

**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA, EN LA VARIACIÓN, DEL MÓDULO
DINÁMICO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COLOMBIANAS**

**ERVING DE JESUS CAMACHO LASSO
LEONARDO ENRIQUE CONTRERAS MARIN**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2010**

**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA, EN LA VARIACIÓN, DEL MÓDULO
DINÁMICO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COLOMBIANAS**

**ERVING DE JESUS CAMACHO LASSO
LEONARDO ENRIQUE CONTRERAS MARIN**

**Tesis de grado modalidad investigación Para optar el título de:
Ingeniero Civil**

**Director:
EDUARDO CASTAÑEDA PINZÓN
Ingeniero Civil, M. Sc, Doctor.**

**Co- Directora:
Ma. CRISTINA RIVERO OLARTE
Ingeniera Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2010

A mi madre querida que a pesar de mis errores me apoyó incondicionalmente con esfuerzo, dedicación y con su amor lleno de sabiduría. A mi padre por sus consejos oportunos.

A Sofía Isabel y nuestro bebe que está en el cielo, que llenan mi vida de inspiración para hacerlos sentir orgullosos y me dan fuerzas para cumplir mis objetivos

A mis hermanos que han estado caminando a mi lado y son partícipes de mis triunfos y derrotas, llorando o celebrando, mostrándome el verdadero sentido de la familia.

A mis compañeros y amigos que con su amistad han llenado mi vida de experiencias inolvidables.

Erving de Jesús Camacho Lasso

A mis hijas preciosas, Luisa Fernanda, Angie Kathalina y la Bebe que viene en camino, porque llenan mi vida de felicidad, de amor y esperanza, y son la fuente de toda la energía y la fuerza que tengo para seguir adelante. Gracias mis muñequitas.

A mis padres, Hernando Contreras y María Eugenia Marín, quienes con su amor, dedicación, esfuerzo y sacrificio, lo han dado todo para apoyarme y guiarme, y enseñándome desde pequeño a luchar para alcanzar mis metas. Mi triunfo es de ustedes.

A mis hermanos, que siempre han estado a mi lado, acompañándome, ensañándome y corrigiéndome, y sobre todo por brindarme su confianza y creer en mí.

A todos mis amigos y compañeros que me han apoyado y han compartido conmigo todas las experiencias de la academia.

Leonardo Enrique Contreras Marín

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Ing. Eduardo Castañeda Pinzón.

Ing. María Cristina Rivero.

Sr. Jairo "La mechuda"

A todos nuestros compañeros, amigos y familiares.

TABLA DE CONTENIDO.

	PÁG.
INTRODUCCIÓN	19
1. GENERALIDADES SOBRE MEZCLAS ASFALTICAS	21
1.1. COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.	21
1.1.1. Comportamiento Del Agregado Pétreo.	21
1.1.2. Comportamiento Del Cemento Asfáltico.	22
1.1.3. Comportamiento De Las Mezclas Asfálticas.	23
1.2. MÓDULO DINÁMICO.	24
2. METODOLOGÍA DE ESTUDIO.	28
2.1. MATERIALES EMPLEADOS	28
2.1.1 Agregado mineral	28
2.1.1.1 Procedencia:	28
2.1.1.2. Ensayos Realizados Al Agregado:	28
2.1.2. Asfalto.	29
2.1.2.1 Asfalto De Refinería:	29
2.1.2.2. Asfalto Natural (Asfaltita):	29
2.2. METODOLOGÍA USADA PARA LA FABRICACIÓN DE PROBETAS.	31
2.3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL	35
2.3.1. Caracterización volumétrica	35
2.3.1.1. Gravedad Específica Máxima Teórica (GMM) INV E-735.	35
2.3.1.2. Densidad Bulk ó Peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas empleando especímenes saturados con superficie seca. INV E-733	35
2.3.2. Determinación del módulo Dinámico.	35

2.3.2.1. Cálculo tipo.	37
3. RESULTADOS	44
3.1. ENSAYO DE DENSIDAD BULK	44
3.2. ENSAYO DE DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA GMM	45
3.3 PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS	46
3.4. MÓDULOS DINÁMICOS.	46
3.4.1. Mezclas Densas en Caliente MDC-2	47
3.4.2. Mezclas de Gradación Abierta M1.	56
4. CONCLUSIONES.	66
5. RECOMENDACIONES.	67
BIBLIOGRAFÍA.	68
ANEXOS	69

LISTA DE FIGURAS

	PÁG.
Figura 1. Comportamiento del agregado bajo carga de corte	22
Figura 2. Variación del comportamiento de una mezcla asfáltica en función del tiempo de aplicación de una carga (curva experimental).	24
Figura 3. Propagación de cargas	25
Figura 4. Ejemplo de curva maestra	26
Figura 5. Factores de Mezcla.	31
Figura 6. Diseños de Mezclas Densas.	32
Figura 7. Diseños de Mezclas de Gradación Abierta	32
Figura 8. Nomenclatura de Probetas	34
Figura 9. Carga vs Tiempo.	39
Figura 10. Desplazamiento vs Tiempo.	39
Figura 11. Carga-Desplazamiento vs Tiempo.	39
Figura 12. Carga-Desplazamiento vs Tiempo (ajustado).	41
Figura 13. Modulo Dinámico vs Log(Tr).	43
Figura 14. Curva Maestra.	43
Figura 15. Esquema de combinación de mezclas para análisis de susceptibilidad de asfalto.	47
Figura 16. Módulos Dinámicos Probeta 9_2111.	48
Figura 17. Curva Maestra Probeta 9_2111.	49
Figura 18. Módulos Dinámicos Probeta 13_2211.	50
Figura 19. Curva Maestra Probeta 13_2211.	51
Figura 20. Comparación curvas maestras 9_2111 y 13_2211.	51
Figura 21. Módulos Dinámicos Probeta 10_2112.	53
Figura 22. Curva Maestra Probeta 10_2112.	53
Figura 23. Módulos Dinámicos Probeta 14_2212.	55

Figura 24. Curva Maestra Probeta 14_2212.	55
Figura 25. Comparación curvas maestras 10_2112 y 14_2212.	56
Figura 26. Módulos Dinámicos Probeta 19_3121.	57
Figura 27. Curva Maestra Probeta 19_3121.	58
Figura 28. Módulos Dinámicos Probeta 23_3221.	59
Figura 29. Curva Maestra Probeta 23_3221.	60
Figura 30. Comparación curvas maestras 19_3121 y 23_3221	60
Figura 31. Módulos Dinámicos Probeta 20_3122.	62
Figura 32. Curva Maestra Probeta 20_3122.	62
Figura 33. Módulos Dinámicos Probeta 24_3222.	64
Figura 34. Curva Maestra Probeta 24_3222.	64
Figura 35. Comparación curvas maestras 20_3122 y 24_3222	65

LISTA DE TABLAS

	PÁG.
Tabla 1. Granulometrías de mezclas asfálticas.	29
Tabla 2. Datos Entrada Cálculo Tipo.	38
Tabla 3. Coeficientes de Carga Ajustados Cálculo tipo.	40
Tabla 4. Coeficientes de Desplazamiento Ajustados Cálculo Tipo.	40
Tabla 5. Módulo Dinámico y Ángulo de Desfase. Cálculo Tipo.	41
Tabla 6. Curva Maestra Cálculo Tipo.	42
Tabla 7 Densidad Bulk Mezclas MDC-2.	44
Tabla 8. Densidad Bulk Mezclas M1	44
Tabla 9. Datos Entrada Gmm.	45
Tabla 10. Gmm para mezclas densas MDC-2.	45
Tabla 11. Gmm para mezclas abiertas M1.	45
Tabla 12. Parámetros volumétricos para MDC-2 y M1.	46
Tabla 13 Módulos Dinámicos Probeta 9_2111.	48
Tabla 14 Módulos Dinámicos Probeta 13_2211.	50
Tabla 15. Módulos Dinámicos Probeta 10_2112.	52
Tabla 16. Módulos Dinámicos Probeta 14_2212.	54
Tabla 17. Módulos Dinámicos Probeta 19_3121.	57
Tabla 18. Módulos Dinámicos Probeta 23_3221.	59
Tabla 19. Módulos Dinámicos Probeta 20_3122.	61
Tabla 20. Módulos Dinámicos Probeta 24_3222.	63

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	PÁG.
Fotografía 1. Extracción y combinación de Asfaltita con Asfalto de Refinería.	30
Fotografía 2. Elaboración de Mezcla.	33
Fotografía 3. Mezcla Asfáltica.	33
Fotografía 4. Máquina Universal Trebel.	34
Fotografía 5. Máquina Universal Dinámica MTS-810	36

LISTA DE ANEXOS

	PÁG.
ANEXO A GRANULOMETRÍAS	69
ANEXO B CARACTERIZACION DE PROBETAS	70
ANEXO C ENSAYOS MÓDULOS DINÁMICOS	72
ANEXO D CÁLCULOS DE CURVAS MAESTRAS.	78

RESUMEN

TITULO INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA VARIACIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COLOMBIANAS*

AUTORES

CAMACHO LASSO, Erving de Jesús

CONTRERAS MARÍN, Leonardo Enrique **

PALABRAS CLAVES

Mezcla densa en caliente, Mezcla de gradación abierta en caliente, Módulo dinámico, Curva maestra.

DESCRIPCIÓN

La susceptibilidad a la temperatura es una de las variables más significativas que determinan la resistencia de la mezcla para soportar deformaciones, por lo anterior, es clara la necesidad de desarrollar estudios de investigación que permitan evaluar la influencia de las temperaturas predominantes en la geografía colombiana y analizar la influencia que tienen sobre la mezcla asfáltica.

Para ello, se fabricaron dos tipos de mezclas, mezcla densa en caliente MDC-2 y mezcla de gradación abierta M1, con granulometrías especificadas por las normas INVIAS. Se utilizaron dos tipos de asfalto 20/30 y 60/70. Los agregados pétreos utilizados provienen de dos canteras, Pescadero (Santander) y Rio Negro (Santander). Se realizaron 8 tipos de mezclas, cada una replicada 3 veces

Como resultado del desarrollo de esta investigación se construyeron las curvas maestras para cada uno de los diseños de mezcla. Esta curva determina el módulo dinámico utilizando principios de superposición tiempo de carga (frecuencia) y temperatura. Se halló realizando ensayos de módulos dinámicos a diferentes temperaturas y diferentes frecuencias de carga. El ensayo de módulo dinámico se llevó a cabo en la máquina universal dinámica (MTS-810) en donde las probetas se sometieron a esfuerzos que produjeron deformaciones en un rango visco-elástico (lineal), posteriormente se calcularon los módulos dinámicos por medio de la norma INVIAS. E-754-07. Luego se seleccionó una temperatura estándar de referencia y, posteriormente los datos de las diferentes temperaturas, se desplazaron horizontalmente con respecto al tiempo de carga hasta que las curvas se unieron en una única función suavizada, esto se realizó mediante un ajuste de datos.

Los resultados mostraron que para las mezclas de gradación abierta M1 se obtuvo menor variación del módulo dinámico con la temperatura y el tipo de asfalto 60-70 presentó más susceptibilidad a la variación de la temperatura.

* Tesis de grado.

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela Ingeniería Civil, Director Ing. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón. Codirectora Ing. María Cristina Rivero.

ABSTRACT

TITLE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE VARIATION OF DYNAMIC MODULE OF COLOMBIAN ASPHALT MIXTURES*

AUTHORS

CAMACHO LASSO, Erving de Jesús

CONTRERAS MARÍN, Leonardo Enrique**

KEYWORDS

Dense hot mixture, Discontinuos hot mixture, Dynamic Modulus, Master Curve.

DESCRIPTION

The susceptibility to temperature is one of the most significant variables that determine the resistance of the mixture to withstand deformations, for the above is a clear need to develop research studies to evaluate the influence of the prevailing temperatures in the Colombian geography and analyze the influence they have on the asphalt mixture.

To this end, produced two (2) types of mixtures, mixing hot dense MDC-2 and open graded mixture of M1, with particle sizes specified by the rules INVIAS. Were used two types of asphalt 20/30 and 60/70. The rock aggregates used from two quarries, Pescadero (Santander) and Black River (Santander). Were carried out 8 different mixtures, each replicated three times.

The pursuit of this research master curves were constructed. Is a curve that determines the dynamic module using principles of superposition loading time (frequency) and temperature. This curve is found by dynamic testing of modules at different temperatures and different frequencies of loading. The dynamic modulus test of specimens was performed with the help of dynamic universal machine (MTS-810) where they were undergoing efforts produced deformations in the visco-elastic range (linear), then the dynamics modules were calculated using standard INVIAS. -E 754-07. Then we selected a reference standard temperature and subsequently the data of different temperatures, moved horizontally over the loading time until the curves are joined into a single smooth function, this was done by adjusting data.

The results showed that for open graded mixtures M1 was less variation of dynamic modulus with temperature and the type of asphalt 60-70 showed more susceptibility to temperature variation.

* Degree Thesis.

** Physical-Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering. Director. Ing. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón. Codirectora, Ing. María Cristina Rivero.

INTRODUCCIÓN

A medida que las sociedades crecen, y el desarrollo tecnológico avanza, aumenta el problema de movilidad el cual es fundamental, para el desarrollo de la humanidad. Las redes de carreteras de los países, que soportan el tránsito continuo de millones de vehículos diariamente, asumen la mayor parte de este problema.

Colombia al igual que la mayoría de los países utiliza ampliamente los pavimentos flexibles para la construcción de sus carreteras. Las mezclas asfálticas tienen un papel de suma importancia en estos pavimentos, no solo porque aportan las características más importantes para su funcionalidad, si no porque es la parte más costosa de estos.

Es vital el apoyo a investigaciones que promuevan el desarrollo de modelos que caractericen las mezclas asfálticas colombianas, en aras de proporcionar al ingeniero civil un mayor conocimiento y control del comportamiento de la rigidez de las estructuras asfálticas y de esta manera garantizar estructuras de pavimentos resistentes, confiables y durables que requieran menos inversiones de mantenimiento, con altos índices de funcionalidad para los usuarios, siendo esta una medida muy positiva para las regiones en las cuales se ubiquen estos nuevos proyectos.

La susceptibilidad a la temperatura es una de las variables más significativas que determinan, las características y el comportamiento funcional de las mezclas asfálticas, por lo cual crece la incertidumbre de una correcta elección del tipo de ligante asfáltico de acuerdo a la zona donde será colocada la mezcla asfáltica, para evitar que la temperatura influya en gran medida en la deformación de la mezcla. Entre menos susceptible sea el ligante asfáltico a la temperatura, la

mezcla será más resistente a la deformación plástica a altas temperaturas y menos fracturas tendrá a bajas temperaturas. Colombia posee una variedad de climas, por lo cual es necesario saber y/o comprender cómo se comportan los módulos de rigidez de las mezclas asfálticas frente a los cambios de temperatura, proporcionando así diseños eficientes por parte de nuestros ingenieros.

1. GENERALIDADES SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas son diseñadas para que soporten el tránsito continuo de millones de vehículos y así poder resolver los problemas de movilidad de las sociedades.

Por eso es necesario realizar estudios que permitan optimizar los procesos de diseño y construcción para poder obtener pavimentos más resistentes y funcionales, y reducir el costo a corto y largo plazo.

Las mezclas asfálticas son una combinación de material pétreo con una gradación definida y ligante asfáltico con características físicas también definidas, que son aglomerados y mezclados de tal manera que el material pétreo quede recubierto con una película continua de ligante.

1.1. COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

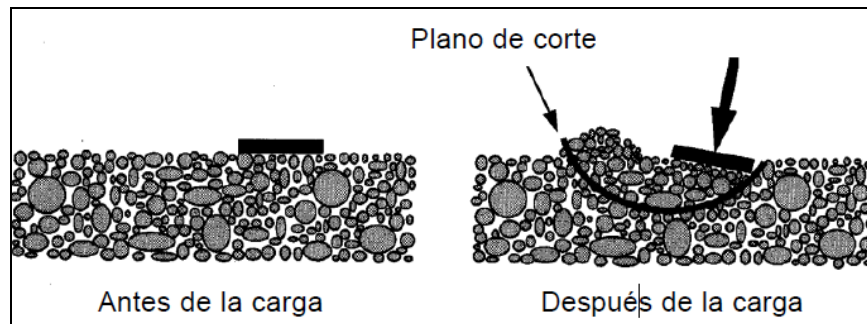
Las mezclas asfálticas son una combinación de agregado pétreo y asfalto, su comportamiento está afectado tanto por las propiedades individuales del agregado mineral y del asfalto, como por la interrelación de los componentes dentro del sistema.

1.1.1. Comportamiento Del Agregado Pétreo.

Los agregados utilizados en las mezclas asfálticas pueden ser naturales, triturados o sintéticos. Los naturales son extraídos de depósitos glaciares o fluviales, y en su utilización no se le aplica ningún procesamiento para elaborar las mezclas

asfálticas. Los agregados triturados son explotados en canteras, y mediante trituración mecánica son reducidos a partículas de tamaños deseados, y el agregado sintético es un subproducto industrial. Independientemente de la fuente se espera que el agregado pétreo provea un esqueleto fuerte para que resista aplicaciones de cargas repetidas. Los agregados angulares y rugosos, generan mayor resistencia que los redondeados y lisos. Aunque una pieza redondeada podría poseer la misma resistencia interna que una angular, las piezas angulares tienden a trabarse unas con otras formando una estructura más compacta del material. Las piezas redondeadas, en vez de trabarse tienden a deslizarse unas sobre otras, generando así masas de agregados sueltas que pueden deformarse con mayor facilidad. Al aplicar una carga a una masa de agregados, se puede generar un plano de corte interno por el cual las partículas se deslicen o se cizallen unas respecto a las otras (ver figura 1), resultando una deformación permanente de la masa. En este plano en el cual las tensiones de corte superan a la resistencia al corte del material. La resistencia al corte del agregado es de vital importancia en las mezclas asfálticas.

Figura 1. Comportamiento del agregado bajo carga de corte



Fuente: Instituto mexicano de transporte

1.1.2. Comportamiento Del Cemento Asfáltico.

Las características más importantes del cemento asfáltico son: la susceptibilidad a la temperatura, la viscoelasticidad, el envejecimiento y el tiempo de aplicación de

la carga. Por tal razón en los ensayos sobre mezclas asfálticas se debe especificar la temperatura y velocidad de carga, sin estas especificaciones, el resultado del ensayo no puede ser interpretado como es debido¹.

A bajas temperaturas ($< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) o bajo aplicación rápida de carga (por ejemplo; flujo rápido de caminos), el asfalto tiene el comportamiento de un sólido elástico, cuando se carga se deforma y cuando se descarga regresa a su forma original.

A altas temperaturas ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$) o bajo aplicación de carga sostenida (por ejemplo; flujo lento, o estacionamiento de camiones), el asfalto se comporta como un líquido viscoso.

Cuando el pavimento esta en servicio, la temperatura a la cual se expone normalmente es intermedia respecto a los extremos mencionados anteriormente, en este intervalo de temperaturas, el asfalto presenta ambas características, las de un fluido viscoso y las de un sólido elástico.

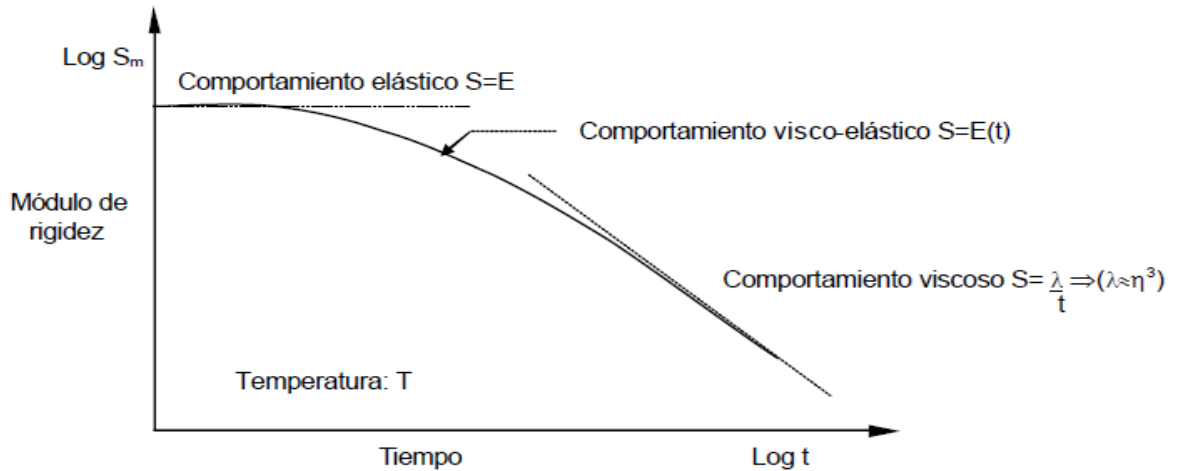
1.1.3. Comportamiento De Las Mezclas Asfálticas.

Después de realizada la mezcla de asfalto y agregado, el asfalto se enfría, y actúa como un pegamento que mantiene al agregado junto en una matriz sólida. En esta etapa, el comportamiento se conoce como viscoelástico; tiene ambas características, dependiendo de la temperatura y la velocidad de la carga.

Como resultado de la naturaleza de la integración de los comportamientos de sus componentes, las mezclas asfálticas presentan un comportamiento visco-elasto - plástico (Figura 2). Por un lado, el agregado pétreo tiene un comportamiento elastoplástico y por el otro, el mástic (asfalto más polvo mineral) tiene un comportamiento viscoelástico. Por tanto, las mezclas asfálticas poseen un comportamiento que se puede llamar visco-elástico-plástico.

¹ Instituto mexicano de transporte; Publicación Técnica No 267Sanfandila, Qro, 2005

Figura 2. Variación del comportamiento de una mezcla asfáltica en función del tiempo de aplicación de una carga (curva experimental).



Fuente: Instituto mexicano de transporte

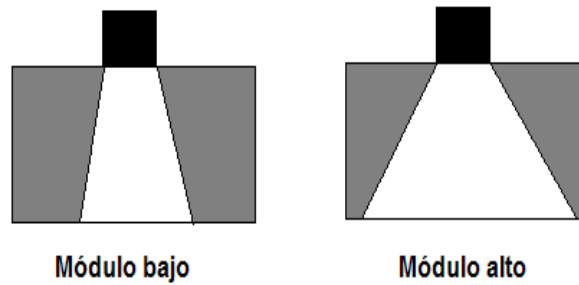
1.2. MÓDULO DINÁMICO.

El módulo dinámico de la mezcla asfáltica es una propiedad importante del material en cualquier procedimiento de diseño y análisis de pavimentos flexibles. La rigidez de la mezcla se ha constituido como un elemento fundamental en el diseño de pavimentos; que caracteriza de manera racional el comportamiento esfuerzo – deformación de los materiales que conforman la estructura.

El módulo dinámico es función de la temperatura, razón de carga, envejecimiento y características de la mezcla como viscosidad y contenido del ligante, granulometría del agregado y vacíos. Este depende tanto del tiempo como de la temperatura, ya que proporciona información de cuanto se deforma el material bajo una carga dada a una temperatura específica, y está relacionado al fisuramiento por fatiga, a la deformación permanente y a la propagación de una

carga en una capa asfáltica. Por esto se convierte en una de las propiedades más importantes a tener en cuenta en el diseño y/o construcción de una mezcla asfáltica.

Figura 3. Propagación de cargas

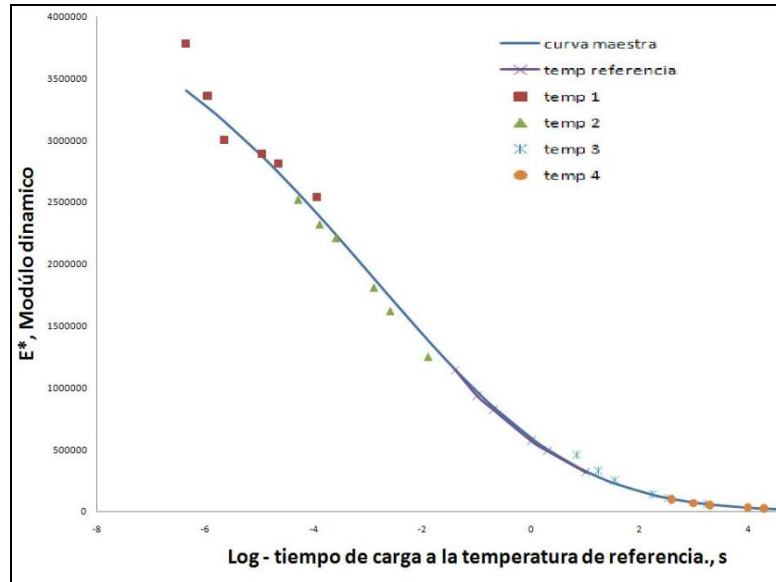


Fuente: Autores del proyecto

Para facilitar el análisis del efecto de la temperatura y la razón de carga en el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica, se desarrolló el concepto de la curva maestra. La curva maestra del módulo dinámico utiliza principios de superposición tiempo de carga (frecuencia)-temperatura, de esta manera puede describirse la dependencia del material con el tiempo; lo cual permite al ingeniero diseñador tomar en cuenta, no solamente la temperatura propia de la zona, sino también la velocidad de los vehículos, en la respuesta estructural que la mezcla asfáltica pueda brindar.

La construcción de la curva maestra consiste en realizar ensayos de módulo dinámico a diferentes temperaturas y frecuencias de carga, luego se selecciona una temperatura estándar de referencia y, posteriormente los datos de las diferentes temperaturas, se desplazan horizontalmente con respecto al tiempo de carga hasta que las curvas se unan en una única función suavizada, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Ejemplo de curva maestra



Fuente: Autores del proyecto

La magnitud del ajuste o desplazamiento de cada dato de temperatura requerido para formar la curva maestra describe la dependencia del material con la temperatura. Esta magnitud se ve afectada por un factor de ajuste, el cual se muestra en la siguiente ecuación

$$a_{(T)} = \frac{t}{t_r} \text{ ecuación 1.1}$$

$$\log(t_r) = \log(t) - \log[a_{(T)}] \text{ ecuación 1.2}$$

Donde:

$a(T)$ = factor de ajuste como una función de la temperatura de interés.

t = tiempo de carga a la temperatura deseada.

t_r = tiempo de carga a la temperatura de referencia.

T = temperatura.

Por su parte, la curva maestra del módulo como una función del tiempo de carga se modela matemáticamente así:

$$\text{Log}|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot \log(t_r)}} \quad \text{ecuación 1.3}$$

Donde:

t_r = tiempo reducido de carga a la temperatura de referencia.

δ = valor mínimo de E^* .

$\delta + \alpha$ = valor máximo de E^* .

β , γ = parámetros que describen la forma de la función sinusoidal.

Los parámetros de ajuste δ y α dependen de la granulometría del agregado, contenido del ligante y vacíos. Los parámetros de ajuste β y γ dependen de las características del ligante asfáltico y la magnitud δ y α .

De esta forma, utilizando las ecuaciones 1.1 ó 1.2, para una determinada temperatura y tiempo de carga, es posible calcular un tiempo de carga de referencia, que puede emplearse en la ecuación 1.3 y determinar así la respuesta (módulo de la mezcla) para ese tiempo de carga y temperatura de referencia.

2. METODOLOGÍA DE ESTUDIO.

La presente investigación se desarrolló cumpliendo las siguientes etapas:

- Recopilación bibliográfica.
- Caracterización de los materiales.
- Diseño y fabricación de probetas.
- Ensayo de probetas.
- Determinación del módulo dinámico.
- Análisis de resultados.

2.1. MATERIALES EMPLEADOS

2.1.1 Agregado mineral

2.1.1.1 Procedencia: El material pétreo que se utilizó en la presente investigación proviene de dos canteras ubicadas en el departamento de Santander, una se localiza junto al río Chicamocha en el sitio denominado Pescadero y la otra cantera se localiza en el municipio de Río Negro.

2.1.1.2. Ensayos Realizados al Agregado: A los agregados no se les realizó ninguna de las pruebas ya que existen estudios de estos materiales, efectuados en la Universidad Industrial de Santander².

² ARENAS ROMERO, Emilio, SERRANO CORZO, Andrés Julian. Análisis comparativo de propiedades de deformación en mezclas MDC-2, MDC-3, M1 y Stone Matrix Asphalt. Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2006.

Para la elaboración de las mezclas densas en caliente y de gradación abierta tenemos definida las siguientes granulometrías descritas en la norma INVIAS (artículos 450-02 y 452-02):

Tabla 1. Granulometrías de mezclas asfálticas.

masa total (g)	2500	
contenido asf (%)	5	5.5
cont asf (g)	125	137.5
peso agregado	2375	2362.5

Peso tamiz	MDC-2	M1
3/4''		
1/2''	296.875	
3/8''	201.875	330.75
Nº4	522.5	1523.8125
Nº10	475	118.125
Nº40	415.625	106.3125
Nº80	166.25	0
Nº200	154.375	129.9375
Pasa 200	142.5	153.5625
TOTAL	2375	2362.5

Fuente: Autores del proyecto

2.1.2. Asfalto.

2.1.2.1 Asfalto De Refinería: El asfalto empleado en esta investigación es asfalto 60-70, proporcionado por la empresa PAVIANDI, empresa que garantiza que el asfalto tenga propiedades de la referencia ya mencionada.

2.1.2.2. Asfalto Natural (Asfaltita): La obtención de este material se realizó con ayuda de personal de la escuela de geología de la Universidad Industrial de Santander en una región denominada La Tigra, vereda La Corcovada en cercanías al municipio de El Playón (Santander).

El asfalto natural se utilizó para modificar las propiedades del asfalto convencional 60/70 y obtener un asfalto de mayor dureza, asfalto 20/30 (ver fotografía 1).

Fotografía 1. Extracción y Combinación de Asfaltita con Asfalto de Refinería.



Fuente: Archivos Personales de Autores.

La metodología empleada para modificar el asfalto de refinería con asfaltita y las pruebas para verificar el cumplimiento de las características del asfalto modificado 20/30 están descritas en la tesis de grado “Mezclas de asfaltos naturales con asfaltos de refinería para producir asfaltos duros, en la elaboración de mezclas con un módulo alto”³ de la Universidad Industrial de Santander,

En esta tesis de grado se consigna que los porcentajes óptimos para la fabricación de asfalto modificado 20/30 son de 20% asfaltita y 80% asfalto de refinería y las temperaturas para la mezcla y compactación son de 170°C y 160°C respectivamente.

³ MÉNDEZ MORALES Adriana, NUÑEZ PARRA Yudith Maritza. Mezclas de asfaltos naturales con asfaltos de refinería para producir asfaltos duros, en la elaboración de mezclas con un módulo alto. Trabajo de grado Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2008.

2.2. METODOLOGÍA USADA PARA LA FABRICACIÓN DE PROBETAS.

Se diseñaron mezclas densas (MDC-2) y mezclas de gradación abierta (M1) en las cuales se combinaron en diferentes niveles los siguientes factores (ver figura 5):

- Contenido de asfalto.
- Tipo de asfalto.
- Fuente del agregado pétreo.

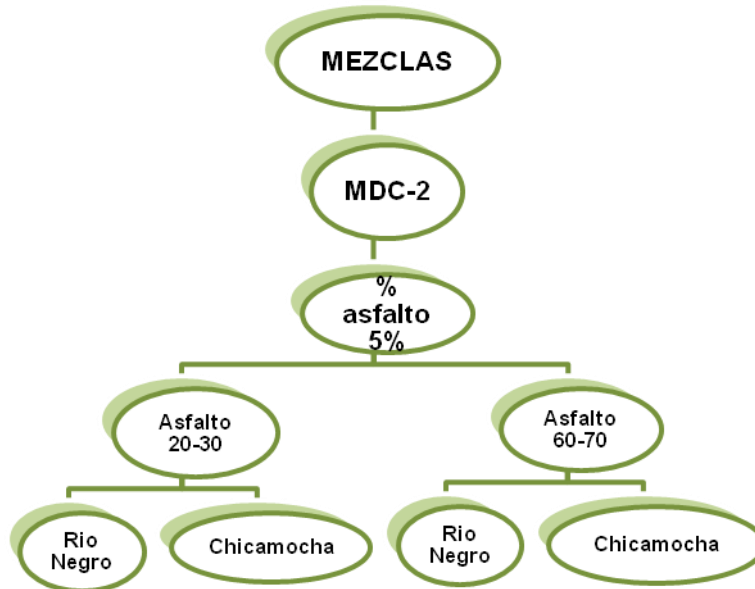
Figura 5. Factores de Mezcla

FACTORES DE MEZCLA							
Factor 1		Factor 2		Factor 3		Factor 4	
Contenido de asfalto		Tipo de asfalto		Gradación		Fuente	
C2	C3	T1	T2	G1	G2	F1	F2
5%	5,5%	20-30	60-70	MDC-2	M1	Chicamocha	Rio Negro

Fuente: Autores del proyecto

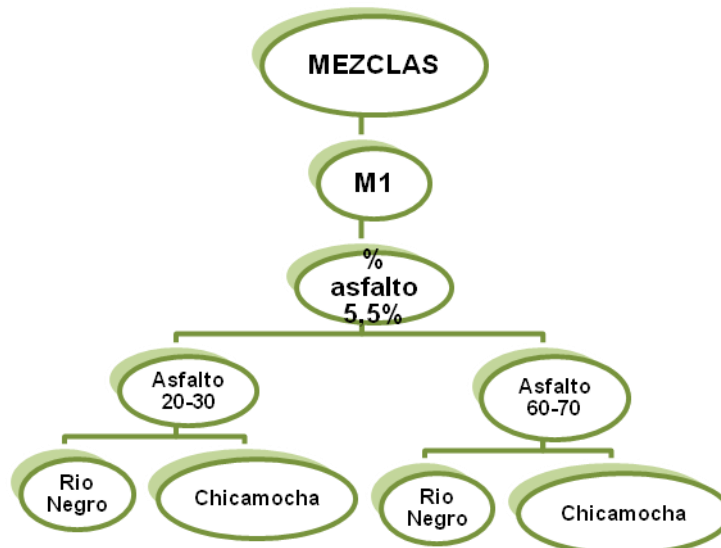
Determinados los factores anteriores, se establecieron diferentes combinaciones de dichos factores para la elaboración de los diseños de las mezclas asfálticas. En la figura 6 y figura 7 se esquematizan las combinaciones realizadas de los factores para cada tipo de mezcla.

Figura 6. Diseños de Mezclas Densas.



Fuente: Autores del proyecto

Figura 7. Diseños de Mezclas de Gradación Abierta.



Fuente: Autores del proyecto

Después de establecer las combinaciones de factores se procedió a fabricar las probetas, estas fueron elaboradas según los artículos 450 – 02 y 452-02 de las normas de INVIAS donde se encuentran las granulometrías exigidas para las mezclas más utilizadas en Colombia las cuales son del tipo MDC2 y M1. (Ver fotografía 4 y 5)

Fotografía 2. Elaboración de Mezcla.



Fuente: Archivos personales de Autores.

Fotografía 3. Mezcla Asfáltica.



Fuente: Archivos personales de Autores.

Fueron fabricados ocho diseños de mezclas y por cada uno se realizaron 3 replicas. Para la fabricación de estas probetas se emplearon moldes de acero e implementos del laboratorio. En el proceso de elaboración de las probetas estas fueron sometidas a una temperatura de mezcla de 160°C y a una temperatura de compactación entre 140°C y 150°C.

Las mezclas fueron compactadas mediante carga estática, con un peso total de mezcla de 2500 gramos y +- 102 mm de diámetro y aproximadamente 135 mm de altura. La compactación de las probetas se realizó con la máquina Universal Trebel (ver fotografía 5) aplicando un precarga inicial de 0,8 toneladas, luego se descargó y nuevamente se le colocó una carga con una velocidad de aplicación de

0,1 toneladas por segundo hasta alcanzar una carga de 17,2 toneladas. Esta carga se mantuvo durante un tiempo de 2 minutos, pasado este tiempo se descargó la probeta de una manera lenta y controlada. La metodología de este proceso de compactación se consigna en la norma del INVIAS E-747-07.

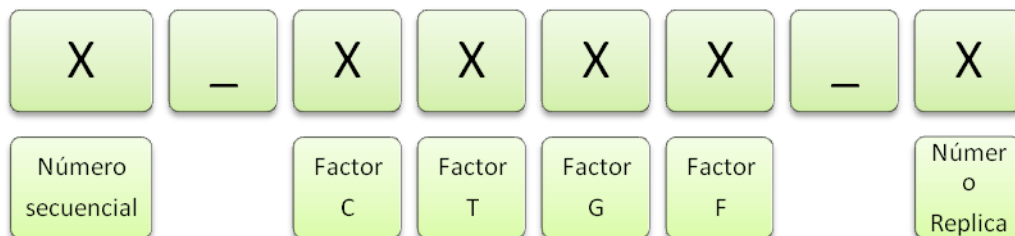
Fotografía 4. Máquina Universal Trebel.



Fuente: Archivos Personales de Autores.

Después de fabricar las probetas y para facilitar el manejo de estas en el laboratorio, se identificaron con la siguiente nomenclatura teniendo en cuenta las combinaciones de los factores de mezcla (Ver figura 8).

Figura 8. Nomenclatura de Probetas.



Fuente: Autores del proyecto

2.3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL.

2.3.1 Caracterización Volumétrica.

Para la caracterización volumétrica de las mezclas asfálticas se realizaron ensayos de Gravedad específica máxima teórica (GMM) y ensayos de peso específico aparente, siguiendo la normatividad respectiva de INVIAS.

2.3.1.1. Gravedad Específica Máxima Teórica (GMM) INV E-735.

Para la realización de este ensayo se elaboraron 8 mezclas: cuatro mezclas densas MDC-2 y cuatro mezclas de gradación abierta M1, que corresponden a cada diseño propuesto. Las mezclas MDC-2 tienen un peso aproximado de 2000 gr y las mezclas M1 tienen un peso aproximado de 1500 gr.

2.3.1.2. Densidad Bulk ó Peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas empleando especímenes saturados con superficie seca. INV E-733

Este método se refiere a la determinación del peso específico aparente y del peso unitario de especímenes de mezclas asfálticas compactadas, y deberá emplearse únicamente con mezclas asfálticas densas que prácticamente no sean absorbentes. A los diseños de mezcla de gradación abierta la densidad Bulk se calculó determinando el volumen de la probeta, midiendo la altura y el diámetro.

2.3.2. Determinación del módulo Dinámico.

Para la determinación del módulo se utilizó la Máquina Universal Dinámica MTS-810 (ver fotografía 5), la cual tiene la capacidad de realizar pruebas de cargas

estáticas y dinámicas en materiales. Posee un sistema variado de cargas controladas y diferentes grados de flujo en la servo-válvula.

Fotografía 5. Máquina Universal Dinámica MTS-810



Fuente: Archivos Personales de Autores.

La prueba se desarrolló siguiendo las pautas de la norma INV E-754-07.

A continuación se realiza una breve explicación del proceso llevado a cabo para la ejecución del ensayo: se aplicó un esfuerzo de compresión axial sinusoidal (medio seno inverso) a un espécimen de concreto asfáltico para una temperatura y frecuencia de carga dada y se mide la recuperación de la deformación axial del espécimen, la cual se efectuó mediante un dispositivo conformado por un extensómetro (lector de deformación) y una abrazadera la cual se utilizaba para la correcta colocación del extensómetro en la probeta.

Se realizaron 9 ensayos para cada replica, se sometieron a 3 temperaturas y 3 frecuencias de aplicación de carga distintas, las temperaturas fueron 3°C, 19°C, 35°C y las frecuencias de aplicación de carga fueron 1Hz, 5Hz y 10Hz.

Para el acondicionamiento de la temperatura de 3°C se utilizó una nevera en donde debían permanecer 12 horas antes del ensayo y para obtener la temperatura de 35°C se introdujeron en un horno durante 2 horas. El tiempo máximo del ensayo no podía superar los 2 minutos, ya que posterior a ese tiempo la probeta perdía la temperatura solicitada para la prueba.

Luego de realizar los ensayos dinámicos a las probetas, los resultados obtenidos de carga y de desplazamiento se ajustaron para determinar la ecuación que permitiera conocer las respectivas amplitudes de esfuerzo y de deformación unitaria.

A continuación se muestra un ejemplo (cálculo tipo), de los ajustes realizados a una de las probetas, a una temperatura y a una frecuencia especificada.

2.3.2.1. Cálculo tipo.

a) Datos de entrada Generales.

Los datos de entrada mostrados en la tabla 2, son los valores correspondientes a las condiciones de cada uno de los ensayos ejecutados.

Tabla 2. Datos Entrada Cálculo Tipo.

DATOS DE ENTRADA	
Código probeta	14_2212_R1
Temperatura (°C)	19
Frecuencia (Hz)	10
w	62.832
Longitud útil (mm)	102.484
área (mm ²)	8107.320
Abertura extensómetro (mm)	8.729
Nº abrazadera	4

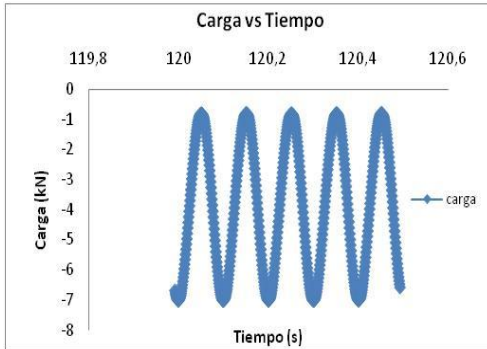
Fuente: Autores del proyecto

Donde;

- **Código Probeta:** nomenclatura utilizada para identificación de probeta.
- **Temperatura:** temperatura del ensayo.
- **Frecuencia:** frecuencia del ensayo.
- **W:** velocidad angular del ensayo ($2 * \pi * f$).
- **Longitud útil:** longitud total del dispositivo que mide la deformación.
- **Área:** área transversal de probeta.
- **Abertura extensómetro:** abertura inicial (antes del ensayo) del extensómetro.
- **Nº abrazadera:** Número de identificación de la abrazadera. Cada abrazadera tenía una altura particular.

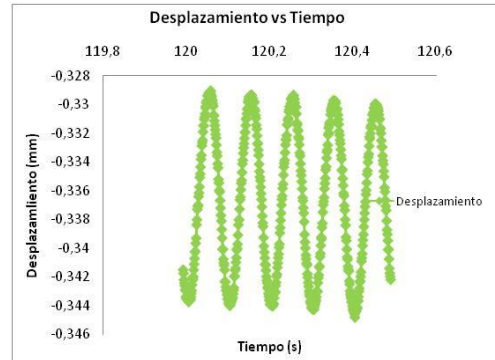
b) Resultados: Se graficaron los datos de carga y desplazamiento para observar su comportamiento en el tiempo y verificar que la respuesta del espécimen (ver figura 9 y figura 10).

Figura 9. Carga vs Tiempo.



Fuente: Autores del proyecto

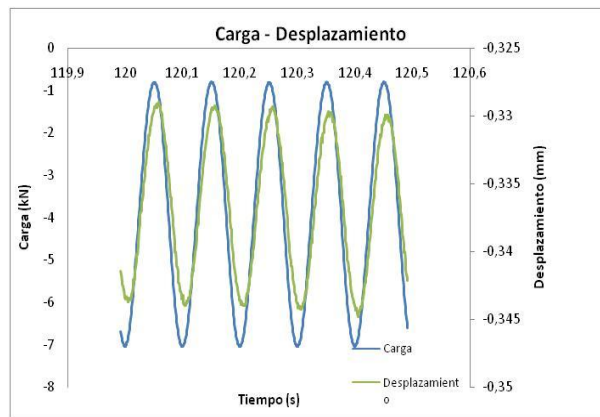
Figura 10. Desplazamiento vs Tiempo.



Fuente: Autores del proyecto

Además se superpusieron las funciones carga y desplazamiento, para observar claramente el desfase que se presenta entre las dos señales, típico de un material con propiedades viscoelásticas (ver figura 11).

Figura 11. Carga-Desplazamiento vs Tiempo.



Fuente: Autores del proyecto

c) Ajuste de las funciones.

Las señales de carga y desplazamiento se ajustaron a una función sinusoidal del siguiente tipo respectivamente (ver tabla 3 y tabla 4):

$$P(t) = A + B * \text{COS}(\omega t - \delta)$$

$$D(t) = A + B * \text{COS}(\omega t - \delta)$$

Los coeficientes de las ecuaciones fueron ajustados con la ayuda de la función Solver de Microsoft Office Excel.

Tabla 3. Coeficientes de Carga Ajustados Cálculo tipo.

CICLOS	CONSTANTES DE LA ECUACION DE AJUSTE			w (rad/s)	Σ ERROR^2	σ (kN/mm2)
	A	B	δ			
Ciclo 1	-3.859	-3.125	6.277	62.832	0.348	3.855 E ⁻⁴
Ciclo 2	-3.858	-3.129	6.275	62.832	0.333	3.860 E ⁻⁴
Ciclo 3	-3.860	-3.126	6.277	62.832	0.368	3.856 E ⁻⁴
Ciclo 4	-3.862	-3.129	6.276	62.832	0.389	3.860 E ⁻⁴
Ciclo 5	-3.861	-3.134	6.273	62.832	0.348	3.865 E ⁻⁴
Amplitud Carga (kN)	-3.129					

Fuente: Autores del proyecto

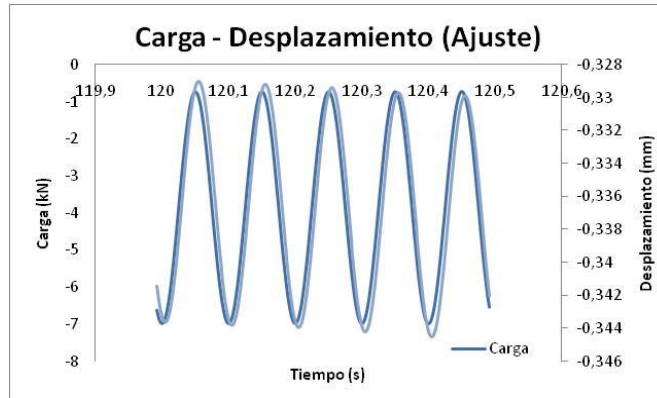
Tabla 4. Coeficientes de Desplazamiento Ajustados Cálculo Tipo.

CICLOS	CONSTANTES DE LA ECUACION DE AJUSTE			w (rad/s)	Σ ERROR^2	ε (mm/mm)	με
	A	B	Δ				
Ciclo 1	-0.336320	-0.0073192	0.304	62.832	3.74 E ⁻⁶	7.142 E ⁻⁵	71.418
Ciclo 2	-0.336502	-0.0073269	0.307	62.832	3.39 E ⁻⁶	7.149 E ⁻⁵	71.493
Ciclo 3	-0.336668	-0.0072911	0.307	62.832	2.85 E ⁻⁶	7.114 E ⁻⁵	71.144
Ciclo 4	-0.336957	-0.0072700	0.301	62.832	2.22 E ⁻⁶	7.094 E ⁻⁵	70.937
Ciclo 5	-0.337202	-0.0073346	0.297	62.832	3.43 E ⁻⁶	7.157 E ⁻⁵	71.568
Amplitud	-0.007308						71.312

Fuente: Autores del proyecto

Después del ajuste se obtiene una curva suavizada que proporciona las amplitudes de carga y desplazamiento (ver figura 12).

Figura 12. Carga-Desplazamiento vs Tiempo (ajustado).



Fuente: Autores del proyecto

Finalmente con las respectivas amplitudes de carga y desplazamiento se calcula el esfuerzo y deformación unitaria para cada ciclo y se determina el módulo dinámico y el ángulo de desfase como promedio de los últimos cinco ciclos de aplicación de carga y desplazamiento (ver tabla 5).

Tabla 5. Módulo Dinámico y Ángulo de Desfase. Cálculo Tipo.

MODULO DINAMICO Y ANGULO DE DESFASE		
CICLOS	E (GPa)	φ (°)
Ciclo 1	5.397	17.767
Ciclo 2	5.399	18.039
Ciclo 3	5.42	17.907
Ciclo 4	5.441	17.628
Ciclo 5	5.401	17.593
Promedio	5.412	17.7868

Fuente: Autores del proyecto

d) Construcción de la Curva Maestra.

La curva maestra del módulo dinámico como una función del tiempo de carga se modela matemáticamente de la siguiente forma (ver tabla 6):

$$\text{Log}|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot \log(t_r)}}$$

Tabla 6. Curva Maestra Cálculo Tipo.

PROBETA 14_2212

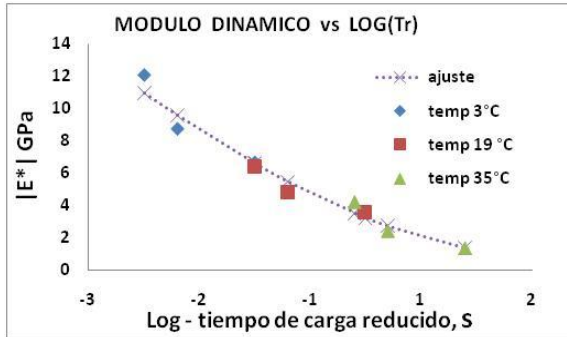
temp ref °C=		19	η ref=	1.556E+08			error^2 =	1.72E-02
temp re °C=	fr Hz	E* Mpa	η (cpoise)	log(tr)	Log E	E pred	Log Epred	error ^2
3	10	12.089	3.112E+09	-1.994	1.0824	10.94	1.04	1.89E-03
3	5	8.739	3.112E+09	-1.693	0.9415	9.56	0.98	1.51E-03
3	1	6.652	3.112E+09	-0.994	0.8230	6.58	0.82	2.53E-05
19	10	6.398	1.556E+08	-1.000	0.8060	6.60	0.82	1.78E-04
19	5	4.814	1.556E+08	-0.699	0.6825	5.45	0.74	2.90E-03
19	1	3.542	1.556E+08	0.000	0.5492	3.22	0.51	1.70E-03
35	10	4.164	1.04E+07	-0.101	0.6195	3.50	0.54	5.65E-03
35	5	2.380	1.04E+07	0.200	0.3766	2.70	0.43	3.08E-03
35	1	1.312	1.04E+07	0.899	0.1181	1.34	0.13	6.16E-05
coeficientes de la ecuación								
δ	α	β	γ	C				
-11.535	13.065	-2.466	0.389	0.764				

Fuente: Autores del proyecto

Los coeficientes δ , α , β y γ de la ecuación fueron ajustados con la ayuda de la función Solver de Microsoft Office Excel. En la figura 13 se observan los módulos dinámicos correspondientes a cada temperatura (3°C, 19°C y 35°C) con respecto al logaritmo del tiempo de carga reducido en contraste con el ajuste que realiza la función Solver.

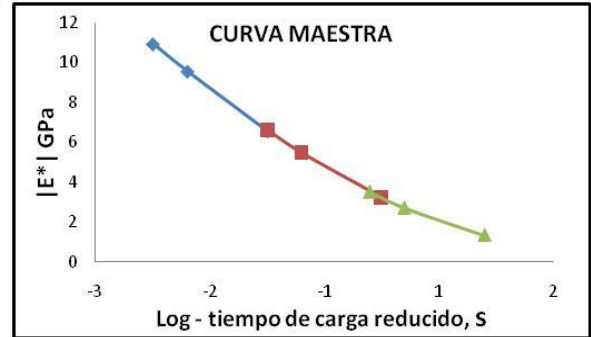
La figura 14 muestra la tendencia de la curva maestra de la probeta del cálculo tipo en la cual se tienen los valores de módulo dinámico con el tiempo de carga reducido

Figura 13. Módulo Dinámico vs Log(tr)



Fuente: Autores del proyecto

Figura 14. Curva Maestra



Fuente: Autores del proyecto

3. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados promedio para cada diseño de mezcla (3 replicas por diseño), obtenidos en los ensayos realizados sobre las probetas.

3.1. ENSAYO DE DENSIDAD BULK

Los ensayos de peso específico aparente se realizaron siguiendo las indicaciones de la norma INVIAS E-225-07. En la tabla 7 y tabla 8 se muestran los valores promedios para cada diseño.

Tabla 7 Densidad Bulk Mezclas MDC-2.

Probeta	Cont-Asfalto	DIMENSIONES (cm)		PESOS (gr)			peso específico aparente
		Altura	Diámetro	Seco	Sumergido	Húmedo	
9_2111	5%	13.15	10.2	2461.533	1412.667	2494.333	2.365
10_2112	5%	13.18	10.2	2469.333	1418.333	2509.667	2.388
13_2211	5%	13.3	10.2	2463.167	1399.333	2486	2.411
14_2212	5%	13.6	10.2	2549.9	1453.333	2589.667	2.371

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 8. Densidad Bulk Mezclas M1

Probeta	Cont-Asfalto	DIMENSIONES (cm)				PESOS (gr)	peso específico aparente
		Altura	Diámetro	Área	Volumen	Seco	
19_3121	5.5%	13.5	10.2	81.713	1103.125	2470.667	2.240
20_3122	5.5%	13.5	10.2	81.713	1103.125	2464.233	2.234
23_3221	5.5%	13.5	10.2	81.713	1103.125	2458.467	2.229
24_3222	5.5%	13.4	10.2	81.713	1094.954	2456.833	2.244

Fuente: Autores del proyecto

3.2. ENSAYO DE DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA GMM

Los ensayos de densidad máxima teórica, se hicieron siguiendo la norma INVIAS E-735-07. En la tabla 9, se muestran los datos de entrada utilizados para calcular los valores correspondientes del GMM.

Tabla 9. Datos Entrada Gmm.

DATOS ENTRADA		
PESO PICNÓMETRO (RECIPIENTE+AGUA)	5954	Gr
PESO MDC-2	2000	Gr
PESO M1	1500	Gr

Fuente: Autores del proyecto

En la tabla 10 y tabla 11, se muestra los valores de densidad máxima teórica, para cada tipo de mezcla (MDC-2 y M1) utilizado en esta investigación.

Tabla 10. Gmm para Mezclas densas MDC-2

PROBETA	CONT- ASFALTO	PESO PROBETA+PICNOMETRO	GMM
9_2111	5.0%	7167	2.54
10_2112	5.0%	7154	2.50
13_2211	5.0%	7151	2.49
14_2212	5.0%	7163	2.53

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 11. Gmm para Mezclas abiertas M1

PROBETA	CONT- ASFALTO	PESO PROBETA+PICNOMETRO	GMM
19_3121	5.5%	6852	2.49
20_3122	5.5%	6848	2.48
23_3221	5.5%	6843	2.46
24_3222	5.5%	6858	2.52

Fuente: Autores del proyecto

3.3 PARAMETROS VOLUMÉTRICOS.

Estos cálculos se hallaron siguiendo la norma INVIAS E-799-07. Los valores correspondientes a estos parámetros se consignaron en la siguiente tabla (tabla 12).

Tabla 12. Parámetros volumétricos para MDC-2 y M1.

	T. Mezcla	VAM	Va (%)	VFA
MDC-2	9_2111	15.53	6.87	55.75
	10_2112	14.72	4.48	69.56
	13_2211	13.88	3.15	77.30
	14_2212	15.10	6.03	60.06
M1	19_3121	20.43	10.06	50.76
	20_3122	20.64	9.82	52.42
	23_3221	20.82	9.26	55.53
	24_3222	20.29	10.89	46.32

Fuente: Autores del proyecto

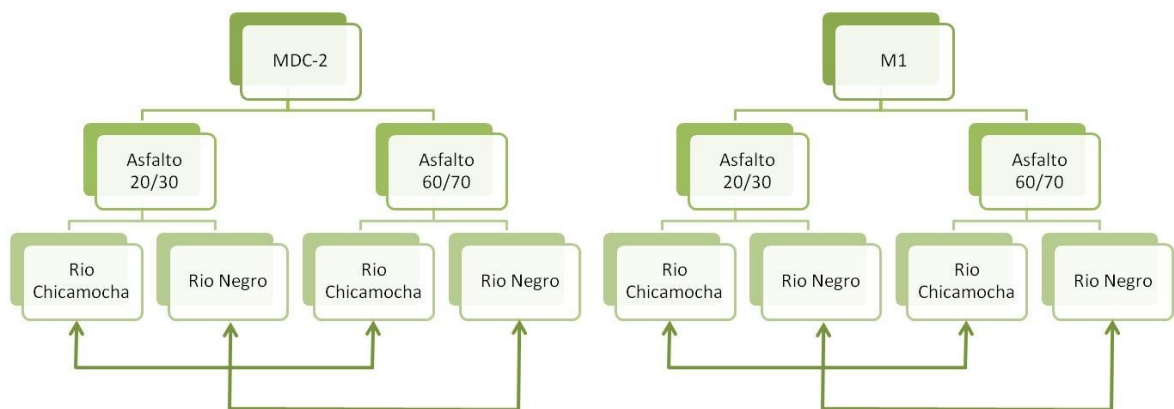
3.4 MÓDULOS DINÁMICOS

La temperatura ambiente alta, ablanda el asfalto, provocando una enorme susceptibilidad a sufrir deformaciones plásticas, puesto que la mezcla presenta un comportamiento muy viscoso. Por tal razón se realizó un análisis contiguo para el valor de la temperatura más elevado en la presente investigación el cual corresponde a 35°C. Este análisis es evaluado con frecuencias de 1Hz, 5Hz y 10Hz

Los módulos dinámicos, fueron analizados teniendo en cuenta, el tipo de mezcla (MDC-2 ó M1), la fuente del agregado pétreo, el contenido de asfalto y el tipo de asfalto utilizado.

Para evaluar la susceptibilidad del tipo de asfalto con la temperatura se agruparon las mezclas asfálticas densas y abiertas en parejas de tal forma de que el único factor diferente entre ellas fuese el tipo de asfalto ver figura 15.

Figura 15. Esquema de combinación de mezclas para análisis de susceptibilidad de asfalto.



Fuente: Autores del proyecto

3.4.1. Mezclas Densas en Caliente.

- **Probeta 9_2111**

Características: contenido de asfalto 5.0%, asfalto 20/30 y fuente del agregado rio Chicamocha.

En la tabla 13 se observan los valores de los módulos dinámicos promedios de las replicas de la mezcla **9_2111**, para cada temperatura y frecuencia ensayada.

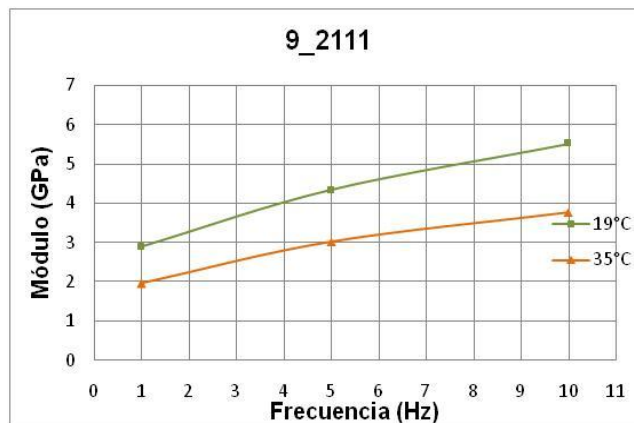
Tabla 13. Módulos Dinámicos Probeta 9_2111.

Código Probeta	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Modulo (GPa)
9_2111	3	10	-
		5	-
		1	-
	19	10	5.524
		5	4.341
		1	2.897
	35	10	3.766
		5	3.015
		1	1.964

Fuente: Autores del proyecto

En la figura 16 se graficó el comportamiento del módulo dinámico de la mezcla **9_2111**, con respecto a la frecuencia de aplicación de carga, para cada temperatura ensayada.

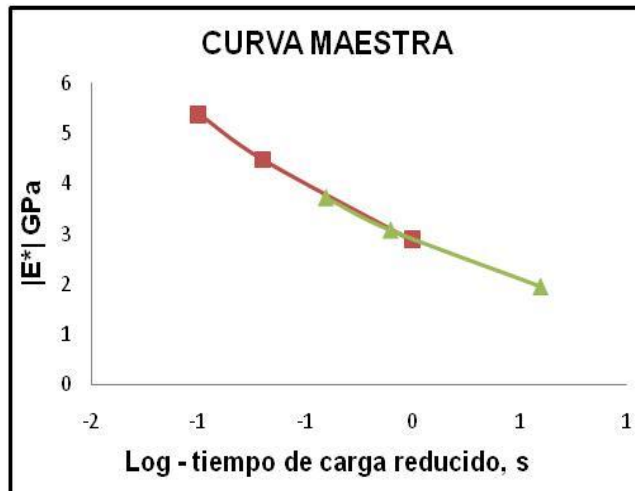
Figura 16. Módulos Dinámicos Probeta 9_2111.



Fuente: Autores del proyecto

En la figura 17 se muestra la curva maestra de la mezcla **9_2111**, ajustada a la temperatura de referencia 19°C.

Figura 17. Curva Maestra Probeta 9_2111.



Fuente: Autores del proyecto

- **Probeta 13_2211**

Características: contenido de asfalto 5.0%, asfalto 60/70 y fuente del agregado; rio Chicamocha

En la tabla 14 se observan los valores de los módulos dinámicos promedios de las replicas de la mezcla **13_2211** para cada temperatura y frecuencia ensayada.

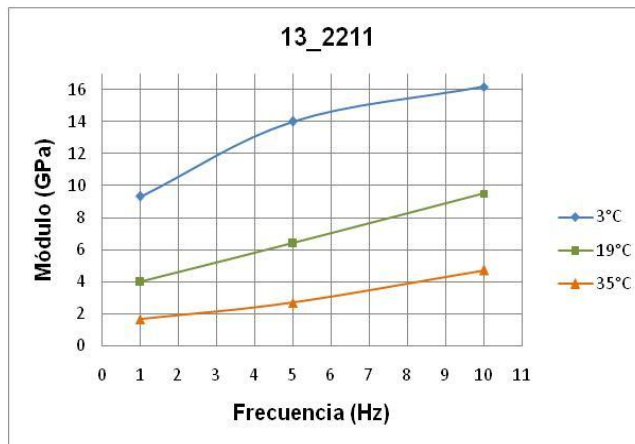
Tabla 14. Módulos Dinámicos Probeta 13_2211.

Código Probeta	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Modulo (GPa)
13_2211	3	10	16.174
		5	14.018
		1	9.323
	19	10	9.521
		5	6.396
		1	3.986
	35	10	4.710
		5	2.687
		1	1.647

Fuente: Autores del proyecto

En la figura 18 se graficó el comportamiento del módulo dinámico de la mezcla **13_2211**, con respecto a la frecuencia de aplicación de carga, para cada temperatura ensayada.

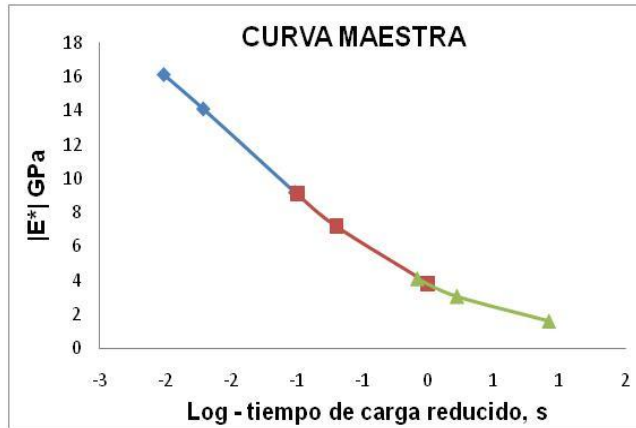
Figura 18. Módulos Dinámicos Probeta 13_2211.



Fuente: Autores del proyecto

En la figura 19 se muestra la curva maestra de la mezcla **13_2211**, ajustada a la temperatura de referencia 19°C.

Figura 19. Curva Maestra Probeta 13_2211.



Fuente: Autores del proyecto

Figura 20. Comparación Curvas Maestras 9_2111 y 13_2211.



Fuente: Autores del proyecto

Las mezclas (MDC-2) 9_2111 y 13_2211, presentan un comportamiento fuera de lo normal, ya que la mezcla 13_2211 aún siendo fabricada con asfalto 60/70, presenta aumento en el módulo dinámico de 52% a temperatura 19°C y de 27% a 35°C con respecto a la mezcla 9_2111, la cual está elaborada con asfalto 20/30.

Este comportamiento se debe al bajo porcentaje de volumen de vacíos de aire que tiene la mezcla 13_2211 frente a la mezcla 9_2111. (ver tabla 12)

- **Probeta 10_2112**

Características: contenido de asfalto 5.0%, asfalto 20/30 y fuente del agregado; río Negro.

En la tabla 15 se observan los valores de los módulos dinámicos promedios de las replicas de la mezcla **10_2112**, para cada temperatura y frecuencia ensayada.

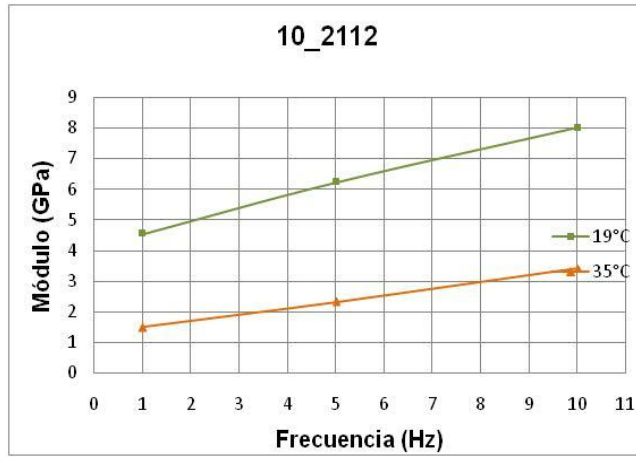
Tabla 15. Módulos Dinámicos Probeta 10_2112.

Código Probeta	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Modulo (GPa)
10_2112	3	10	-
		5	-
		1	-
	19	10	8.001
		5	6.229
		1	4.549
	35	10	3.410
		5	2.323
		1	1.492

Fuente: Autores del proyecto

En la figura 21 se graficó el comportamiento del módulo dinámico de la mezcla **10_2112**, con respecto a la frecuencia de aplicación de carga, para cada temperatura ensayada

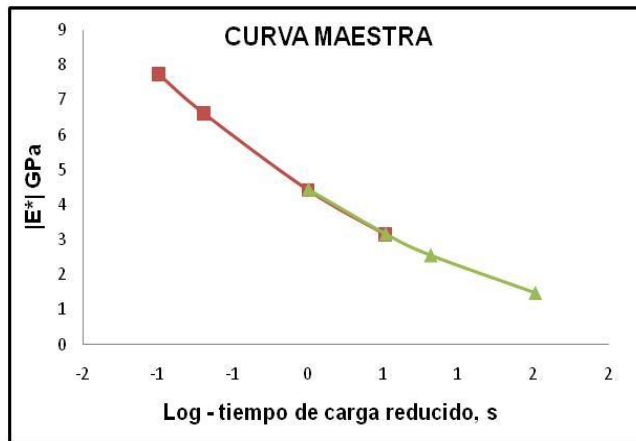
Figura 21. Módulos Dinámicos Probeta 10_2112.



Fuente: Autores del proyecto

En la figura 22 se muestra la curva maestra de la mezcla **10_2112**, ajustada a la temperatura de referencia 19°C.

Figura 22. Curva Maestra Probeta 10_2112



Fuente: Autores del proyecto

En los ensayos realizados las probetas **9_2111** y **10_2112** a temperatura de 3°C, no se lo logro obtener un desplazamiento de forma sinusoidal.

- **Probeta 14_2212**

Características: contenido de asfalto 5.0%, y fuente del agregado; rio Negro.

En la tabla 16 se observan los valores de los módulos dinámicos promedios de las replicas de la mezcla **14_2212**. Para cada temperatura y frecuencia ensayada,

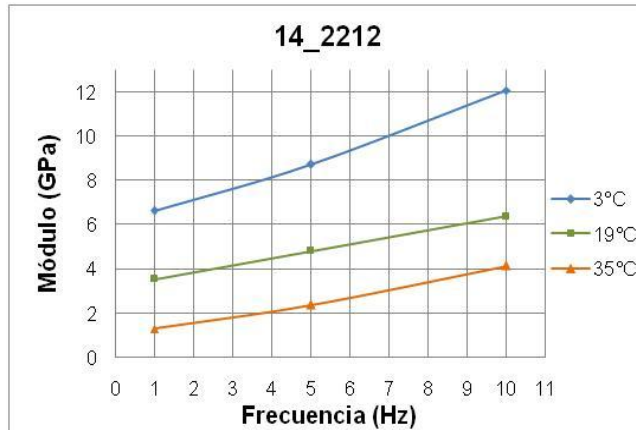
Tabla 16. Módulos Dinámicos Probeta 14_2212.

Código Probeta	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Modulo (GPa)
14_2212	3	10	12.089
		5	8.739
		1	6.652
	19	10	6.398
		5	4.814
		1	3.542
	35	10	4.164
		5	2.380
		1	1.312

Fuente: Autores del proyecto

En la figura 23 se graficó el comportamiento del módulo dinámico de la mezcla **14_2212**, con respecto a la frecuencia de aplicación de carga, para cada temperatura ensayada.

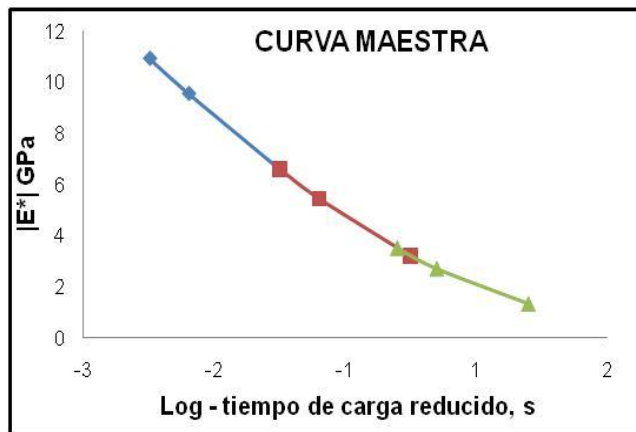
Figura 23. Módulos Dinámicos Probeta 14_2212.



Fuente: Autores del proyecto

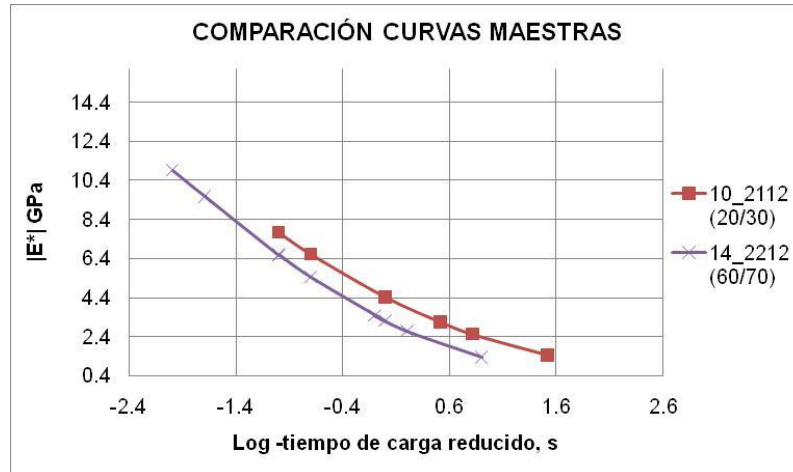
En la figura 24 se muestra la curva maestra de la mezcla **14_2212**, ajustada a la temperatura de referencia 19°C.

Figura 24. Curva Maestra Probeta 14_2212.



Fuente: Autores del proyecto

Figura 25. Comparación Curvas Maestras 10_2112 y 14_2212.



Fuente: Autores del proyecto

En las mezclas MDC-2, se observa que dos de estas (10_2112 y 14_2212) tienen un comportamiento normal, ya que la mezcla 10_2112 está elaborada con asfalto 20/30 y presenta un aumento de módulo de 27% a temperatura 19°C y 22.5% a 35°C sobre la mezcla 14_2212, la cual está fabricada con asfalto 60/70.

Con estos valores se puede observar que para temperaturas de 35°C en una mezcla densa en caliente (MDC-2) se pueden presentar módulos dinámicos entre 1,5 GPa y 3,7 GPa, en mezclas hechas con asfalto modificado 20/30 y entre 1,3 GPa y 4,7 GPa en las mezclas elaboradas con asfalto convencional 60/70.

3.4.2. Mezclas de Gradación Abierta.

- **Probeta 19_3121**

Características: contenido de asfalto 5.5%, asfalto 20/30 y fuente del agregado; río Chicamocha.

En la siguiente tabla 17 se observan los valores de los módulos dinámicos promedios de las replicas de la mezcla **19_3121**. Para cada temperatura y frecuencia ensayada,

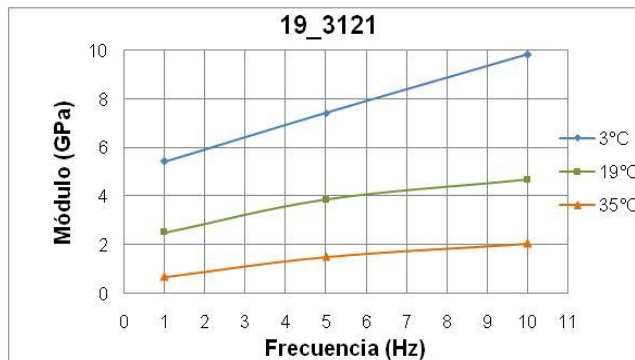
Tabla 17. Módulos Dinámicos Probeta 19_3121.

Código Probeta	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Modulo (GPa)
19_3121	3	10	9.842
		5	7.435
		1	5.434
	19	10	4.686
		5	3.865
		1	2.508
	35	10	2.047
		5	1.510
		1	0.680

Fuente: Autores del proyecto

En la figura 26 se graficó el comportamiento del módulo dinámico de la mezcla **19_3121**, con respecto a la frecuencia de aplicación de carga, para cada temperatura ensayada.

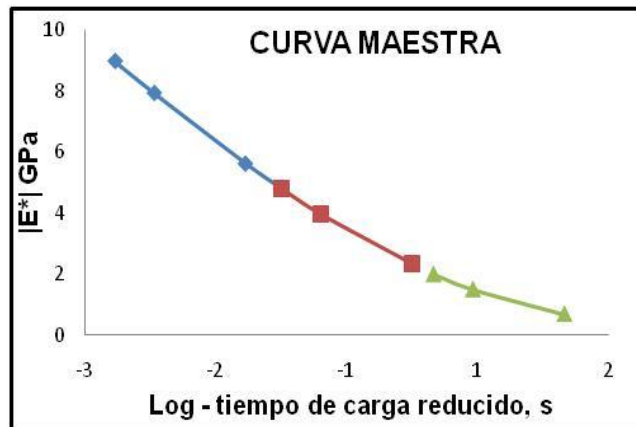
Figura 26. Módulos Dinámicos Probeta 19_3121.



Fuente: Autores del proyecto

En la figura 27 se muestra la curva maestra de la mezcla **19_3121**, ajustada a la temperatura de referencia 19°C.

Figura 27. Curva Maestra Probeta 19_3121.



Fuente: Autores del proyecto

- **Probeta 23_3221**

Características: contenido de asfalto 5.5%, y fuente del agregado; río Chicamocha.

En la siguiente tabla se observan los valores de los módulos dinámicos promedios de las replicas de la mezcla **23_3221**. Para cada temperatura y frecuencia ensayada,

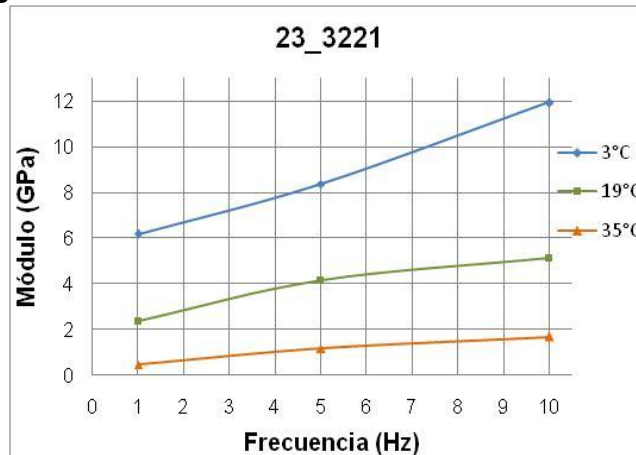
Tabla 18. Módulos Dinámicos Probeta 23_3221.

Código Probeta	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Modulo (GPa)
23_3221	3	10	11.945
		5	8.377
		1	6.179
	19	10	5.118
		5	4.157
		1	2.369
	35	10	1.699
		5	1.186
		1	0.474

Fuente: Autores del proyecto

En la figura 28 se graficó el comportamiento del módulo dinámico de la mezcla **23_3221**, con respecto a la frecuencia de aplicación de carga, para cada temperatura ensayada.

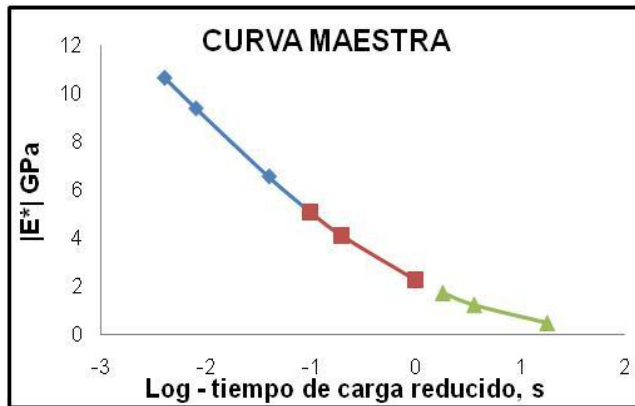
Figura 28. Módulos Dinámicos Probeta 23_3221.



Fuente: Autores del proyecto

En la figura 29 se muestra la curva maestra de la mezcla 23_3221, ajustada a la temperatura de referencia 19°C

Figura 29. Curva Maestra Probeta 23_3221.



Fuente: Autores del proyecto

Figura 30. Comparación Curvas Maestras 19_3121 y 23_3221.



Fuente: Autores del proyecto

En los diseños de mezclas 19_3121 y 23_3221, se muestra una superioridad por parte de la mezcla 23_3221 en cuanto al valor del modulo dinámico se refiere, ya

que tiene un aumento en su módulo dinámico de 17% a temperatura 3°C, de 0,6% a 19°C y 31% a 35°C.

- **Probeta 20_3122**

Características: contenido de asfalto 5.5%, y fuente del agregado; rio Negro.

En la siguiente tabla se observan los valores de los módulos dinámicos promedios de las replicas de la mezcla **20_3122**. Para cada temperatura y frecuencia ensayada,

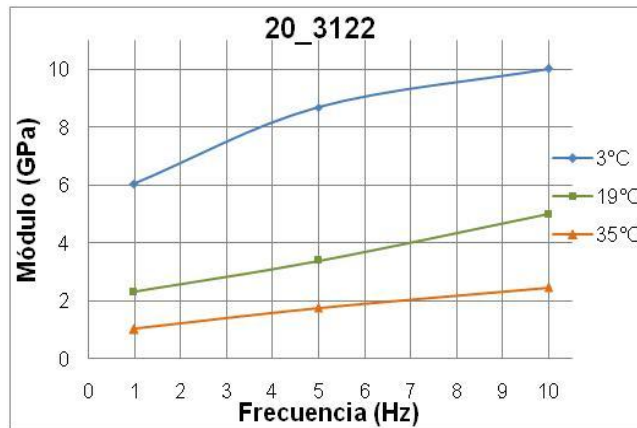
Tabla 19. Módulos Dinámicos Probeta 20_3122.

Código Probeta	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Modulo (GPa)
20_3122	3	10	10.041
		5	8.699
		1	6.061
	19	10	4.995
		5	3.388
		1	2.322
	35	10	2.474
		5	1.758
		1	1.033

Fuente: Autores del proyecto

En la figura 31 se graficó el comportamiento del módulo dinámico de la mezcla **20_3122**, con respecto a la frecuencia de aplicación de carga, para cada temperatura ensayada.

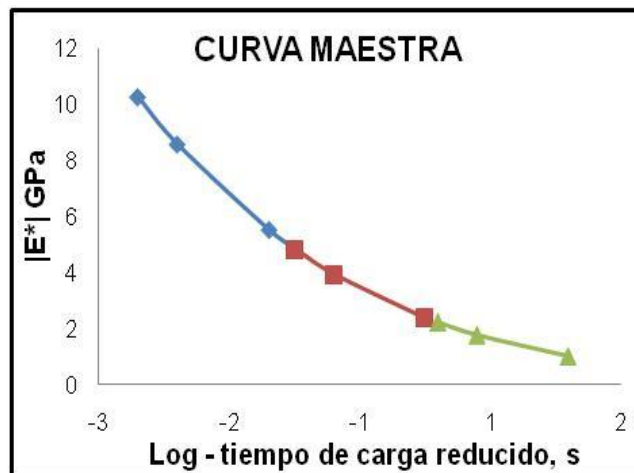
Figura 31. Módulos Dinámicos Probeta 20_3122.



Fuente: Autores del proyecto

En la figura 32 se muestra la curva maestra de la mezcla **20_3122**, ajustada a la temperatura de referencia 19°C.

Figura 32. Curva Maestra Probeta 20_3122.



Fuente: Autores del proyecto

- **Probeta 24_3222**

Características: contenido de asfalto 5.5%, y fuente del agregado; rio Negro.

En la siguiente tabla se observan los valores de los módulos dinámicos promedios de las replicas de la mezcla **24_3222**. Para cada temperatura y frecuencia ensayada.

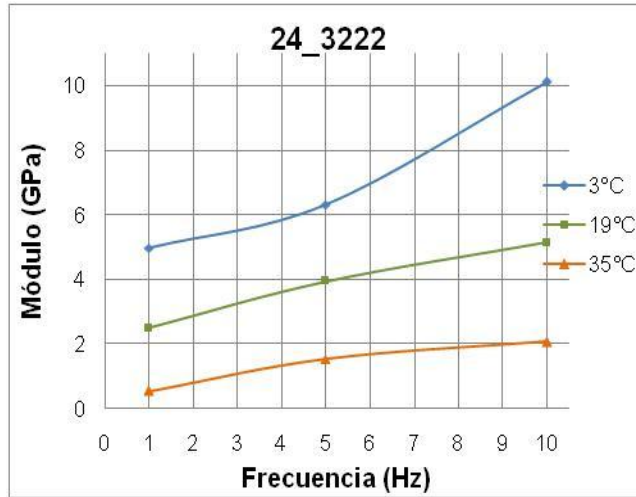
Tabla 20. Módulos Dinámicos Probeta 24_3222.

Código Probeta	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Modulo (GPa)
24_3222	3	10	10.116
		5	6.319
		1	4.981
	19	10	5.145
		5	3.954
		1	2.507
	35	10	2.077
		5	1.542
		1	0.547

Fuente: Autores del proyecto

En la figura 29 se graficó el comportamiento del módulo dinámico de la mezcla **24_3222**, con respecto a la frecuencia de aplicación de carga, para cada temperatura ensayada.

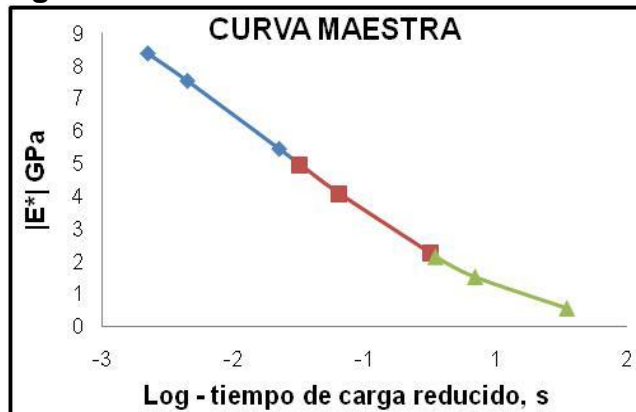
Figura 33. Módulos Dinámicos Probeta 24_3222.



Fuente: Autores del proyecto

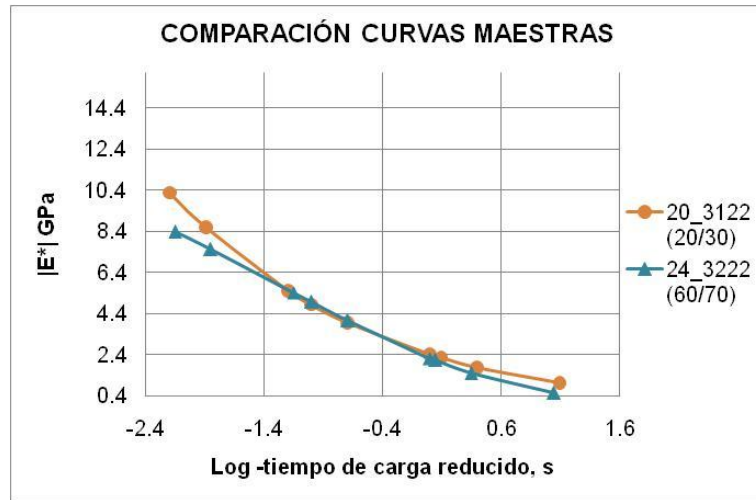
En la figura 30 se muestra la curva maestra de la mezcla **24_3222**, ajustada a la temperatura de referencia 19°C

Figura 34. Curva Maestra Probeta 24_3222.



Fuente: Autores del proyecto

Figura 35. Comparación Curvas Maestras 20_3122 y 24_3222.



Fuente: Autores del proyecto

Las mezclas M1 (20_3122 y 24_3222) se comportan de la siguiente manera; el diseño 20_3122 está elaborado con asfalto 20/30 y tiene un aumento en su módulo dinámico de 20% para la temperatura de 3°C, 7% para 19°C y 60% para 35°C sobre los valores de la mezcla 24_3222.

En general para una mezcla de gradación abierta (M1) fabricada con asfalto modificado 20/30, se pueden presentar valores de módulo dinámico entre 0,7 GPa y 2,5 GPa y para mezcla con asfalto convencional 60/70 se tiene un comportamiento entre 0,5 y 2,1, GPa, esta variación se observa en la temperatura de 35°C

4. CONCLUSIONES.

- A frecuencias lentas de aplicación de carga, se apreció que las mezclas MDC-2, mostraron valores de módulos dinámicos más altos, que los valores presentados por las mezclas M1, pero a su vez las mezclas MDC-2 presentaron mayor sensibilidad a los cambios de frecuencia de aplicación de carga ya que los valores de módulos dinámicos variaron apreciablemente con estos cambios de frecuencia.
- Es de esperarse que las mezclas hechas con asfalto duro (asfalto modificado 20-30) presenten valores de módulos dinámicos mayores que los valores de las mezclas hechas con asfalto convencional (60/70). En este estudio los resultados mostraron que en algunas mezclas los valores de módulos dinámicos en mezclas hechas con asfalto convencional (60/70), fueron mayores que los presentados por algunas mezclas hechas con asfalto duro (asfalto modificado 20-30), esto debido a que el porcentaje de volumen de vacíos de aire, fue menor en las probetas fabricadas con asfalto convencional (60/70), (ver tabla 12) proporcionándoles así una estructura más compacta, aportándole mayor resistencia y rigidez.
- A pesar de que el contenido de asfalto en las mezclas MDC-2 (5%) es menor que el contenido en las mezclas M1 (5,5%), fue más notable la influencia del ligante asfáltico en las mezclas MDC-2. Estas mezclas asfálticas mostraron mayor sensibilidad al cambio de temperatura, ya que presentaron una variación considerable en los valores de módulos dinámicos, frente a dichos cambios de temperatura.

5. RECOMENDACIONES.

- Ampliar las investigaciones las cuales incluyan nuevos modelos para predecir módulos, para que sean compatibles con los climas y materiales de nuestro país, para así garantizar estructuras de pavimento resistentes y durables.
- Emplear otros tipos de ensayos y modelos como Análisis de resistencia a la fatiga, resistencia a la compresión diametral, estabilidad y flujo, sensibilidad a la humedad que arrojen buenos resultados con el fin de evaluar las propiedades de las mezclas asfálticas.
- Es de vital importancia tener equipos nuevos que nos permitan estudiar más a fondo los fenómenos que se dan en las mezclas asfálticas, recibiendo instrucciones sobre la implementación y manejo de estos equipos.
- Seguir en la tarea de investigar sobre estos temas y hacer de estos trabajos una base de datos confiable para la ingeniería.

BIBLIOGRAFÍA.

- ADAMS, Y.E.; ZEGHAL, M.; ELHUSSEIN H. MOHAMED, Complex Modulus Test Protocol and Procedure for Determining Huet-Sayegh Model Parameters, Canada, November 6, 2006.
- DONALD J. SWAN, Evaluation of the testing procedure and data analysis for the uniaxial complex modulus test on hot mix asphalt, University Of Florida, 2002.
- EDUARDO DUSSÁN NAVARRO – FERNANDO FLAUTERO VALENCIA, Automatización de Ensayos Dinámicos del Laboratorio de Pavimentos en el Equipo NAT (NOTTINGHAM ASPHALT TESTER) de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C, 2005.
- EMILIO ARENAS ROMERO – ANDRÉS JULIÁN SERRANO CORZO, Análisis Comparativo de Propiedades de Deformación en las Mezclas MDC-2, MDC-3, M1 y Stone Matrix Asphalt, Bucaramanga, 2006.
- ING. JORGE CORONADO ITURBIDE, Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, Guatemala, Noviembre de 2002.
- Instituto mexicano de transporte; Publicación Técnica No 267Sanfandila, Qro, (2005)
- MARK HARLEY KING, Determination of Dynamic Moduli in Uniaxial Compression for North Carolina Hot Mix Asphalt Concrete, November 1, 2004.

ANEXOS

ANEXO A GRANULOMETRÍAS

Parámetros de mezclas para elaboración de probetas.

contenido asf (%)	5	5.5
cont asf (g)	125.0	137.5
peso agregado	2375.0	2362.5

Peso tamiz	MDC-2	M1
3/4		
1/2	296.9	
3/8	201.9	330.8
Nº4	522.5	1523.8
Nº10	475.0	118.1
Nº40	415.6	106.3
Nº80	166.3	0.0
Nº200	154.4	129.9
Pasa 200	142.5	153.6
TOTAL	2375	2362.5

ANEXO B. CARACTERIZACION DE PROBETAS

1. DENSIDAD BULK

Probeta	DIMENSIONES (cm)		PESOS (gr)			peso especifico aparente
	Altura	Diámetro	Seco	Sumergido	Húmedo	
9_2111_R1	13.18	10.2	2456.2	1451.32	2492	2.360
9_2111_R2	13.1	10.2	2466	1453.62	2498	2.361
9_2111_R3	13.17	10.2	2462.4	1455.87	2493	2.374
10_2112_R1	13.2	10.2	2467.5	1470.36	2509	2.375
10_2112_R2	13.15	10.2	2474.5	1474.25	2514	2.379
10_2112_R3	13.2	10.2	2466	1481.78	2506	2.407
13_2211_R1	13.6	10.2	2478	1468.83	2502	2.398
13_2211_R2	13.1	10.2	2450.5	1461.87	2476	2.416
13_2211_R3	13.2	10.2	2461	1462.51	2480	2.418
14_2212_R1	13.7	10.2	2553	1509.32	2595	2.351
14_2212_R2	13.6	10.2	2557.2	1520.20	2587	2.397
14_2212_R3	13.5	10.2	2539.5	1521.17	2587	2.382
19_3121_R1	13.6	10.2	2452.6			2.206
19_3121_R2	13.37	10.2	2476.7			2.267
19_3121_R3	13.45	10.2	2482.7			2.258
20_3122_R1	13.5	10.2	2465.3			2.234
20_3122_R2	13.5	10.2	2470.1			2.239
20_3122_R3	13.5	10.2	2457.3			2.227
23_3221_R1	13.5	10.2	2464.5			2.234
23_3221_R2	13.4	10.2	2456.4			2.243
23_3221_R3	13.6	10.2	2454.5			2.208
24_3222_R1	13.4	10.2	2460			2.246
24_3222_R2	13.4	10.2	2456.5			2.243
24_3222_R3	13.4	10.2	2454			2.241

1. PESO ESPECIFICO TEORICO MAXIMO (GMM)

DATOS ENTRADA		
PESO PICNÓMETRO (RECIPIENTE+AGUA)	5954	gr
PESO MDC-2	2000	gr
PESO M1	1500	gr

PROBETA	PESO PROBETA+PICNOMETRO	GMM
9_2111	7167	2.54
10_2112	7154	2.50
13_2211	7151	2.49
14_2212	7163	2.53
19_3121	6852	2.49
20_3122	6848	2.48
23_3221	6843	2.46
24_3222	6858	2.52

ANEXO C ENSAYOS MÓDULOS DINÁMICOS

1. TABLA RESULTADOS ENSAYOS DINAMICOS

MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE – Contenido de asfalto: 5.0%

Código	Temp (°C)	Fr (Hz)	Modulo (Gpa)	ϕ (°)	Carga (kN)	ϵ (μ s)
9_2111_R1	3	10	-	-	-	-
9_2111_R1	3	5	-	-	-	-
9_2111_R1	3	1	-	-	-	-
9_2111_R1	19	10	6.207	18.929	3.502	69.597
9_2111_R1	19	5	4.814	19.771	2.982	76.407
9_2111_R1	19	1	2.926	23.453	2.297	96.81
9_2111_R1	35	10	4.563	22.519	1.958	52.93
9_2111_R1	35	5	3.948	23.03	1.772	55.348
9_2111_R1	35	1	2.403	20.161	0.95	48.768
9_2111_R2	3	10	-	-	-	-
9_2111_R2	3	5	-	-	-	-
9_2111_R2	3	1	-	-	-	-
9_2111_R2	19	10	3.923	15.965	2.671	83.992
9_2111_R2	19	5	3.201	16.658	1.275	82.177
9_2111_R2	19	1	2.191	17.635	1.272	71.628
9_2111_R2	35	10	3.24	18.266	1.671	63.604
9_2111_R2	35	5	2.363	19.632	1.292	67.428
9_2111_R2	35	1	1.989	19.08	1.812	112.384
9_2111_R3	3	10	-	-	-	-
9_2111_R3	3	5	-	-	-	-
9_2111_R3	3	1	-	-	-	-
9_2111_R3	19	10	6.443	16.598	2.303	79.517
9_2111_R3	19	5	5.009	18.726	3.609	69.078
9_2111_R3	19	1	3.573	21.083	2.254	55.516
9_2111_R3	35	10	3.494	18.887	1.655	58.435
9_2111_R3	35	5	2.734	20.157	1.769	79.807
9_2111_R3	35	1	1.499	22.005	0.915	75.281
10_2112_R1	3	10	-	-	-	-
10_2112_R1	3	5	-	-	-	-
10_2112_R1	3	1	-	-	-	-
10_2112_R1	19	10	7.796	14.642	2.705	42.804
10_2112_R1	19	5	6.4	15.934	2.723	52.472
10_2112_R1	19	1	4.355	19.087	2.30	65.143
10_2112_R1	35	10	3.977	20.418	1.245	38.625
10_2112_R1	35	5	2.732	21.298	1.042	47.057
10_2112_R1	35	1	1.91	24.394	0.779	50.317
10_2112_R2	3	10	-	-	-	-
10_2112_R2	3	5	-	-	-	-

Código	Temp (°C)	Fr (Hz)	Modulo (Gpa)	ϕ (°)	Carga (kN)	ϵ (μ s)
10_2112_R2	3	1	-	-	-	-
10_2112_R2	19	10	9.211	14.599	3.674	49.201
10_2112_R2	19	5	6.898	15.56	3.393	60.675
10_2112_R2	19	1	5.303	18.682	2.739	63.706
10_2112_R2	35	10	2.66	19.828	1.219	56.521
10_2112_R2	35	5	1.651	20.544	1.022	76.371
10_2112_R2	35	1	1.041	22.629	0.646	76.611
10_2112_R3	3	10	-	-	-	-
10_2112_R3	3	5	-	-	-	-
10_2112_R3	3	1	-	-	-	-
10_2112_R3	19	10	6.996	15.197	3.666	64.642
10_2112_R3	19	5	5.389	16.555	3.373	77.209
10_2112_R3	19	1	3.988	19.811	2.288	70.773
10_2112_R3	35	10	3.593	19.064	1.179	40.48
10_2112_R3	35	5	2.586	20.508	1.006	47.967
10_2112_R3	35	1	1.525	23.388	0.642	51.902
13_2211_R1	3	10	16.861	8.535	6.756	49.424
13_2211_R1	3	5	15.18	11.05	5.045	40.994
13_2211_R1	3	1	10.284	13.46	3.517	42.184
13_2211_R1	19	10	7.906	18.433	2.695	42.055
13_2211_R1	19	5	4.796	21.982	1.6	41.143
13_2211_R1	19	1	3.966	27.699	0.825	25.673
13_2211_R1	35	10	3.263	22.97	1.052	39.774
13_2211_R1	35	5	2.564	27.499	0.707	34.019
13_2211_R1	35	1	1.407	33.304	0.291	25.534
13_2211_R2	3	10	20.277	7.095	6.771	41.19
13_2211_R2	3	5	19.12	7.387	5.039	32.508
13_2211_R2	3	1	10.6	11.751	3.872	45.06
13_2211_R2	19	10	12.58	14.47	3.638	35.675
13_2211_R2	19	5	8.27	19.247	1.603	23.911
13_2211_R2	19	1	4.493	26.507	0.491	22.624
13_2211_R2	35	10	3.356	23.429	1.082	39.77
13_2211_R2	35	5	1.917	24.619	0.675	43.451
13_2211_R2	35	1	1.079	28.508	0.31	35.48
13_2211_R3	3	10	11.383	9.611	6.827	73.979
13_2211_R3	3	5	7.755	12.685	5.004	79.584
13_2211_R3	3	1	7.085	14.027	4.086	71.134
13_2211_R3	19	10	8.076	14.815	2.701	41.256
13_2211_R3	19	5	6.122	17.508	1.801	36.278
13_2211_R3	19	1	3.498	22.486	0.969	34.166

Código	Temp (°C)	Fr (Hz)	Modulo (Gpa)	φ (°)	Carga (kN)	ϵ (μ s)
13_2211_R3	35	10	7.511	22.16	1.113	18.284
13_2211_R3	35	5	3.58	20.89	1.151	39.666
13_2211_R3	35	1	2.454	22.663	1.228	61.703
14_2212_R1	3	10	10.458	4.086	6.676	78.743
14_2212_R1	3	5	8.131	7.56	5.032	76.339
14_2212_R1	3	1	6.066	13.613	3.407	69.285
14_2212_R1	19	10	5.412	17.836	3.129	71.312
14_2212_R1	19	5	4.482	19.995	2.259	62.171
14_2212_R1	19	1	2.952	27.812	0.958	40.053
14_2212_R1	35	10	3.108	24.909	0.877	34.81
14_2212_R1	35	5	1.865	25.593	0.644	42.614
14_2212_R1	35	1	1.136	30.524	0.307	33.359
14_2212_R2	3	10	14.625	6.877	6.667	56.23
14_2212_R2	3	5	10.198	10.132	5.049	61.067
14_2212_R2	3	1	7.321	14.298	6.676	78.743
14_2212_R2	19	10	7.667	62.352	3.178	51.128
14_2212_R2	19	5	4.477	19.235	2.005	55.243
14_2212_R2	19	1	3.738	24.374	0.948	31.286
14_2212_R2	35	10	5.693	30.248	0.915	19.817
14_2212_R2	35	5	2.428	29.867	0.568	28.88
14_2212_R2	35	1	1.406	35.612	0.306	26.867
14_2212_R3	3	10	11.183	12.541	6.448	71.12
14_2212_R3	3	5	7.888	11.182	5.028	78.628
14_2212_R3	3	1	6.57	14.69	3.419	64.188
14_2212_R3	19	10	6.114	16.585	2.859	57.67
14_2212_R3	19	5	5.483	17.703	2.049	46.083
14_2212_R3	19	1	3.935	67.38	0.19	30.176
14_2212_R3	35	10	3.69	23.336	0.905	30.243
14_2212_R3	35	5	2.848	24.829	0.729	31.588
14_2212_R3	35	1	1.395	26.131	0.302	26.735

MEZCLAS ABIERTAS – Contenido de asfalto: 5.5%

Código	Temp (°C)	Fr (Hz)	Modulo (Gpa)	ϕ (°)	Carga (kN)	ϵ (μ s)
19_3121_R1	3	10	10.587	4.465	5.031	58.613
19_3121_R1	3	5	7.57	11.363	3.955	64.447
19_3121_R1	3	1	5.265	14.856	2.938	68.832
19_3121_R1	19	10	4.006	16.381	2.591	79.77
19_3121_R1	19	5	3.467	20.627	2.088	74.263
19_3121_R1	19	1	2.179	23.162	1.565	88.551
19_3121_R1	35	10	1.684	21.944	0.998	73.078
19_3121_R1	35	5	1.403	25.425	0.666	58.575
19_3121_R1	35	1	0.683	30.69	0.347	62.627
19_3121_R2	3	10	8.787	10.055	5.716	80.242
19_3121_R2	3	5	7.858	12.119	4.41	69.216
19_3121_R2	3	1	5.174	15.359	2.941	70.111
19_3121_R2	19	10	4.773	18.109	2.67	69.008
19_3121_R2	19	5	4.176	20.027	2.072	61.205
19_3121_R2	19	1	2.86	23.669	1.539	66.379
19_3121_R2	35	10	2.211	23.791	1.053	58.763
19_3121_R2	35	5	1.495	27.075	0.691	57.067
19_3121_R2	35	1	0.707	33.083	0.35	61.008
19_3121_R3	3	10	10.152	9.129	6.138	74.572
19_3121_R3	3	5	6.878	12.753	-4.576	82.075
19_3121_R3	3	1	5.863	15.754	2.907	61.166
19_3121_R3	19	10	5.279	18.184	2.596	60.658
19_3121_R3	19	5	3.951	19.916	2.086	65.119
19_3121_R3	19	1	2.485	22.763	1.571	77.977
19_3121_R3	35	10	2.245	22.439	1.022	56.138
19_3121_R3	35	5	1.632	25.653	0.648	48.94
19_3121_R3	35	1	0.648	32.522	0.338	64.295
20_3122_R1	3	10	13.198	10.696	6.058	56.62
20_3122_R1	3	5	11.793	12.935	5.04	52.717
20_3122_R1	3	1	8.621	16.119	3.183	45.534
20_3122_R1	19	10	5.798	16.611	2.486	52.895
20_3122_R1	19	5	4.059	18.21	2.045	62.153
20_3122_R1	19	1	3.35	22.218	1.559	57.413
20_3122_R1	35	10	3.413	20.571	1.201	43.409
20_3122_R1	35	5	2.409	25.052	0.992	50.777
20_3122_R1	35	1	1.467	29.245	0.618	51.938
20_3122_R2	3	10	9.185	9.864	6.135	82.394
20_3122_R2	3	5	6.514	76.173	3.654	69.203

Código	Temp (°C)	Fr (Hz)	Modulo (Gpa)	ϕ (°)	Carga (kN)	ϵ (μ s)
20_3122_R2	3	1	4.204	72.885	2.314	67.885
20_3122_R2	19	10	5.881	18.38	2.615	54.842
20_3122_R2	19	5	3.772	19.528	2.103	68.759
20_3122_R2	19	1	2.401	23.571	1.585	81.412
20_3122_R2	35	10	1.899	22.399	1.205	78.289
20_3122_R2	35	5	1.305	23.375	0.99	93.593
20_3122_R2	35	1	0.692	26.73	0.496	88.465
20_3122_R3	3	10	7.74	9.122	4.539	72.335
20_3122_R3	3	5	7.79	11.453	3.204	50.742
20_3122_R3	3	1	5.358	14.932	2.086	48.037
20_3122_R3	19	10	3.307	16.323	2.647	98.715
20_3122_R3	19	5	2.331	18.272	0.981	51.899
20_3122_R3	19	1	1.214	21.558	0.552	56.141
20_3122_R3	35	10	2.11	22.829	1.206	70.493
20_3122_R3	35	5	1.559	23.516	0.986	78.003
20_3122_R3	35	1	0.94	25.772	0.493	64.71
23_3221_R1	3	10	12.276	13.096	4.617	46.388
23_3221_R1	3	5	8.827	13.589	3.898	54.464
23_3221_R1	3	1	5.682	16.855	3.378	73.337
23_3221_R1	19	10	4.509	22.411	2.196	60.064
23_3221_R1	19	5	3.835	24.066	2.004	64.456
23_3221_R1	19	1	2.227	26.33	1.757	97.34
23_3221_R1	35	10	1.861	27.113	0.769	50.97
23_3221_R1	35	5	0.991	26.283	0.606	75.473
23_3221_R1	35	1	0.493	29.12	0.334	83.541
23_3221_R2	3	10	13.485	9.408	4.602	42.093
23_3221_R2	3	5	7.353	12.602	3.9	65.423
23_3221_R2	3	1	6.978	15.655	3.526	62.325
23_3221_R2	19	10	5.881	22.634	2.21	46.367
23_3221_R2	19	5	4.543	23.21	2.226	60.428
23_3221_R2	19	1	2.407	27.866	1.754	89.877
23_3221_R2	35	10	1.713	29.589	0.766	55.18
23_3221_R2	35	5	1.496	37.603	0.591	48.738
23_3221_R2	35	1	0.457	31.184	0.331	89.498
23_3221_R3	3	10	10.075	9.583	4.638	56.777
23_3221_R3	3	5	8.952	11.95	3.875	53.392
23_3221_R3	3	1	5.878	15.941	3.544	74.358
23_3221_R3	19	10	4.964	23.636	2.17	53.924
23_3221_R3	19	5	4.092	23.899	2.231	67.257
23_3221_R3	19	1	2.472	26.948	1.755	87.556

Código	Temp (° C)	Fr (Hz)	Modulo (Gpa)	ϕ (°)	Carga (kN)	ϵ (μ s)
23_3221_R3	35	10	1.523	30.483	0.809	65.498
23_3221_R3	35	5	1.072	29.936	0.604	69.462
23_3221_R3	35	1	0.472	31.735	0.283	74.099
24_3222_R1	3	10	9.341	10.398	4.54	59.947
24_3222_R1	3	5	6.452	13.374	3.383	64.678
24_3222_R1	3	1	5.116	20.533	2.614	63.019
24_3222_R1	19	10	4.91	20.417	2.436	61.186
24_3222_R1	19	5	3.349	23.245	1.194	43.966
24_3222_R1	19	1	2.083	28.238	1.251	74.066
24_3222_R1	35	10	2.431	29.624	0.956	57.291
24_3222_R1	35	5	1.853	32.651	0.657	52.051
24_3222_R1	35	1	0.595	33.719	0.253	51.999
24_3222_R2	3	10	11.554	10.888	4.611	49.229
24_3222_R2	3	5	6.364	13.679	3.394	65.776
24_3222_R2	3	1	4.646	18.255	2.618	69.506
24_3222_R2	19	10	4.817	20.698	2.098	53.737
24_3222_R2	19	5	4.353	22.916	1.666	47.192
24_3222_R2	19	1	3.09	28.26	1.627	64.973
24_3222_R2	35	10	2.059	24.299	0.937	47.539
24_3222_R2	35	5	1.557	29.844	0.658	43.774
24_3222_R2	35	1	0.601	38.426	0.255	52.916
24_3222_R3	3	10	9.455	12.339	4.143	54.054
24_3222_R3	3	5	6.141	14.196	3.395	68.195
24_3222_R3	3	1	5.18	20.279	2.619	62.362
24_3222_R3	19	10	5.707	22.01	2.234	48.278
24_3222_R3	19	5	4.16	22.693	2.253	66.809
24_3222_R3	19	1	2.347	27.66	1.624	85.361
24_3222_R3	35	10	1.74	25.254	0.99	70.158
24_3222_R3	35	5	1.215	28.044	0.647	65.62
24_3222_R3	35	1	0.446	31.303	0.258	71.432

ANEXO D. CALCULO DE CURVAS MAESTRAS

MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE

Probeta 9_2111

Asfalto modificado (20/30)
Fuente (Rio Chicamocha)
Contenido de asfalto (5.0%)

temp. ref °C=		19	η ref	6.981E+08			Σ error^2 =	4.150E-04	coeficientes de la ecuación				
temp ° C	fr Hz	E* Mpa	η (cpoise)	log(tr)	Log E	E pred	Log Epred	error ^2	δ	α	β	γ	C
3	10								-7.796	11.4720	-0.9425	0.1210	0.5242
3	5												
3	1												
19	10	5.524	6.981E+08	-1	0.7423	5.389	0.732	1.159E-04					
19	5	4.341	6.981E+08	-0.6989	0.6376	4.478	0.651	1.823E-04					
19	1	2.896	6.981E+08	0	0.4619	2.878	0.459	7.911E-06					
35	10	3.765	5.09E+07	-0.4039	0.5759	3.724	0.571	2.41E-05					
35	5	3.015	5.09E+07	-0.1029	0.4793	3.075	0.488	7.22E-05					
35	1	1.963	5.09E+07	0.5960	0.2931	1.948	0.290	1.24E-05					

Probeta 10_2112

Asfalto modificado (20/30)

Fuente (Rio Negro)

Contenido de asfalto (5.0%)

temp ref °C=		19	η ref	6.981E+08			Σ error ² =	3.829E-03	coeficientes de la ecuación				
temp °C	fr Hz	E* Mpa	η cpoise	log(tr)	Log E	E pred	Log Epred	error ^2	δ	α	β	γ	C
3	10								-8.991	10.7606	-2.142	0.2683	1.3328
3	5												
3	1												
19	10	8.	6.981E+08	-1	0.9031	7.741	0.889	2.062E-04					
19	5	6.228	6.981E+08	-0.6989	0.7944	6.626	0.821	7.188E-04					
19	1	4.548	6.981E+08	0	0.6579	4.426	0.646	1.406E-04					
35	10	3.410	5.09E+07	0.5154	0.5328	3.156	0.499	1.136E-03					
35	5	2.323	5.09E+07	0.8164	0.3661	2.545	0.406	1.573E-03					
35	1	1.491	5.09E+07	1.5154	0.1737	1.467	0.166	5.50E-05					

Probeta 13_2211

Asfalto convencional (60/70)

Fuente (Rio Chicamocha)

Contenido de asfalto (5.0%)

temp ref °C=		19	η ref	1.556E+08			error^2 =	1.039E-02 <th colspan="5">coeficientes de la ecuación</th>	coeficientes de la ecuación				
tem °C	fra Hz	E* Mpa	η (cpoise)	log(tr)	Log E	E pred	Log Epred	error ^2	δ	α	β	γ	C
3	10	16.174	3.112E+09	-2.0120	1.2088	16.113	1.207	2.637E-06	-0.351	1.763	-0.110	0.953	0.778
3	5	14.018	3.112E+09	-1.7110	1.1467	14.100	1.149	6.397E-06					
3	1	9.323	3.112E+09	-1.0120	0.9696	9.196	0.964	3.565E-05					
19	10	9.521	1.556E+08	-1	0.9787	9.115	0.960	3.581E-04					
19	5	6.396	1.556E+08	-0.699	0.8059	7.190	0.857	2.585E-03					
19	1	3.986	1.556E+08	0	0.6005	3.795	0.579	4.523E-04					
35	10	4.710	1.04E+07	-0.0849	0.6730	4.118	0.615	3.401E-03					
35	5	2.687	1.04E+07	0.2162	0.4293	3.080	0.489	3.511E-03					
35	1	1.647	1.04E+07	0.9151	0.2167	1.622	0.210	4.258E-05					

Probeta 14_2212

Asfalto convencional (60/70)

Fuente (Rio Negro)

Contenido de asfalto (5.0%)

temp re°C=		19	η ref	1.556E+08			error^2 =	1.702E-02	coeficientes de la ecuación				
temp re°C=	fr Hz	E* Mpa	η (cpoise)	log(tr)	Log E	E pred	Log Epred	error ^2	δ	α	β	γ	C
3	10	12.089	3.112E+09	-1.994	1.0824	10.94	1.04	1.897E-03	-11.535	13.065	-2.466	0.389	0.764
3	5	8.739	3.112E+09	-1.693	0.9415	9.56	0.98	1.512E-03					
3	1	6.652	3.112E+09	-0.994	0.8230	6.58	0.82	2.536E-05					
19	10	6.398	1.556E+08	-1	0.8060	6.60	0.82	1.789E-04					
19	5	4.814	1.556E+08	-0.699	0.6825	5.45	0.74	2.909E-03					
19	1	3.542	1.556E+08	0	0.5492	3.22	0.51	1.704E-03					
35	10	4.164	1.04E+07	-0.101	0.6195	3.50	0.54	5.656E-03					
35	5	2.380	1.04E+07	0.200	0.3766	2.70	0.43	3.080E-03					
35	1	1.312	1.04E+07	0.899	0.1181	1.34	0.13	6.164E-05					

MEZCLAS ABIERTAS M1

Probeta 19_3121

Asfalto Modificado (20/30)

Fuente (Rio Chicamocha)

Contenido de asfalto (5.5%)

tem ref °C=		19	η ref	6.981E+08			error^2 =	4.111E-03	coeficientes de la ecuación				
tem°C=	fr Hz	E* Mpa	η (cpoise)	log(tr)	Log E	E pred	Log Epred	error ^2	δ	α	β	γ	C
3	10	9.842	1.209E+10	-2.2702	0.993	8.989	0.954	1.549E-03	-11.602	13.002	-2.450	0.391	1.026
3	5	7.435	1.209E+10	-1.9692	0.871	7.946	0.900	8.330E-04					
3	1	5.434	1.209E+10	-1.2702	0.735	5.636	0.751	2.52E-04					
19	10	4.686	6.981E+08	-1	0.671	4.816	0.683	1.4167E-04					
19	5	3.865	6.981E+08	-0.6989	0.587	3.969	0.599	1.334E-04					
19	1	2.508	6.981E+08	0	0.399	2.328	0.367	1.042E-03					
35	10	2.047	5.09E+07	0.1661	0.311	2.012	0.304	5.53E-05					
35	5	1.510	5.09E+07	0.4671	0.179	1.512	0.180	5.015E-07					
35	1	0.680	5.09E+07	1.1661	-0.168	0.696	-0.158	1.034E-04					

Probeta 20_3122

Asfalto Modificado (20/30)

Fuente (Rio Negro)

Contenido de asfalto (5.5%)

tem ref °C=		19	η_{re}	6.981E+08			error^2 =	8.644E-03	coeficientes de la ecuacion				
tem °C=	Fr Hz	E* Mpa	η (cpoise)	log(tr)	Log E	E pred	Log Epred	error ^2	δ	α	β	γ	C
3	10	10.041	1.209E+10	-2.196	1.0018	10.288	1.012	1.110E-04	-10.798	13.823	-1.44	0.149	0.965
3	5	8.698	1.209E+10	-1.895	0.9395	8.589	0.934	3.066E-05					
3	1	6.060	1.209E+10	-1.196	0.7825	5.524	0.742	1.623E-03					
19	10	4.995	6.981E+08	-1	0.6986	4.854	0.686	1.55E-04					
19	5	3.387	6.981E+08	-0.699	0.5299	3.959	0.598	4.5849E-03					
19	1	2.321	6.981E+08	0	0.3658	2.410	0.382	2.639E-04					
35	10	2.473	5.09E+07	0.098	0.3933	2.243	0.351	1.815E-03					
35	5	1.757	5.09E+07	0.399	0.2449	1.789	0.253	5.923E-05					
35	1	1.033	5.09E+07	1.098	0.0141	1.034	0.015	1.487E-07					

Probeta 23_3221

Asfalto Convencional (60/70)

Fuente (Rio Chicamocha)

Contenido de asfalto (5.5%)

temp ref °C=		19	η ref	1.556E+08			error^2 =	6.303E-03	coeficientes de la ecuacion				
temp °C	fr Hz	E* Mpa	η (cpoise)	log(tr)	Log E	E pred	Log Epred	error ^2	δ	α	β	γ	C
3	10	11.945	3.112E+09	-2.394	1.0772	10.628	1.026	2.576E-03	-11.580	13.028	-2.384	0.424	1.071
3	5	8.377	3.112E+09	-2.093	0.9231	9.358	0.971	2.312E-03					
3	1	6.179	3.112E+09	-1.394	0.7909	6.529	0.815	5.710E-04					
19	10	5.117	1.556E+08	-1.000	0.7091	5.087	0.706	6.748E-06					
19	5	4.156	1.556E+08	-0.699	0.6187	4.093	0.612	4.427E-05					
19	1	2.368	1.556E+08	0.000	0.3745	2.230	0.348	6.865E-04					
35	10	1.699	1.04E+07	0.260	0.2302	1.707	0.232	3.82E-06					
35	5	1.186	1.04E+07	0.561	0.0743	1.214	0.084	9.69E-05					
35	1	0.474	1.04E+07	1.260	-0.3242	0.476	-0.322	4.546E-06					

Probeta 24_3222

Asfalto Convencional (60/70)

Fuente (Rio Negro)

Contenido de asfalto (5.5%)

tem ref °C=		19	η ref	1.556E+08			error^2 =	1.710E-02	coeficientes de la ecuacion				
temp °C	fr Hz	E* Mpa	η (cpoise)	log(tr)	Log E	E pred	Log Epred	error ^2	δ	α	β	γ	C
3	10	10.116	3.112E+09	-2.155	1.0050	8.381	0.923	6.682E-03	-11.705	12.881	-2.681	0.572	0.888
3	5	6.319	3.112E+09	-1.854	0.8006	7.533	0.877	5.827E-03					
3	1	4.980	3.112E+09	-1.155	0.6973	5.436	0.735	1.442E-03					
19	10	5.144	1.556E+08	-1	0.7114	4.966	0.696	2.358E-04					
19	5	3.954	1.556E+08	-0.699	0.5971	4.073	0.610	1.642E-04					
19	1	2.506	1.556E+08	0	0.3991	2.237	0.350	2.438E-03					
35	10	2.076	1.04E+07	0.044	0.3174	2.138	0.330	1.575E-04					
35	5	1.541	1.04E+07	0.345	0.1880	1.525	0.183	2.218E-05					
35	1	0.547	1.04E+07	1.044	-0.2617	0.562	-0.250	1.313E-04					