634	5,1072	4,8212

Fuente: (Atencia H., 2011), (Cortes V., 2012)

El análisis reológico se realizó con el equipo DSR de la Pontificia Universidad Javeriana, cuyos resultados de módulo complejo G^* y ángulo de fase δ se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resumen caracterización reológica con DSR

PERIODO DE INMERSIÓN (meses)	MÓDULO COMPLEJO G^* (KPa)	ÁNGULO DE FASE δ (°)	$G/\text{seno } \delta \geq 1\text{KPa}$ $\geq 2.2\text{ KPa}$	$G^*\text{seno } \delta < 5\text{MPa}$
0	1919	87,12	1921.42	1916.57
3	2972	86,22	2978.47	2965.53
6	3204	86,14	3211.28	3196.73
9	3928	86,18	3936.74	3919.27
12	4101	85,29	4114.89	4087.15
15	4694	84,90	4712.65	4675.41
18	4292	85,19	4307.16	4276.88
21	4961	85,08	4979.34	4942.72

Fuente: Atencia (2011) y Cortes (2012).

3.1.2 Agregados Pétreos

El agregado pétreo utilizado es del Rio Coello, ubicado en el departamento del Tolima. Estos agregados corresponden al grupo Gualanday Superior, contienen algunos fragmentos de cuarzo y rocas silíceas, estas últimas utilizadas para la construcción. En el rio se encuentra un aluvión activo y arena de

arrastre, materiales que deben pasar por el proceso de trituración primaria, secundaria y terciaria para su utilización en mezclas asfálticas.

Los ensayos de caracterización a los agregados pétreos, se tomaron de Vera (2012), según la Norma de ensayos para carreteras (INVÍAS, 2007b). El cuadro Resumen de ensayos realizados se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Ensayos realizados sobre el agregado pétreo.

CARACTERÍSTICA DEL ENSAYO	UNIDAD	NORMA INV	ESPECIFICACIÓN INVÍAS		RESULTADO
			Mín.	Máx.	
Equivalente de arena	%	E-133-07	50	-	58
Desgaste Los Ángeles	%	E-218-07	-	25	28.6
Pérdidas en ensayo de solidez Sulfato de magnesio	%	E-220-07	-	18	4.1
Gravedad específica y absorción de agregado fino	-	E-222-07	-	-	2.48/1.7
Gravedad específica y absorción de agregados gruesos	-	E-223-07	-	-	2.59/1.6
Partículas fracturadas mecánicamente	%	E-227-07	85	-	87.7
Índice de alargamiento y aplanamiento	%	E-230-07	-	35 ⁽¹⁾	21.1
Valor de azul de metileno	%	E-235-07	-	10 ⁽¹⁾	4.8
Desgaste Micro-Deval	%	E-238-07	-	20	10.4
Partículas planas y alargadas (Relación 5:1)	%	E-240-07	-	10	1.4

⁽¹⁾ Valores especificados para bases y subbases granulares.

Fuente: (Vera S, 2012).

3.1.3 Mezcla Asfáltica

Ahora bien, el diseño de la mezcla asfáltica se efectuó aplicando la metodología del SUPERPAVE®, utilizando como materiales agregados de río y asfaltos sumergidos 80-100 producidos en la refinería de Barrancabermeja, Colombia. El diseño fue extraído de Vera (2012), definiendo en primera instancia el número de ejes simples equivalentes para el carril de diseño correspondiente a la categoría de 30 a 100 millones, adicional a esto, se seleccionó una granulometría que cumpliera con las especificaciones dadas en ((INVÍAS, 2007a)) y cuyas propiedades cumplieran con las exigidas por SUPERPAVE®, para finalmente seleccionar una mezcla que pasara por encima de la zona restringida, dando como resultado los valores consignados en la Tabla 9 y Tabla 10.

Tabla 9. Granulometría de diseño para la mezcla asfáltica MDC-2.

Tamiz mm	Apertura $\phi_{0.45}$	Zona restringida		Puntos de control		Especificación MDC-2		% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	Porcentaje retenido	Peso retenido
19.0	3.762				100	100		100.0	0.0	0.0	0.00
12.5	3.11166			90	100	80	95	93.0	7.0	7.0	139.09
9.5	2.754					70	88	79.0	21.0	14.0	278.19
4.75	2.016					49	65	57.0	43.0	22.0	437.15
2.36	1.472	39.1	39.1	28	58						
2.00	1.366					29	45	40.0	60.0	17.0	337.80
1.18	1.077	25.6	31.6								
0.60	0.795	19.1	23.1								
0.425	0.680					14	25	22.0	78.0	18.0	357.67
0.30	0.582	15.5	15.5								
0.180	0.462					8	17	12.5	87.5	9.5	188.77
0.075	0.312			2	10	4	8	6.0	94.0	6.5	129.16
Fondo								0.0	100.0	6.0	119.22
										100.0	1987.05

Fuente: (Vera S, 2012)

Tabla 10. Propiedades de la mezcla de agregados pétreos

Propiedad	Criterio	Mezcla
Partículas alargadas y aplanadas	10% máx.	1.4%
Equivalente de arena	50% mín.	58.0%
Desgaste de Los Ángeles	35% máx.	28.6%
Intemperismo acelerado	10% máx.	4.1%
Gravedad específica Bulk (G_{sb})	-	2.538
Gravedad específica aparente (G_{sa})	-	2.647

Fuente: (Vera S, 2012)

De igual manera, se realizó la selección de ligante asfáltico de diseño tal como lo muestra (Vera S, 2012), mostrado en la Tabla 11.

Tabla 11. Resumen de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica MDC-2

% de asfalto	% de vacíos de aire	% VMA	%VFA
5.2	6,1	14,1	57,0
5,7	4,1	14,2	71,6
6,2	2,8	13,9	80,0
6,7	1,7	13,9	87,6

Fuente: (Vera S, 2012)

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo el análisis de los procesos de oxidación del asfalto 80/100 en inmersión bajo agua, se desarrolló un proceso experimental en la investigación de Atencia (2011); para colocar el asfalto, se diseñó elementos laminares que portarían las muestras, el material inerte definido para la fabricación de éstas fue el vidrio (Figura 1) debido a su rapidez de fabricación, ser resistente al calor, y por su liviandad, así también por permitir ser cortado a una dimensión de fácil manipulación; obteniéndose una dimensión de las láminas de 45 x 45 cm y 3 mm de espesor, y se colocaron en tanques de agua.

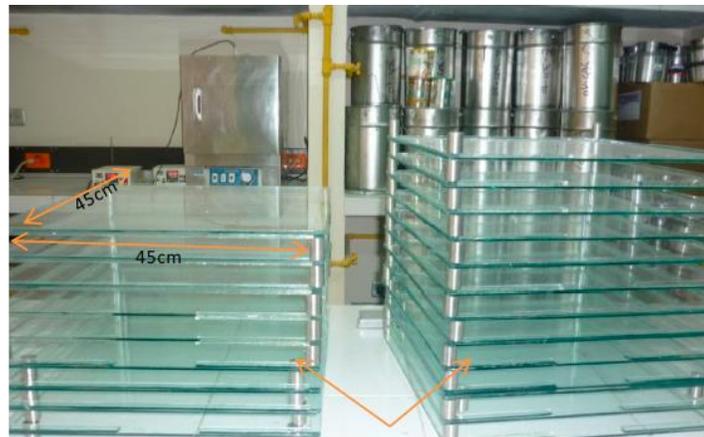


Figura 1. Láminas de vidrio para disposición de las muestras. (Atencia H., 2011)

El asfalto 80/100 se colocó en las láminas de vidrio, para realizar esto se precalentado el asfalto 80/100 hasta alcanzar su fluidez a una temperaturas máximas entre los 100 y 110 °C, conservando un espesor de película de 2 mm. Después del precalentamiento se colocó sobre la lámina de vidrio, intentando esparcir la cantidad de ligante (en gramos) que permitiese dicho espesor. La exposición de las láminas “porta-asfalto” en agua se realizó bajo las condiciones de temperatura, pH y oxígeno disuelto (OD) propias del agua potable de la ciudad de Bogotá. Además se realizó control del oxígeno presente en los tanques mediante la implementación de una bomba de oxígeno conectada permanentemente, y a través del chequeo mensual de la cantidad de oxígeno en estos tanques. Las láminas estuvieron sumergidas durante los periodos ya definidos como: 0 meses, 3 meses, 6 meses, 9 meses, 12 meses, 15 meses, 18 meses y 21 meses (Figura 2).



Figura 2. Láminas y el tanque donde se sumergió el asfalto.

Con el ligante modificado por la oxidación del agua, el cual se recuperó en periodos definidos se procedió a elaborar las mezclas con la granulometría definida y así obtener los especímenes necesarios para el desarrollo experimental del presente trabajo de investigación.

De acuerdo con los antecedentes citados, se estableció el programa de ensayos; en primera instancia se realizaron ensayos para determinar la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas como el TSR y MIST (Medidor de sensibilidad de humedad inducida), adicional a ello, se elaboraron ensayos para establecer el desempeño mecánico mediante la fatiga, ahuellamiento y módulo dinámico para cada uno de los periodos de inmersión, y por último se desarrolló un análisis de imágenes de la estructura interna de la mezcla asfáltica basado en imágenes de 2-D a través del programa IPAS®.

En la Tabla 12, se muestra los diferentes ensayos que se mencionaron anteriormente con su respectiva Normatividad y en la Figura 3 se presenta el plan de ensayos de la Investigación.

Tabla 12. Ensayos con su respectiva norma.	
ENSAYO	NORMA
MIST	ASTM D7870-13 (Aprobada Junio 2013)
TSR	INV E-725-07 (AASHTO T 283)
Módulo dinámico	INV E-754-07
Fatiga	NFP 98-216-1
ahuellamiento	INV E-756-07

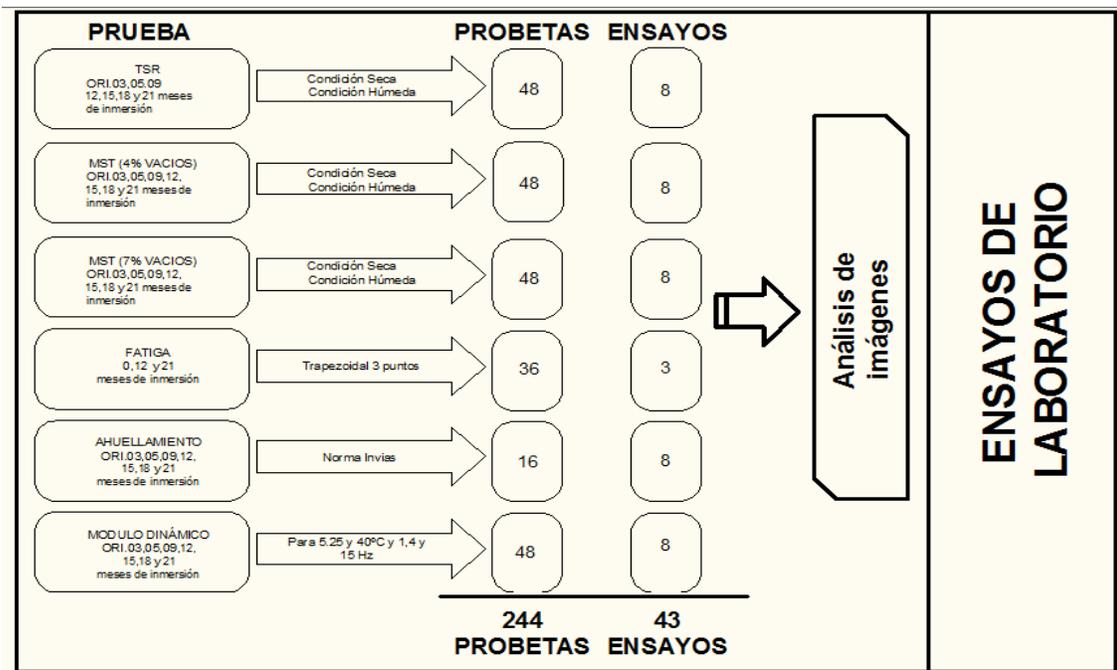


Figura 3. Plan de ensayos en la investigación

3.2.1 Ensayos para determinar el efecto de la humedad

3.2.1.1 Ensayo MIST (Medidor de sensibilidad de humedad inducida)

El MIST está diseñado como un dispositivo de acondicionamiento acelerado para determinar la resistencia de la mezcla asfáltica a la presión (Ver Figura 4). Cabe destacar que en la ejecución del proyecto entre julio 2012 - mayo 2013 no existía norma estandarizada. En la revisión bibliográfica se encontró en la ASTM una norma que reglamenta el acondicionamiento en el equipo MIST®. Básicamente la ASTM D7870-13 aprobada en junio de 2013, el cual establece los siguientes parámetros (Ver Tabla 13).

Tabla 13. Parámetros aplicados al ensayo MIST según norma ASTM D7870-13 (aprobada en junio de 2013)

Presión	40 psi
Temperatura	60 grados
Número de ciclos	3500



Figura 4. Equipo de acondicionamiento MIST.

Fuente: <http://instrotek.com/material-testing/laboratory-products/mist/>

Teniendo en cuenta lo anterior, se determinó el siguiente procedimiento para cada uno de los períodos de inmersión del asfalto (OM-3M-6M-12M-15M-18M-21M): En primer lugar se fabricaron 6 probetas con un porcentaje de vacíos de aire de 7% +/- 1 por el diseño SUPERPAVE® empleado en trabajos de grado anteriores pertenecientes a la misma investigación; Adicional a ello, la probeta empleada en el ensayo del módulo dinámico es no destructiva, por lo tanto, se cortó para tener 6 probetas de aproximadamente 7 cm, se efectuó el ensayo de la gravedad específica bulk para comprobar que el porcentaje de vacíos de aire de la mezclas asfáltica sea del 4% +/- 1; es decir que hay dos grupos (6 muestras con 4% de vacíos aproximadamente y 6 muestras con 7 % de vacíos aproximadamente), luego se clasificó la muestra en dos grupos en condición seca y húmeda (Ver Figura 5).



Figura 5. Condición seca y húmeda para el ensayo MIST.

El primer grupo se selló en una bolsa plástica y el segundo se acondicionó en la cámara del MIST, a la cual se le aplicaron los parámetros de entrada definidos en la Tabla 14; posteriormente, los dos grupos de muestras se pusieron en un baño de agua a 25° C durante 2 horas, en seguida, se colocó en la prensa de carga a una deformación 50.8 mm/min (Ver Figura 6).



Figura 6. Prensa de carga que se empleó para el ensayo TSR y MIST.

Los parámetros definidos aplicados al ensayo, se tomaron como referencia de la investigación desarrollada por Li, Gibson & Azari (2010). (Ver Tabla 14).

Tabla 14. Parámetros aplicados al ensayo MIST.

Presión	50 psi
Temperatura	60 grados
Número de ciclos	3000

- Los números de ciclos fueron elegidos a partir de la absorción de núcleo de asfalto. Según estudios realizados por INSTROTEK (fabricante) se determinó que el núcleo de asfalto no podía absorber más agua después de 3,000 a 3,500 ciclos.
- La temperatura fue elegida por el "PG Grade". Para 60°C para PG64 y más alto.
- La precisión fue elegida por la presión que se nota en una carretera cuando una llanta hace contacto con el pavimento. En relación a lo anterior, un estudio de la Universidad de Florida comprobó que el pavimento puede sentir de 15 Psi a 70 Psi de presión.

3.2.1.2 Ensayo TSR

Este ensayo se realiza con el propósito de medir el efecto del agua sobre la resistencia a la tracción de una mezcla asfáltica, se empleó para este ensayo la normativa del INVÍAS (INV E-725-07). Para cada uno de los periodos de inmersión se realizaron 6 probetas (3 en condición seca y las restantes en húmeda), dando un total de 48 probetas, se garantizó que el porcentaje de vacíos de aire fuera de 7% +/- 1%; a todas las muestras se le determinó la gravedad específica máxima teórica y bulk; la probeta de condición seca se acondiciona a un baño de agua a 25 grados por veinte minutos, luego se le aplica una carga en la prensa a una rata de deformación de 50.8 mm/min, hasta fracturarla y registrar la carga última (Ver Figura 6 y Figura 7).



Figura 7. Probeta fallada en la prensa de carga para el ensayo de TSR y MIST.

La probeta en condición húmeda se satura parcialmente con agua destilada en la cámara de vacíos a 70 KPa para alcanzar un porcentaje de saturación entre 55 y 80% (Ver Figura 8), luego se puso la muestra en un baño de agua por 24 horas a 60 grados, siguiendo el mismo procedimiento para el acondicionamiento de la probeta en condición seca.



Figura 8. Saturación para el ensayo de TSR.

3.2.2 Ensayos para determinar el comportamiento mecánico

3.2.2.1 Ensayo de ahuellamiento

Para el ensayo de ahuellamiento se siguió la norma INVÍAS (INV E-756-07), en esta medida se elaboraron 2 muestras por cada periodo de inmersión, las cuales se ensayaron en la máquina ahuelladora de la Pontificia Universidad Javeriana. Esta máquina trabaja a 42r.p.m, aplicando sobre la briqueta que se encuentra a una temperatura de 60°C, una presión de 0.662MPa, que es equivalente a la presión ejercida por un eje de 13 ton, durante cuatro horas como mínimo, posteriormente se inició el ensayo tomando datos en el tiempo transcurrido (1,3,5,10,15,20,25,30,35,40,45,60,75,90,105,120 min), (Ver Figura 9).



Figura 9. Equipo de ahuellamiento norma INVÍAS – PUJ.

Fuente: (Mantilla, 2003)

Para iniciar el ensayo se aplica una carga cíclica, sobre probeta que tiene 300mm largo de, 300mm de ancho y 50mm de alto. Después de montada la probeta en el equipo, se marcaron 3 líneas donde se

midieron las deformaciones plásticas presentadas por la presión de contacto de la rueda de 900 KPa (Ver Figura 10).



Figura 10. Probeta de ahuellamiento.

3.2.2.2 *Ensayo de fatiga*

La metodología para la realización de este ensayo se basó en la norma francesa NFP 98-216-1 y se utilizó una frecuencia de 10 Hz (temperatura promedio 19°C). Para esta finalidad, se elaboraron un total de 36 probetas para ensayar en los periodos: 0, 12 y 21 meses; para cada ley de fatiga se emplearon 12 probetas en forma trapezoidal con las siguientes dimensiones: base mayor 75 mm, base menor 25 mm, Altura 250 mm y espesor 25 mm (Ver Figura 11).



Figura 11. Probetas de forma trapezoidal para el ensayo de fatiga.

Los moldes que se emplearon para elaborar dichas muestras son de 35mm de alto, 300mm de ancho y 500mm de largo (Ver Figura 12), después de 15 días de elaboradas las muestras se cortaron a las dimensiones mencionadas anteriormente. Posteriormente se ubicaron en el banco de fatiga francés, en el cual se desarrolló un ensayo en tres niveles de deformaciones: 90 μm , 150 μm y 220 μm , esto con el fin de obtener las leyes de fatiga para cada uno de los periodos analizados y poder realizar el ensayo de fatiga.



Figura 12. Molde para elaborar las probetas trapezoidales- PUJ

Finalmente, el ensayo de fatiga se realizó en el banco de fatiga (Ver Figura 13), equipo construido por la Pontificia Universidad Javeriana, el cual emplea un mecanismo de flexión por tracción, que consiste en someter una probeta trapezoidal apoyada en sus extremos, a un desplazamiento que varía en el tiempo según una función sinusoidal, para así relacionar las deformaciones máximas iniciales producidas en el tercio medio de la probeta con el número de ciclos necesarios para obtener las leyes de fatiga correspondientes.



Figura 13. Banco de fatiga (PUJ)

3.2.2.3 Módulo dinámico

En el método de ensayo se aplica un esfuerzo de compresión axial sinusoidal (medio seno inverso) a un espécimen de concreto asfáltico para una temperatura y frecuencia de carga descritas en la norma (INV E – 754). (INVÍAS, 2007b). En éste se mide la recuperación de la deformación axial del espécimen y define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal (Ver Figura 14).

Una vez realizadas las probetas y compactadas en el compactador giratorio (21 probetas para 8 ensayos para cada periodo de inmersión respectivamente) de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura de acuerdo con la norma de INVÍAS (INV E – 754) (INVÍAS, 2007b). El ensayo anterior, se lleva a cabo en el equipo MTS® que cuenta con un generador que produce una onda de medio seno inverso para

calcular el módulo dinámico. Este equipo trabaja con temperaturas de 5, 25 y 40°C con frecuencias de 1.0, 4.0 y 16 Hz.



Figura 14. Probeta para módulo dinámico – PUJ

Seguido a lo anterior, se llevaron las probetas a las temperaturas especificadas por la norma; el esfuerzo aplicado corresponde a 35 psi durante 40 segundos, se midieron las deformaciones resultantes para cada una de las frecuencias establecidas; a su vez se midió la amplitud promedio de carga y la deformación durante los cuatro últimos ciclos para calcular el módulo dinámico.

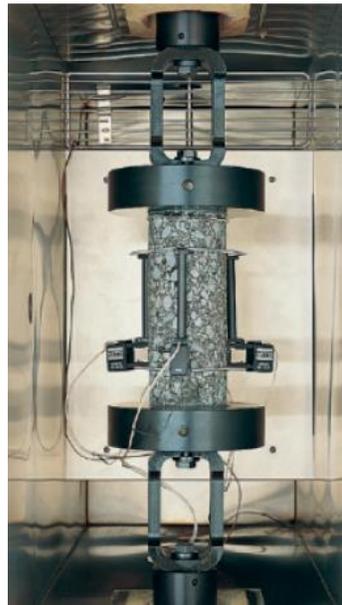


Figura 15. Montaje de ensayo de módulo dinámico – MTS®
Fuente: (Vacca, León, & Ruiz, 2012)

3.2.3 Análisis de imágenes a través del programa IPAS®

El procesamiento y análisis de imágenes se realizó a través de un programa llamado IPAS® (Image Processing & Analysis System - uso libre) creado por la Universidad de Wisconsin Madison; para el

presente estudio se determinó tomar las probetas del ensayo TSR y MIST con un porcentaje de vacíos de aire de 7% para los distintos periodos de inmersión. Cada una de ellas se cortó en dos secciones tanto para el estado seco y saturado, como se muestra en la Figura 16.

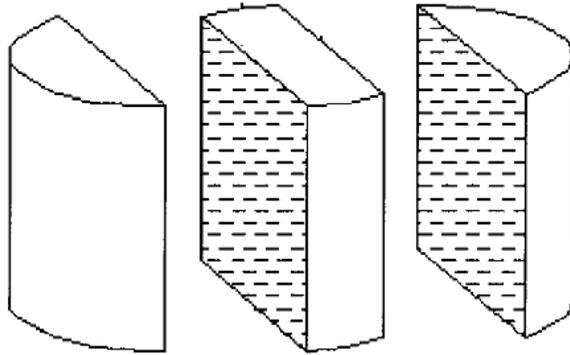


Figura 16. Seccionamiento patrón de las muestras de mezcla asfáltica

Cada una de las secciones se escaneó con una resolución de 1200 PPP en escala de grises, la cual en la etapa final del procesamiento se convirtió en una imagen de blanco y negro que se utilizó para el análisis de la microestructura; sin embargo, hay varios pasos para mejorar esta imagen de las diferentes fases llamados filtros (Ver Figura 17), el software emplea un filtro medio, el máximo filtro y el umbral que indica el límite de nivel de escala de grises que separa el asfalto de los agregados los cuales son parámetros de entrada (datos variables). La aplicación de filtros se detiene hasta que el área de fracción de los agregados de la imagen escaneada vs la fracción de volumen calculado tengan el mismo valor, como se puede observar en la siguiente Figura 18, la cual muestra la curva de degradación en el laboratorio vs la escaneada.

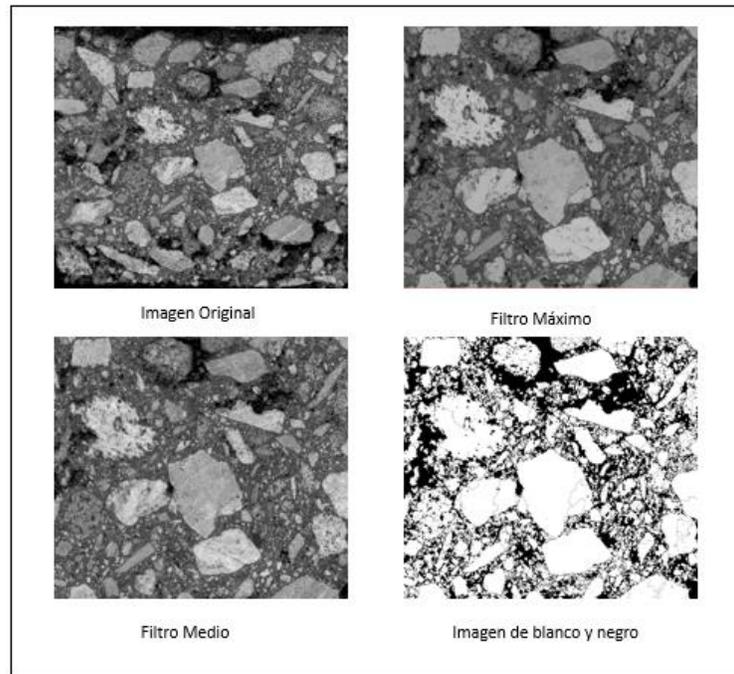


Figura 17. Procesamiento de imágenes en el programa IPAS®.

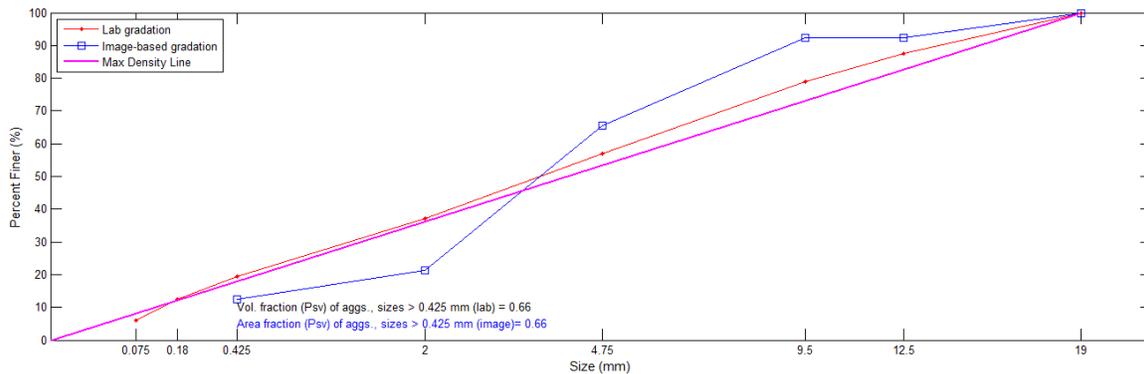


Figura 18. Control de la imagen en el programa IPAS®.

Los datos de entrada complementarios son las propiedades de la muestra como: vacíos totales de la mezcla, porcentaje de asfalto, gravedad específica de los agregados y del ligante, curva de gradación obtenida en el laboratorio (datos invariables) y específicamente para el análisis, se ingresa la distancia de separación mínima entre agregados, para ser considerada un contacto y el mínimo tamaño de agregado para buscar como contacto, estos dos parámetros fueron fijos durante el procesamiento realizado. En el análisis de imágenes, el software da como resultado, el número de contactos y de agregados, la longitud de contacto y la orientación (Ver Figura 19).

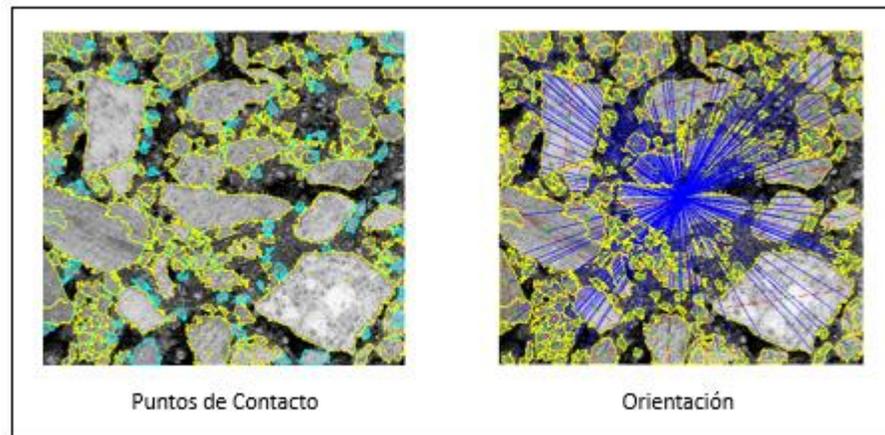


Figura 19. Análisis de imágenes en el programa IPAS®.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a las pruebas planteadas en el capítulo Materiales y Métodos; todos los ensayos se ejecutaron en el laboratorio de pruebas y ensayos de ingeniería civil de la Pontificia Universidad Javeriana, controlando la calidad de la prueba y siguiendo los protocolos descritos en cada una de las normas de referencia; los certificados de calidad de los equipos utilizados se presentan en los anexos del presente documento.

4.1 ENSAYO TSR (Tensile Strength Ratio)

Los resultados se obtuvieron a partir de la ejecución del ensayo de evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas, utilizando la prueba de tracción indirecta especificado en la norma INV-E-725-07 (INVÍAS, 2007b), denominado TSR, los cuales se presentan en la Figura 20.

Al analizar los datos en los diferentes periodos de inmersión, se encuentra que el comportamiento de las muestras en el ensayo se pueden separar en 2 grupos representativos; el primero conformado por las muestras 0 meses, 3 meses, 6 meses y 9 meses, periodos en los cuales la variación de la susceptibilidad es mayor, o se presentan diferencias de 3% o más, entre un periodo y otro. El otro grupo, está conformado por las muestras 12 meses, 15 meses, 18 meses y 21 meses. En estos periodos la variación tiende a comportarse de manera uniforme o a estabilizarse. (Ver Figura 20).

A partir de estos resultados se puede afirmar que la muestra original 0 meses ensayada, es la única que cumple la normatividad dada en el Art 450-07, cuyo criterio de valoración dice: *“La resistencia promedio a tracción indirecta de las probetas sometidas a curado húmedo deberá ser, cuando menos, ochenta por ciento (80%) del valor promedio alcanzado por las probetas curadas en condición seca”* (INVÍAS, 2007a). La pérdida de resistencia a la tracción indirecta, en las muestras ensayadas se puede atribuir al proceso de oxidación que se aplicó al ligante asfáltico, generando que la relación de ligante-agregado se vea alterada por esta condición.

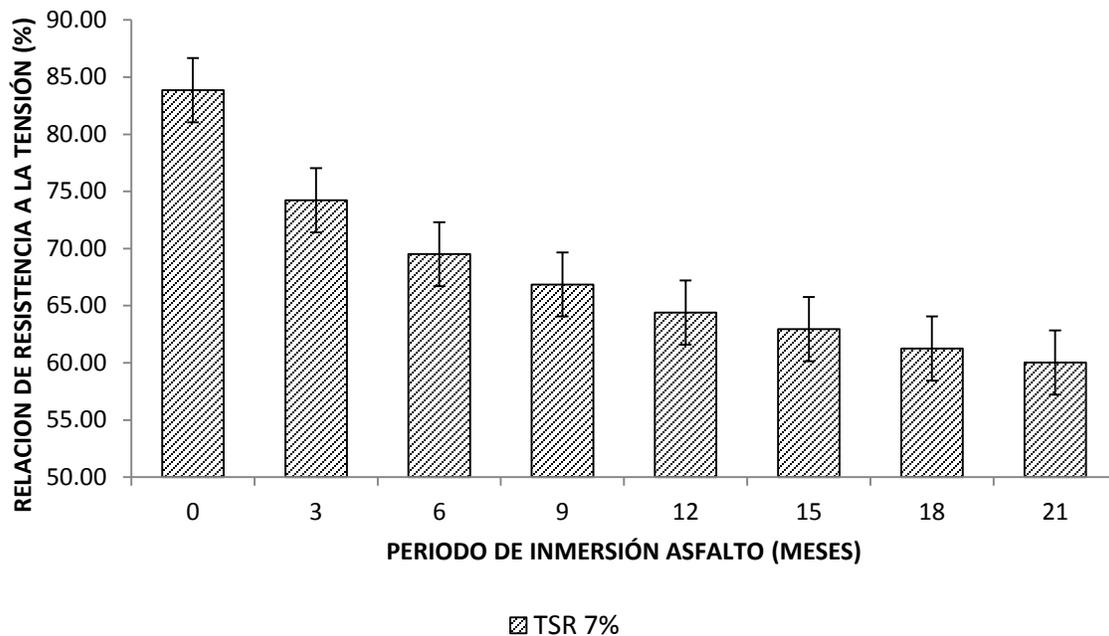


Figura 20. Comparativo de daño por humedad en TSR

El resultado final de la prueba, es un porcentaje que se obtiene de dividir la fuerza seca entre la húmeda, el comportamiento de las fuerzas en los diferentes periodos de inmersión fue igualmente analizado y los resultados se muestran en la Figura 21. Es importante mencionar que en el grupo de control “condición seca” se pudo observar, que a medida que el período de inmersión es mayor, su capacidad de resistencia de carga aumenta, debido al proceso de oxidación que sufre el asfalto en inmersión.

Para el grupo “condición húmeda” el incremento de resistencia de carga fue menor, comparado con el grupo “condición seca”, en todos los periodos analizados, este efecto se vio influenciado por las condiciones de la prueba: temperatura 60°C durante 24 horas y la saturación del 100% en la muestra, generando perdida posiblemente de la cohesión y adhesión en la estructura interna de la muestra.

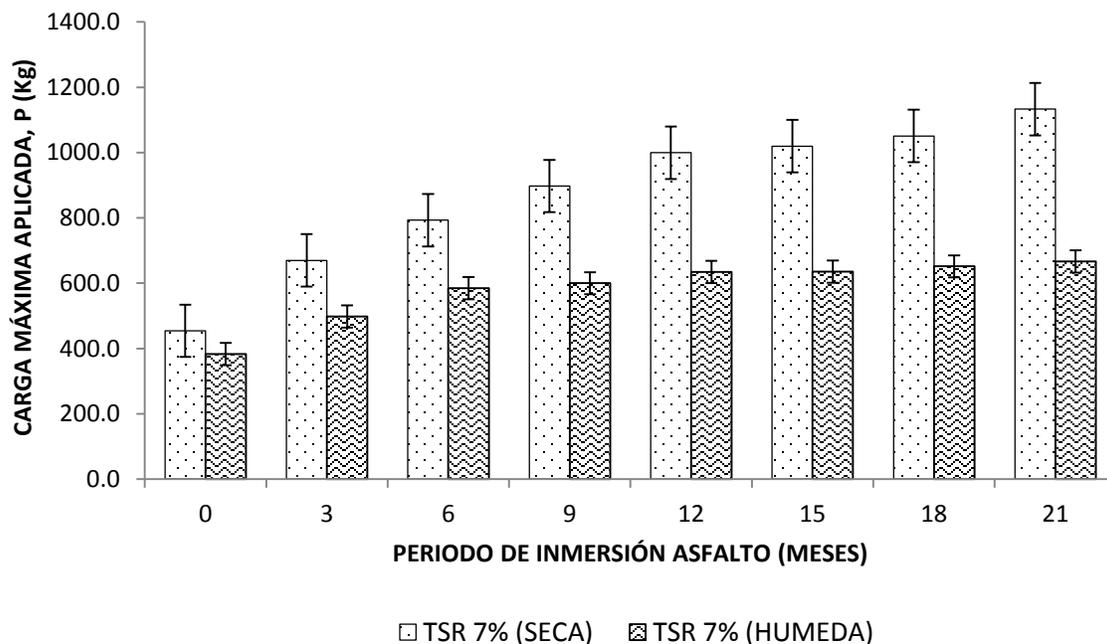


Figura 21. Comparativo de carga máxima en TSR

4.2 ENSAYO MIST (Moisture Induced Sensitivity Test)

Los parámetros de entrada para el ensayo del MIST, fueron seleccionados con base en estudios de investigación mencionados en el capítulo de materiales y métodos Tabla 14, a partir de estos resultados se realizaron ensayos a muestras cuyos porcentajes de vacíos fueran del 4% y 7%.

4.2.1 Ensayo MIST 4% de vacíos de aire

La prueba MIST somete la muestra a sobre esfuerzos de temperatura y presión, debido a que la cámara que contiene la muestra está saturada de agua y al generar una presión de cámara, esta se ve reflejada en la muestra con un aumento en la presión de poros de la misma, generando una pérdida en relación agregado-ligante. Los resultados arrojados indican, que ningún periodo de inmersión cumple el parámetro de mínimo el 80% de la resistencia a la tracción indirecta, debido a que en la normatividad con la que se realizó la prueba, no se tiene en cuenta el acondicionamiento de la cámara MIST

La condición de presión, temperatura y ciclos, que se simuló en el laboratorio mediante la cámara MIST es la prueba de desempeño que mejor representa la realidad de una estructura de pavimento, en la cual están involucradas, la presión, la temperatura, el agua y el tráfico, según lo manifiesta Buchanan & Moore (2005) el equipo MIST es quien muestra el mejor potencial para determinar el daño por humedad, aunque debe investigarse aún más para determinar los parámetros de la prueba y mejorar la eficiencia del equipo.

Al momento de analizar los resultados de MIST 4% de vacíos de aire, en los diferentes períodos de inmersión, su comportamiento frente a la relación de resistencia y a la tensión indirecta, describen un descenso gradual en el porcentaje de resistencia de la muestra húmeda contra la seca, siendo más notorio este descenso en el primer grupo de muestras conformado por las muestras desde la 0 meses hasta la muestra de 9 meses; en el segundo grupo de comportamiento se observa una tendencia a estabilizar su pérdida de relación a la tracción indirecta. (Ver Figura 22)

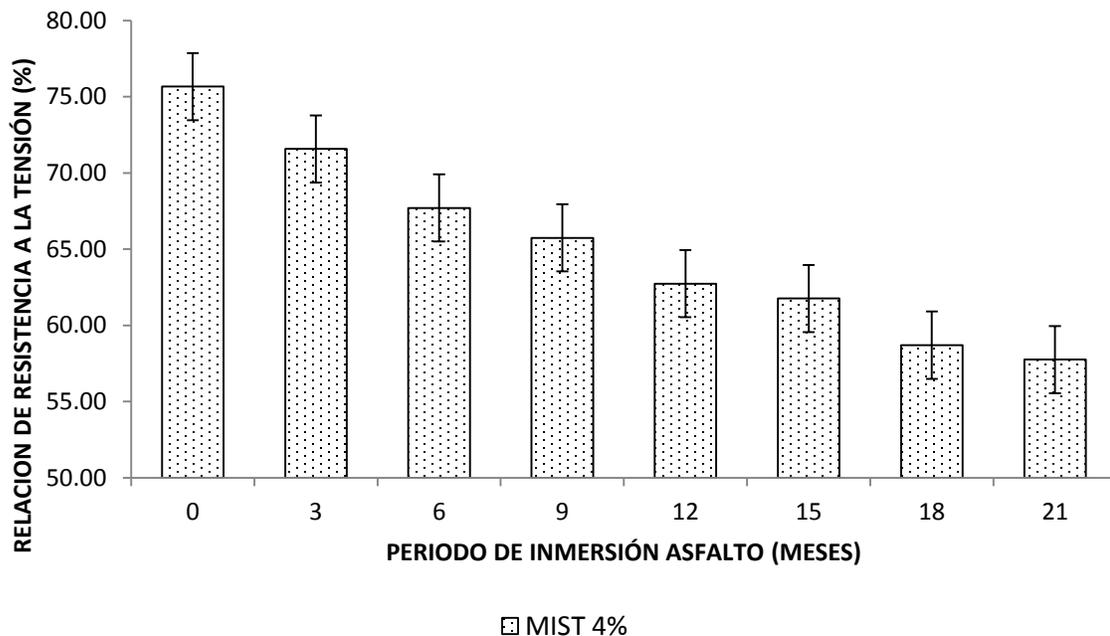


Figura 22. Comparativo de daño por humedad en MIST 4%

El mismo comportamiento se puede observar si se analiza la fuerza que resistió cada grupo, en este caso la fuerza que resistió las muestras “condición húmeda” se estabilizó. (Ver Figura 23)

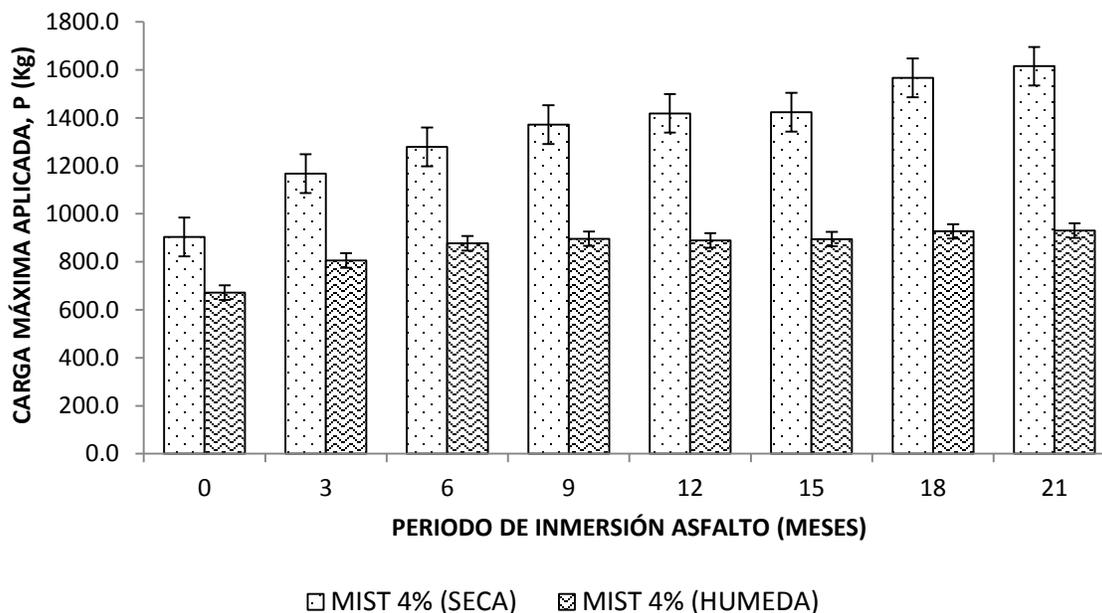


Figura 23. Comparativo de carga máxima en MIST 4%

Esta estabilización se logró en el grupo conformado por las muestras de 12 meses, hasta 21 meses de inmersión, atribuible al comportamiento químico. Ver Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7. En estas tablas se relacionan los ensayos realizados al ligante en los diferentes periodos de inmersión, demostrando un envejecimiento y cambio de las propiedades físicas y químicas del ligante, debido a la acción del agua.

Por ejemplo, si se observa el comportamiento de la penetración en los diferentes periodos de inmersión, claramente se distingue la rigidización del ligante, esta rigidez que ha adquirido el ligante se ve reflejada en la mayor resistencia a la carga en la prensa. Sin embargo, ese comportamiento no significa que se ha mejorado el desempeño, al contrario, ha generado que la mezcla se comporte frágil ante la acción de cargas externas, ya que el objetivo es medir la fuerza a la tensión indirectamente aplicando una carga compresiva monotónica. Aunque esta rigidización mejora la resistencia a las deformaciones permanentes.

4.2.2 Ensayo MIST 7% de vacíos de aire.

Este ensayo se realizó con las probetas fabricadas para MIST, que poseen un porcentaje de vacíos de mezcla del 7%, y nuevamente en esta prueba ningún periodo de inmersión cumplió el parámetro TSR, exigido en la norma (INV-725-07) (INVÍAS, 2007b)

Realizando el análisis en los diferentes periodos de inmersión de la relación de resistencia a la tensión indirecta, se encuentra reiteradamente la diferenciación del comportamiento en dos grupos: en el primer grupo conformado por las muestras 0 meses hasta 9 meses, la variación en la relación de resistencia se encuentra en el orden del 3% como mínimo, a partir de este periodo de inmersión la tendencia de los resultados tiende a estabilizarse y cuyas variaciones no sobrepasan el 2%. (Ver Figura 24).

Adicionalmente a medida que la muestra se vuelve más rígida debido a su oxidación, las cargas que resisten las muestras secas son mayores en comparación con la muestra original, (Ver Figura 25), este comportamiento se puede sustentar en la variación que presenta el ligante asfáltico en materia de su composición química, (Ver Tabla 6).

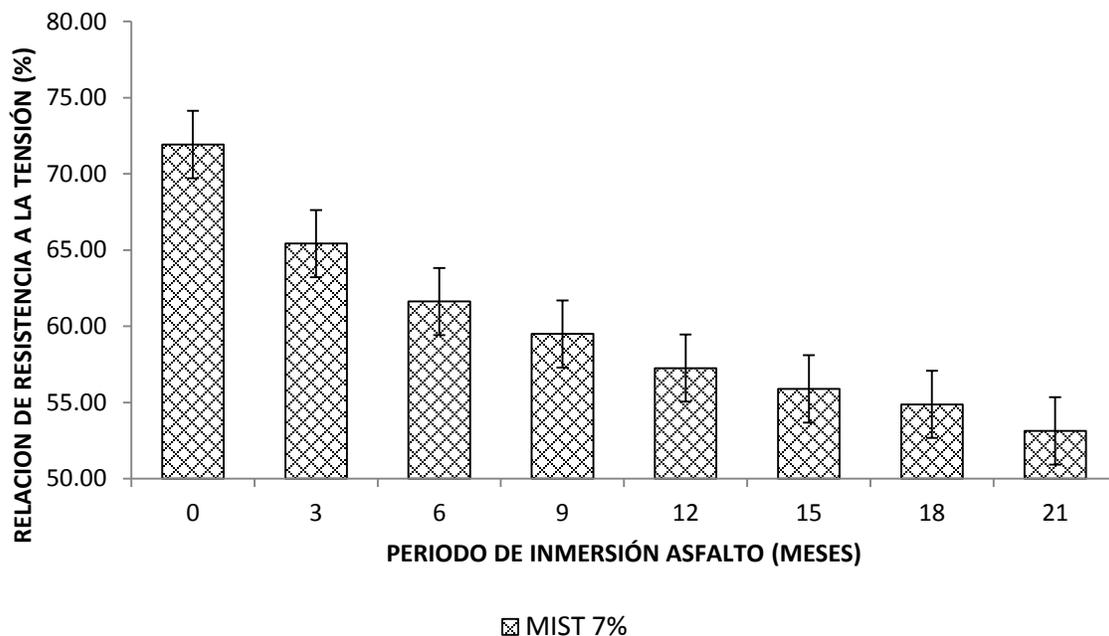


Figura 24. Comparativo de daño por humedad en MIST 7%

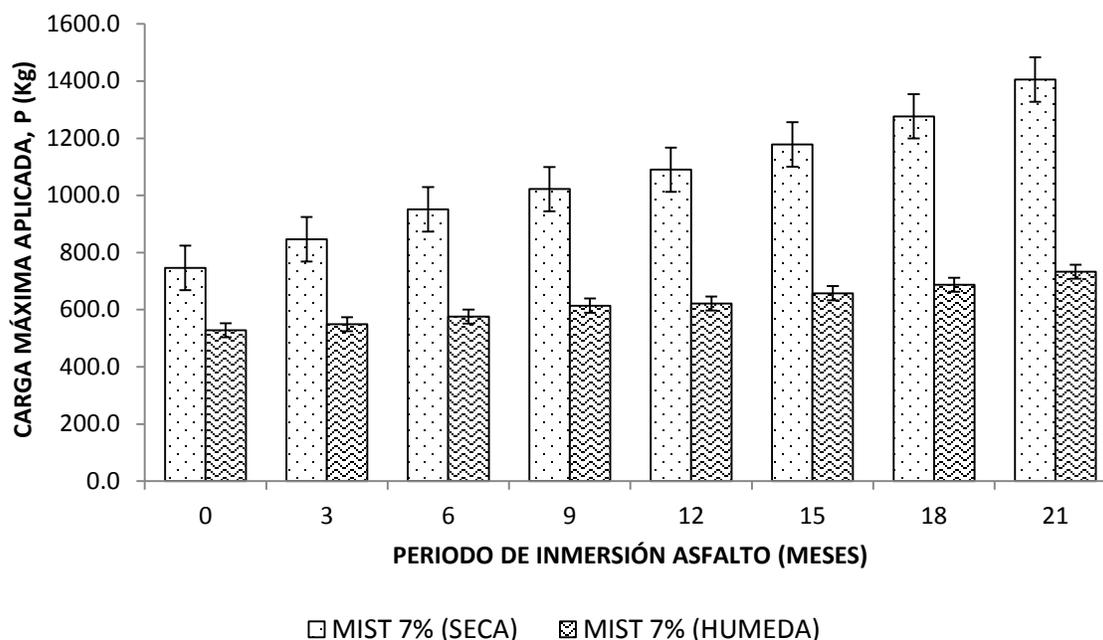


Figura 25. Comparativo de carga máxima en MIST 7%

4.2.3 Resultado comparativo entre TSR – MIST 4% - MIST 7%

Como el ensayo de MIST no posee aún valores o rangos de evaluación de daño por humedad por ser un proyecto en desarrollo e investigación, se realiza la comparación de los resultados obtenidos con las pruebas de TSR, MIST 4% de vacíos de aire y MIST 7% de vacíos de aire, con el objetivo de poder determinar una tendencia del comportamiento de la mezcla en su desempeño real.

Según Cheng & Huang (2008) el daño por humedad en una mezcla asfáltica se considera un problema de difícil solución o identificación visual en una vía, ya que este daño se puede presentar por ahuellamientos, fisuras, grietas, desprendimientos parciales o totales de los agregados. Esto se debe a que la humedad que está atrapada en la mezcla durante su fabricación, o la que penetró la mezcla desde la superficie, o ascendió por la estructura del pavimento, genera un debilitamiento entre la unión agregado-ligante, lo que ocasiona un desprendimiento del agregado, rotura de la película del ligante y separación entre agregados, ya que el ligante tiende a ablandarse en un proceso de emulsificación.

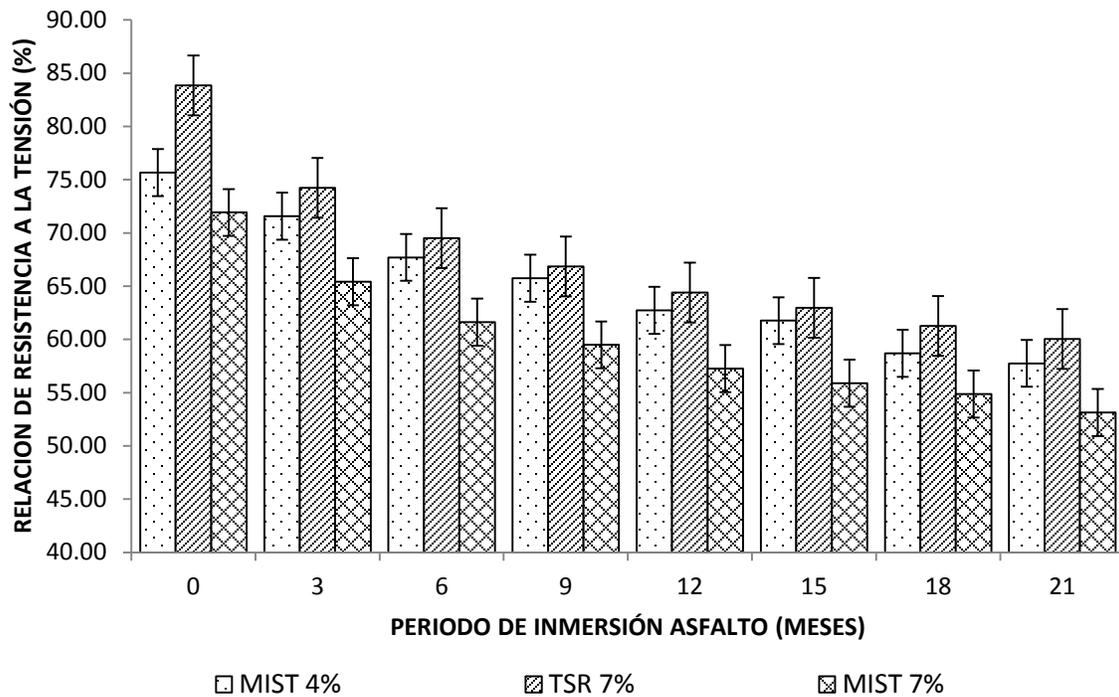


Figura 26. Comparativo de daño por humedad entre TSR-MIST4%-MIST7%

Este efecto descrito por Cheng & Huang (2008), se puede evidenciar en la Figura 26, donde se presenta el comparativo de los tres ensayos realizados, con diferentes condiciones de prueba en el cual se determinó el daño por humedad. En este sentido, a medida que el agua está en contacto por mayor tiempo con el ligante (período de inmersión), la acumulación de daño es mayor y visualmente el desprendimiento del agregado de la muestra es más evidente en los últimos períodos de inmersión (ver Figura 27).



Figura 27. Desprendimiento de agregados en pruebas de daño por humedad.

En la actualidad, la prueba más aceptada para control de calidad de la mezcla es la trabajada por Lottman y modificada por Tunni-cliff y Root, trabajo que dio origen a la prueba AASHTO-T-283, conocida como relación a la resistencia a tensión TSR. (J. A. Epps, 2000). Pero actualmente la prueba de MIST se considera con un amplio potencial de poder determinar el daño causado por humedad en mezclas compactas (Buchanan & Moore, 2005)

La prueba de sensibilidad al daño inducido MIST, fue desarrollada para determinar de forma racional en un corto período de tiempo la susceptibilidad de una mezcla asfáltica densa en caliente a la humedad; esta prueba simula el daño debido a la presión de poros cíclica que experimenta una vía en servicio, saturada bajo la carga de tráfico. (Mallick *et al*, 2005). Como se puede observar en la Figura 27 la presión de poros que se indujo en la muestra posiblemente causó el desprendimiento de los agregados gruesos.

En la Figura 28 y Figura 29, se analiza el efecto de la carga que resiste cada una de las muestras en los diferentes ensayos, básicamente se busca mostrar el efecto del daño por el agua en el ligante en el desempeño de la mezcla asfáltica, con el envejecimiento del ligante, el cual fue expuesto a períodos de inmersión bajo agua, las propiedades reológicas, químicas y físicas cambiaron (ver Tabla 6). Al generarse estos cambios el ligante se convierte en un material más rígido (envejecimiento) y por ende más frágil a presentar grietas o fisuras en la mezcla, exactamente en la relación agregado-ligante, por donde el agua penetra la mezcla generando el fenómeno de stripping, el cual debilita el desempeño mecánico de la mezcla asfáltica.

El envejecimiento de la mezcla fue mayor en la prueba de MIST 4%, la cual registró valores mayores para la carga aplicada a las probetas ensayadas (ver Figura 28 y Figura 29), este comportamiento tiende a estar relacionado con el proceso de envejecimiento del ligante y al proceso aplicado en la cámara MIST. A diferencia de los resultados de la prueba TSR, donde los valores de resistencia última fueron inferiores que las otras dos pruebas; aunque el asfalto está envejecido en la misma proporción, ya que estuvieron sumergidos en los mismos periodos, el proceso de daño por stripping fue diferente para los tres casos que se estudiaron.

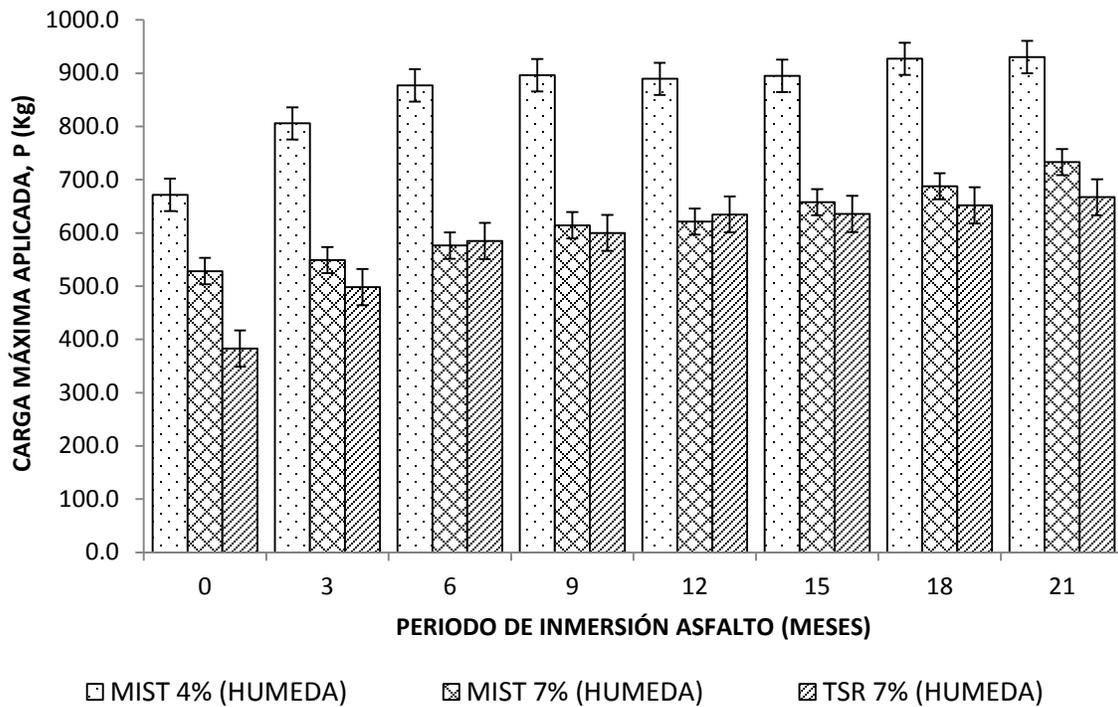


Figura 28. Comparativo de carga máxima muestras húmedas entre TSR-MIST4%-MIST7%

Como lo demostró Little & Jones (2003), se hizo evidente que el daño causado por la humedad no se limita únicamente a una pérdida de adhesividad, también influye en el debilitamiento de la fuerza de cohesión del mastic debido a la infiltración del agua. La investigación realizada ha demostrado que el agua puede difundirse en el mastic de la mezcla, generando una acumulación importante de la misma. Durante muchos años se ha demostrado claramente que el agua puede debilitar la mezcla asfáltica, por lo que la convierte en más susceptible al stripping.

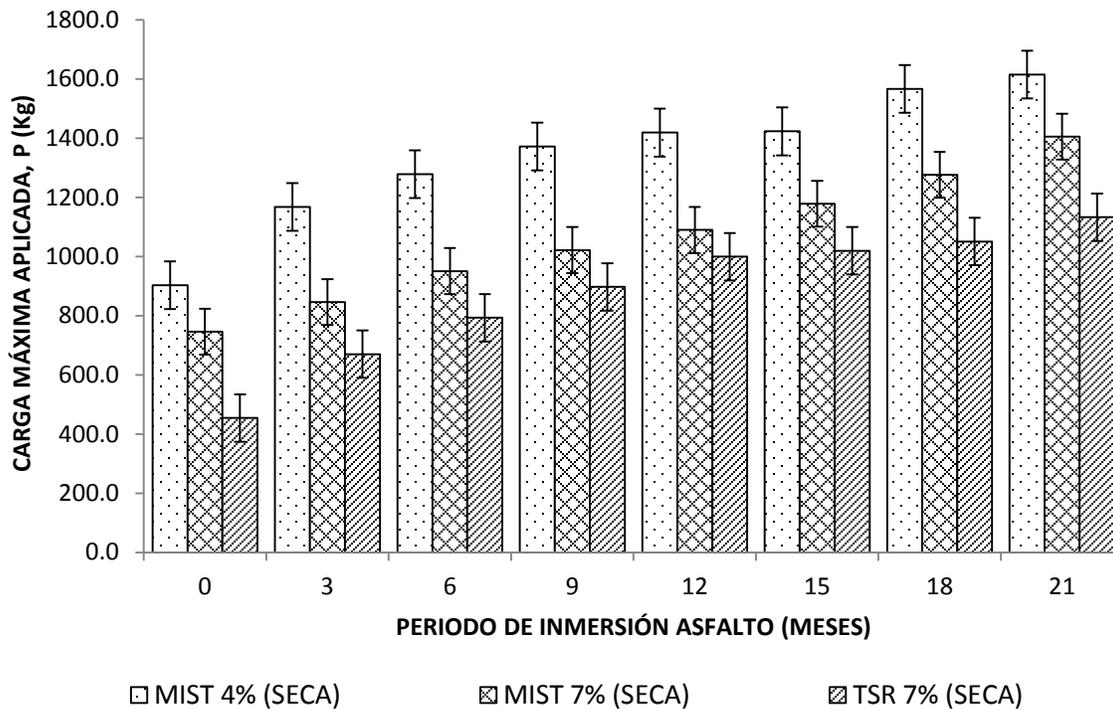


Figura 29. Comparativo de carga máxima muestras secas entre TSR-MIST4%-MIST7%

Según la investigación adelantada por Rondón & Moreno (2010), realizada en dos fases, en la fase1 realizaron probetas tipo Marshall con asfalto 80-100, estas probetas fueron sumergidas en agua durante seis meses y cada mes realizaban el ensayo de tracción indirecta bajo carga monotónica a través del ensayo Marshall (relación E/F entre la estabilidad E y el flujo F) y la fase 2 sumergieron láminas de asfalto (4mm espesor) en agua y cada mes retiraban las láminas para construir probetas tipo Marshall y realizar el ensayo de tracción indirecta bajo carga monotónica a través del ensayo Marshall. Los resultados encontrados sugieren que el ligante asfáltico cuando está en presencia de agua, cambia sus propiedades, ya que aumenta la resistencia mecánica de la mezcla, generando un endurecimiento o rigidización del ligante, esta situación conduce a pensar que la relación agregado-ligante, va a tender a fallar por adherencia o cohesión, generando el fenómeno de stripping en la mezcla.

4.3 ENSAYO MÓDULO DINÁMICO EN MEZCLA ASFÁLTICA – MTS

Para medir la rigidez de las muestras asfálticas analizadas se llevaron a cabo los ensayos de módulo en el actuador dinámico MTS® marca INSTRON modelo: 3369-2530-445. Bajo la norma INV-E-754 (2007b) Es importante destacar, que el módulo de un material es uno de los ensayos más importantes debido a que suministra información sobre el comportamiento dinámico de las mezclas, ya que la mezcla asfáltica se comporta de manera viscoelástica y este comportamiento depende de la temperatura a la cual está la mezcla asfáltica.

De los resultados obtenidos en todos los ensayos, se aprecia que el comportamiento de las muestras está relacionado con la temperatura y la velocidad a la que se aplica el esfuerzo, más concretamente, a altas temperaturas y tiempos de aplicación largos el módulo es bajo, mientras que a bajas temperaturas y tiempos cortos de aplicación de la carga el módulo fue alto.

La dependencia de los resultados de módulo dinámico respecto a la temperatura y a la frecuencia es la esperada; es decir, los módulos se incrementan en la medida en que se disminuye la temperatura de ensayo y se incrementa la frecuencia de aplicación de carga el módulo dinámico de la mezcla asfáltica con asfalto envejecido es superior al módulo dinámico de la mezcla elaborada con asfalto original. (Reyes, 2003).

4.3.1 Curvas maestras de módulos dinámicos de mezcla asfáltica

Con cada uno de los datos obtenidos en el ensayo de módulos dinámicos en la MTS, se realizó el tratamiento de los datos utilizando los modelos CAM modificado y WLF, para el cálculo de la curva maestra a la temperatura de 25°C. Al graficar las curvas maestras (ver Figura 30) y analizar la frecuencia a 10Hz se encontró un comportamiento ascendente o de rigidización de 0 a 9 meses en el módulo dinámico de la mezcla (Ver Tabla 15) es decir que el módulo paso de 3753 Mpa en la mezcla 0 meses a presentar un módulo de 5362 Mpa a 9 meses. Lo anterior quiere decir que a medida que aumentaba la exposición del ligante a la presencia de agua este se iba rigidizando. Para el

comportamiento de 12 meses el módulo descendió un poco frente al periodo anterior, a partir de este periodo el comportamiento del módulo dinámico cambió.

En el caso del módulo de 15 meses, se puede decir que este siguió ablandando comparado con el módulo anterior, en este caso el módulo fue de 4967 Mpa; para el módulo de 18 meses su comportamiento fue a rigidizarse, frente al periodo inmediatamente anterior, obteniendo un resultado de 5797 Mpa, siendo el valor más alto presentado en los módulos analizados a 10Hz y 5110 Mpa, para los 21 meses el resultado decreció llegando a un valor final de 5110 Mpa (Ver Tabla 15). Estos resultados encontrados se pueden contrastar con lo reportado por Rondón & Moreno (2010) en donde manifiestan que el asfalto en presencia del agua modifica su consistencia aumentando su rigidez, este aumento en la rigidez genera una menor vida a fatiga y una mayor resistencia a las deformaciones permanentes (ahuellamiento).

Tabla 15. Módulo dinámico a 25°C y 10Hz

PERIODO DE INMERSIÓN (meses)	MÓDULO DINÁMICO A 25°C y 10 Hz (MPa)
0	3753
3	4841
6	4885
9	5362
12	5278
15	4967
18	5797
21	5110

Este resultado se puede también analizar si se observa la Tabla 6, en donde la fracción de asfaltenos, aumenta a medida que varían los periodos de inmersión, denotando una rigidización, o envejecimiento tal como lo indica Cortes (2012), en donde manifiesta que los asfaltenos se incrementaron debido al proceso de envejecimiento que sufrió el ligante al estar sumergido bajo el agua.

Tabla 16. Comportamiento de la fracción asfaltenos

PERIODO DE INMERSIÓN (meses)	ASFALTENOS (%)
0	9,62
3	9,29
6	10,96
9	12,51
12	12,08
15	11,93
18	12,47
21	13,04

Fuente: (Atencia H., 2011) y (Cortes V., 2012)

El envejecimiento que experimentó el ligante al estar en contacto con el agua, generó un incremento en los asfaltenos y las resinas y por otro lado una disminución de las fracciones de saturados y aromáticos. Estos resultados sugieren que además de la posible volatilización que ocurre en la fracción más liviana (saturados), los aceites parafínicos (aromáticos) se convierten en aceites resinosos (resinas) y estos a su vez en asfaltenos (Cortes V., 2012).

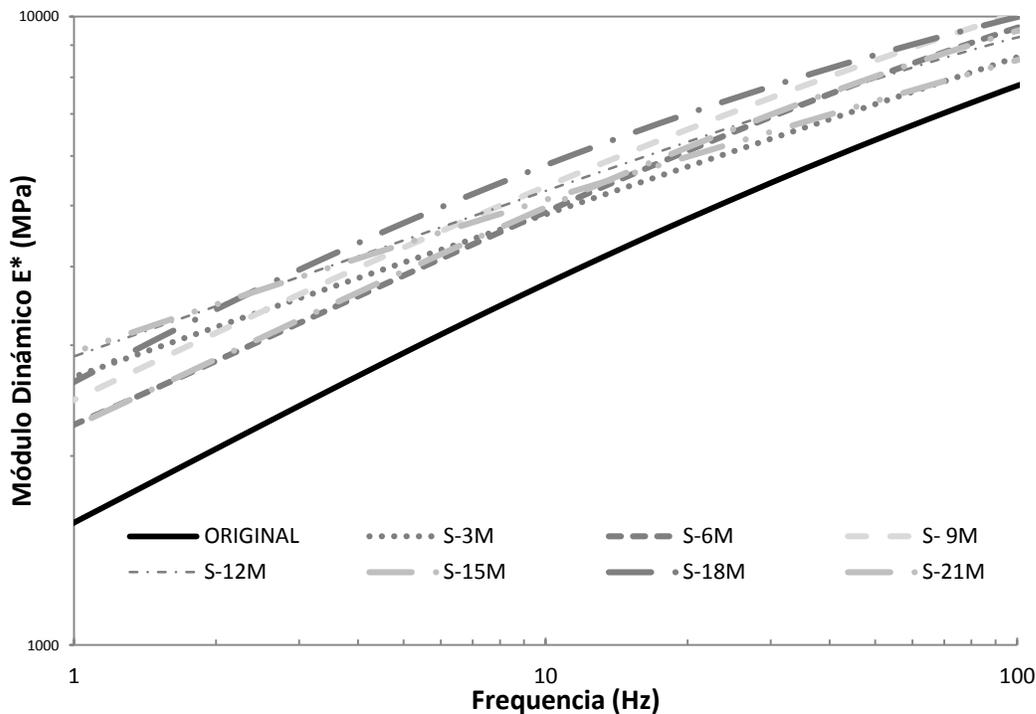


Figura 30. Consolidado curvas maestras de módulo dinámico de mezcla asfáltica entre 1 y 100 Hz.

Al contrastar los resultados de módulos dinámicos con los resultados de caracterización química presentados en la Tabla 6, se observa que los asfaltenos se incrementaron debido al proceso de envejecimiento que sufrió el ligante al estar sumergido bajo el agua (Cortes V., 2012), de igual forma se observa que el contenido de la fracción saturada disminuyó en el mes 21 con respecto al asfalto original en un 0,90%, esto es, una disminución poco significativa que confirma la estabilidad que tiene esta fracción y la baja susceptibilidad al proceso de envejecimiento dentro del asfalto, para el caso de la fracción de asfaltenos se observó un incremento del 3,42%, evidenciando la influencia que existe sobre las características adhesivas y aglomerantes del asfalto.

Teniendo en cuenta que la fracción aromáticos son los de menor peso molecular, estos representaron un 30,49% del peso en el asfalto original, disminuyendo con respecto al tiempo hasta un 25,96% en el mes 21 de estar sumergido, esta fracción es la que presentó mayor diferencia en el tiempo al disminuir un 4,53% su peso. Por su parte, las resinas tuvieron un incremento del 3,03% lo que indica un aumento en la capacidad adhesiva del asfalto (Ver Figura 31)

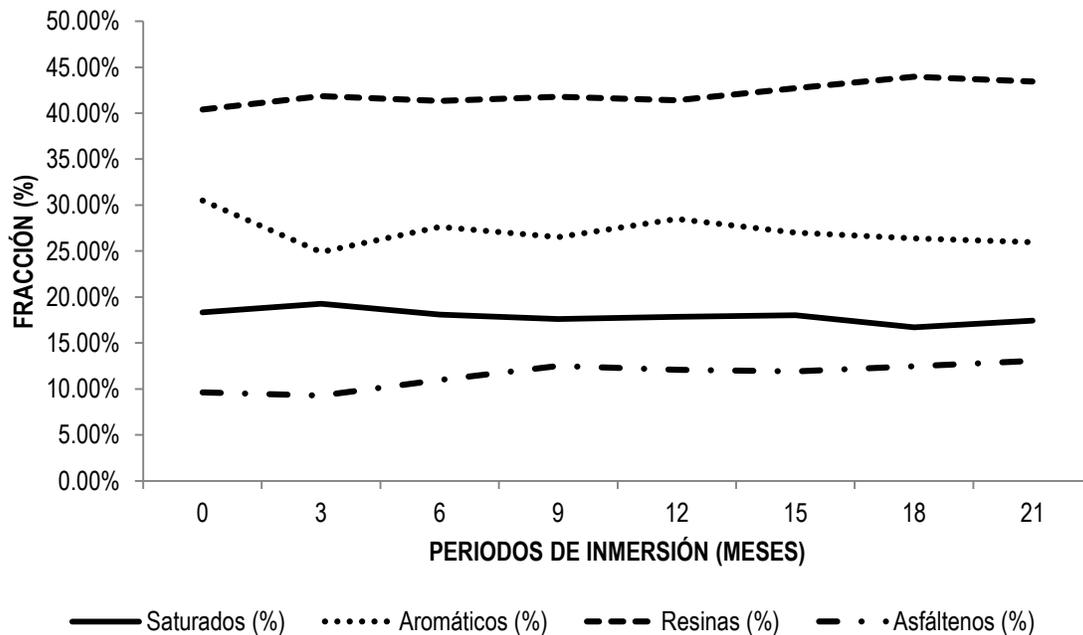


Figura 31. Comportamiento de las fracciones SARA en los periodos de inmersión

En general los cambios observados en las fracciones del asfalto en el tiempo de inmersión en el agua indican un envejecimiento presente, al disminuir la fase continua y al aumentar la fase dispersa. Esto se observa con el material, que al manipularlo se comporta de manera frágil, pero a la vez se hace más rígido.

Aunado a lo anterior, el envejecimiento del asfalto ocasionó un incremento en los asfaltenos y las resinas, y por el contrario, una disminución de las fracciones de saturados y aromáticos. Estos resultados sugieren que además de la posible volatilización que ocurre en la fracción más liviana, los aceites parafínicos se convierten en aceites resinosos y estos a su vez en asfaltenos. El asfalto depende de las proporciones en que se encuentren las fracciones, por lo que el hecho de que haya

pérdida de saturados y aromáticos hace que las micelas de asfaltenos se unan más, generando mayor fricción entre ellas, disminuyendo la facilidad de desplazarse, lo cual corrobora el grado de envejecimiento que se ganó. (Cortes V., 2012)

Las cuatro fracciones del análisis SARA, constituyen la ley coloidal la cual se expresa con la Ecuación 4 y Ecuación 5

$$IC = \frac{\text{Constituyentes floculados}}{\text{Constituyentes dispersados}} = \frac{(\text{SATURADOS} + \text{ASFÁLTENOS})}{(\text{AROMÁTICOS} + \text{RESINAS})}$$

Ecuación 4. Índice coloidal a partir del SARA

$$IS = \frac{\text{RESINAS}}{\text{ASFÁLTENOS}} + \frac{\text{AROMÁTICOS}}{\text{SATURADOS}}$$

Ecuación 5. Índice de solubilidad a partir del SARA

Siendo el índice de inestabilidad coloidal IC, quien brinda una idea del grado de gelificación de los asfaltos o del cambio de la estructura coloidal, experimentalmente se ha determinado un valor máximo de 0.6, si el IC es mayor a 0.6 se comporta como un tipo gel. En el caso del índice de solubilidad IS este determina la estructura coloidal, es el siguiente rango:

- $IS < 4$ = Estructura GEL
- $4 < IS < 9$ = Estructura SOL-GEL
- $IS > 9$ = Estructura SOL

Si un asfalto es tipo GEL, este posee una baja susceptibilidad térmica y un mayor intervalo de temperatura entre el cambio de estado elástico a viscoso. Se caracteriza por tener una deformidad elástica retardada y por presentar bajas deformaciones permanentes debidas a la carga y temperatura. En consecuencia, si el asfalto se comporta como un tipo SOL, significa que el asfalto posee una alta susceptibilidad térmica, producto de contener bajo % de asfaltenos (dureza y rigidez), lo que genera que se presenten deformaciones permanentes (ahuellamiento) en la mezcla asfáltica.

Ahora bien, si el asfalto es de tipo SOL-GEL, se caracteriza por su comportamiento de forma elástica y después de presentada una deformación, presenta una susceptibilidad térmica intermedia. Si se observa los resultados obtenidos en la caracterización del ligante, el IS del asfalto 0 meses se encontró el 5,8618 y en 21 meses termino en 4,8212 lo que significa que su comportamiento es SOL-GEL, como el contenido de asfaltenos aumentó con los diferentes periodos de inmersión

Ambos índices dejan ver que el asfalto, a medida que pasaban los periodos de inmersión, tendía a tener un comportamiento tipo GEL. El índice calculado para el asfalto original y para cada uno de los periodos de inmersión muestra un asfalto ideal para ser usado en pavimentación, debido a su proporción de máltenos y asfaltenos.(Cárdenas & Fonseca, 2009)

Por otro lado, si se observa la Tabla 7 donde se consolidan los valores de módulo complejo del ligante, el incremento en el módulo complejo G^* , representa un aumento de resistencia a la deformación y por ende aumenta la resistencia al ahuellamiento. El valor del ángulo de fase δ tuvo un comportamiento decreciente, reflejando un mayor componente de deformación total elástica, según lo planteado por Hardin (1995). De igual forma, el incremento del módulo complejo y decrecimiento del ángulo de fase muestra una tendencia a endurecerse durante la comparación con los diferentes tiempos de inmersión.

4.4 ENSAYO DE AHUELLAMIENTO

El ensayo de ahuellamiento se realizó en la pista de laboratorio, el cual entregó la resistencia de la mezcla a deformaciones permanentes, que en la mezcla con asfalto original presentó una deformación no recuperable de 41,70 mm en 105 minutos de desempeño en la pista; este fue el resultado más alto frente a los demás periodos de inmersión. En la Figura 32. Comparativo ahuellamiento vs tiempo - muestras 0 a 21 meses se observa el comportamiento de las muestras después de ser sometidas a inmersión, en esta prueba también se observa que la muestra ha sufrido un proceso de envejecimiento al ser menores las deformaciones permanente en el mismo periodo de inmersión.

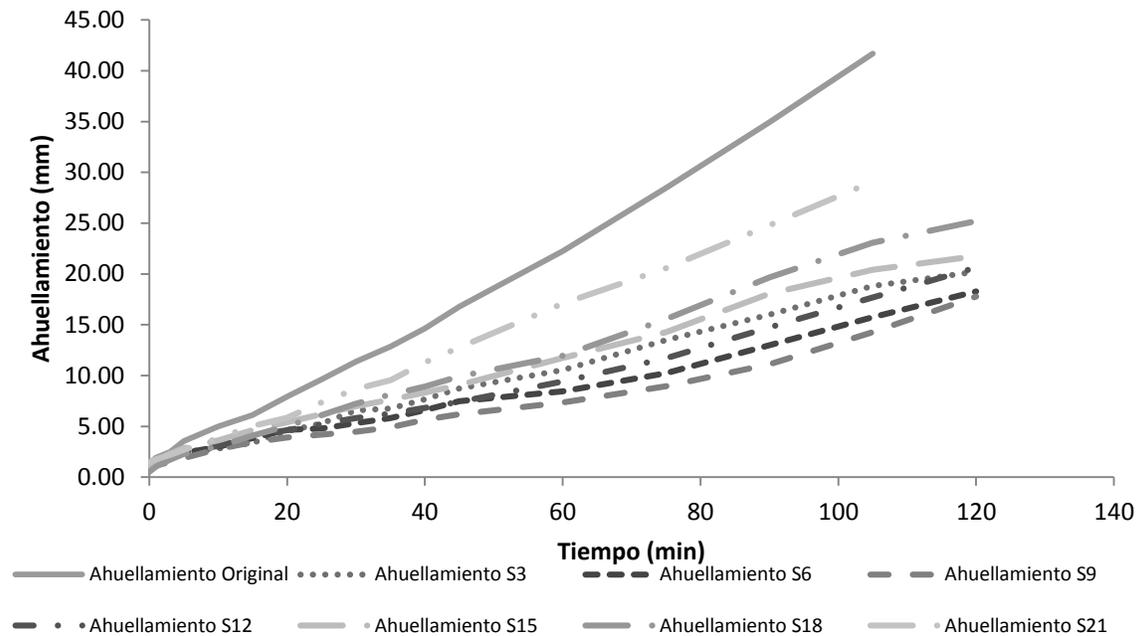


Figura 32. Comparativo ahuellamiento vs tiempo - muestras 0 a 21 meses

En este sentido, si se realiza un análisis de todas las muestras a 105 min de ejecución de la prueba (Ver Tabla 17), se observa que el grupo se divide en dos grupos diferenciables. El primero con las muestras: 0 meses, 3 meses, 6 meses, 9 meses. Y el segundo con las muestras: 12 meses, 15 meses, 18 meses y 21 meses.

En el primer grupo todas las muestras sufren un proceso de endurecimiento o resistencia a deformaciones permanentes; a medida que pasan los periodos de inmersión este comportamiento se debe tal como se explicó en el TSR y MIST, a que el ligante está presentando un cambio químico en su composición, ya que los asfaltenos en el periodo de 0 a 9 meses están aumentando pasando de 9,62% a 12,51%, mientras que los máltenos (saturados, aromáticos y resinas) están disminuyendo pasando de 89,23% a 85,92%. En el segundo grupo de comportamiento la fracción de máltenos aumenta comparada con los periodos de inmersión precedentes teniendo un comportamiento cercano al 87,76% en la muestra 12 meses y en 21 meses 86,84% y en la fracción de asfaltenos su comportamiento en los periodos de 12 y 15 meses, la fracción disminuye con respecto a 9 meses presentando resultados de 12,08% y 11,93 respectivamente; para los meses de 18 y 21 meses la fracción de asfaltenos cambia su comportamiento aumentando y presentando valores de 12,47% y 13,07% respectivamente (ver Tabla 6)

Tabla 17. Resultados de ahuellamiento a 105 min

PERIODO DE INMERSIÓN (MESES)	AHUELLAMIENTO A 105 MIN (mm)
0	41,70
3	18,82
6	15,73
9	14,28
12	17,70
15	20,42
18	23,07
21	29,07

Con estos resultados se presentan la Figura 33 y Figura 34 las cuales permiten identificar los dos comportamientos en la prueba de ahuellamiento.

El ahuellamiento se presenta en la capa superior del pavimento, y se produce por la acumulación de deformaciones plásticas en la mezcla asfáltica, como resultado de la repetición de cargas cíclicas, y es considerado como una falla estructural del pavimento. Entre más alta sea la temperatura en la zona donde está ubicada la estructura, mayor será su deformación permanente, debido a que el ligante asfáltico que le da solidez y cohesión a la mezcla presenta menores viscosidades. Por lo general las deformaciones permanentes se presentan en mayor proporción en los asfaltos originales o menos envejecidos, debido a su bajo % en los asfaltenos. (Fernández, *et al.*, 2011)

Si se analiza el comportamiento del módulo complejo/seno δ y según la clasificación por SUPERPAVE® este parámetro debe ser superior a 1 KPa, para asfalto original y de 2.2 KPa para asfaltos envejecidos. Es decir que entre más alejado se encuentre de este parámetro, la deformación permanente que experimentara la mezcla será menor, al revisar el valor en la Tabla 7 encontramos que el asfalto cumple con este parámetro tanto para la muestra original como para los meses que el asfalto se sumergió bajo agua.

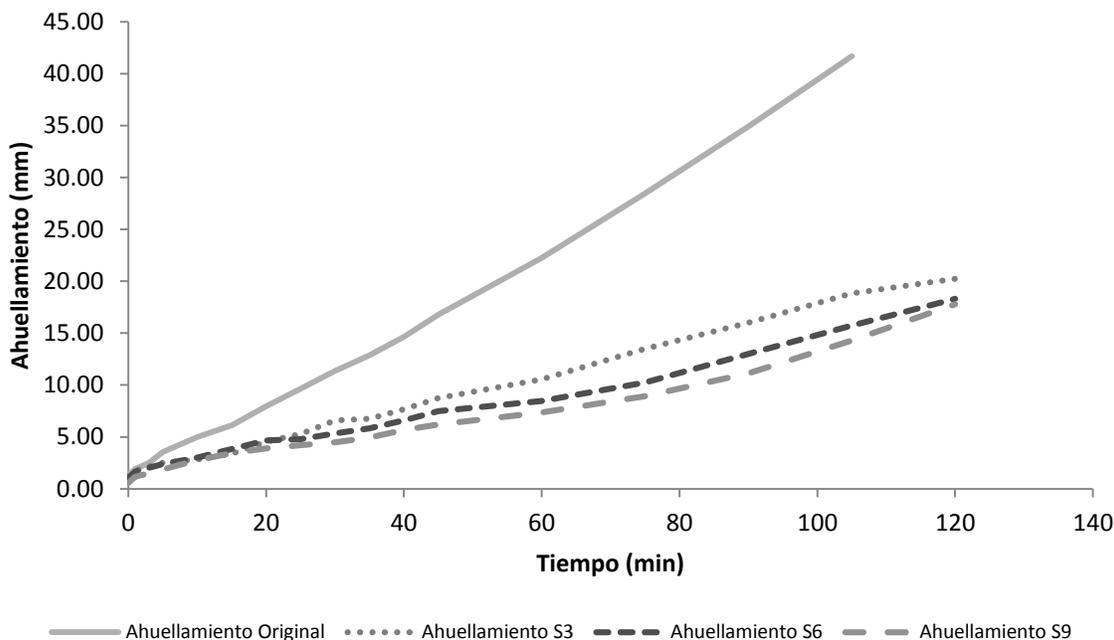


Figura 33. Comparativo ahuellamiento vs tiempo - muestras desde original hasta 9 meses

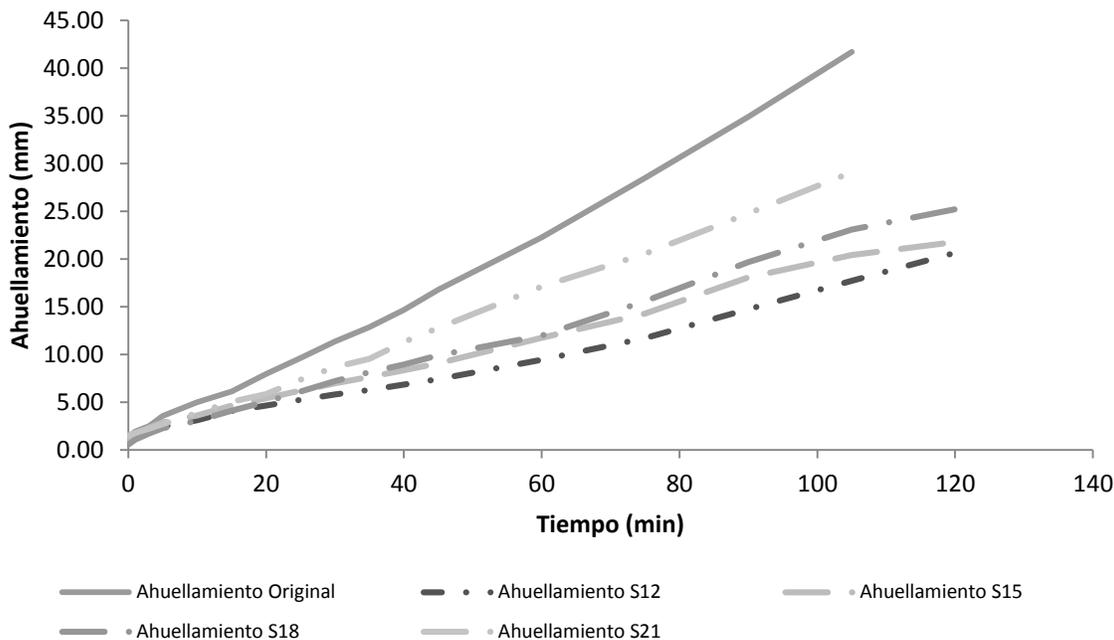


Figura 34. Comparativo ahuellamiento vs tiempo - muestras desde 12 meses hasta 21 meses

En la investigación adelantada por Caro *et al* (2003) evidencia la modelación del ahuellamiento en mezclas asfálticas, en la que se presenta la curva de ahuellamiento de una mezcla MDC-2, la cual

cumple el artículo 450-07 (INVÍAS, 2007a). En esa investigación el desempeño de la muestra a 105 min de prueba presentó un ahuellamiento aproximado de 3.5 cm, en la prueba realizada en esta investigación el ahuellamiento a 105 min fue de 4.1 cm, bajo las mismas condiciones de temperatura, presión y frecuencia de carga.

Cuando una mezcla asfáltica experimenta una deformación permanente, significa que la mezcla tiene baja resistencia al corte. Como la carga que aplica el vehículo es cíclica, esta produce una deformación permanente pequeña que se va acumulando a medida que la carga vuelve y se aplica a la mezcla. La deformación por efecto corte, se caracteriza por presentar un movimiento vertical y lateral, que con el número de ciclos, aparece los primeros surcos, roderas o huellas en la mezcla, ocasionando la falla en el pavimento.

Para evitar que la mezcla asfáltica experimente está deformación permanente, es necesario utilizar un ligante más duro, que ofrezca una buena resistencia al corte, pero no es la única característica sino que el ligante debe comportarse como un sólido elástico, significa que luego de retirada la carga, el sólido se recupere. El tipo de ligante que se utilizó en esta investigación, demuestra una tendencia a envejecimiento, ya que ha adquirido mayor rigidez, expresada en el módulo dinámico de la mezcla (Ver Tabla 15) y en el módulo complejo del ligante (Ver Tabla 7). Con esta mayor rigidez la mezcla se deforma menos a medida que pasan los periodos de inmersión desde 0 meses hasta 9 meses (ver Figura 33); a partir de allí la mezcla comienza un proceso de ascenso, es decir la muestra se deforma aún más en el mismo lapso de tiempo que la muestra del periodo de inmersión anterior. (Ver Figura 34).

El comportamiento que experimentó la mezcla se puede atribuir a la relación entre el ligante-agregado-agua. Mientras en los primeros meses de inmersión el ligante sufre un proceso de envejecimiento u oxidación y que presenta cambio en las propiedades físicas, químicas y reológicas, en los siguientes meses este envejecimiento tiende a estabilizarse, (Ver Tabla 5) la relación agua-ligante tiende a formar procesos o comportamientos elásticos, una posible razón a este proceso es la emulsificación que experimenta el .ligante asfáltico, tal como lo sustenta (Little & Jones, 2003).

El usar un ligante de consistencia dura, es decir alta viscosidad, aunque reduce el efecto de ahuellamiento, lo convierte en un material más frágil, y más susceptible a desmoronarse o desintegrarse al ser sometido a cargas. Este comportamiento está asociado a la ductilidad, la cual con los diferentes periodos de inmersión se redujo frente a la muestra 0 meses (Ver Tabla 5), pasando de 144 cm en la muestra 0 meses a 92,5 cm en la muestra 21 meses, es decir el ligante se redujo un 35.7%. Visualmente este proceso se pudo comprobar con las muestras de ahuellamiento, que después de fallada en la pista, inició un proceso de desintegración que fue mayor en los periodos de inmersión de 21 meses (Ver Figura 35). También Tarefder, *et al.* (2003), indicaba que el agua presente en el ligante asfáltico genera pérdida de resistencia en la relación agregado-ligante, conduciendo a una pérdida de cohesión en la mezcla, debido a la humedad.



0 meses



3 meses



6 meses



9 meses

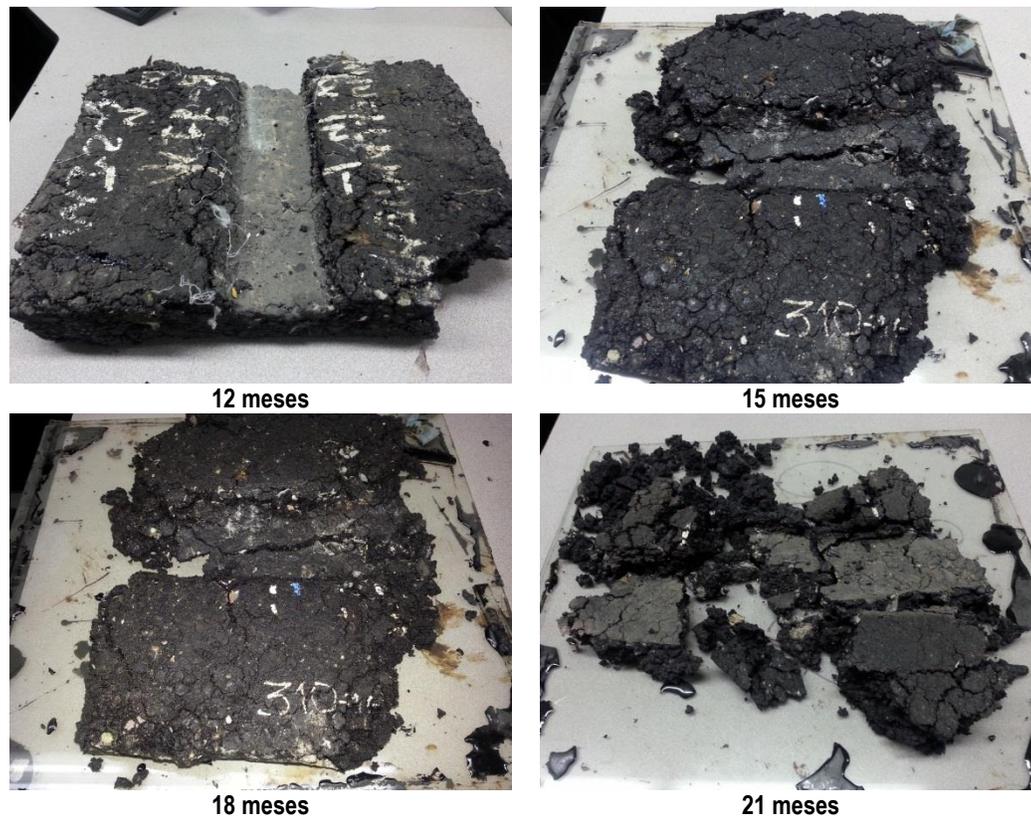


Figura 35. Muestras de ahuellamiento en los diferentes periodos de inmersión, desintegradas

4.5 ENSAYO DE FATIGA TRAPEZOIDAL

Para poder determinar la resistencia a fatiga de las muestras analizadas en los diferentes períodos de inmersión se utilizó el banco de fatiga trapezoidal, la fatiga es uno de los daños que más afecta las mezclas en servicio cuando estas son sometidas a cargas repetitivas, como las ocasionadas por el tráfico, es por esta razón que es necesario determinar la ley de fatiga que rige el comportamiento de la mezcla.

Tabla 18. Resumen de parámetros de las leyes de fatiga Original, 12 meses y 21 meses.

PERIODO DE INMERSIÓN (MESES)	PARAMETROS	
0	ϵ_6	151.8
	b	-0.258
	α	3.88
12	ϵ_6	192.5
	b	-0.308
	α	3.25

PERIODO DE INMERSIÓN (MESES)	PARAMETROS	
21	ε_6	124.5
	b	-0.211
	α	4.74

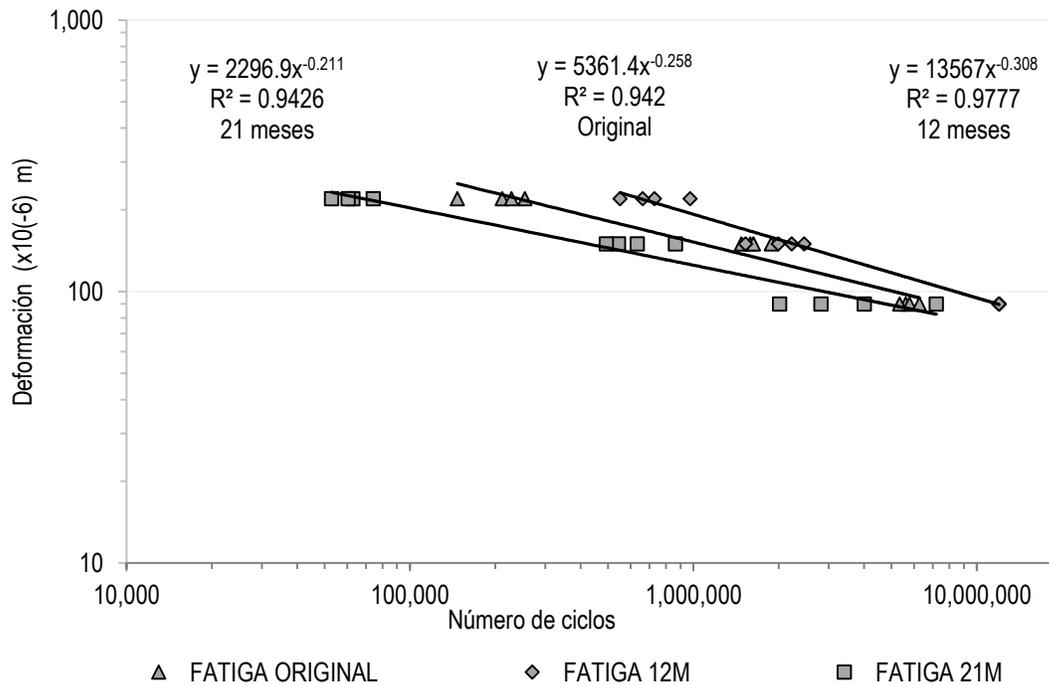


Figura 36. Comparación leyes de fatiga original, 12 meses, 21 meses

Es oportuno tener en cuenta que la fatiga es un fenómeno que ocurre en los materiales debido a la acción de cargas repetitivas o ciclos de carga. En tal sentido, la fatiga se asocia con la fractura de los materiales en procesos a largo plazo, en el caso de los cementos asfálticos la fatiga se relaciona con la energía disipada en la carpeta de asfalto durante cada ciclo de carga. El criterio que se utiliza para evaluar el desempeño a la fatiga de un ligante asfáltico, es mediante la prueba en el DSR donde se mide la pérdida de la componente viscosa del módulo complejo, se determina con $G^* \text{ Seno } \delta$ el cual máximo puede ser 5 MPa (Petersen *et al.*, 1994). En la Tabla 7 se relaciona el parámetro de Módulo complejo*seno δ , se analiza la relación en cada uno de los periodos de inmersión.

La Figura 36 muestra los resultados de las 3 leyes de fatiga realizadas en los periodos de 0, 12 y 21 meses. El comportamiento de la ley de fatiga de 12 meses tiende a comportarse de una forma elástica, es decir, que bajo la misma deformación aplicada, el número de ciclos necesarios para llegar a la falla, es mayor frente a la muestra de 0 meses.

Para la ley de 21 meses su comportamiento es inverso, es decir que bajo la misma deformación aplicada el número de ciclos decrece con respecto a 0 y 12 meses. Este comportamiento indica que mientras a los 12 meses las muestras presentaban un ablandamiento posiblemente atribuible a una emulsificación del ligante, en la muestra de 21 meses mostraba una rigidización considerable. Tal como lo comprobó Rondón & Moreno (2010) cuando fabricaron muestras con láminas de concreto asfáltico sumergidas en agua, se observa una tendencia a aumentar la resistencia mecánica de las mezclas con el tiempo de sumergimiento de las láminas en agua. Los resultados sugieren que el concreto asfáltico, en presencia solamente de agua, cambia sus propiedades, ya que aumenta la resistencia mecánica de las mezclas. Lo anterior conduce a pensar que la conexión ligante-pétreos en una mezcla asfáltica se puede romper, debido a que el concreto por la sola presencia del agua se vuelve rígido, lo que conlleva una contracción del ligante sin cambio de volumen y, por lo tanto, separación con el agregado. Por su parte Brown & Selig (1991) indicaron que una mezcla asfáltica muy rígida no presenta un buen comportamiento a la fatiga por experimentar una alta resistencia al ahuellamiento, situación que se pudo comprobar mediante los ensayos de módulos dinámicos, ahuellamiento y fatiga.

4.6 ANÁLISIS DE IMÁGENES MEDIANTE EL SOFTWARE IPAS®

Después de procesar las imágenes en el software IPAS® y encontrar los puntos de contacto de la estructura interna de la muestra analizada, el software permite determinar cuántos contactos entre agregado-agregado se encuentran en la muestra, determinando el número de agregados analizados.

Al analizar la muestra de MIST 7% de vacíos de aire se determinó que con el transcurso de los períodos de inmersión los números de contactos analizados por cada imagen decrecían en las muestras secas y

en las húmedas, demostrando un daño en la estructura interna debido a la presencia de agua en el ligante asfáltico.

En la Figura 37 se presenta el comportamiento de las muestras MIST 7% de vacíos de aire. Las muestras más afectadas en el cambio de la estructura fueron las de condición húmeda, demostrando aún más que el agua genera un cambio en la estructura y que este cambio pudo ser debido a un desplazamiento del agua en la relación agregado-ligante, una posible expansión del ligante por una emulsificación, como lo ha mencionado Fromm (1974); cuando el asfalto se sumerge en agua tiende a formar una emulsión invertida de gotas de agua en el cemento asfáltico, generando un desprendimiento de la película de asfalto cuando las gotas de agua llegan a la superficie del agregado, generando una pérdida en la relación agregado-ligante.

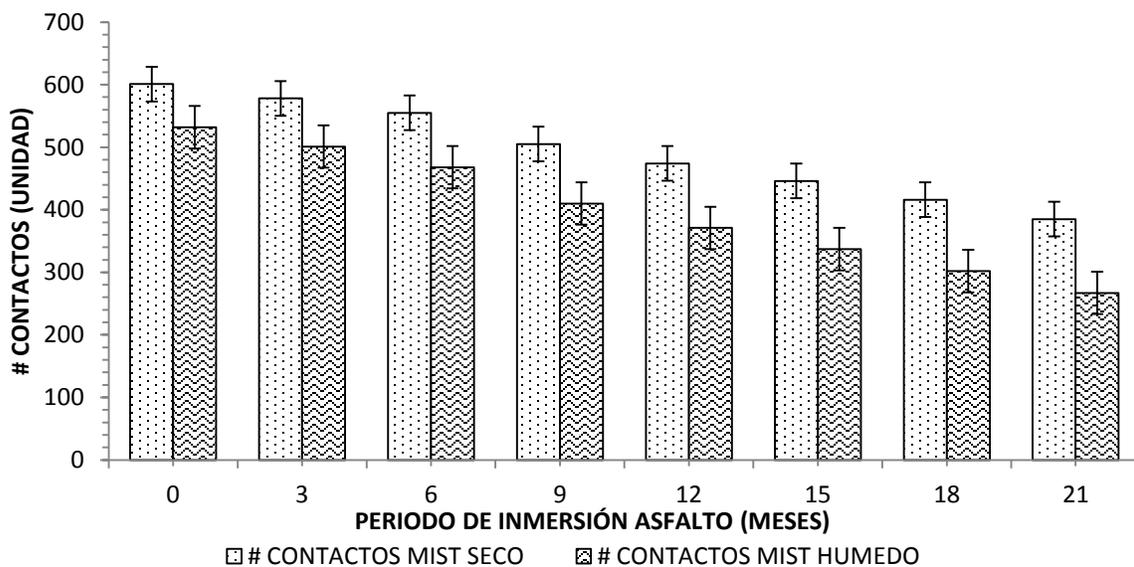


Figura 37. Consolidado # de contactos MIST 7%

Para la muestra de TSR 7 % de vacíos de aire el comportamiento fue similar que el registrado en la muestra anterior, ya que el número de contactos decreció con el aumento del tiempo de inmersión del ligante asfáltico. (Ver Figura 38).

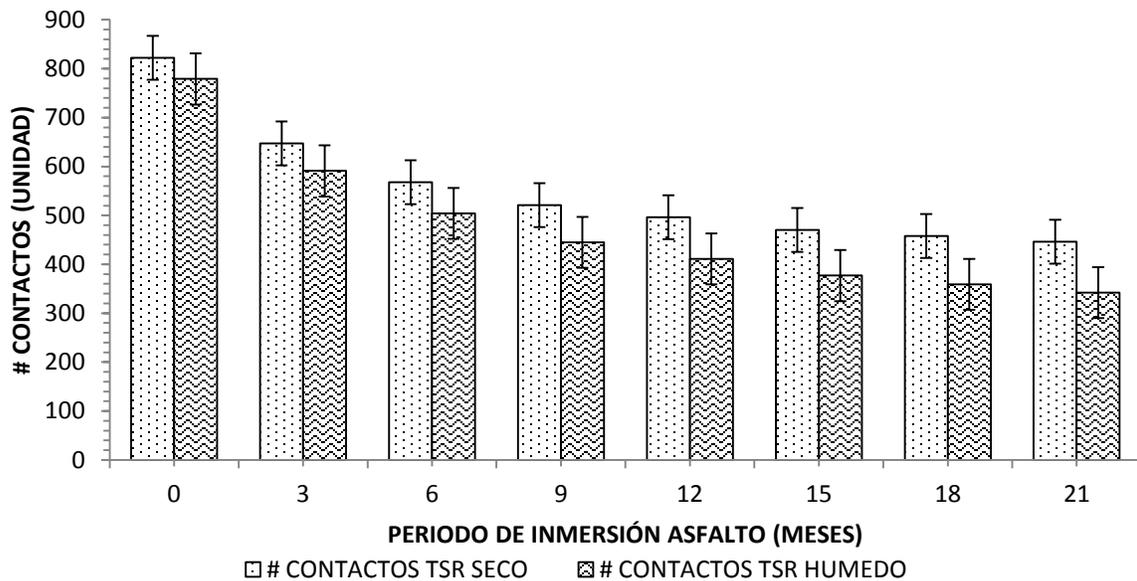


Figura 38. Consolidado # de contactos TSR 7%

Para poder realizar una comparación del comportamiento del cambio de número de contacto en las dos muestras analizadas, se realizó una relación de húmedas/secas, y con esta relación o porcentaje se realizó la Figura 39 encontrando que el daño fue más evidente en las muestras que fueron sometidas a la cámara MIST. Este decrecimiento, tal como se explicó en el comportamiento del resultado de MIST 7% de vacíos de aire, se debe al cambio de la relación agregado-ligante, como muchos autores han manifestado los daños por humedad, como es el caso de Aschenbrener (2002), Kringos & Scarpas (2008), Ángelo & Anderson (2003).

Este deterioro funcional, progresivo, se evidenció en las muestras analizadas, en muchas ocasiones por la posible pérdida de la adhesión del ligante asfáltico y la superficie principalmente y/o pérdida de la cohesión del cemento asfáltico ante la presencia de agua en el ligante, tal como lo manifestó Kiggundu & Roberts (1988), quien concluye que los daños por humedad afectan principalmente estas dos propiedades, adhesión y cohesión, evidenciando deterioro en el desempeño de la mezcla y reduciendo considerablemente la vida útil del pavimento.

Es por esta acción que durante el análisis de las imágenes 2-D en el software IPAS® se observó esta retracción entre el número de contactos; como la cantidad de datos de contactos y agregados es

analizada por área de imagen, se realizó el control para determinar que todas las imágenes analizadas mantuvieran la misma relación entre número de contactos y número de agregados; esta relación estuvo por el orden del 60% para las muestras secas y 70% para las muestras húmedas de cada uno de los dos ensayos (Ver Tabla 19, Tabla 20, Tabla 21 y Tabla 22).

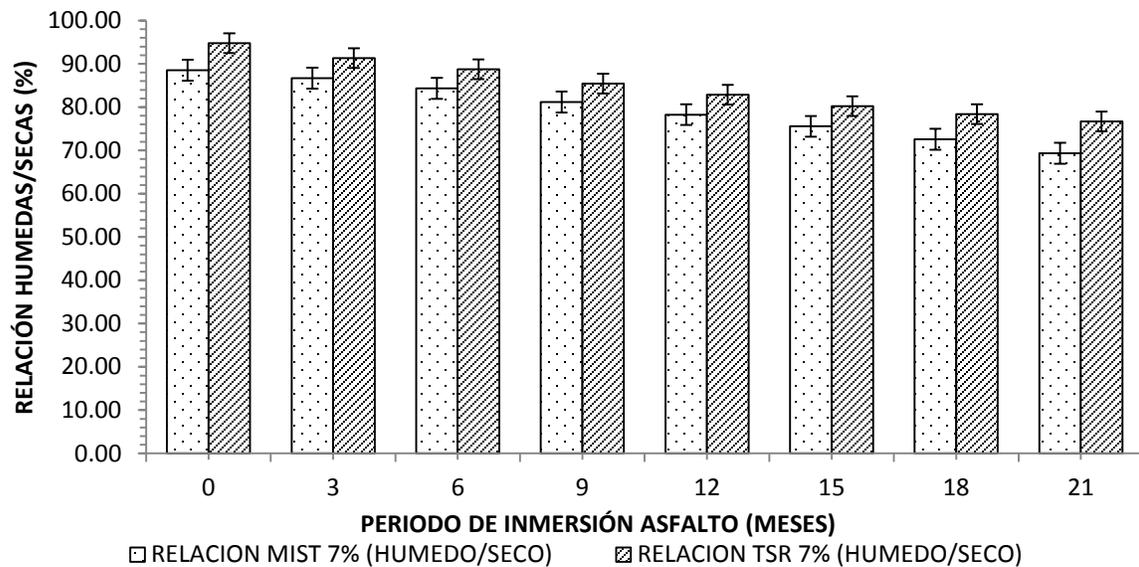


Figura 39. Consolidado relación MIST 7% y TSR 7%

Tabla 19. Relación # contactos/ # agregados MIST Seco
MIST SECO

PERIODO	# CONTACTOS MIST SECO	# AGREGADOS	% CONTACTOS / AGREGADOS
0	601	381	63,39%
3	578	322	55,71%
6	555	357	64,32%
9	505	324	64,16%
12	474	295	62,24%
15	446	283	63,45%
18	416	270	64,90%
21	385	239	62,08%

Tabla 20. Relación # contactos/ # agregados MIST húmedo
MIST HÚMEDO

PERIODO	# CONTACTOS MIST SECO	# AGREGADOS	% CONTACTOS / AGREGADOS
0	532	336	63,16%
3	501	286	57,09%
6	468	319	68,16%
9	410	307	74,88%
12	371	294	79,25%
15	337	280	83,09%
18	302	241	79,80%
21	267	225	84,27%

Tabla 21. Relación # contactos/ # agregados TSR seco
TSR SECO

PERIODO	# CONTACTOS MIST SECO	# AGREGADOS	% CONTACTOS / AGREGADOS
0	822	465	56,57%
3	647	340	52,55%
6	568	307	54,05%
9	521	292	56,05%
12	496	269	54,23%
15	470	307	65,32%
18	458	294	64,19%
21	446	283	63,45%

Tabla 22. Relación # contactos/ # agregados TSR húmedo
TSR HUMEDO

PERIODO	# CONTACTOS MIST SECO	# AGREGADOS	% CONTACTOS / AGREGADOS
0	779	469	60,21%
3	591	320	54,15%
6	504	323	64,09%
9	445	318	71,46%
12	411	309	75,18%
15	377	278	73,74%
18	359	263	73,26%
21	342	246	71,93%

4.7 RELACIÓN ENTRE HUMEDAD Y ENSAYOS MECÁNICOS DE MEZCLA Y FÍSICOS, QUÍMICOS Y REOLÓGICOS DE LIGANTE

Para poder definir una relación entre el desempeño mecánico, los parámetros físicos, químicos y el daño por humedad, presentamos algunas de las gráficas en las cuales involucramos dos variables para determinar alguna dependencia entre ambas así.

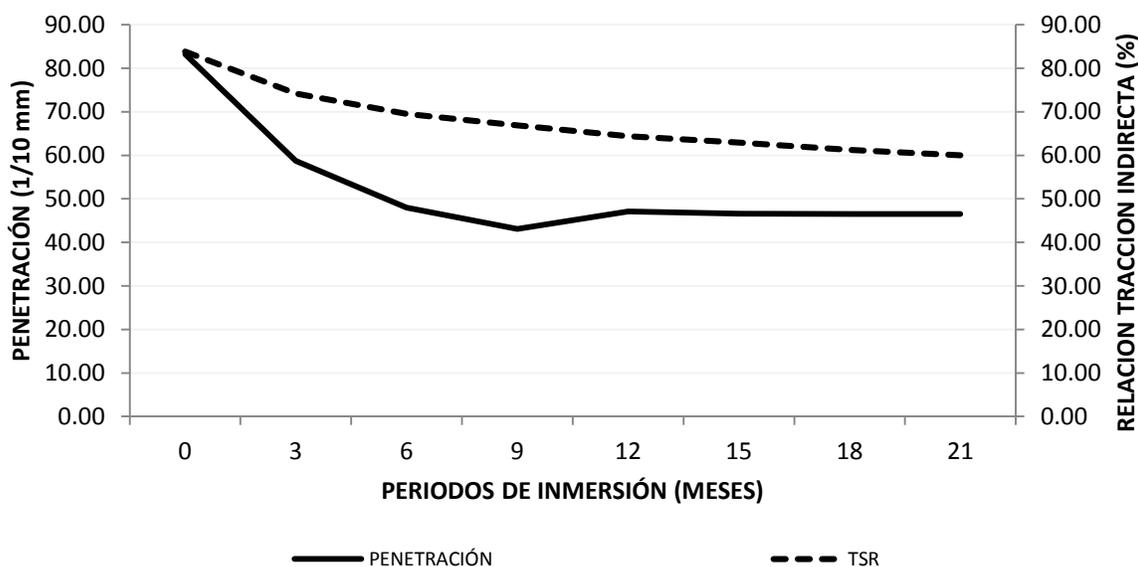


Figura 40. Relación entre Penetración Vs TSR

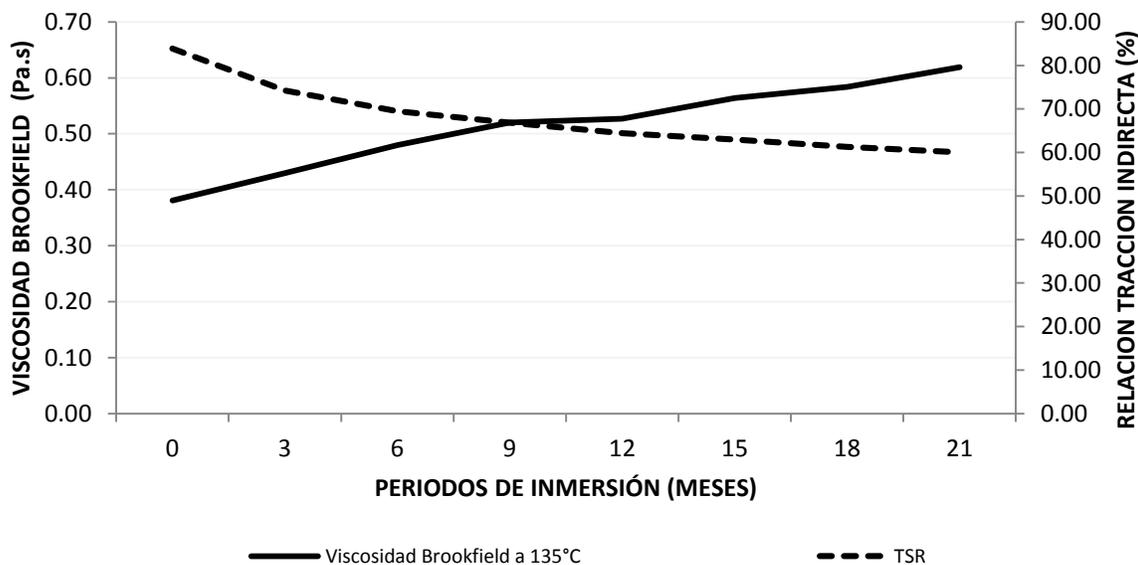


Figura 41. Relación entre Viscosidad Brookfield Vs. TSR

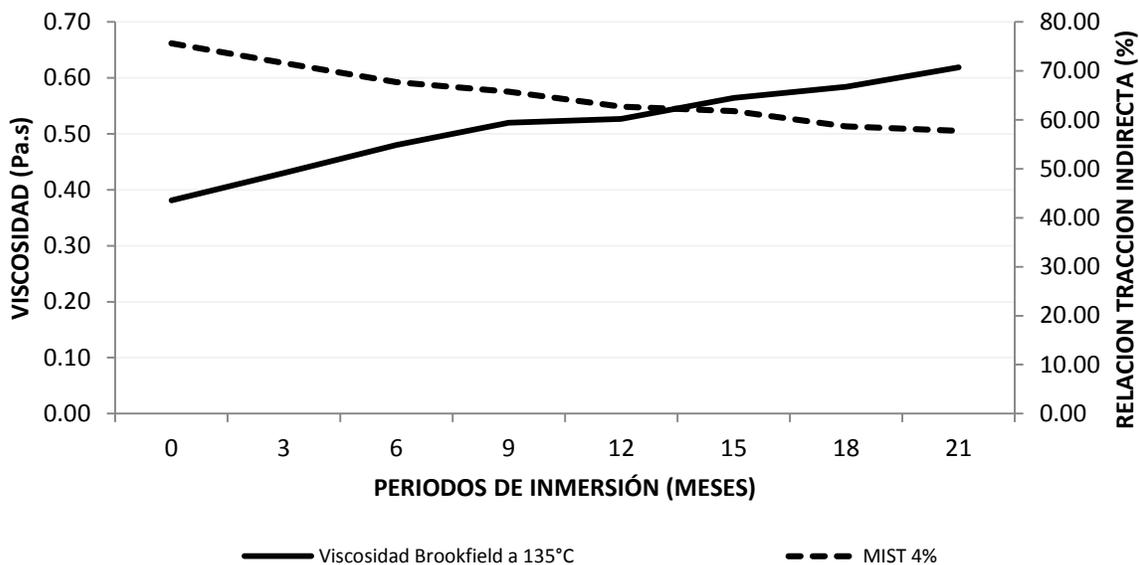


Figura 42. Relación entre viscosidad Brookfield Vs. MIST 4%

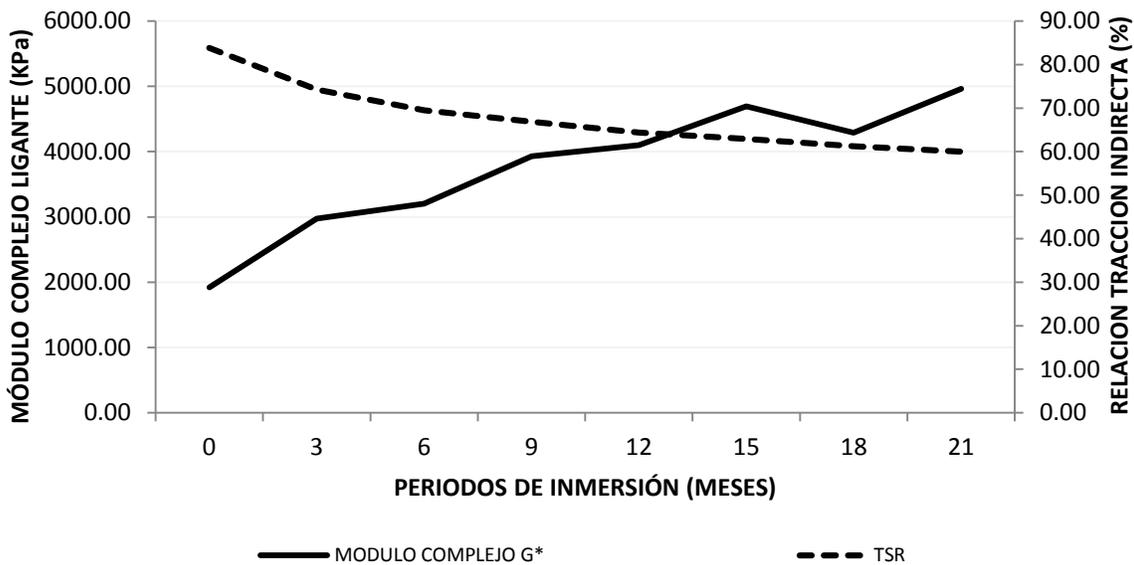


Figura 43. Relación entre módulo complejo ligante Vs. TSR

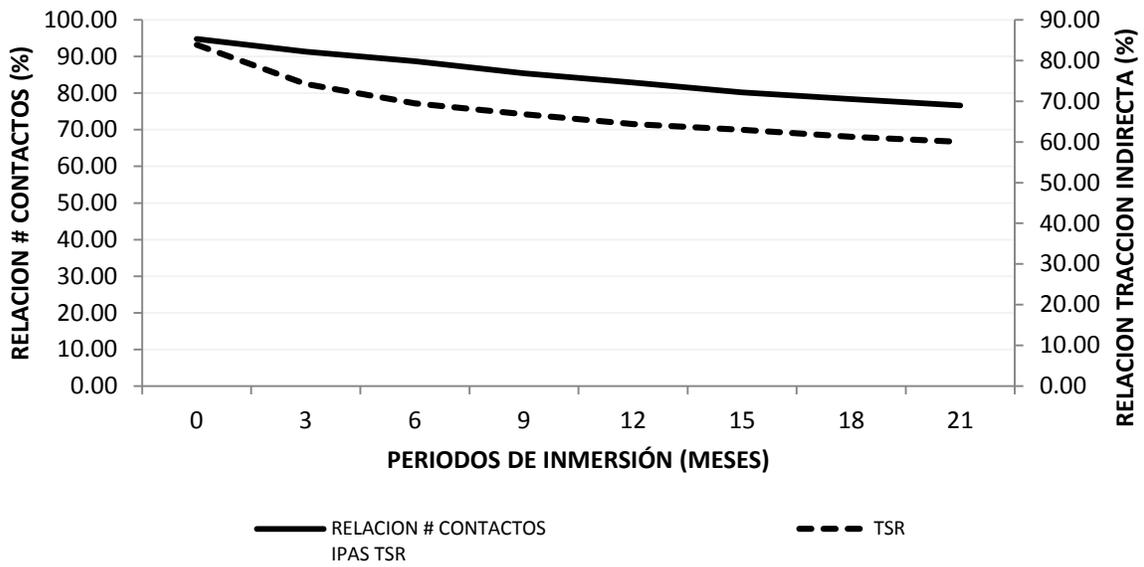


Figura 44. Relación entre # contactos TSR Vs. TSR

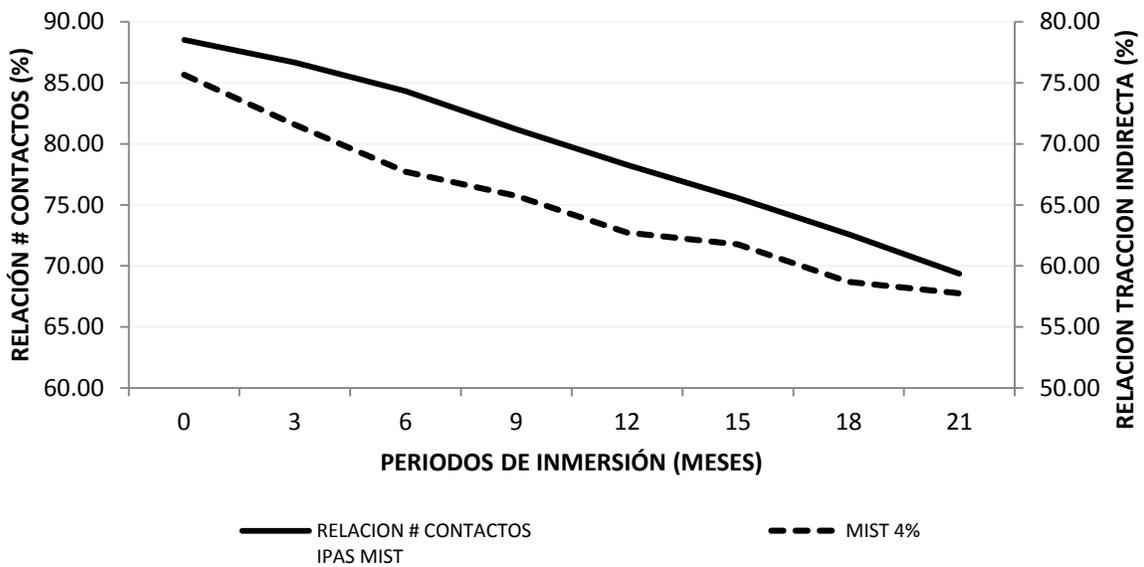


Figura 45. Relación entre # contactos MIST Vs. MIST 4%

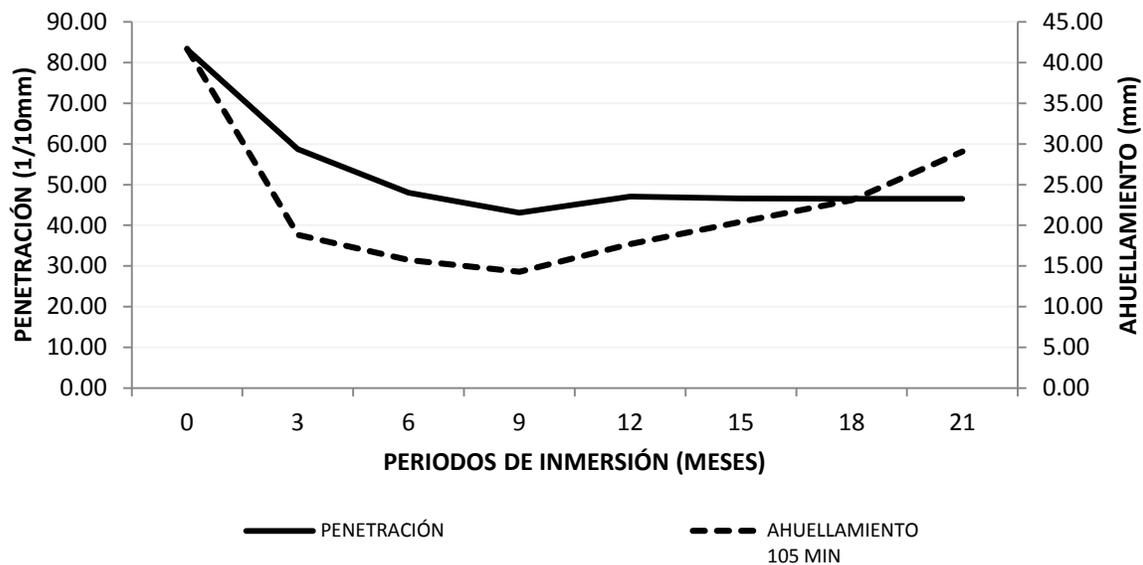


Figura 46. Relación entre Penetración Vs. ahuellamiento a 105 min.

En las figuras anteriores se ilustraron algunas relaciones que se encontraron entre los diferentes ensayos ejecutados en la investigación; algunas relaciones no son representativas o no marcan alguna tendencia y por ende, no se presentaron en esta sección; por ejemplo si se observa la Figura 40, se relaciona cómo varía la penetración vs el resultado de TSR y se puede concluir que a medida que la penetración decrece, es decir el ligante se endurece, la relación de tracción indirecta decrece con el tiempo de inmersión, comportamiento atribuible a que el ligante al ser más duro tiende a comportarse más frágil generando un debilitamiento entre la relación agregado-ligante.

Situación similar ocurre con la Figura 41 y Figura 42 en donde la viscosidad Brookfield a 135°C aumenta con los períodos de inmersión del ligante, mientras el TSR y el MIST 4% decrecen evidenciando rigidización del ligante y la mezcla, reduciendo su relación de tracción indirecta. En la Figura 43 se analiza el comportamiento del módulo complejo del ligante. Nuevamente se evidenció proceso de rigidización en los diferentes periodos de inmersión, este comportamiento junto con el de las dos figuras anteriores tienden a demostrar el proceso que está sufriendo la mezcla asfáltica en los procesos de inmersión, evidenciando su incidencia en las pruebas de desempeño mecánico que se realizaron.

En la Figura 44 y Figura 45 se analiza el comportamiento de la microestructura de las mezclas vs su desempeño en las pruebas de sensibilidad a la humedad TSR y MIST; en estas imágenes se contrasta que a medida que los números de contacto encontrados en las muestras decrece, su relación de tracción indirecta también lo hace en una proporción muy similar, es decir que estas dos variables están directamente relacionadas y tienden a mostrar un comportamiento similar; estas variables como ya se explicó en los análisis anteriores están relacionadas debido al efecto que tiene la humedad en la relación agregado-ligante, ya que el agua tiende a generar diversos efectos en la mezcla, desde emulsificación, aumento en la presión de poros, pérdida de la cohesión y adhesión entre otros, efectos que repercuten directamente en el desempeño mecánico de las mezclas.

En la Figura 46 se analiza la relación que se encontró entre la penetración y el ahuellamiento, claramente se puede observar que mientras la penetración disminuía, es decir, se rigidizaba la mezcla, el efecto de ahuellamiento era menor, este comportamiento fue evidente hasta el 9° y 12° mes de inmersión en donde la penetración se estabilizó pero el ahuellamiento a partir de este mes empezó a aumentar con respecto al mes predecesor. Esta situación llevó a configurar dos grupos de desempeño en el ahuellamiento: primer grupo conformado por 0 meses, 3 meses, 6 meses y 9 meses donde la penetración disminuía, y el segundo grupo conformado por 12 meses, 15 meses, 18 meses y 21 meses donde la penetración fue constante. Claramente se observa la relación entre estos dos ensayos, lo que genera que se validen los resultados encontrados en la presente investigación, ya que los resultados de penetración fueron presentados en las investigaciones de Atencia (2011) y Cortes (2012).

Adicionalmente a los ensayos anteriores se analizó el módulo dinámico de la mezcla comparado con varios parámetros del ligante y la mezcla encontrando las siguientes relaciones.

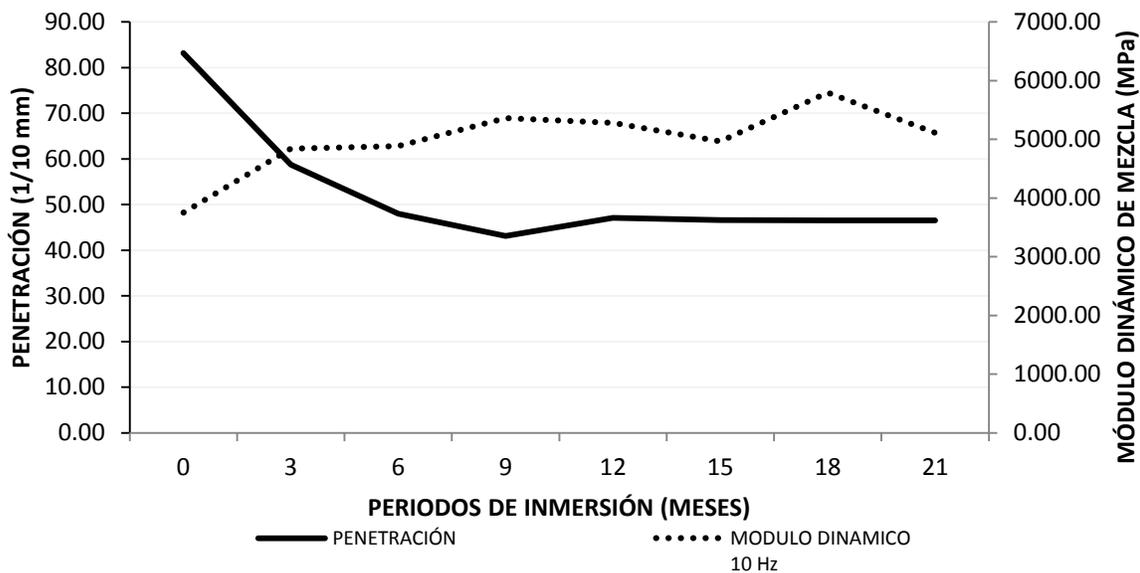


Figura 47. Relación penetración Vs. módulo dinámico de mezcla

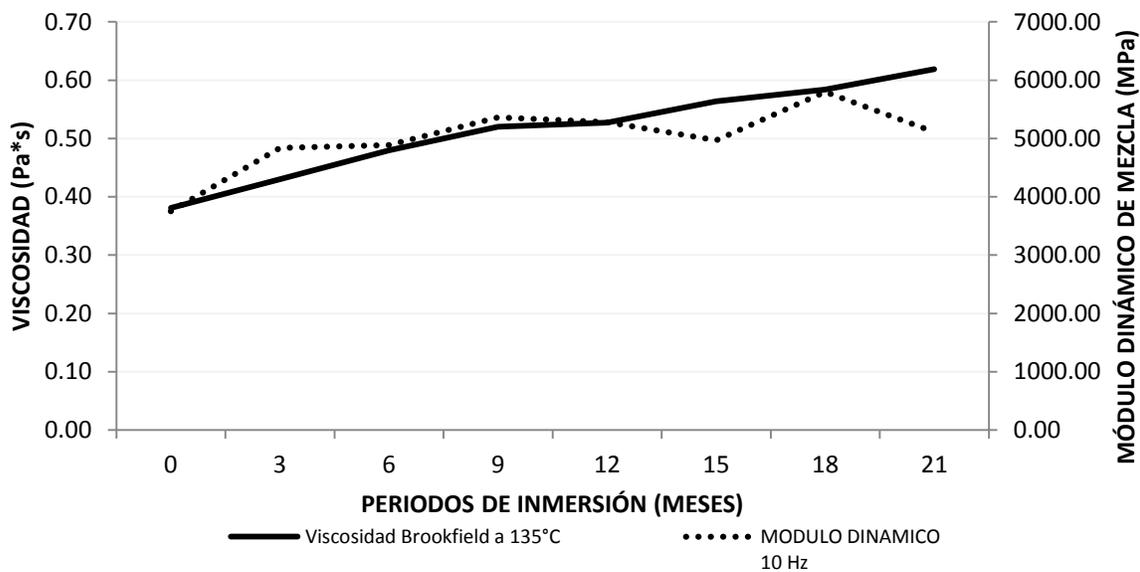


Figura 48. Relación viscosidad Brookfield Vs. módulo dinámico de mezcla

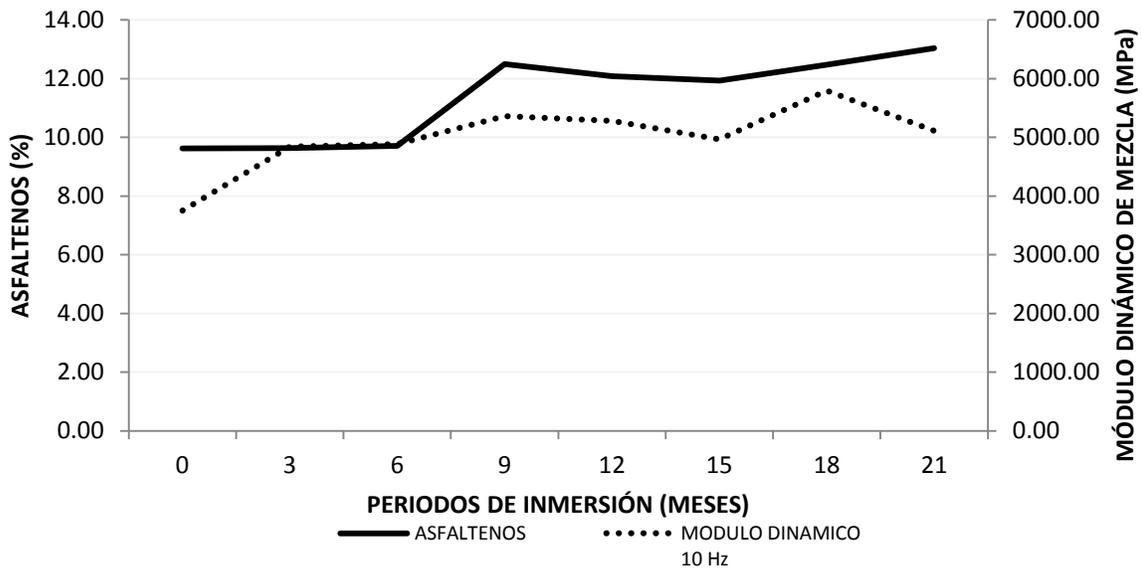


Figura 49. Relación asfaltenos Vs. módulo dinámico de mezcla

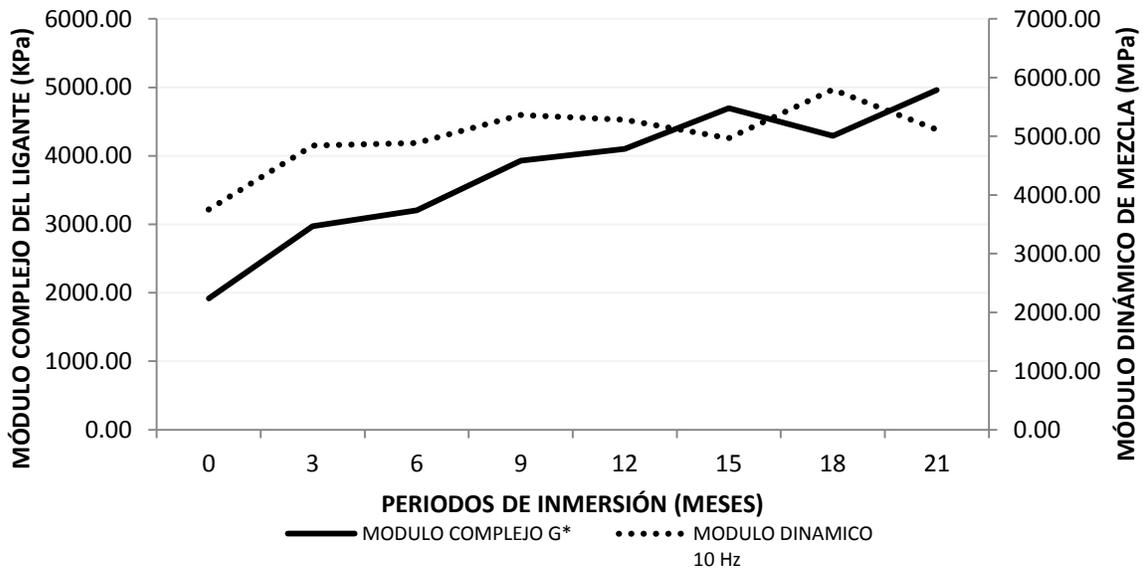


Figura 50. Relación módulo complejo del ligante Vs. módulo dinámico de mezcla

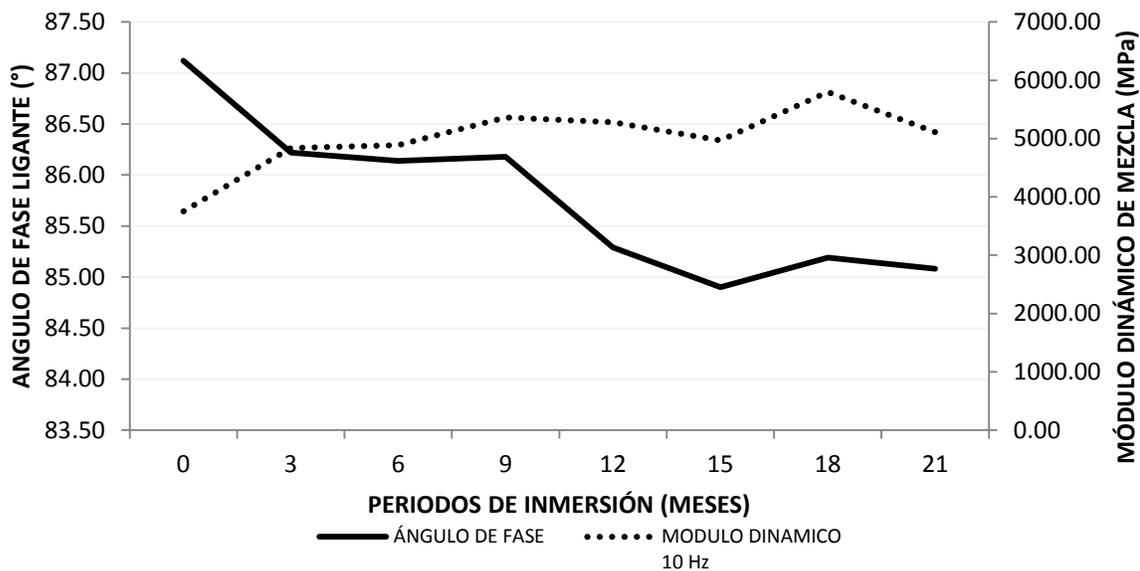


Figura 51. Relación ángulo de fase del ligante Vs. módulo dinámico de mezcla

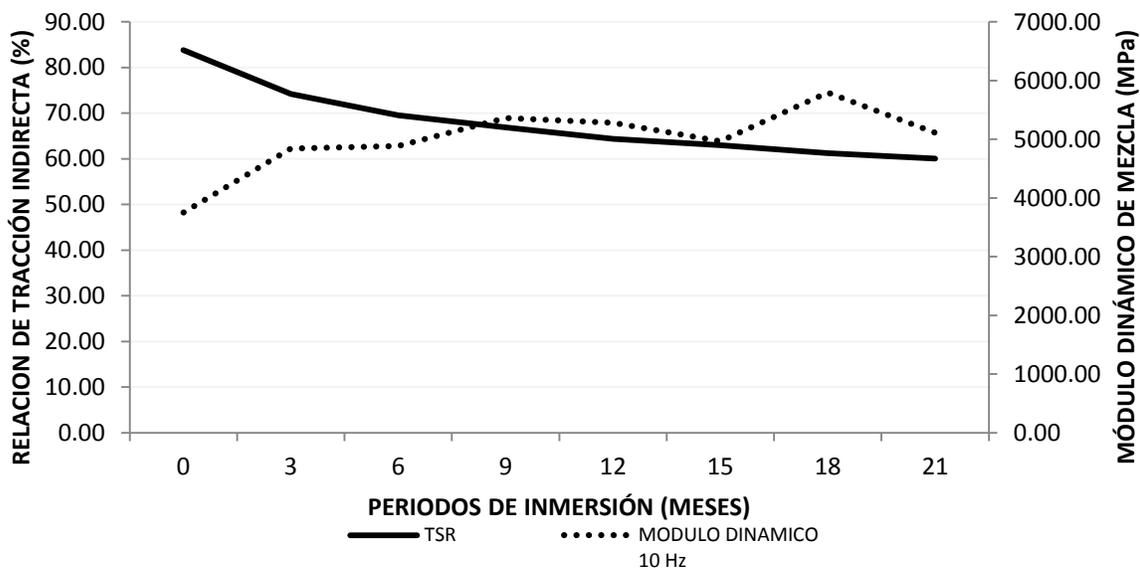


Figura 52. Relación de tracción indirecta TSR Vs. módulo dinámico de mezcla

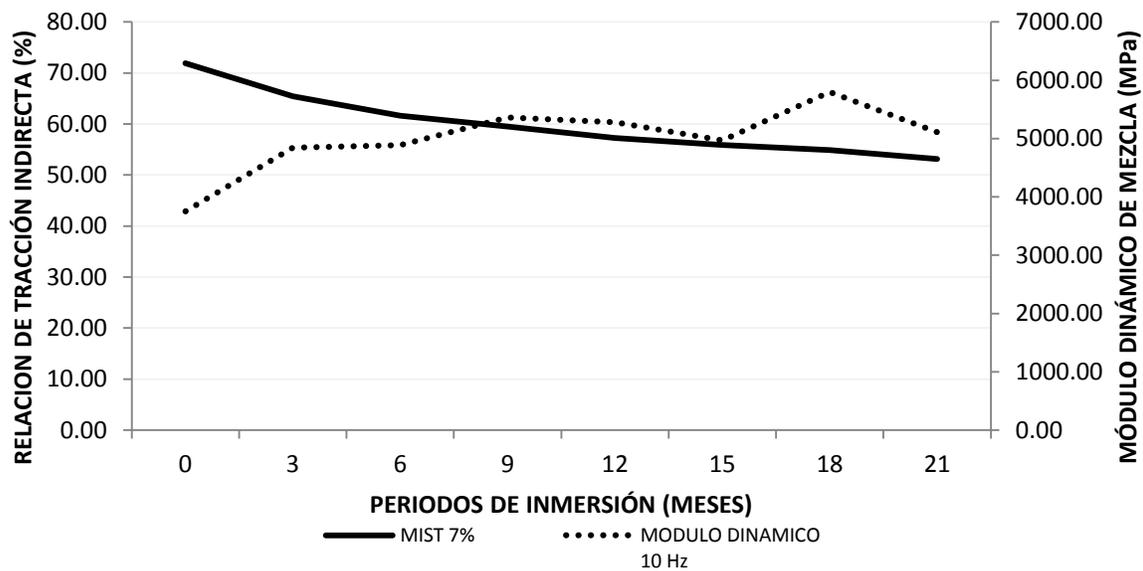


Figura 53. Relación de tracción indirecta MIST 7% vacíos de aire Vs. módulo dinámico de mezcla

Como el módulo dinámico de mezcla se considera un parámetro muy importante en el diseño de pavimentos asfálticos, es por esta razón que se determinó su relación con los demás ensayos, encontrando una relación directa entre cada uno de ellos. Como se ve por ejemplo en la Figura 47, donde se analiza la penetración vs el módulo dinámico, en la Figura 51, donde se analiza el ángulo de fase del ligante vs el módulo dinámico, en la Figura 52, la relación de tracción indirecta TSR vs el módulo dinámico y en la Figura 53 la relación de tracción indirecta MIST 7% vacíos de aire vs el módulo dinámico. En todas estas relaciones, el comportamiento es inversamente proporcional, mientras el módulo con los diferentes períodos de inmersión va aumentando su rigidez, los parámetros analizados van decreciendo evidenciando una pérdida o disminución de su propiedad analizada.

Estas propiedades están directamente relacionadas en el sentido de que la penetración determina el comportamiento de la mezcla, si esta es muy dura el ahuellamiento va a ser menor, pero el desempeño a fatiga va a ser más frágil, si el ángulo de fase del ligante decrece, éste tiende a tener un mejor comportamiento a las deformaciones plásticas, es decir, el ahuellamiento tiende a ser menor con el paso de los períodos de inmersión, situación que se comprobó con el ensayo de ahuellamiento. De igual forma, estos dos parámetros también influyen en el desempeño de la mezcla al daño por

humedad, ya que a medida que el módulo se incrementó, la resistencia a la humedad decreció evidenciando un mayor daño de la mezcla asfáltica, comprobado con los ensayos de TSR y MIST.

Con relación a la Figura 48, se analizó la viscosidad Brookfield a 135°C vs el módulo dinámico de la mezcla, por su parte en la Figura 49, se determinó la relación entre los asfaltenos vs el módulo dinámico de la mezcla y en la Figura 50, se tuvo en cuenta la forma como varía el módulo complejo del ligante vs el módulo dinámico de la mezcla; con estos tres parámetros el comportamiento entre las variables fue directamente proporcional; es decir mientras la viscosidad del ligante aumentó con el incremento de los períodos de inmersión el módulo dinámico también se rigidizó. Teniendo en cuenta, que los asfaltenos son el componente que le dan el sustento o rigidez al ligante por ser la fracción sólida, este parámetro aumentó para todos los períodos de inmersión, aportando mayor rigidez al desempeño mecánico de la mezcla. Lo mismo ocurrió con el módulo complejo, ya que por la presencia de agua en el ligante su composición cambió rigidizando el comportamiento del ligante y por ende de la mezcla asfáltica.

Los anteriores parámetros están intrínsecamente relacionados, aportando todos indicios de rigidización causada por el envejecimiento del ligante, y siendo directamente responsables del desempeño de la mezcla asfáltica y al ser determinantes en el efecto de la humedad en la mezcla asfáltica, alterando de cierto modo la relación agregado-ligante. Sin embargo, esta relación se puede medir realizando ensayos de cohesión y adhesión los cuales no fueron objeto de estudio del presente trabajo, razón por la cual no se puede determinar un parámetro exacto de este comportamiento.

En conclusión, con todos los ensayos realizados se pudo determinar, cuánto la mezcla asfáltica por el efecto de la humedad se degrada reduciendo la vida útil y evidenciando problemas causados por el envejecimiento prematuro de la mezcla (Ver Tabla 23 y Tabla 24).

Tabla 23. Variación de los ensayos desempeño de la mezcla, realizados en los diferentes periodos de inmersión

PERIODO DE INMERSION (MESES)	TSR (%)	MIST 4% (%)	MIST 7% (%)	MÓDULO DINAMICO 10 HZ (Mpa)	AHUELLAMIENTO 105 MIN (mm)	FATIGA DEFORMACIÓN 1^6 CICLOS	RELACIÓN # CONTACTOS IPAS MIST (%)	RELACIÓN # CONTACTOS IPAS TSR (%)
0	83.85	75.66	71.92	3753.00	41.70	151.80	88.52	94.77
3	74.23	71.57	65.42	4841.00	18.82	-	86.68	91.34
6	69.51	67.70	61.62	4885.00	15.73	-	84.32	88.73
9	66.86	65.74	59.49	5362.00	14.28	-	81.19	85.41
12	64.40	62.73	57.25	5278.00	17.70	119.20	78.27	82.86
15	62.96	61.76	55.89	4967.00	20.42	-	75.56	80.21
18	61.26	58.70	54.87	5797.00	23.08	-	72.60	78.38
21	60.03	57.75	53.13	5110.00	29.08	124.50	69.35	76.68
VARIACIÓN 0 - 21 MESES	28.41%	23.67%	26.13%	-36.16%	30.28%	17.98%	21.65%	19.09%

Tabla 24. Variación de los ensayos del ligante asfáltico, realizados en los diferentes periodos de inmersión

PERIODO DE INMERSION (MESES)	PENETRACIÓN (1/10mm)	PTO. ABLANDAMIENTO (°C)	VISCOSIDAD BROOKFIELD A 135°C (Pa.s)	MALTENOS (%)	ASFALTENOS (%)	IC	MÓDULO COMPLEJO G* (KPa)	ÁNGULO DE FASE (°)
0	83.20	50.60	0.38	89.20	9.62	0.39	1919.00	87.12
3	58.70	52.00	0.43	86.93	9.63	0.43	2972.00	86.22
6	48.00	53.00	0.48	81.90	9.71	0.47	3204.00	86.14
9	43.10	54.20	0.52	81.70	12.50	0.47	3928.00	86.18
12	47.10	52.20	0.53	87.77	12.08	0.42	4101.00	85.29
15	46.60	52.70	0.56	87.71	11.93	0.43	4694.00	84.90
18	46.50	53.00	0.58	87.08	12.47	0.41	4292.00	85.19
21	46.50	53.30	0.62	86.84	13.04	0.44	4961.00	85.08
VARIACIÓN 0 - 21 MESES	44.11%	-5.34%	-62.47%	2.65%	-35.55%	-11.47%	-158.52%	2.34%

5 CONCLUSIONES

En un primer momento, se pudo establecer que la mejor prueba para determinar el daño por humedad causado a las mezclas compactas es la prueba del MIST® de 7% de vacíos de aire, debido a que fue la que obtuvo la menor relación a tracción indirecta; obteniendo valor de 71.92% en muestra 0 meses y de 53.13% en la muestra de 21 meses

De igual forma, se observó que con los diferentes períodos de inmersión del ligante asfáltico, la mezcla tiende a endurecerse o rigidizarse generando procesos de pérdida de propiedades en la mezcla; como ocurrió por ejemplo en el TSR donde la mezcla al final se degradó en un 28.41%, frente a la mezcla asfáltica con 0 meses de inmersión. Este resultado indica una pérdida en la relación agregado-ligante, y un aumento en la resistencia a la tensión indirecta, es decir que a medida que el ligante se envejece, debido a la inmersión en agua, la mezcla tiende a resistir más carga en la muestra seca, sin embargo en la muestra húmeda no ocurre este cambio lo que genera que el decrecimiento de la relación a la tensión indirecta sea más notoria en los últimos meses de inmersión. Algo similar ocurre con las muestras de MIST de 4% y 7% de vacíos de aire, donde se evidenció un envejecimiento del 23.67% y 26.13% respectivamente con respecto a la muestra patrón de 0 meses. Con estos valores podemos determinar que la mezcla sufrió un grave daño debido a la humedad, evidenciando una reducción de más o menos el 26% en la vida útil de la mezcla asfáltica.

Por su parte, la variación que se presentó en el ensayo de módulo dinámico fue del 36.16%, evidenciando un proceso de rigidización, por consecuencia del módulo varió de 3753 Mpa a 5110 Mpa, para una frecuencia de 10Hz y una temperatura de 25°C, esta variación se ve reflejada en el desempeño de la mezcla asfáltica a pruebas mecánicas, como ahuellamiento, fatiga, TSR y MIST, en todos los ensayos se evidenció el cambio que presentó la mezcla. En lo que tiene que ver con el ahuellamiento la variación fue del 30.28%, lo cual fue analizado entre la muestra 0 meses y 21 meses, pero sí se determina la variación con el menor ahuellamiento que se presentó en la muestra 9 meses, la que corresponde a una variación del 65.75% con respecto a la muestra 0 meses, indicando que la

mezcla entre 0 y 9 meses se rigidizó en esta proporción, generando resistencia a la deformación permanente.

Se puede decir que la anterior recuperación a la deformación permanente es positiva, lo cual significa que la mezcla no se va a deformar bajo las mismas condiciones de carga y tiempo, pero esta ganancia se contrarresta con la fragilidad que experimenta la mezcla en el ensayo de fatiga, en esta prueba la mezcla tuvo una variación de 17.98% entre la muestra 0 y 21 meses, convirtiendo la mezcla en un estado de fragilidad que significa que bajo una deformación fija, la mezcla reduce su vida útil en este mismo porcentaje.

En los ensayos relacionados con el análisis de la microestructura de la mezcla asfáltica para las pruebas de MIST y TSR, el número de contactos se reduce en un 21.65% y 19.09% respectivamente. Con este análisis del comportamiento de la estructura, se evidenció el deterioro de la relación agregado-ligante, generando pérdida en sus propiedades de vida útil. De lo anterior, se puede inferir que todo el deterioro generado en cada uno de los procesos, es atribuible al envejecimiento y deterioro que sufrió el ligante asfáltico durante los períodos de inmersión, ya que el resto de variables se controlaron para que fueran similares en todas las pruebas; estas condiciones tienen que ver con la calidad de los agregados, los tiempos y temperaturas de preparación de especímenes, así como condiciones del laboratorio, entre otras.

Analizando los resultados reportados por Atencia (2011) y Cortes (2012) se encontró que la penetración tuvo una variación del 44.11%, evidenciando proceso de rigidización del ligante, el punto de ablandamiento varió en un rango de 5.34% hacia arriba, es decir que el ligante tiende a ser más rígido en los últimos periodos de inmersión. En el análisis químico la variación de la fracción de asfaltenos cambió en un 35.55% ya que la fracción cambió de 9,62% a 13.04% en los períodos de 0 y 21 meses respectivamente.

Por último, es importante mencionar que con el análisis realizado a las pruebas físicas, químicas y reológicas del ligante, se observó un proceso de endurecimiento del ligante, generando procesos de

envejecimiento y variación en sus propiedades, que se evidenciaron en las pruebas de desempeño de la mezcla, las cuales se vieron afectadas por la humedad, presente en el ligante asfáltico.

6 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar la prueba de MIST® de 4% de vacíos de aire, ya que la mezcla está diseñada por metodología SUPERPAVE® y es este % de vacíos de mezcla que se va a presentar en la vida en servicio, la norma establece que se debe trabajar con un 7% +/-1% de vacíos de mezcla pero es para garantizar la saturación de la misma. Pero no va a reflejar las condiciones en servicio.

Se recomienda realizar pruebas de cohesión y adhesión en los diferentes periodos de inmersión para determinar a ciencia cierta la relación agregado-ligante, ya que en la presente investigación se observaron procesos que sugieren pensar que la adhesión y la cohesión variaron gracias a efecto del agua en el ligante.

Se recomienda validar los parámetros propuestos en la nueva norma ASTM D7870-13, donde se reglamenta el ensayo de acondicionamiento de mezclas en la cámara MIST, estos parámetros difieren de los planteados en la presente investigación en el número de ciclos y en la presión de cámara. Para el ensayo de MIST la norma propone realizar el ensayo con un porcentaje de vacíos de aire del 7% +/-1%, se sugiere realizar el ensayo con 4% +/-1% de vacíos de aire, ya que es la condición en la cual la mezcla asfáltica diseñada por metodología SUPERPAVE® funcionara en la vida en servicio.

De igual forma, sería importante realizar el proceso de afectación de la humedad, en la mezcla en un proceso inverso al planteado en la presente investigación, ya que en el presente trabajo el ligante fue el que estuvo sumergido durante 21 meses, se recomienda realizar todas las probetas desde el inicio de la investigación y sumergirlas ya mezcladas y compactadas en agua durante los mismos periodos de inmersión y validar los resultados alcanzados en este trabajo.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Airey, G. D. (2003). State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(3), 165–176.
- Álvarez, A. E., Caballero, M. M., & Mora, J. C. (2012). AVANCES EN LA CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DRENANTES. Presented at the 8 Jornada Internacional del asfalto, Bogotá D.C, Colombia.
- Angelo, J., & Anderson, M. (2003). Material Production, Mix Design, and Pavement Design Effects on Moisture Damage. Presented at the Moisture sensitivity of asphalt pavements a national seminar, San Diego, California.
- Archilla, A. R. (2006). Use of superpave gyratory compaction data of rutting prediction. *Journal of Transportation engineering*, 132 (9), 734–741.
- Ardila M., A. A., & Granados V., S. P. (2012). *Envejecimiento de Mezclas Asfálticas 60-70 y 80-100 a largo plazo*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, Bogotá.
- Aschenbrener, T. (2002). *Survey on Moisture Damage of Hot Mix Asphalt Pavements* (Colorado Department of Transportation.). Denver, Colorado.
- Atencia H., O. L. (2011). *Análisis de los Procesos de Oxidación de Asfaltos Colombianos en Inmersión Bajo Agua*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, Bogotá.
- Bahia, H., & Ahmad, S. (1999). *Evaluation and correlation of lab and field tensile strength ratio (TSR) procedures and values in assessing the stripping potential of asphalt mixes*.
- Bahia, Hussain, Sefidmazgi, N. R., & Kutay, E. (2012). *Tutorial software Ipas 2* (Guía de Usuario) (p. 21). Madison: University of Wisconsin-Madison y Michigan State University.

- Bell, A. (1989). *Summary report on the aging of asphalt-aggregate systems* (Transportation Research board). Transportation Research board.
- Bianchetto, H. (2006). Envejecimiento de Mezclas Asfálticas: Estudio, evaluación y métodos de prevención. Presented at the Presented at the Jornadas Técnicas de actualización y capacitación en el área de pavimentos flexibles, La Plata.
- Brown, S., & Selig, E. (1991). *The Design of Pavement and Rail Track Foundations*.
- Buchanan, M. S., & Moore, V. M. (2005). *Laboratory Accelerated Stripping Simulator for Hot Mix Asphalt*.
- Cárdenas, J., & Fonseca, E. (2009). MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE ASFALTO CONVENCIONAL Y MODIFICADO CON POLÍMERO RECICLADO, ESTUDIADA DESDE LA RELACIÓN VISCOSIDAD-TEMPERATURA. *EIA*, 12(2), 125–137.
- Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., & Little, D. N. (2008). Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering*, 9(2), 81–98.
- Caro, Silvia, & Alvarez, A. E. (2011). Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 58, 95–104.
- Caro, Silvia, Coral, L., & Caicedo, B. (2003). Modelación del ahuellamiento en mezclas asfálticas de pavimentos. *Revista de Ingeniería - Universidad de los Andes*, 18, 41–47.
- Chen, D., & Hugo, F. (1998). Full scale accelerated pavement testing of texas mobile load simulator. *Journal of materials in civil engineering*, 124 (5), 479–490.
- Chen, X., & Huang, B. (2008). Evaluation of moisture damage in hot mix asphalt using simple performance and superpave indirect tensile tests. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1950–1962.

- Chen, X., & Zu, Z. (2009). Effects of load and temperature on permanent deformation properties of HMA. *Geohunan International conference, ASCE, Geotechnical Special Publication, 191*, 49–55.
- Choubane, B., Page, G. C., & Musselman, J. A. (2000). Effects of Different Water Saturation Levels on the Resistance of Compacted HMA Samples to Moisture Induced Damage. Presented at the 80th Annual Transportation Research Board Meeting, Washington D.C.,.
- Collop, A. C., & Hardy, M. S. A. (1995). viscoelastic approach to rutting in flexible pavements. *Journal of Transportation engineering, ASCE 121 (1)*, 82–93.
- Cortes, C., Perez, A., Feroso, J., Costa, A., Guisado, F., Esquena, J., & Potti, J. (2010). Envejecimiento Foto-Oxidativo De Betunes Asfálticos (p. 12). Presented at the ASEFMA.
- Cortes V., A. (2012). *ANÁLISIS DEL PROCESO DE OXIDACIÓN DEL ASFALTO COLOMBIANO 80/100 EN INMERSIÓN BAJO AGUA: PERIODO 12-21 MESES*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, Bogotá.
- Cuellar, A. (2003). *Estudio comparativo de las leyes de fatiga de una mezcla cerrada 0/10 con y sin adiciones de icopor*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, Bogotá.
- Di Benedetto, H., De la Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., & Lundstrom, R. (2004). Fatigue of bituminous mixtures. *Material and structures, 37 (4)*, 202–216.
- Epps, J. A. (2000). *Compatibility of a test for moisture-induced damage with superpave volumetric mix design*. Transportation Research Board.
- Epps, J., & Monismith, C. L. (1972). Fatigue of asphalt concrete mixtures - summary of existing information. Fatigue of compacted bituminous aggregate mixtures (pp. 19 –45). Presented at the American society for testing and materials.
- Fernández, W., Rondón, H., & Reyes, F. (2011). Envejecimiento de Asfaltos y Mezclas Asfálticas: Estado del conocimiento.

- Fromm, H. J. (1974). The Mechanisms of Asphalt Stripping from Aggregate Surfaces. *Association of Asphalt Paving Technologists*, 43, 191–223.
- Hardin, J. C. (1995). *Physical properties of asphalt cement binders* (Vol. 1241). Astm International.
- Harvey, T. J., Deacon, J. A., Tsai, B., & Monismith, C. L. (1995). *Fatigue performance of asphalt concrete mixes and its relationships to asphalt concrete pavement performance in California* (No. RTA-65W 485-2). Berkeley: Institute of Transportation studies, University of California.
- Hsu, T., & Tseng, K. (1996). Effect of rest periods on fatigue response of asphalt concrete mixtures. *Journal of Transportation engineering*, 122 (4), 316–322.
- Hua, J., & White, T. (2002). A study of nonlinear tire contact pressure effects on HMA rutting. *International Journal of Geomechanics*, 2 (3), 353–376.
- Huang, S.-C., & Zeng, M. (2007). Characterization of aging effect on rheological properties of asphalt-filler systems (Vol. 8 (13),213). Presented at the International Journal of Pavement Engineering.
- Infante, A. S., Reyes, F., Velasquez, R., & Bahia, H. (2012). El efecto de la exposición extendida al agua en las propiedades del asfalto. Presented at the 8 jornada internacional del asfalto, Bogota D.C, Colombia.
- INVÍAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS 2007. , Pub. L. No. resolución número 3288 (2007).
- INVÍAS. NORMAS DE ENSAYO PARA CARRETERAS 2007. , Pub. L. No. resolución número 3290 (2007).
- Kanitpong, K., & Bahia, H. U. (2008). Evaluation of HMA moisture damage in Wisconsin as it relates to pavement performance. *International Journal of Pavement Engineering*, 9(1), 9–17.
- Karlson, T. k. (2005). *evaluation of cyclic pore pressure induced moisture damage in asphalt pavement*. University of Florida, Florida.

- Kiggundu, B. M., & Roberts, F. L. (1988). *Stripping in HMA Mixtures: State-of-the-Art and Critical Review of Test Methods* (No. Report No. NCAT 88-02) (pp. 4–38). Auburn, Alabama: Ed. National Center for Asphalt Technology (NCAT).
- Kim, Y.-R., Ban, H., & Pinto, I. (2009). *Moisture Sensitivity of Hot-mix Asphalt (HMA) Mixtures in Nebraska: Phase II*. Nebraska Department of Roads. Retrieved from http://ntl.bts.gov/lib/46000/46900/46959/Moisture_Sensitivity_of_Hot_Mix_Asphalt_Mistures_in_Nebraska_Phase_II.pdf
- Kringos, N., & Scarpas, A. (2008). Physical and Mechanical Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures (Vol. 45, pp. 2671–2685). Presented at the International Journal of Solids and Structures.
- Li, X., Gibson, N., & Azari, H. (2010). EVALUATION OF INSTROTEK MOISTURE INDUCED SENSITIVITY TEST (M 1ST) DEVICE: COMPARISON AND CONTRAST WITH AASHTO T 283.
- Limón, P., López, O., Sandoval, I., Centeno, M., Cremades, I., & Navarro, J. O. (2009). Análisis y comparación de los diferentes métodos de sensibilidad al agua de las mezclas asfálticas basado en el protocolo AMAAC. Presented at the XV CILA - Congreso Ibero-Latino Americano del Asfalto, Lisboa - Portugal.
- Little, D. N., & Jones, D. (2003). Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements. Presented at the Moisture sensitivity of asphalt pavements (A National seminar), San Diego, California.
- Majildzadeh, K., & Brovold, F. N. (1968). *State of the art: Effect of water on bitumen-aggregate mixtures*. (Highway Res. Board Special Report 98 No. 1546).

- Mallick, R. B., Pelland, R., & Hugo, F. (2005). Use of accelerated loading equipment for determination of long term moisture susceptibility of hot mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 6(2), 125–136.
- Mantilla, L. (2003). *Caracterización dinámica de una mezcla asfáltica drenante con adición de desechos plásticos mediante técnicas de banco de fatiga*. Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Javeriana., Bogotá.
- Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N., & Harman, T. (1998). Aggregate Orientation and Segregation in Asphalt Concrete. *ASCE Geotechnical Special Publication*, 85, 69–80.
- Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements. (2003). In *International Journal of Pavement Engineering*. San Diego, California.
- Moreno, M. (2011). *efecto de la presencia de humedad en el comportamiento de mezclas asfálticas sometidas a ensayo de rueda de carga (norma NLT-173/84)*. Universidad de Chile, Chile.
- Parra, A. O., & Cepeda, S. M. (2012). *Variación de las propiedades dinámicas de las mezclas elaboradas con asfalto colombiano 60-70 y 80-100, después de ser sometidas a procesos de envejecimiento de corto plazo*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, Bogotá.
- Petersen, J. C., Robertson, R. E., Branthaver, J. F., Harnsberger, P. M., Duvall, J. J., Kim, S. S., ... Bahia, H. U. (1994). *BINDER CHARACTERIZATION AND EVALUATION. VOLUME 1* (Vol. 1).
- Rao Tangella, R., Craus, J., Deacon, J. A., & Monismith, C. L. (1990). *Summary report on fatigue response of asphalt mixtures*. (Rep. to strategic Highway Research Program). Washington D. C.
- Reyes, F. (2003). *Diseño Racional de Pavimentos*. Escuela Col. de Ingeniería.
- Reyes O., O. J., & Millán M, S. (2009). Influencia de la temperatura, la granulometría y el agua en la cohesión de mezclas asfálticas. *Ing. Univ*, 309–324.

- Rondón, H. A., & Moreno, L. Á. (2010). Influencia del agua en el fenómeno de stripping en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante. *Ing. Univ*, 297–312.
- Rondón, H., Reyes, F., González, L., & Vásquez, S. (2012). *Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas* (Colección tierra y vida.). Bogota D.C, Colombia: Ecoe ediciones Ltda.
- Rondón Quintana, H. A., Pinzon Hernández, M. H., Reyes Lizcano, F. A., Vacca Gámez, H. A., Moreno Anselmi, L. A., & Vargas Arenas, X. A. (2008). Influencia de las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá sobre la estabilidad y el flujo Marshall de una mezcla densa en caliente. *Studiositas*, 3(2), 60–66.
- Salgado, B., Momm, L., & Bariani, L. L. (2006). Evaluación del efecto de la acción del agua en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas de la región amazónica sobre las condiciones de humedad inducida. *Infraestructura Vial*, IX(16), 16 – 23.
- Sefidmazgi, N. R. (2011). *defining effective aggregate skeleton in asphalt mixture using digital imaging*. University of Wisconsin, Madison.
- Sepehr, K., Svec, O., Yue, Z., & Hussein, H. (1994). Finite element modelling of asphalt concrete microstructure. Presented at the Proc., 3rd Int. Conf. on Comp.-Aided Assessment and Control Localized Damage.
- Shiwakoti, H. (2008). *Development of a rapid test to determine moisture sensitivity of HMA (SUPERPAVE) mixtures*. University of Kansas, Kansas.
- Solaimanian, M., Bonaquist, R. F., & Tandon, V. (2007). *Improved Conditioning and Testing Procedures for Hot-mix Asphalt Moisture Susceptibility* (Vol. 589). Transportation Research Board National Research.

- Solaimanian, Mansour, Harvey, J., Maghsoud, T., & Vivek, T. (2003). Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements. Presented at the Moisture sensitivity of asphalt pavements, San Diego, California.
- Sousa, J. B., Deacon, J. A., Weissman, S., Harvey, J. T., & Monismith, C. L. (1994). *Permanent deformation response of asphalt aggregate mixes* (SHRP-A-415) (p. p 437). Council, Washington: Strategic highway research progra.
- Szydlo, A., & Mackiewicz, P. (2005). Asphalt mixes deformation sensitivity to change in rheological parameters. *Journal of materials in civil engineering*, 17 (1), 1–9.
- Tarefder, R. A., Zaman, M., & Hobson, K. (2003). A laboratory and statistical evaluation of factors affecting rutting. *International Journal of Pavement Engineering*, 4 (1), 59–68.
- Tashman, L., Masad, E., Little, D. N., & Zabib, H. (2001). Internal structure analysis of asphalt mixes to improve the simulation of Superpave gyratory compaction to field conditions. *Association of Asphalt Paving Technologists*, 70, 605–645.
- Taylor, M. A., & Khosla, N. P. (1983). Stripping of Asphalt Pavements: State-of-the-Art (Vol. 911). Presented at the Transportation Research Record.
- Vacca, H. A., León, M. P., & Ruiz, D. M. (2012). Evaluation of the Rolling Thin Film Oven Aging of the 80-100 Asphalt Cement in the Static and Dynamic Behavior of Asphalt Mixtures. *Ingeniería y Universidad*, 16(2), 379–396.
- Vera S, J. (2012). *Caracterización de mezclas asfálticas por su resistencia a fatiga por reflexión*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, Bogotá.
- Wöhler, A. (1871). Test to determine the forces acting on railway carriage axles and capacity of resistance of the axle. *Engineering*, 11, 199.

Zeng, M., Bahia, H. U., Zhai, H., Anderson, M. R., & Turner, P. (2001). RHEOLOGICAL MODELING OF MODIFIED ASPHALT BINDERS AND MIXTURES (WITH DISCUSSION). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 70.

Zhu, H., & Nodes, J. (2000). Contact based analysis of asphalt pavement with the effect of aggregate angularity. *Mechanics of Materials*, 32.

ANEXOS

ANEXO A
FORMATOS DE ENSAYOS REALIZADOS

ANEXO B
CERTIFICADOS DE CALIBRACION DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO DE LA
PONTIFICA UNIVERSIDAD JAVERIANA