



FACULTAD DE INGENIERÍA

Maestría en Ingeniería Civil

Trabajo de Grado

**ESTUDIO DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL DAÑO POR HUMEDAD DE UNA
MEZCLA ASFÁLTICA PARA RODADURA UTILIZANDO ASFALTO 80-100 Y SU
RELACIÓN CON EL DESEMPEÑO DE CAMPO**

Presentado Por:

SARA CATHERINE PLAZA TORRALVO

GINNA TATIANA RINCÓN CAICEDO

Director

Ing. M.Sc. Ph.D. FREDY REYES LIZCANO

Asesora

Ing. M.Sc Ana Sofía Figueroa Infante

Bogotá D.C, Enero 2014.

APROBACIÓN

El Trabajo de grado con título “Estudio de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura utilizando asfalto 80-100 y su relación con el desempeño de campo”, desarrollado por las estudiantes Sara Catherine Plaza Torralvo y Tatiana Rincón Caicedo, en cumplimiento de 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

Fredy Alberto Reyes Lizcano

Asesora

Ana Sofía Figueroa Infante

Jurado 1

Hugo Alexander Rondón Quintana

Jurado 2

Oscar Javier Reyes Ortiz

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios quien nos permitió vivir y culminar esta etapa de nuestras vidas.

A nuestras familias quienes nos dieron su apoyo incondicional, su amor para salir adelante con este proyecto.

Agradecemos al Ingeniero Fredy Reyes Lizcano, a la Ingeniera Ana Sofía Figueroa, al Ingeniero Carlos Rodríguez y al Ingeniero Wilmar Fernández, quienes nos brindaron su apoyo, sus conocimientos y su experiencia.

A la firma Mario Huertas Cotes MHC, quien nos proporcionó los insumos necesarios para el desarrollo de este proyecto y al grupo de trabajo del Laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana.

**ESTUDIO DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL DAÑO POR HUMEDAD DE UNA
MEZCLA ASFÁLTICA PARA RODADURA UTILIZANDO ASFALTO 80-100 Y SU
RELACIÓN CON EL DESEMPEÑO DE CAMPO**

Sara Catherine Plaza Torralvo
Ginna Tatiana Rincón Caicedo

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.

DEDICATORIA

A Dios, mi Padre, mi Madre, mis Hermanos y mi Novio, quienes son mi motivación y mi apoyo incondicional.

SARA CATHERINE PLAZA TORRALVO

A mis padres quienes por ellos soy lo que soy, por sus consejos y comprensión, a mi hermana quien está en cada paso que doy, a mi esposo por ser mi motivación e inspiración. Al Dr. Mario Huertas y a la Sra. Cecilia Rojas quienes hicieron posible este logro en mi vida. A mi amiga Sara por este gran equipo!!!.

GINNA TATIANA RINCÓN CAICEDO

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUCCIÓN	12
2. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	13
3. OBJETIVOS	14
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4. MARCO DE ANTECEDENTES	15
5. MATERIALES Y METODOLOGÍA	27
5.1 MATERIALES	27
5.2 METODOLOGÍA	29
5.2.1 Fase I Muestras De Campo	30
5.2.2 Fase II Muestras De Campo.....	35
5.2.3 <i>TSR (Tensile Strenght Ratio)</i>	37
5.2.4 MIST (Moisture Induced Sensitivity Test)	38
5.2.5 <i>Módulos Dinámicos</i>	40
5.2.6 <i>Ahuellamiento</i>	41
5.2.7 <i>Fatiga</i>	42
5.2.8 Fase III.....	42
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
6.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA.....	44
6.3.1 Ensayo S.A.R.A.....	44
6.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA	47
6.2.1 Caracterización De Materiales Granulares De Campo Y Laboratorio.....	47
6.2.2 Comprobación Diseño Marshall – % De Asfalto De Diseño Original.....	49
6.3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	50

6.3.1 Determinación De Susceptibilidad Al Daño Por Humedad (Tsr-Mist).	50
6.3.3 Ensayo De Módulo Dinámico.	56
6.3.4 Ensayo De Fatiga.	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ensayos mecánicos en Fase I.....	31
Tabla 2. Ensayos de caracterización material granular para las muestras extraídas de campo.....	33
Tabla 3. Fórmula de trabajo Laboratorio MHC. Fuente (Informe laboratorio MHC).....	35
Tabla 4. Descripción detallada ensayos de caracterización realizados para las muestras realizadas en el Laboratorio.....	36
Tabla 5. Ensayos mecánicos en Fase II.....	36
Tabla 6. Resultado ensayo SARA muestra de campo.....	44
Tabla 7. Datos índice coloidal a 24 meses.....	46
Tabla 8. Caracterización material de campo y laboratorio.	49
Tabla 9. Diseño Marshall 6% de asfalto.	49
Tabla 10. Datos ensayo TSR muestras extraídas de campo.....	50
Tabla 11. Datos ensayo MIST muestras extraídas de campo.....	51
Tabla 12. Datos ensayo TSR muestras de Laboratorios.....	52
Tabla 13. Datos ensayo MIST muestras de Laboratorios.....	52
Tabla 14. Resultados del ensayo de Fatiga.	59

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Factores que influyen en la susceptibilidad al daño por humedad en pavimentos asfálticos.....	18
Figura 2. Resumen de Módulos Dinámicos obtenidos por diferentes métodos....	24
Figura 3. Tramo vial Concesión Sabana-Occidente.....	27
Figura 4. Muestras extraídas de Campo.....	28
Figura 5. Ensayos realizados sobre los cementos asfálticos.....	29
Figura 6. Resumen del análisis por cromatografía de columna SARA.....	29
Figura 7. Diagrama Metodología FASE I.....	30
Figura 8. Ensayo Centrífuga.....	32
Figura 9. Ensayo Rotovapor.....	32
Figura 10. Procedimiento ensayo SARA.....	33
Figura 11. Columnas ensayo SARA.....	34
Figura 12. Diagrama Metodología FASE II.....	35
Figura 13. Especímenes ensayo TSR.....	37
Figura 14. Prensa Marshall.....	37
Figura 15. Equipo MIST.....	38
Figura 16. Especímenes acondicionamiento seco.....	39
Figura 17. Especímenes acondicionamiento húmedo.....	40
Figura 18. Ensayo Tracción indirecta.....	40
Figura 19. Briquetas módulos dinámicos.....	41
Figura 20. Panela ahuellamiento.....	41
Figura 21. Ensayo Fatiga.....	42
Figura 22. Diagrama Metodología FASE III.....	43
Figura 23. Coloidal e índice de solubilidad asfaltos sumergidos en agua.....	44
Figura 24. Proyección índice coloidal a 24 meses.....	46
Figura 25. Curvas granulométricas material de campo y laboratorio.....	48
Figura 26. Determinación susceptibilidad al daño por humedad de la muestra de campo ante de ser instalada 2010.....	51
Figura 27. Resultados del ensayo de ahuellamiento.....	54
Figura 28. Resultados del ensayo de módulo dinámico.....	56
Figura 29. Resultados del ensayo de Fatiga.....	58

RESUMEN

En el presente trabajo, se aborda el daño producido por la humedad sobre las mezclas asfálticas. Para ello, se comienza realizando una descripción de los antecedentes de estudios enfocados en esta área, determinando de dicha forma los métodos de análisis para la evaluación de los daños causados por la humedad. Posteriormente se avanza a la aplicación de la metodología propuesta, para lo cual fueron extraídos núcleos de pavimento asfáltico del tramo que corresponde a la doble calzada entre Bogotá y Villeta, escogido porque ha sido una carretera que ha presentado daños evidentemente notorios asociados a la humedad. La metodología propuesta compone una serie de etapas, se toma la muestra de campo y se ejecuta la caracterización mecánica, física y química mediante una serie de ensayos (Tensile Strength Ratio (TSR), Moisture Induced Strength Tester (MIST), Módulos Dinámicos, Fatiga, Ahuellamiento, Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions S.A.R.A.). En la segunda fase se estudia y caracteriza los materiales granulares proporcionados por la firma Mario Huertas para una mezcla original hecha en laboratorio y para lo que se realizaron los mismos ensayos mecánicos de la fase 1.

Como resultado de la investigación y a partir del análisis de los resultados encontrados, se concluyó que las mezclas asfálticas a nivel nacional pueden presentar un mismo comportamiento ante la exposición a altos índices de humedad. En relación a las distintas pruebas ejecutadas, se llegó a determinar que el ensayo TSR no logró simular todas las condiciones encontradas en el campo, puesto comenzando no tiene en cuenta el tráfico al cual se exponen las mezclas asfálticas. Los ensayos de módulo dinámico, ahuellamiento y fatiga no incorporan análisis de rigidización, por lo cual sería evidente la importancia de aplicar un método que acapare todas estas características. Por último y en base a los resultados del estudio, se recomienda seguir ejecutando investigaciones en este campo de aplicación, puesto que existen múltiples factores y condiciones que afectan el estado de las mezclas asfálticas y no se pueden en este estudio abordar todas.

Palabras claves. Asfalto, ahuellamiento, fatiga, módulo dinámico, rigidización, ensayos, humedad, granular.

ABSTRACT

In this paper, we address the damage caused by moisture on the asphalt mixtures. For this purpose, starts performing a description of the background of studies focused on this area of the shape determining methods of analysis for the evaluation of damage caused by humidity. Later advances to the application of the proposed methodology, for which they were, extracted asphalt pavement cores, the section that corresponds to the dual carriageway between Bogota and Villeta, chosen because it was a road that has presented clearly noticeable damage associated with moisture. The proposed methodology comprises a series of steps, take the field sample and mechanical, physics and chemistry characterization runs through a series of trials (Tensile Strength Ratio (TSR), Moisture Induced Strength Tester (MIST), Dynamic Modules, Fatigue, Rutting, Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions S.A.R.A.). The second phase is studied and characterized granular materials provided by Mario Huertas original mix made for laboratory and for what their mechanical testing phase 1 was carried.

As a result of the investigation and the analysis of the findings, it was concluded that the national asphalt mixtures can present the same behavior when exposed to high humidity. In relation to the various tests performed , it was determined that the test failed Tensile Strength Ratio (TSR) simulate all conditions encountered in the field , since starting disregards in traffic which asphalt mixes are presented . The dynamic modulus tests, rutting and fatigue do not incorporate stiffening analysis, so it would be obvious the importance of applying a method that hoard all these features. Finally and based on the results of the study , we recommend further implementation research in this field of application , since there are multiple factors and conditions that affect the state of asphalt mixtures and cannot be in this study address all .

Keywords. Asphalt, rutting, fatigue, dynamic modulus, stiffening, essays, moisture, granular.

1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos flexibles se han convertido en la solución ingenieril utilizada en la mayoría de la vías nacionales e internacionales, pero a pesar de esto y de haber sido estudiados durante muchos años, aún no se cuenta con un total conocimiento de su comportamiento, pues las propiedades de sus componentes van cambiando a lo largo de la vida del mismo, debido a que son afectados por agentes externos abrasivos de manera continua tales como: tráfico, humedad, cambios de temperatura, radiación solar y otras condiciones ambientales, haciendo que estos pavimentos se deterioren en corto tiempo sin haber cumplido su vida útil, a pesar de que en el momento de ser instalados cumplen con las normas estandarizadas a nivel nacional. (Spinel & Lugo, 2011).

Uno de los principales aspectos que conforman el estudio del asfalto, se relaciona con el análisis de las propiedades de los mismos, a partir de los cuales se determinan características como la resistencia al esfuerzo, tracción, compresión, flexión, torsión, de igual forma la ocurrencia de desgaste, dureza, elasticidad, incluso se analizan las propiedades de conducción térmica asociados, entre otros. Esta clase de estudios, tiene como fin último el de caracterizar la mecánica del asfalto a partir de una serie de técnicas, las cuales permiten establecer el comportamiento del mismo bajo determinadas condiciones, ya sea de operabilidad o condiciones ambientales.

Dentro de las condiciones ambientales, se tiene que la humedad en las mezclas asfálticas ha sido objeto de múltiples investigaciones, debido a que este es uno de los principales daños que afecta este tipo de pavimentos; por lo anterior este proyecto busca aportar información fundamental a dichas investigaciones, haciendo un análisis comparativo del comportamiento de las muestras instaladas en campo contra las muestra originales realizadas en el laboratorio, mediante algunos ensayos mecánicos, físicos y químicos. Esta investigación en particular da un aporte al daño por humedad en mezclas asfálticas en la Sábana de Bogotá que permita disminuir los costos de mejoramiento, mantenimiento y reparación que son invertidos anualmente por el Estado.

2. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La ubicación de Colombia en la zona tórrida, la ha catalogado como un país con un clima tropical, la temperatura y la humedad del ambiente son bastante diversas, obedeciendo a características especiales de cada una de las regiones y localidades en función de la altura, la temperatura, la vegetación, las masas de agua, los vientos, lluvias, entre otros factores ambientales. Ahora, con base a dichas características ambientales, se debe comenzar por hablar de cómo este puede influir o contribuir en el comportamiento normal de toda infraestructura que se encuentre sujeta a estos parámetros.

La susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas ha sido un tema de constantes investigaciones durante varias décadas, específicamente el análisis en el desempeño de los materiales granulares, del ligante asfáltico, características ambientales como cambios de temperatura, cargas a que es sometido, entre otras. (Spinel, et al., 2011; Chen, et al., 2007; Airey, et al., 2007)

Según investigaciones realizadas, los daños más severos que sufren los pavimentos asfálticos en Colombia son causados por problemas de drenajes que pueden afectar los materiales granulares, lluvia durante la colocación de la mezcla, acción intensa del agua u otros agentes abrasivos además del tránsito, problemas de adherencia entre agregado y asfalto, entre otras. Ante ello, es indispensable al momento del diseño y construcción, tener en cuenta la influencia que tiene el ambiente en el desempeño de esta serie de materiales. (Rondón & Moreno, 2010; Rondón & Reyes, 2009)

El daño por humedad de las mezclas asfálticas es uno de los principales daños que se presenta en los pavimentos flexibles, lo que se traduce en la producción de altos costos con el fin de realizar las respectivas acciones de mantenimiento y reparaciones. Por esta razón se considera indispensable la caracterización del comportamiento y dinámica de este tipo de material ante condiciones climáticas adversas, en lo cual se enfatiza el desarrollo del presente estudio.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Encontrar la relación del daño por humedad de las mezclas asfálticas realizadas en laboratorio con su desempeño en campo.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Caracterizar mecánica y físicamente la muestra de campo sometida a condiciones de humedad.
- ✓ Caracterizar muestras en laboratorio que reproduzca las propiedades de la muestra de campo.
- ✓ Determinar la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas

4. MARCO DE ANTECEDENTES

El daño por humedad en las mezclas asfálticas se puede definir como el deterioro de la capacidad estructural de la mezcla, causada por la presencia de agua en estado líquido o gaseoso al interior de su microestructura. Diferentes investigaciones han mostrado que las manifestaciones más comunes debido a la presencia de humedad en las mezclas asfálticas son el stripping y el raveling, el primero de ellos se conoce como el desprendimiento del cemento asfáltico y de los agregados, el segundo de ellos consiste en el desprendimiento gradual de los agregados y la mezcla de la superficie debido al paso constante de los vehículos. (Caro, 2001)

A pesar de que este fenómeno ha sido estudiado desde 1950, solo hasta finales de los años 70 tomó fuerza y atención debido a la cantidad de reportes que llegaban mencionando el mal estado de las vías y en consecuencia la cantidad de recursos invertidos en el mantenimiento por las entidades estatales encargadas de las vías.

Una de las pruebas utilizadas para determinar la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfáltica y de las primeras que se presentó en la industria de pavimentos, fue la inmersión estática y la prueba de ebullición, ambas pruebas realizadas sobre mezclas sueltas, posteriormente a finales de 1940 se utilizó la prueba inmersión-compresión, que fue realizada sobre muestras compactadas. Esta fue la primera en convertirse en una prueba estándar (ASTM) a mediados del año 1950.

Durante los 1987 y 1993, el Programa de Investigación Estratégico de Carretera (SHRP) con recursos aportados por diferentes países como Estados Unidos, Canadá, México y algunos países de Europa, llevó a cabo varios proyectos de investigación, con el fin de mejorar y perfeccionar las especificaciones para mezclas asfálticas en caliente y de igual manera poder identificar las causas del daño por humedad en este tipo de asfaltos. Al programa, se concluyó que ninguno de los resultados experimentales obtenidos con los procedimientos de laboratorio desarrollados por el programa de Investigación estratégico de carretera, proporcionó una predicción al daño por humedad más preciso que con el actual Método AASHTO T283. Por tal motivo, este último fue incorporado para determinar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas en caliente. Algunas agencias han reportado problemas con esta prueba en términos de correlación entre los resultados de laboratorio y observaciones de campo.

Posteriormente se han desarrollado varios estudios que han ayudado a fortalecer conocimientos en el daño de la humedad en pavimentos asfálticos. A continuación se relacionan algunos de ellos:

- El modo de rotura de estructuras sometidas a cargas continuas y que llegan a su falla a pesar de que el material no alcance su límite de resistencia se denomina falla por fatiga, Salomón & Oñate (1999) realizan un análisis por medio de métodos numéricos desarrollando un modelo constitutivo basado en la mecánica de medio continuo este modelo permite combinar efectos térmico y de fatiga.

La fatiga se produce bajo condiciones de carga por debajo del límite elástico del material, una pérdida progresiva de la resistencia del material depende del número de ciclos de carga que generan un efecto de daño.

Por lo anterior se puede afirmar que el efecto mecánico de la fatiga produce una pérdida de resistencia del material como función del número de ciclos y la amplitud de carga de esta pérdida de fuerza el material es sometido a un comportamiento inelástico, que puede ser considerado como fisuración seguido por su rompimiento.

La teoría de la fatiga que se presenta en este trabajo es una función que modifica el límite de discontinuidad, produciendo una "evolución implícita de la variable de fatiga" incluido en el plástico interna y / o las variables de daño del modelo inelástica. Además, la parte térmica de la definición de la fatiga se introduce en la misma forma que en la formulación mecánica, todo a través de una variable de daño interno implícita. (Salomón & Oñate, 1999 p. 136)

Un aspecto importante es que esta teoría utiliza el marco de la mecánica del medio continuo que es una base para la formulación apropiada si se utilizan principios termodinámicos bien establecidos.

- El desempeño de las mezclas asfálticas en presencia de agua ha sido objeto de innumerables estudios de investigación desde la década de 1920, buscando una prueba de laboratorio que pueda predecir el comportamiento de la mezcla asfáltica en el campo y su susceptibilidad a la humedad.

Ahora hay varios métodos de tratamiento que mejoran la capacidad del asfalto, estos pueden ser agregados desde las refinerías haciendo que el

problema disminuya considerablemente, aunque no deja ser importante contar con métodos de prueba precisos con el fin de comparar la eficacia de estas adiciones y de competir en sus formas de tratamiento.

Hay dos tipos de pruebas de susceptibilidad a la humedad (Solaimanian, et al., 2003) los describen como: cualitativa y cuantitativa.

Las pruebas cualitativas proporcionan una evaluación subjetiva:

- Prueba de agua en ebullición
- Prueba de pedestal de congelación-descongelación
- Prueba de botella rápido
- Rodando método de la botella

Las pruebas cuantitativas proporcionan un valor para un parámetro específico:

- Ensayo de inmersión-compresión
- Ensayo de tracción indirecta
- Ensayo de inmersión en Marshall
- Método de doble golpe
- Ensayos de módulo resiliente

La implementación de cualquier prueba de laboratorio para la sensibilidad a la humedad siempre requerirá calibración de los resultados con el rendimiento observado en campo. Si los resultados de las pruebas no están calibrados puede concluirse con error sobre una mezcla asfáltica, algunas variables que pueden aumentar significativamente o disminuir el riesgo de susceptibilidad a la humedad son:

- El drenaje y la condición del sistema de drenaje
- La estructura del pavimento
- El diseño de mezcla
- El uso de aditivos, que pueden reducir la susceptibilidad a la humedad general de la mezcla
- Variabilidad de construcción
- Clima, la acción de congelación y descongelación
- Tráfico

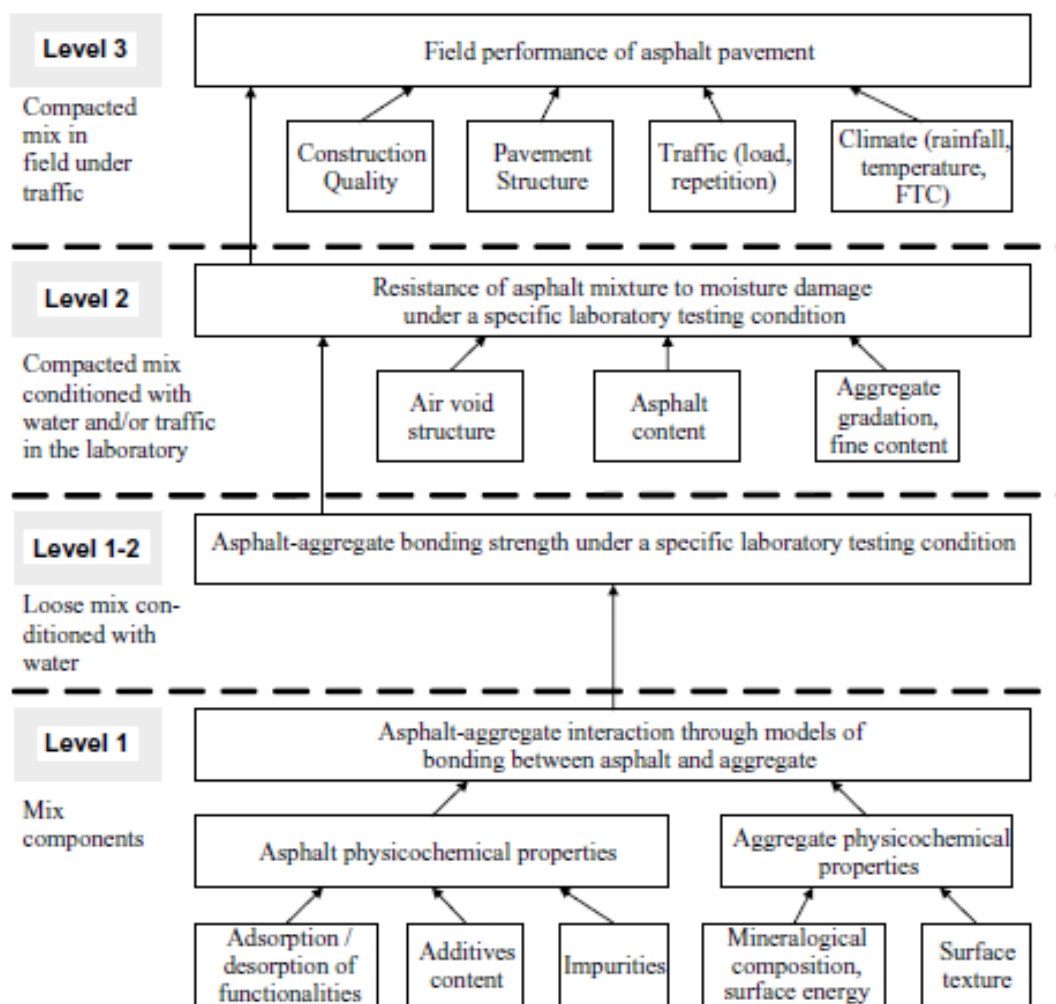


Figura 1 Factores que influyen en la susceptibilidad al daño por humedad en pavimentos asfálticos (Solaimanian, et al., 2003)

Se evalúan los efectos del daño por humedad en vigas de fatiga por flexión que fueron tomadas de tramos de campo que exhibían diferentes niveles de daño relacionado con la humedad, también se crearon vigas de fatiga de laboratorio con las mismas materias primas de las muestras de campo incluyendo algunas con tratamiento de adición de cal. Las vigas fueron acondicionadas parcialmente con saturación del 60 al 80%, luego se sometieron a tres repeticiones de 5 horas a 60°C seguido de 4 horas a 25°C y un ciclo de 5 horas a 18°C. Se retira del acondicionamiento y se realiza la prueba a la fatiga con la norma AASHTO TP-8. Los resultados

mostraron que el acondicionamiento tenía un significativo efecto sobre la rigidez inicial y sobre las muestras realizadas en laboratorio.

Algunas de las muestras de campo tenían 12% de vacíos de aire lo que indica que su susceptibilidad a la humedad en el campo fue altamente relacionada con el sistema constructivo y el control de compactación de la mezcla asfáltica. Los resultados también mostraron que la adición de cal aumentó el contenido de finos de la mezcla lo que se ve reflejado en menor porcentaje de vacíos de aire permitiendo una menor penetración de agua a la mezcla.

Muchas variables en el campo como materiales de construcción, sistema constructivo, tráfico y clima hacen difícil correlacionarlo con laboratorio y esta ha sido una de las principales deficiencias en el desarrollo de pruebas de laboratorio efectivas que pueden proporcionar resultados cuantitativos utilizados en las especificaciones y diseño a través de una amplia gama de condiciones.

El resultado es que una mezcla asfáltica tendrá diferentes riesgos dependiendo de dónde y cómo se va a utilizar, y estos factores deben tenerse en cuenta en el desarrollo de pruebas, su evaluación, calibración y aplicación, pero aún no se cuenta con suficientes bases de datos que incluyan las variables requeridas y un número suficiente de proyectos para poder generar una prueba definitiva.

- Buchanan & Moore (2005), evaluaron las mezclas asfálticas en caliente (HMA) con gradación gruesa utilizando metodología Superpave. Para esta investigación se utilizaron dos tipos de ligantes (PG 67-22 asfalto puro y PG 76-22 polímero asfalto modificado) y tres condiciones de antistripping (ninguno, cal hidratada y agente antistripping líquido adicionándole cal hidratada). Las muestras fueron compactadas en el compactador giratorio Superpave y acondicionadas posteriormente en el equipo MIST para por último determinar la resistencia a la tracción de las muestras húmedas y compararlas con las resistencias obtenidas en el grupo de muestras secas. Adicionalmente estas muestras fueron ensayadas mediante el ensayo de Ebullición MT-59 para poder comparar los resultados obtenidos con el equipo MIST.

A partir de esta investigación se concluyó que con el equipo MIST se puede medir el stripping de las mezclas asfálticas en caliente, teniendo en cuenta que fue fabricado con el fin de proporcionar un método racional para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad en HMA y que es capaz de simular el stripping en un periodo menor a tres horas, debido a que controla la temperatura y genera una presión de poros en la mezcla, simulando las condiciones de campo existentes.

- Chen & Huang (2007), evaluaron el daño por humedad en mezclas asfálticas en caliente usando la prueba de rendimiento simple y la prueba de tensión indirecta. Esta investigación se desarrolló teniendo en cuenta que dicha situación es uno de los mayores problemas que afectan la vida útil de las mezclas asfálticas. Para la producción de las mezclas en el laboratorio, se utilizó material granular grueso (gravas) con diferentes tipos de angularidad (100% - 50% y 0% fracturadas), pero con gradaciones similares. En algunas de estas muestras se utilizaron aditivos anti-stripping y en otras no. Los especímenes desarrollados fueron acondicionados por cuatro diferentes métodos:
 - a. Un ciclo de Freeze Thaw (F-T)
 - b. Dos ciclos de Freeze Thaw (F-T)
 - c. Quinientos ciclos de presión de poros con el Moisture Induced Susceptibility Test (MIST)
 - d. Mil ciclos con Moisture Induced Susceptibility Test (MIST)

Los resultados indican que la prueba de módulo dinámico (SPT) y la prueba de tensión indirecta (IDT) con los condicionamientos F-T o MIST son efectivas para caracterizar la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas en el laboratorio. De igual manera indican que el incremento de los ciclos en FT o MIST incrementa la susceptibilidad al daño por humedad en las mezclas y el incremento de la angularidad de los agregados gruesos podría aumentar el módulo dinámico. Por último concluye que los aditivos anti-stripping son efectivos para disminuir la susceptibilidad al daño por humedad.

- Se desarrolló una investigación por Airey, et al. (2008), en la cual se establece que existen varios métodos de pruebas para identificar la susceptibilidad al daño por humedad en las mezclas asfálticas, como el método ASSHTO T283 y la prueba de laboratorio combinando el daño de

envejecimiento/humedad, conocido como Saturation Ageing Tensile Stiffness (SATS). Esta prueba que ha sido usada para cuantificar el daño de humedad en mezclas de asfaltos británicos, consiste en evaluar los efectos combinados del envejecimiento y el daño por humedad en las mezclas asfálticas, mediante el envejecimiento de los especímenes de mezcla compactas de asfalto con presencia de humedad (100 mm de diámetro y 60 mm de espesor), presión y temperaturas elevadas. Dicha prueba ha sido capaz de reproducir satisfactoriamente en el laboratorio, la pérdida de módulo de rigidez observada en campo por el daño por humedad. Adicionalmente discrimina la resistencia al daño por humedad para diferentes combinaciones de mezclas de asfalto.

- Kanitpon & Bahia (2008), desarrollaron una investigación que buscaba evaluar la relación del comportamiento entre los pavimentos asfálticos en campo y los valores de TSR encontrados en las muestras de laboratorio con asfalto original, adicionalmente buscaron evaluar el efecto que causan los aditivos anti stripping en el desempeño de las muestras asfálticas en campo.

Para esta investigación se utilizaron veintiún (21) secciones de pavimentos cubriendo una variedad de lugares y fuentes de agregados. Los datos de la resistencia a la tensión indirecta (TSR) y los índices de deterioro del pavimento (PDI) fueron tomados de la base de datos del Departamento de Transporte de Wisconsin (WisDOT).

Con esta investigación, se determinó que no existía relación entre los resultados de TSR y el comportamiento del pavimento en campo, el cual fue medido por el índice de deterioro de pavimento, de igual manera tampoco se encontró relación entre el TSR y el agotamiento específico del pavimento (desmoronamiento de la superficie).

Por otro lado, para evaluar el efecto que causan los aditivos anti stripping en los pavimentos asfálticos, se analizó la información de la base de datos y se contrastó con lo obtenido en el laboratorio, determinando que los resultados obtenidos con la base de datos muestran un efecto en el comportamiento y en el agotamiento del pavimento relacionado con los daños por humedad. A diferencia de lo encontrado con los resultados en el laboratorio, en donde los aditivos anti stripping no cambiaron las propiedades reológicas de los aglutinantes del asfalto, ni para mejorar la

formación de deformaciones, ni para mejorar las propiedades de la fatiga, relacionada con el aglutinante del asfalto, sin embargo se encontró que aumentan la adhesión del aglutinante a la superficie de los agregados, especialmente cuando el enlace del aglutinante se expone al agua.

Concluyendo finalmente que para obtener un mejor desempeño en campo se debe obtener una mejor adhesión entre el ligante y los agregados. Adicionalmente se concluyó que a pesar que la prueba TSR es sensible al uso del aditivos anti stripping, no simula correctamente los factores que influyen en el desgaste del pavimento.

- La susceptibilidad al daño por humedad, desarrollando mezclas asfálticas con dos (2) tipos de ligantes (CA 80-100 y CA 60-70), fue estudiada por Rondón & Moreno (2010), donde su mayor propósito fue evaluar el efecto que causa el ligante asfáltico al daño por humedad de las muestras asfálticas. Concluyendo de dicho análisis, que la adhesión que existe entre el ligante asfáltico y el agregado pétreo, es afectado por el cambio en la consistencia que experimenta el ligante asfáltico con la presencia del agua. Aunque el ligante asfáltico es un material impermeable y de muy baja reacción química, con la presencia del agua o de agentes externos modifica su consistencia y aumenta su rigidez. “Lo anterior demuestra que la interfase ligante asfáltico-agregado pétreo se afecta por tal cambio de consistencia. El aumento en la rigidez causa contracción del ligante asfáltico sin cambio de volumen, lo cual podría ser una de las causas que generen el desprendimiento del cemento asfáltico con el agregado” (Rondón & Moreno, 2010, p.7). Adicionalmente concluyeron, que se deben desarrollar otras investigaciones que permitan entender con mayor claridad los resultados reportados en este estudio, por lo que es necesario evaluar en un futuro el cambio en las propiedades químicas, reológicas y de resistencia mecánica de los ligantes y las mezclas asfálticas analizadas cuando son sumergidas en agua.
- Nieto (2010), realiza una evaluación sobre la resistencia al ahuellamiento en mezclas asfálticas en caliente, explicando que las deformaciones plásticas en las mezclas asfálticas son producidas por la acumulación de pequeñas cantidades de deformación irre recuperable, las cuales son el resultado de cada aplicación de carga. Este tipo de fallas se presentan en pavimentos asfálticos sometidos a condiciones ambientales como la

humedad, la temperatura y especialmente a las cargas y frecuencia del tránsito, más aun cuando dichas cargas son pesadas y lentas.

La consistencia de la mezcla asfáltica es susceptible a las altas temperaturas, volviendo el material asfáltico viscoso y presentando deformaciones plásticas con la aplicación de cargas debido a la facilidad de desplazamiento que tiene el material en esta condición. La temperatura entonces juega un papel importante en que la mezcla presente deformaciones plásticas o elásticas, mientras que el agua puede generar en la mezcla asfáltica deformaciones plásticas permanentes. Como conclusión de esta investigación y al analizar cada uno de los factores que hacen sensible al Ahuellamiento en una mezcla asfáltica, se determina que los agregados pétreos en cuanto a su textura, tamaño, distribución granulométrica son aportantes de resistencia a las deformaciones plásticas. La temperatura del ligante asfáltico, es una característica decisiva en la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica.

- Del mismo modo, Higuera et al. (2011), desarrollaron una investigación con el fin de buscar una correlación entre los ensayos de laboratorio y las metodologías utilizadas para hallar el módulo dinámico en la mezclas asfálticas. El ensayo realizado en el laboratorio fue el de Tensión Indirecta y los métodos teóricos tomados para realizar la correlación fueron: Fórmula de BONNAURE, Fórmula del INSTITUTO DEL ASFALTO, Fórmula de HEUKELOM y KLOMP, Fórmula de WITCZAK, Programa Shell BANDS 2.0 y Monogramas. La investigación se desarrolló para tres velocidades diferentes: 30, 60 y 80 km/h, con el fin de observar el comportamiento del módulo dinámico en diferentes situaciones de operación. A continuación se muestran los módulos dinámicos obtenidos con los diferentes métodos.

	Módulo dinámico (kg/cm ²) para una velocidad de 30 Km/h	Módulo dinámico (kg/cm ²) para una velocidad de 60 Km/h	Módulo dinámico (kg/cm ²) para una velocidad de 80 Km/h
Ensayo de laboratorio	22762 100	Sin información	40940 100
Monogramas	37740 166%	40800	42840 105%
Fórmulas de BONNAURE y otros	37219 164%	41624	47448 116%
Fórmulas del INSTITUTO DEL ASFALTO	36946 162%	44275	47890 117%
Fórmulas de HEUKELOM y KLOMP	40727 179%	45098	50751 124%
Fórmula de WITCZAK	43021 189%	49992	53230 130%
Programa Shell BANDS 2.0]	31212 137%	40290	44676 109%

Figura 2 Resumen de Módulos Dinámicos obtenidos por diferentes métodos. **Fuente:** (Higuera et al. 2011, p 45)

De esta investigación se concluyó que existen diferentes formas de calcular el módulo dinámico de una mezcla asfáltica, como los ensayos de laboratorio y los métodos teóricos. Igualmente que los resultados obtenidos por estos dos métodos no difieren mucho entre sí, pero aun así son enfáticos en precisar que los resultados más confiables son los resultados obtenidos con los ensayos de laboratorio ya que reproducen las condiciones propias del entorno.

- o Reyes et al. (2010), realizan una investigación sobre la caracterización dinámica de las mezclas asfálticas sometidas durante veintinueve (29) meses a condiciones climáticas reales. La investigación fue desarrollada en la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta sus fuertes cambios de temperatura, la altura sobre el nivel del mar, la humedad y el clima. Se utilizó un diseño de mezcla MDC-2 según Norma INVIAS-07 con cemento asfáltico CA 80-100 y se realizaron trescientos sesenta (360) ensayos de fatiga, concluyendo que a los veintinueve (29) meses de exposición con las condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá, la mezcla asfáltica presenta una disminución en la vida a la fatiga en un 64%, esto se debe al aumento de rigidez por las condiciones a las que fue sometida. A partir de esta investigación se concluye que la carga es una de las razones que causa el fenómeno de fatiga en las mezclas asfálticas, pero existe otras como el envejecimiento y el daño por humedad, que se constituyen en factores importantes en la durabilidad de las mismas, es

decir las mezclas asfálticas deben ser diseñadas para cargas y condiciones ambientales.

- En la investigación realizada por Pérez (2012), se identifican los métodos más utilizados en diferentes países para evaluar el daño por humedad en las mezclas asfálticas, a continuación se relacionan:
 - ✓ **Método de ebullición:** Este método se encuentra estandarizado por la norma ASTM D-3625 y permite determinar la pérdida de la película asfáltica en los materiales pétreos, presentada como un porcentaje de cubrimiento. De igual manera permite observar el incremento o la falta de la adhesión al utilizar diversos tipos y dosis de aditivos químicos, así como el incremento de los agregados recubiertos con asfalto caliente no compacto, debido a la acción del agua en ebullición.
 - ✓ **Método de tensión indirecta (TSR):** Este método se encuentra estandarizado por las normas AASHTO T-283 y ASTM D-4867. Consiste en el acondicionamiento de seis (6) especímenes, los cuales previamente han sido compactados hasta obtener 6% y 8% de vacíos de aire en la mezcla. Los especímenes son divididos en dos (2) subgrupos los cuales tres de ellos son sometidos a un acondicionamiento en seco y otros a un acondicionamiento húmedo. Posteriormente son sometidos a una tensión indirecta mediante la máquina del equipo Marshall obteniendo un promedio de la fuerza por unidad de área de cada uno de los subgrupos.
 - ✓ **Método de la rueda cargada “Hamburgo”:** En este ensayo los especímenes son sometidos a un equipo compuesto por dos ruedas de acero que presentan un movimiento axial, desarrollando una carga en cada rueda de 158 lb, una presión de contacto de 217 psi y una temperatura de cincuenta grados centígrados (50°C). Estos especímenes son sumergidos completamente en agua. Cuando existe un cambio de pendiente en el desarrollo de la prueba, el punto de inflexión indica el momento en el que la muestra presentará susceptibilidad al daño por humedad.
 - ✓ **Método inmersión-compresión:** Por medio de este método se obtiene un valor promedio de la fuerza por compresión axial de los especímenes

sujetos a condiciones secas y otro para los especímenes sujetos a condiciones húmedas, de igual manera se obtiene el índice de estabilidad retenida que se define como la relación de estas fuerzas de compresión. Se encuentra estandarizado en las normas AASHTO T-165 y ASTM D-10758.

En este estudio se determinó que el daño que causa la humedad en las mezclas asfálticas es evidente y puede ser propiciado por diversos mecanismos físico-químicos, por lo que es necesario utilizar uno o varios métodos que puedan indicar este daño, teniendo en cuenta que algunos de esto métodos son utilizados en la etapa de diseño y otros en la etapa de construcción de la carpeta asfáltica.

5. MATERIALES Y METODOLOGÍA

5.1 MATERIALES.

Para el desarrollo de la primera parte de esta tesis, se utilizaron núcleos extraídos de campo de pavimento asfáltico (Mezcla asfáltica densa en Caliente MDC2, asfalto 80-100), del tramo siete de vía de la Concesión Sabana de Occidente, que hace parte proyecto Ampliación de la doble calzada Bogotá – Villeta. Dicho tramo fue escogido teniendo en cuenta que se encontraba afectado y deteriorado por efectos de la humedad, adicionalmente cuenta con un diseño homogéneo, garantizando así que las muestras extraídas fueron diseñadas bajo las mismas condiciones.

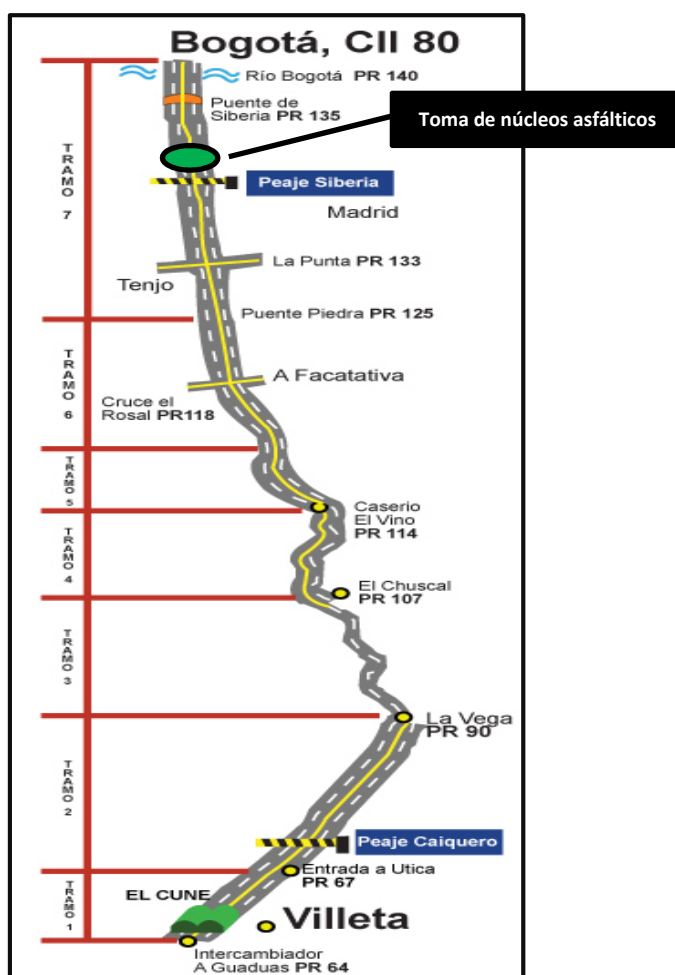


Figura 3. Tramo vial Concesión Sabana-Occidente. Fuente: (<http://www.concesionsabana.com/construccion.html>)

En el momento en que las muestras fueron extraídas, la carpeta asfáltica presentaba una vida de servicio de tan solo dos (2) años. Dicho pavimento fue instalado en Febrero del año 2010, con un nivel de tráfico NT3, por la firma Mario Huertas Cotes. A continuación se presentan algunas fotografías.



Figura 4. Muestras extraídas de Campo. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

Para la segunda parte de este proyecto se utilizaron los insumos proporcionados por la Firma Mario Muertas Cotes MHC. Los materiales granulares triturados (Tamaño máximo $\frac{3}{4}$) provienen de la Cantera La Suiza (Cundinamarca), la arena de río, del Rio Saldaña en Tolima y el asfalto 80-100 de Barrancabermeja. Estos materiales presentan las mismas características de los materiales con los que se elaboró la carpeta asfáltica de donde fueron extraídos los núcleos.

La caracterización del asfalto 80-100 fue tomada de las investigaciones realizadas anteriormente a esta, las cuales hacen parte de un mismo proyecto doctoral. En estas investigaciones Atencia (2011) y Cortes (2012), evaluaron las características del asfalto en diferentes periodos de inmersión.

En la figura No 5 se indican los resultados obtenidos de las propiedades del ligante asfáltico, los cuales se tomarán como referencia en esta investigación

teniendo en cuenta que analizamos una muestra en condición original (Laboratorio) y otra a veinticuatro (24) meses (campo).

CARACTERÍSTICA EVALUADA	UNIDAD	NORMA INV	ESPECIFICACIÓN INVIAS		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	°C	E-709-07	230	-	358	370,0	370,8	370,8	370,7	-	-	-
Copa Abierta de Cleveland	-	E-707-07	-	-	1,007	1,039	-	1,034	-	-	-	-

Figura 5. Ensayos realizados sobre los cementos asfálticos. **Fuente:** Atencia (2011) y Cortes (2012)

En la siguiente figura, se indica un resumen del análisis por cromatografía de columna SARA.

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

Figura 6. Resumen del análisis por cromatografía de columna SARA. **Fuente:** Atencia (2011) y Cortes (2012)

5.2 METODOLOGÍA.

En la metodología definida para la fase experimental de esta investigación, se establecieron tres etapas generales, así:

5.2.1 Fase I Muestras De Campo.

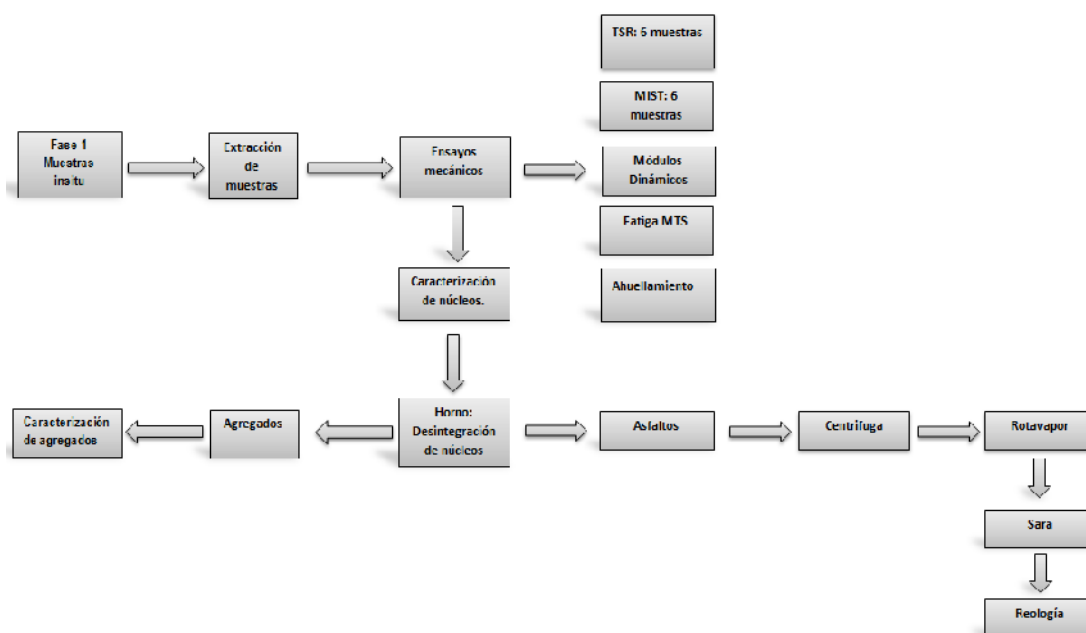


Figura 7. Diagrama Metodología FASE I **Fuente:**(Presentación propia de los autores)

La primera etapa de la investigación consistió en la identificación de un tramo de vía que estuviera afectado y deteriorado por efectos de la humedad y adicionalmente cumpliera las siguientes especificaciones: Mezcla asfáltica densa en caliente MDC2, asfalto 80-100, diseño homogéneo, más de un año de vida de servicio.

Una vez seleccionado el tramo vial, localizado en la concesión Sabana Occidente, se procedió a la extracción de los núcleos de carpeta asfáltica, siguiendo los lineamientos de la norma INVIAS INV E 758-07.

Posteriormente se realizaron los ensayos para determinar la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas (TSR y MIST), y los ensayos para determinar el comportamiento mecánico de los núcleos extraídos de campo.

En la tabla No 1, se relacionan el número de muestras ensayadas con su respectiva normatividad:

ENSAYO	NUMERO DE MUESTRAS	NORMA
TSR	6	INIVAS E 725 07/ AASTHO T283
MIST	6	ASTM D7870-13 (Aprobada Junio 2013)
Ahuellamiento	3	INV E 756-07
Módulos Dinámicos	3	INV E 754-07
Fatiga	12	NFP 98-216-1

Tabla 1. Ensayos mecánicos en Fase I

Una vez terminados los ensayos que permitieron determinar la Susceptibilidad al daño por humedad (TSR y MIST) de las muestras extraídas de campo, estas muestras fueron llevadas al horno a una temperatura de 160 °C, para ser desintegradas y así poder reconstruir especímenes (briquetas y panelas), con las dimensiones adecuadas para los ensayos de Módulos dinámicos, ahuellamiento y fatiga.

Para la reconstrucción de dichos especímenes se utilizó el mismo material de las muestras extraídas de campo y el mismo diseño, garantizando que las condiciones de campo se mantuvieran.

Después de los ensayos mecánicos (MIST, TSR, Ahuellamiento, módulos dinámicos, Fatiga), se inició la caracterización física y química de las muestras extraídas de campo, con el fin de conocer el estado de los materiales después de estar sometidos a las condiciones de campo (tránsito, humedad).

Este proceso inició con la desintegración de los núcleos extraídos de campo, mediante el proceso de centrifugado, el cual fue desarrollado con los procedimientos estipulados en la norma INV E 732-07, obteniendo la separación de los materiales granulares y del bitumen. Para poder realizar esta separación se utilizó un treinta (30%) de etanol y setenta (70%) de Tolueno como solvente.



Figura 8. Ensayo Centrifuga. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

Mediante el uso del Rotovapor y los procedimientos determinados en la norma INV E 759-07, se separó el asfalto del solvente, quedando libre el ligante asfáltico de las impurezas generadas por el material granular.



Figura 9. Ensayo Rotovapor. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

Posteriormente se inició la caracterización física del material granular, para el cual fue necesario elaborar los siguientes ensayos:

ENSAYO	NORMA
Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras	INV E 230 07
Porcentaje de caras fracturadas en los agregados	INV E 227 07
Límite plástico e índice de plasticidad de suelos	INV E 126 07
Determinación del límite líquido de los suelos	INV E 125 07
Equivalente de arena de suelos y agregados finos	INV E 133 07
Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles	INV E 218 07
Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval	INV E 238 07

Tabla 2 Ensayos de caracterización material granular para las muestras extraídas de campo

La caracterización química del asfalto 80/100 se desarrolló mediante el ensayo de cromatografía líquida, el cual está estandarizado por la norma ASTM D4121-09 (Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions) o coloquialmente conocido como ensayo S.A.R.A (saturados, asfaltenos, resinas y aromáticos). Dicho ensayo permite separar las fracciones que componen el asfalto. A continuación se indica el flujograma del procedimiento desarrollado para la elaboración de este ensayo.

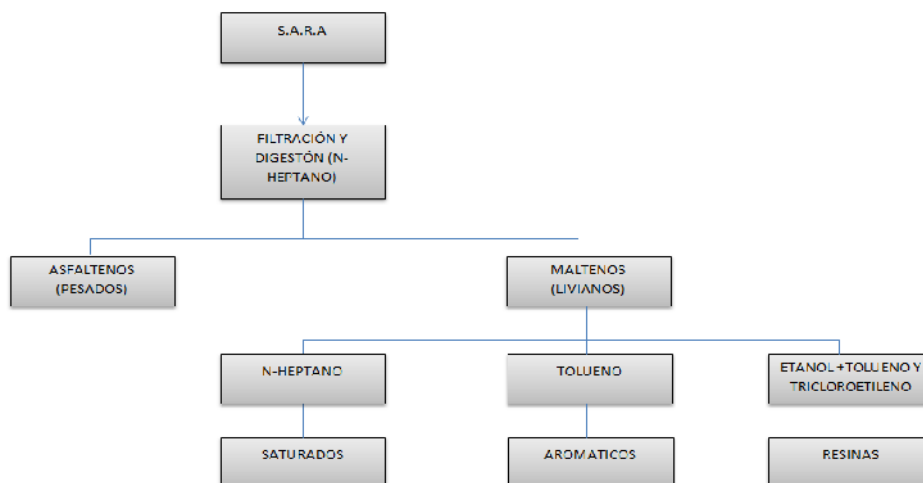


Figura 10. Procedimiento ensayo S.A.R.A Fuente: (Presentación propia de los autores)

A través de los procesos de digestión y filtración del ensayo S.A.R.A, en donde se utilizó como solvente el n-heptano, se obtiene la separación de las fracciones pesadas y livianas del bitumen, asfaltenos y maltenos respectivamente.



Figura 11. Columnas ensayo S.A.R.A **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

Después de obtenidos los maltenos estos fueron separados en sus (3) tres fracciones, saturados, aromáticos y resinas, mediante la cromatografía en columna. Posteriormente se estableció el porcentaje de cada uno de estas fracciones y se comparó con los porcentajes de cada fracción en un asfalto 80-100 original. (Ver Figura 6).

5.2.2 Fase II Muestras De Campo.

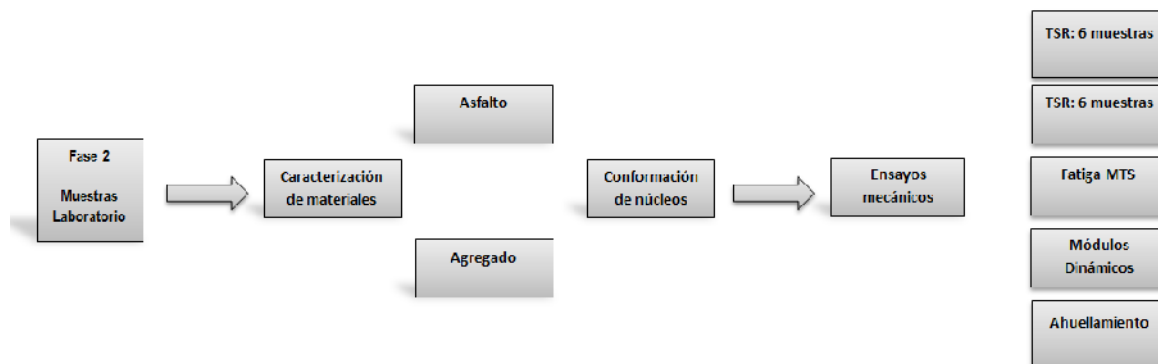


Figura 12. Diagrama Metodología FASE II **Fuente:**(Presentación propia de los autores)

La segunda etapa inició con el análisis de la información del diseño de la mezcla instalada en el tramo vial donde fueron extraídos los núcleos, proporcionada por el laboratorio de la firma Mario Huertas Cotes MHC, información que se relaciona a continuación:

- ✓ Fórmula de trabajo mezcla asfáltica MDC 2

MATERIAL	ESPECIFICACIÓN	PORCENTAJE
Triturado	Pasa ¾" (Cantera la Suiza)	30%
Triturado	Pasa 3/8" (Cantera Suiza)	25%
Triturado	Pasa # 4 (Cantera Suiza)	25%
Arena	Río Saldaña (Casamotor)	20%
Asfalto	Barranca 80-100 Ecopetrol	6%

Tabla 3. Fórmula de trabajo Laboratorio MHC. Fuente (Informe laboratorio MHC)

- ✓ Diseño original mezcla asfáltica (Diseño Marshall)
- ✓ Análisis granulométrico

Posteriormente se desarrolló la caracterización física de los materiales granulares, proporcionados por la Firma Mario Huertas Cotes, los cuales fueron tomados de las mismas canteras de donde fue seleccionado el material con que se desarrolló la mezcla asfáltica instalada en el corredor vial. Esta

caracterización se efectuó teniendo en cuenta los procedimientos estandarizados en los ensayos que se relacionan a continuación:

ENSAYO	NORMA
Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras	INV E 230 07
Porcentaje de caras fracturadas en los agregados	INV E 227 07
Límite plástico e índice de plasticidad de suelos	INV E 126 07
Determinación del límite líquido de los suelos	INV E 125 07
Equivalente de arena de suelos y agregados finos	INV E 133 07
Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles	INV E 218 07
Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval	INV E 238 07

Tabla 4. Descripción detallada ensayos de caracterización realizados para las muestras realizadas en el Laboratorio

Por último se realizaron las muestras de laboratorio, que posteriormente fueron sometidas a para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (TSR y MIST) y a ensayos mecánicos (módulos dinámicos y Fatiga y ahuellamiento), bajo las mismas características con las que se elaboraron los ensayos para las muestras extraídas de campo. Paralelamente se desarrolló la comprobación del diseño Marshall de la mezcla asfáltica MDC 2 asfalto 80-100.

En la siguiente tabla, se relacionan el número de muestras ensayadas para la Fase II con su respectiva normatividad:

ENSAYO	NUMERO DE MUESTRAS	NORMA
TSR	6	INIVAS E 725 07/ AASTHO T283
MIST	6	ASTM D7870-13 (Aprobada Junio 2013)
Ahuellamiento	3	INV E 756-07
Módulos Dinámicos	3	INV E 754-07
Fatiga	12	NFP 98-216-1

Tabla No 5. Ensayos mecánicos en Fase II

5.2.3 TSR (*Tensile Strenght Ratio*).

El ensayo TSR se desarrolló de acuerdo a la norma AASTHO T283 y a la norma INIVAS E 725 07. El procedimiento que se describe a continuación, fue desarrollado para las muestras de laboratorio y para las muestras extraídas de campo.

Se tomaron seis (6) núcleos que se clasificaron en dos (2) subgrupos de acuerdo al porcentaje (%) de vacíos, para cada uno de ellos se inició el acondicionamiento respectivo. Para el Subgrupo No 1 el acondicionamiento para muestras secas y para el Subgrupo No 2 el acondicionamiento para muestras húmedas. Estas últimas fueron saturadas parcialmente.



Figura 13. Especímenes ensayo TSR. **Fuente:**(Presentación propia de los autores)

Posterior a este acondicionamiento, se determinó la resistencia a la tensión de ambos subgrupos, cada una de las muestras fueron sometidas a carga centradas y paralelas, en un plano diametral vertical a una relación de deformación de 50.8 mm/min, en la prensa Marshall.



Figura 14. Prensa Marshall. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

Por último se determinó el porcentaje de susceptibilidad al daño por humedad de las muestras de campo y las muestras de laboratorio, haciendo una relación de las resistencias encontradas entre los dos subgrupos de cada una de las muestras.

5.2.4 MIST (Moisture Induced Sensitivity Test).

El equipo MIST es un dispositivo de acondicionamiento acelerado, que funciona a mayores temperaturas que las normales, creando así presiones dentro de los poros de la mezcla y logrando una aceleración de los efectos que experimenta una mezcla en condiciones normales de tráfico y de temperaturas. Adicionalmente, este equipo provee esfuerzos cíclicos y presión de poros en la muestra, de forma similar a las tensiones vistas en un pavimento asfáltico mojado al pasar los neumáticos del vehículo.



Figura 15. Equipo MIST. **Fuente:** (Guía de operación Equipo MIST InstroTek, Inc.)

Teniendo en cuenta que este ensayo busca determinar la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas y en el momento que fue desarrollado aún no se contaba con una normatividad oficial, se utilizó la norma INVIAS INV E 725-07 y la norma AASTHO T 283.

Las muestras extraídas de campo y las elaboradas en el laboratorio, fueron sometidas a este ensayo para obtener la susceptibilidad al daño por humedad, desarrollando el procedimiento que se describe a continuación: Se tomaron otros seis (6) de los núcleos y se dividieron en dos (2) subgrupos de acuerdo al porcentaje de vacíos, para cada uno de ellos se inició el acondicionamiento

respectivo, para el Subgrupo No 1 el acondicionamiento para muestras secas de la misma forma que en el ensayo TSR y para el Subgrupo No 2 el acondicionamiento para muestras húmedas, el cual fue realizado en el equipo MIST.



Figura 16. Especímenes acondicionamiento seco. **Fuente:**(Presentación propia de los autores)

Se configuró el equipo con los siguientes parámetros: Tres mil (3000) ciclos, temperatura del agua a sesenta grados centígrados (60 °C) y una presión de cincuenta (50) PSI.

Según estudios realizados por el fabricante (INSTROTEK), determinaron que el núcleo de asfalto no podía absorber más agua después de 3,000 a 3,500 ciclos, la temperatura se determinó según el "PG Grade", 60°C para PG64 y mayores. La presión fue determinada a partir de un estudio adelantado por la Universidad de Florida, en el cual se comprobó que el pavimento puede sentir de 15 Psi a 70 Psi de presión.

Se dio inicio al ensayo y el equipo empezó a inducir presión a las muestras, simulando la presión que las llantas de los vehículos ejercen en la mezcla asfáltica.



Figura 17. Especímenes acondicionamiento húmedo **Fuente:** (Guía de operación Equipo MIST InstroTek, Inc.)

Cuando terminó el ensayo, se retiraron las muestras del equipo y fueron llevadas al equipo de la Prensa Marshall para medir la resistencia a la tracción indirecta de cada una de ellas.



Figura 18. Ensayo Tracción indirecta **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

Por último se determinó el porcentaje de susceptibilidad al daño por humedad de las muestras asfálticas extraídas de campo y las elaboradas en el laboratorio.

5.2.5 Módulos Dinámicos.

Este ensayo se desarrolló teniendo en cuenta el procedimiento descrito en la norma INVIAS INV E 754-07. A continuación se describe el procedimiento realizado para las muestras de campo y las muestras realizadas en el laboratorio.

Se tomaron tres (3) briquetas con relación dos (2) a uno (1), de diez (10) centímetros de diámetro y veinte (20) cm de altura.



Figura 19. Briquetas módulos dinámicos **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

Este ensayo permite definir las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal, mediante el equipo MTS. Cada una de las briquetas fue ensayada a tres frecuencias y temperaturas diferentes: diez (10°), veinticinco (25°) y cuarenta (40°) grados centígrados y a un (1) hz, cuatro (4) hz y dieciséis (16) hz.

5.2.6 Ahuellamiento.

Las muestras extraídas de campo (2 panelas) y las elaboradas en el laboratorio (2 panelas), fueron ensayadas para obtener su resistencia a la deformación permanente, bajo los parámetros establecidos en la norma INVIAS INV E 756-07.

El ensayo de ahuellamiento permite determinar la resistencia a la deformación plástica, mediante mediciones constantes de la deformación que presenta la panela al ser sometida a una carga con una rueda que ejerce presión de contacto de $900 \pm 25 \text{ kN/m}^2$, a una temperatura de sesenta grados centígrados (60°) por un tiempo determinado.



Figura 20. Panela ahuellamiento. **Fuente:**(Presentación propia de los autores)

5.2.7 Fatiga.

El ensayo de Fatiga permite determinar el número de ciclos de carga que puede soportar una mezcla asfáltica al estar sometida a cargas repetitivas e idénticas (Di Benedetto & De la Roche, 2005).

Se tomaron veinticuatro (24) briquetas trapezoidales, doce (12) de las muestras extraídas de campo y doce (12) de las elaboradas en el laboratorio, las cuales fueron ensayadas a fatiga simple con deformación controlada, siguiendo los parámetros AASTHO T 321-03. El equipo utilizado para el desarrollo del ensayo utiliza un mecanismo de flexión por tracción, en donde se someten a un desplazamiento constante cuatro (4) briquetas trapezoidales fijadas en sus extremos (superior e inferior). El criterio de falla de cada una de las briquetas, está dado cuando el material llega al 50% de la carga inicial, pero es de anotar que si una biqueta falla antes de llegar al 50% del registro inicial, se considerará que dicha biqueta ha fallado.

Para el desarrollo de este ensayo, se utilizó una frecuencia de 10 Hz a temperatura ambiente (aproximadamente 20°C). Las briquetas fueron sometidas a una carga sinusoidal con (3) tres niveles de amplitud: 90µm, 150µm y 220 µm, para obtener las leyes de fatiga.



Figura 21. Ensayo Fatiga. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

5.2.8 Fase III.

En la última parte de este proyecto se determinó la susceptibilidad al daño por humedad de las muestras asfálticas, adicionalmente se analizó y se comparó los

resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados para las muestras extraídas de campo y las elaboradas en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana.

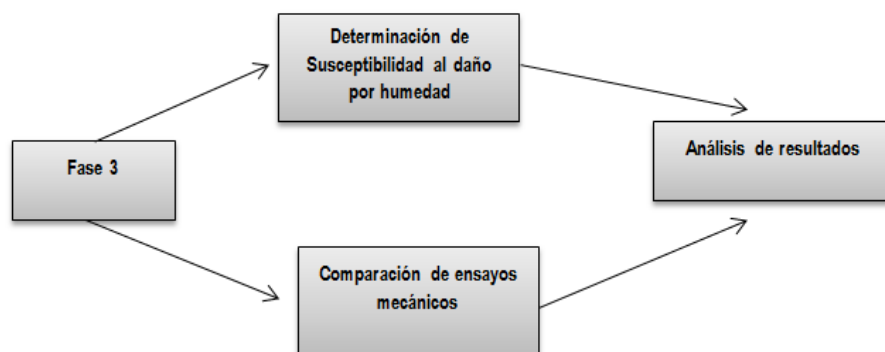


Figura 22. Diagrama Metodología FASE III. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA.

6.3.1 Ensayo S.A.R.A.

Este ensayo se realizó para el asfalto producto de la separación con el material granular de las muestras extraídas de campo, con el fin de realizar un análisis y comparación con el asfalto original.

Los resultados obtenidos en esta investigación, para el asfalto de las muestras de campo se indican en la tabla número 6.

	CAMPO
Asfaltenos	19.10%
Porcentaje de Maltenos (%)	88.34%
Saturados	16.63%
Aromáticos	25.38%
Resinas	38.70%
	99.81%

Tabla 6. Resultado ensayo SARA muestra de campo. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

Como se mencionó anteriormente los datos del asfalto original fueron tomados de las investigaciones Atencia (2011) y Cortes (2012), quienes evaluaron las características químicas en un asfalto original y asfaltos sumergidos en distintos períodos de tiempo. A continuación se relacionan.

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

Figura 23. Índice coloidal e índice de solubilidad asfaltos sumergidos en agua. **Fuente:** Atencia (2011) y Cortes (2012).

Los asfáltenos son moléculas aromáticas de alto peso molecular insolubles en solventes orgánicos, su presencia en los asfaltos es fundamental, pues de ellos dependen sus propiedades físicas y mecánicas. Los asfáltenos en proporciones adecuadas proporcionan al asfalto durabilidad, pero cuando las proporciones son mayores aumentan la viscosidad del asfalto y lo vuelven rígido. (Cortes, 2012)

A partir de los datos mostrados en la tabla 6 y en la Figura 23, se puede observar que los asfáltenos aumentaron 10.43% de 8.67% muestra original a 19.1% muestra de campo (24 meses), disminuyendo la resistencia a la oxidación de la mezcla asfáltica y volviéndolo más rígido.

Por otro lado, la ley coloidal que se expresa en las siguientes ecuaciones, se constituye a partir de las cuatro (4) fracciones obtenidas del análisis S.A.R.A. Los resultados que se presentan a continuación se hallaron para las muestras extraídas de campo.

- Índice Coloidal

$$IC = \frac{\text{Constituyente Floculado}}{\text{Constituyente Dispersados}} = \frac{\text{Saturados} + \text{Asfáltenos}}{\text{Aromáticos} + \text{Resinas}}$$

$$IC = 0.557$$

- Índice de Solubilidad

$$IS = \frac{\text{Resinas}}{\text{Asfaltenos}} + \frac{\text{Aromáticos}}{\text{Saturados}}$$

$$IS = 3.55$$

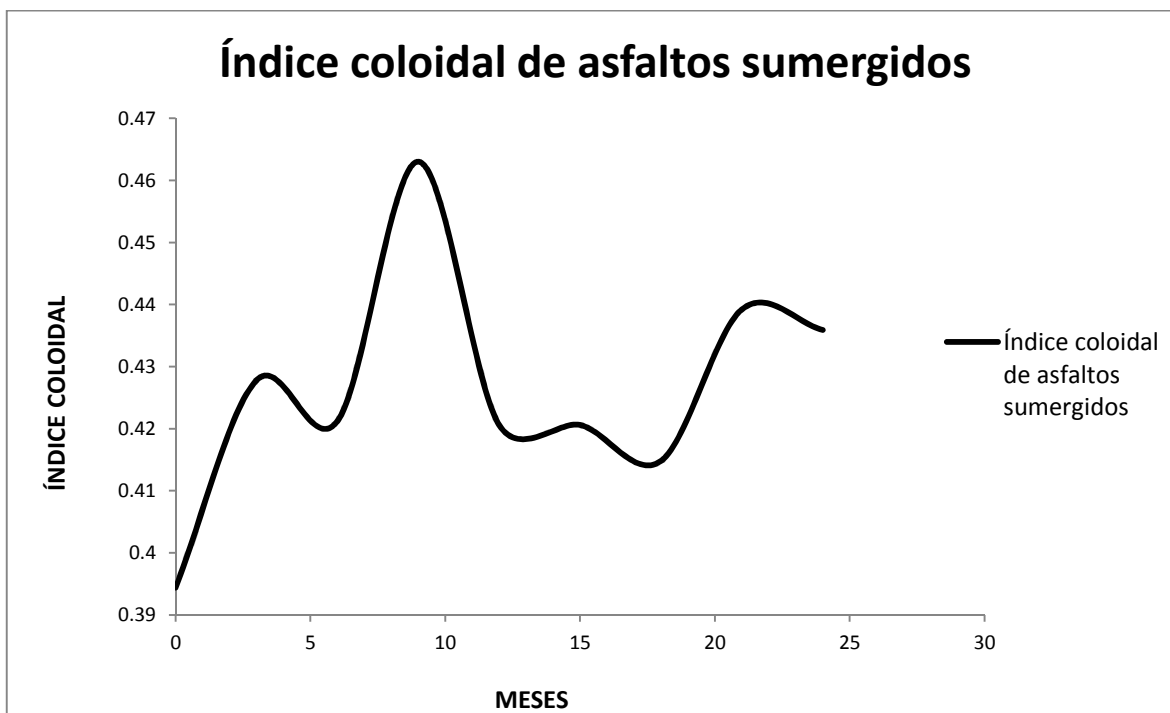


Figura 24. Proyección Índice coloidal a 24 meses. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

MESES	IC
0	0,3944
3	0,4278
6	0,4212
9	0,463
12	0,4206
15	0,4206
18	0,4148
21	0,4392
24	0,4359

Tabla 7. Datos Índice coloidal a 24 meses. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

En la figura No 24 se muestra la proyección realizada a 24 meses (2 años) del índice coloidal, con base en los datos obtenidos en la investigación de Atencia (2011) y Cortes (2012). El índice coloidal a los 24 meses dió como resultado 0,55 por lo que no es factible incluirlo en un línea de tendencia de la escala de tiempos de los asfaltos sumergidos, el resultado obtenido puede deberse a que el daño en campo de la muestra asfáltica es mas severo dado que se incluyen las presiones

del agua, la radiación UV y las presiones de tráfico, aspectos estos que no hacen parte de este estudio.

De la proyección realizada podemos determinar que los ensayos efectuados en el laboratorio, presentan valores menores a los encontrados en campo, lo cual nos indica que se deben desarrollar nuevas investigaciones que integren los diferentes factores a los que se ven sometidos los pavimentos en campo (Humedad, presiones, radiación UV) , que permitan obtener valores más cercanos a la realidad.

El índice de inestabilidad coloidal IC, indica el cambio de la estructura coloidal, de la susceptibilidad térmica y el grado de gelificación de los asfaltos, el cual experimentalmente se ha determinado un valor máximo de 0.6, por lo que se entiende que si este valor es mayor, el asfalto se comporta como del tipo gel y es más pobre su estabilidad coloidal. (Reyes, et al., 2007)

A partir de los resultados obtenidos encontramos que el asfalto extraído de las muestras de campo, cuentan con una estructura Gel (IC <0.6 Y IS < 3.5), indicando de esta forma que posee una baja estabilidad coloidal y una alta susceptibilidad térmica, producidas por la asociación de asfaltenos. (Martínez, et al., 2003)

Ambos índices dejan ver que el asfalto, a medida que pasaban los periodos de inmersión, tendía a tener un comportamiento tipo GEL. Esto lo podemos relacionar directamente con las muestras de campo, las cuales han estado expuestas a condiciones climáticas y de tráfico durante veinticuatro (24) meses aproximadamente, presentando un envejecimiento debido a la pérdida de volátiles y la oxidación de ciertas moléculas con la formación de interacciones fuertes entre grupos que contiene oxígeno. (Cárdenas & Fonseca, 2009).

6.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA.

6.2.1 Caracterización De Materiales Granulares De Campo Y Laboratorio.

El material granular es analizado según la normatividad INVIAS acogida en Colombia para las vías Nacionales, a continuación se presentan las curvas granulométricas resultado del ensayo realizado al material granular con que se

elaboraron las muestras de laboratorio y el material granular de campo resultado de la extracción realizada.

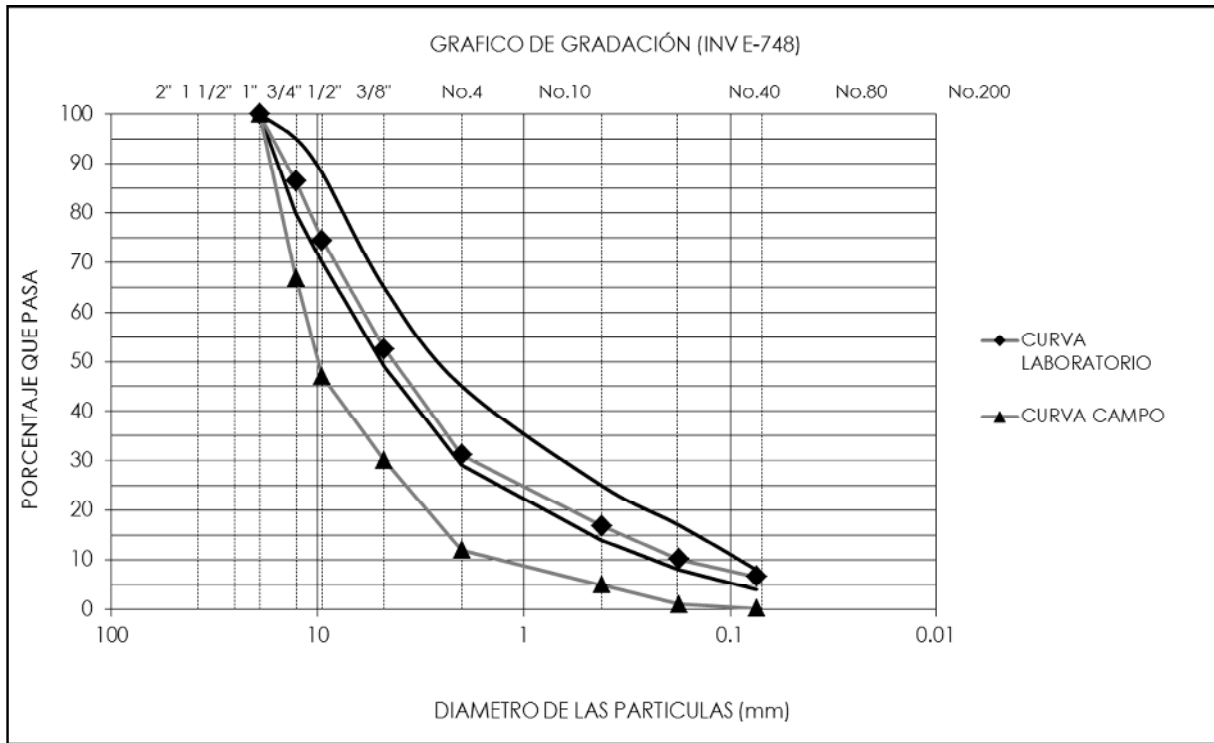


Figura 25. Curvas granulométricas material de campo y laboratorio. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

Como se muestra en la Figura 25, el material granular de campo está fuera de las curvas para un diseño mezcla MDC-2, esto ocurre debido al rompimiento de las partículas y a la pérdida de los finos que se presenta como consecuencia a las cargas de compactación y las cargas del tráfico que soportó la mezcla durante el tiempo de servicio, situación contraria se presenta en el material virgen analizado para la elaboración de las muestras de laboratorio, el cual se encuentra dentro de los límites establecidos.

Es importante anotar que la granulometría se desarrolló con los ensayos correspondientes según la normatividad INVIAS para mezclas asfálticas MDC-2 y Nivel de tráfico 3, el cual corresponde a nuestro tramo de evaluación.

Ensayo Requisitos mínimos de calidad INVIAS (2007a) – NT3 Resultado

Ensayo	Norma	Laboratorio	Cumple/No Cumple	Campo	Cumple/No Cumple	
Equivalente de arena	INV E-133	50 % mín	73%	Cumple	-	No Cumple
Límite líquido	INV E-126	NL	NL	Cumple	NL	Cumple
Límite plástico	INV E-126	NP	NP	Cumple	NP	Cumple
Caras fracturadas (1 cara)	INV E-227	85 % mín	89%	Cumple	94%	Cumple
Índice de aplanamiento y Aplanamiento	INV E-230	10 % máx	7,2%	Cumple	5,3%	Cumple
Micro-Deval	INV E-238	20 % máx	16%	Cumple	21%	No Cumple
Resistencia al desgaste en la máquina de Los Ángeles	INV E-218-219	25 % máx	24%	Cumple	23%	Cumple

Tabla 8. Caracterización material de campo y laboratorio. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

En la tabla número 8, se muestran los resultados de los ensayos realizados a los materiales granulares de campo y laboratorio, encontrando que el material de campo presenta una gran afectación conllevando al incumplimiento de algunos de los parámetros establecidos, por el contrario el material para la elaboración de las muestras en laboratorio cumple con los estándares establecidos.

Esto se debe a que el material granular de las muestras de campo, han soportado las cargas de tráfico y han estado sometidos a diferentes condiciones climáticas que afectan su desempeño físico dentro del concreto asfáltico.

6.2.2 Comprobación Diseño Marshall – % De Asfalto De Diseño Original.

DISEÑO MARSHALL			
CARACTERÍSTICAS	NORMA ENSAYO I.N.V.	MEZLAS DENSAS REQUISITO CATEGORIA	RESULTADOS MEZCLA MDC-2
Estabilidad mínima (Kg)	E-748	900	2,014
Flujo (mm)	E-748	2- 3.5	3.28
Vacíos con aire (Va) %	E-736	4- 6	5.44
Vacíos en los agregados minerales (VAM) %	E-799	> 15	15.39

Tabla 9. Diseño Marshall 6% de asfalto. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

Se realiza una verificación al diseño Marshall, partiendo del porcentaje % óptimo de asfalto de nuestra mezcla, el cual es conocido, 6%. Los resultados de la tabla número nueve (9), indican que los parámetros principales de una mezcla asfáltica

como son el flujo y la estabilidad están dentro de los requisitos de la norma para una mezcla MDC-2, así como el porcentaje de vacíos y vacíos minerales.

6.3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Como fue expuesto en el capítulo anterior, se realizaron ensayos mecánicos (MIST, TSR, ahuellamiento, módulos dinámicos y Fatiga) para las muestras extraídas de campo y las muestras elaboradas en el laboratorio. Los resultados obtenidos durante este proceso, se presentan a continuación de manera individual y posteriormente se realiza la comparación entre ellas.

6.3.1 Determinación De Susceptibilidad Al Daño Por Humedad (TSR-MIST).

En las tablas número 10 y 11, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos TSR y MIST para las muestras extraídas de campo.

TSR	HÚMEDAS	SECAS
Número de especímenes en cada subgrupo.	3	3
Promedio de vacíos con aire en cada subgrupo	9.30%	6.69%
Grado promedio de saturación después de la saturación parcial y acondicionamiento de humedad	78.30%	8.52%
Proporción de resistencia a la tensión. [Kpa]	714.85	1102.43
Relación de Resistencia a la tensión TSR	65%	

Tabla 10. Datos ensayo TSR muestras extraídas de campo.

A continuación se presentarán los datos obtenidos en los ensayos TSR y MIST para las muestras hechas en el laboratorio.

TSR	HÚMEDAS	SECAS
Número de especímenes en cada subgrupo.	3	3
Promedio de vacíos con aire en cada subgrupo	6.77%	7.52%
Grado promedio de saturación después de la saturación parcial y acondicionamiento de humedad	87.53%	23.05%
Proporción de resistencia a la tensión. [Kpa]	552.07	617.10
Relación de Resistencia a la tensión TSR	89.5%	

Tabla 12. Datos ensayo TSR muestras de Laboratorios

MIST	HÚMEDAS	SECAS
Número de especímenes en cada subgrupo.	3	3
Promedio de vacíos con aire en cada subgrupo	6.83%	7.69%
Grado promedio de saturación después de la saturación parcial y acondicionamiento de humedad	77.43%	23.05%
Proporción de resistencia a la tensión. [Kpa]	447.95	632.31
Relación de Resistencia a la tensión MIST	70.8%	

Tabla 13. Datos ensayo MIST muestras de Laboratorios

Las tablas número 12 y 13 muestran los resultados de los ensayos TSR y MIST realizados para determinar la susceptibilidad al daño por humedad de las muestras realizadas en el laboratorio. Dentro de los resultados obtenidos se observa que las muestras ensayadas con el equipo MIST no cumplen con el porcentaje mínimo admitido por la norma INVIAS 450-07, a diferencia de lo que sucede con las muestras ensayadas con el ensayo TSR. El resultado obtenido para este último ensayo, es muy similar al alcanzado por las muestras realizadas en el laboratorio Mario Huertas Cotes en el año 2010. (Ver figura 24).

Analizando los resultados obtenidos en los dos (2) ensayos mencionados anteriormente, se observa de forma clara que todas las muestras tanto de

laboratorio como las de campo, acondicionadas en el equipo MIST presentan una mayor afectación que las acondicionadas en el ensayo TSR.

El daño por humedad en una mezcla asfáltica es un problema de difícil identificación visual en una vía, teniendo en cuenta que se puede presentar por diferentes situaciones, tales como: ahuellamiento, desprendimiento de agregados, fisuras, grietas, etc, constituyéndose en el resultado de la humedad atrapada en la mezclas durante su fabricación o en la humedad que pudo penetrar desde la superficie o ascender desde la estructura general del pavimento, debilitando la unión agregados- ligante asfáltico, desplazando el ligante de los agregados, debido al ablandamiento que presenta a causa del proceso emulsificación. (Cheng & Huang, 2008). Lo descrito anteriormente se observa de forma clara en las muestras de campo que estuvieron afectadas por la humedad un mayor periodo de tiempo, obteniendo un desprendimiento del agregado y una mayor acumulación de daño.

Por otro lado, se observa que la capacidad de resistencia de carga en el grupo de “condición seca” de las muestras de campo aumenta con respecto a las muestras de laboratorio, esto se debe al proceso de oxidación que sufre el asfalto al haber estado sometido a condiciones de humedad. Este aumento se observa en menor medida en el grupo de “condición húmeda”, el cual se encuentra estrechamente influenciado por las características de su acondicionamiento, generando en las muestras de campo una mayor pérdida de cohesión y adhesión en la estructura interna de la muestra.

Este aumento de la capacidad en la resistencia a las cargas que se observa en el grupo de condición seca de las muestras de campo, comparadas con las muestras del laboratorio, se puede sustentar en el cambio de la composición química que presenta el ligante asfáltico, producido por el proceso de oxidación que experimentó en la muestras de campo, debilitando la unión ligante asfáltico agregado pétreo. (Ver Figura No 5 y No 6).

En la figura No 5 y No 6 en el capítulo anterior, se observa que los ensayos realizados al ligante asfáltico en los diferentes periodos de inmersión, indican un envejecimiento y un cambio de las propiedades físicas y químicas del ligante, debido a la acción del agua. Esta situación se observa igualmente en las muestras extraídas de campo (24 meses), las cuales presentan una rigidización del ligante, que se refleja en una mayor resistencia a la carga comparada con las muestras

realizadas en el laboratorio (Ver tablas 10, 11, 12 y 13), sin embargo este comportamiento de rigidización no mejora el desempeño de la mezcla, por el contrario genera un comportamiento frágil ante cargas externas.

Teniendo en cuenta que el ensayo MIST somete las muestras a esfuerzos de temperatura y presión elevados, generando una pérdida en la relación agregado-ligante asfáltico, los resultados arrojados no cumplen el parámetro mínimo de resistencia a la tracción indirecta (80%). Pues es de anotar que a la fecha de efectuará el ensayo MIST no existía un normatividad para este, por lo anterior se realizó con la metodología TSR que no tiene en cuenta el fuerte acondicionamiento de la cámara MIST.

6.3.2 Ensayo De Ahuellamiento. En la figura 27 se muestra el ahuellamiento obtenido para las muestras de campo y las muestras realizadas en el laboratorio. Estas curvas se obtuvieron a partir del promedio de las deformaciones obtenidas en cada una de las paneles que fueron sometidas a este ensayo.

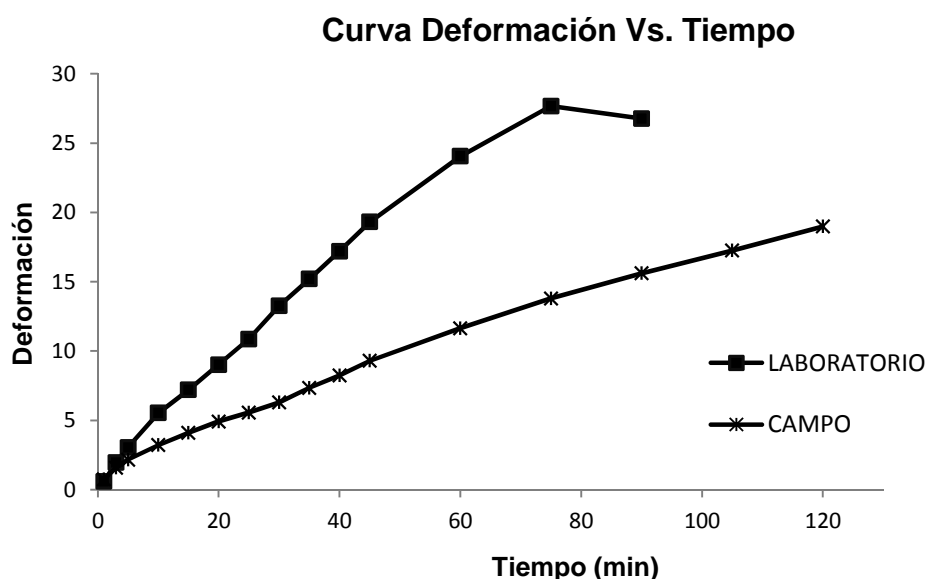


Figura 27. Resultados del ensayo de ahuellamiento. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

Como se observa, las paneles realizadas en el laboratorio alcanzaron una deformación mayor a una pulgada alrededor de los 70 minutos, sin poder llegar al

tiempo total de ensayo, a diferencia de las muestras de campo las cuales terminaron el ensayo y presentaron mayor resistencia al ahuellamiento.

De igual manera en la figura se observa que las muestras extraídas de campo presentan una reducción al ahuellamiento que alcanza el 48.44% a los 60 minutos del ensayo con respecto a la mezcla realizadas en el laboratorio. Teniendo en cuenta que las muestras de campo presentan cierto grado de rigidización, la resistencia a las deformaciones plástica es mayor presentando menores deformaciones, situación que es contraria en la muestras realizadas en el laboratorio por su condición original.

El comportamiento que experimentaron las muestras de campo se puede atribuir a la relación que existen entre el ligante asfáltico y el agregado pétreo en presencia del agua, en donde debido al proceso de envejecimiento y al cambio en las propiedades físicas, químicas y reológicas, el ligante asfáltico presenta un proceso de emulsificación (Little & Jones, 2003).

Con el fin de obtener un ligante asfáltico que no presente deformaciones permanentes, se debe usar un ligante asfáltico más duro con una buena resistencia al corte, pero que se comporte como un sólido elástico, que le permita recuperarse una vez sea e retirada la carga.

Un ligante con alta viscosidad reduce el efecto de ahuellamiento, pero pierde su capacidad elástica volviéndolo un material frágil y más susceptible a desintegrarse cuando está sometido a cargas. Este comportamiento se observa en los resultados obtenidos para los cementos asfálticos en diferentes periodos de inmersión (Ver Figura 6), indicando que con un mayor periodo de inmersión la ductilidad se reduce frente a la encontrada en una muestra original, situación que se observa en nuestra investigación al comparar la rigidización que se presenta en las muestras de campo frente a las muestras realizas en el laboratorio.

Debido a que en las muestras extraídas de campo se presenta un mayor porcentaje de asfaltenos comparado con el encontrado en las muestra de laboratorio (Ver Figura 5), en estas últimas se presentan mayores deformaciones permanentes debido a que el ligante asfáltico que da la solidez y la cohesión a la mezcla presenta menores viscosidades, tal como lo sustenta. (Fernández, et al., 2011)

6.3.3 Ensayo De Módulo Dinámico.

A continuación se indican los resultados obtenidos en el ensayo de Módulo Dinámico.

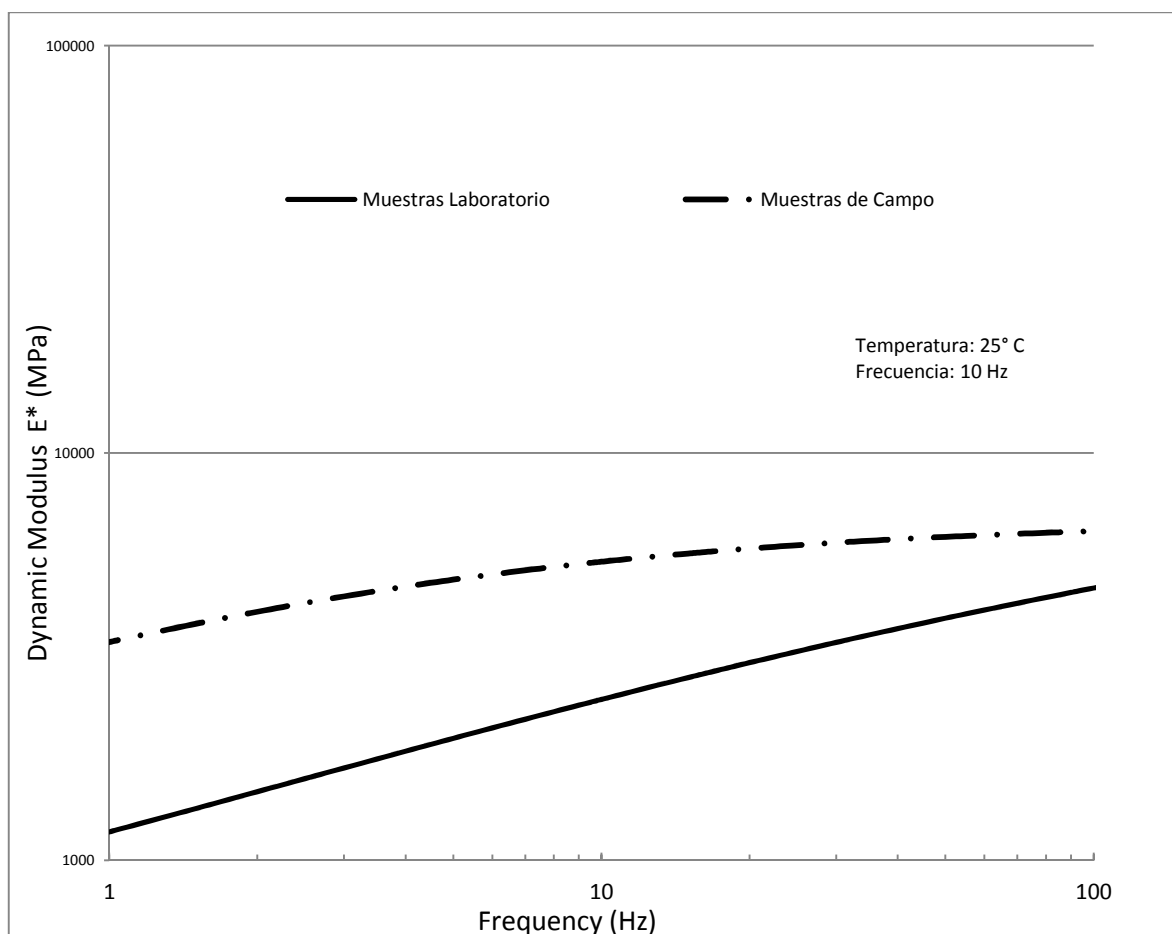


Figura 28. Resultados del ensayo de módulo dinámico. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

La figura 28 muestra la curva de módulo dinámico (E^*) versus la frecuencia de aplicación de carga de las muestras de campo y las desarrolladas en el laboratorio. En ella se observa que las muestras de campo presentan un mayor valor de módulo dinámico con respecto a los alcanzados por las muestras

realizadas en el laboratorio. De igual manera se observa en ambas muestras que el valor del módulo dinámico aumenta cuando aumenta la frecuencia.

Teniendo en cuenta que las muestras de campo presentan un mayor grado de rigidización que las muestras realizadas en el laboratorio, estas últimas presentan un menor esfuerzo para ser deformadas.

En el ensayo de módulo dinámico la frecuencia de carga y la temperatura a que son sometidas las muestras determinaran los esfuerzos y las deformaciones ya que las mezclas asfálticas tienen un comportamiento viscoelástico, por lo que los módulos se incrementan en la medida en que se disminuye la temperatura y se incrementa la frecuencia de aplicación de carga. (Reyes, 2003)

El módulo dinámico de una mezcla asfáltica con asfalto envejecido es superior al módulo dinámico de la mezcla elaborada con asfalto original como sucede en esta investigación que para la muestra de campo que ya tiene un tiempo de 24 meses de exposición su módulo dinámico es 5611MPa a una temperatura de 25°C y 16 Hz de frecuencia y para la muestra de laboratorio con asfalto original su módulo a esta misma temperatura y frecuencia es de 3283MPa lo que muestra un incremento del 70.91%.

Teniendo en cuenta que las muestras de campo presentan un mayor grado de rigidización que las muestras realizadas en el laboratorio, estas últimas presentan un menor esfuerzo para ser deformadas.

Con los datos obtenidos en el ensayo de Módulo Dinámico en la MTS se realizan las curvas maestras utilizando el modelo CAM modificado de cada tipo de asfalto en esta investigación campo y laboratorio para así determinar a una temperatura de 25°C y 10Hz de frecuencia los módulos dinámicos de la mezcla asfáltica de campo y de laboratorio obteniendo como resultado en la muestra de laboratorio un módulo dinámico igual a 4350 MPa y en la muestra de campo un módulo dinámico de 7200 MPa que indica un incremento en la rigidización de la mezcla asfáltica equivalente al 65.5%.

A su vez estos resultados pueden ser comparados con el aumento de los asfáltenos en la muestra de campo resultado de la rigidización del material producto de la exposición durante 24 meses a condiciones ambientales

especialmente de humedad, la muestra de laboratorio realizada con un asfalto original por el contrario cuenta con un mayor módulo dinámico. (Cortes, 2012)

6.3.4 Ensayo De Fatiga.

Al igual que los ensayos mecánicos anteriormente mencionadas, se realizaron ensayos de resistencia a la fatiga para las muestras extraídas de campo y las fabricadas en el laboratorio. A continuación se presentan los resultados de los ensayos de manera independiente y posteriormente se realizará comparación de los comportamientos

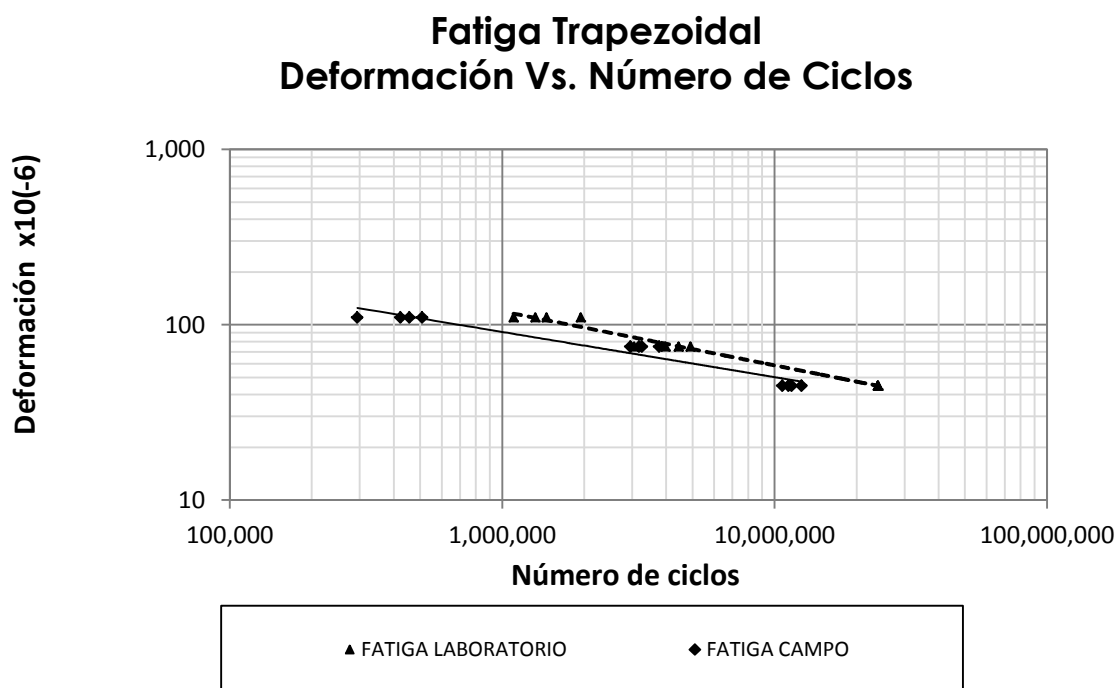


Figura 29. Resultados del ensayo de Fatiga. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

De acuerdo con la metodología seleccionada para esta investigación, se realizaron ensayos de fatiga tipo flexión simple con deformación controlada y cuyos resultados se presentan en la Figura 29.

A partir de los resultados obtenidos se observa que cuando aumenta el envejecimiento de las muestras asfálticas, las líneas de fatiga se desplazan de manera significativa hacia la izquierda del gráfico disminuyendo así, el número de ciclos y por consiguiente su resistencia a la fatiga. De igual manera se observa que las muestras de campo presentan una menor pendiente en comparación con la pendiente de las muestras de laboratorio, esto indica que las muestras de laboratorio necesitaron mayor número de ciclos para llegar a la falla por fatiga. De igual manera se observa que la línea de fatiga de las muestras de campo está ubicada en la zona izquierda de la gráfica mostrando que necesitan menor número de ciclos para llegar a la falla por fatiga.

Como se menciona en el marco de antecedentes las investigaciones han determinado que el incremento de la rigidez en las mezclas asfálticas reduce su vida de fatiga, esto es lo que puede verse en la figura No 29, con la muestra de campo ya que ha estado expuesta a las condiciones climáticas y de tráfico por aproximadamente dos (2) años.

FATIGA CAMPO	
ϵ_6	126.28
b	-0.226
α	4.42
FATIGA LABORATORIO	
ϵ_6	78.794
b	-0.296
α	3.38

Tabla 14. Resultados del ensayo de Fatiga. **Fuente:** (Presentación propia de los autores)

La vida a la fatiga de la mezcla asfáltica MDC-2 analizada en el tiempo disminuyó en un 37% en los dos (2) años de su instalación:

$$\epsilon_{m\acute{a}x} = \frac{\epsilon_{m\acute{a}x \text{ LABORATORIO}} - \epsilon_{m\acute{a}x \text{ CAMPO}}}{\epsilon_{m\acute{a}x \text{ LABORATORIO}}} = \frac{126.28 - 78.794}{126.28} = 0,37$$

Las condiciones climáticas a que fue expuesta y las cargas de tráfico generaron esta pérdida en la mezcla, en los antecedentes citados en el marco de antecedentes, la pérdida fue de 55 a 64% en 29 meses, puede llegar a ser un dato cercano si se analiza que es un poco de tiempo más en el que la mezcla pueda hacerse más rígida.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a la revisión literaria desarrollada y al aporte de esta investigación, las mezclas asfálticas a nivel nacional presentan un daño prematuro con respecto al tiempo de diseño, por lo anterior es importante evaluar por qué a pesar de que los materiales y el producto final cumplen la normativa colombiana presentan una corta vida de servicio.

Analizada la información obtenida a partir de los ensayos mecánicos (MIST y TSR) en las muestras extraídas de campo y las de laboratorio, se puede concluir que el ensayo TSR no simula totalmente las condiciones encontradas en campo, pues dicho ensayo contempla un acondicionamiento parcial de las muestras y no tiene en cuenta el efecto del tráfico en las mismas. En esta investigación se utilizó un nuevo método para determinar la susceptibilidad al daño por humedad en las mezclas asfálticas, el cual en el momento del ensayo no se encontraba reglamentado, pero con este proyecto de investigación, se puede indicar que el ensayo MIST al contemplar el uso de presiones y estar inmerso en agua se aproxima más a la condición de campo salvo que no tiene la radiación UV, el TSR solamente contempla la humedad sin presión, luego el ensayo MIST es más representativo de la realidad de los pavimentos en campo.

En junio de 2013 se aprobó la norma ASTM D7870-13, para el desarrollo del ensayo MIST, en donde se parametrizaron los siguientes valores: Presión 40 PSI, Temperatura 60° grados y número de ciclos 3500. Teniendo en cuenta que estos parámetros difieren con respecto a los utilizados en esta investigación, se deberían adelantar nuevos estudios que permitan determinar si estas variaciones son significativas tanto en las muestras originales como en a las muestras envejecidas.

Por otro lado, se encontró que los ensayos utilizados en los laboratorios para analizar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas (ensayo de ahuellamiento, módulos dinámicos y fatiga), no analizan algunas características que presentan las mezclas asfálticas cuando ya cuentan con una vida de servicio, como es la rigidización que van adquiriendo las mezclas asfálticas con el envejecimiento, llevándolas a su pronta fractura, por eso se hace necesario investigaciones que permitan la evaluación del desempeño de las mezclas asfálticas integrando las condiciones climáticas, cargas y tiempos de exposición.

En el ensayo de ahuellamiento se encontró que un pavimento presenta mayores deformaciones cuando no ha estado expuesto a factores abrasivos como tráfico, condiciones ambientales, entre otros, esto debido a como se ha visto a lo largo del desarrollo de esta investigación, el material tiende a rigidizarse condición que genera deformaciones plásticas en donde la mezcla ya no se recupera, por el contrario puede acercarlo a su pronta fisuración.

Un ensayo más que confirma lo anteriormente expuesto, es el ensayo SARA ya que en este, la característica principal de un asfalto que se encuentra en un estado rígido es el porcentaje de asfáltenos, tomando como base para el análisis de este resultado la investigación Atencia (2011) y Cortes (2012), evidenciando que este porcentaje aumenta a medida que el asfalto presenta una oxidación por el tiempo, medio y condiciones en que se encuentre. El período de la muestra de campo, materia de esta investigación es de 24 meses y su porcentaje de asfáltenos en comparación con los asfáltenos de un asfalto original se incrementan en un 220%.

De conformidad a lo mencionado anteriormente, se hace necesario continuar con investigaciones que sirvan de soporte para encontrar ensayos y/o métodos que permitan integrar la mayor cantidad de factores que afectan la mezcla asfáltica, después de un periodo de servicio.

BIBLIOGRAFÍA

- Airey, G.D., Collop, A.C., Zoorob, S.E., Elliott R.C. (2007). The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. *Construction and building materials*. Volume 2. 2015 – 2024
- Atencia, O.L. (2011). Análisis de los Procesos de Oxidación de Asfaltos Colombianos en Inmersión Bajo Agua. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- Buchanan, M. S., Moore, V. M. (2005). Laboratory Accelerated Stripping Simulator for Hot Mix Asphalt. Transportation research board of the national academies
- Catriel, G.A. (2008). Envejecimiento de un cemento asfáltico durante el proceso constructivo de una mezcla asfáltica. Universidad Tecnológica Nacional. 3
- Chen, X., Huang, Baoshan. (2008). Evaluation of moisture damage in hot mix asphalt using simple performance and superpave indirect tensile tests. Construction and Building Materials. Volume 22. 1950-1962
- Cortes, A. (2012). Análisis del proceso de oxidación del asfalto colombiano 80/100 en inmersión bajo agua: Período 12-21 meses. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- ECOPETROL S.A.. Informe final prueba para el mejoramiento de la calidad del asfalto de la refinería Apiay. (2012). 11
- Epps, J.A., Sebaaly P.E., Penaranda J., Maher M.R., Mccann M.B., Hand, A.J. (2000). Compatibility of a test for moisture-induced damage with Superpave volumetric mix design. National cooperative highway research program. Report 44.
- Fernández, W., Rondón, H., & Reyes, F. (2011). Envejecimiento de Asfaltos y Mezclas Asfálticas: Estado del conocimiento.

-
- Higuera, C.H., Naranjo, G.M., Cetina, J.F. (2011). Determinación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica por correlaciones. Revista Facultad de Ingeniería UPTC. Volumen 20. 41-54.
- Kanitpong, K., Bahia, H. U. (2008). Evaluation of HMA moisture damage in Wisconsin as it relates to pavement performance. International Journal of Pavement Engineering, 9–17
- INVÍAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS 2007. , Pub. Resolución número 3288 (2007).
- INVÍAS. NORMAS DE ENSAYO PARA CARRETERAS 2007. , Pub. Resolución número 3290. (2007).
- Nieto, J.P. (2010). Criterios de valorización de capas asfálticas en caliente para carpetas asfálticas y resistencia al ahuellamiento. Universidad Tecnológica Nacional. Centro de investigación vial. 1-38
- Pardo, C. (2013). Mantenimiento de 22 vías genera puja por \$1.2 billones. Publicado Portafolio. Economía.
- Patiño, G., Ovalles F., Gutiérrez F. (2003). Estudio e investigación del estado actual de las obras de la Red Nacional de Carreteras. Universidad Nacional de Colombia. Instituto Nacional de Vías.
- Peréz, G. (2012). Métodos prácticos para determinar la sensibilidad al agua en las mezclas asfálticas. Revista vías terrestres edición No 16.
- Reyes, F.A., Madrid, M.F., Salas, S.X. (2007). Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100). Pontificia Universidad Javeriana Infraestructura Vial. No 17.
- Rondón, H.A., Moreno, L.A. (2010). Influencia del agua en el fenómeno de stripping en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante. Universidad Militar Nueva Granada DIS 406. Universidad Católica de Colombia PIC 158C. 297-312.

Rondón, H.A., Reyes, F.A., Vacca, H.A. (2010). Caracterización dinámica de una mezcla asfáltica sometida a las condiciones ambientales de Bogotá. Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia No 14. 135-145.

Salomón, O., Oñate, E. (1999). Thermomechanical fatigue analysis base on continuum mechanics. Centro Internacional de Métodos Numéricos de Ingeniería. 133-143.

Solaimanian, M, 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. 77-113.