

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL AGUA EN VIGAS DE CONCRETO
ASFÁLTICO BAJO CONDICIONES INDUCIDAS DE HUMEDAD**

VIVIANA MARCELA PEREZ RODRIGUEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2012**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL AGUA EN VIGAS DE CONCRETO
ASFÁLTICO BAJO CONDICIONES INDUCIDAS DE HUMEDAD**

VIVIANA MARCELA PEREZ RODRIGUEZ
Ingeniera Civil

**Trabajo de grado para optar al título de
Master en Ingeniería Civil**

Director
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN
Doctor en Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA

2012

*A Dios por la segunda oportunidad
que me ha dado en la vida para
aprovecharla y retribuir de alguna manera
a la sociedad.*

*A mi familia y mis seres más
queridos por apoyarme en todo momento y
acompañarme todo el tiempo.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por disponer lo necesario en mi favor, por acompañarme siempre, por darme la oportunidad de continuar con mi vida y mis estudios.

A mi familia por apoyarme en todo, estar en los momentos más importantes para mí, y guiarme en las decisiones tomadas.

A una persona muy especial en mi vida que me apoyó de diferentes maneras en este tiempo de estudio, y lo amo con todo mi corazón JT.

Al Ingeniero Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, por su gran interés y tiempo dedicado en este proyecto de Grado, por sus aportes de conocimiento y experiencia para el buen desarrollo del mismo.

A Cristina "Riveiro" quien se inspiró en más de una frase en este libro y me ayudó a culminar esta meta.

A Jairo y Jaime los laboratoristas que siempre estuvieron apoyando la

A la universidad y mis profesores que me orientaron manteniendo principios y valores, buscando mi promoción como profesional y personal, a través de diferentes herramientas de carácter material e intelectual.

A Ludwing Pérez por su amistad incondicional en este tiempo, por ser tan servicial y amable con todos, y por la buena compañía al almuerzo.

A los estudiantes de pregrado con los que trabaje en proyectos de investigación que sirvieron de aporte a mi tesis.

A mis amigos con quienes compartí en la universidad y a todas las personas que me ayudaron a lograr esta meta.

CONTENIDO

INTRODUCCION	17
1. OBJETIVOS.....	20
1.1 GENERAL	20
1.2 ESPECÍFICOS.....	20
2. GENERALIDADES CONCEPTUALES.....	21
2.1. CONCRETO BITUMINOSO	21
2.2. DEGRADACIÓN DEL CONCRETO ASFÁLTICO.....	23
2.1.1. Agrietamiento por temperatura.....	23
2.1.2. Agrietamiento por fatiga	24
2.1.3. Ahuellamiento	25
2.1.4. Efecto del Agua.....	26
2.2. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS	27
2.2.1. Caracterización Tradicional del Concreto Asfáltico	29
2.2.2. Caracterización dinámica del Concreto asfáltico.....	31
2.3. MODELAMIENTO DINÁMICO DEL CONCRETO BITUMINOSO	36
2.3.1. Modelo de Kelvin-Voigt	36
2.3.2. Modelo de Maxwell.....	37
2.3.3. Modelo de Huet – Sayegh (1965)	37
2.4. DETERIORO DEL CONCRETO ASFALTICO POR EFECTO DEL AGUA	44
2.4.1. Adhesión entre el Agregado y el Asfalto	45
2.4.1.1. Adhesividad activa	46
2.4.1.2. Adhesividad Pasiva	48

2.5. ENSAYOS PARA EVALUAR EL EFECTO DEL AGUA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	52
2.5.1. ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	53
2.5.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	54
2.6. EL MÓDULO COMPLEJO PARA EVALUAR EL EFECTO DEL AGUA .	56
2.6.1. Metodología de cuantificación de deterioro del material.	58
3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL	60
3.1. IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYO EN VIGAS DE CONCRETO ASFÁLTICO	60
3.1.1. Descripción del ensayo de flexión en cuatro puntos	61
3.1.2. Diseño y montaje del dispositivo estructural	62
3.2. FABRICACION DE PROBETAS	66
3.3. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS.....	67
3.3.1. Agregados.....	67
3.3.2. Ligante Asfáltico:.....	68
3.3.3. Diseño del experimento.....	68
3.4. METODOLOGÍA DEL ENSAYO	72
3.4.1. Comportamiento de variables en el ensayo	73
3.4.2. Interpretación de los datos	75
4. ANALISIS DE RESULTADOS	78
4.1. CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	78
4.2. EVALUACIÓN DE LA RIGIDEZ.....	80
4.2.1. Método tradicional.....	80
4.2.2. Evolución de la rigidez en el Plano Complejo	83
4.3. FACTOR DE DEGRADACIÓN DE LA MEZCLA (FA)	86

4.3.1.	Factor de deterioro en el plano Cole - Cole.....	86
4.3.2.	Factor de deterioro en el Espacio de Black.....	92
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
6.	BIBLIOGRAFÍA	107

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Componentes de una mezcla asfáltica.	22
Tabla 2. Valores límites a tener en cuenta en la metodología Marshall.	30
Tabla 3. Tipos de ensayos para determinar el módulo complejo en mezclas asfálticas.....	40
Tabla 4. Ensayos destructivos para evaluar el efecto del agua.	53
Tabla 5. Ensayos no destructivos para evaluar el efecto del agua	54
Tabla 6. % Material Contaminado por Placa	69
Tabla 7. Factores y niveles para el diseño del experimento.....	72
Tabla 8. Número de ciclos para la prueba	74
Tabla 9. Caracterización Volumétrica de las muestras ensayadas.	79
Tabla 10. Variación de la rigidez evaluada para diferentes temperaturas.	81
Tabla 11. Resultados de módulo de P1-8.10%	84
Tabla 12. Factores de deterioro FA para las diferentes mezclas. – Angulo de Evaluación θ	87
Tabla 13. Factores de deterioro para las diferentes mezclas.	88
Tabla 14. Variación de Resultados	92
Tabla 15. Factor FA P3-2-2.5%	94
Tabla 16. Resultados obtenidos evaluando E_{∞} en el diagrama de Black.....	95
Tabla 17 Variacion de Resultados.	98
Tabla 18. Variación del Factor FA (72 Horas)	100
Tabla 19. Evaluación del Factor de Deterioro Calculado Vs. Valor esperado.....	100

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Composición de la mezcla asfáltica.....	22
Figura 2. Fatiga por temperatura	24
Figura 3. Agrietamiento por fatiga.....	25
Figura 4: Deformación permanente y ahuellamiento en pavimentos flexibles	26
Figura 5. Comportamiento Visco- Elástico del concreto asfáltico.....	27
Figura 6. Comportamiento de una mezcla asfáltica, según la deformación y el número de ciclos aplicados	28
Figura 7. Comportamiento de una mezcla asfáltica en función de su deformación y temperatura..	29
Figura 8 Equipo de Carga Marshall.	30
Figura 9. Plano del módulo Complejo.....	32
Figura 10. Ángulo de desfase en el concreto asfáltico.	33
Figura 11. Señales de carga y deformación	35
Figura 12. Modelo generalizado de Kelvin.....	37
Figura 13. Modelo de Maxwell generalizado.	37
Figura 14. Valores Calculados E_{∞} y E_0 en el diagrama de Black.	39
Figura 15. Deterioro del pavimento por efecto del agua.....	44
Figura 16. Tensión superficial y el ángulo contacto entre el agregado y el asfalto.	46
Figura 17. Adhesividad Activa	47
Figura 18. Adherencia entre el agregado y el asfalto	48
Figura 19. Adhesividad Pasiva	49
Figura 20. Falta de cohesión y alta adhesividad Pasiva.....	49
Figura 21. Baja adhesividad.....	50
Figura 22. Tipos de ensayos.....	52
Figura 23. Plano complejo de Cole –Cole	56
Figura 24. Deterioro del Concreto asfáltico en el plano complejo.	57
Figura 25. Representación gráfica de módulo en el Diagrama de Black.	58
Figura 26. Metodología de Evaluación	59
Figura 27: Apoyo en 4 puntos y aplicación de carga.....	61
Figura 28: Equipo de Carga MTS – 810	62
Figura 29: Dispositivo estructural.....	64
Figura 30: Dimensiones de la Viga o Probeta	65

Figura 31: Diseño Elemento Estructural	65
Figura 32. Placas de concreto asfáltico.	66
Figura 33. Cortadora de Placas	67
Figura 34. Granulometría Utilizada para la fabricación de placas.	68
Figura 35. Agregados utilizados en la mezcla en diferentes proporciones	69
Figura 36. Agregados limpios y contaminados cubierto con asfalto	70
Figura 37. Degradación del Agregado después de un proceso de inmersión de 18 horas	71
Figura 38. Procedimiento experimental	73
Figura 39. Cámara de temperatura del Equipo de Carga.....	75
Figura 40. Resultados Iniciales del Equipo.....	76
Figura 41. Hoja de Cálculo.....	77
Figura 42. Identificación de probetas	79
Figura 43. Variación de la Rigidez P2-1-0%	82
Figura 44. Curvas de modulo para la viga P1-8-10% en el plano Cole - Cole	83
Figura 45. Evolución de la rigidez en el Espacio de Black para la probeta P1-8-10%.....	85
Figura 46 Comparación de curvas de y niveles de degradación en el plano Cole – Cole	87
Figura 47. Degradación de las probetas para diferentes tiempos de inmersión en agua.	88
Figura 48. Degradación de las probetas para diferentes tiempos de inmersión en agua.	89
Figura 49. Factor FA Vs % de contaminación en probetas.	90
Figura 50. Repetitividad del ensayo evaluando la rigidez en el plano Cole – Cole.....	91
Figura 51. Resultados P3-2-2.5% en el diagrama de Black	92
Figura 52. Funciones a trabajar en el diagrama de Black	93
Figura 53. Evaluación del factor FA en el diagrama de Black	94
Figura 54. Factor FA Vs % de contaminación en probetas.	96
Figura 55. Repetitividad del ensayo evaluando la rigidez en el diagrama de Black	97
Figura 56. Factor FA para la mezclas.....	99
Figura 57. Deterioro observado en las mezclas después de 72 Horas.....	102

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Cálculo de Módulos en vigas Ensayadas - Procesos de inmersión	111
Anexo B. Curvas de Módulo con Factores de Degradación.....	119
Anexo C. Hoja de Cálculo de módulo dinámico.....	123
Anexo D. Factores de deterioro calculados en las probetas analizadas	124

TITULO: Evaluación del efecto del agua en vigas de concreto asfáltico bajo condiciones inducidas de humedad.*

AUTOR: Viviana Marcela Pérez Rodríguez. **

PALABRES CLAVE: Concreto Asfáltico, agua, deterioro, módulo complejo, vigas, flexión.

El agua es uno de los agentes que produce daño sobre la carpeta asfáltica aumentando la velocidad de degradación en la vida útil del pavimento debido a la filtración entre los poros de la mezcla asfáltica ocasionando la pérdida de adhesión entre el asfalto y el material granular, característica visible en la red vial Colombiana, la cual es afectada por las precipitaciones que se presentan en las regiones.

Esta investigación plantea validar una metodología para evaluar el efecto del agua en el concreto asfáltico, a partir de ensayos no destructivos en vigas, determinando las características visco-elásticas del material, a través de la evolución de la rigidez en el plano de módulo complejo.

Para establecer el efecto del agua se fabricaron 16 probetas, combinando 4 factores en su diseño: contenido de asfalto, gradación, fuente del material granular, y tiempos de inmersión en agua. Los especímenes fueron sometidos a una carga de flexión en 4 puntos (Máquina de Ensayos Universales MTS 810) variando la frecuencia de aplicación de la carga entre 1, 3, 5, y 10 Hz y la temperatura entre 0, 10, 20 y 30 °C. Se realizaron ensayos de módulo complejo a las mezclas asfálticas antes y después de los ciclos de inmersión en agua para determinar la evolución de la rigidez del material. A partir de lo anterior, se logró establecer que las mezclas con mayores tiempos de inmersión presentaron mayor deterioro con respecto a las que no fueron sometidas al efecto del agua, y una relación entre la pérdida de adherencia del asfalto y el agregado mineral, de esta forma, se definió un factor de daño (FA) para calcular el deterioro del concreto asfáltico por efecto del agua.

*Proyecto de Grado para optar por el título de Master en Ingeniería Civil.

**Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora Hebenly Celis Leguizamo.

TITLE: Evaluation of the effect of water on low beams asphalt concrete induced moisture conditions.*

AUTHOR: Viviana Marcela Pérez Rodríguez.**

KEYWORDS: Asphalt Concrete, water, damage, complex modulus, beams, bending.

Water is one of the most harmful agents on the asphalt, because it increases the rate of degradation in the road surface life; this is a clear and visible characteristic in the Colombian road network which has been affected by long periods of rain, getting a leak of water among the pores of the asphalt. This leak causes loss of adhesion between asphalt and granular material. This research raises validate a methodology to evaluate the effect of water on asphalt concrete girder with nondestructive testing, monitoring of visco-elastic characteristics through the evolution of rigidity module materials complex plane.

To establish the effect of water, 16 samples were fabricated, combining 4 factors in their design: asphalt content, gradation, source of material granular, and times of immersion in water. The specimens were subjected to compression and tensile loads (MTS Universal Testing Machine 810) by varying the load application frequency between 1, 3, 5 and 10Hz and temperatures among 0, 10, 20 and 30 °C. The complex module tests to the asphalt mixtures were made before and after immersion cycles in water to determine the evolution of the materials stiffness'. Due to that, it was established that mixtures with higher immersion times showed more deterioration compared to those which were not subjected to water effect, and also a relationship between loss of adhesion of asphalt to mineral aggregated, in this way a factor damage was defined (FA), in order to calculate the asphalt concrete deterioration due to water.

*Graduation project to qualify for the title of Master of civil engineering

**Faculty of Engineering Physical Mechanical. School of Civil Engineering. Director Hebenly Celis Leguizamo.

INTRODUCCIÓN

En Colombia, la mayoría de las carreteras son diseñadas y construidas con pavimentos flexibles; sin embargo en los diseños no se consideran algunos efectos negativos del medio ambiente sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas, generando riesgos para el correcto comportamiento de las estructuras de pavimento. Los principales factores de deterioro en las mezclas asfálticas pueden ser asociados a fuertes cambios de temperatura, a la carga aplicada por el tránsito, y al efecto del agua sobre la misma.

En países tropicales como Colombia, el agua es un agente que deteriora la carpeta asfáltica y reduce notablemente la vida útil del mismo; cuando el agua se infiltra en los poros de la mezcla asfáltica provoca un nivel de degradación en los materiales, y ocasiona la pérdida de adhesión entre el asfalto y el material granular.

En algunos países se han desarrollado metodologías para evaluar el efecto del agua en materiales bituminosos, y determinan la sensibilidad de los mismos a través del estudio de la rigidez visco-elástica en el plano complejo, aplicando ensayos de módulo dinámico en probetas trapezoidales.

Esta investigación plantea validar la metodología con ensayos de módulo complejo en otro tipo de probetas y materiales que presenten poca diferencia en su naturaleza y sus proporciones. El ensayo permitirá diferenciar los materiales que presentan mayor deterioro, y así, establecer la diferencia del deterioro por efecto del agua en los mismos.

El documento está compuesto por 6 capítulos, los cuales se describen brevemente a continuación:

Capítulo 1 y 2. Introducción y objetivos: Presenta el planteamiento del problema y las consideraciones que dieron origen al presente trabajo de investigación, el objetivo y alcance del proyecto.

Capítulo 3. Generalidades Conceptuales: Se presenta la revisión bibliográfica realizada en esta investigación. Primero se analiza el comportamiento de las mezclas asfálticas, teniendo en cuenta su composición, la influencia de variables como el clima, la calidad de los materiales, el tráfico y el agua entre otros. Se exponen algunas metodologías para caracterizar la respuesta mecánica de las mezclas, los modelos dinámicos que se pueden aplicar; el deterioro que ocasiona el agua en el concreto bituminoso, los ensayos para determinar este deterioro y la aplicación del módulo complejo para evaluar la degradación de la rigidez en los materiales por efecto del agua.

Capítulo 4. Campaña experimental: En este capítulo se presenta la metodología y el diseño del ensayo de módulo complejo para evaluar el efecto del agua en las mezclas asfálticas estudiadas. Primero se describe el proceso de implementación del ensayo de módulo complejo aplicado en vigas de concreto asfáltico, el procedimiento empleado en la fabricación de probetas y la caracterización de los materiales utilizados, por último, se aplica la metodología de ensayo utilizada para evaluar el efecto del agua en las mezclas bituminosas.

Capítulo 5. Resultados y Análisis: se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas y los factores de deterioro para cada tipo de mezcla asfáltica analizada en este estudio.

Capítulo 6. Conclusiones y Observaciones: Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en esta investigación, se presentan las conclusiones y puntos de vista que dan claridad y cumplimiento al objetivo de la tesis.

1. OBJETIVOS

Para el desarrollo de esta investigación se estableció un objetivo general y tres objetivos específicos, que se presentan a continuación.

1.1 GENERAL

- Validar una metodología para evaluar el efecto de la acción del agua en concreto asfáltico con probetas tipo viga y ensayos no destructivos bajo condiciones de humedad inducida.

1.2 ESPECÍFICOS

- Estudiar la degradación y la sensibilidad al efecto del agua en mezclas asfálticas sometidas a procesos de inmersión en agua.
- Determinar variaciones en la rigidez de un concreto asfáltico por efecto del desprendimiento del ligante de la superficie del agregado.
- Determinar el efecto de la temperatura en el daño por humedad en mezclas bituminosas.

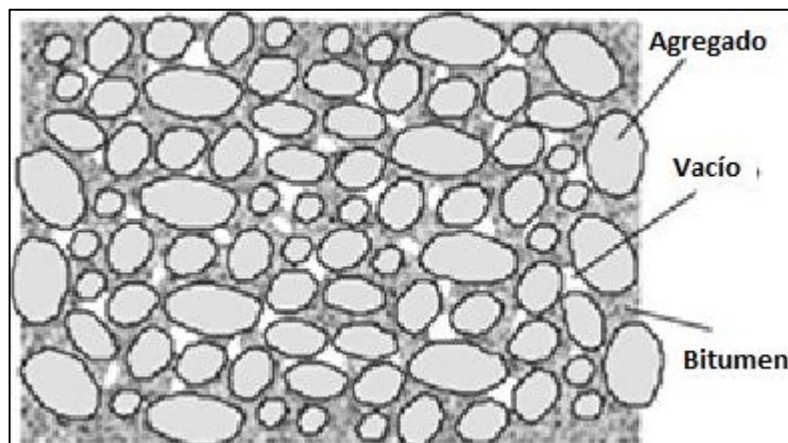
2. GENERALIDADES CONCEPTUALES

Los pavimentos son estructuras multicapa construidos para permitir la circulación cómoda y segura de los vehículos en las vías. Existen diferentes tipos de pavimento, como los flexibles, rígidos, articulados y semirrígidos, sin embargo vale la pena aclarar que uno de los más utilizados son los pavimentos flexibles por que ofrecen durabilidad, resistencia y economía. La estructura del pavimento se compone básicamente de una capa de rodadura, una base, y una sub-base granular. La capa de rodadura en pavimentos flexibles, resiste directamente las cargas transmitidas por el tráfico de vehículos y soporta los efectos climáticos a los que está expuesta, es el resultado de la combinación de agregado, asfalto y vacíos llenos de aire, y se conoce como mezcla asfáltica o concreto bituminoso.

2.1. CONCRETO BITUMINOSO

Es una combinación de asfalto, agregados pétreos y vacíos llenos de aire, que forman un material de propiedades visco-elásticas. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, el rendimiento para un uso determinado. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta un esquema de la composición de una mezcla asfáltica tipo.

Figura 1. Composición de la mezcla asfáltica.



FUENTE: (Dai & You, 2006)

Estas mezclas asfálticas pueden ser fabricadas en plantas y con equipos apropiados para esta labor. Según sus propiedades y espesores de capa, se considera que aportan capacidad estructural al pavimento. En la Tabla 1 se presentan los compontes de la mezcla.

Tabla 1. Componentes de una mezcla asfáltica.

COMPONENTES	AGRUPADA DE LA SIGUIENTE MANERA
Agregado graduado	Agregado (grueso), agregado fino (arena) y llenante mineral (filler)
Asfalto o bitumen	Ligante bituminoso
Poros	Espacios ocupados con aire

FUENTE: (Dai & You, 2006)

La determinación de la cantidad y calidad de los materiales para fabricar cualquier tipo de mezcla, depende de sus propiedades mecánicas que se evalúan a través de ensayos de laboratorio. Los ensayos proporcionan parámetros de diseño fundamentales para predecir el comportamiento de la mezcla. La rigidez es un

factor fundamental que brinda información sobre las propiedades mecánicas de los materiales, y se define como la relación entre un esfuerzo aplicado y la deformación ocasionada por este. (CLYNE , 2003)

2.2. DEGRADACIÓN DEL CONCRETO ASFÁLTICO

Los pavimentos se encuentran sometidos directamente a la acción de las cargas del tránsito, variaciones climáticas y otros agentes del medio ambiente que pueden ocasionar, en muchos casos la falla prematura del mismo. El concreto asfáltico se deteriora principalmente por fenómenos de fisuración o fatiga, ocasionados por efecto de cargas o temperatura, deformaciones excesivas, desgaste de los materiales y pérdida de adhesividad del agregado y el ligante por efecto del agua.

2.1.1. Agrietamiento por temperatura

Esta falla de la mezcla asfáltica se caracteriza por la aparición de fisuras transversales al eje de la vía y presenta un espaciamiento notablemente uniforme. Se debe a la contracción de la carpeta asfáltica por efecto de temperaturas bajas. El ligante asfáltico juega un papel importante en la fisuración por temperatura baja, cuando los ligantes por naturaleza son duros o propensos a oxidación, son más susceptibles a este tipo de deterioro. Los ligantes blandos y las mezclas con un bajo porcentaje de vacíos disminuyen el efecto del envejecimiento por efecto de bajas temperaturas. (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Sandoval Sandoval, 2005)

Figura 2. Fatiga por temperatura



Fuente: (INSTITUTO NACIONAL DE INVIAS, 2006)

2.1.2. Agrietamiento por fatiga

La fatiga es un fenómeno en el que se somete el pavimento a la repetición de miles de esfuerzos menores al esfuerzo de rotura definitivo (Di Benedetto, 1990). La fisuración por fatiga se produce en la huella donde se aplican las cargas del tránsito y se reconoce por la aparición de varias fisuras longitudinales a lo largo de la huella que en algún momento se unen con otras, causando un fenómeno conocido como “piel de cocodrilo”. Cuando se presenta esta anomalía puede haber desprendimiento entre la carpeta asfáltica y la subrasante formando baches en la superficie de rodamiento.

Figura 3. Agrietamiento por fatiga



Fuente: (INSTITUTO NACIONAL DE INVIAS, 2006)

2.1.3. Ahuellamiento

En los pavimentos flexibles, con el fin de proporcionar un diseño que resista las cargas, se debe tener en cuenta el daño que produce el continuo flujo vehicular y la carga que se trasmite a la mezcla. El continuo paso de los vehículos sobre la mezcla puede causar deformaciones permanentes, fenómeno es conocido como ahuellamiento. En la Figura 4 se observa el efecto de la carga compresiva repetitiva y continua.

Figura 4: Deformación permanente y ahuellamiento en pavimentos flexibles



Fuente: (HECK, 2001)

Cuando se presenta acumulación de la deformación permanente, se producen asentamientos que generan huellas longitudinales. Este fenómeno de ahuellamiento suele presentarse en pavimentos sometidos a cargas de larga duración o cuando se encuentran expuestos a temperaturas altas; esta susceptibilidad al ahuellamiento se debe a la naturaleza visco-elástica del ligante asfáltico (Dussan & Falutero, 2005).

2.1.4. Efecto del Agua

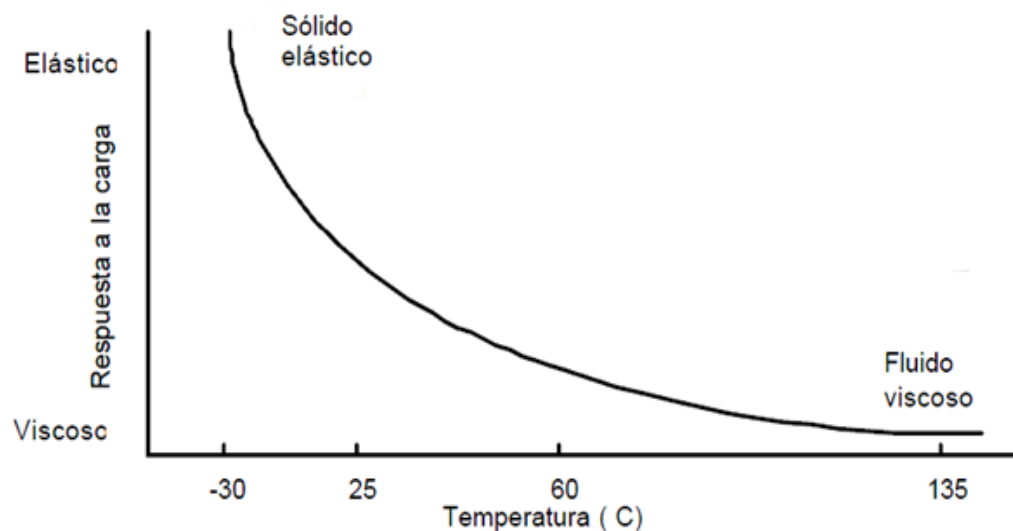
En países tropicales como Colombia, el agua puede producir daños permanentes sobre la carpeta asfáltica y deteriora notablemente la vida útil de los pavimentos. El agua que logra entrar en contacto con los materiales (agregado y asfalto) impide que exista una buena adhesividad entre los mismos. En el numeral 2.4 se explica con detalle los factores que inciden en el deterioro que ocasiona el agua en la mezcla asfáltica.

2.2. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

El comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica varía dependiendo de las condiciones a las que se encuentre expuesta; teniendo en cuenta que es un material visco-elástico, puede verse afectado por la temperatura, la frecuencia de carga entre otros; por ejemplo a elevadas temperaturas presenta las propiedades de un fluido viscoso, a bajas temperaturas su comportamiento es como un sólido y a una temperatura intermedia se comporta como un material visco-elástico, esta última condición, es la apropiada para su uso en pavimentos flexibles. (Asphalt Institute, 2006)

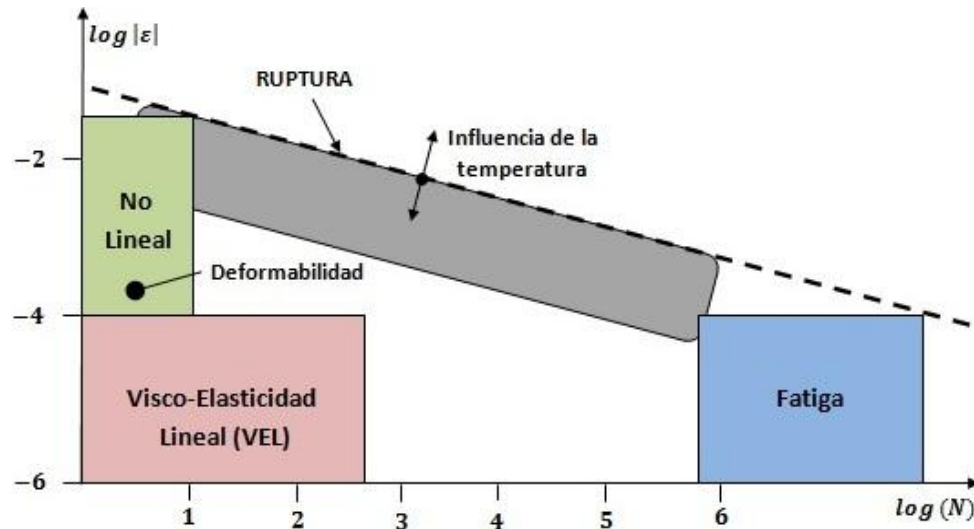
Para determinar las características mecánicas del concreto asfáltico, se usan ensayos tradicionales como la estabilidad Marshall que miden valores de calidad de carga y deformación, y métodos dinámicos o reológicos que determinan las componentes elástica y viscosa.

Figura 5. Comportamiento Visco- Elástico del concreto asfáltico.



Según el nivel de sollicitación al que se somete el concreto asfáltico exhibe diferentes comportamientos. La Figura 6 presenta cuatro zonas de comportamiento en las mezclas asfálticas según la carga aplicada.

Figura 6. Comportamiento de una mezcla asfáltica, según la deformación y el número de ciclos aplicados

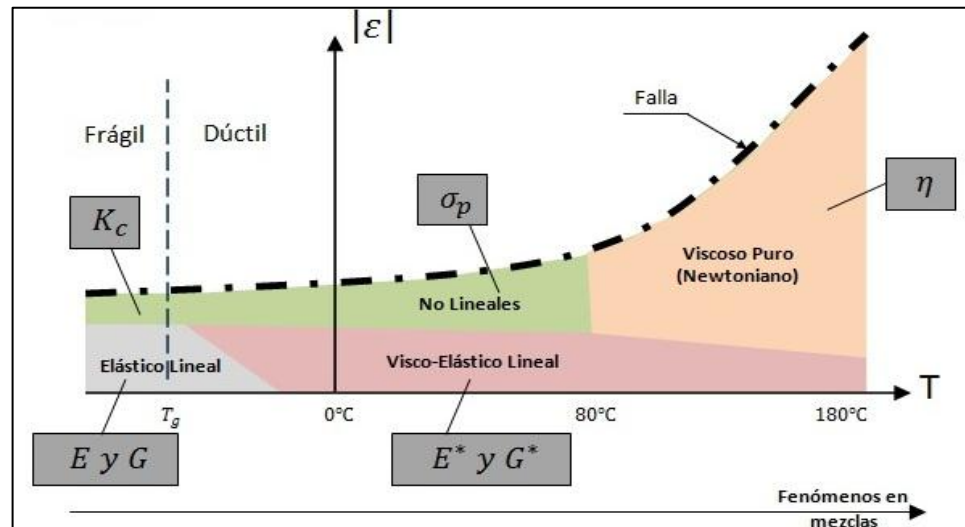


Fuente: (Di Benedetto, 1990)

En el diagrama anterior, se observa que la aplicación de cargas elevadas produce grandes deformaciones en el material, y su respuesta mecánica es catalogada como no lineal. Para pocos ciclos de carga y deformaciones pequeñas (10^{-4}), el comportamiento del material se considera en un rango visco-elástico lineal (Di Benedetto, 1990).

En algunas temperaturas de aplicación de carga, el concreto asfáltico se puede considerar como homogéneo, isotrópico y lineal para ciertos rangos de esfuerzo-deformación. En la Figura 7 se presenta la evaluación de la deformación que sufre el material para diferentes temperaturas y los rangos de comportamiento del concreto asfáltico.

Figura 7. Comportamiento de una mezcla asfáltica en función de su deformación y temperatura



Fuente: (OLARD, 2003)

Para condiciones térmicas normales y deformaciones pequeñas, el comportamiento de la mezcla es visco elástico lineal. En estas condiciones sólo se tiene en cuenta el comportamiento del ligante y no la interacción entre las partículas del agregado. (OLARD, 2003)

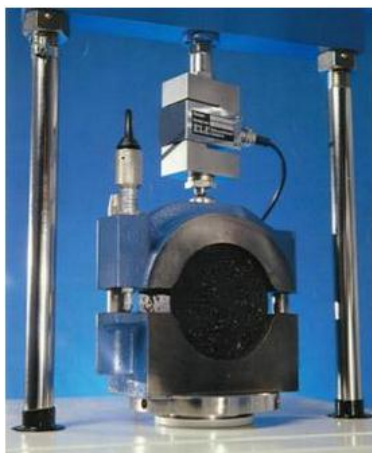
2.2.1. Caracterización Tradicional del Concreto Asfáltico

Una de las metodologías más utilizadas para determinar el comportamiento del concreto asfáltico es la metodología Marshall, en la que se miden valores de estabilidad y flujo en probetas cilíndricas. (Ver Figura 8).

Las probetas antes de ser ensayadas, se acondicionan a una temperatura de $60 \pm 1^\circ\text{C}$ y se someten a un incremento de carga hasta que ocurra la falla, el máximo valor de carga soportado se registra como “estabilidad” de la mezcla. La deformación sufrida por el cuerpo de prueba durante la aplicación de la carga

hasta su máximo valor, se mide con un deformímetro o medidor de flujo, y deberá anotarse como valor de flujo de la muestra.

Figura 8 Equipo de Carga Marshall.



Los valores elevados de estabilidad y bajos niveles de flujo son indicativos de mezclas resistentes a la deformación. En algunas normas, con base en el comportamiento observado en campo, se establecen los valores que deben presentar las mezclas asfálticas utilizando la metodología de Marshall. La Tabla 2 presenta esta información.

Tabla 2. Valores límites a tener en cuenta en la metodología Marshall.

Parámetro	Normas	
	ABNT NBR 12891/93	DNER-ME 43/95
Estabilidad Mínima (Kgf)	250 a 350	500
Flujo mm	2,0 a 4,6	-

Fuente: (Salgado Barra, 2009)

2.2.2. Caracterización dinámica del Concreto asfáltico

Las mezclas asfálticas están sometidas al paso continuo de los vehículos que transmiten cargas, las cuales se distribuyen en toda la estructura del pavimento; las cargas del tránsito se pueden simular en el laboratorio aplicando cargas dinámicas al material. Estos niveles de carga no deben modificar las condiciones iniciales de la mezcla asfáltica, para garantizar una respuesta dentro del rango lineal visco-elástico.

Los materiales visco-elásticos presentan una relación esfuerzo-deformación definida por un número complejo E^* denominado módulo complejo o módulo de *Young*, matemáticamente está dado por la relación entre el esfuerzo dinámico (σ_0) y la deformación unitaria (ε_0) (Witczak, Kaloush, & Pellinen, 2002), el concreto asfáltico al ser sometido a una carga sufre deformaciones que presentan un retraso en su respuesta, que puede ser medido (DE LA ROCHE, 1996):

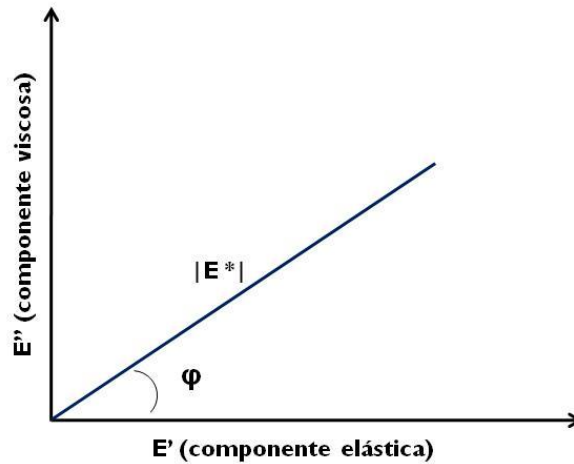
$$E^*(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon^*(t) = \varepsilon^0 e^{-i\theta} \quad (2)$$

Donde θ es el ángulo de desfase que existe entre la componente elástica y viscosa del material.

El concepto de módulo complejo se aprecia con la representación en un plano complejo como el siguiente:

Figura 9. Plano del módulo Complejo



Fuente: Propia

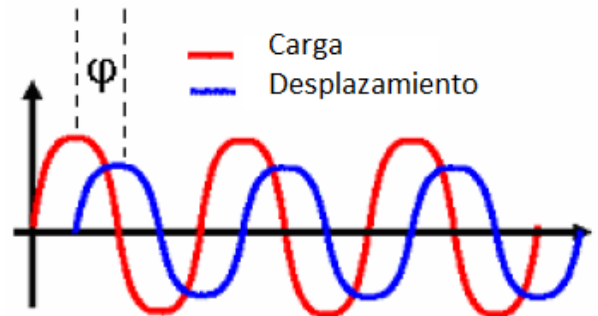
De donde:

E' es la componente de elasticidad

E'' es la componente de viscosidad.

El ángulo de desfase θ para materiales elásticos es de 0° y para materiales viscosos es de 90° ; en las mezclas asfálticas este ángulo se encuentra en un intervalo entre estos dos extremos, se puede medir y observar gráficamente con el desplazamiento de la curva de carga con respecto a la función sinusoidal inicial (Ver Figura 10) (Salgado Barra, 2009).

Figura 10. Ángulo de desfase en el concreto asfáltico.



Fuente: (Salgado Barra, 2009)

El tipo de carga sinusoidal aplicada al concreto presenta la siguiente función característica:

$$\sigma = \sigma_0 \cos(\omega t) + i\sigma_0 \sin(\omega t) = \sigma_0 e^{i\omega t}$$

Forma exponencial con amplitud compleja del esfuerzo

Donde, σ_0 es la amplitud de la de la carga y ω es la velocidad angular, que relaciona la frecuencia de aplicación de la carga f así:

$$\omega = 2\pi f$$

Frecuencia angular

Al asumir que el efecto de la inercia es despreciable, la ecuación diferencial se puede escribir como:

$$\lambda_1 \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + E_1 \epsilon = \sigma_0 e^{i\omega t}$$

Ecuación diferencial

La solución de la ecuación anterior se puede expresar como

$$\epsilon = \epsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}$$

En la que ϵ es la amplitud de la deformación y ϕ es el ángulo de fase en la deformación retrasada con respecto al esfuerzo. Sustituyendo la ecuación de amplitud compleja en la ecuación diferencial se tiene:

$$i\lambda_1\epsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)} + E_1\epsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)} = \sigma_0 e^{i\omega t}$$

Después de cancelar $e^{i\omega t}$ en ambos lados de la ecuación e igualando el término real a σ_0 con los términos imaginarios a cero, se obtienen las siguientes ecuaciones para resolver ϵ_0 y ϕ :

$$\lambda_1\omega\epsilon_0 \sin \phi + E_1\epsilon_0 \cos \phi = \sigma_0$$

$$\lambda_1\omega\epsilon_0 \cos \phi - E_1\epsilon_0 \sin \phi = \sigma_0$$

La solución de la ecuación anterior se puede expresar como:

$$\epsilon_0 = \frac{\sigma_0}{\sqrt{E_1^2 + (\lambda_1\omega)^2}}$$

$$\tan \phi = \frac{\lambda_1\omega}{E_1}$$

En materiales elásticos cuando $\lambda_1 = 0$, $\phi = 0$; y en materiales viscosos cuando $E_1 = 0$, $\phi = \frac{\pi}{2}$. Por lo tanto, el ángulo de fase de materiales visco-elásticos oscila entre 0 y $\frac{\pi}{2}$. El módulo complejo E^* se define como

$$E^* = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\epsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}}$$

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos \phi + i \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin \phi$$

De esta manera, si se somete un material visco elástico a un esfuerzo sinusoidal de amplitud (σ_0) y frecuencia (ω); la deformación tendrá una amplitud (ε_0), la misma frecuencia ω con un ángulo de desfase (ϕ). La Ecuación 3-1 y la Ecuación 3-2 describen, en el tiempo, el esfuerzo y la deformación respectivamente

$$\sigma(t) = \sigma_0 * \sin(\omega \cdot t)$$

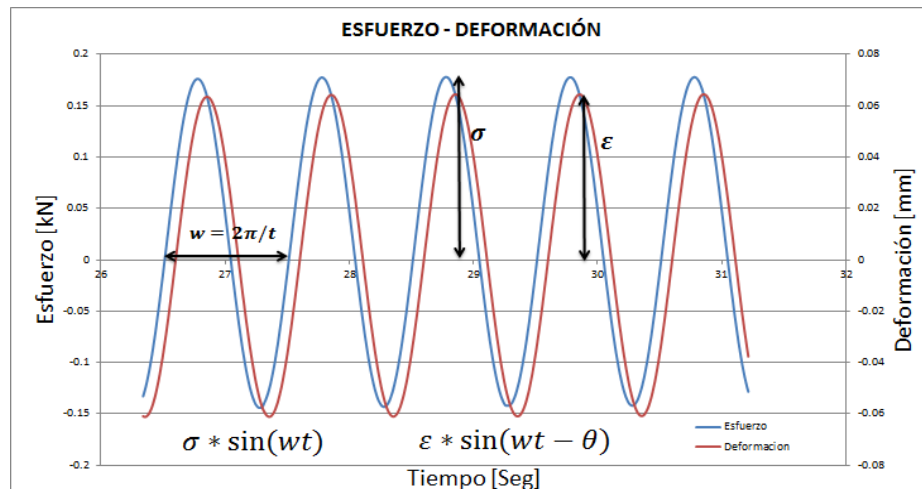
Ecuación 3-1: Esfuerzo sinusoidal

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 * \sin(\omega \cdot t - \phi)$$

Ecuación 3-2: Deformación sinusoidal desfasada.

La Figura 11 muestra un ejemplo gráfico de la Ecuación 3-1 y Ecuación 3-2 aplicadas en mezclas asfálticas, donde la señal de carga y de deformación presenta amplitudes diferentes con el mismo periodo y un desfase acorde al comportamiento visco-elástico del material. La relación esfuerzo-deformación, que representa la rigidez del material, es el módulo complejo.

Figura 11. Señales de carga y deformación



Fuente: (OLARD, 2003)

Existen modelos reológicos para evaluar las características visco elásticas de las mezclas asfálticas, (reología de flujo No-Newtoniano), que tienen en cuenta la magnitud del esfuerzo resistido por la mezcla, la temperatura, la forma y frecuencia de aplicación de la carga. A continuación se presentan algunos modelos reológicos empleados para modelar el comportamiento del concreto bituminoso.

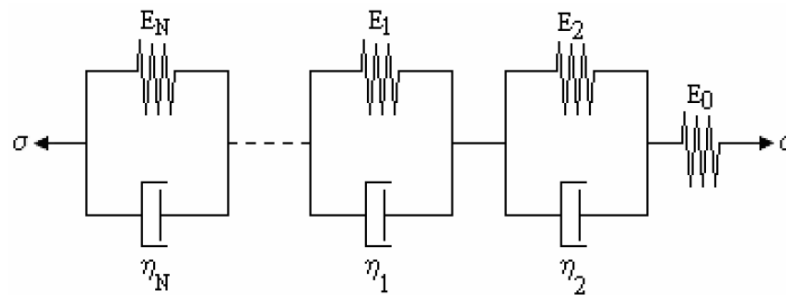
2.3. MODELAMIENTO DINÁMICO DEL CONCRETO BITUMINOSO

El comportamiento mecánico del concreto asfáltico se puede modelar mediante analogías mecánicas compuestas por resortes y amortiguadores, donde los resortes se consideran como solidos elásticos ideales obedeciendo a la ley de Hooke y los amortiguadores reflejan el comportamiento viscoso. Dependiendo de como se encuentren conectados existirán varias configuraciones para crear modelos vico-elásticos ideales. A continuación se presentan algunos modelos reológicos utilizados para evaluar las características visco-elásticas de los materiales. (OSORIO TOBÓN & CIRO VELÁSQUEZ, 2005)

2.3.1. Modelo de Kelvin-Voigt

El modelo de Kelvin tiene un resorte y un amortiguador conectados en paralelo, el esfuerzo que se impone al elemento va a ser la suma de los esfuerzos impuestos, mientras que la deformación va a ser la misma en cada componente. (STEFFE F, 1996) Sin embargo, el modelo propuesto no describe en forma satisfactoria el comportamiento de los materiales visco-elásticos, por lo anterior, se recurre a usar una generalización del mismo, la cual se define por un conjunto de modelos de Kelvin conectados en serie, lo como se observa en la Figura 12.

Figura 12. Modelo generalizado de Kelvin



2.3.2. Modelo de Maxwell

El modelo de Maxwell es análogo al de Kelvin, sin embargo, los resortes y amortiguadores están conectados en serie, el esfuerzo impuesto es soportado por cada elemento, y la deformación es la suma de las deformaciones producidas en cada resorte, en la Figura 13 se presenta el modelo de Maxwell generalizado.

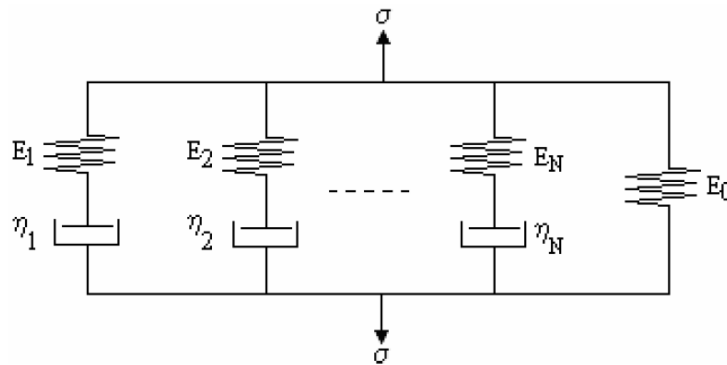
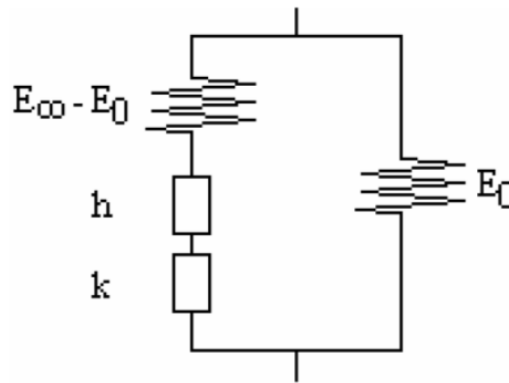


Figura 13. Modelo de Maxwell generalizado.

2.3.3. Modelo de Huet – Sayegh (1965)

Este modelo tiene en cuenta el comportamiento de los resortes y adiciona amortiguadores; la rigidez del material se idealiza en paralelo. El modelo permite estudiar el comportamiento reológico a bajas frecuencias y altas temperaturas.



Este modelo se puede representar a través de la siguiente ecuación:

$$E^*(\omega) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}$$

Donde:

i = Numero complejo definido por $i^2 = -1$;

E_∞ = Es el módulo obtenido cuando $\omega\tau$ tiende a infinito, con elevadas frecuencias y bajas temperaturas.

E_0 = Es el módulo, para bajas frecuencias y elevadas temperaturas

τ = Tiempo de relajación de dos amortiguadores o tiempo de retardo que varía con la temperatura;

h, k = Son las constantes de los amortiguadores se encuentran en un intervalo entre $0 < k < h < 1$;

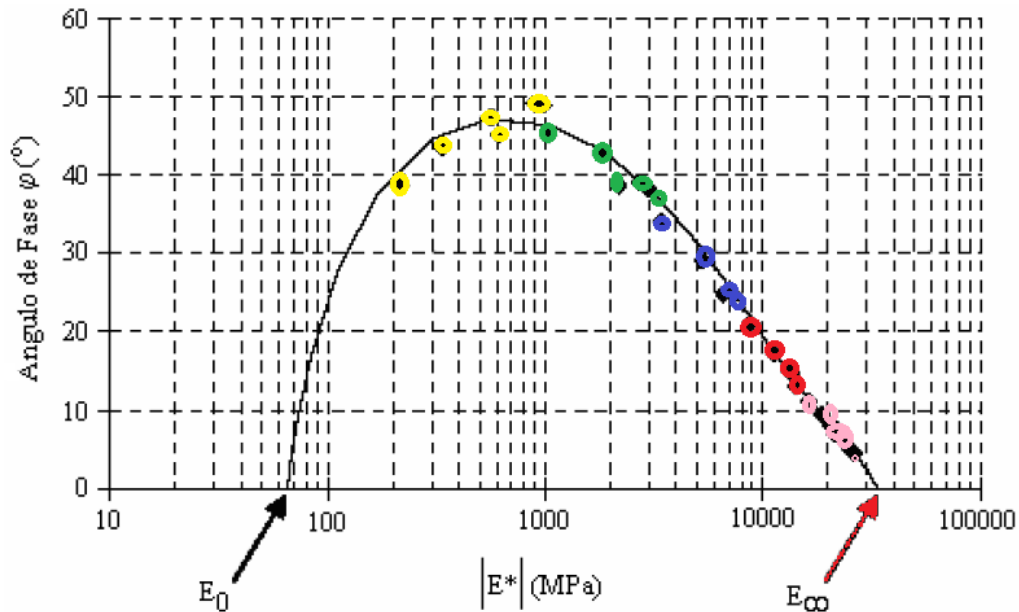
δ = constante adimensional, está en función de la granulometría del material.

$\omega = 2\pi f$; donde f = frecuencia de carga aplicada.

Este modelo permite determinar el valor módulo complejo E_0 en las mezclas asfálticas al aplicar cargas a elevadas temperaturas y bajas frecuencias; el valor de E_∞ se puede encontrar al aplicar cargas con bajas temperaturas y altas

frecuencias. En la Figura 14 se muestran gráficamente los valores E_0 y E_∞ . (HECK, 2001)

Figura 14. Valores Calculados E_∞ y E_0 en el diagrama de Black.



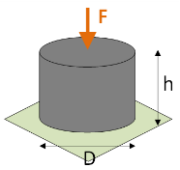
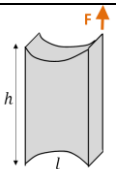
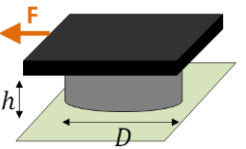
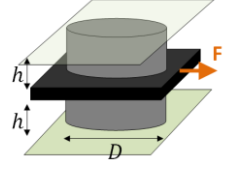
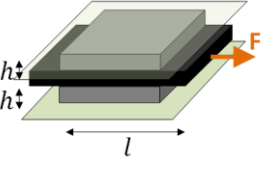
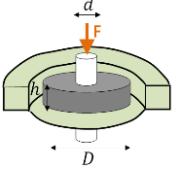
Fuente: (Heck, 2001)

Según la literatura, este modelo tiende a describir de forma aproximada el comportamiento visco-elástico lineal de las mezclas asfálticas.

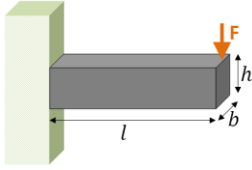
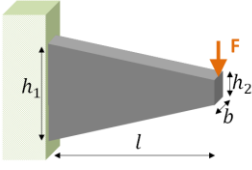
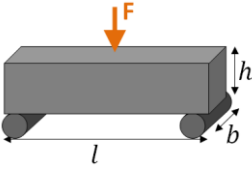
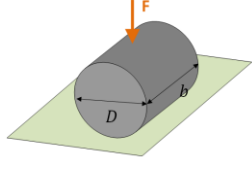
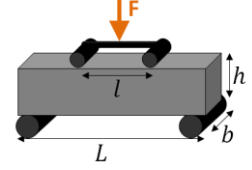
Para determinar el comportamiento visco-elástico de las mezclas asfálticas en el laboratorio se realizan ensayos homogéneos, donde se obtienen directamente los esfuerzos y las deformaciones del material, y ensayos no homogéneos que adicionalmente tienen en cuenta la geometría de la probeta. En la Tabla 3 se presentan los ensayos homogéneos y no-homogéneos utilizados para determinar el módulo complejo.

Tabla 3. Tipos de ensayos para determinar el módulo complejo en mezclas asfálticas

a) Ensayos homogéneos:

Ensayos Homogéneos	Ensayo	Principio	Factor de Forma (γ)	Referencia
	Tensión Compresión (con o sin limitar presión)		$\frac{h}{\pi D^2}$	Charif Dubbaneh Witczak
	Ensayo Cortante		$\frac{l}{he}$	Assi De la Roche
	Ensayo Cortante con Altura Constante		$\frac{h}{\pi D^2}$	Souce
	Ensayo Cortante con Maquina		$\frac{h}{\pi D^2}$	Lambe
			$\frac{h}{2Lb}$	
	Ensayo de Corte Co-axial		$\frac{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}{2\pi h}$	Gubler

b) Ensayos no homogéneos:

Ensayos No Homogéneos	Ensayo	Principio	Factor de Forma (γ)	Referencia
	Flexión en 2 Puntos		$\frac{4L^3}{bh^3}$	Francken
			$\frac{12L^3}{b(h_1 - h_2)^3} \left[\left(2 - \frac{h_2}{2h_1} \right) \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} \ln \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \right]$	Huet Chauvin
	Flexión en 3 Puntos		$\frac{24L^3}{\pi^4 bh^3}$	Souce
	Ensayo de Tensión Indirecta		$\frac{1}{b}(v + 0.27)$	Brown Kennedy Tayebali
	Flexión en 4 Puntos		$\frac{2L^3 - 3Ll^2 + l^3}{8bh^3}$	Pronk

Fuente: (H. Di Benedetto, 2001)

Todos los ensayos determinan el módulo complejo a partir del esfuerzo aplicado y la deformación producida, tienen en cuenta factores de forma que incluye dimensiones de los especímenes, y factores de masa los cuales relacionan los efectos de la inercia con la masa de los cuerpos de prueba y los elementos utilizados en la ejecución del ensayo.

Si la mezcla ensayada tiene comportamiento visco elástico lineal, los ensayos no-homogéneos arrojan mejores resultados, debido a que el factor de forma presentado, tiene incidencia en ambos componentes del módulo complejo; mientras que el factor de masa sólo afecta el comportamiento elástico (H. Di Benedetto, 2001).

El módulo complejo en el asfalto se determina con reómetros de corte dinámico (DSR = Dynamic Shear Rheometer), que se emplean para caracterizar las propiedades visco-elásticas del mismo. Mide el módulo complejo en corte (G^*) y el ángulo de fase (δ), sometiendo a la muestra de asfalto a tensiones de corte oscilante.

Para probetas en concreto asfáltico se determina sometiendo el espécimen a ensayos de carga uniaxial o bajo cargas a flexión, donde se aplica una carga sinusoidal a una frecuencia ω , de forma $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$, y la respuesta del material está dada por la misma carga con un ángulo de desfase θ , de forma $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t + \theta)$, que permiten definir las características visco-elásticas a partir del módulo de G^* (Módulo de cizalladura) y K^* (módulo volumétrico), y se definen con las siguientes relaciones. (FUNG, 1994)

$$k^*(t) = \frac{E^*}{3(1 - 2\nu)}$$

$$G^*(t) = \frac{E^*}{2(1 - \nu)}$$

Donde ν es el coeficiente de Poisson.

A partir de los ensayos de módulo se determina la rigidez inicial del material, parámetro principal de diseño de la carpeta asfáltica, que brinda información sobre el desempeño del material en servicio.

La mezcla asfáltica al estar expuesta a las condiciones del medio ambiente se ve deteriorada por factores como el clima, el tráfico, el agua entre otros. La mayoría de ensayos intentan determinar el comportamiento del material sometiéndolo a los factores mencionados anteriormente. El tema de interés en este estudio es evaluar el de daño por humedad en el concreto bituminoso a través de ensayos de módulo complejo; a continuación se describen las causas y efectos que inciden en el deterioro de las mezclas asfálticas por efecto del agua.

2.4. DETERIORO DEL CONCRETO ASFALTICO POR EFECTO DEL AGUA

Se ha demostrado que el agua libre al interior de un pavimento puede deteriorar de 20 a 50 veces su capacidad estructural, constituyéndose en un factor climático erosivo peligroso (Loradi, 1998), (Simonsen, Janoo, & Isacsson, 1997) (Ariza & Birgisson, 2002). La presencia de agua libre dentro del pavimento se debe principalmente a dos causas definidas por (Cañete 2000):

- 1) Infiltración de agua a través de grietas en el pavimento, zanjas laterales, cunetas sin pavimentar, etc.
- 2) Ascensión capilar desde el nivel freático.

Cada uno de estos aspectos contribuye a la degradación de la capacidad portante de las estructuras. Los mayores daños en los pavimentos se producen por la infiltración de agua en las fisuras que se encuentran en la carpeta de rodadura (H. H. Ridgeway, 1976). En la Figura 15 se presentan los daños en la carpeta asfáltica por efecto del agua.

Figura 15. Deterioro del pavimento por efecto del agua.



El agua que penetra en los poros de la mezcla asfáltica cambia el equilibrio de fuerzas y puede actuar de diferentes maneras:

- a) La penetración de agua sobre la superficie del asfalto y agregado, provoca que la fuerza de cohesión de la mezcla se degrade por la intrusión de agua en la misma. (Cheng, 2002)
- b) La difusión a través de la película asfáltica, de gotas de agua en el asfalto, que debilitan la cohesión de la carpeta.
- c) El debilitamiento de la fuerza de cohesión del agregado (Curtis, 1993).

El agua tiene una tensión superficial menor que la del asfalto, lo que le permite moverse lentamente hacia el asfalto, y destruir las fuerzas que mantienen unida la capa del ligante al agregado. La sensibilidad al agua del asfalto y el agregado se ve influenciada por su naturaleza físico-química. (Castañeda Pinzón, 2004)

2.4.1. Adhesión entre el Agregado y el Asfalto

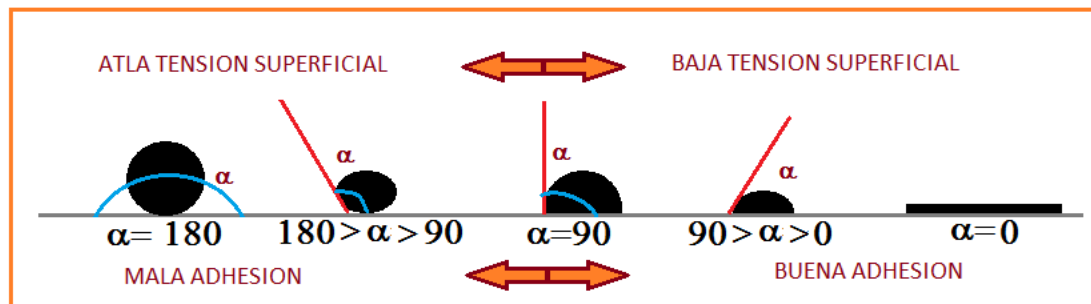
La adhesión entre el asfalto y el agregado es un factor importante en la vida de una mezcla asfáltica. Con frecuencia los daños en la superficie de una carretera pueden ser atribuidos al desprendimiento entre el agregado y el asfalto por falta de adhesión, o la falta de cohesión en las moléculas del asfalto o del agregado (Gutierrez Muñiz & Ramirez Soto, 2008).

La adhesión depende del contacto íntimo entre los dos materiales y de la atracción entre ambas superficies. Para que exista adherencia entre los materiales es necesario que la superficie del agregado esté limpia de polvo y de humedad, ya

que en ambos casos suponen una barrera física que impide que el asfalto humecte el material y, por lo tanto, que se adhiera a él. El asfalto puede cubrir el agregado sin necesidad de estar adherido a él, para conseguir este contacto íntimo se precisa que el asfalto esté en estado líquido, lo que se puede conseguir por calentamiento, emulsificación o por dilución con solventes (Laboratorio Bituper S.A.C).

La facilidad de cubrimiento del asfalto al agregado pétreo se denomina humectación y depende de las propiedades visco-elásticas del bitumen. El agua tiene una tensión superficial menor que la del asfalto y menor que la de la mayoría de los agregados pétreos, esto significa que el agua mojará los agregados con más facilidad que el asfalto y, por tanto, podrá desplazar a este último de los agregados secos cubiertos. (Ver Figura 16) (Laboratorio Bituper S.A.C)

Figura 16. Tensión superficial y el ángulo contacto entre el agregado y el asfalto.



Fuente: Propia.

2.4.1.1. Adhesividad activa

Se dice que hay adhesividad activa, en el proceso en el que el asfalto cubre los agregados y se adhiere a ellos. El asfalto debe estar en estado líquido y tener una temperatura adecuada para mantener su fluidez, para humectar la superficie y penetrar en los poros del agregado como se muestra en la Figura 17.

Figura 17. Adhesividad Activa

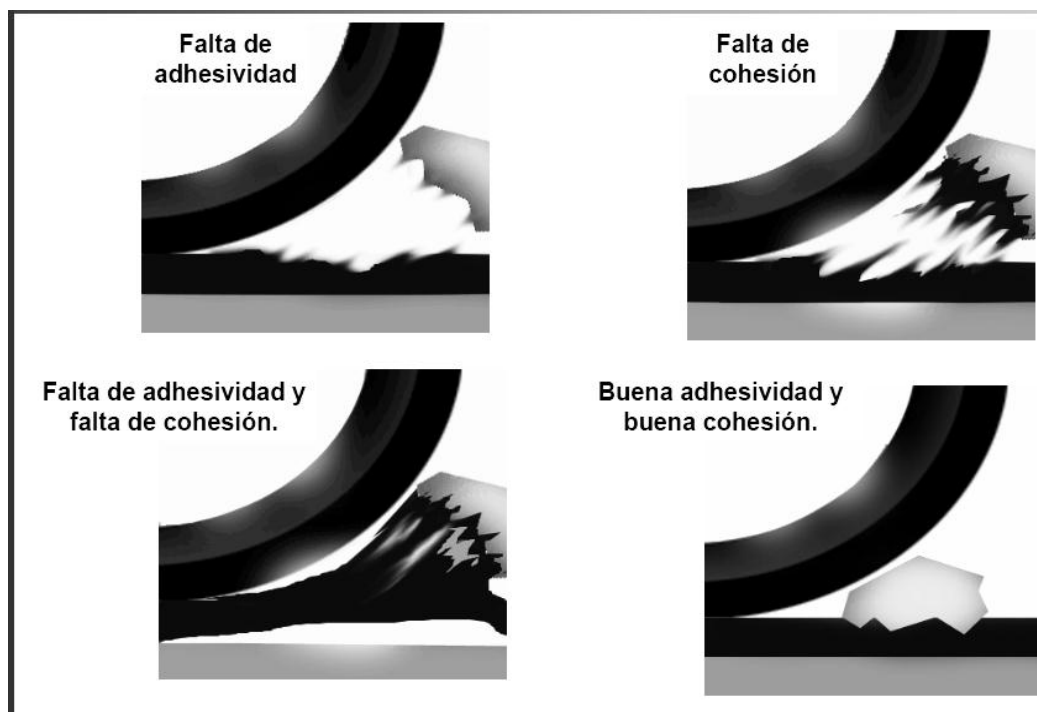


Fuente: (Gutierrez Muñiz & Ramirez Soto, 2008)

La interacción de un líquido y un sólido se caracteriza por la tensión superficial, la tensión interfacial y el ángulo de contacto que presentan. La tensión superficial es el conjunto de las fuerzas moleculares que permite que un líquido o sólido mantenga su estado (cohesión); la tensión interfacial es la fuerza resultante del equilibrio de dos cuerpos que determinan la adhesión (Castañeda Pinzón, 2004). El ángulo de contacto mide el grado de humectación del líquido con el sólido. Cuando el ángulo de contacto es mayor que 90 grados el líquido no humecta el sólido, un ángulo de 0 grados se forma cuando el líquido moja fácilmente o se extiende completamente sobre la superficie del sólido.

Cuando el ángulo de contacto es pequeño la energía de adhesión entre el líquido y el sólido es muy grande, pero cuando están muy cercanos, o por encima de 90 grados la tensión superficial es muy alta y la interacción entre los dos materiales se reduce (Castañeda Pinzón, 2004).

Figura 18. Adherencia entre el agregado y el asfalto

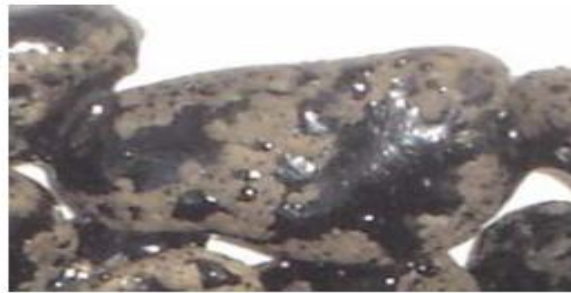


FUENTE: (Gutiérrez, 2008)

2.4.1.2. Adhesividad Pasiva

La adhesividad pasiva es la resistencia de un ligante a ser desplazado por acción del agua y a los cambios de temperatura, que dependen también de la afinidad polar por el asfalto, espesor de la película, viscosidad, tensión superficial y textura superficial (Laboratorio Bituper S.A.C).

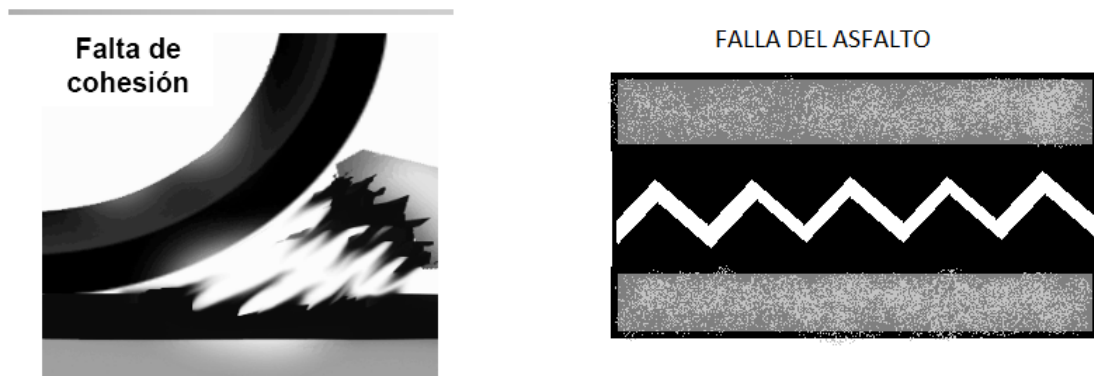
Figura 19. Adhesividad Pasiva



FUENTE: (Gutierrez Muñiz & Ramirez Soto, 2008)

Un caso especial para identificar adhesividad pasiva alta, es cuando el asfalto logra adherirse muy bien al agregado y la mezcla falla por cohesión del ligante, como se presenta en la Figura 20 (Castañeda Pinzón, 2004)

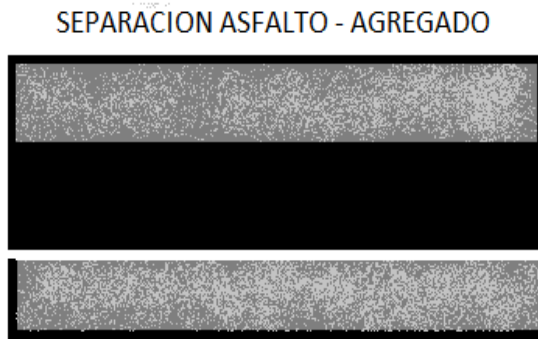
Figura 20. Falta de cohesión y alta adhesividad Pasiva



Fuente: (Castañeda, 2004; Gutiérrez 2008)

Cuando la adhesividad pasiva es baja se produce una separación entre la interfase del agregado y el asfalto como se muestra en la Figura 21.

Figura 21. Baja adhesividad



(Curtis, 1993) dice que las fuerzas que intervienen en el proceso de adhesión entre agregado y asfalto producen:

- 1) Energía interfacial: Es la medida directa de fuerzas intermoleculares que se da cuando dos materiales están en contacto (Asfalto – Agregado).
 - a) Fuerzas London o de dispersión: son el resultado del movimiento interno de los electrones en las moléculas.
 - b) Fuerzas Dipolo – Dipolo: Existen entre las moléculas polares neutras; las moléculas polares se atraen unas a otras cuando el extremo positivo de una molécula está cerca del extremo negativo de otra. Esta fuerza es débil y para ser efectivas las moléculas polares deben estar muy próximas, es decir, que deben estar cerca unas de otras para que la fuerza atractiva de la interacción sea significativa (L.Brown, Bursten, & Burdge, 2004).

Un agregado se puede mojar con asfalto fácilmente si se encuentra seco, pero si existe humedad en los agregados, la superficie se puede polarizar negativamente o positivamente, esto depende de la naturaleza del mismo.

La naturaleza del asfalto es ácida, se considera que entre éste y los agregados calcáreos existe atracción electrostática debida a sus cargas

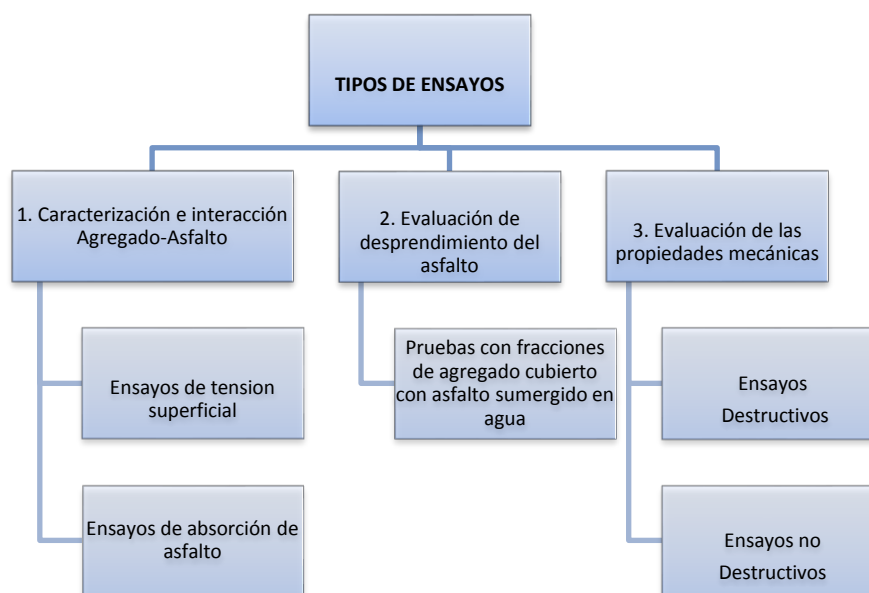
eléctricas opuestas. No sucede lo mismo, entre el asfalto y los agregados silíceos, por que poseen la misma carga eléctrica, y existe una repulsión, y no hay buena adherencia (Laboratorio Bituper S.A.C).

- 2) El anclaje mecánico: Se presenta cuando un líquido, como el asfalto, puede fluir al interior de los poros de otro material (agregado), y se solidifica en su interior, lo que evitará que cuando se aplique una tensión superficial sobre el ligante, se separen. Los materiales con una superficie muy porosa proporcionan un buen anclaje mecánico por ende una buena adhesión (Rodriguez Montes, Castro Martinez, & Real Romero, 2006).
- 3) Reacción química: La naturaleza química de los materiales (ácidos y Bases) influye en la capacidad de adherencia entre los mismos. Los asfaltos contienen compuestos ácidos y por lo general tienen una adhesión más fuerte con áridos calizos compuestos principalmente de carbonato de calcio, a diferencia de agregados tales como cuarcita, granitos y pórfido que están compuestos de silicatos.

2.5. ENSAYOS PARA EVALUAR EL EFECTO DEL AGUA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

En las metodologías de diseño de pavimentos se evalúa el efecto del agua en las capas granulares consideradas más susceptibles a la humedad, sin embargo, no cuantifican el daño o la reducción de la vida útil del pavimento en relación con el deterioro que sufre la capa bituminosa de la estructura. Para determinar la sensibilidad al agua de las mezclas asfálticas se distinguen tres tipos de ensayos como se muestra en la Figura 22. (Castañeda Pinzón, 2004)

Figura 22. Tipos de ensayos



Los ensayos para evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas son los más utilizados para determinar el efecto del agua en los pavimentos, algunos toman medidas de referencia antes y después de la inmersión en agua, con pruebas destructivas y no destructivas, a continuación se presentan los ensayos utilizados tradicionalmente para evaluar el efecto del agua en las mezclas.

2.5.1. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Los ensayos de tipo destructivos son los más utilizados para evaluar el efecto del agua, ver Tabla 4 Este efecto se cuantifica al establecer la reducción de la resistencia después de sumergir el material en agua.

Tabla 4. Ensayos destructivos para evaluar el efecto del agua.

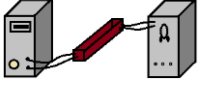
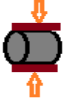
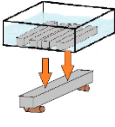
ENSAYO	NORMA	PROBETAS	SATURACION DE POROS	INMERSION	ENSAYO MECANICO
LOTTMAN (1978)	MARSHALL ASTM D1559	Cilindros de 101,6 mm de diámetro, 63.5 mm de altura. % VACIOS 4-8	Vacíos de 650mm Hg, 30 minutos	15 Horas a 0 C, 24 Horas a 60 C	Tracción Indirecta 
Lottman modificado ASSTHO T283	ASTM D3387	Cilindros de 101,6 mm de diámetro, 63.5 mm de altura. % VACIOS 7 - 8	Porosidad entre el 55 y 80%	24 Horas a 60 C	Tracción Indirecta 
Immersion Compression ASTM D1075	Doble pistón 20,68 Mpa ASTM D1074	Cilindros de 101,6 mm de diámetro, 101,6 mm de altura.	NO ESPECIFICA	1 Hora a 60 C, 4 Horas a 49 C	Compression Simple 
Inmersión Compresión (NFP P98-265 1)	Doble pistón 60 KN 5 min	Cilindros de 80 mm de diámetro, 1000 g de peso.	120 minutes % Vacíos 350mm Hg	7 Horas a 18 C, 1 Horas a 50 C	Compresión Simple 
Congelación y Descongelación	Doble pistón 27,58 KN, 20 min	Cilindros de 101,6 mm de diámetro, 101,6 mm de altura. %vacíos 5	NO ESPECIFICA	15 Horas a 12 C, 9 Horas a 49 C	Aparición de fisuras 

FUENTE: (Castañeda, 2004)

2.5.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos se basan en la evolución del módulo de rigidez del material. El efecto del agua se cuantifica al establecer la reducción del módulo de rigidez después de sumergir el material en agua. (Ver Tabla 5).

Tabla 5. Ensayos no destructivos para evaluar el efecto del agua

ENSAYO	NORMA	PROBETAS	SATURACION DE POROS	INMERSION	ENSAYO MECANICO
Andersland Goetz (1956)	Proyecto de Investigación de la Universidad de Indiana	Muestras tomadas del Pavimento	No esta definido	0 - 100 Horas Temp Variable	Módulo de elasticidad con sub frecuencias Sónicas 
Graf Schmidt (1972) Craus Ishai (1977)	ASTM D1561 Procedimiento Marshall ASTM D1559	Cilindros de 101,6 mm de diámetro, 63.5 mm de altura.	Humedad 5% Vacíos 650mm de Hg	0 – 65 Horas- 60 C 0 – 30 Horas Temperatura entre 23 a 60 C	Módulo ASTM D4123 23 C Módulo resiliente 
Sistema Ambiental acondicionado Terrel Allen (1992) AASTHO TP-34	Cisaillement Giratoire	Cilindros de 101,6 mm de diámetro, 101,6 mm de altura	Vacíos 508mm de Hg 30 min	3 ciclos de tres Horas a 60 C Carga axial repetida de 124 Kpa	Módulo resiliente 25 C 
Módulo complejo I.N.V. E-754	I.N.V. E-754 flexión en 4p AASTHO T321-03, INVIAS Artículo 450-07	Vigas 50mm de altura, 50mm de Ancho, 40 mm profundidad	No esta definido	0-72 Horas	Módulo Complejo 0-40 C 

FUENTE: (Castañeda, 2004)

Los ensayos citados anteriormente evalúan el efecto del agua a través de diferentes metodologías que intentan explicar el comportamiento del concreto asfáltico. Estos métodos evalúan la rigidez del material antes y después de ser sometidos a tiempos de inmersión en agua acondicionados a diferentes temperaturas, mostrando el deterioro en el material, sin embargo, estos ensayos no permiten dar un concepto claro del comportamiento de la mezcla debido a que se presenta un incremento de módulo de rigidez después de procesos de inmersión, razón por la cual este tipo de ensayos no logra detectar los factores que determinan el deterioro de la mezcla asfáltica por efecto del agua.

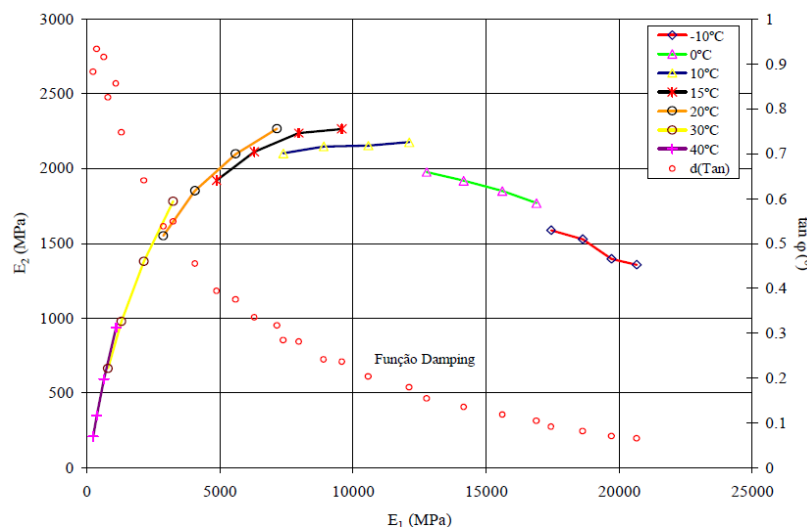
(Escalante & Alza, 2011), evaluaron el efecto del agua para mezclas bituminosas utilizando el método AASTHO T 283 donde se concluye que los ensayos de módulo de resiliencia, realizados a las probetas utilizadas, después de algunos procesos de inmersión presentaron resultados superiores al 100% de la rigidez, y atribuyen este hecho al buen comportamiento de los ligantes bituminosos peruanos que se utilizaron en la investigación. Sin embargo las variaciones en los resultados no dejan clara la evidencia de esta hipótesis, y recomiendan continuar con el estudio para poder utilizar este ensayo como parámetro de evaluación del daño de humedad.

La metodología de evaluación de seguimiento de las propiedades visco-elásticas demuestra que el comportamiento del concreto asfáltico bajo el efecto de la acción del agua, sí presenta un deterioro progresivo (Castañeda, 2004). Esta evolución se puede medir con el módulo complejo de rigidez determinado a diferentes temperaturas y frecuencias de carga. Los resultados se grafican en diagramas de Black ó en el plano Cole – Cole, proporcionando información sobre el comportamiento térmico y cinético del material en comparación a ensayos de carga uniaxial y constante.

2.6. EL MÓDULO COMPLEJO PARA EVALUAR EL EFECTO DEL AGUA

Los ensayos de módulo complejo se pueden evaluar en diagramas que tienen en cuenta las componentes visco-elásticas del concreto asfáltico. Al estudiar la evolución de la rigidez de las mezclas asfálticas, con varias temperaturas y frecuencias, los resultados obtenidos se pueden graficar en el plano Cole - Cole, que refleja una curva en forma de arco como se muestra en la Figura 23. Se observa que la componente elástica y viscosa aumenta de forma lineal para altas temperaturas, sin embargo este comportamiento varía en la medida en que disminuye la temperatura y aumenta la frecuencia de carga.

Figura 23. Plano complejo de Cole –Cole

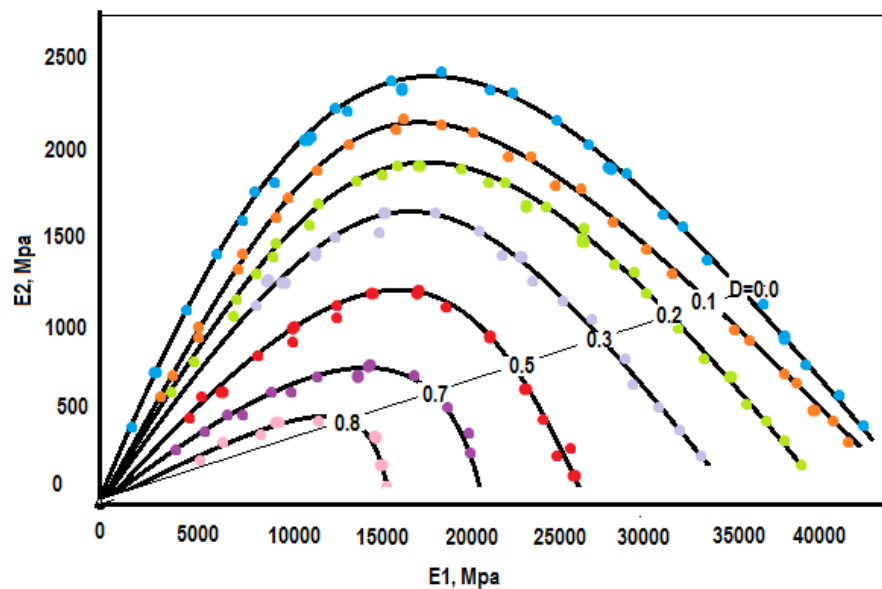


Fuente: (Salgado Barra, 2009)

Para tiempos de aplicación de carga muy pequeños (0.1 s) y temperaturas bajas (inferiores a 10 °C), el comportamiento de las mezclas asfálticas se puede considerar elástico; para valores elevados de tiempo de aplicación y temperaturas altas, su comportamiento es viscoso. Razón por la cual, la rigidez en las mezclas asfálticas es variable. (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Sandoval Sandoval, 2005)

Para determinar el deterioro por efecto del agua de una mezcla asfáltica es necesario hacer la evaluación de la rigidez en el plano Cole – Cole, a través de ensayos no destructivos que reflejen el deterioro de la curva de módulo después de procesos de inmersión en agua. En la Figura 24 se presenta un ejemplo del deterioro de una mezcla asfáltica después de varios procesos de inmersión.

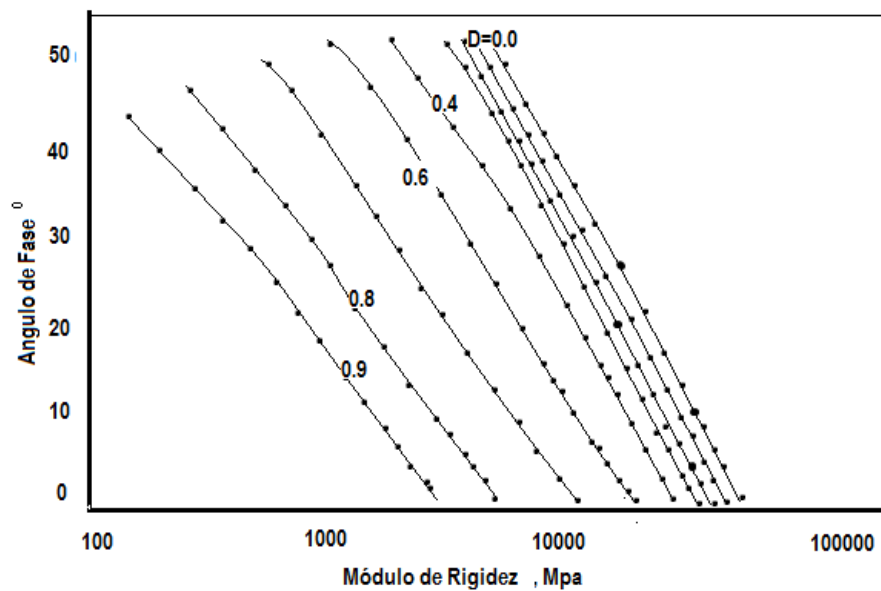
Figura 24. Deterioro del Concreto asfáltico en el plano complejo.



Fuente: (Castañeda, 2004)

Otra representación gráfica de la evolución del módulo complejo se puede realizar en el espacio de Black como se muestra en la Figura 25, que relaciona el ángulo de desfase y el módulo de rigidez. El deterioro de la mezcla para diferentes tiempos de inmersión, se refleja gráficamente en el desplazamiento de las curvas hacia la izquierda.

Figura 25. Representación gráfica de módulo en el Diagrama de Black.



Fuente: (Castañeda, 2004)

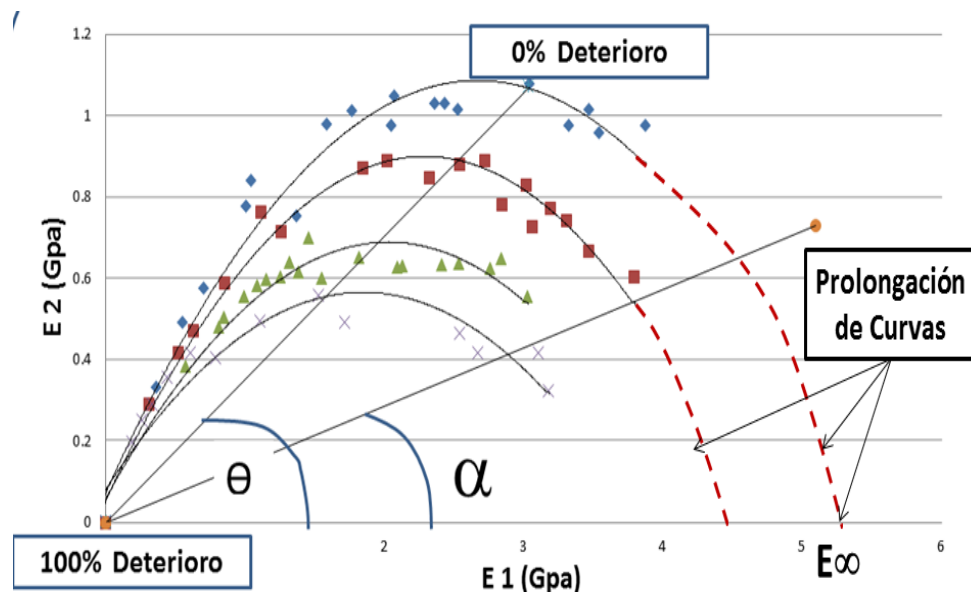
Existen ecuaciones que describen el comportamiento reológico de la mezcla a partir de los datos obtenidos experimentalmente las cuales concuerdan con las teorías del comportamiento visco-elástico propuestas por Maxwell, Kelvin y Huet-Sayegh, sin embargo, las curvas se pueden definir de forma sencilla a través de funciones que se ajusten a los datos obtenidos en el laboratorio y así, determinar el deterioro en la mezcla.

2.6.1. Metodología de cuantificación de deterioro del material.

Para determinar el deterioro de la mezcla se define un porcentaje de reducción de las curvas o factor de reducción, usando como parámetro de referencia la curva de rigidez inicial del material. La curva inicial presenta grado de deterioro igual a 0% y curvas cercanas al origen representan deterioros hasta del 100%.

La reducción de la rigidez se observa con mayor claridad en valores de módulo obtenidos a bajas temperaturas y altas frecuencias al comparar las curvas de rigidez en cada ciclo de inmersión. Para calcular el factor de degradación se evalúa el módulo de rigidez para dos ángulos de desfase constantes (θ y α), como se observa en la Figura 26. El ángulo θ permite definir en el centro de la curva el valor de rigidez para los diferentes ciclos de inmersión y al determinar la variación de los mismos se calcula el factor de deterioro.

Figura 26. Metodología de Evaluación



Al hacer la evaluación con un ángulo igual a 0° (utilizando valores de E_∞), se establece el deterioro total de mezcla, sin embargo es difícil hacer esta evaluación debido a que el valor de E_∞ solo se puede encontrar con ensayos de módulo a temperaturas bajas y elevadas frecuencias de carga, por lo general no se pueden determinar experimentalmente. Para hacer el análisis con ángulo $\alpha = 0^\circ$ se prolongan las curvas como se muestra en la Figura 26.

3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

El desarrollo de esta tesis busca validar el método de evaluación del efecto del agua en mezclas asfálticas, utilizando la metodología de evolución del módulo complejo. El método que fue desarrollado por (Castañeda, 2004), en probetas trapezoidales; en esta investigación se busca verificar los resultados obtenidos trabajando con otro tipo de ensayo y materiales que presenten pequeñas diferencias en la adhesividad entre el agregado y el asfalto. Para ello se implementó el ensayo de flexión en vigas bajo carga dinámica, se definió el proceso de fabricación de los cuerpos de prueba usados y la metodología del ensayo para evaluar el efecto del agua en las mezclas bituminosas.

3.1. IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYO EN VIGAS DE CONCRETO ASFÁLTICO

Para la implementación del ensayo de flexión en vigas de concreto asfáltico se utilizó la máquina de ensayos universales de referencia “Material Test System” (MTS-810) que se encuentra en la Universidad industrial de Santander. El procedimiento del ensayo de flexión en cuatro puntos está normalizado para Europa con la norma NF-EN 12697-26, (CEN, 2005) y para América por la AASTHO T321-03 (TP8-94), (AASHTO, 2002). En estas normas se definen las dimensiones del espécimen, las condiciones de aplicación de carga y otros aspectos.¹

¹NARANJO SALAZAR, F. A., & RUEDA ZAMBRANO, J. A. (2011). *implementación de un ensayo para medir el módulo de rigidez complejo en mezclas asfálticas*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

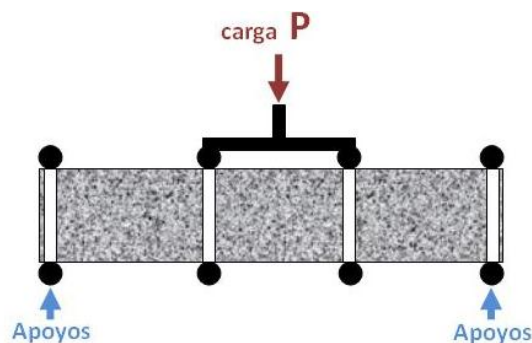
3.1.1. Descripción del ensayo de flexión en cuatro puntos

El ensayo mide el valor del módulo de rigidez complejo de muestras de concreto asfáltico con forma de paralelepípedo rectangular, extraídas en campo o fabricadas en laboratorio, mediante un ensayo no destructivo de flexión bajo la acción de cargas cíclicas.

Se requiere una máquina capaz de transmitir carga de tipo sinusoidal, con un sistema que permita almacenar datos de la carga aplicada y la deformación de las probetas, al tiempo que se controla la temperatura. (INVIAS, 2007)

La muestra se apoya en los extremos donde se restringe el movimiento vertical pero se permite la rotación, y la carga que produce la flexión se aplica en los tercios medios del paralelepípedo. (Ver Figura 27).

Figura 27: Apoyo en 4 puntos y aplicación de carga



Fuente: Propia

3.1.2. Diseño y montaje del dispositivo estructural

El equipo de carga MTS-810 está diseñado para realizar pruebas de carga estática ó dinámica con diferentes materiales, posee una celda diseñada para controlar diferentes grados de esfuerzo y deformación. El sistema utilizado puede configurarse fácilmente para cumplir con las necesidades del ensayo y tiene una capacidad máxima de 20kN. En la Figura 28 se presentan las partes del equipo MTS-810 y la función de cada elemento.

Figura 28: Equipo de Carga MTS – 810

a) Material Test System MTS-810 (Vista Frontal)



b) Material Test System MTS-810 (Vista Posterior)



Control de seguros hidráulicos. Permite bloquear o desbloquear los tornillos

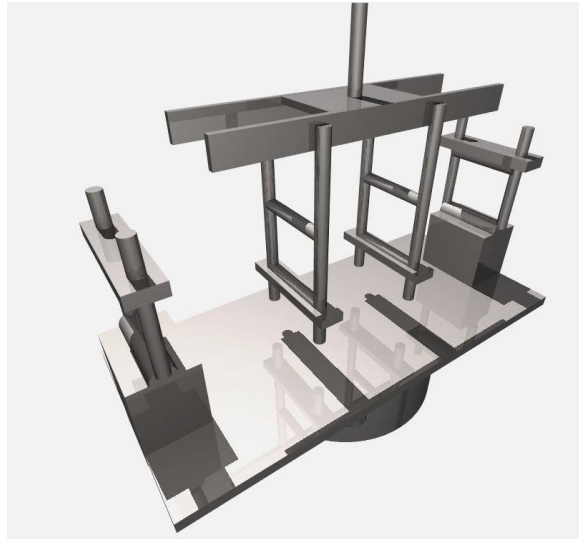
Actuador Hidráulico. Mejora la capacidad de carga para obtener resultados más exactos.

Actuador de control de flujo. Reduce las fluctuaciones en la presión hidráulica para mejorar pruebas de control y exactitud en los resultados.

Fuente: Catalogo Electrónico del Equipo (MTS Systems Corporation)

Teniendo en cuenta la geometría del equipo MTS-810 se diseñó un elemento adaptable a los actuadores de carga del sistema, que cumple con las condiciones de prueba, y se ajusta a las especificaciones geométricas de las probetas. En la Figura 29 se observa el prototipo del elemento diseñado para implementación del ensayo.

Figura 29: Dispositivo estructural



Fuente: Naranjo, 2010

- **Geometría de las Vigas:** Según la norma técnica NE FP 12697 -26, para probetas tipo viga, la altura o ancho debe ser tres veces el tamaño máximo del agregado de la mezcla, mientras que la longitud debe ser ocho veces la altura o el ancho de la viga. A continuación se describe las dimensiones de la viga utilizadas en el proyecto:

Dimensiones mínimas de las vigas:

Ancho: Para $T_{max} = 16.7 \text{ mm}$

Ancho calculado = $T_{max} \times 3 = 50.1 \text{ mm}$

Ancho Seleccionado = 50 mm

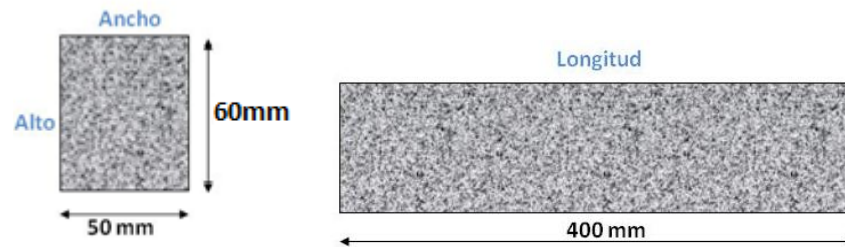
Alto mínimo, igual al ancho = 50 mm

Altura seleccionada = 60 mm

longitud $8 * \text{Ancho}(\text{o el alto}) = 400 \text{ mm}$

El tamaño máximo del agregado se definió teniendo en cuenta la granulometría de la mezcla seleccionada MDC-2 que cumple con las especificaciones descritas en la norma INVIAS Artículo 450-07.

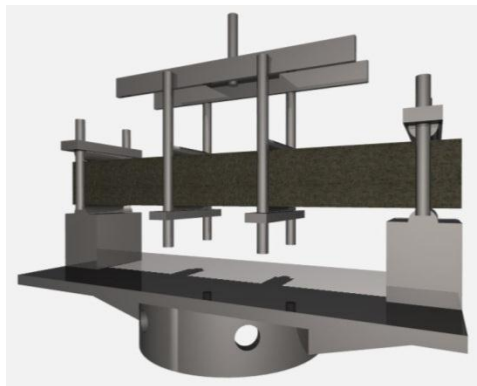
Figura 30: Dimensiones de la Viga o Probeta



Fuente: Elaboración Propia

El dispositivo estructural se fabricó en acero inoxidable para evitar deformaciones causadas por esfuerzos mecánicos y térmicos, que influyeran en los resultados de las pruebas. En la Figura 31 se presenta el diseño definitivo del elemento estructural que se adaptó al equipo MTS – 810 y a la cámara de temperatura.

Figura 31: Diseño Elemento Estructural

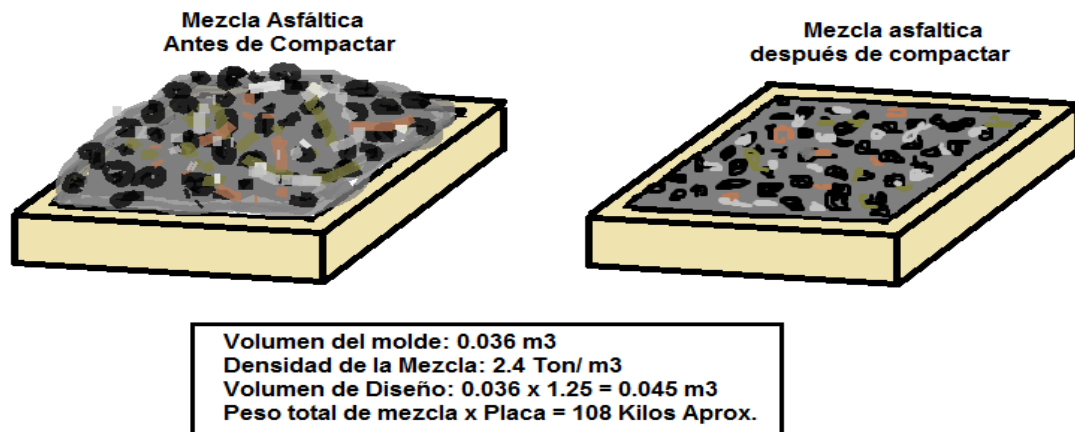


Fuente: Registro Fotográfico Propio

3.2. FABRICACION DE PROBETAS

Para obtener probetas de densidad homogénea, se realizaron placas de concreto asfáltico de dimensión 0.6 m x 0.6 m x 0.1 m, de las cuales se extrajeron hasta 8 vigas. Para fabricar las placas se mezclaron los materiales y se compactaron a temperaturas de 140 y 150 °C, utilizando un equipo compactador de impactos. Los cuerpos de prueba se cortaron 24 horas después de la compactación. En la Figura 32 se ilustra el proceso de fabricación de las placas y vigas extraídas.

Figura 32. Placas de concreto asfáltico. .



Fuente: Registro Fotográfico Propio

El proceso de corte se realiza en una mesa de disco con punta diamantada, garantizando un corte limpio y uniforme. La Figura 33 muestra el procedimiento realizado con el equipo del laboratorio.

Figura 33. Cortadora de Placas



Fuente: Registro Fotográfico Propio

3.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

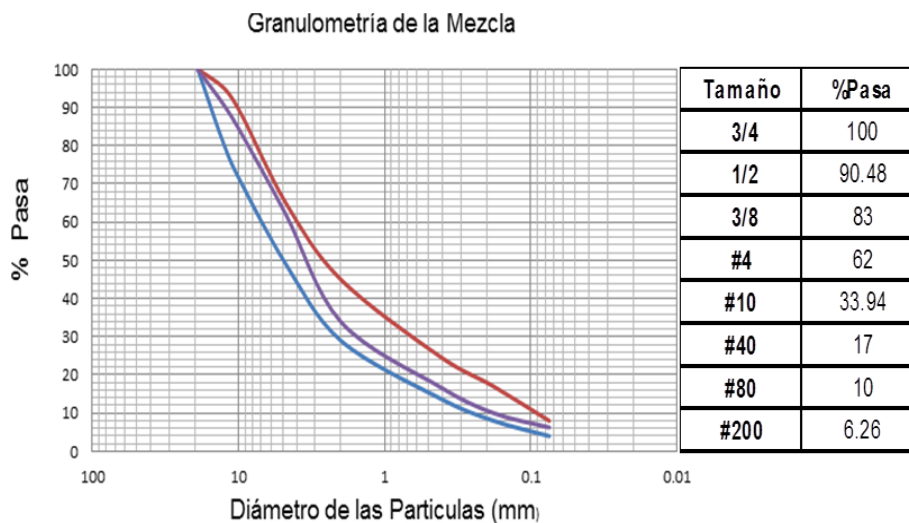
Se utilizaron materiales pétreos duros, durables y que presentaron buena adhesividad activa o de mezclado.

3.3.1. Agregados

Para estudiar el deterioro de la mezcla se trabajó con material granular calcáreo, que garantiza una mejor adherencia con el ligante asfáltico por la atracción electrostática de los materiales, como se explicó anteriormente. El árido de origen calcáreo es extraído de una cantera de calizas ubicada al norte de la ciudad de Bucaramanga.

- Granulometría: En la fabricación de placas se utilizó una gradación de mezcla asfáltica densa con un contenido de asfalto establecido de acuerdo con la formulación Marshall. En la Figura 34 se presenta la granulometría del material estudiado.

Figura 34. Granulometría Utilizada para la fabricación de placas.



3.3.2. Ligante Asfáltico:

Se utilizó un asfalto de penetración 60/70, de uso convencional en mezclas bituminosas en caliente. El contenido de asfalto en todas las muestras fue del 5 %, el porcentaje de vacíos varió entre 4.5% y 5.5%.

3.3.3. Diseño del experimento

Se fabricaron 4 tipos de placas utilizando la misma granulometría y contenido de asfalto, pero con una fracción del árido cubierto por arcilla. La arcilla se utilizó con el fin de simular materiales con diferentes niveles de adhesividad y mostrar la correspondencia entre los resultados del ensayo y la susceptibilidad del material al agua. El deterioro de la rigidez del material por efecto del agua aumenta si no hay buena adhesividad entre el agregado y el asfalto.

En la Figura 35 se presentan muestras de agregado limpio y agregado recubierto con arcilla, que posteriormente fueron mezclados en diferentes proporciones para fabricar cada placa; en la Tabla 6 se muestra las cantidades de agregado mezclados en cada placa.

Figura 35. Agregados utilizados en la mezcla en diferentes proporciones



a) Muestra de material limpio

b) Muestra de material contaminado con Arcilla

Las placas se fabricaron teniendo en cuenta los pesos y los contenido de arcilla presentados en la Tabla 6.

Tabla 6. % Material Contaminado por Placa

Contenido de Arcilla en placas de Concreto Asfáltico				
Placa	Masa del agregado Contaminado (kg)	Masa del agregado Limpio (kg)	Masa Total de la Placa (Kg)	Porcentaje de agregado Contaminado
1	0	101	101	0%
2	2.45	95.55	98	2.5%
3	5	95	100	5%
4	10.3	92.7	103	10%

Fuente: Propia.

El árido recubierto por arcilla debe presentar mayor deterioro por que impide que el asfalto se adhiera al agregado, sin embargo se realizaron ensayos de adherencia para comprobar esta hipótesis y se verificó que la adhesividad del agregado con el asfalto disminuye en presencia de arcilla. En la Figura 36 se presentan los agregados limpios y contaminados con arcilla recubiertos con asfalto, y en la Figura 37 se presenta el desprendimiento del asfalto después de un proceso de inmersión en agua de 18 horas como lo indica la norma INV- 737.

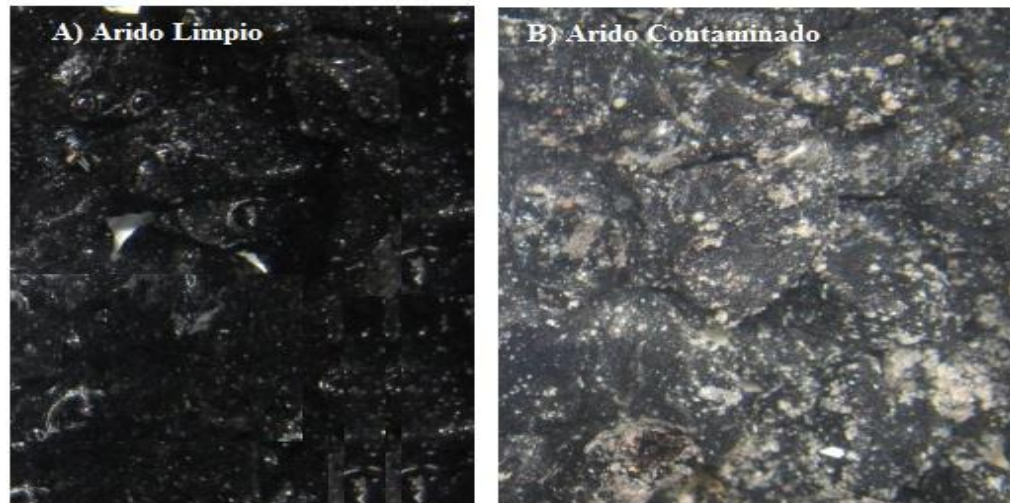
Figura 36. Agregados limpios y contaminados cubierto con asfalto



Fuente: Propia

Como se puede observar en la Figura 36 inicialmente no se nota ninguna diferencia entre los áridos (Limpios y contaminados) después de cubrirlos con asfalto. Sin embargo después de un proceso de inmersión en agua se observa el desprendimiento del ligante asfáltico con agregado para las dos mezclas.

Figura 37. Degradación del Agregado después de un proceso de inmersión de 18 horas



El porcentaje de desprendimiento del asfalto es mayor en la muestra contaminada con arcilla; lo que supone que al existir una parte de este material contaminante en una mezcla asfáltica, puede aumentar el deterioro por efecto del agua.

3.4. METODOLOGÍA DEL ENSAYO

Para estudiar la evolución del deterioro en las vigas de concreto asfáltico seleccionadas, se realizaron ensayos de módulo complejo a diferentes temperaturas, frecuencias y tiempos de inmersión en agua, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Factores y niveles para el diseño del experimento

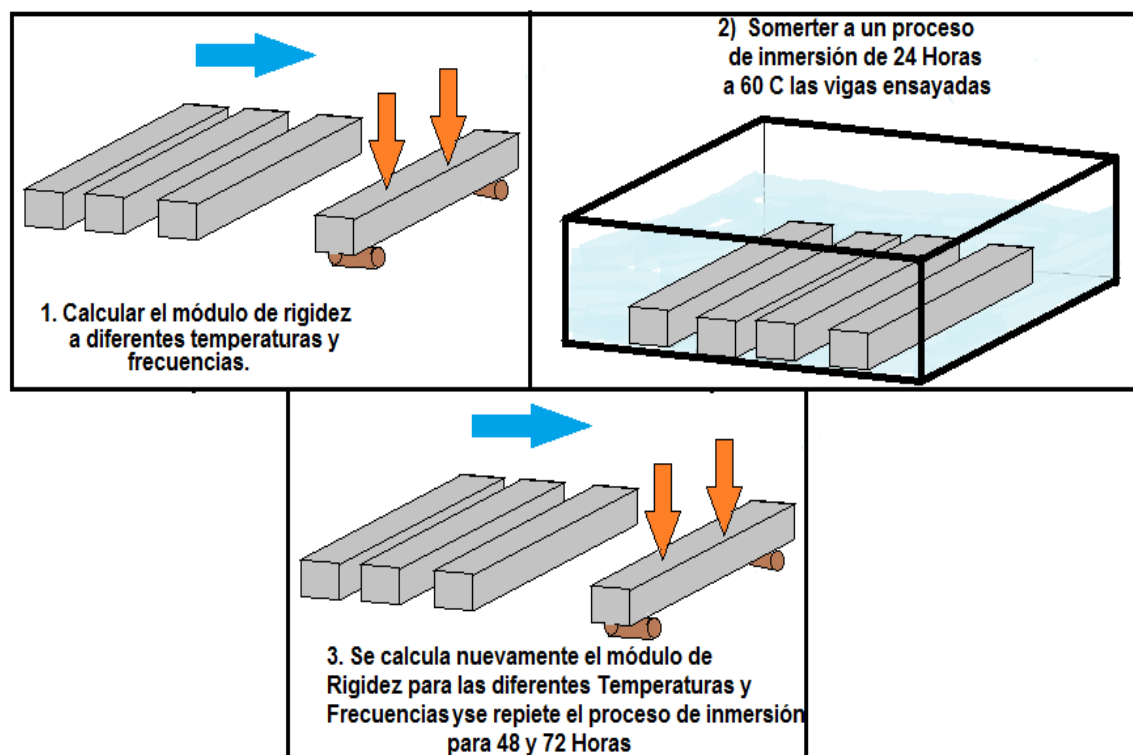
Frecuencia de aplicación de Carga (Hz)	Tiempos de inmersión	Temperatura del ensayo (°C)
1	0 horas	0,10,20,30
	24 horas	4,10,20,30
	48 horas	
	72 horas	
3	0 horas	0,10,20,30
	24 horas	4,10,20,30
	48 horas	
	72 horas	
5	0 horas	0,10,20,30
	24 horas	4,10,20,30
	48 horas	
	72 horas	
10	0 horas	0,10,20,30
	24 horas	4,10,20,30
	48 horas	
	72 horas	

Cada probeta se somete a ensayos de módulo para diferentes frecuencias de carga (1,3,5 y 10 Hz) y temperaturas (30, 20, 10 y 0 °C). Se calculan los módulos de rigidez y se verifican los resultados en el Plano Cole - Cole. (0 Horas de inmersión)

Después se someten las probetas a inmersión en agua a 60 °C durante 8, 24, 48 y 72 Horas; se ejecuta nuevamente el ensayo de módulo a las diferentes

combinaciones de frecuencias y temperaturas, en cada tiempo de inmersión. En la Figura 38 se muestra gráficamente el procedimiento.

Figura 38. Procedimiento experimental



3.4.1. Comportamiento de variables en el ensayo

El ensayo es realizado aplicando una carga dinámica, controlando la temperatura y la frecuencia. La carga aplicada no debe producir una deformación en el espécimen mayor a $150\mu\epsilon$, con lo cual se asegura que la sollicitación esta dentro del rango visco-elástico lineal del material (MOHAMED & ZEGHAL, 2007)

- **Nivel y frecuencia del esfuerzo aplicado**

La frecuencia de aplicación de la carga disminuye en cada ensayo, es decir, se inicia con 10Hz y finaliza con 1Hz. Al comienzo de la prueba se aplica una pre-carga dinámica de 200 ciclos a una frecuencia de 20 Hz y posteriormente se somete la probeta al número correspondiente de ciclos según la frecuencia del ensayo, ver Tabla 8.

Tabla 8. Número de ciclos para la prueba

Frecuencia (Hz)	Número de ciclos
20 (Precarga)	200
10	100
5	50
3	20
1	20

Fuente: Propia

- **Temperatura**

Las probetas se acondicionaron en la cámara de temperatura del equipo MTS – 810 con 6 horas de anterioridad al ensayo y la temperatura de prueba varió de 0 °C a 30 °C. En la Figura 39 se observa el montaje de la cámara de temperatura en la máquina MTS - 810.

Figura 39. Cámara de temperatura del Equipo de Carga.



Fuente: Registro fotográfico propio.

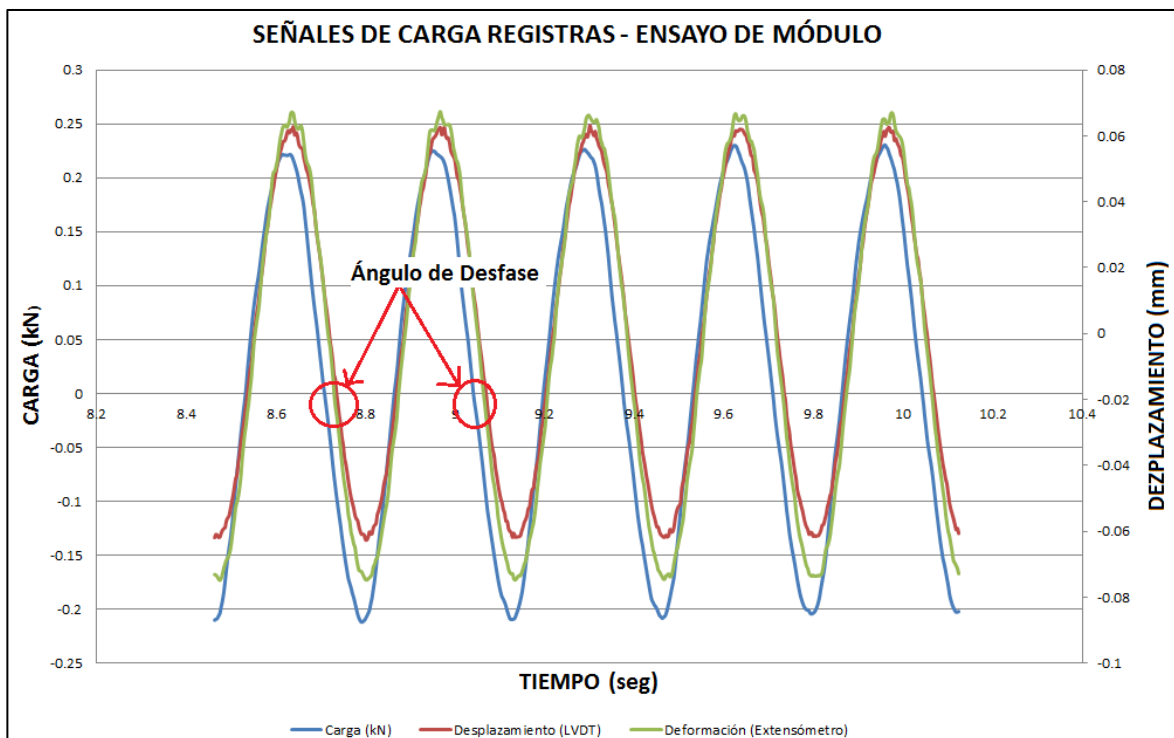
3.4.2. Interpretación de los datos

El software para la adquisición de datos registra la información en un archivo compatible con una hoja de cálculo; donde los valores medidos son dispuestos en filas o columnas según la programación. Las variables almacenadas durante la prueba fueron: tiempo, carga aplicada, desplazamiento medido por el LVDT del actuador de la máquina y los datos de deformación del extensómetro ubicado en el centro de la viga.

Al graficar en el tiempo la carga aplicada y el desplazamiento medido (LVDT y extensómetro), se observa el desfase entre las señales de la carga y el desplazamiento, ver Figura 40. Los datos de esfuerzo y deformación son

ajustados a funciones sinusoidales, y a partir de ellas se determina el módulo dinámico y el ángulo de desfase. Para facilitar este procedimiento repetitivo se programó una hoja de cálculo, ver Figura 41, la cual se consigna en el Anexo 3.

Figura 40. Resultados Iniciales del Equipo.



Fuente: Propia

Figura 41. Hoja de Cálculo.



Fuente: Propia

4. ANALISIS DE RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados de la caracterización volumétrica de las mezclas fabricadas, además evalúa el deterioro por efecto del agua, a partir de ensayos de módulo dinámico a diferentes frecuencias y temperaturas, empleando el método tradicional y la metodología de seguimiento de la rigidez visco-elástica en el plano complejo y así, determinar el factor (FA) de deterioro por efecto del agua en los materiales.

4.1. CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Para definir las proporciones de los diferentes materiales que componen la mezcla asfáltica, se determinan las relaciones volumétricas de las mezclas; esto incluye: el volumen de poros del agregado mineral, el porcentaje de vacíos de la mezcla, la densidad bulk y la densidad máxima teórica. Caracterizar las propiedades volumétricas del material, garantizan la homogeneidad de los cuerpos de prueba.

En la Tabla 9, se resumen los resultados de la caracterización volumétrica de los diferentes diseños de mezcla realizados.

Tabla 9. Caracterización Volumétrica de las muestras ensayadas.

IDENTIFICACIÓN PROBETAS	Wseco	Wsup.seco	Wsumergido	VOLUMEN	Volumen de poros	Densidad Bulk	Gmm	% de Vacíos
				cm ³	cm ³			
1-3-0	3012	3016	1745	1271	4	2.37	2.50	5.21
2-1-0	3024	3028	1775	1253	4	2.41	2.53	4.61
2-3-0	3032	3035	1765	1270	3	2.39	2.50	4.50
1-4-0	3074	3080	1793	1287	6	2.39	2.50	4.46
5-3-2.5	2723	2726	1572	1154	3	2.36	2.49	5.24
3-2-2.5	2602	2608	1543	1065	6	2.44	2.57	4.93
5-5-2.5	2768	2772	1605	1167	4	2.37	2.49	4.74
5-4-2.5	2799	2802	1622	1180	3	2.37	2.49	4.74
3-1-5	2607	2612	1527	1085	5	2.40	2.51	4.27
3-6-5	2622	2628	1532	1096	6	2.39	2.52	5.07
4-5-5	2794	2798	1625	1173	4	2.38	2.52	5.48
4-6-5	2768	2772	1605	1167	4	2.37	2.52	5.88
4-7-10	2794	2798	1625	1173	4	2.38	2.48	3.95
1-2-10	2778	2783	1596	1187	5	2.34	2.48	5.63
1-8-10	2788	2792	1605	1187	4	2.35	2.48	5.29
4-7-10	2668	2671	1548	1123	3	2.38	2.48	4.20

Fuente: cálculos Propios

Las probetas según su composición fueron identificadas con la nomenclatura mostrada en la Figura 42, para facilitar su manipulación en el laboratorio y su respectivo análisis.

Figura 42. Identificación de probetas



Una vez determinadas las propiedades volumétricas de las vigas, se procedió a realizar los ensayos de módulo dinámico para determinar las características mecánicas y la evolución de la rigidez en cada probeta.

4.2. EVALUACIÓN DE LA RIGIDEZ

La rigidez de la mezcla bituminosa se deteriora a medida que el material se somete a procesos de inmersión en agua acondicionada a una temperatura de 60 °C, cuando se evalúa el deterioro mediante el módulo complejo se espera que para condiciones de ensayo iguales (frecuencia y temperatura) el módulo de rigidez disminuya.

Los resultados obtenidos en el laboratorio permiten evaluar el deterioro de la mezcla. La evaluación se hace comparando valores de módulo y observando la evolución de la rigidez visco-elástica, en el plano Cole-cole.

4.2.1. Método tradicional

Los ensayos tradicionales realizan comparaciones de la rigidez de manera individual con el fin de encontrar la variación del módulo de rigidez en cada par de valores de temperatura y frecuencia; al evaluar los resultados con este método se observa que no se puede clasificar el deterioro de las muestras ya que los datos no muestran una tendencia definida.

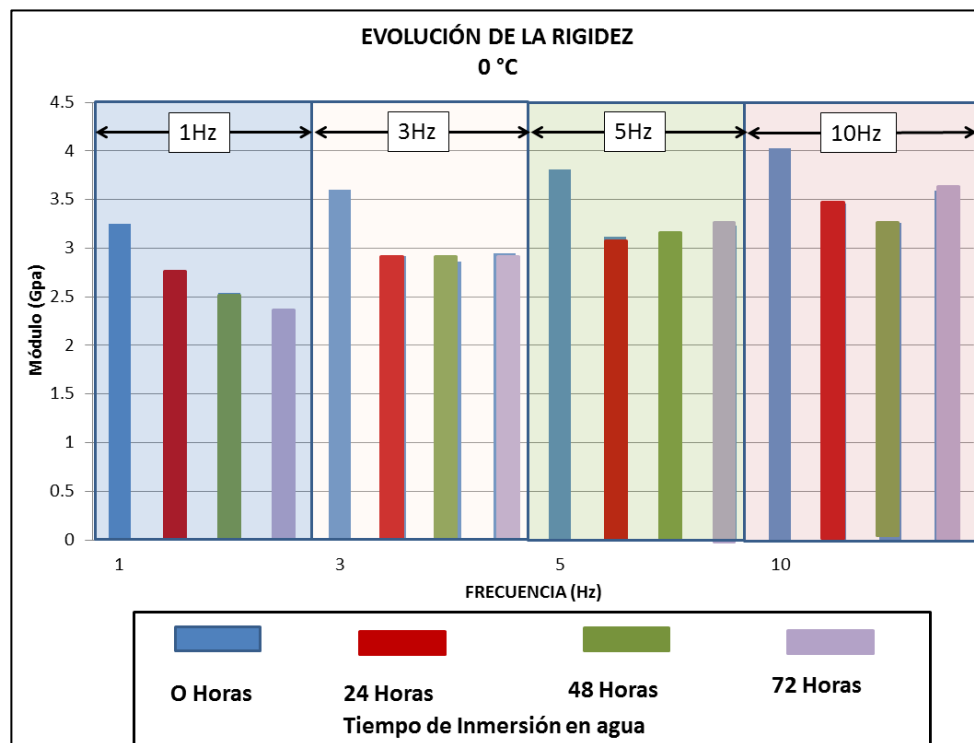
Obviamente las probetas sufren mayor deterioro cuanto mayor sea el tiempo de inmersión en agua, no obstante algunos resultados de la variación individual de módulo de rigidez indican que no hay deterioro sino aumento de la calidad del material, lo cual es un resultado erróneo. En la Tabla 10 se presentan los resultados de una probeta evaluada a 10°C con diferentes frecuencias de carga.

Tabla 10. Variación de la rigidez evaluada para diferentes temperaturas.

Frecuencia (Hz)	Temperatura (Grados °)				Tiempo de Inmersión Horas
	0	10	20	30	
1	3.24	2.36	1.35	0.41	0
	3.45	2.05	0.95	0.37	24
	3.07	2.21	0.83	0.42	48
	3.21	2.54	0.22	NA	72
3	3.62	2.53	2.04	0.66	0
	3.79	2.41	1.32	0.60	24
	3.28	2.51	1.27	0.65	48
	3.67	2.64	0.39	NA	72
5	4.04	2.71	2.18	0.78	0
	4.08	2.55	1.46	0.70	24
	3.16	2.71	1.47	0.71	48
	3.77	3.03	0.52	NA	72
10	4.52	2.75	2.49	1.03	0
	4.45	2.77	1.67	0.86	24
	3.83	2.96	1.84	0.93	48
	3.92	3.44	0.75	NA	72

En la Tabla 10 se observa que la rigidez disminuye al final de varios procesos de inmersión en agua, sin embargo, analizando los diferentes ciclos la rigidez aumenta y disminuye sin que exista un comportamiento coherente. La Figura 43 muestra el comportamiento de los datos evaluados en las mismas condiciones de ensayo (0°C – 1, 3, 5 y 10 Hz).

Figura 43. Variación de la Rigidez P2-1–0%



Fuente: Propia

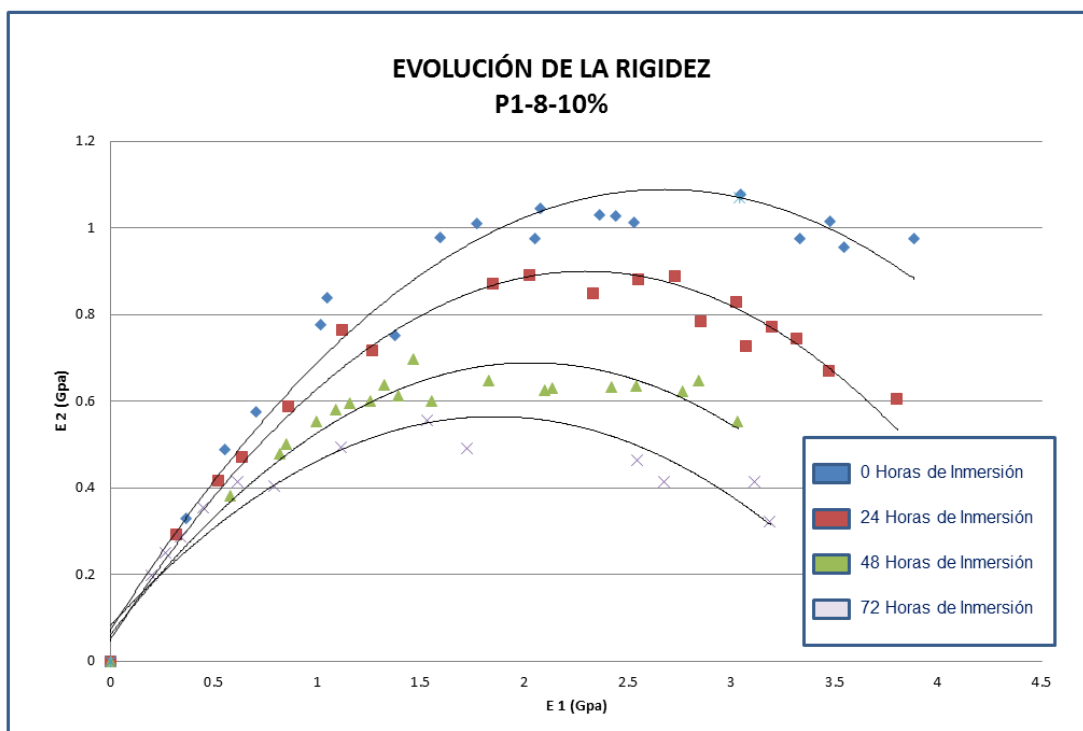
Al evaluar el deterioro a partir de los datos de módulos dinámicos sin considerar las componentes visco-elásticas del material, los resultados no reflejan una disminución constante a través de los ciclos de inmersión a los que se somete la mezcla asfáltica y en ocasiones presenta aumento de la rigidez que se atribuye al envejecimiento del asfalto por efecto del agua. Por esta razón no es confiable utilizar la evaluación del deterioro por efecto del agua mediante análisis tradicionales.

Se recomienda tener en cuenta las componentes visco-elásticas de la rigidez para diferentes combinaciones de frecuencia y temperatura, logrando determinar la evolución de la rigidez representada en un plano complejo. El deterioro por efecto del agua en el material asfáltico, a través de este análisis sí presenta una disminución progresiva de la rigidez.

4.2.2. Evolución de la rigidez en el Plano Complejo

Después de cada proceso de inmersión se evaluó el conjunto de valores de rigidez registrados en cada cuerpo de prueba y se grafican los resultados en el plano Cole- Cole obteniendo una curva en forma de arco, como se observa en la Figura 44.

Figura 44. Curvas de modulo para la viga P1-8-10% en el plano Cole - Cole



La Figura 44 muestra la degradación gradual de una probeta bajo el efecto del agua; cada curva relaciona un ensayo de módulo complejo a diferentes temperaturas, frecuencias de carga y tiempos de inmersión. Se observa que la rigidez del material presenta mayor deterioro a medida que aumentan los tiempos de inmersión en agua. La Tabla 11 presenta los resultados obtenidos en una de las probetas analizadas (P1- 8-10%).

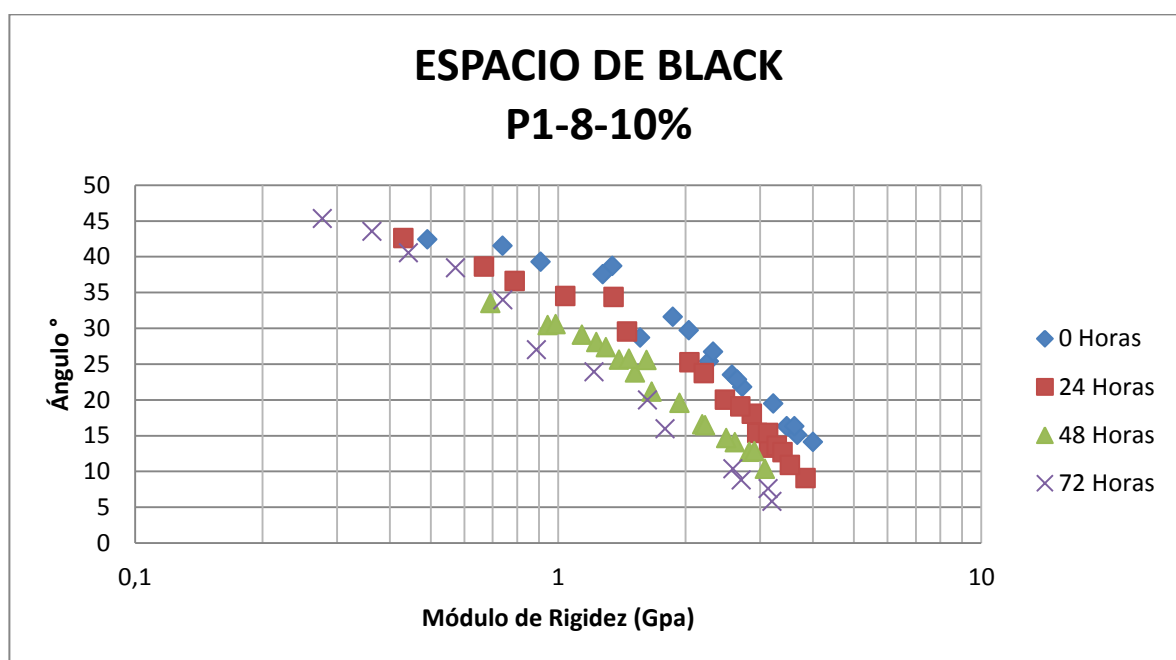
Tabla 11. Resultados de módulo de P1-8.10%

		Tiempo de inmersión en agua a 60 °C P1-8-10%															
		0 horas				24 Horas				48 Horas				72 Horas			
Temperatura	Frecuencia	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°
0 °C	1	3.33	0.97	3.5	16.3	2.85	0.78	2.96	15.35	2.10	0.62	2.19	16.56	NA	NA	NA	NA
	3	3.55	0.96	3.7	15.1	3.07	0.73	3.15	13.32	2.54	0.63	2.62	14.05	NA	NA	NA	NA
	5	3.88	0.98	4.0	14.1	3.80	0.61	3.85	9.05	2.76	0.62	2.83	12.70	NA	NA	NA	NA
10 °C	1	2.05	0.97	2.3	25.4	2.73	0.89	2.87	18.06	1.55	0.60	1.66	21.13	2.55	0.46	2.59	10.34
	3	2.36	1.03	2.6	23.5	3.02	0.83	3.13	15.35	1.82	0.65	1.94	19.56	2.68	0.41	2.71	8.80
	5	2.53	1.01	2.7	21.8	3.20	0.77	3.29	13.59	2.13	0.63	2.22	16.44	3.11	0.42	3.14	7.60
	10	3.04	1.08	3.2	19.5	3.31	0.74	3.39	12.66	2.42	0.63	2.50	14.64	0.79	0.40	0.89	27.00
20 °C	1	1.05	0.84	1.3	38.7	1.12	0.76	1.35	34.34	0.81	0.48	0.94	30.41	1.11	0.49	1.22	23.89
	3	1.59	0.98	1.9	31.6	1.85	0.87	2.04	25.24	1.09	0.58	1.23	28.08	1.53	0.56	1.63	19.98
	5	1.77	1.01	2.0	29.7	2.02	0.89	2.21	23.74	1.15	0.60	1.30	27.33	1.72	0.49	1.79	15.94
	10	2.08	1.05	2.3	26.7	2.33	0.85	2.48	20.03	1.26	0.60	1.39	25.58	0.19	0.20	0.28	45.33
30 °C	1	0.36	0.33	0.5	42.4	0.32	0.29	0.43	42.61	0.58	0.38	0.69	33.53	0.26	0.25	0.36	43.52
	3	0.55	0.49	0.7	41.5	0.52	0.42	0.67	38.61	0.85	0.50	0.99	30.55	0.34	0.29	0.44	40.53
	5	0.70	0.58	0.9	39.3	0.63	0.47	0.79	36.59	0.99	0.55	1.14	29.09	0.45	0.36	0.57	38.43
	10	1.01	0.78	1.3	37.5	0.86	0.59	1.04	34.51	1.32	0.64	1.47	25.75	0.61	0.41	0.74	33.97

Fuente: Cálculos Propios

La disminución de la rigidez de la probeta (P1- 8-10%) se visualiza en el diagrama de Black, ver Figura 45, en sus abscisas se relaciona los valores de módulo de rigidez en escala logarítmica y en sus ordenadas el ángulo de desfase para cada punto.

Figura 45. Evolución de la rigidez en el Espacio de Black para la probeta P1-8-10%.



Fuente: Propia

El Plano Cole-Cole y el espacio de Black relacionan los valores de módulo complejo reflejando el deterioro de la mezcla por efecto del agua. En estas gráficas se confirma la hipótesis de que el valor de módulo de rigidez por sí solo no permite evaluar la evolución del deterioro por efecto del agua y que el análisis de la evolución de la rigidez en el plano complejo es una medida de mayor confiabilidad.

En este estudio se evalúa el deterioro de las mezclas a través de la evolución de la rigidez en el plano Cole – cole, para ello se determinan funciones características de cada curva y el grado de disminución de las mismas en el plano, teniendo como referencia la curva de rigidez inicial del material.

4.3. FACTOR DE DEGRADACIÓN DE LA MEZCLA (FA)

Para determinar el factor de deterioro se hizo la evaluación en el plano complejo Cole-Cole y en el diagrama de Black. A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada gráfico.

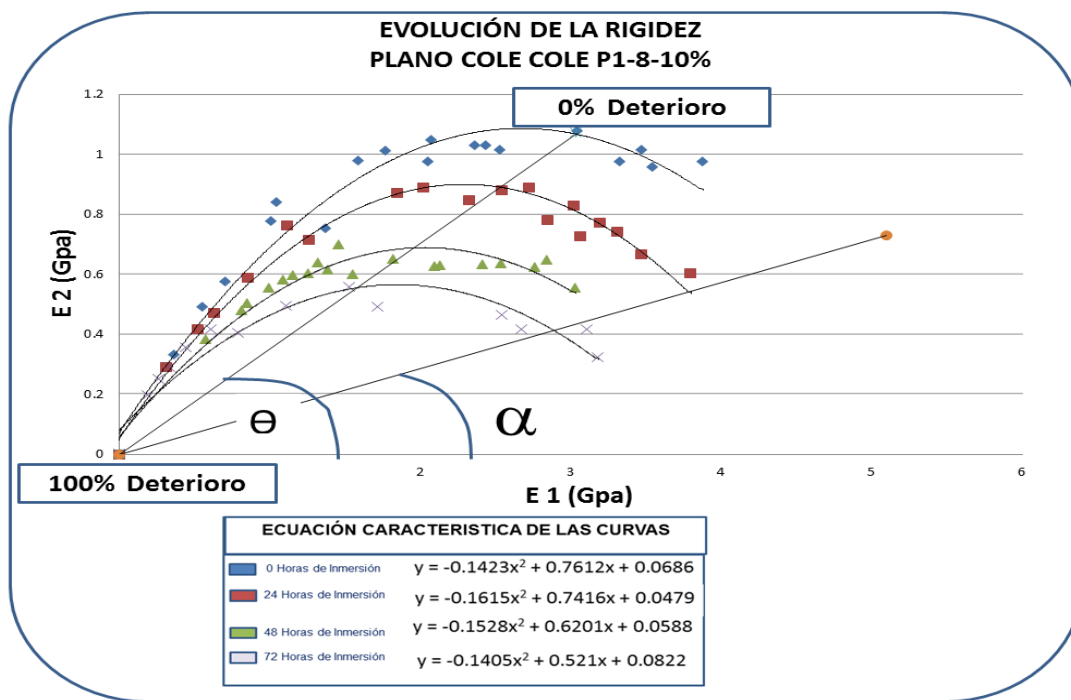
4.3.1. Factor de deterioro en el plano Cole - Cole

Para establecer la variación de la rigidez en las curvas de las probetas ensayadas, se definieron los ángulos de evaluación θ y α , y se determinaron los factores de deterioro en cada mezcla.

El análisis se realizó con un ángulo α de menor valor a θ , localizado en la zona de valores de módulo a bajas temperaturas, y se calculó el valor E_{∞} , que corresponde al módulo cuando $\alpha=0$.

Se establecieron las funciones de ajuste para los resultados obtenidos y se analizó la disminución de la rigidez del material, al encontrar valores de módulo en las curvas para los ángulos de evaluación constantes (θ y α) en cada proceso de inmersión, y así, determinar el porcentaje de disminución de la rigidez en los cuerpos de prueba. En la Figura 46 se presentan las funciones características de las curvas en uno de los especímenes analizados (P1-8-10%) para determinar el factor de deterioro (FA).

Figura 46 Comparación de curvas de y niveles de degradación en el plano Cole – Cole



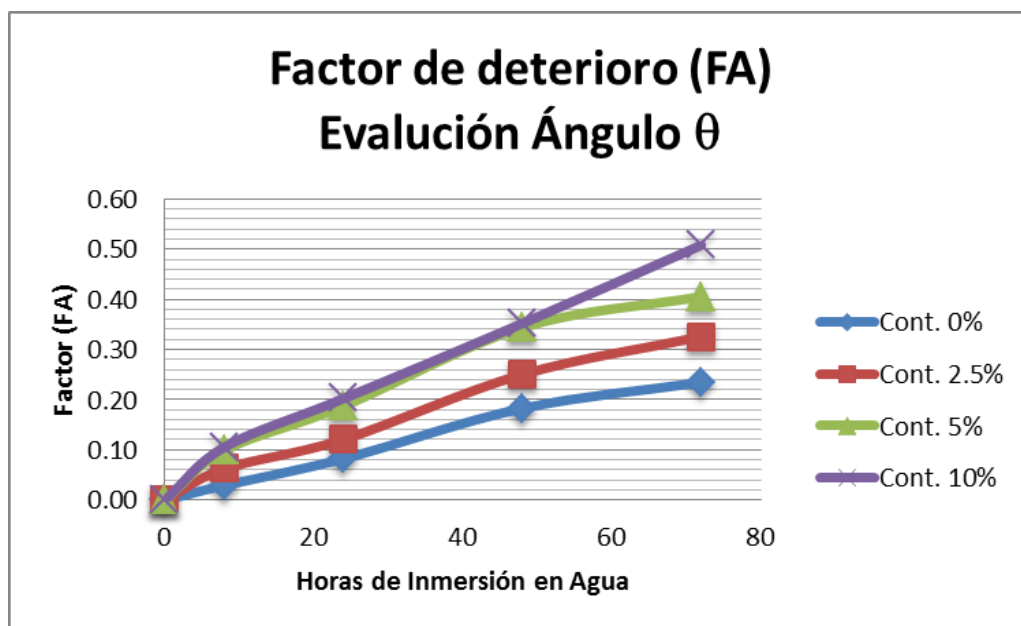
La Tabla 12 resume los factores de deterioro calculados en mezclas con diferentes porcentaje de contaminación después de cada proceso de inmersión utilizando el ángulo de evaluación θ . En la Figura 47 se presentan gráficamente estos resultados.

Tabla 12. Factores de deterioro FA para las diferentes mezclas. – Ángulo de Evaluación θ .

% de Contaminación Horas de Inmersión	Factor FA - Ángulo θ			
	0%	2.5%	5%	10%
0	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.03	0.06	0.10	0.11
24	0.08	0.12	0.19	0.20
48	0.18	0.25	0.34	0.35
72	0.23	0.33	0.41	0.51

Fuente: Propia.

Figura 47. Degradación de las probetas para diferentes tiempos de inmersión en agua.

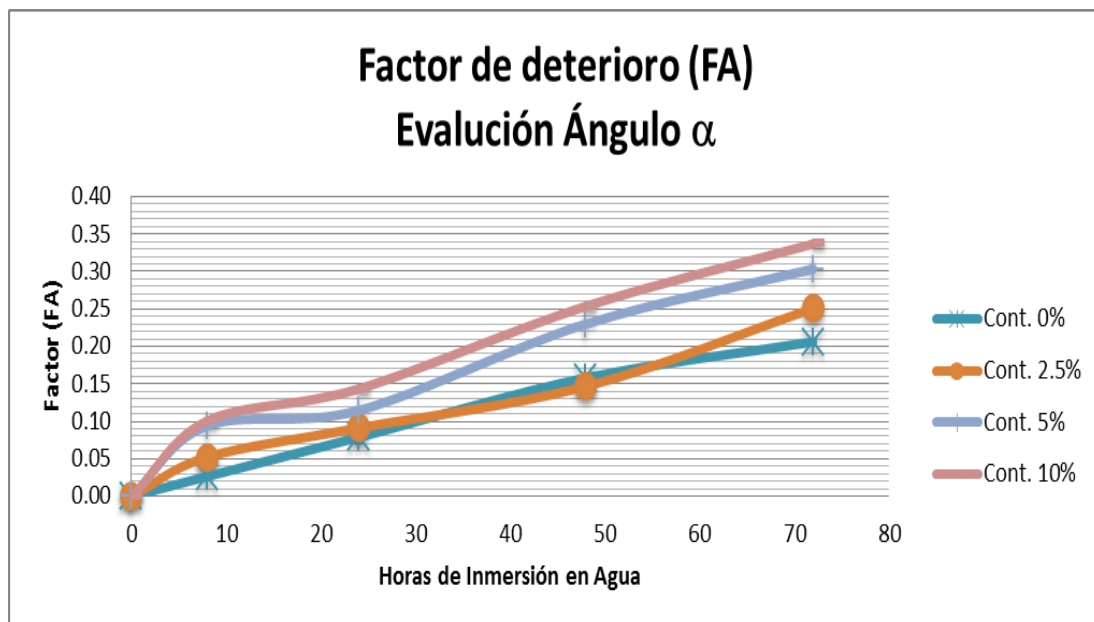


En la figura anterior se observan los resultados del factor FA calculados para el ángulo θ ; en las abscisas se relacionan los tiempos de inmersión en agua y en las ordenadas el factor Fa calculado. Cada línea representa un tipo de mezcla con diferentes porcentajes de contaminación; se concluye que a medida que aumenta el porcentaje de contaminación el factor de deterioro es mayor. Sucede lo mismo al hacer la evaluación con un ángulo inferior α ; en la Tabla 13 se presentan los resultados.

Tabla 13. Factores de deterioro para las diferentes mezclas.

Horas de Inmersión \ % de Contaminación	Factor FA - Ángulo α			
	0%	2.5%	5%	10%
0	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.03	0.05	0.09	0.10
24	0.08	0.09	0.11	0.14
48	0.16	0.15	0.23	0.25
72	0.21	0.25	0.30	0.34

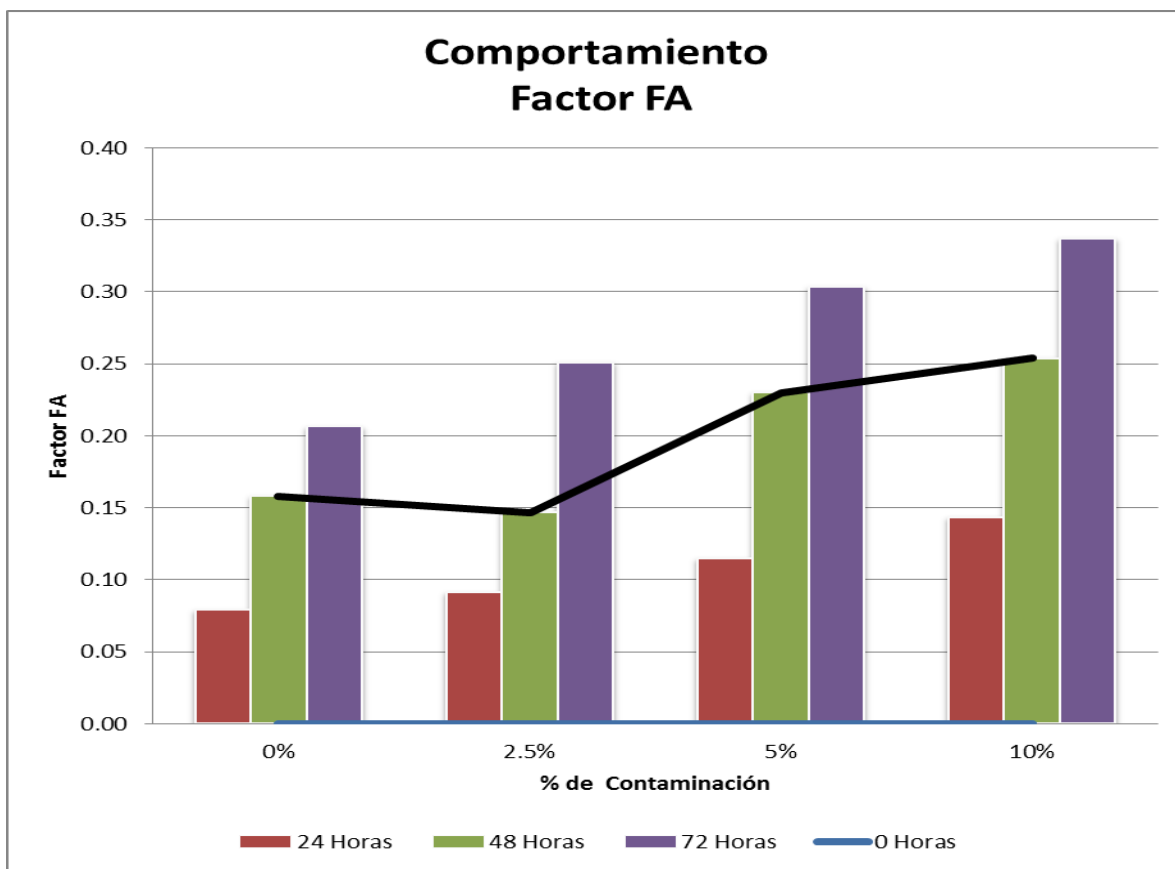
Figura 48. Degradación de las probetas para diferentes tiempos de inmersión en agua.



Como se puede observar en la Figura 48 las probetas con un porcentaje de contaminación del 10% presentan hasta un 35% de deterioro ($FA=0.35$) en su rigidez por efecto del agua después de 72 horas de inmersión.

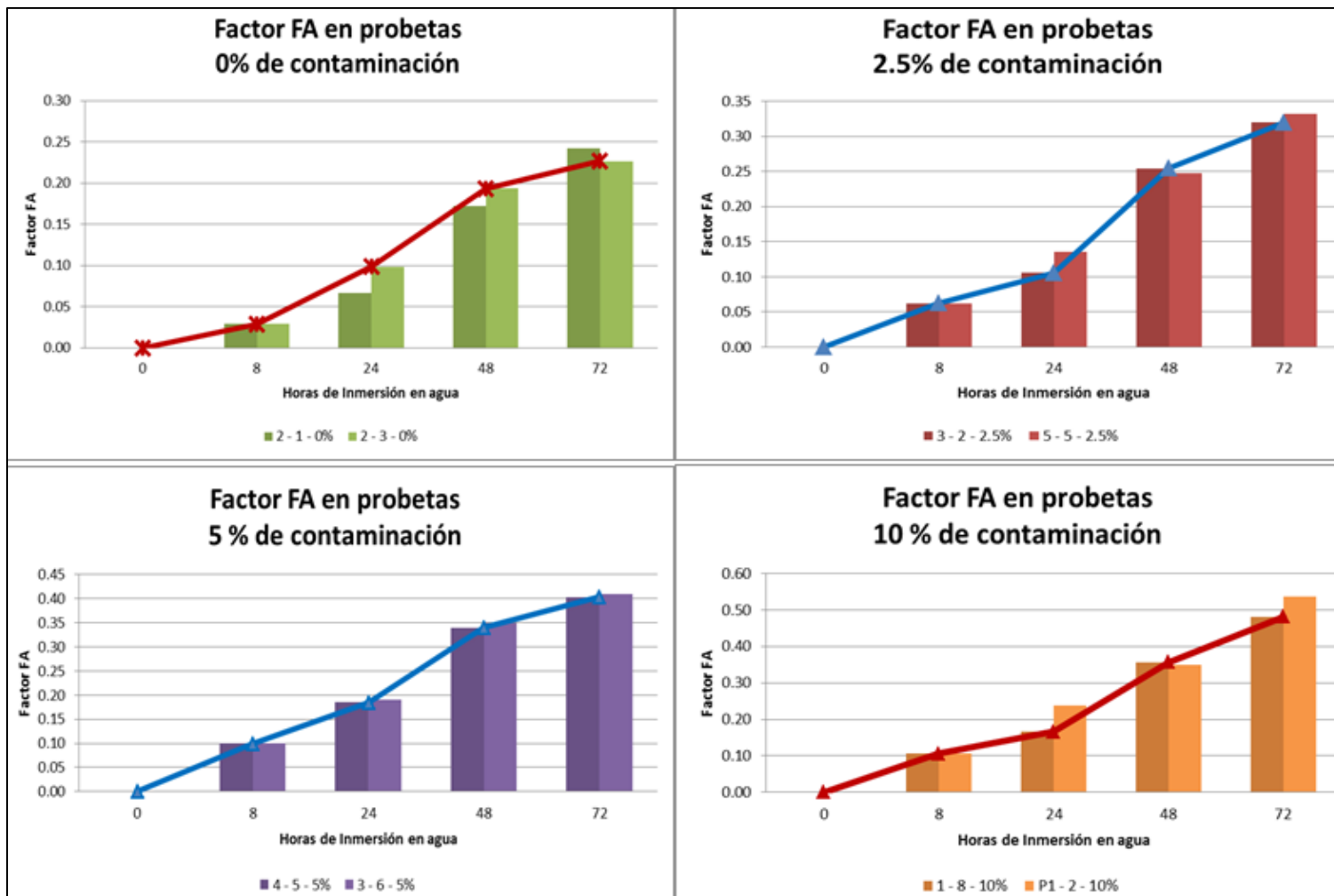
Al finalizar los ensayos se compararon los diferentes valores de degradación sobre cada una de las probetas y se comprobó que las probetas con mayor porcentaje de contaminación en el árido, son más susceptibles al deterioro por efecto del agua. (Ver Figura 49)

Figura 49. Factor FA Vs % de contaminación en probetas.



Para corroborar la confiabilidad de estos resultados se compararon los factores de deterioro encontrados en probetas con el mismo porcentaje de contaminación. En la Figura 50 se muestra la variación del factor FA.

Figura 50. Repetitividad del ensayo evaluando la rigidez en el plano Cole – Cole



De la figura anterior, se concluye que a mayores tiempos de inmersión en agua para cualquier tipo de mezcla el deterioro aumenta, y se observan los resultados para dos probetas de cada tipo (8 probetas en total), en los cuales la variación de los resultados se encuentra en un rango entre el 1% y 10% aproximadamente; en la siguiente tabla se presenta la variación de resultados para los diferentes porcentajes de contaminación.

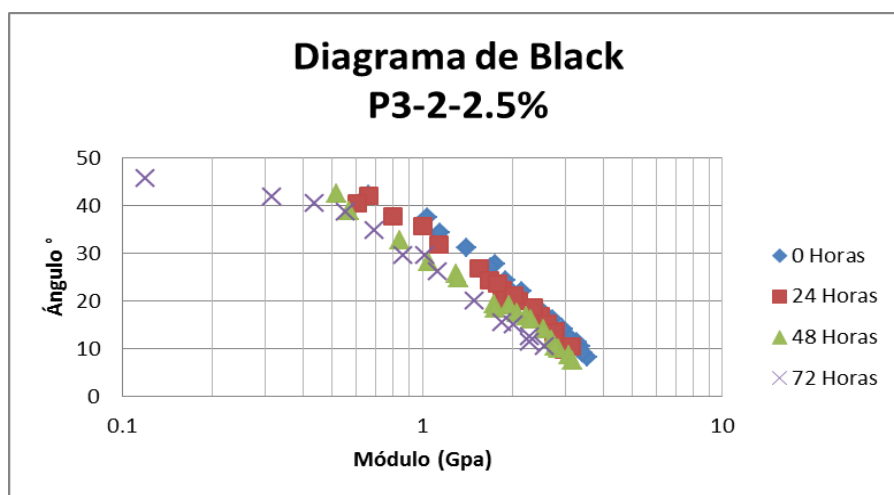
Tabla 14. Variación de Resultados

% de Contaminación	% Variación
0	6.5%
2.5	4.0%
5	1.3%
10	10.3%

4.3.2. Factor de deterioro en el Espacio de Black

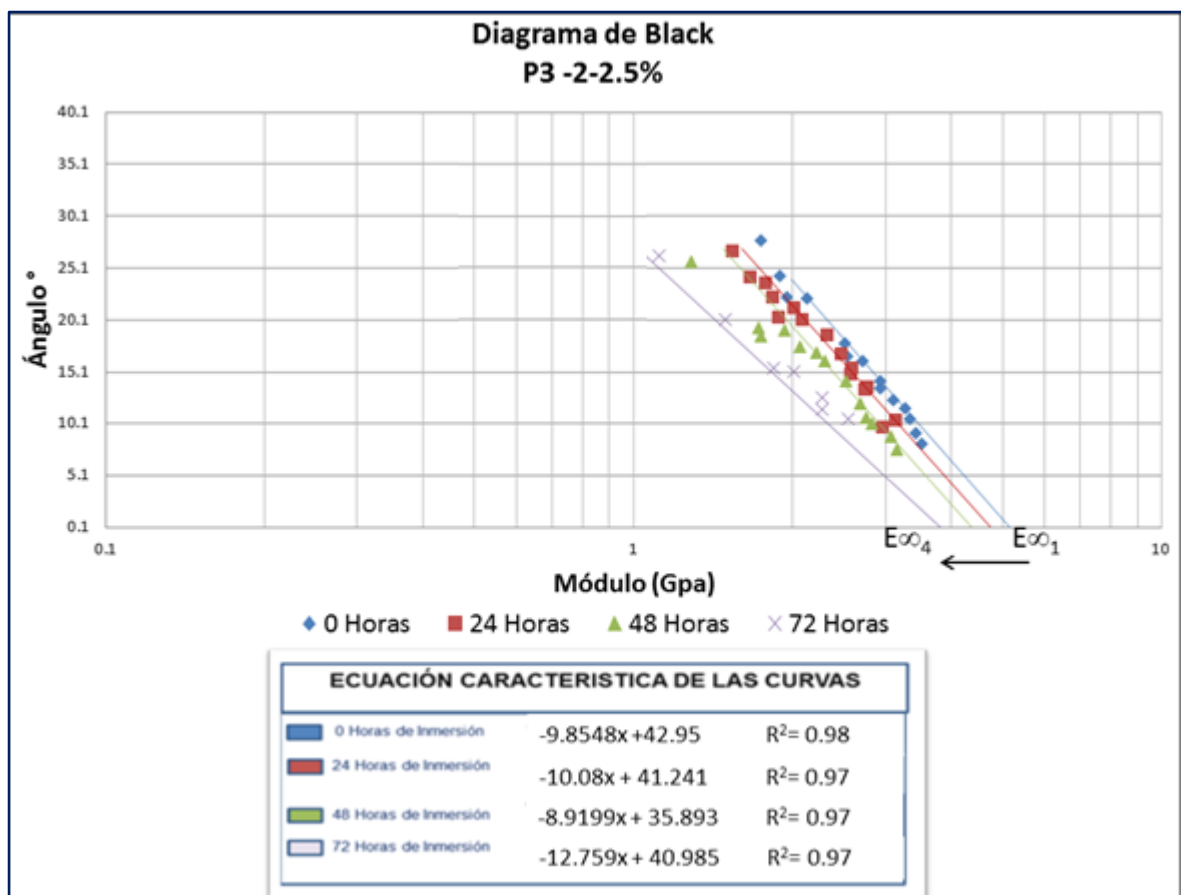
Se utilizó el diagrama de Black para evaluar el factor de deterioro de las mezclas teniendo en cuenta que para bajas temperaturas presenta un comportamiento lineal como se muestra a continuación.

Figura 51. Resultados P3-2-2.5% en el diagrama de Black



Se puede observar en la gráfica anterior que los valores de módulos superiores a 1 Gpa presentan un comportamiento que se puede definir con una función lineal y así, calcular el Valor de E_{∞} . Sin embargo se hace necesario identificar los puntos que definen cada una de estas funciones. El error máximo permitido de ajuste debe ser inferior al 5% para que exista una buena correlación de los datos analizados. A continuación se presenta la grafica depurada con las funciones correspondientes.

Figura 52. Funciones a trabajar en el diagrama de Black



Fuente: Propia

Este procedimiento se repitió para cada una de las vigas analizadas y se calcularon los valores de E_{∞} , para determinar el porcentaje de degradación de la

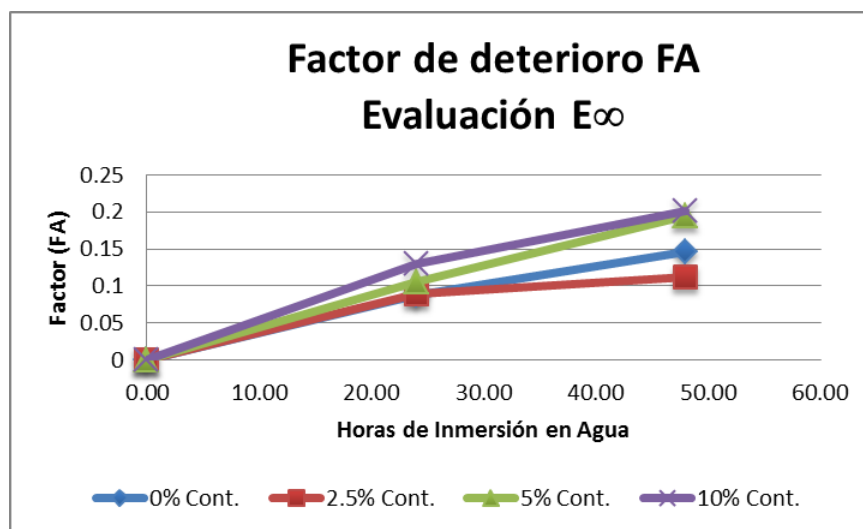
mezcla. El factor FA se calculó teniendo en cuenta como valor inicial $E_{\infty 1}$, que corresponde al valor de módulo con un ángulo de 0 grados para 0 horas de inmersión en agua y los siguientes valores de $E_{\infty n}$ que corresponden a los módulos registrados para 24, 46, y 72 horas de inmersión en agua con el mismo ángulo (0 grados) de evaluación. (Ver Tabla 15)

Tabla 15. Factor FA P3-2-2.5%

Tiempo de Inmersión (Horas)	E_{∞} (Gpa)	FA
0	4.36	0.00
24	4.09	0.06
48	4.02	0.08
72	3.21	0.26

En la Figura 53 se presenta el comportamiento de los datos para todas las mezclas trabajadas, en las abscisas el tiempo de inmersión en agua y en las ordenadas el factor FA, cada línea representa el comportamiento de las mezclas analizadas.

Figura 53. Evaluación del factor FA en el diagrama de Black



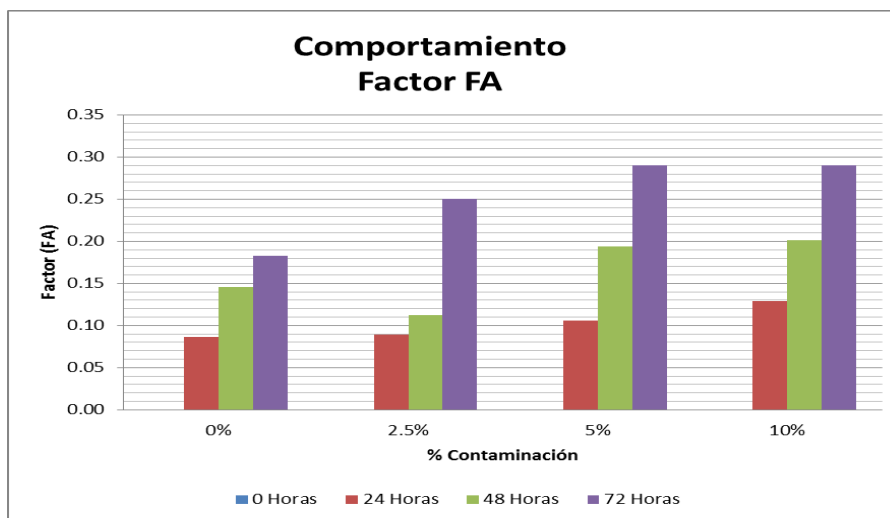
Como se observa en la Figura 53 las probetas con mayor porcentaje de material contaminado presentan mayor deterioro, en este caso las probetas con el 10% del material contaminado presentaron hasta un 30% de deterioro ($FA=0.30$) en su rigidez por efecto del agua. (Ver Figura 55)

Tabla 16. Resultados obtenidos evaluando E_{∞} en el diagrama de Black

%Contaminación	Identificación	Tiempo de inmersión en horas				
		0	24	48	72	
0.00%	2 - 1 - 0%	0.0	0.08	0.16	0.18	Factor de Degradación en cada probeta (FA)
	2 - 3 - 0%	0.0	0.09	0.13	0.19	
2.50%	3 - 2 - 2.5%	0.0	0.06	0.08	0.26	
	5 - 5 - 2.5%	0.0	0.12	0.15	0.24	
5.00%	4 - 5 - 5%	0.0	0.09	0.13	0.30	
	3 - 6 - 5%	0.0	0.12	0.26	0.31	
10.00%	1 - 8 - 10%	0.0	0.14	0.23	0.29	
	1 - 2 - 10%	0.0	0.08	0.13	0.20	

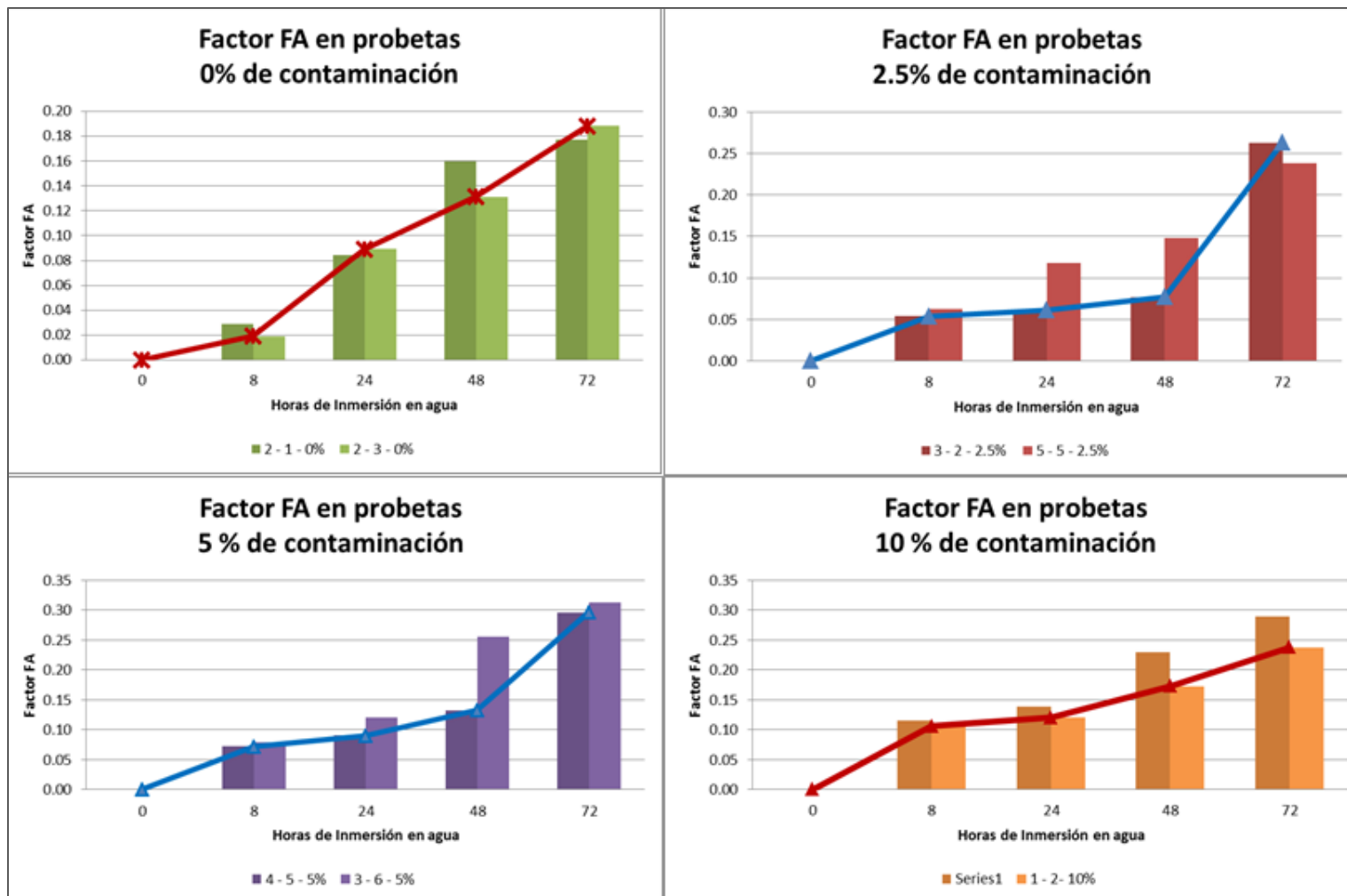
El comportamiento de los datos muestra que a mayor porcentaje de contaminación, el factor FA es mayor, en cada porcentaje de contaminación de la mezcla según los ciclos de inmersión en agua este factor también aumenta. (ver Figura 54)

Figura 54. Factor FA Vs % de contaminación en probetas.



De los resultados anteriores se puede concluir que los métodos de evaluación con base en el módulo complejo permiten diferenciar el efecto del agua sobre diferentes materiales ensayados. La repetitividad del ensayo se presenta en la Figura 55 para cada tipo de mezcla.

Figura 55. Repetitividad del ensayo evaluando la rigidez en el diagrama de Black



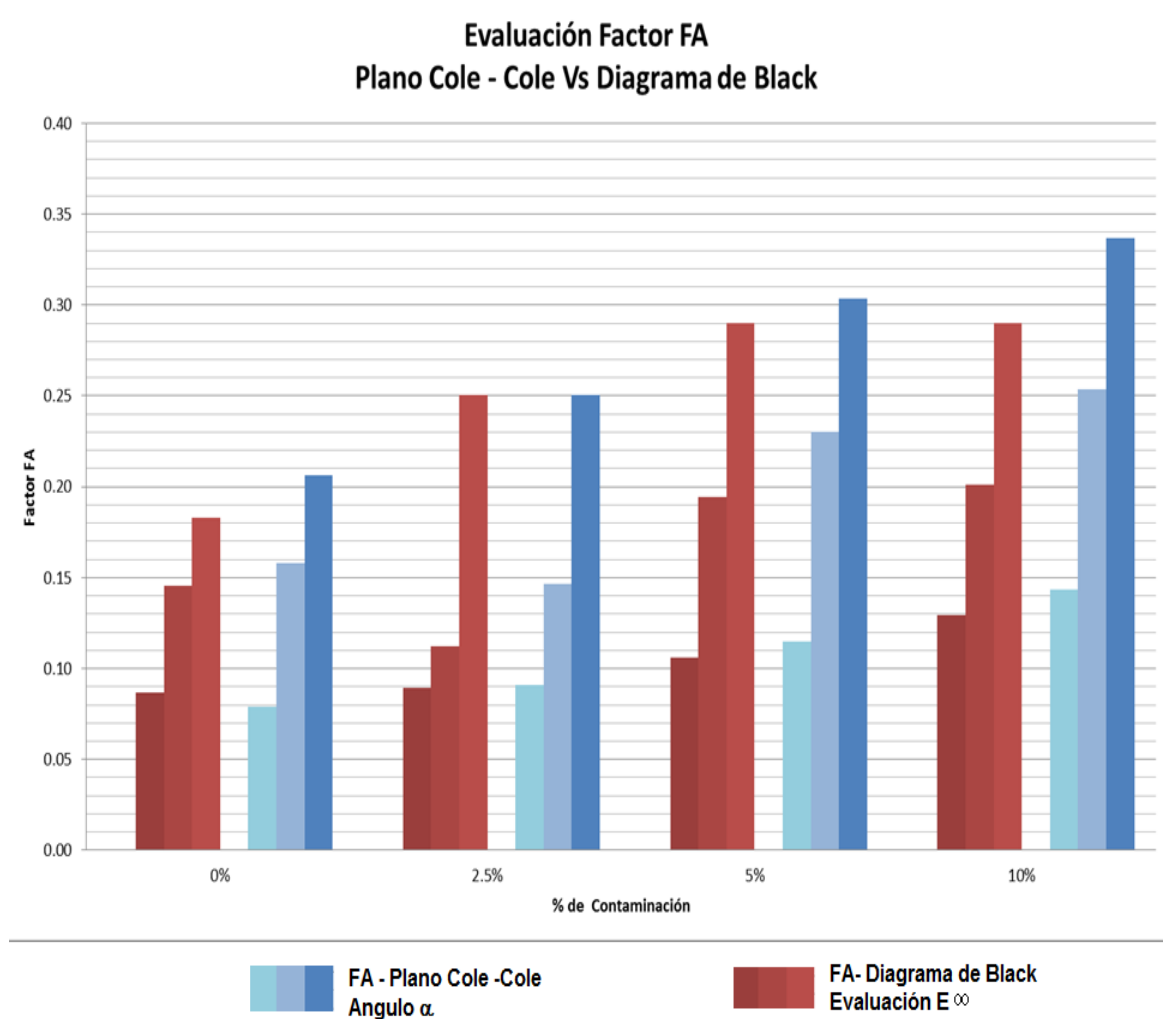
A partir de los resultados observados se concluye que el comportamiento de los datos presenta la tendencia esperada, sin embargo los valores de E_{∞} no son resultados confiables debido a que la variación de los resultados para cada par de probetas es superior al 10%. En la Tabla 17 se presentan las variaciones dependientes del tipo de mezcla.

Tabla 17 Variación de Resultados.

% de Contaminación	% Variación
0	3.5%
2.5	28.5%
5	26.1%
10	22.9%

Se debe tener en cuenta que al utilizar esta metodología, para encontrar los valores de E_{∞} , se elimina una gran parte de los datos al linealizar las funciones, a diferencia del ajuste que se realiza cuando se trabaja con las curvas en el plano Cole – Cole teniendo en cuenta que utiliza la información de los valores de módulo en conjunto sin excluir datos. Sin embargo vale la pena comparar los factores FA con las diferentes metodologías de evaluación. En la Figura 56 se presentan los resultados del factor FA evaluado en el plano complejo con el ángulo α y en el diagrama de Black calculando E_{∞} .

Figura 56. Factor FA para la mezclas.



La Figura 46 describe el comportamiento de los factores FA, se observa que los resultados son similares en las dos formas de evaluación, sin embargo se recomienda trabajar con los resultados obtenidos en la evaluación a través del plano Cole – Cole, debido a que se tiene en cuenta los resultados obtenidos en conjunto para las diferentes combinaciones de frecuencia y temperatura de carga. En la siguiente tabla se presenta la variación del Factor de deterioro teniendo en cuenta las dos metodologías.

Tabla 18. Variación del Factor FA (72 Horas)

Contaminación	FA - 72 Horas		Variación
Evaluación	E_{∞}	α	%
0%	0.18	0.21	12.9%
2.5%	0.25	0.25	0.1%
5%	0.29	0.30	4.6%
10%	0.29	0.34	16.2%

Al utilizar la metodología de evaluación de deterioro por efecto del agua a través del módulo complejo se determinaron los factores de degradación (FA) en cada una de las mezclas estudiadas. En la Tabla 19 se establece la comparación entre los factores esperados y los factores medidos del deterioro en las mezclas.

Tabla 19. Evaluación del Factor de Deterioro Calculado Vs. Valor esperado

Porcentaje de Contaminación	Tiempo de Inmersión Horas					
	0	8	24	48	72	
0.0%	0.000	0.027	0.079	0.158	0.206	FE
	0.000	0.027	0.079	0.158	0.206	FM
Δ	0%	0%	0%	0%	0%	
2.5%	0.00	0.05	0.11	0.20	0.25	FE
	0.00	0.05	0.09	0.15	0.25	FM
Δ	0.0%	0.1%	1.4%	5.7%	0.3%	
5.0%	0.00	0.08	0.13	0.22	0.27	FE
	0.00	0.09	0.11	0.23	0.30	FM
Δ	0.0%	-1.7%	1.4%	-0.6%	-3.0%	
10.0%	0.00	0.13	0.17	0.26	0.31	FE
	0.00	0.10	0.14	0.25	0.34	FM
Δ	0.0%	2.5%	3.1%	1.1%	-2.6%	

FE= Factor Esperado

FC= Factor Medido

Para calcular el factor esperado de deterioro en cada una de las mezclas, se define como valor de referencia, el factor FA obtenido para materiales que no fueron contaminados. Por ejemplo para calcular el factor de deterioro esperado en una probeta con el 5% de contaminación a las 24 horas de inmersión se realiza el siguiente procedimiento:

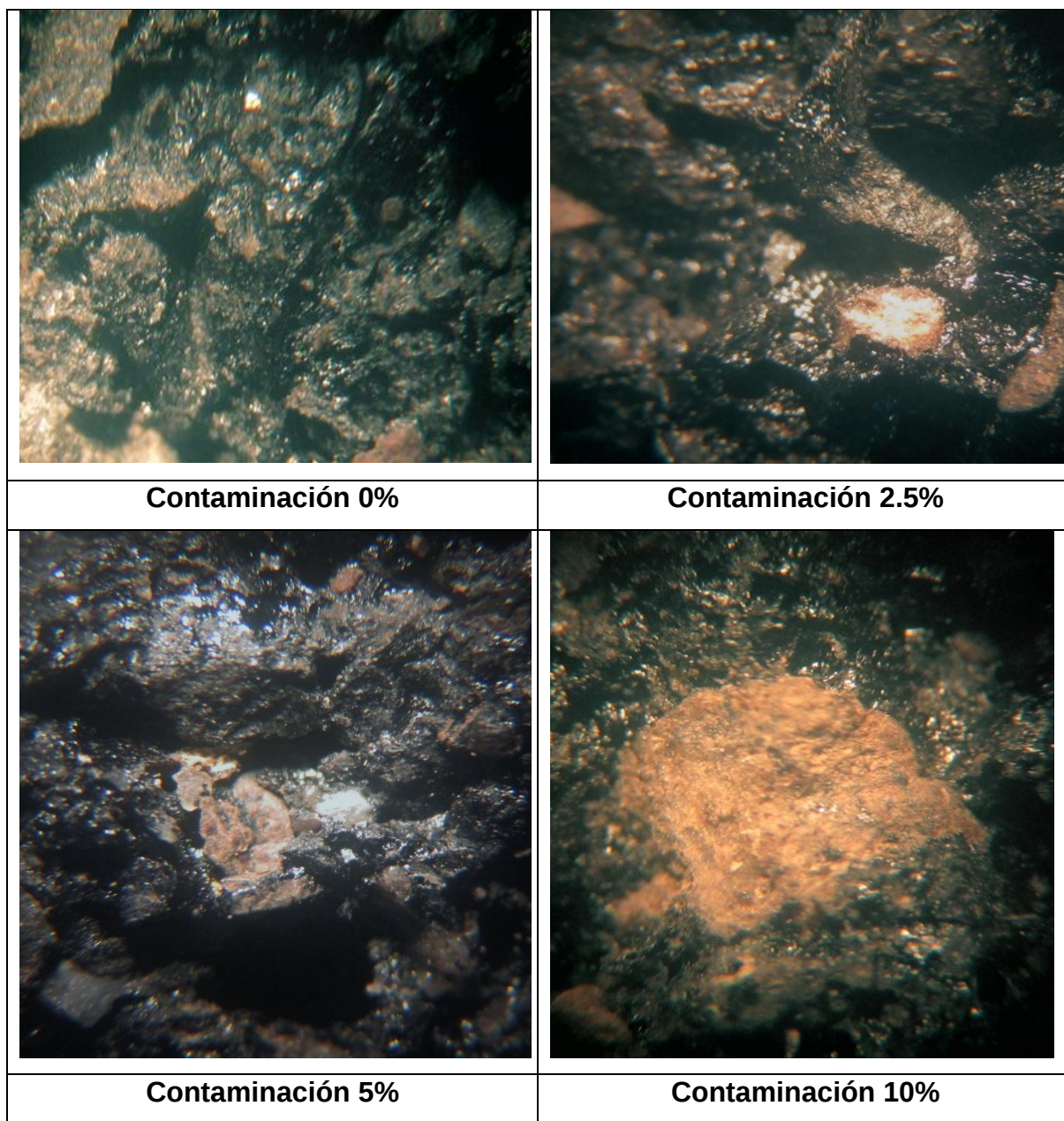
- 1- Definir el FA de referencia para la probeta no contaminada a las 24 horas de inmersión: $FA = 8\%$
- 2- Se asume que el 92% del material en la probeta de referencia no se deterioró.
- 3- Se espera que este 92% en probetas con algún porcentaje de contaminación se deteriore en el mismo tiempo de inmersión, en proporción al material contaminante.
- 4- Para una probeta con el 5% del material contaminado, el Factor FA esperado a las 24 horas de inmersión es igual a $FE = 8\% + (92 \cdot 5/100) = 12.6\%$.

A partir de las variaciones de los resultados (Δ), se recomienda definir el factor de daño experimentalmente, sin embargo, se propone continuar con estudios de investigación que permitan definir una relación para determinar el factor de deterioro con pocos ciclos de inmersión.

La degradación final de las mezclas se muestra en la Figura 57; se observa la diferencia en el deterioro de los materiales, y se concluye que al existir un

porcentaje de material contaminado disminuye la adhesividad de la mezcla e incide en el aumento del deterioro por efecto del agua del concreto asfáltico analizado.

Figura 57. Deterioro observado en las mezclas después de 72 Horas.



Fuente: Registro fotográfico Propio.

Al realizar la evaluación de módulo complejo en mezclas asfálticas en el plano cole – cole o en el diagrama de Black, se pudo comprobar que la metodología de ensayo es capaz de diferenciar el efecto del agua en materiales con poca diferencia, debido a que logra detectar los materiales susceptibles al deterioro por efecto del agua. En este caso logró mostrar en las mezclas con algún porcentaje de contaminación, el deterioro fue mayor.

Se logró establecer que la metodología de evaluación en el plano complejo es aplicable a otro tipo de probetas, en este caso a vigas. Se recomienda hacer la evaluación del efecto del agua con menores tiempos de inmersión (8, 12 y 24 Horas) ya que se pueden establecer factores de deterioro, que nos indiquen que materiales son mas susceptibles a efecto del agua en poco tiempo.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este proyecto de investigación, logró validar la metodología para el evaluar en efecto del agua a través del estudio de la evolución de la rigidez del material teniendo en cuenta la caracterización mecánica de sus componentes visco-elásticas.

Los valores del módulo de rigidez en cada par de valores de temperatura y frecuencia no permiten clasificar el deterioro de las muestras debido a que algunos resultados en la variación individual de módulo de rigidez indican que no hay deterioro sino aumento de la calidad del material, lo cual es un resultado erróneo.

Los ensayos pueden mostrar un aumento en el valor de módulo complejo en las mezclas asfálticas después de algún proceso de inmersión en agua, y esto se debe al envejecimiento del asfalto y no a un aumento de la capacidad mecánica del material, razón por la cual no se debe hacer la evaluación individual de módulo.

El ensayo de módulo complejo en mezclas asfálticas es confiable para determinar la evolución de la rigidez por efecto del agua, debido a que su comportamiento y su degradación son visibles en el plano Cole – Cole y el diagrama de Black.

Relacionar los ángulos de desfase que presentan las mezclas con el módulo de rigidez a diferentes temperaturas y frecuencias permitió ver la diferencia entre las curvas que se generaban a partir de los ensayos, en los diferentes periodos de inmersión en agua.

Se demostró que las mezclas con mayores tiempos de inmersión presentan mayor deterioro, esto se ve reflejado en el aumento del factor FA para cada curva evaluada en el plano Cole- Cole.

Al estudiar la interface entre el ligante y el agregado en la se logró detectar que la adhesividad para las mezclas con algún porcentaje de contaminación en el agregado pétreo disminuye ya presentaron mayor deterioro, que las probetas fabricadas con materiales limpios debido al desprendimiento agregado asfalto.

El deterioro de las mezclas se hace evidente después de cada proceso de inmersión en agua, al graficar los resultados en el plano Cole – Cole, se observa que los materiales que no fueron sometidos a inmersión no presentan el deterioro por efecto del agua, pero sí se ven afectados por la contaminación de los agregados con arcilla, encontrando además que existen problemas de adhesión entre el ligante y el agregado.

La metodología implementada es sensible para evaluar el efecto del agua; y permite caracterizar el comportamiento visco elástico de las mezclas asfálticas sin la necesidad de realizar un gran número de ensayos, viéndose los resultados claramente en el plano Cole – Cole.

Para encontrar los valores de E_{∞} en el plano Cole – Cole y en el diagrama de Black se recomienda realizar ensayos con frecuencias altas (superiores a 100Hz) y baja temperatura, con el fin de que la curva de módulo se pueda completar con los datos experimentales y así las funciones que determinan el comportamiento sean más confiables.

Es importante no causar deformaciones a la probeta cuando se está ajustando el elemento para garantizar que el material no sufra pérdida de la rigidez inicial antes de empezar el ensayo.

Se recomienda hacer ensayos a altas frecuencias para poder encontrar valores de E_{∞} en cada curva, y ajustar las funciones características de las curvas y determinar con mayor exactitud el factor deterioro en las mezclas asfálticas.

Se espera continuar con investigaciones de evaluación del efecto del agua en el plano Cole- Cole, con diferentes materiales utilizados en Colombia para fabricación de mezclas asfálticas, e identificar los materiales más sensibles al efecto del agua.

Se recomienda hacer ensayos con mejoradores de adherencia en la mezcla que hayan demostrado su eficiencia en campo con el fin de comprobar que el comportamiento mecánico, en este tipo de mezclas, al evaluar el efecto del agua a través de ensayos de modulo complejo, es el mismo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (2002). Standard Specification for transportation materials and methods of sampling and testing. *American Association of State Highway and Transportation Officials*. EEUU.
- Asphalt Institute. (2006). Laboratory mixing and compaction temperatures. Kentucky , USA: Asphalt Institute Technical Bulletin.
- BULMAQ - Maquinaria y Servicios. (s.f.). *BULMAQ*. Recuperado el Enero de 2011, de <http://bulmaq.blogspot.com/2009/02/nuestra-empresa.html>
- CEN. (2005). Module Complexe NF-EN 12697-21. *COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION*. Bruselas, Belgica.
- CLYNE , T. (2003). Dynamic and resilient modulus of MN/DOT asphalt mixture. *Thechnical Report Minnsota*, 67.
- DE LA ROCHE, C. (Diciembre de 1996). Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux/Expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse. *Thèse de Doctorat*. Francia: Ecole Centrale Paris.
- Di Benedetto, H. (1990). Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux. *Proceedings of the Fourth International RILEM*. Budapest.
- Dussan, E., & Falutero, F. (2005). AUTOMATIZACIÓN DE ENSAYOS DINÁMICOS DEL LABORATORIO. *Tesis Javeriana*. Bogota, Colombia.
- Escalante, J., & Alza, A. (2011). Evaluación del comportamiento de ligantes asfálticos peruanos al daño por humedad Inducida de mezclas asfálticas. *XVI CILA Congreso Ibero-Latinoamericano del asfalto*, 575-584.
- FUNG, Y. (1994). Isotropy. En Y. Fung, *A First course in continuum mechanics* (págs. 165-176). Prentice Hall.
- Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., & Sandoval Sandoval, C. D. (2005). *ANÁLISIS DE VARIANZA DEL EFECTO DE ALGUNOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DEFORMACIÓN PERMANENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS*. México.

- H. Di Benedetto, M. N. (Marzo de 2001). Stiffness testing for bituminous mixtures. *RILEM TC 182-PEB*.
- HECK, J.-V. (2001). Modélisation des déformations réversibles et permanentes des enrobés bitumineux Application à l'orniérage des chaussées. *These de Doctorat Université de Nantes*.
- I.N.V.748. (s.f.). RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL. Colombia.
- INSTITUTO NACIONAL DE INVIAS. (2006). *Manual para la Inspección Visual de Pavimentos*. Bogotá D.C.
- INVIAS. (2007). I.N.V. E-754 Módulo Dinámico en Mezclas Asfálticas. *INVIAS*. Colombia.
- MOHAMED, E. H., & ZEGHAL, M. (2007). Testing techniques to obtain asphalt concrete with in the visco-elastic response. *18th Engineering Mechanics Division Conference of ASCE*, (págs. 1-6). Blacksburg Virginia.
- NARANJO SALAZAR, F. A., & RUEDA ZAMBRANO, J. A. (2011). *IMPLEMENTACIÓN DE UN ENSAYO PARA MEDIR EL MÓDULO DE RIGIDEZ COMPLEJO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- OLARD, F. (Octubre de 2003). COMPORTEMENT THERMOMÉCANIQUE DES ENROBÉS BITUMINEUX. *ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE LYON*. Lyon, Francia: L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON.
- OSORIO TOBÓN, J. F., & CIRO VELÁSQUEZ, H. J. (2005). CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA Y TEXTURAL DEL QUESO EDAM. *UNAL*, 13.
- Rueda, E. (2010). ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ESFUERZO DE TRACCIÓN EN VIGAS DE CONCRETO ASFÁLTICO SOMETIDAS A FLEXIÓN. *Tesis UIS*. Bucaramanga, Colombia.
- STEFFE F, J. (1996). Rheological methods in food process engineering. *Freeman Press*, 294-304.
- WITCZAK, M., Kaloush, K., & Pellinen, T. (2002). Simple performance test for superpave mix design transportation research board. WASHINGTON, D.C.: NCHRP Report 465.

WULF RODRIGUEZ, F. A. (2008). Analisis de Pavimento Asfaltico Modificado con Polimero. Valdivia, Chile: Universidad Austral .

ANEXOS

Anexo A. Cálculo de Módulos en vigas Ensayadas - Procesos de inmersión

1.1. Viga P2-1-0%

		Temp. de inmersión en agua a 60 °C P2-1-0%															
		0 horas				24 Horas				48 Horas				72 Horas			
Temperatura	Frecuencia	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°
0 °C	1	3.11	0.91	3.2	16.4	3.37	0.76	3.45	12.69	2.98	0.72	3.07	13.55	NA	NA	NA	NA
	3	3.51	0.90	3.6	14.3	3.71	0.76	3.79	11.60	3.21	0.71	3.28	12.56	NA	NA	NA	NA
	5	3.96	0.80	4.0	11.4	4.02	0.69	4.08	9.78	3.10	0.61	3.16	11.21	NA	NA	NA	NA
	10	4.47	0.69	4.5	8.8	4.41	0.59	4.45	7.66	3.77	0.65	3.83	9.73	NA	NA	NA	NA
10 °C	1	2.15	0.97	2.4	24.3	1.82	0.95	2.05	27.41	2.05	0.83	2.21	21.96	3.15	0.62	3.21	11.09
	3	2.32	1.00	2.5	23.3	2.23	0.92	2.41	22.45	2.36	0.87	2.51	20.26	3.63	0.51	3.67	7.92
	5	2.52	0.98	2.7	21.2	2.37	0.93	2.55	21.54	2.57	0.86	2.71	18.46	3.74	0.48	3.77	7.25
	10	2.57	0.96	2.7	20.5	2.61	0.92	2.77	19.49	2.85	0.80	2.96	15.71	3.90	0.39	3.92	5.69
20 °C	1	1.06	0.84	1.3	38.4	0.74	0.60	0.95	38.99	0.65	0.53	0.83	39.08	2.41	0.80	2.54	18.41
	3	1.78	0.99	2.0	29.0	1.08	0.76	1.32	35.30	1.09	0.66	1.27	31.25	2.52	0.81	2.64	17.74
	5	1.94	0.99	2.2	26.9	1.21	0.82	1.46	33.89	1.27	0.74	1.47	30.09	2.94	0.70	3.03	13.38
	10	2.25	1.05	2.5	25.0	1.44	0.84	1.67	30.23	1.65	0.81	1.84	26.25	3.39	0.57	3.44	9.47
30 °C	1	0.28	0.30	0.4	46.1	0.25	0.28	0.37	48.12	0.29	0.30	0.42	46.09	0.15	0.16	0.22	45.67
	3	0.46	0.47	0.7	45.8	0.42	0.43	0.60	45.83	0.48	0.44	0.65	42.42	0.29	0.26	0.39	42.70
	5	0.56	0.55	0.8	44.6	0.53	0.46	0.70	41.01	0.54	0.47	0.71	40.59	0.39	0.33	0.52	40.45
	10	0.80	0.66	1.0	39.6	0.68	0.52	0.86	37.05	0.75	0.55	0.93	36.27	0.60	0.45	0.75	37.32

1.2. Viga P2-3-0%

		Temp. de inmersión en agua a 60 °C P2-3-0%															
		0 horas				24 Horas				48 Horas				72 Horas			
Temperatura	Frecuencia	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°
0 °C	1	2.95	0.99	3.1	18.6	3.42	0.90	3.54	14.68	2.94	0.85	3.06	16.09	NA	NA	NA	NA
	3	3.32	0.98	3.5	16.4	3.56	0.85	3.66	13.49	3.28	0.75	3.37	12.92	NA	NA	NA	NA
	5	3.59	0.97	3.7	15.1	3.77	0.76	3.84	11.45	3.40	0.74	3.47	12.25	NA	NA	NA	NA
	10	4.17	0.79	4.2	10.7	3.80	0.70	3.87	10.49	3.56	0.67	3.62	10.69	NA	NA	NA	NA
10 °C	1	2.11	1.00	2.3	25.4	2.35	0.98	2.54	22.56	2.23	0.82	2.37	20.28	2.48	0.72	2.59	16.20
	3	2.45	1.06	2.7	23.4	2.57	0.93	2.73	19.88	2.50	0.87	2.65	19.16	3.27	0.68	3.34	11.75
	5	2.73	1.07	2.9	21.4	2.80	0.94	2.96	18.53	2.62	0.85	2.75	17.94	3.59	0.56	3.63	8.80
	10	2.87	1.05	3.1	20.1	3.02	0.91	3.15	16.79	3.04	0.85	3.16	15.64	4.02	0.38	4.04	5.43
20 °C	1	0.90	0.69	1.1	37.4	1.48	0.87	1.72	30.43	0.99	0.63	1.18	32.24	2.17	0.91	2.35	22.67
	3	1.41	0.86	1.6	31.4	1.72	0.85	1.92	26.44	1.05	0.63	1.22	30.81	2.73	0.87	2.87	17.59
	5	1.67	0.95	1.9	29.7	1.94	0.92	2.15	25.40	1.29	0.64	1.44	26.40	2.81	0.71	2.90	14.25
	10	2.00	1.07	2.3	28.2	2.14	0.97	2.35	24.51	1.57	0.74	1.74	25.36	3.20	0.66	3.26	11.60
30 °C	1	0.41	0.43	0.6	46.0	0.26	0.26	0.37	45.56	0.22	0.21	0.30	44.40	0.17	0.14	0.22	40.67
	3	0.75	0.65	1.0	41.0	0.45	0.41	0.60	42.33	0.30	0.30	0.42	44.29	0.31	0.24	0.39	37.70
	5	0.91	0.70	1.1	37.8	0.56	0.47	0.73	39.72	0.51	0.47	0.69	42.65	0.41	0.31	0.52	36.45
	10	1.12	0.79	1.4	35.2	0.78	0.58	0.97	36.71	0.53	0.44	0.68	39.68	0.62	0.42	0.75	34.32

1.3. Viga P3-2-2.5%

		Temp. de inmersión en agua a 60 °C P3-2-2.5%															
		0 horas				24 Horas				48 Horas				72 Horas			
Temperatura	Frecuencia	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°
0 °C	1	2.45	0.73	2.6	16.5	2.37	0.71	2.48	16.75	2.13	0.65	2.23	16.84	NA	NA	NA	NA
	3	2.86	0.68	2.9	13.4	2.50	0.66	2.59	14.78	2.46	0.62	2.54	14.10	NA	NA	NA	NA
	5	3.04	0.66	3.1	12.3	2.70	0.65	2.78	13.59	2.79	0.49	2.83	10.06	NA	NA	NA	NA
	10	3.30	0.61	3.4	10.5	2.93	0.50	2.98	9.71	3.04	0.47	3.08	8.75	NA	NA	NA	NA
10 °C	1	1.81	0.74	2.0	22.2	1.71	0.70	1.84	22.20	1.84	0.63	1.94	19.01	1.78	0.49	1.85	15.40
	3	2.62	0.75	2.7	16.1	1.97	0.72	2.10	20.09	1.98	0.62	2.07	17.41	1.95	0.52	2.01	15.03
	5	2.86	0.72	3.0	14.1	2.22	0.74	2.34	18.55	2.21	0.64	2.30	16.09	2.23	0.50	2.28	12.57
	10	3.21	0.65	3.3	11.5	2.51	0.69	2.60	15.34	2.64	0.56	2.70	11.92	2.51	0.46	2.56	10.43
20 °C	1	1.08	0.71	1.3	33.5	1.38	0.69	1.54	26.72	0.74	0.45	0.87	31.50	0.57	0.39	0.69	34.69
	3	1.55	0.81	1.7	27.7	1.52	0.68	1.67	24.22	0.89	0.49	1.01	28.91	0.75	0.43	0.87	29.52
	5	1.73	0.78	1.9	24.3	1.63	0.71	1.78	23.57	1.16	0.56	1.29	25.60	1.01	0.50	1.12	26.22
	10	1.98	0.80	2.1	22.1	1.77	0.65	1.89	20.25	1.63	0.57	1.73	19.25	1.41	0.51	1.50	20.02
30 °C	1	0.49	0.44	0.7	42.3	0.49	0.44	0.66	42.12	0.38	0.35	0.52	42.45	0.08	0.09	0.12	45.66
	3	0.82	0.63	1.0	37.6	0.46	0.39	0.61	40.34	0.44	0.36	0.57	38.80	0.23	0.21	0.31	41.74
	5	0.95	0.65	1.1	34.3	0.63	0.49	0.80	37.70	0.71	0.46	0.84	32.75	0.33	0.28	0.44	40.54
	10	1.20	0.73	1.4	31.1	0.82	0.59	1.00	35.63	0.92	0.50	1.05	28.29	0.43	0.35	0.56	38.53

1.4. Viga P5-5-2.5%

		Temp. de inmersión en agua a 60 °C P5-5-2.5%															
		0 horas				24 Horas				48 Horas				72 Horas			
Temperatura	Frecuencia	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°
0 °C	1	2.66	1.41	3.0	28.0	3.21	1.07	3.39	18.34	3.08	0.89	3.21	16.12	NA	NA	NA	NA
	3	2.85	1.41	3.2	26.3	3.69	1.01	3.83	15.36	3.14	0.84	3.25	14.97	NA	NA	NA	NA
	5	3.53	1.29	3.8	20.0	3.35	0.95	3.48	15.78	3.31	0.79	3.41	13.49	NA	NA	NA	NA
	10	4.17	1.03	4.3	13.9	3.67	0.84	3.76	12.89	3.54	0.78	3.63	12.50	NA	NA	NA	NA
10 °C	1	1.81	1.38	2.3	37.3	2.04	1.22	2.38	30.99	2.40	1.06	2.63	23.70	2.38	0.93	2.55	21.31
	3	1.97	1.38	2.4	35.1	2.40	1.21	2.69	26.73	2.66	1.00	2.85	20.60	2.86	0.90	3.00	17.47
	5	2.10	1.44	2.5	34.5	2.60	1.18	2.85	24.47	2.88	1.00	3.05	19.12	3.00	0.72	3.09	13.56
	10	2.39	1.38	2.8	30.0	2.86	1.19	3.10	22.60	3.34	0.88	3.45	14.81	3.25	0.66	3.32	11.50
20 °C	1	1.40	1.20	1.8	40.6	1.70	1.24	2.10	36.13	1.44	0.92	1.71	32.65	1.01	0.78	1.27	37.80
	3	1.63	1.26	2.1	37.7	2.11	1.30	2.48	31.60	1.84	1.11	2.15	31.03	1.52	0.98	1.80	32.75
	5	2.26	1.38	2.6	31.5	2.36	1.23	2.66	27.54	2.29	1.10	2.54	25.64	1.78	0.99	2.04	29.10
	10	2.54	1.38	2.9	28.6	2.58	1.17	2.83	24.31	2.42	1.10	2.66	24.53	2.07	0.86	2.24	22.69
30 °C	1	0.71	0.81	1.1	48.6	0.62	0.67	3.06	21.62	0.39	0.39	0.55	44.39	0.25	0.26	0.36	46.21
	3	1.10	1.03	1.5	43.2	0.93	0.83	1.25	41.56	0.65	0.61	0.90	43.29	0.45	0.41	0.61	42.46
	5	1.32	1.14	1.7	40.8	1.15	0.95	1.49	39.59	0.77	0.71	1.04	42.69	0.58	0.52	0.77	41.68
	10	1.70	1.33	2.2	38.1	1.37	1.08	1.75	38.34	1.08	0.89	1.40	39.35	0.84	0.70	1.09	39.60

1.5. Viga P4-5-5%

		Temp. de inmersión en agua a 60 °C P4-5-5%															
		0 horas				24 Horas				48 Horas				72 Horas			
Temperatura	Frecuencia	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°
0 °C	1	3.21	0.82	3.3	14.3	3.34	0.52	3.38	8.90	2.82	0.53	2.87	10.70	NA	NA	NA	NA
	3	3.37	0.81	3.5	13.5	3.65	0.49	3.68	7.68	3.18	0.49	3.21	8.72	NA	NA	NA	NA
	5	3.44	0.77	3.5	12.6	3.68	0.50	3.71	7.76	3.29	0.41	3.31	7.10	NA	NA	NA	NA
	10	3.66	0.70	3.7	10.8	3.75	0.26	3.76	3.98	3.49	0.31	3.50	5.11	NA	NA	NA	NA
10 °C	1	2.07	1.01	2.3	26.1	1.71	0.81	1.89	25.43	1.93	0.55	2.01	15.78	1.34	0.58	1.46	23.55
	3	2.45	0.98	2.6	21.8	2.05	0.82	2.20	21.78	2.30	0.59	2.37	14.41	1.49	0.58	1.60	21.25
	5	2.76	0.97	2.9	19.5	2.12	0.77	2.25	20.06	2.55	0.56	2.61	12.46	1.74	0.60	1.84	18.87
	10	3.01	0.92	3.2	17.0	2.29	0.72	2.40	17.40	2.84	0.51	2.89	10.14	2.09	0.50	2.15	13.39
20 °C	1	1.65	0.98	1.9	30.7	0.86	0.63	1.06	36.32	0.75	0.50	0.90	33.71	0.37	0.28	0.46	37.03
	3	1.93	1.01	2.2	27.6	1.25	0.72	1.45	29.98	1.47	0.73	1.64	26.47	0.85	0.53	1.00	31.75
	5	2.11	1.05	2.4	26.4	1.40	0.72	1.58	27.21	1.51	0.63	1.64	22.75	1.07	0.60	1.23	29.16
	10	2.34	0.97	2.5	22.6	1.75	0.83	1.93	25.49	1.66	0.60	1.77	19.95	1.38	0.58	1.50	22.80
30 °C	1	0.48	0.42	0.6	41.5	0.34	0.32	0.47	43.20	0.34	0.28	0.44	39.16	0.24	0.17	0.29	35.88
	3	0.74	0.60	1.0	38.9	0.56	0.45	0.72	38.86	0.54	0.40	0.67	36.59	0.40	0.29	0.49	35.36
	5	0.94	0.72	1.2	37.3	0.66	0.51	0.83	37.58	0.77	0.51	0.93	33.55	0.52	0.36	0.63	34.51
	10	1.28	0.90	1.6	35.2	0.86	0.62	1.06	35.56	0.88	0.52	1.02	30.32	0.77	0.45	0.90	30.23

1.6. Viga P3-6-5%

		Temp. de inmersión en agua a 60 °C P3-6-5%															
		0 horas				24 Horas				48 Horas				72 Horas			
Temperatura	Frecuencia	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°
0 °C	1	3.33	0.88	3.4	14.8	2.13	0.58	2.21	15.23	2.05	0.55	2.12	14.93	NA	NA	NA	NA
	3	3.73	0.71	3.8	10.7	2.95	0.73	3.03	13.86	2.25	0.59	2.33	14.77	NA	NA	NA	NA
	5	3.95	0.66	4.0	9.5	3.24	0.62	3.30	10.84	2.72	0.55	2.78	11.49	NA	NA	NA	NA
	10	4.19	0.54	4.2	7.4	3.71	0.52	3.74	7.96	3.00	0.50	3.04	9.49	NA	NA	NA	NA
10 °C	1	2.58	0.91	2.7	19.5	2.14	0.80	2.28	20.52	1.89	0.63	2.00	18.54	1.84	0.52	1.92	15.73
	3	2.99	0.94	3.1	17.5	2.35	0.77	2.47	18.21	1.95	0.56	2.03	15.92	2.02	0.54	2.09	15.03
	5	3.17	0.87	3.3	15.4	2.60	0.77	2.71	16.49	2.21	0.60	2.29	15.12	2.30	0.51	2.36	12.57
	10	3.27	0.77	3.4	13.3	2.82	0.74	2.91	14.82	2.45	0.58	2.52	13.35	2.59	0.48	2.64	10.43
20 °C	1	1.13	0.87	1.4	37.6	1.07	0.67	1.27	32.14	0.76	0.53	0.92	34.94	0.54	0.38	0.66	34.69
	3	1.42	0.94	1.7	33.7	1.40	0.79	1.61	29.47	1.13	0.62	1.29	28.85	0.96	0.54	1.10	29.52
	5	1.54	0.94	1.8	31.5	1.51	0.79	1.70	27.56	1.29	0.65	1.44	26.77	1.14	0.56	1.27	26.22
	10	1.68	0.96	1.9	29.6	1.69	0.78	1.86	24.71	1.41	0.67	1.56	25.28	1.39	0.59	1.51	23.02
30 °C	1	0.70	0.65	1.0	43.1	0.49	0.43	0.65	41.12	0.37	0.29	0.47	38.52	0.14	0.14	0.20	45.66
	3	0.93	0.79	1.2	40.4	0.72	0.57	0.92	38.39	0.50	0.36	0.61	35.90	0.21	0.20	0.29	44.08
	5	1.06	0.82	1.3	37.8	0.84	0.61	1.04	35.80	0.68	0.44	0.81	32.97	0.25	0.24	0.34	43.87
	10	1.33	0.90	1.6	34.0	1.10	0.70	1.30	32.30	0.89	0.52	1.03	30.29	0.45	0.40	0.60	41.53

1.7. Viga P1-8-10%

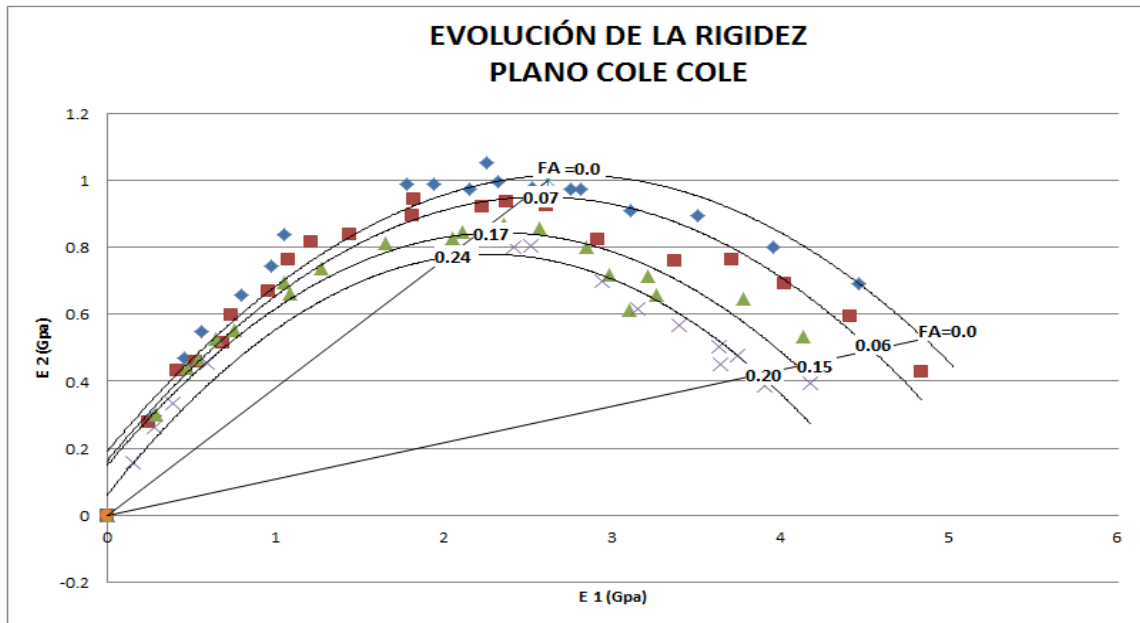
		Temp. de inmersión en agua a 60 °C P1-8-10%															
		0 horas				24 Horas				48 Horas				72 Horas			
Temperatura	Frecuencia	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°
0 °C	1	3.33	0.97	3.5	16.3	2.85	0.78	2.96	15.35	2.10	0.62	2.19	16.56	NA	NA	NA	NA
	3	3.55	0.96	3.7	15.1	3.07	0.73	3.15	13.32	2.54	0.63	2.62	14.05	NA	NA	NA	NA
	5	3.88	0.98	4.0	14.1	3.80	0.61	3.85	9.05	2.76	0.62	2.83	12.70	NA	NA	NA	NA
10 °C	1	2.05	0.97	2.3	25.4	2.73	0.89	2.87	18.06	1.55	0.60	1.66	21.13	2.55	0.46	2.59	10.34
	3	2.36	1.03	2.6	23.5	3.02	0.83	3.13	15.35	1.82	0.65	1.94	19.56	2.68	0.41	2.71	8.80
	5	2.53	1.01	2.7	21.8	3.20	0.77	3.29	13.59	2.13	0.63	2.22	16.44	3.11	0.42	3.14	7.60
	10	3.04	1.08	3.2	19.5	3.31	0.74	3.39	12.66	2.42	0.63	2.50	14.64	0.79	0.40	0.89	27.00
20 °C	1	1.05	0.84	1.3	38.7	1.12	0.76	1.35	34.34	0.81	0.48	0.94	30.41	1.11	0.49	1.22	23.89
	3	1.59	0.98	1.9	31.6	1.85	0.87	2.04	25.24	1.09	0.58	1.23	28.08	1.53	0.56	1.63	19.98
	5	1.77	1.01	2.0	29.7	2.02	0.89	2.21	23.74	1.15	0.60	1.30	27.33	1.72	0.49	1.79	15.94
	10	2.08	1.05	2.3	26.7	2.33	0.85	2.48	20.03	1.26	0.60	1.39	25.58	0.19	0.20	0.28	45.33
30 °C	1	0.36	0.33	0.5	42.4	0.32	0.29	0.43	42.61	0.58	0.38	0.69	33.53	0.26	0.25	0.36	43.52
	3	0.55	0.49	0.7	41.5	0.52	0.42	0.67	38.61	0.85	0.50	0.99	30.55	0.34	0.29	0.44	40.53
	5	0.70	0.58	0.9	39.3	0.63	0.47	0.79	36.59	0.99	0.55	1.14	29.09	0.45	0.36	0.57	38.43
	10	1.01	0.78	1.3	37.5	0.86	0.59	1.04	34.51	1.32	0.64	1.47	25.75	0.61	0.41	0.74	33.97

1.8. Viga P1-8-10%

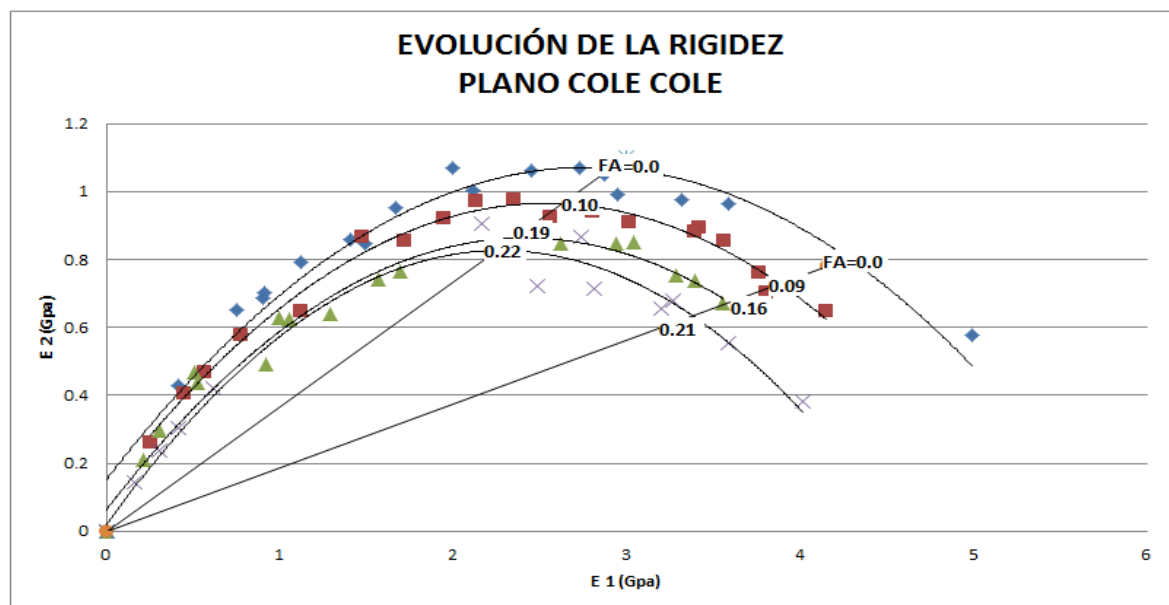
		Temp de inmersión en agua a 60 °C P1-2-10%															
		0 horas				24 Horas				48 Horas				72 Horas			
Temperatura	Frecuencia	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	Módulo (Gpa)	Ángulo°
0 °C	1	3.09	0.99	3.2	17.8	2.60	0.83	2.73	17.76	2.44	0.68	2.54	15.65	NA	NA	NA	NA
	3	3.45	1.02	3.6	16.4	2.81	0.78	2.92	15.52	2.78	0.64	2.86	13.03	NA	NA	NA	NA
	5	3.66	1.04	3.8	15.8	3.01	0.77	3.11	14.43	3.10	0.62	3.16	11.34	NA	NA	NA	NA
	10	3.94	0.79	4.0	11.4	3.38	0.74	3.46	12.39	3.20	0.59	3.26	10.49	NA	NA	NA	NA
10 °C	1	NA	NA	NA	NA	2.12	0.88	2.30	22.61	1.85	0.70	1.98	20.74	2.29	0.55	2.36	13.47
	3	2.60	1.13	2.8	23.5	2.52	0.88	2.67	19.19	2.28	0.76	2.41	18.41	2.89	0.54	2.94	10.64
	5	2.82	1.12	3.0	21.6	2.67	0.82	2.79	17.08	2.41	0.71	2.51	16.37	3.20	0.42	3.23	7.48
	10	3.33	1.16	3.5	19.2	2.95	0.83	3.06	15.75	2.72	0.76	2.83	15.60	3.57	0.31	3.58	4.96
20 °C	1	1.38	0.95	1.7	34.6	1.06	0.63	1.24	30.53	0.75	0.44	0.87	30.66	1.12	0.47	1.21	22.57
	3	2.03	1.11	2.3	28.7	1.40	0.75	1.59	28.33	1.05	0.62	1.22	30.57	1.62	0.58	1.73	19.77
	5	2.36	1.16	2.6	26.2	1.51	0.78	1.70	27.15	1.15	0.61	1.30	28.14	1.91	0.60	2.00	17.37
	10	NA	NA	NA	NA	1.70	0.82	1.88	25.73	1.29	0.60	1.42	24.85	2.28	0.59	2.36	14.58
30 °C	1	0.64	0.58	0.9	42.0	0.31	0.25	0.40	38.53	0.43	0.30	0.52	35.47	0.17	0.13	0.22	37.65
	3	0.89	0.69	1.1	37.6	0.54	0.40	0.67	36.48	0.63	0.42	0.76	33.28	0.30	0.20	0.36	33.93
	5	1.18	0.84	1.4	35.6	0.68	0.45	0.81	33.86	0.76	0.46	0.88	31.25	0.39	0.24	0.45	31.61
	10	1.39	0.85	1.6	31.5	0.87	0.52	1.02	31.03	0.98	0.56	1.13	29.86	0.55	0.31	0.63	28.90

Anexo B. Curvas de Módulo con Factores de Degradación.

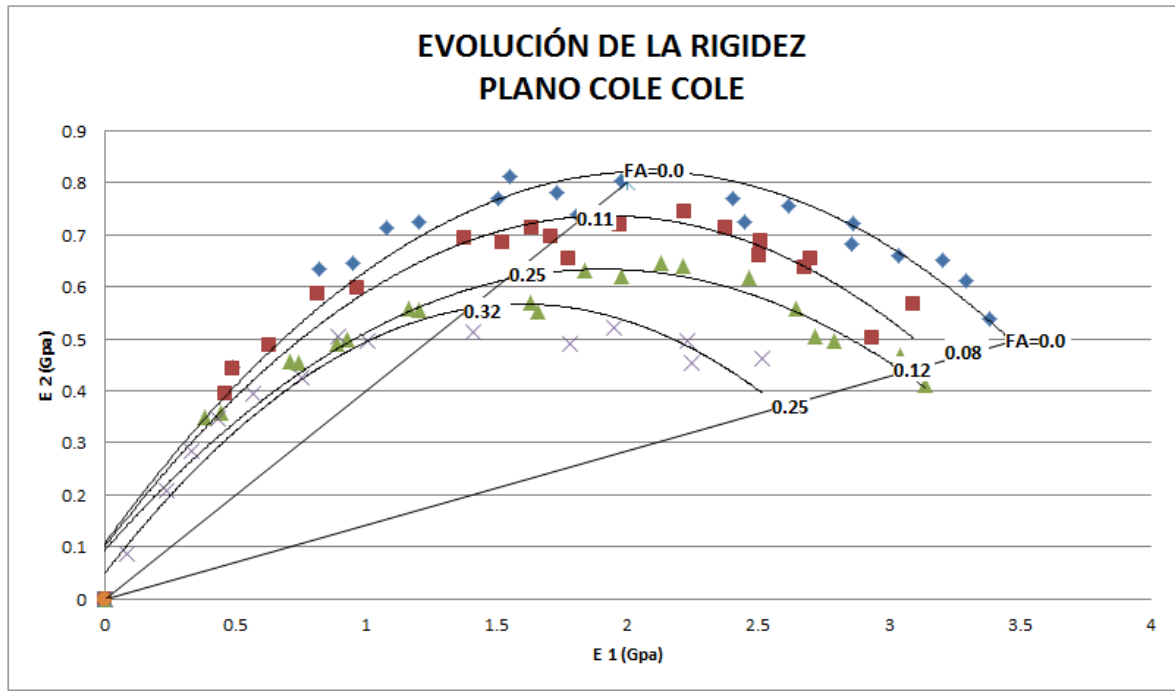
2.1 P2-1-0%



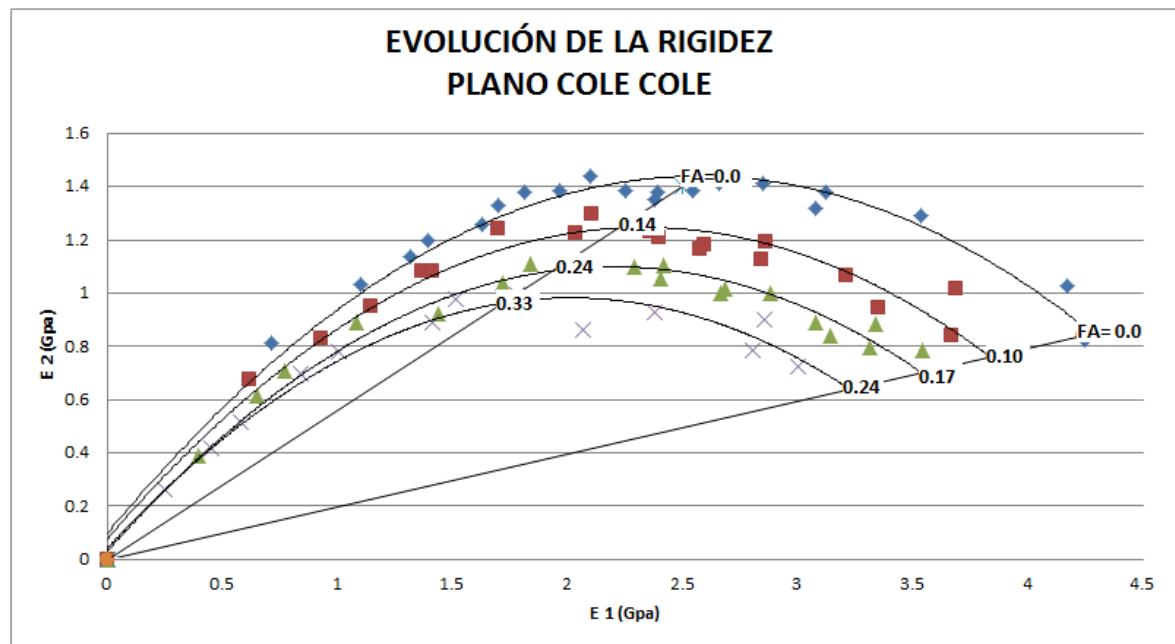
2.2 P2-3-0%



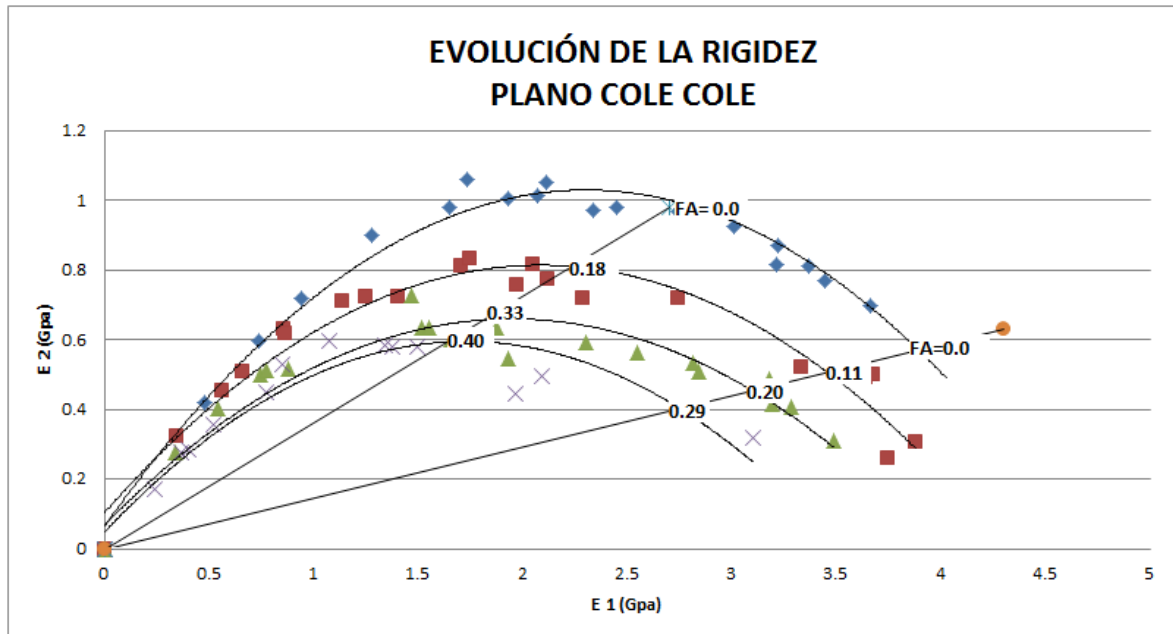
2.3 P3-2-2.5%



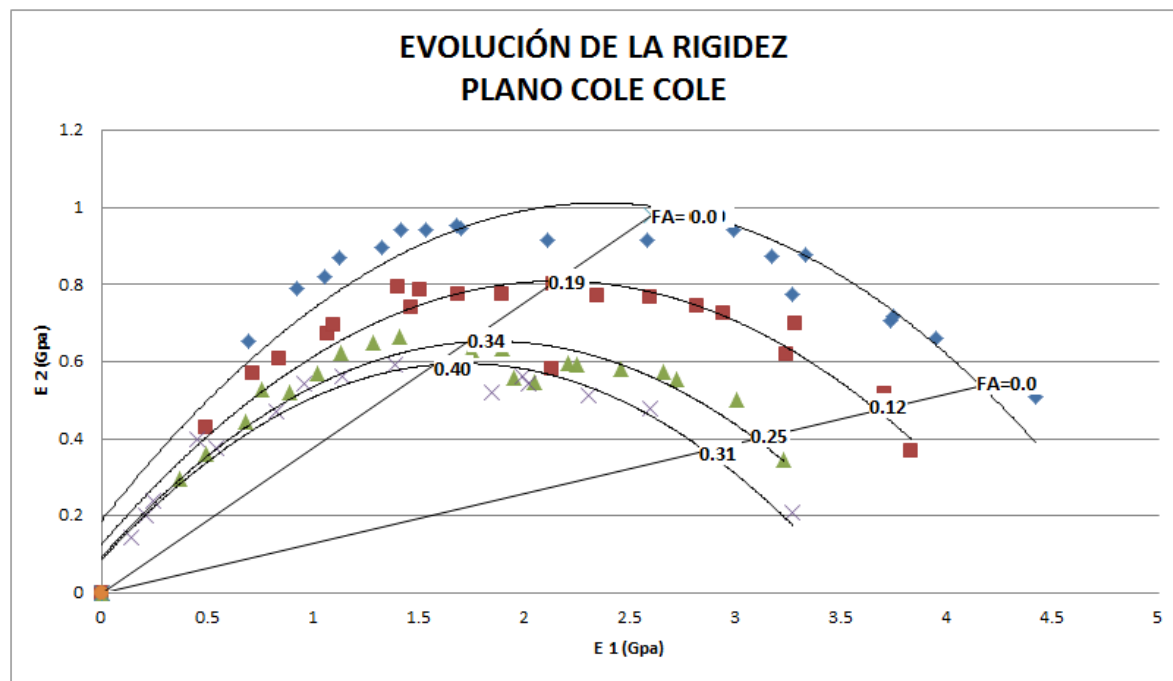
2.4 P5-5-2.5%



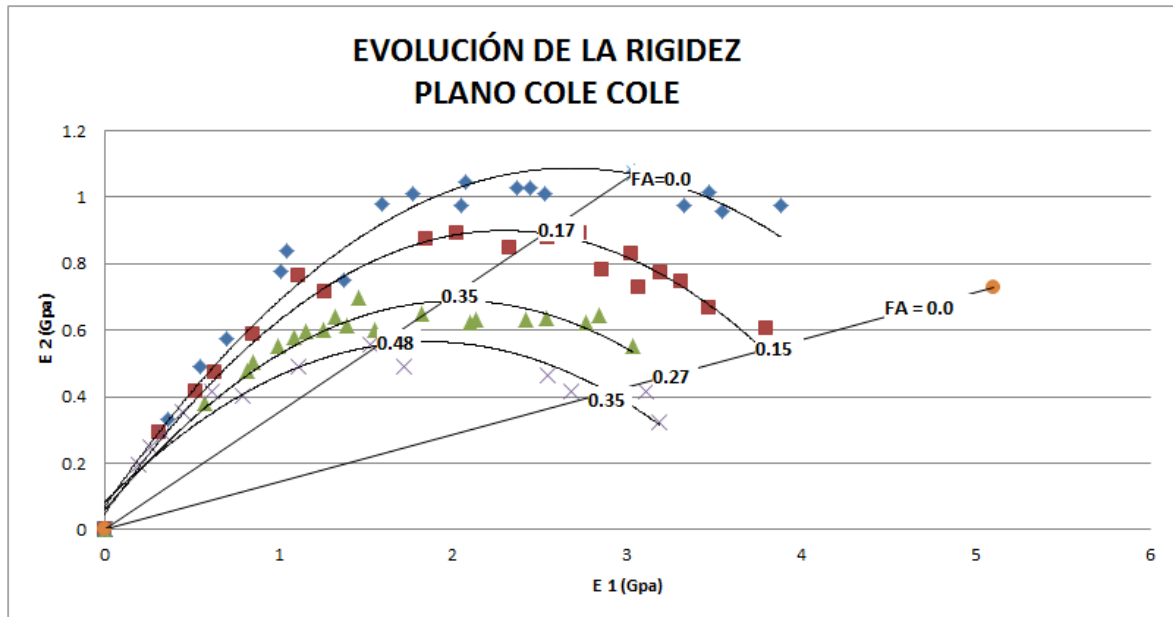
2.5 P4-5-5%



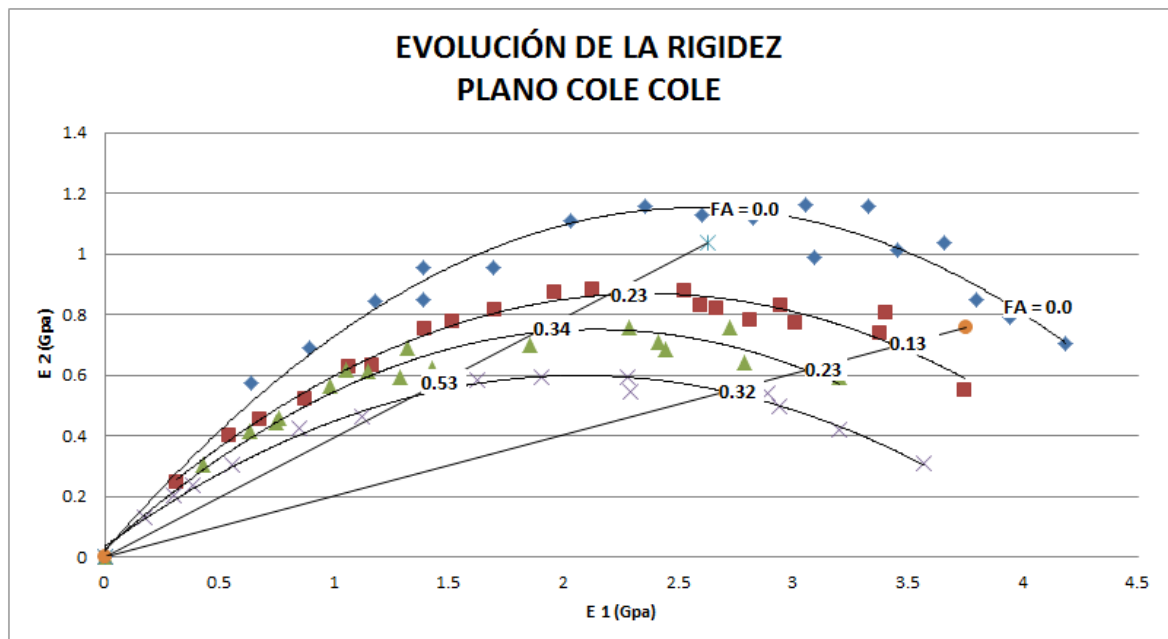
2.6 P3-6-5%



2.7 P1-8-10%



2.8 P1-2-10%



Anexo C. Hoja de Cálculo de módulo dinámico.

- Resultados Laboratorio\Hoja de Calculo\ANEXO C\PCMRC-VIGAS.xlsm

Anexo C. Factores de deterioro calculados en las probetas analizadas

Evaluación Angulo θ								
Factor de Degradación en cada probeta (FA)								
% de Contaminación	0.00%		2.50%		5.00%		10.00%	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.00	0.07	0.10	0.11	0.14	0.18	0.19	0.17	0.24
48.00	0.17	0.19	0.25	0.25	0.34	0.35	0.36	0.35
72.00	0.24	0.23	0.32	0.33	0.40	0.41	0.48	0.54

Evaluación Angulo α								
Factor de Degradación en cada probeta (FA)								
% de Contaminación	0.00%		2.50%		5.00%		10.00%	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.00	0.06	0.09	0.08	0.10	0.11	0.12	0.15	0.14
48.00	0.16	0.16	0.12	0.17	0.20	0.26	0.27	0.24
72.00	0.20	0.21	0.26	0.25	0.29	0.31	0.35	0.32

Evaluación E _∞								
Factor de Degradación en cada probeta (FA)								
%Contaminación	0.00%		2.50%		5.00%		10.00%	
Inmersión en Horas								
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.03	0.02	0.05	0.06	0.07	0.08	0.12	0.11
24	0.08	0.09	0.06	0.12	0.09	0.12	0.14	0.12
48	0.16	0.13	0.08	0.15	0.13	0.26	0.23	0.17
72	0.18	0.19	0.26	0.24	0.30	0.31	0.29	0.24

