

**PREDICCIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ DINÁMICO DE LA MEZCLA
ASFÁLTICA A PARTIR DE UNA PRUEBA CON CARGA MONOTÓNICA**

MARÍA CRISTINA RIVERO OLARTE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO - MECÁNICAS
MAESTRIA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2012**

**PREDICCIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ DINÁMICO DE LA MEZCLA
ASFÁLTICA A PARTIR DE UNA PRUEBA CON CARGA MONOTÓNICA**

MARÍA CRISTINA RIVERO OLARTE

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
MAGISTER EN INGENIERIA CIVIL**

Director

EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN

Doctor en Ingeniería Civil

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO - MECÁNICAS
MAESTRIA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012



*Al maestro interno por ser la
fuente de inspiración y fortaleza en
cada uno de mis días.*

*A mi familia por su apoyo y
compañía incondicional, por su amor y
paciencia.*

AGRADECIMIENTOS

Al Profesor Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, por su apoyo y profesionalismo con el cual contribuyo a la elaboración de este proyecto.

A Karina, Alejandra, Eduardo y Laura, por la compañía brindada durante esta etapa de mi vida y por hacer cada momento más agradable.

A los estudiantes de ingeniería civil que participaron contribuyendo a través de sus proyectos para la obtención de los datos de laboratorio.

A la Escuela de Ingeniería Civil por la oportunidad dada para desarrollar este proyecto de investigación y brindar las herramientas necesarias para continuar con mi crecimiento profesional.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
1.1 OBJETIVOS	20
1.1.1 General	20
1.1.2 Específicos	20
1.2 CONTENIDO DE LA TESIS	21
2. MARCO TEÓRICO	22
2.1 PARÁMETROS QUE AFECTAN LA RIGIDEZ DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	24
2.1.1 Composición de la mezcla asfáltica	25
2.1.2 La temperatura	29
2.1.3 La frecuencia de aplicación de la carga	30
2.2 MÉTODOS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE RIGIDEZ DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	31
2.2.1 Ensayo de compresión uniaxial	32
2.2.2 Ensayo de cizallamiento	35
2.2.3 Ensayo de Tracción indirecta	37
2.2.4 Ensayo de Flexión	39
2.3 METODOLOGÍAS DE PREDICCIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	42
2.3.1 Modelos empíricos	43
2.3.2 Modelos analíticos/ numéricos	50
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	67
3.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO	67
3.2 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS	68
3.2.1 Materiales empleados	69
3.3 CARACTERIZACIÓN VOLUMÉTRICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	72
3.4 METODOLOGÍA DEL ENSAYO BAJO CARGA DINÁMICA	72
3.4.1 Equipo Utilizado	72

3.4.2 Variables del ensayo	75
3.4.3 Interpretación de los datos	78
3.5 METODOLOGÍA DEL ENSAYO BAJO CARGA MONOTÓNICA (EQUIPO AUTOMATIZADO)	79
3.5.1 Equipo Utilizado	79
3.5.2 Variables del ensayo	80
3.5.3 Interpretación de los datos	80
3.6 METODOLOGÍA DEL ENSAYO BAJO CARGA MONOTÓNICA (EQUIPO DE OPERACIÓN MANUAL)	82
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	85
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	85
4.1.1 Caracterización Volumétrica De Las Mezclas Asfálticas	85
4.1.2 Caracterización De La Rigidez De Las Mezclas Asfálticas Aplicando Carga Dinámica	87
4.1.3 Rigidez De La Mezcla Asfáltica Aplicando Carga Monotónica (Equipo Automatizado)	89
4.1.4 Rigidez De La Mezcla Asfáltica Aplicando Carga Monotónica (Equipo De Operación Manual)	92
4.2 EVALUACIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS DE LA REGIÓN (SANTANDER)	95
4.2.1 Contenido De Asfalto	96
4.2.2 Tipo De Asfalto	99
4.2.3 Tipo De Mezcla	101
4.2.4 Fuente Del Agregado	104
4.3 EVALUACIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO	107
4.3.1 Relación Directa Entre Valores De Rigidez Dinámica Y Monotónica	109
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
BIBLIOGRAFÍA	129
ANEXOS	137

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Modelos para predecir el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica _____	42
Tabla 2. Parámetros estadísticos del modelo propuesto por Bari y Witczak 2006 _____	48
Tabla 3. Factores y niveles del diseño experimental _____	67
Tabla 4. Pruebas de laboratorio realizadas al asfalto modificado. _____	70
Tabla 5. Tipo de gradación _____	71
Tabla 6. Número de ciclos para la prueba _____	76
Tabla 7. Tiempo requerido para el acondicionamiento de la temperatura en las probetas _____	77
Tabla 8. Porcentaje de variación del valor de módulo monotónico _____	82
Tabla 9. Caracterización volumétrica de las mezclas asfálticas _____	86
Tabla 10. Aplicación de la carga monotónica a las diferentes velocidades de deformación constante _____	94
Tabla 11. Influencia del contenido de asfalto en la rigidez dinámica de la mezcla asfáltica _____	98
Tabla 12. Influencia del contenido de asfalto en la rigidez monotónica de la mezcla asfáltica _____	99
Tabla 13. Influencia del tipo de asfalto en la rigidez dinámica de la mezcla asfáltica _____	100
Tabla 14. Influencia del tipo de asfalto en la rigidez monotónica de la mezcla asfáltica _____	101
Tabla 15. Influencia del tipo de mezcla en la rigidez dinámica de la mezcla asfáltica _____	103
Tabla 16. Influencia del tipo de mezcla en la rigidez monotónica de la mezcla asfáltica _____	104

Tabla 17. Influencia de la fuente del agregado en la rigidez dinámica de la mezcla asfáltica _____	105
Tabla 18. Influencia de la fuente del agregado en la rigidez monotónica de la mezcla asfáltica _____	106
Tabla 19. Coeficientes del modelo lineal ajustado para predecir el módulo dinámico de la mezcla _____	116
Tabla 20. Clasificación del ajuste según parámetros estadísticos _____	118
Tabla 21. Parámetros estadísticos del ajuste lineal _____	118
Tabla 22. Coeficientes del modelo ajustado para predecir el módulo dinámico de la mezcla _____	121
Tabla 23. Parámetros estadísticos del ajuste _____	123

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Distribución de esfuerzos en la estructura del pavimento _____	22
Figura 2. Microestructura de la mezcla asfáltica _____	24
Figura 3. Comportamiento de la rigidez de la mezcla asfáltica para una temperatura fija en función del nivel de las solicitaciones de carga. _____	26
Figura 4. Influencia de la temperatura y tiempo de carga en la rigidez de la mezcla _____	30
Figura 5. Esfuerzo y deformación vs tiempo, para ensayo de compresión uniaxial con carga dinámica _____	33
Figura 6. Componente elástica y viscosa de la mezcla asfáltica _____	33
Figura 7. Esfuerzo y deformación vs tiempo para ensayo de corte con altura constante _____	36
Figura 8. Configuración de la prueba a tensión indirecta _____	37
Figura 9. Carga y deformación vs tiempo para ensayo de tensión indirecta con carga repetida _____	38
Figura 10. Esquemas de ensayos a flexión _____	39
Figura 11. Esquema del método de la inclusión elástica equivalente para calcular el tensor de concentración de la deformación, A_p^{dil} _____	54
Figura 12. Idealización del material compuesto de acuerdo al modelo autoconsistente generalizado (3 fases). _____	59
Figura 13. Idealización del material compuesto con n fases _____	61
Figura 14. Procesamiento de imágenes para obtener el modelo digital de la mezcla asfáltica _____	65
Figura 15. Nomenclatura de las probetas _____	68
Figura 16. Programación de la prueba a compresión con carga dinámica _____	73

Figura 17. Funciones sinusoidales de la curva de esfuerzo y deformación	78
Figura 18. Programación de la prueba a compresión con carga monotónica	79
Figura 19. Variación del módulo monotónico para diferentes repeticiones	81
Figura 20. Señales de Carga y Desplazamiento en el tiempo Probeta 2221_R2 a temperatura de 3°C y frecuencia 1 Hz, antes y después del ajuste de datos	88
Figura 21. Carga aplicada en función del desplazamiento bajo la aplicación de una carga monotónica a diferentes velocidades de deformación	89
Figura 22. Evolución del módulo monotónico según número de repeticiones (consecutivas) del ensayo	90
Figura 23. Gráfica de contorno y 3D, del módulo monotónico influenciado por la temperatura y la velocidad de deformación	91
Figura 24. Comportamiento del esfuerzo en función de la deformación bajo carga monotónica (equipo de operación manual)	92
Figura 25. Comportamiento de la rigidez monotónica (equipo de operación manual)	93
Figura 26. Comportamiento de la rigidez según el contenido de asfalto de la mezcla asfáltica	97
Figura 27. Comportamiento de la rigidez según el tipo de asfalto de la mezcla asfáltica	100
Figura 28. Comportamiento de la rigidez según el tipo de mezcla asfáltica	102
Figura 29. Curva maestra para diferentes porcentajes de vacíos de la mezcla.	103
Figura 30. Comportamiento de la rigidez según la fuente del agregado mineral	105
Figura 31. Nomograma de Van Der Poel	108
Figura 32. Tendencia de los datos de la probeta 4_1122_R1 y 16_2222_R3	109
Figura 33. Relación entre la rigidez monotónica y dinámica según temperatura y frecuencia de carga del ensayo	110
Figura 34. Regresión de los mejores subconjuntos	113
Figura 35. Índices de sensibilidad a la temperatura y velocidad de deformación	114
Figura 36. Relación entre la rigidez dinámica obtenida en el laboratorio y el módulo a partir de la correlación propuesta	117

Figura 37. Módulo monotónico en función de la temperatura y la velocidad de deformación _____	119
Figura 38. Comportamiento de la rigidez de la mezcla asfáltica dependiendo de la velocidad de deformación. Probeta 3_1121_R3 _____	121
Figura 39. Comparación del módulo dinámico medido en el laboratorio contra el módulo de rigidez correlacionado a través del modelo. Probeta 3_1121_R3 ____	122
Figura 40. Relación entre el módulo de rigidez dinámico ajustado y la rigidez determinada en el laboratorio _____	122

LISTA DE FOTOS

	pág.
Foto 1. Ahuellamiento y agrietamientos del pavimento de concreto asfáltico.....	28
Foto 2. Compactación de las probetas de asfalto, INVIAS 747-07	69
Foto 3. Mezcla asfáltica, izquierda: granulometría discontinúa (M1), derecha: granulometría continúa (MDC-2).....	71
Foto 4. Montaje de la probeta para la prueba de compresión uniaxial con carga dinámica	73
Foto 5. Equipo utilizado para el acondicionamiento de la temperatura.....	76
Foto 6. Acondicionamiento de la temperatura para el ensayo bajo carga monotónica (equipo manual)	83
Foto 7. Ensayo bajo carga monotónica (equipo de operación manual)	84

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO 1. FACTORES DE DISEÑO UTILIZADOS PARA REALIZAR LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS _____	137
ANEXO 2. DATOS DE MÓDULO DINÁMICO Y MONOTÓNICO _____	139

TITULO: Predicción del módulo de rigidez dinámico de la mezcla asfáltica a partir de una prueba con carga monotónica.*

AUTOR: María Cristina Rivero Olarte **

PALABRAS CLAVES: rigidez, módulo dinámico, carga monotónica, mezcla asfáltica.

RESUMEN: La rigidez de la mezcla asfáltica es uno de los parámetros de entrada principales de las nuevas metodologías de diseño, desarrolladas para pavimentos flexibles y rehabilitaciones. Por lo anterior, es importante caracterizar la rigidez de la mezcla bituminosa a través de ensayos dinámicos que permiten evaluar su comportamiento de forma más acertada. En Colombia, sin embargo, el alto costo de las pruebas y la carencia de equipos dinámicos, dificulta esta caracterización. Se desarrolló el estudio que pretende determinar una relación para predecir el módulo dinámico de rigidez a través de un ensayo aplicando cargas monotónicas. La investigación consistió en someter 24 mezclas a una carga dinámica de compresión axial utilizando el marco de carga de la MTS variando la frecuencia de aplicación de la carga entre 1, 5, y 10 Hz y la temperatura entre 7, 19 y 35°C, determinando el módulo de rigidez dinámico de la mezcla. Posteriormente los especímenes se sometieron a una carga de compresión simple utilizando nuevamente el marco de carga del equipo MTS, aplicando velocidades de deformación de 1, 7 y 15 mm/min a temperaturas de 7, 19 y 35°C, se determinó el módulo de rigidez bajo carga monotónica.

Se relaciona el módulo de rigidez dinámico de la mezcla asfáltica en función del valor de rigidez obtenido bajo carga monotónica, la temperatura, la velocidad de deformación y la porosidad de la mezcla. La importancia de esta relación es contar con una herramienta que permite controlar en las etapas de diseño y construcción la rigidez de la mezcla a través de una prueba de laboratorio con carga monotónica que tiene ciertas ventajas como son: un procedimiento fácil, tiempos cortos de prueba, disponibilidad del equipo y bajo costo del ensayo.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Eduardo Alberto Castañeda Pinzón.

TITLE: Prediction module dynamic stiffness of asphalt mixture through a test using monotonic loads.*

AUTOR: María Cristina Rivero Olarte **

KEYWORDS: stiffness, dynamic modulus, monotonic loading, asphalt.

ABSTRACT: The stiffness of the asphalt mix is one of the main input parameters of the new design methodologies developed for flexible pavements and rehabilitation. Therefore, it is important to characterize the stiffness of the asphalt mix through dynamic test to assess their behavior more accurate. In Colombia, however, the high cost of testing and lack of dynamic teams, makes this characterization. We developed the initial phase of the study aims to determine a relationship to predict the dynamic modulus of rigidity by applying a monotonic test. The research consisted in subjecting 24 mixtures at a dynamic loading of axial compression using the loading frame of the MTS varying the frequency of load application between 1, 5, and 10 Hz and the temperature between 7, 19 and 35 ° C, determining the dynamic stiffness modulus of the blend. Subsequently, the specimens were subjected to a compressive load simply using again under equipment load MTS, applying shear rates of 1, 7 and 15 mm / min at temperatures of 7, 19 and 35 ° C, was determined modulus under monotonic loading.

Relates the dynamic modulus of the asphalt mix depending on the stiffness value obtained under monotonic loading, temperature, strain rate and porosity of the mixture. The importance of this relationship is to have a tool to control in the design and construction stages of the stiffness of the mixture through a laboratory test with monotonic loading has certain advantages such as: an easy, short test times, availability of equipment and low cost of the trial.

* Work of degree.

** Faculty of Physical Mechanical. School of Civil Engineering. Director Eduardo Alberto Castañeda Pinzón.

INTRODUCCIÓN

La adecuada evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales usados en la construcción es una de las principales etapas para predecir su comportamiento. En la ingeniería es frecuente utilizar materiales compuestos, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas, las cuales son función de las propiedades de las fases que lo constituyen. Dentro de las propiedades de mayor interés en la ingeniería se encuentra la rigidez, la cual caracteriza la deformación de los materiales cuando son sometidos a cargas. En la evaluación de estructuras de pavimento, es importante conocer la variación de la rigidez de las mezclas asfálticas (constituidas por bitumen, partículas de agregado pétreo y aire), debido a su influencia en la forma como se distribuyen los esfuerzos en las capas inferiores del pavimento.

En la caracterización del módulo de rigidez de la mezcla asfáltica se han planteado diferentes ensayos que buscan definir el comportamiento del material bajo esfuerzos dinámicos. En estos ensayos se simulan las cargas que se producen sobre un pavimento con el paso del tránsito. Algunos de estos ensayos son: el módulo resiliente, el módulo complejo y el módulo dinámico, los cuales se llevan a cabo, variando los factores externos como la temperatura y el tiempo en el que son aplicadas las cargas. En este aspecto el desarrollo de tecnología ha tenido grandes avances a nivel mundial, sin embargo, en Colombia las limitaciones económicas, han sido un obstáculo para evaluar la resistencia de las mezclas asfálticas a través de ensayos dinámicos.

En el corto y mediano plazo es poco probable suplir el déficit de equipos especializados en este tipo de pruebas y es clara la necesidad de encontrar metodologías alternas, que permitan predecir el comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas a través de ensayos fundamentales efectuados con los equipos de laboratorio existentes en el país.

El desarrollo de una relación que permita predecir el módulo dinámico de rigidez utilizando parámetros que se determinan a través de un ensayo con aplicación de cargas monotónicas, permitiría a las empresas constructoras de pavimentos flexibles, disponer de una prueba de laboratorio caracterizada por: un procedimiento fácil de implementar, tiempos cortos de prueba y ensayo que se puede realizar con equipos disponibles en la mayoría de los laboratorios. Esta relación es una herramienta que permite tener un mayor conocimiento sobre la rigidez de la mezcla asfáltica en las etapas de diseño y construcción para obtener estructuras que presenten un mejor desempeño frente a daños de fatiga y deformaciones.

La relación de predicción permitiría conocer un rango del espectro de rigidez que pueda presentar la mezcla asfáltica en diversas condiciones de temperatura y tiempos de carga.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 General

El proyecto pretende formular un modelo para predecir el módulo de rigidez dinámico de las mezclas asfálticas a partir de una prueba con carga monotónica.

1.1.2 Específicos

Se han planteado así mismo, una serie de objetivos específicos, que se detallan a continuación:

- Relacionar los valores de los módulos de rigidez de las mezclas asfálticas obtenidos a través de la prueba con carga monotónica con los obtenidos a partir de la prueba de compresión dinámica.
- Determinar la sensibilidad, a la temperatura y a la velocidad de aplicación de las cargas, de las mezclas asfálticas sometidas a cargas monotónicas (compresión axial).
- Determinar la sensibilidad, a la temperatura y a la velocidad de aplicación de las cargas, de mezclas asfálticas sometidas a cargas dinámicas (compresión dinámica).

1.2 CONTENIDO DE LA TESIS

El documento está compuesto por 5 capítulos, los cuales se describen brevemente a continuación:

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

Capítulo 2. Marco Teórico: se expone el desarrollo de las metodologías utilizadas para la caracterización en laboratorio de la rigidez de las mezclas asfálticas y los principales modelos desarrollados para predecir valores de rigidez a partir de las propiedades de los materiales que constituyen la mezcla.

Capítulo 3. Programa Experimental: En este capítulo se consolida el trabajo de laboratorio desarrollado durante la investigación. En la primera parte se realiza una descripción de los materiales utilizados para la fabricación de los especímenes asfálticos, posteriormente se complementa con la caracterización de la mezcla y por último se presentan las metodologías de ensayo para encontrar el módulo de rigidez bajo carga monotónica y cíclica.

Capítulo 4. Resultados y Análisis: se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas y el modelo determinado para predecir el módulo de rigidez en las mezclas asfálticas.

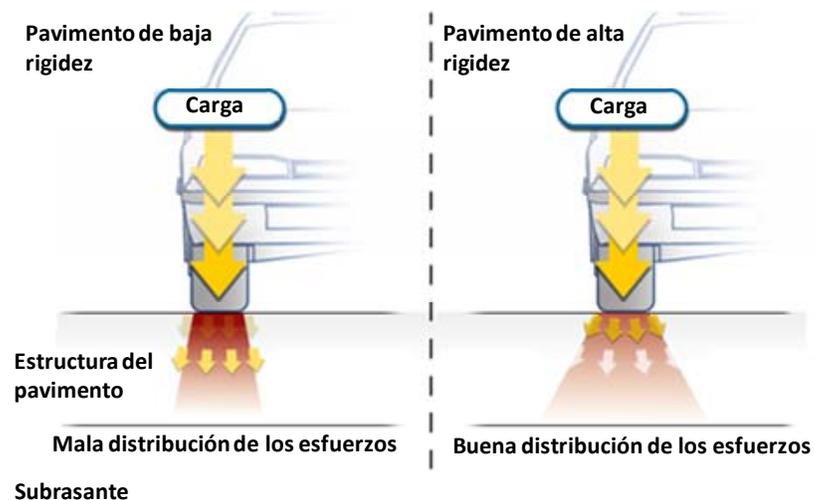
Capítulo 5. Conclusiones y Observaciones.

Bibliografía.

2. MARCO TEÓRICO

La mezcla asfáltica hace parte de la estructura del pavimento flexible, se utiliza como capa para el rodamiento de los vehículos y su función principal es distribuir los esfuerzos causados por el tránsito a las capas inferiores (ver Figura 1), además de proporcionar una protección frente a los agentes externos como el agua. Varios factores afectan la capacidad mecánica de la mezcla bituminosa, para cumplir con los requisitos estructurales de la capa asfáltica, hay que determinar y conocer la influencia que tienen sobre el desempeño de la mezcla, aspectos relacionados con los materiales usados, los métodos constructivos, los niveles de carga y las condiciones climáticas que debe soportar.

Figura 1. Distribución de esfuerzos en la estructura del pavimento



Fuente: (file:///D:/Disco%20E/Carpeta2/ARTICULOS1/2009/graficas%20cheveres.htm)

El desempeño de la mezcla puede ser evaluado a través de la rigidez, parámetro fundamental que proporciona información sobre las propiedades mecánicas del material, y se define como la relación entre un esfuerzo aplicado y la deformación ocasionada por este. Para las mezclas asfálticas, es conocido que la rigidez varía de acuerdo con la temperatura y a la frecuencia a la que son aplicadas las cargas debido al comportamiento visco-elástico proporcionado por el ligante asfáltico (CLYNE *et al*, 2003).

La rigidez de la mezcla asfáltica es un parámetro clave en el diseño y evaluación de los pavimentos, y es utilizado para correlacionar el funcionamiento de la mezcla y determinar la resistencia frente a daños que generan ahuellamientos, agrietamientos por fatiga y térmicos (EPPS *et al*; 2000).

El módulo de rigidez de la mezcla asfáltica puede ser determinado mediante pruebas realizadas en el laboratorio, que permiten simular el estado de tensiones que soportan los materiales en campo debido a las condiciones de carga y temperatura. Además de determinar la rigidez de la mezcla de forma directa en laboratorio, se han desarrollado modelos que permiten predecir el valor del módulo de rigidez en función de otros parámetros de la mezcla, sin embargo estos modelos tienen limitaciones al ser funcionales bajo las premisas en las cuales fueron desarrollados.

Aunque se ha logrado grandes progresos en la comprensión del comportamiento de los materiales bituminosos, es complicado llegar a caracterizar a fondo el desempeño de las mezclas asfálticas, considerando la heterogeneidad de los materiales que conforman la mezcla y la variabilidad de las condiciones de carga y del clima en las diferentes zonas donde se construyen pavimentos flexibles.

2.1 PARÁMETROS QUE AFECTAN LA RIGIDEZ DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

En la mezcla asfáltica se identifican tres fases diferentes. La primera es una matriz de asfalto cuya función es ligar las partículas de agregado pétreo, la segunda corresponde al agregado, el cual proporciona a la mezcla mayor resistencia y rigidez, por último los espacios vacíos ocupados por aire. La influencia de las relaciones volumétricas y gravimétricas de la mezcla asfáltica cumple un papel fundamental en el comportamiento del material (GARNICA *et al*; 2005).

Figura 2. Microestructura de la mezcla asfáltica

Fuente: Autor .

El desempeño de la mezcla asfáltica está íntimamente ligado a diversos factores como son: las características de cada uno de los componentes, la temperatura de servicio (clima), el nivel de esfuerzo aplicado y de la velocidad de las cargas (tránsito), por ello, se llevan a cabo investigaciones para determinar el comportamiento mecánico de las mezclas elaboradas con materiales de las zonas y bajo las condiciones de carga y ambientales propias de las regiones, todo esto con el fin de determinar de manera más precisa el desempeño que puedan presentar bajo condiciones particulares. Por lo anterior se efectúan ajuste a modelos de rigidez existentes (ELIZONDO; ULLOA YBADILLA; 2008) o amplían las bases de datos (WITCZAK y BARI; 2004), (FLINTSC *et al*; 2007) para tener mayor

conocimiento sobre el comportamiento de los concretos asfálticos. A continuación se describe la influencia en la rigidez de la mezcla asfáltica de los parámetros mencionados anteriormente.

2.1.1 Composición de la mezcla asfáltica

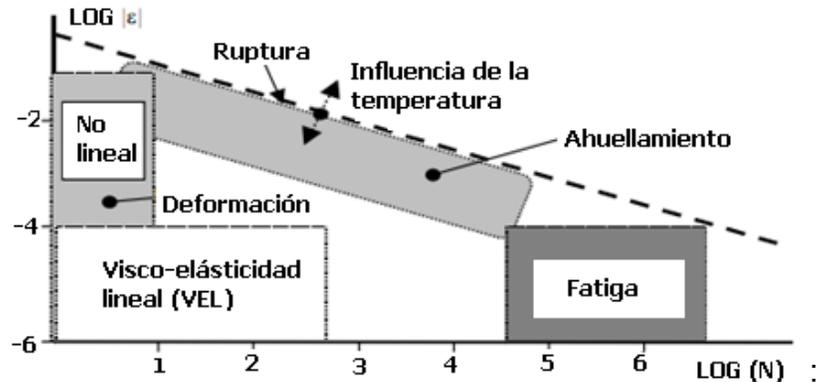
El comportamiento de la mezcla asfáltica depende de las propiedades de los componentes individuales y de la interacción que existe entre ellos. La mezcla está compuesta por asfalto el cual representa aproximadamente el 10% del volumen de la mezcla, los agregados el 85% y los vacíos con aire del orden del 5%. Los anteriores elementos deben ser mezclados, de tal forma que proporcionen una mezcla con ciertos requerimientos como lo son: rigidez, resistencia a la deformación, resistencia a la fatiga, no presentar susceptibilidad térmica, resistente a bajas temperaturas, poca susceptibilidad a la humedad, ser permeables, económicamente viables, amigables con el medio ambiente, y trabajabilidad de la mezcla entre otras (DAS; 2004).

- **El ligante asfáltico**

Uno de los materiales que mayor influencia tiene sobre la rigidez de la mezcla es el asfalto, debido a la naturaleza visco-elástica, el bitumen presenta comportamientos de un fluido viscoso (la deformación debida a la carga no es recuperable) y de un sólido elástico (la deformación debida a la carga es recuperable), este comportamiento es función de la combinación de temperatura y tiempo de carga a la cual es sometido el material (ALSHAMSI; 2006). Debido a lo anterior la mezcla exhibe diferentes comportamientos, en la Figura 3, se presenta

un esquema en el cual se definen cuatro zonas de comportamiento para las mezclas asfálticas (OLARD; 2003):

Figura 3. Comportamiento de la rigidez de la mezcla asfáltica para una temperatura fija en función del nivel de las solicitaciones de carga.



Fuente: (OLARD; 2003)

- Cuando las cargas producen elevadas deformaciones en el material, su comportamiento es catalogado 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 (VEL).
- 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.
- El ahuellamiento se presenta por la acumulación de deformación (permanente) y es un fenómeno irreversible.

Las características de la mezcla asfáltica son consecuencia del tipo de asfalto usado, de la cantidad de ligante, de la adhesión que exista entre el asfalto y el

agregado, además del cubrimiento proporcionado por el asfalto a cada una de las partículas.

En cuanto al tipo de asfalto empleado, mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos más rígidos puede ser resistentes al ahuellamiento pero susceptibles a fallar por fatiga, por el contrario mezclas con asfaltos de baja rigidez pueden tener un buen comportamiento a la fatiga pero ser vulnerables a temperaturas altas provocando daños por deformaciones permanentes en la mezcla bituminosa. Con el propósito de mejorar las características mecánicas del ligante asfáltico se utilizan diversos modificadores entre los cuales se encuentran polímeros (SBS, SBR, EVA), gilsonita, asfaltita, caucho, entre otros. Asfalto modificado con gilsonita proporciona una menor susceptibilidad a la temperatura y debido a la baja viscosidad a altas temperaturas mejora la trabajabilidad del material (BOUDIN; 2002). En Bogotá D.C. (Colombia), asfaltos modificados con polímeros han sido utilizados para producir asfaltos de alto módulo con el fin de proporcionar soluciones a problemas de ahuellamiento presentados en estaciones del sistema de transporte masivo (CASTRO y CAICEDO; 2001) teniendo como resultado mezclas más resistentes a las deformaciones plásticas.

Al igual que la rigidez del asfalto, el contenido de asfalto es un parámetro influyente en el desempeño de la mezcla asfáltica para soportar diferentes solicitaciones. Estudios demuestran que a mayores contenidos de asfalto, hasta cierto límite óptimo, la mezcla asfáltica no presenta mayores daños por deformación, superado el contenido de asfalto óptimo, la mezcla se vuelve susceptible a sufrir deformaciones originando ahuellamientos (ROBBINS; 2009). Mezclas con altos contenidos de ligante asfáltico y porcentajes de vacíos alrededor de 3% resultan ser vulnerables a sufrir daños por deformaciones de corte (GARBA; 2002).

Foto 1. Ahuellamiento y agrietamientos del pavimento de concreto asfáltico



Fuente:<http://www.asfaltogravayterracerias.com.mx/Servicios/Pavimentos/Fallas/talbid/110/Default.aspx>

Además, el desempeño de la mezcla se ve afectado por los procesos de mezclado y compactación, se presenta el fenómeno de envejecimiento debido a la evaporación de los componentes livianos del asfalto, además, del envejecimiento que se presenta a largo plazo debido a la reacción entre el oxígeno y la película delgada de ligante que recubre el agregado, modificando las propiedades del asfalto y produciendo un endurecimiento del material bituminoso.

Los requerimientos de diseño de la mezcla definirán la cantidad y tipo de asfalto a utilizar y dependerá de las condiciones ambientales de la zona del proyecto, de la magnitud del tránsito, además de factores económicos o la facilidad de obtención de la materia prima.

- **El agregado pétreo**

Los agregados representan aproximadamente el 95% del peso total de la mezcla asfáltica y desempeñan un papel fundamental ya que proveen una estructura para

resistir las aplicaciones de carga producidas por el tránsito. Seleccionar agregados con apropiadas características físicas y químicas es de vital importancia para el buen desempeño de la capa asfáltica. Algunas de las propiedades físicas del agregado que tienen influencia en la rigidez de la mezcla son: la textura, forma, tamaño y granulometría, los agregados deben proporcionar un esqueleto de soporte que permita la fricción entre sus partículas para originar una trabazón que proporcione estabilidad y rigidez a la mezcla (DELGADO; 2006).

Algunos aspectos sobre el comportamiento de la mezcla debido a la influencia del agregado son determinados en (MCGAHAN; 2005), quien concluye que un aumento en el porcentaje de partículas planas originó un aumento en la resistencia a la deformación permanente en la dirección vertical. Esto es atribuido al hecho de que las partículas alargadas tienden a orientarse de tal manera, que el eje mayor de las partículas está inclinado hacia el plano horizontal. Por lo tanto, más contactos se desarrollan en la dirección vertical. Aunque, informa que una desventaja de utilizar partículas planas y alargadas son la rotura de las partículas y los planos de debilidad en la dirección horizontal.

Además, de la interacción física existente entre agregados, es ideal contar con un agregado que ofrezca una buena adhesión con el asfalto por lo cual se debe tener en cuenta la composición química y mineral de la roca de la cual se extrae el material granular.

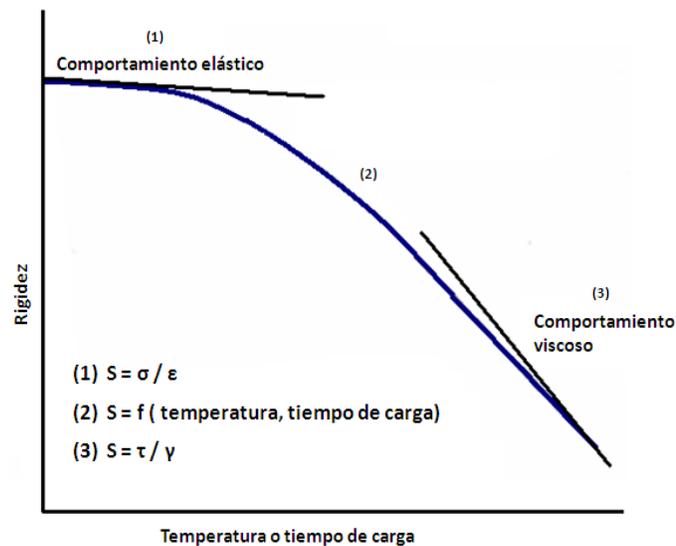
2.1.2 La temperatura

La rigidez de la mezcla asfáltica varía de acuerdo con la temperatura a la cual es expuesta. Este comportamiento es debido a la sensibilidad del ligante asfáltico a

la temperatura, produciendo disminución del modulo de rigidez a temperaturas altas y un incremento a temperaturas bajas, ver Figura 4.

La temperatura de servicio de un pavimento es un factor de gran influencia en el desempeño de la mezcla asfáltica, y se debe considerar para formular materiales con capacidad de resistir los gradientes térmicos que se presentan diariamente por los cambios de temperatura.

Figura 4. Influencia de la temperatura y tiempo de carga en la rigidez de la mezcla



Fuente: (ALSHAMSI; 2006)

2.1.3 La frecuencia de aplicación de la carga

La frecuencia o duración de aplicación de la carga sobre la capa de pavimento determina la magnitud del modulo de rigidez. Aplicar cargas con una frecuencia baja somete el material a tiempos mayores de aplicación de carga, produciendo mayores deformaciones en la mezcla y por lo tanto la reducción de la rigidez del

material asfáltico, por el contrario, someter la estructura de pavimento al paso de cargas a elevadas velocidades (tiempo de carga menores) generan módulos de rigidez de mayor magnitud, ver Figura 4.

2.2 MÉTODOS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE RIGIDEZ DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Las pruebas de laboratorio tienen como objetivo reproducir los niveles de esfuerzo y deformación a los cuales se ve sometida la estructura de la mezcla asfáltica producto de las sollicitaciones del tránsito y de las condiciones climáticas. A partir de los resultados de las pruebas de laboratorio se puede determinar con mayor precisión el comportamiento de la mezcla asfáltica y su desempeño frente a sollicitaciones que sean de interés del diseñador o investigador.

Varios procedimientos de pruebas se han propuesto para conocer la rigidez de las mezclas asfálticas (KING; 2004), (MOMEN; 2004), (PELLINEN and XIAO; 2006), (ADAMS, ZEGHAL and MOHAMED; 2006) los cuales utilizan tipos de probetas diferentes, varían en la forma de aplicación de carga pero todos tienen como finalidad común determinar la relación que existe entre un esfuerzo aplicado y la deformación que se presenta. A continuación se definen algunas de las pruebas de laboratorio que han sido empleadas sobre la mezcla asfáltica para determinar su rigidez.

2.2.1 Ensayo de compresión uniaxial

En un material como el concreto asfáltico se plantea determinar su rigidez sometiendo un espécimen a un pulso de carga bajo la suposición de que la relación esfuerzo/deformación es independiente del esfuerzo aplicado (rango viscoelástico lineal), ver Figura 5.

Partiendo de lo anterior se define un número complejo denominado módulo complejo, el cual define la rigidez de un material viscoelástico como la combinación entre una componente elástica y una componente viscosa, y se expresa de la siguiente manera:

$$E^* = E' + i E''$$

Donde:

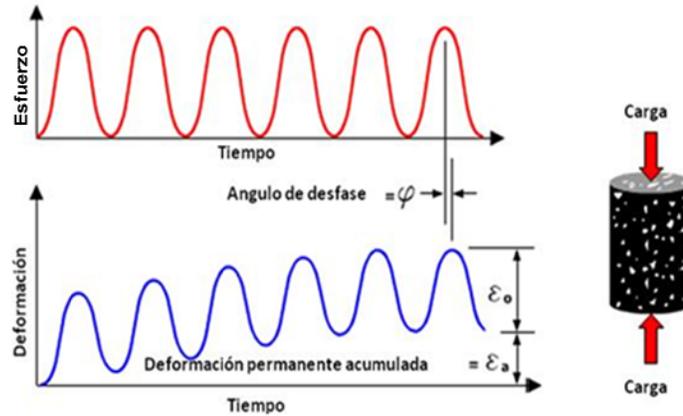
E^* = Módulo complejo

La componente elástica es = $E' = |E^*| \cos \varphi$

La componente viscosa es = $E'' = |E^*| \sen \varphi$

i = Número imaginario

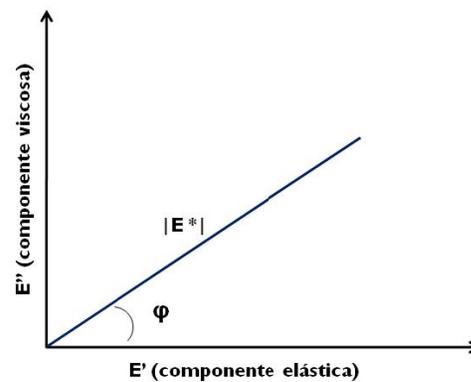
Figura 5. Esfuerzo y deformación vs tiempo, para ensayo de compresión uniaxial con carga dinámica



Fuente: Autor

La componente elástica y viscosa del módulo complejo están en función de lo que se denomina módulo dinámico $|E^*|$ y el ángulo de desfase φ . Los anteriores conceptos pueden esquematizarse como se observa en la Figura 6:

Figura 6. Componente elástica y viscosa de la mezcla asfáltica



Fuente: Autor

Entonces, el módulo dinámico se define como la magnitud del módulo complejo:

$$|E^*| = \sqrt{E'^2 + i E''^2}$$

Y el ángulo de desfase como:

$$\varphi = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{E''}{E'}\right)$$

El módulo dinámico y el ángulo de desfase es determinado en laboratorio a través de la aplicación de una carga sinusoidal en una probeta de concreto asfáltico, en la cual se registra la deformación que sufre el espécimen debido a la aplicación del esfuerzo. El módulo dinámico es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación:

$$|E^*| = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

En donde:

σ = Amplitud del esfuerzo

ε = Amplitud de la deformación

A su vez, el esfuerzo y la deformación se definen por:

$$\sigma = \frac{P}{A} \qquad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

En donde:

P = Carga

A = Área de la sección transversal de la probeta

ΔL = Cambio en el desplazamiento

L = Longitud en la cual se mide el cambio de desplazamiento

φ = ángulo de desfase – se define como el retraso que existe entre la señal de carga y deformación. Para un material completamente elástico, el valor del ángulo de desfase es $\varphi=0$; Para un material completamente viscoso es $\varphi=90$. El desfase se puede calcular como:

$$\varphi = 360^\circ f \Delta t$$

En donde

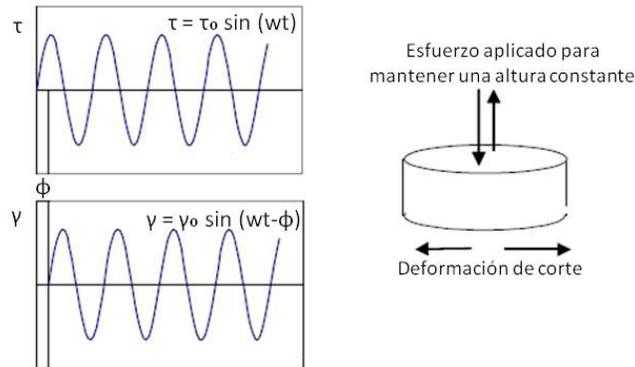
f = Frecuencia de aplicación de la carga (Hz)

Δt = Intervalo de tiempo entre el ciclo de esfuerzo y la deformación (s)

2.2.2 Ensayo de cizallamiento

El espécimen se coloca entre dos placas de aluminio y se aplica una deformación de corte horizontal de forma sinusoidal a una frecuencia dada. Al mismo tiempo, la altura de la muestra se mantiene constante mediante la compresión o tracción axial de la muestra controlada por los LVDT's verticales colocados a los lados de la muestra, ver Figura 7. La probeta tiene un diámetro de 150 mm, y una altura 50 mm

Figura 7. Esfuerzo y deformación vs tiempo para ensayo de corte con altura constante



Fuente: (PELLINEN and XIAO; 2006)

Los parámetros obtenidos de la prueba son el módulo de cizalla G^* y el ángulo de fase δ .

$$|G^*| = \frac{\tau_o}{\gamma_o}$$

donde:

G^* = Módulo de corte

τ_o = Amplitud del esfuerzo

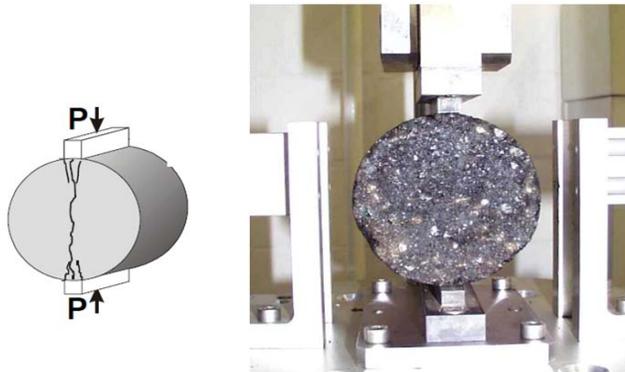
γ_o = Amplitud de la deformación

Con base en estos resultados, se puede determinar la componente elástica y viscosa a través del módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') análogos según lo discutido para el módulo dinámico.

2.2.3 Ensayo de Tracción indirecta

El ensayo de tensión indirecta sobre mezclas asfálticas se lleva a cabo aplicando una carga verticalmente en un plano diametral sobre un espécimen cilíndrico de concreto asfáltico, como se muestra en la Figura 8.

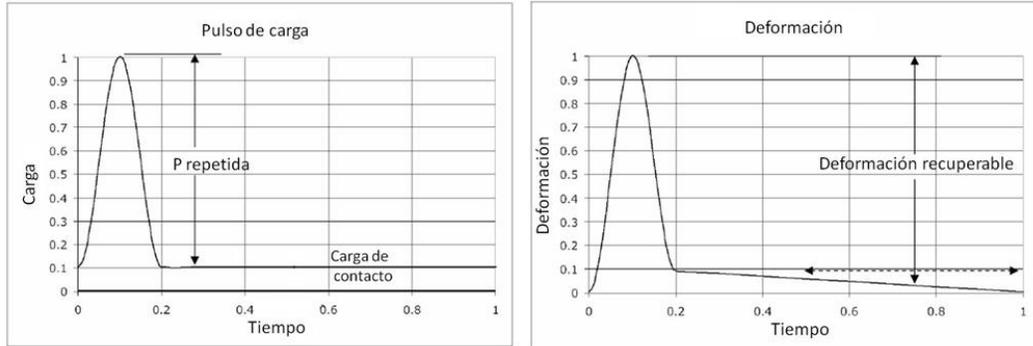
Figura 8. Configuración de la prueba a tensión indirecta



Fuente: (POULIKAKOS, *et al*; 2006)

A partir de la configuración de aplicación de cargas mediante tracción indirecta se determina el módulo resiliente de la mezcla asfáltica aplicando una carga repetida conforma de onda sobre la probeta, dependiendo de la frecuencia de la carga y la temperatura del ensayo, la probeta se somete de 50 a 200 aplicaciones de carga.

Figura 9. Carga y deformación vs tiempo para ensayo de tensión indirecta con carga repetida



Fuente:(INTERLAKEN TECHNOLOGY CORPORATION)

Cuando la deformación resiliente (recuperable) llegue a ser estable se registran las lecturas de deformación horizontal y vertical de las últimas aplicaciones de carga. Los valores obtenidos a través del ensayo de tracción indirecta pueden ser usados en el análisis visco elástico lineal para evaluar el desempeño de la mezcla frente a daños debido a fisuras producidas por fatiga y cambios térmicos.

$$M_R = \frac{P}{t \delta_{xx}} (a + b\mu) \quad \delta_{xx} = \left(\frac{2(1 + 3\mu)}{d(a + b\mu)\pi} \right)$$

En donde:

M_R = Módulo resiliente

P = Carga aplicada

t = Espesor de la probeta

δ_{xx} = Deformación horizontal

a, b = Constantes que dependen de la longitud en la cual se miden las deformaciones

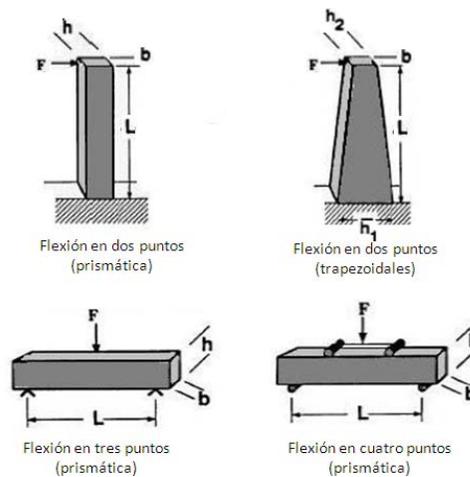
μ = Relación de Poisson

d = Diámetro de la probeta

2.2.4 Ensayo de Flexión

Para determinar el módulo de rigidez se han desarrollado diferentes formas de someter una probeta de concreto asfáltico a flexión y determinar la deformación producida por la aplicación de una carga dinámica. En la Figura 10, se muestran los esquemas propuestos para desarrollar la prueba.

Figura 10. Esquemas de ensayos a flexión



Fuente: (DI BENEDETTO, *et al*; 2001)

- Flexión en dos puntos, para este ensayo la muestra se monta verticalmente y se fija en su base inferior. En la parte superior de la probeta se aplica un desplazamiento sinusoidal de amplitud constante y se registra la carga requerida para producir dicho desplazamiento. El ensayo finaliza cuando la carga llega al 50% del valor inicialmente aplicado. Los valores de esfuerzo y deformación máximos son determinados como función de la geometría de la probeta. Para probetas trapezoidales el σ_{max} y la ϵ_{max} se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_{\max} = \frac{3L}{2bh_2(h_1 - h_2)} F$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{(h_1 - h_2)^2}{8L^2 h_2 \left(\ln \frac{h_1}{h_2} - \frac{(h_1 - h_2)(3h_1 - h_2)}{2h_1^2} \right)} D$$

σ_{\max} = Esfuerzo máximo

ε_{\max} = Deformación máxima

F = Carga máxima aplicada

D = Desplazamiento máximo

L = Altura de la probeta

h1 = longitud base inferior de la probeta

h2 = longitud base superior de la probeta

b = espesor de la probeta

- Flexión en tres puntos, se realiza sobre vigas prismáticas apoyadas sobre dos soportes. La viga se somete a una carga dinámica en el centro de la probeta, el esfuerzo y deformación máximos se determinan de la siguiente forma:

$$\sigma_{\max} = \frac{3F \left(\frac{L}{2} - 10 \right)}{bh}$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{D}{20 + \frac{e - 20}{2} \left(1 + \frac{\frac{L}{2} - e}{2} \right)}$$

σ_{\max} = Esfuerzo máximo

ε_{\max} = Deformación máxima

F = Carga máxima aplicada

D = Desplazamiento máximo

L = Luz de la viga

b = ancho de la viga

h = altura de la viga

e = Longitud donde se mide la deformación

- Flexión en cuatro puntos, es un método para caracterizar el comportamiento de las mezclas bituminosas sometidas a flexión, la probeta prismática es colocada en un dispositivo que cuenta con cuatro apoyos distribuidos simétricamente. Los apoyos internos sujetan la probeta y permiten la distribución de la carga en sentido vertical y perpendicularmente al eje longitudinal de la viga, y los apoyos externos restringen el movimiento en sentido vertical. La configuración del equipo permite aplicar una carga dinámica que crea un momento constante, y por tanto, una deformación constante entre las dos mordazas interiores.

$$\sigma_{\max} = \frac{3Fa}{bh^2}$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{12hD}{3L^2 - 4a^2}$$

σ_{\max} = Esfuerzo máximo

ε_{\max} = Deformación máxima

F = Carga máxima aplicada

D = Deflexión máxima en el centro de la viga

a = L/3

L = Luz de la viga

b = ancho de la viga

h = altura de la viga

2.3 METODOLOGÍAS DE PREDICCIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Actualmente la tendencia en el diseño de pavimentos busca determinar con mayor precisión el comportamiento de las estructuras asfálticas basándose en un enfoque mecanístico que permita definir el comportamiento de los materiales cuando son sometidos a solicitaciones de carga. Las metodologías actuales de diseño de pavimentos son el producto de años de investigaciones realizadas desde la década de los 40, un estado del arte de la evolución de los pavimentos puede ser consultada en (MONISMIT; 2004).

Como opción alterna a las pruebas de laboratorio para determinar el módulo de rigidez se han desarrollado metodologías que permiten predecir un valor de rigidez utilizando modelos que están en función de variables de la mezcla que son fácilmente medibles. A continuación se describen algunas de las relaciones que han sido propuestas a través de los años, para predecir el módulo de rigidez de las mezclas asfálticas, los cuales se pueden clasificar en modelos empíricos y en modelos numéricos / analíticos, ver Tabla 1.

Tabla 1. Modelos para predecir el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica

Modelos para predecir el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica	
empíricos	numéricos / analíticos
1964. Heukelom y Klomp	Modelos analíticos Campo medio Modelo Eshelby 1973. Modelo Mori y Tanaka
1969. Asphalt Institute Method (Shook y Kallas)	
1977. Modelo de Bonnaure	
1972. Modelo de Witczak	

1978. Modelo de Witczak y Shook	Modelos autoconsistentes
1981. Modelo de Witczak	1979. Modelo de Christensen y Lo
1983. Modelo de Witczak, Miller y Uzan	Modelos numéricos
1984. Modelo de Witczak y Akhter	1999. Uddin
1989. Modelo de Witczak, Leahy, Caves y Uzan	2003. You
1996. Modelo de Witczak y Fonseca	2007. Dai and You
1999. Revisión del Modelo de Andrei, Witczak y Mirza's	2007. Abbas
2003. Modelo de Hirsch modificado por Christensen Pellinen y Bonoquist	
2006. Modelo de Bari y Witczak	

Fuente: (ABU ABDO *et al*; 2009)

2.3.1 Modelos empíricos

Partiendo de la importancia que tienen las proporciones y las características de cada una de las fases que componen la mezcla asfáltica (asfalto-agregado-aire) y la influencia que tienen en el comportamiento del material, varios estudios se han desarrollado para definir relaciones empíricas que permitan estimar la rigidez de la mezcla a partir de las propiedades físicas y mecánicas de cada uno de sus componentes. Para predecir la rigidez de la mezcla un modelo fue propuesto por Heukelom y Klomp en 1964 el cual determinaba el módulo a partir de la rigidez del asfalto y de la concentración volumétrica de los agregados.

$$S_m = S_b \left(1 + \frac{2.5}{n} \frac{C_v}{1 - C_v} \right)^n$$

S_m : módulo de rigidez de la mezcla, N/m²

Sb: módulo de rigidez del asfalto, N/m²

Cv: concentración volumétrica de los agregados

$$n : 0.83 \log_{10} \left(\frac{4 \times 10^{10}}{S_b} \right)$$

$$C_v = \frac{V_g}{V_g + V_b}$$

Vg: porcentaje en volumen de agregados

Vb: porcentaje en volumen de asfalto

La relación fue obtenida para mezclas que tenían aproximadamente 3% de vacíos y para un Cv entre 0.7 a 0.9. Van Draat y Sommer en 1965, propusieron la siguiente corrección de Cv para contenidos de vacíos mayores a 3%.

$$C'_v = \frac{100C_v}{100 + V_a - 3}$$

Va: contenido de vacíos con aire

Cv: concentración volumétrica de los agregados

C'v: valor corregido de concentración volumétrica de los agregados

La anterior ecuación es válida solo para mezclas que satisfagan la siguiente expresión:

$$C_B = \frac{2}{3} (1 - C'_v)$$

$$C_B = \frac{V_b}{V_g + V_b}$$

La relación de Heukelom y Klomp es usada para valores de rigidez del asfalto por encima de 0.02 GPa.

Uno de los modelos empíricos más famoso que se utilizó como base para la mayoría de modelos de predicción fue el propuesto por el Instituto del Asfalto (Shook y Kallas 1969). Este método fue desarrollado utilizando una configuración triaxial con carga cíclica y se investigaron los efectos sobre la rigidez de la mezcla asfáltica debido a la temperatura y la frecuencia de aplicación de las cargas.

$$\log_{10}|E^*| = 1.54536 + 0.020108 X_1 - 0.0318606 X_2 + 0.068142 X_3 - 0.00127003 (X_4)^{0.4} (X_5)^{1.4}$$

E^* = Módulo dinámico 10^5 psi (para una frecuencia de 4 Hz)

X_1 = Porcentaje pasando en la malla No 200

X_2 = Porcentaje de vacíos de aire

X_3 = Viscosidad del asfalto a 70°F, 10^6 poises

X_4 = Porcentaje de asfalto en peso

X_5 = Temperatura del ensayo, °F

En 1977 Bonnaure desarrolló un nomograma para predecir la rigidez de la mezcla, en función de la rigidez del asfalto, del porcentaje de volumen de agregado y del porcentaje en volumen de asfalto.

- Para $5 \text{ MPa} < S_b < 1 \text{ GPa}$

$$\log(S_m) = \frac{\beta_4 + \beta_3}{2} (\log(S_b) - 8) + \frac{\beta_4 - \beta_3}{2} |\log(S_b) - 8| + \beta_2$$

- Para $1 \text{ GPa} < S_b < 3 \text{ GPa}$

$$\log(S_m) = \beta_2 + \beta_4 + 2.0959(\beta_1 - \beta_2 - \beta_4)(\log(S_b) - 9)$$

Donde,

$$\beta_1 = 10.82 - \frac{1.342(100 - V_g)}{V_g - V_b} \qquad \beta_3 = 0.6 \log\left(\frac{1.37V_b^2 - 1}{1.33V_b} - 1\right)$$

$$\beta_2 = 8.0 + 0.00568V_g + 0.0002135V_g^2 \qquad \beta_4 = 0.7582(\beta_1 - \beta_2)$$

S_b : módulo de rigidez del asfalto, N/m²

V_g : porcentaje en volumen de agregados

V_b : porcentaje en volumen de asfalto

Witczak (1972-2006) modificó la relación propuesta por el Instituto del Asfalto (1978) usando una base de datos con la cual relacionó el módulo dinámico con las propiedades de mezcla para varias temperaturas y frecuencias de carga.

A partir de la ecuación modificada por Witczak más modelos fueron desarrollados, Witczak y Fonseca (1996), proponen la adición de más coeficientes de regresión para considerar propiedades de la mezcla tales como el porcentaje de absorción del asfalto, el contenido efectivo de asfalto, el porcentaje de agregados retenidos en los tamices 3/4, 3/8 y N°4. Sin embargo, se argumentan que los modelos desarrollados tienen limitaciones debido a que se han usado solamente asfaltos convencionales y no se tiene

en cuenta el envejecimiento del asfalto, además del rango de temperaturas en las cuales es determinado el módulo de rigidez (5 a 40°C):

Con el objetivo de mejorar el alcance de la predicción, Witczak y Fonseca proponen la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \log E^* = & -0.261 + 0.008225 \rho_{200} - 0.00000101(\rho_{200})^2 \\ & + 0.00196 \rho_4 - 0.03157V_a - 0.415 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) \\ & + \frac{1.87 + 0.002808 \rho_4 + 0.0000404 \rho_{38} - 0.001786(\rho_{38})^2 + 0.0164 \rho_{34}}{1 + e^{(-0.716 \log(f) - 0.725 \log(\eta))}} \end{aligned}$$

E^* =Módulo dinámico, 10^5 psi

η = Viscosidad del asfalto al envejecimiento y temperatura de interés, 10^6 Poise

f = Frecuencia de carga, Hz

V_a = Contenido de vacíos de aire, %

V_{beff} =Contenido de asfalto efectivo, % por volumen

ρ_{34} =Porcentaje retenido acumulado en la malla de 19 mm (3/4 pulg)

ρ_{38} =Porcentaje retenido acumulado en la malla de 9,53 mm (3/8 pulg)

ρ_4 =Porcentaje retenido acumulado en la malla No 4

ρ_{200} =Porcentaje pasando en la malla No 200

En 2006 Bari y Witczak reemplazaron en el modelo la viscosidad del asfalto (η), por el módulo de corte del asfalto (G^*) y el ángulo de fase (δ), los cuales son más representativos de la respuesta del material a diferentes condiciones de carga

Además, este nuevo ajuste de la ecuación está basado en una base de datos de 7400 puntos y 346 diseños de mezcla asfáltica.

$$\log_{10} E^* = -0.349 + 0.754 \left(|G_b^*|^{-0.0052} \right) \dots$$

$$\times \left[\begin{aligned} &6.65 + 0.032 \rho_{200} + 0.0027 (\rho_{200})^2 + 0.011 \rho_4 - 0.0001 (\rho_4)^2 + 0.006 \rho_{38} \\ &- 0.00014 (\rho_{38})^2 - 0.08 V_a - 1.06 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) \end{aligned} \right] \dots$$

$$+ \frac{2.56 + 0.03 V_a + 0.71 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + 0.012 \rho_{38} - 0.0001 (\rho_{38})^2 + 0.01 \rho_{34}}{1 + e^{(-0.7814 - 0.5785 \log |G_b^*| + 0.8834 \log \delta_b)}}$$

G^* = Módulo de corte del asfalto, psi

δ = Ángulo de fase asociado con G_b^*

A continuación en la Tabla 2, se presentan los parámetros estadísticos determinados para el modelo de Witczak propuesto por Bary y Witczak en el 2006.

Tabla 2. Parámetros estadísticos del modelo propuesto por Bari y Witczak 2006

Parámetro	Escala aritmética	Escala logarítmica
N° de puntos	7400	7400
N° de mezclas	346	346
S_e	4536.75 MPa	0.21
S_y	10059.45 MPa	0.66
S_e/S_y	0.45	0.32
R^2	0.80	0.90

Fuente: (ROBBINS; 2009).

El módulo de rigidez de la mezcla es una entrada esencial en el diseño mecánico – empírico propuesto por la Guía de Diseño AASHTO 2002, el cual utiliza tres diferentes niveles de precisión para diseñar y evaluar una estructura de pavimento. Datos de rigidez obtenidos en pruebas de laboratorio como módulos obtenidos de correlaciones son utilizados por la Guía de Diseño. En (LOULIZ, FLINTSCH and McGHEE; 2006) se verifica la precisión de los diferentes niveles exigidos por la Guía para la rehabilitación de un pavimento asfáltico, con el cual confirman la importancia de las pruebas que puedan llevarse a en campo (FWD – Falling weight deflectometer), además de la caracterización volumétrica que permita el uso de correlaciones como la propuesta por Witczak.

Christensen *et al.* (2003) desarrollaron un modelo para predecir el módulo dinámico de la mezcla de asfalto utilizando el módulo de la carpeta G_b y la composición volumétrica como VMA y VFA. Su modelo se basa en una versión existente de la ley de mezclas, llamado el modelo de Hirsch (1962) (ZOFKA *et al.*; 2004), el cual combina en serie y en paralelo elementos de las fases que componen la mezcla. El resultado de su estudio se conoce como la modificación del modelo de Hirsch.

$$|E^*| = P_c \left[4200000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3 |G_b^*| \left(\frac{VFA \times VMA}{10000} \right) \right] \\ + (1 - P_c) \left[\left(\frac{1 - VMA/100}{4200000} \right) + \left(\frac{VMA}{3VFA |G_b^*|} \right) \right]^{-1}$$

$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{3VFA |G_b^*|}{VMA} \right)^{0.58}}{\left(650 + \frac{3VFA |G_b^*|}{VMA} \right)^{0.58}}$$

Otros investigadores han propuesto modelos mecánicos – empíricos, basados en la Ley de mezclas en la cual las fases de los materiales compuestos son modeladas en configuraciones en paralelo y en serie, las cuales derivan en modelos a veces requieren menos entradas para determinar la rigidez de la mezcla (AL-KHATEEB *et al*; 2006).

Las relaciones empíricas proporcionan estimaciones de los valores de rigidez de la mezcla asfáltica, sin embargo son validas bajo las condiciones en la que fueron desarrolladas, debido a la diversidad de componentes usados y metodologías de fabricación de las probetas, entre otros, por lo tanto es difícil establecer una relación universal que pueda ser aplicada a todas las mezclas asfálticas.

2.3.2 Modelos analíticos/ numéricos

Recientemente, gracias a las herramientas computacionales, las relaciones teóricas basadas en el análisis de modelos micromecánicos han recibido gran atención, los cuales han sido utilizados para interpretar el comportamiento de los materiales compuestos desde hace décadas (BAYOMY *et al*, 2007). En los modelos micromecánicos las propiedades de los materiales compuestos pueden ser obtenidas a partir de sus constituyentes.

2.3.2.1 Modelos analíticos

Los modelos micromecánicos proporcionan ecuaciones constitutivas basadas en principios físicos que permiten conocer las propiedades macroscópicas de los materiales compuestos a partir de las propiedades de la microestructura. Los modelos micromecánicos se pueden dividir en tres categorías según (SHASHIDHAR and SHENOY; 2002):

1. Modelos basados en análisis fenomenológicos macroscópicos a través de principios de correspondencia.
2. Modelos basados en principios variacionales.
3. Modelos basados en sistemas auto-consistentes.

A continuación se resumen algunos de los modelos analíticos desarrollados para predecir la rigidez de los materiales compuestos, los cuales pueden ser consultados en la revisión bibliográfica realizada por (GONZALEZ; 2000), (SEGURADO; 2004), (BÖHM; 2008).

- **Modelos de campo medio**

Se define un volumen característico como la mínima porción de volumen que posee las mismas propiedades de todo el material, las propiedades de interés de esta fracción de volumen son la tensión y la deformación y se denominan propiedades efectivas, y pueden ser determinadas a través de los valores medios de las fases que componen el volumen característico, esto

es, $\bar{\sigma}_m$ y $\bar{\varepsilon}_m$ para la matriz y $\bar{\sigma}_p$ y $\bar{\varepsilon}_p$ para las partículas de refuerzo. Si V_m es el volumen ocupado por la matriz en el material compuesto y V_p es el volumen ocupado por las partículas, las medias volumétricas se pueden calcular como:

$$\bar{\sigma}_m = \frac{1}{V_m} \int_{V_m} \sigma_m(x) dV \quad \bar{\varepsilon}_m = \frac{1}{V_m} \int_{V_m} \varepsilon_m(x) dV$$

$$\bar{\sigma}_p = \frac{1}{V_p} \int_{V_p} \sigma_p(x) dV \quad \bar{\varepsilon}_p = \frac{1}{V_p} \int_{V_p} \varepsilon_p(x) dV$$

donde $V_m + V_p = V$ es el volumen representativo del material compuesto que se estudia, y el vector \mathbf{x} indica la posición de un punto material en el interior de la fase correspondiente. Si la matriz y las partículas de refuerzo se comportan como sólidos elásticos, la relación entre las tensiones y las deformaciones medias en cada una de las fases se puede escribir de acuerdo con la ecuación (1):

$$\bar{\sigma}_m = L_m \bar{\varepsilon}_m \quad \bar{\sigma}_p = L_p \bar{\varepsilon}_p \quad (1)$$

donde L_m y L_p son los tensores de cuarto orden de rigidez elásticos de cada fase y $M_m = L_m^{-1}$ y $M_p = L_p^{-1}$ los correspondientes tensores de flexibilidad. Las tensiones y deformaciones medias en el material compuesto, $\bar{\sigma}$ y $\bar{\varepsilon}$, (denominadas efectivas) se obtienen integrando las tensiones y deformaciones medias en cada una de las fases dentro del volumen representativo o característico. Esta operación se denomina homogeneización y se expresa como:

$$\bar{\sigma} = (1 - \xi)\bar{\sigma}_m + \xi\bar{\sigma}_p$$

$$\bar{\varepsilon} = (1 - \xi)\bar{\varepsilon}_m + \xi\bar{\varepsilon}_p$$

donde ξ es la fracción volumétrica de las inclusiones en el material compuesto. Las tensiones y deformaciones efectivas se relacionan con las tensiones y deformaciones medias en cada fase a través de los correspondientes tensores de concentración de la deformación (A_p y A_m) y de la tensión (B_p y B_m) según:

$$\bar{\sigma}_m = B_m \bar{\sigma}$$

$$\bar{\varepsilon}_m = A_m \bar{\varepsilon}$$

$$\bar{\sigma}_p = B_p \bar{\sigma}$$

$$\bar{\varepsilon}_p = A_p \bar{\varepsilon}$$

que, evidentemente, deben satisfacer las relaciones de las ecuaciones (2).

$$(1 - \xi)A_m + \xi A_p = I$$

$$(1 - \xi)B_m + \xi B_p = I \quad (2)$$

Donde I es el tensor unitario de cuarto orden. Las constantes elásticas efectivas quedan determinadas en el momento en el que se conoce uno de los cuatro tensores de concentración y teniendo en cuenta las ecuaciones 1 y 2 se llega a:

$$L = L_m + \xi(L_p - L_m)A_p \quad (3)$$

$$M = M_m + \xi(M_p - M_m)B_p$$

Donde L es el tensor de rigidez del material compuesto y $M = L^{-1}$ el correspondiente tensor de flexibilidad. El problema elástico se reduce por tanto a calcular el valor de uno de los cuatro tensores de concentración en función de la microestructura del volumen representativo del material compuesto. Para calcular A_p se han presentado diversas soluciones, entre las que se puede citar las siguientes:

Modelo Eshelby, Los tensores de concentración de la deformación y de la tensión (A_p, A_m, B_p, B_m) son función de la fracción volumétrica, de la forma y de las ecuaciones constitutivas de las fases, y se pueden calcular siguiendo distintas aproximaciones. La mayor parte de ellas se apoyan en el trabajo pionero de Eshelby (1957) sobre el comportamiento de una inclusión elástica de forma elipsoidal embebida en un medio elástico e indefinido, ver Figura 11.

Figura 11. Esquema del método de la inclusión elástica equivalente para calcular el tensor de concentración de la deformación, A_p^{dil}

Fuente: (GONZALEZ; 2000),

Para resolver este problema, Eshelby estudió el comportamiento de un material homogéneo donde una región elipsoidal cambia de forma espontáneamente al sufrir una deformación uniforme ε_T generando tensiones en el resto del material y en sí misma. Si se denomina a la deformación uniforme de la región elipsoidal asumiendo que la región está aislada, la deformación de equilibrio ε_C de esta región embebida en el sólido es uniforme y está relacionada con ε_T según:

$$\varepsilon_C = S_p \varepsilon_T$$

Donde S_p es el tensor de Eshelby para la partícula incrustada elipsoidal. Además, la tensión en la partícula se puede obtener directamente aplicando la ley de Hooke como:

$$\sigma_p = L_m (\varepsilon_C - \varepsilon_T) = L_m (S_p - I) \varepsilon_T$$

Si el conjunto partícula/matriz se encuentra sometido a una deformación efectiva $\bar{\varepsilon}$, la deformación en la partícula puede calcularse sustituyendo la partícula real por otra ficticia de propiedades iguales al medio. La partícula ficticia sufre una deformación libre de tensión ε_T tal que los campos de tensión y deformación de ambas partículas (ficticia y real) dentro de la matriz sean iguales. De acuerdo con la Figura 11, la deformación y la tensión en la partícula ficticia vienen dadas por las ecuaciones (4).

$$\varepsilon^{fic} = \bar{\varepsilon} + \varepsilon_C \tag{4}$$

$$\sigma^{fic} = L_m (\varepsilon_C + \bar{\varepsilon} - \varepsilon_T)$$

y como la deformación y tensión en la partícula real tienen que ser iguales a las correspondientes de la partícula ficticia, se cumple las ecuaciones (5)

$$\varepsilon^{real} = \bar{\varepsilon} + \varepsilon_C \quad (5)$$

$$\sigma^{real} = L_p(\varepsilon_C + \bar{\varepsilon} - \varepsilon_T)$$

Igualando las tensiones de las ecuaciones anteriores (4) y (5), se calcula la deformación libre ε_T que hay que imponer sobre la partícula ficticia

$$\varepsilon_T = [(L_p - L_m) + L_m]^{-1}(L_p - L_m)\bar{\varepsilon} \quad (6)$$

y combinando las ecuaciones (4) y (6) se obtiene el tensor de concentración de la deformación para la partícula, A_p^{dil} , relacionado en la ecuación (7):

$$\varepsilon_p = \bar{\varepsilon} + \varepsilon_C = \bar{\varepsilon} + S_p \varepsilon_T = [I + S_p L_m^{-1}(L_p - L_m)]^{-1} \bar{\varepsilon} = A_p^{dil} \bar{\varepsilon} \quad (7)$$

donde el superíndice *dil* indica que esta expresión sólo es exacta cuando se trata de una partícula aislada en un medio infinito. El tensor de concentración de la deformación A_p^{dil} no tiene en cuenta las interacciones entre las diferentes partículas dentro del material compuesto y solo puede usarse para obtener las propiedades de materiales compuestos cuando la fracción volumétrica del refuerzo es pequeña (en la práctica, inferior al 10 %). En estas condiciones, la expresión del tensor de rigidez efectivo del material compuesto se obtienen a partir de (7) y (3).

$$L = L_m + \xi(L_p - L_m) \left[I + S_p L_m^{-1} (L_p - L_m) \right]^{-1}$$

Existen distintos métodos basados en el modelo de Eshelby para calcular las propiedades efectivas de un compuesto cuando la fracción volumétrica de inclusiones es finita. Entre ellos destacan los modelos de Mori-Tanaka y los modelos autoconsistentes.

- **Modelo de Mori-Tanaka (1973)**

Presentaron un modelo que, en una posterior reformulación por Benveniste (1987), modifica el modelo de Eshelby incorporando la influencia de la interacción entre partículas vecinas. En este caso, el tensor de concentración de la deformación A_p^{mt} puede calcularse como:

$$A_p^{mt} = A_p^{dil} \left[(1 - \xi)I + \xi A_p^{dil} \right]^{-1}$$

y las propiedades elásticas efectivas se obtienen de forma directa introduciendo esta expresión para el tensor de concentración de deformación en la ecuación (3) según:

$$L = L_m \xi + (L_p - L_m) \left[A_p^{dil} \left[(1 - \xi)I + \xi A_p^{dil} \right]^{-1} \right]$$

- **Modelos auto-consistentes**

Si en la expresión (6) de los modelos de campo medio, se considera que A_p es variable con la rigidez efectiva L , dicha expresión pasa a ser una ecuación, no lineal. Se dice entonces que el modelo es de tipo auto-consistente.

El modelo auto-consistente clásico de Kröner (1958), estudia el problema formado por una sola partícula embebida en el medio efectivo. El tensor de concentración de la deformación para la partícula A_i^{sc} se obtiene directamente de la solución diluida de Eshelby, ecuación (7), sustituyendo el tensor de rigidez de la matriz, L_m por el correspondiente al medio efectivo L , de acuerdo con

$$A_p^{sc} = [I + S_p L^{-1} (L_p - L)]^{-1}$$

donde el tensor de Eshelby depende de la forma de la partícula y de las constantes elásticas del medio efectivo. El tensor de concentración de la ecuación 1.16 se sustituye en la ecuación (3) y la ecuación no lineal resultante es:

$$L = L_m + \xi (L_p - L_m) [I + S_p L_m^{-1} (L_p - L)]^{-1}$$

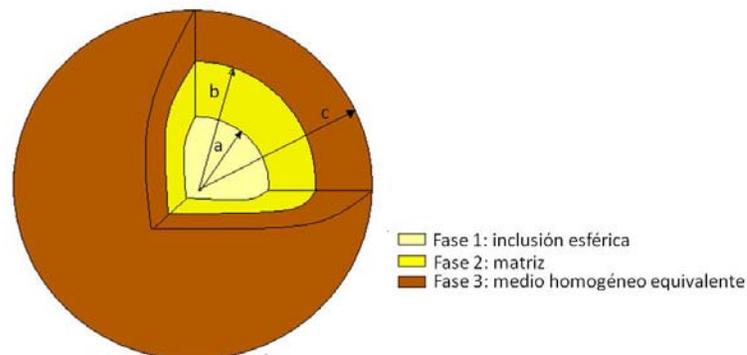
La anterior expresión, se resuelve de forma iterativa para calcular las constantes elásticas efectivas del material compuesto. Este modelo es

particularmente adecuado para materiales compuestos donde las diversas fases se encuentran dispersas sin que exista una matriz continua propiamente dicha, como los sólidos policristalinos.

- **Modelo auto-consistente generalizado**

El modelo auto-consistente generalizado fue desarrollado por Christensen y Lo (1979) para calcular la constantes elásticas de un material compuesto reforzado con inclusiones esféricas o fibras alineadas. Las esferas tienen diferentes tamaños y están rodeadas de una matriz de manera que la relación entre el radio de la inclusión y el espesor de la matriz es constante y viene impuesta por la fracción volumétrica de refuerzo dentro del material compuesto. Un material compuesto de este tipo puede llenar todo el espacio si la distribución de los radios de las esferas se elige adecuadamente y sus constantes elásticas se pueden calcular a partir del modelo simplificado dibujado en la Figura 12.

Figura 12. Idealización del material compuesto de acuerdo al modelo autoconsistente generalizado (3 fases).



Fuente: (GOMEZ; 2005)

El material compuesto se representa por una inclusión esférica rodeada por una matriz, que a su vez está embebida en un medio efectivo, elástico, isótropico e indefinido, que representa al resto del material compuesto y cuyas constantes elásticas son precisamente la solución del problema. Christensen y Lo resolvieron el problema elástico para este material compuesto de tres fases bajo dos sollicitaciones de carga diferentes (compresión hidrostática y corte simple) y los valores del módulo de compresibilidad K y del módulo de elasticidad transversal G del material compuesto vienen expresadas por:

$$K = K_m + \frac{\xi(K_p - K_m)}{1 + (1 - \xi)\frac{K_p - K_m}{K_m} + \frac{4}{3G_m}}$$

$$A\left[\frac{G}{G_m}\right]^2 + 2B\left[\frac{G}{G_m}\right] + C = 0$$

donde K_i y G_i son las constantes elásticas de las partículas, K_m y G_m las correspondientes a la matriz y A , B , y C son tres constantes que dependen de las constantes elásticas de la matriz y de las esferas y de sus respectivas fracciones volumétricas.

Es conveniente señalar que el método autoconsistente generalizado no es un método de campo medio propiamente dicho porque no se apoya en las medias volumétricas de las tensiones y deformaciones en cada fase. Este método permite obtener mejores aproximaciones que el modelo de Mori-Tanaka para las constantes elásticas de materiales compuestos con una

topología inclusión-matriz incluso cuando todas las esferas de refuerzo tienen el mismo radio (Christensen, 1990).

Maurer, propuso un modelo en el cual el volumen elemental representativo está constituido por un una inclusión esférica rodeada de una interfase y esta a su vez rodeada por una matriz. Las fracciones volumétricas de cada fase son:

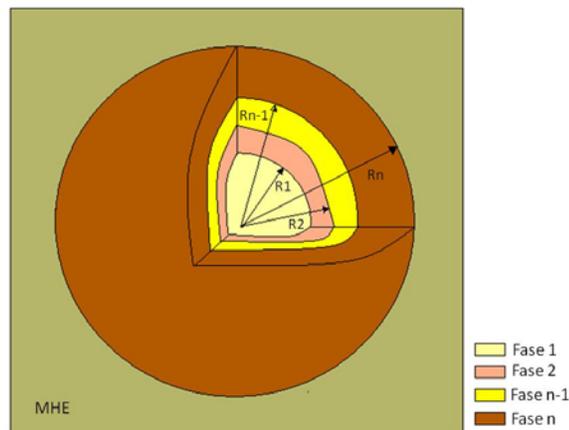
$$\phi_p = a^3, \phi_1 = b^3 - a^3, \phi_m = 1 - b^3$$

El módulo cortante esta dado por la siguiente ecuación:

$$40|A|\left(\frac{G_c}{G_m}\right)^2 + (2|B| + 8|C|)\left(\frac{G_c}{G_m}\right) - 5|D| = 0$$

Hervé y Zaoui, generalizaron la solución de Christensen y Lo, como un material compuesto de n capas (n+1 fases). El modelo contiene una esfera compuesta que está constituida de n capas inmersas en una matriz sometida a condiciones homogéneas de esfuerzo o de deformación en el infinito.

Figura 13. Idealización del material compuesto con n fases



Fuente: (GOMEZ; 2005)

El módulo cortante del material, es similar a la solución de Christensen y Lo y se encuentra dado por la siguiente ecuación:

$$X \left(\frac{G}{G_m} \right)^2 + Y \left(\frac{G}{G_m} \right) + Z = 0$$

- **Principios Variacionales**

Las expresiones más sencillas para definir las propiedades termo-elásticas efectivas se obtienen buscando el mínimo de la energía de deformación de un material compuesto a fin de estimar los límites del módulo elástico efectivo. Hill (1963) demostró que las estimaciones realizadas por el modelo de isodeformación de Voigt (1889) y el modelo de isotensión de Reuss (1929), determinan los límites superior e inferior para las propiedades efectivas de un material compuesto constituido por $n+1$ fases. El límite superior de Voigt se obtiene suponiendo que la deformación en cada una de las fases es uniforme e igual a la deformación efectiva aplicada.

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_i$$

Entonces,

$$L = \sum_{i=0}^N c_i L_i$$

De forma análoga se llega al límite inferior de Reuss cuando la tensión en cada fase es uniforme e igual a la tensión efectiva.

$$\bar{\sigma} = \sigma_i$$

Entonces,

$$L^{-1} = \sum_{i=0}^N c_i L_i^{-1}$$

Estas expresiones (conocidas como las reglas de las mezclas o límites de un punto) son independientes de la distribución espacial y de la forma de las fases.

Hashin y Shtrikman (1962) obtuvieron unos límites más estrechos mediante una formulación variacional basada en el principio de mínima energía potencial. Estos límites (denominados de dos puntos) utilizaron esta formulación variacional para obtener los límites superior e inferior de las propiedades elásticas efectivas de materiales de dos fases con una microestructura isótropica. Según este modelo los límites inferior y superior para el módulo de cortante están dados por:

$$G_c^- = G_m + \frac{5\phi_p (G_p - G_m)(3K_m + 4G_m)}{9K_m + 8G_m + 6V_m (K_m + 2G_m)(G_m/G_p) + 6\phi_p (K_m + 2G_m)}$$

$$G_c^+ = G_p + \frac{5\phi_m (G_m - G_p)(3K_p + 4G_p)}{9K_p + 8G_p + 6V_p (K_p + 2G_p)(G_p/G_m) + 6\phi_m (K_p + 2G_p)}$$

En general los métodos variacionales han permitido establecer los límites superior e inferior para las propiedades elásticas efectivas de los materiales compuestos. Estos límites son más precisos cuanto mayor es la información que se tiene sobre la microestructura del medio.

2.3.2.2 Modelos numéricos

Con el avance de las herramientas computacionales, muchos modelos numéricos han sido desarrollados para determinar la respuesta de las mezclas bituminosas en diferentes condiciones de carga utilizando análisis de elementos finitos (FEA) y métodos de elementos discretos (DEM). Diversas herramientas de FEA utilizadas en el análisis de pavimentos, están disponibles en el mercado algunas de ellas son enunciadas por (RONDON y REYES; 2007): “SENOL (University of Nottingham), FENLAP (University of Nottingham), ILLI-PAVE (University of Illinois), GT-PAVE (Georgia Institute of Technology) y el NOEL (Université de Nantes), y códigos como el DIANA (Delft University of technology) y el CESAR (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)”.

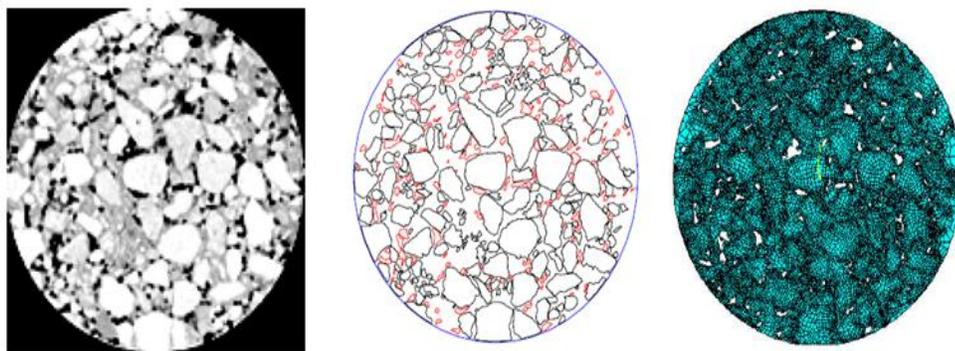
Uddin (1999) desarrolló un modelo de análisis micromecánico para determinar el comportamiento a fluencia de la mezcla bituminosa en un nivel microscópico mediante las propiedades elásticas de los agregados y las propiedades visco-elásticas del bitumen a una temperatura dada. Muchos otros modelos han sido desarrollados para predecir el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica utilizando FEA. Sin embargo, la mayoría de estos modelos sólo se han desarrollado para una condición de carga específica y una configuración de prueba, y se basan en el supuesto de que el ligante y los agregados sólo exhiben propiedades elásticas lineales (BANDYOPADHYAYA, DAS and BASU; 2008).

Varios investigadores (You 2003, JIANG –MIAO *et al.* 2006, YOU y DAI 2007, ABBAS 2004, Abbas, 2007), están utilizando DEM para determinar la respuesta compleja de la mezcla asfáltica, a través de experimentos virtuales

asistidos por computadora, con lo cual se procesan imágenes de la microestructura de la mezcla capturando las diferentes secciones de la muestra compactada a través de tomografías computarizadas (CT), ver Figura 14. Luego, estas imágenes son procesadas para obtener el modelo final de la estructura de la mezcla y se procede a realizar el análisis solicitando la estructura con una configuración de carga y se obtienen las distribuciones de los esfuerzos sobre el material.

Sin embargo, estudios recientes (Buttler y Dave 2005; Buttler y You 2001; You y Buttler 2006; YOU, ADHIKARI and DAI 2008) han demostrado que a pesar del intento por describir el comportamiento de los materiales compuestos a través de esta metodologías, los modelos micromecánicos tradicionales no han logrado describir adecuadamente la compleja microestructura de las mezclas asfálticas.

Figura 14. Procesamiento de imágenes para obtener el modelo digital de la mezcla asfáltica



Fuente: (YOU y DAI; 2007)

Se espera hacia un futuro que los modelos 3D tengan una mayor capacidad para determinar las propiedades fundamentales de las mezclas asfálticas y de los pavimentos.

Es una realidad que la caracterización del comportamiento de los materiales asfálticos es una tarea compleja debido a que sus propiedades dependen de varios factores: el medio ambiente, la magnitud - duración y frecuencia de las cargas, el estado de tensiones, las proporciones y características de los componentes, entre otros. Los modelos desarrollados intentan simular las condiciones a las cuales es sometido el material y comprender la respuesta de la mezcla asfáltica, lo cual requiere un equilibrio apropiado entre la exactitud y la practicidad, sin embargo en este momento no todas las variables pueden ser consideradas de manera simultánea, al menos no en la etapa actual del conocimiento, a pesar de contar con avances tecnológicos en software y pruebas de laboratorio, cada problema del material es abordado por separado, para simplificar la compleja respuesta de la mezcla.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se documenta la metodología usada para caracterizar los diseños de mezclas asfálticas propuestos en la investigación, según las normas vigentes del Instituto Nacional de Vías (INVIAS; 2007). Se describe el procedimiento y el equipo utilizado en las pruebas para determinar el módulo dinámico y el módulo de rigidez monotónico de las mezclas.

3.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Se definieron 24 diseños de mezcla como resultado de variar en diferentes niveles factores como el contenido y tipo de asfalto, la gradación y la fuente de la cual se extrae el material pétreo, ver Tabla 3 y Anexo 1.

Tabla 3. Factores y niveles del diseño experimental

Factores		Niveles	Valores	
Factor 1	Contenido de asfalto	3	C1	4,5
			C2	5,0
			C3	5,5
Factor 2	Tipo de asfalto	2	T1	20/30
			T2	60/70
Factor 3	Gradación	2	G1	MDC-2
			G2	M1
Factor 4	Fuente	2	F1	Chicamocha
			F2	Rionegro

Fuente: Autor

Las probetas según su composición fueron identificadas con la nomenclatura mostrada en la Figura 15, para facilitar su manipulación en el laboratorio y su respectivo análisis.

Figura 15. Nomenclatura de las probetas



Fuente: Autor

3.2 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

Los materiales se mezclaron y se compactaron a temperaturas de 160 y 150 °C respectivamente, las cuales se encuentran en conformidad con los requisitos del asfalto utilizado. Las mezclas se compactaron siguiendo la metodología propuesta en la norma INVIAS 747-07, “Resistencia a la Compresión Simple de Mezcla Bituminosas”. Las probetas de forma cilíndrica poseen las siguientes dimensiones: 100 mm de diámetro por 130 mm de altura y tienen un peso de 2500 gramos aproximadamente.

Para cada uno de los 24 diseños de mezcla se realizaron 2 probetas adicionales con idénticas relaciones de los materiales mezclados y mismo procedimiento de fabricación de las probetas.

Foto 2. Compactación de las probetas de asfalto, INVIAS 747-07



Fuente: Autor

3.2.1 Materiales empleados

- **Ligante Asfáltico**

El asfalto utilizado para la fabricación de las probetas fue proporcionado por empresas ubicadas en la región de Santander y corresponde a un asfalto convencional de penetración 60/70, el cual ha sido caracterizado en proyectos de investigación realizados en la Universidad Industrial de Santander.

Para obtener el asfalto de penetración 20/30, se modificó con la adición de un 20% de asfáltita en peso (MENDEZ y NUÑEZ; 2008). La asfáltita se

extraído de un yacimiento natural ubicado en cercanías del Playón, en un sitio conocido como “La Tigra”. El material fue reducido en tamaño por medio de abrasión hasta que pasará por el tamiz #100 con el propósito de facilitar la homogenización con el asfalto convencional. Para confirmar la dosificación de asfáltita se realizaron las siguientes pruebas de laboratorio sobre el asfalto modificado: penetración (INV-706-07), ductilidad (INV-702-07) y punto de ablandamiento (INV-712-07).

Tabla 4. Pruebas de laboratorio realizadas al asfalto modificado.

PRUEBA	RESULTADO
Penetración (INV-706-07),	21.7 – 22.7
Ductilidad (INV-702-07)	26 – 27.5
Punto de ablandamiento (INV-712-07).	57 °C

Fuente: Autor

- **Agregado**

Para la elaboración de las mezclas asfálticas se utilizaron como fuentes de agregado pétreo el material que se extrae de los ríos conocidos como Chicamocha y Rionegro. El agregado es producto de los procesos de trituración realizado por parte de las plantas ubicadas en la zona. Estudios de investigación llevados a cabo en la Universidad han caracterizado estas fuentes de material granular (ARENAS y SERRANO; 2006)

Foto 3. Mezcla asfáltica, izquierda: granulometría discontinúa (M1), derecha: granulometría continúa (MDC-2)



Fuente: autor

En la elaboración de las probetas se utilizaron dos gradaciones para obtener mezclas con granulometría continúa y mezclas con granulometría discontinúa. En la Tabla 5, se presentan las granulometrías utilizadas para las mezclas densas en caliente MDC-2 y para las mezclas discontinuas M1, ver Foto 3.

Tabla 5. Tipo de gradación

TAMIZ	% PASA	
	MDC - 2	M1
3/4	100	-
1/2	87,5	100
3/8	79	86
Nº 4	57	21,5
Nº 10	37	16,5
Nº 40	19,5	12
Nº 80	12,5	-
Nº 200	6	6,5

Fuente: Especificaciones del INVIAS 450 y 452

3.3 CARACTERIZACIÓN VOLUMÉTRICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los parámetros volumétricos de la mezcla tales como: vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos con asfalto (VFA) y vacíos de aire (V_a), permiten determinar las proporciones en las cuales los diferentes materiales quedan conformando la mezcla. Para definir los anteriores parámetros, se realizaron los ensayos de laboratorio para determinar la densidad bulk de cada una de las probetas (INV E-733) y la gravedad máxima teórica de las diferentes mezclas elaboradas (INV E-735).

3.4 METODOLOGÍA DEL ENSAYO BAJO CARGA DINÁMICA

3.4.1 Equipo Utilizado

Para el desarrollo de la prueba a compresión se utilizó una máquina de ensayos universales servo-hidráulica fabricada por MTS. La fuerza aplicada se midió y se controló a través de una celda de carga con capacidad para aplicar 2 toneladas en un rango de frecuencias de 0.01 a 25 Hz. Las deformaciones axiales presentadas en la probeta fueron medidas con el deformímetro (LVDT) con el que cuenta el equipo MTS. La deformación fue medida en toda la altura de la probeta, el marco de carga se muestra en la Foto 4.

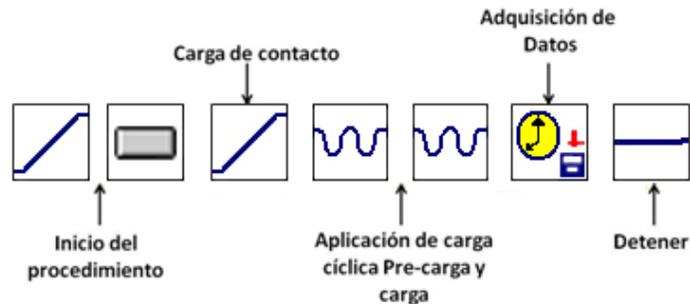
Foto 4. Montaje de la probeta para la prueba de compresión uniaxial con carga dinámica



Fuente: Autor

El equipo utilizado para realizar el ensayo cuenta con un software que permite programar los procedimientos requeridos, mediante comandos se aplican las cargas deseadas, se realiza la adquisición de datos, los eventos de detección e instrucciones de control externo. En la Figura 16, se muestra la línea de comandos utilizada para el ensayo a compresión con carga dinámica.

Figura 16. Programación de la prueba a compresión con carga dinámica



Fuente: Autor

A partir de lo recomendado en la norma AASTHO TP-62, la programación del ensayo inicia con la aplicación de una carga lineal de contacto que permite que los discos de acero de la máquina no dejen de sujetar la probeta. Esta carga corresponde al 10% de la carga máxima dinámica aplicada. Luego, se aplica una pre-carga dinámica (senoidal) de 200 ciclos a una frecuencia de 16 Hz, y a continuación se aplica la carga dinámica (senoidal) a la frecuencia deseada del ensayo, durante este proceso se realiza la captura de datos correspondientes a los últimos 5 ciclos de carga y desplazamiento, se registran 100 datos por cada uno de los ciclos los cuales se usan para determinar los valores máximos de carga y desplazamiento que permiten calcular el esfuerzo y la deformación unitaria. Con estos datos se calcula el módulo dinámico en las condiciones deseadas de temperatura y frecuencia del ensayo. Aunque el procedimiento de ensayo se encuentra estandarizado, en (DOUGAN *et al*; 2003) se evalúan varios problemas que se presentan durante el desarrollo de las pruebas y se enuncian puntos claves para ejecutar de manera más precisa el ensayo, entre los cuales se enumeran: la preparación del espécimen, compactación, corte de las probetas y su instrumentación, además de los niveles de carga para no exceder el rango visco-elástico del material y ocasionar deformaciones mayores a 1500 microstrain (acumuladas) y por último el control de la temperatura de acondicionamiento de las probetas.

3.4.2 Variables del ensayo

- **Nivel y frecuencia del esfuerzo aplicado**

La prueba se realizó mediante la aplicación de un esfuerzo dinámico axial controlado para una temperatura y frecuencia dada, teniendo en cuenta que el esfuerzo aplicado 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 y ZEGHAL, 2007).

El esfuerzo dinámico aplicado varía con la rigidez de la probeta a ensayar, además de la combinación de temperatura y frecuencia durante la prueba. La Guía de diseño de Pavimentos AASHTO 2002, recomienda determinar el módulo dinámico a través de la norma AASHTO TP62, la cual sugiere realizar el ensayo aplicando un esfuerzo controlado sobre el espécimen, sin embargo se ha demostrado que al realizar la prueba de esta forma, en ocasiones los niveles de esfuerzos producen grandes deformaciones superando el nivel de deformación que permite el supuesto del rango visco-elástico lineal.

La frecuencia con la cual se deben aplicar los esfuerzos en cada una de las temperaturas se inicia en la frecuencia más elevada y progresa hacia la más baja (10, 5 y 1 Hz). Al comienzo de la prueba se aplica una pre-carga dinámica de 200 ciclos a una frecuencia de 16 Hz y posteriormente se somete la probeta al número correspondiente de ciclos según la frecuencia del ensayo, ver Tabla 6.

Tabla 6. Número de ciclos para la prueba

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

Fuente: Autor

- **Temperatura**

Las probetas fueron acondicionadas con anterioridad a la temperatura de ensayo colocándolas en una nevera u horno según la temperatura requerida, el módulo de rigidez dinámico se determinó a las temperaturas de 3, 19 y 35 °C.

Foto 5. Equipo utilizado para el acondicionamiento de la temperatura



Fuente: Autor

En la Tabla 7 se consolidan los tiempos que fueron necesarios para obtener la temperatura deseada en el espécimen, partiendo de la temperatura ambiente en la probeta. Para monitorear la temperatura en las probetas durante el acondicionamiento, se adecuó una probeta testigo con un orificio en el centro del cual se introdujo la sonda de una termocupla, y se constató que no presentara una variación superior a $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

La duración de la prueba fue inferior a 2 minutos para garantizar una variación de la temperatura menor de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ (INV E-454). Finalizada la aplicación del esfuerzo, la temperatura del espécimen se acondicionaba nuevamente por 30 minutos para continuar con una nueva aplicación de carga.

Tabla 7. Tiempo requerido para el acondicionamiento de la temperatura en las probetas

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Acondicionamiento de las probetas (hrs)
3.0	12
19	6
35	2

Fuente: Autor

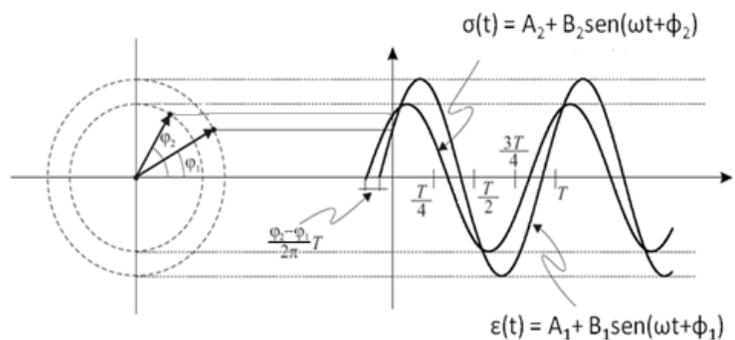
Lo recomendado para controlar la temperatura es tener una cámara capaz de mantener una variación de temperatura en el espécimen de concreto asfáltico inferior a $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ en el instante de la prueba, sin embargo, cuando

no se cuenta con el equipo requerido, hay que recurrir a otros sistemas de control.

3.4.3 Interpretación de los datos

Para determinar el valor del módulo dinámico de rigidez de la mezcla asfáltica se ajustaron los datos a una función sinusoidal por medio de mínimos cuadrados y así, encontrar las amplitudes de la carga y desplazamiento, ver Figura 17.

Figura 17. Funciones sinusoidales de la curva de esfuerzo y deformación



Fuente: Autor

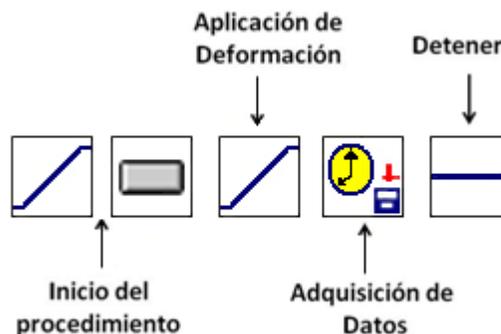
3.5 METODOLOGÍA DEL ENSAYO BAJO CARGA MONOTÓNICA (EQUIPO AUTOMATIZADO)

3.5.1 Equipo Utilizado

El equipo utilizado para ejecutar el ensayo bajo carga monotónica fue la máquina de ensayos universales servo-hidráulica MTS. La prueba fue realizada controlando la deformación mediante el LVDT de la máquina.

La secuencia de programación de los procedimientos para ejecutar el ensayo se muestra en la Figura 18, en la cual se aplica un desplazamiento a velocidad constante hasta alcanzar 0.1 milímetro de deformación en la probeta. Se registraron en promedio 200 puntos para determinar el módulo de rigidez monotónico para cada una de las combinaciones de temperatura y velocidad de deformación. En cada una de las combinaciones se repitió la prueba 5 veces para definir el valor del módulo monotónico como el valor obtenido en la última repetición.

Figura 18. Programación de la prueba a compresión con carga monotónica



Fuente: autor

3.5.2 Variables del ensayo

- **Velocidad de la deformación aplicada**

Se aplicó una deformación axial a velocidad constante sobre la probeta (1, 7 y 15 mm/min), la prueba finalizaba cuando se alcanzaba 0.1 mm de deformación.

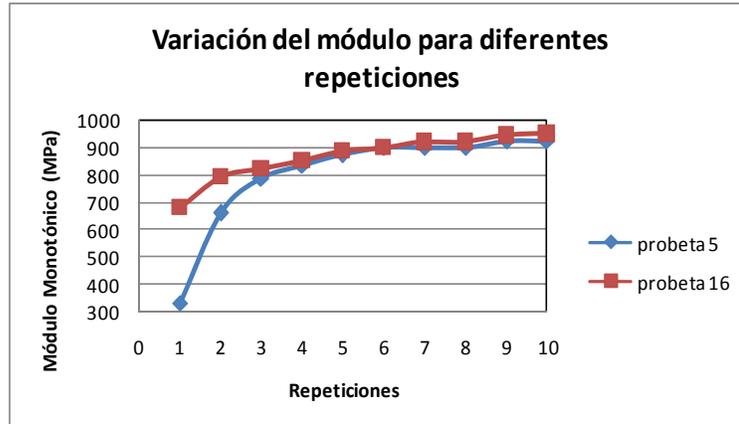
- **Temperatura**

Las probetas se acondicionaron a 7, 19 y 35 °C utilizando la misma metodología descrita en el ensayo bajo carga dinámica.

3.5.3 Interpretación de los datos

El módulo de rigidez monotónico fue calculado como la relación que existe entre el esfuerzo aplicado sobre la probeta y la deformación unitaria. Para comprobar la precisión de la prueba se sometió el espécimen a una secuencia de ensayos bajo las mismas condiciones de temperatura y velocidad de deformación y se observó la variación del módulo monotónico en las diferentes repeticiones realizadas consecutivamente, ver Figura 19.

Figura 19. Variación del módulo monotónico para diferentes repeticiones



Fuente: Autor

La tendencia apreciada en la Figura 19, indica una variación significativa entre los valores obtenidos en la primera repetición y los valores hallados en la última repetición, estas variaciones en algunos casos son mayores al 50% entre los valores obtenidos al inicio de la secuencia con los finales. Se observa una mayor variación del valor del módulo en las primeras repeticiones, la cual disminuye hasta una diferencia no mayor al 10% a partir de la quinta repetición.

Debido a que la prueba no debe durar más de 2 minutos, llevar a cabo diez secuencias no es recomendable, además de someter las probetas a una acumulación de deformación. Se definió como valor del módulo monotónico, el mayor valor encontrado ó cuando se presente una variación menor al 10% entre dos medidas consecutivas, ver Tabla 8.

Tabla 8. Porcentaje de variación del valor de módulo monotónico

Repetición	% de variación	
	P5	P16
5	5.5	6.7
6	2.7	5.4
7	2.7	3.1
8	2.5	3.1
9	0.0	0.7

Fuente: Autor

3.6 METODOLOGÍA DEL ENSAYO BAJO CARGA MONOTÓNICA (EQUIPO DE OPERACIÓN MANUAL)

Con el propósito de implementar el ensayo bajo carga monotónica haciendo uso de equipos de operación manual disponibles en los laboratorios, se planteó una metodología utilizando el marco de carga usado para los ensayos de Marshall. El procedimiento llevado a cabo fue el siguiente:

Las probetas se sometieron a un acondicionamiento de temperatura, este procedimiento consistió en sumergir las probetas en agua durante un periodo de 3 horas según la temperatura deseada para el ensayo, las temperaturas escogidas para realizar las pruebas fueron 7, 24 y 35 °C.

Foto 6. Acondicionamiento de la temperatura para el ensayo bajo carga monotónica (equipo manual)

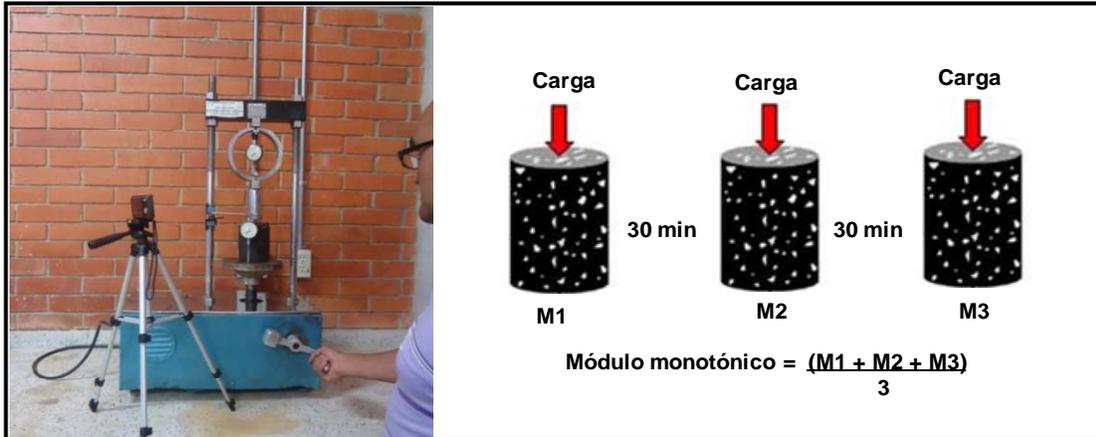


Fuente: Autor

La prueba fue realizada aplicando sobre la mezcla asfáltica una carga axial a una velocidad de deformación constante (1.27, 15.2 y 50.8 mm/min) mediante un marco de carga de operación manual, ver Foto 7. El ensayo era finalizado cuando se alcanzaba una deformación máxima de 1 mm, para las diferentes velocidades de deformación aplicada. Las velocidades de 1.27, 15.2 mm/min fueron aplicadas manualmente por el operador y la velocidad de deformación de 50.8 mm/min es correspondiente a la velocidad automática para realizar el ensayo de Marshall.

La prueba tiene una corta duración en la cual es difícil visualizar los datos de los equipos análogos que registran la deformación y la carga aplicada, por tal motivo fue necesario para la adquisición de los datos utilizar una cámara de video, para su posterior análisis y extracción de los datos requeridos y así, obtener la curva esfuerzo en función de la deformación para determinar el valor de módulo monotónico como la relación entre el esfuerzo y la deformación.

Foto 7. Ensayo bajo carga monotónica (equipo de operación manual)



Fuente: Autor

Cada una de las probetas fue sometida a una serie de tres aplicaciones de carga, dejando un periodo de tiempo de 30 minutos entre pruebas para acondicionar nuevamente la temperatura en el material. El valor del módulo monotónico fue el resultado de promediar los resultados de los tres ensayos realizados.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se evalúa la factibilidad de determinar una relación con la cual se pueda establecer un valor cercano al módulo de rigidez dinámico utilizando datos que se obtienen en un ensayo aplicando cargas de tipo monotónico. Para ello, se realizó la caracterización volumétrica y mecánica de las mezclas asfálticas a través de ensayos con aplicación de cargas dinámicas y monotónicas a compresión axial, para determinar la rigidez del material. A partir de los datos obtenidos, se consolida el análisis estadístico para determinar el conjunto de variables independientes que hacen parte del modelo propuesto, el cual permite predecir del valor del módulo dinámico.

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

El trabajo llevado en laboratorio para definir las propiedades volumétricas y el comportamiento mecánico de las probetas de mezcla asfáltica se consolida en los siguientes resultados obtenidos.

4.1.1 Caracterización Volumétrica De Las Mezclas Asfálticas

Para definir las proporciones de los diferentes elementos que componen el material bituminoso, se determinaron las relaciones volumétricas de las mezclas, esto incluye: los vacíos del agregado mineral (VMA), los vacíos llenos de asfalto (VFA), el porcentaje de vacíos de la mezcla (V_a), además de la densidad bulk (ρ_b) y densidad máxima teórica (Gmm). 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 mezclas asfálticas

Diseño	Densidad Bulk	Gmm	VMA	VFA	Va (%)
1111	2.35	2.49	10.8	46.3	5.8
1112	2.34	2.43	12.9	71.1	3.7
1121	2.23	2.53	19.8	41.0	11.7
1122	2.23	2.44	19.8	56.8	8.6
1211	2.38	2.50	10.3	51.7	5.0
1212	2.33	2.48	11.1	44.9	6.1
1221	2.24	2.47	19.5	53.2	9.2
1222	2.22	2.53	17.8	52.3	8.5
2111	2.54	2.37	15.5	55.8	6.9
2112	2.50	2.39	14.7	69.6	4.5
2121	2.28	2.46	12.3	42.1	7.1
2122	2.30	2.50	10.9	26.2	8.0
2211	2.49	2.41	13.9	77.3	3.2
2212	2.53	2.37	15.1	60.1	6.0
2221	2.30	2.50	10.8	26.6	7.9
2222	2.28	2.45	12.6	44.0	7.1
3111	2.32	2.31	20.2	80.5	3.9
3112	2.31	2.39	17.7	81.8	3.2
3121	2.49	2.24	20.4	50.8	10.1
3122	2.48	2.23	20.6	52.4	9.8
3211	2.33	2.41	17.4	79.4	3.6
3212	2.30	2.44	18.4	69.0	5.7
3221	2.46	2.23	20.8	55.5	9.3
3222	2.52	2.24	20.3	46.3	10.9

Fuente: Autor

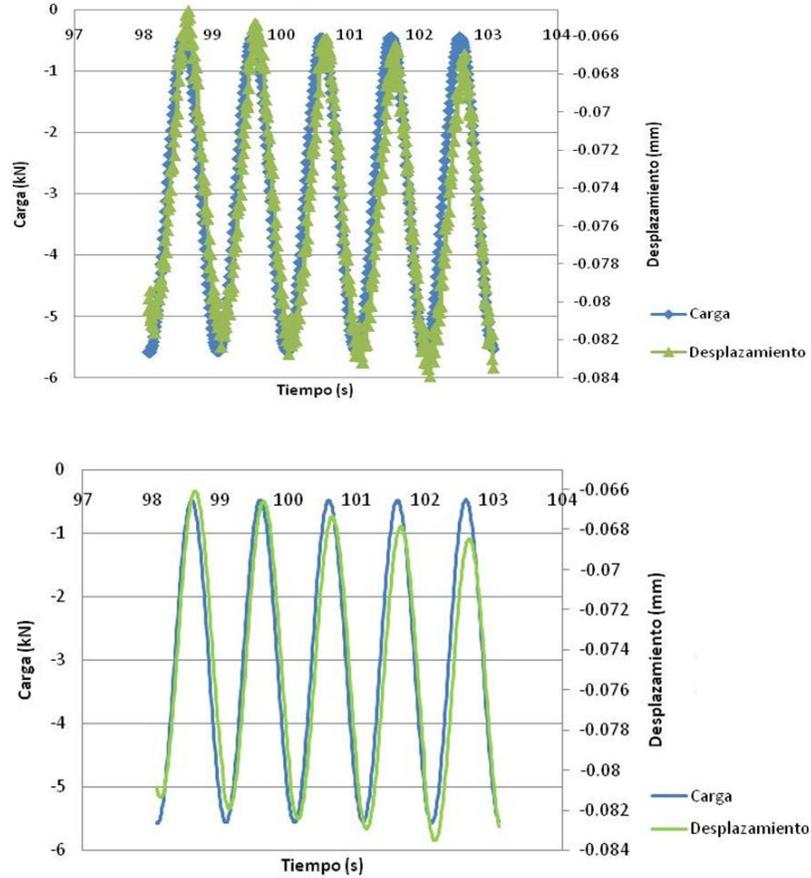
El comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas fue determinado aplicando en una primera etapa cargas dinámicas para determinar el módulo de rigidez dinámico y en una segunda etapa se ensayaron los especímenes sometiéndolos a una aplicación de carga monotónica y de esta forma determinar el módulo de rigidez monotónico.

4.1.2 Caracterización De La Rigidez De Las Mezclas Asfálticas Aplicando Carga Dinámica

Para determinar la rigidez dinámica del material asfáltico se aplica una carga axial de forma senoidal a una frecuencia específica y se obtienen los valores de carga (kN) y los respectivos desplazamientos (mm) experimentados por el material, estos datos se ajustan a una curva senoidal para determinar las amplitudes correspondientes a la carga (P) y al desplazamiento (ΔL). Estableciendo el valor de las amplitudes (carga y desplazamiento), se determina el esfuerzo (σ) y la deformación unitaria (ϵ), relacionándolo con el área de la sección transversal de la probeta (A) y la longitud en la cual se mide el desplazamiento (L) respectivamente. Con base en lo anterior se establece el valor del módulo de rigidez dinámico como la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación.

Según la Tabla 6, para las diferentes aplicaciones de frecuencia, se registran los datos correspondientes a los últimos cinco ciclos para realizar el ajuste a una curva senoidal.

Figura 20. Señales de Carga y Desplazamiento en el tiempo Probeta 2221_R2 a temperatura de 3°C y frecuencia 1 Hz, antes y después del ajuste de datos



Fuente: Autor

En la Figura 20, se muestra la forma de las curvas de carga y desplazamiento, antes y después del ajuste de datos realizado por la minimización del error cuadrado. El valor del módulo dinámico es el resultado de promediar los módulos de rigidez obtenidos para cada uno de los cinco ciclos, según la combinación de temperatura y frecuencia a la cual haya sido realizado el ensayo. En el Anexo 2 se puede consultar los valores del módulo

dinámico de las mezclas asfálticas que fueron ensayadas. Los resultados obtenidos muestran en general, que los valores de mayor magnitud del módulo dinámico se obtienen para combinaciones en las cuales el material es ensayado a bajas temperaturas (3°C) y altas frecuencias de aplicación de la carga (10Hz).

4.1.3 Rigidez De La Mezcla Asfáltica Aplicando Carga Monotónica (Equipo Automatizado)

La rigidez monotónica del material asfáltico se determina a través de la aplicación de una carga axial a una tasa de deformación constante (1, 7 y 15 mm/min), hasta producir una deformación máxima de 0.1 mm. A partir de este ensayo se obtienen los valores de carga (kN) y los respectivos desplazamientos (mm), ver Figura 21.

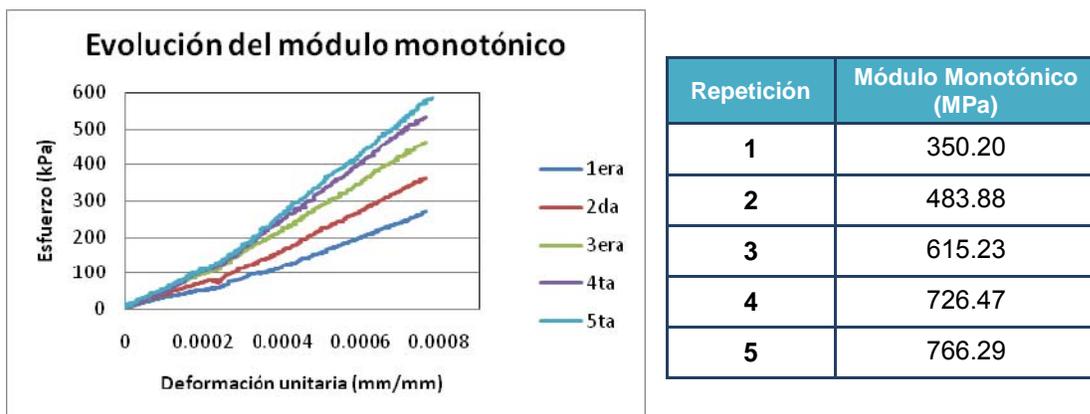
Figura 21. Carga aplicada en función del desplazamiento bajo la aplicación de una carga monotónica a diferentes velocidades de deformación

Fuente: Autor

Teniendo los valores correspondientes a la carga aplicada y al desplazamiento, se determina el esfuerzo (σ) y la deformación unitaria (ϵ), relacionándolo con el área de la sección transversal de la probeta (A) y la longitud en la cual se mide el desplazamiento (L) respectivamente. Con base en lo anterior, se establece el valor del módulo de rigidez dinámico como la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación (pendiente de la recta).

Partiendo de lo referenciado en el numeral 3.5.3, en la Figura 22 se observa la evolución del módulo de rigidez monotónico cuando se realiza el ensayo de manera consecutiva (5 veces). La mezcla asfáltica presenta una tendencia a incrementar el módulo pero este se estabiliza alrededor de la quinta repetición del ensayo y se registra como valor del módulo de rigidez monotónico, el mayor valor encontrado ó cuando se presente una variación menor al 10% entre dos medidas consecutivas. En el Anexo 2, se consolidan los valores del módulo monotónico de las mezclas ensayadas.

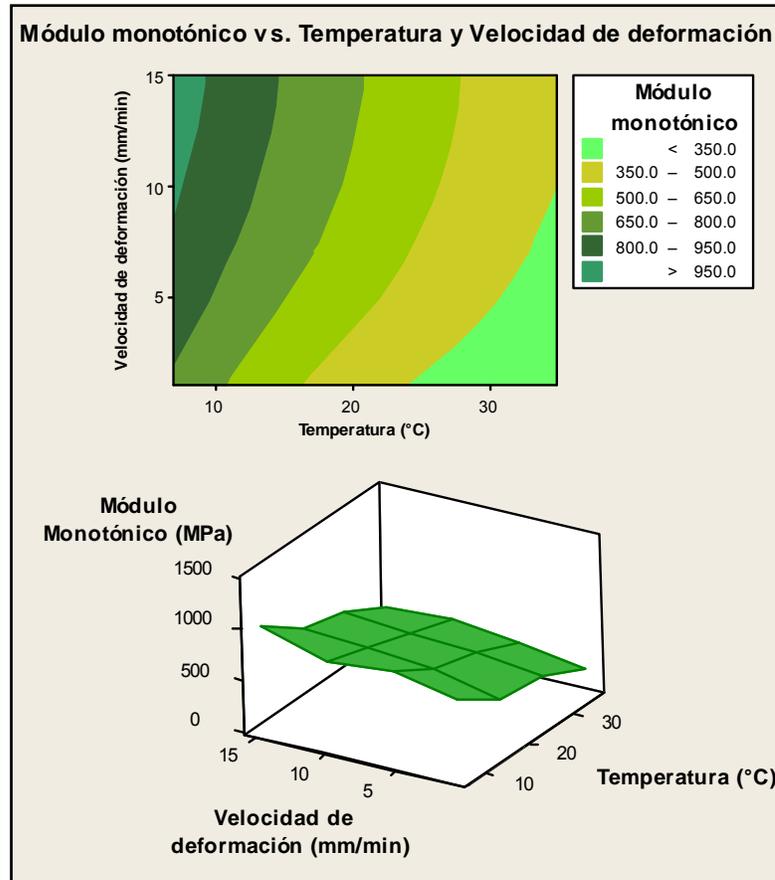
Figura 22. Evolución del módulo monotónico según número de repeticiones (consecutivas) del ensayo



Fuente: Autor

Al igual que el comportamiento bajo carga dinámica, el módulo monotónico presenta un incremento cuando es sometido a temperaturas bajas (7°C) y altas velocidades de deformación (15 mm/min).

Figura 23. Gráfica de contorno y 3D, del módulo monotónico influenciado por la temperatura y la velocidad de deformación



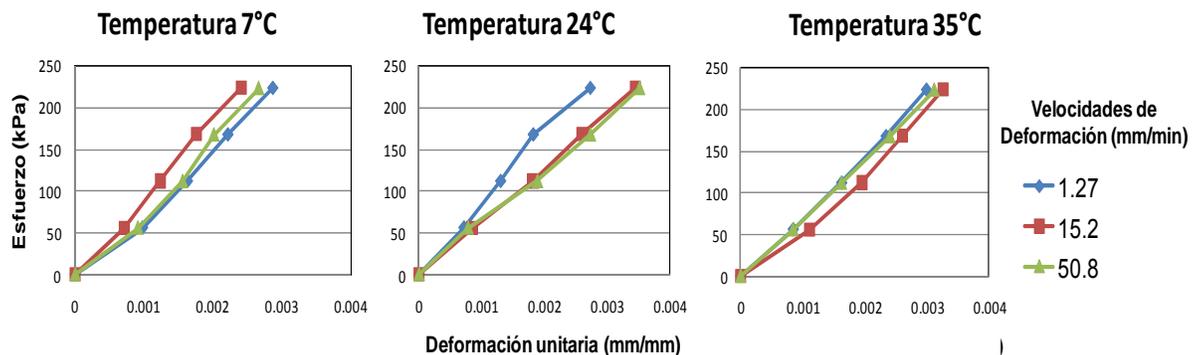
Fuente: Autor

4.1.4 Rigidez De La Mezcla Asfáltica Aplicando Carga Monotónica (Equipo De Operación Manual)

Dentro del procedimiento llevado a cabo para determinar la rigidez monotónica, haciendo uso de un equipo de operación manual, se obtuvieron los siguientes resultados: El comportamiento de la rigidez no presentó una sensibilidad a la temperatura y a la velocidad de deformación aplicada que permitiera obtener un patrón de comportamiento coherente. Se esperaba obtener módulos de rigidez mayores cuando el material era sometido al ensayo a temperaturas bajas y velocidades de deformación mayores y por otro lado, los valores de módulo menores se presentaron a altas temperaturas y velocidades de deformación bajas.

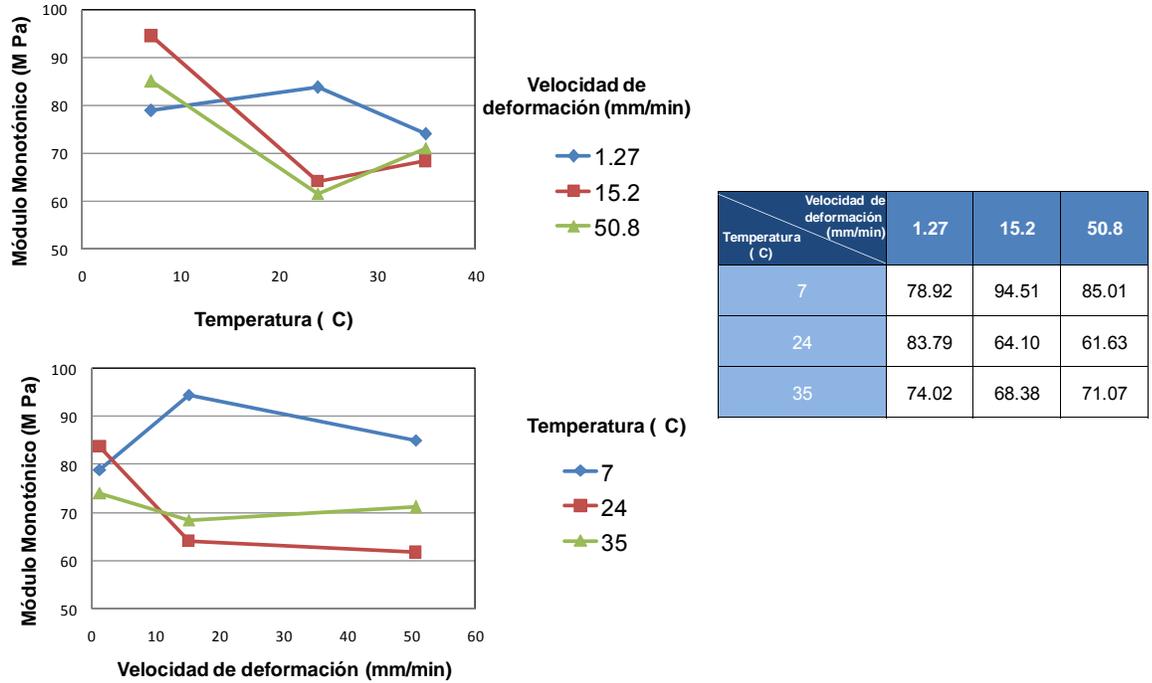
Las Figuras 24 y 25, muestran las curvas obtenidas para la probeta 10_2112_R3 a las diferentes temperaturas y velocidades de deformación de la prueba.

Figura 24. Comportamiento del esfuerzo en función de la deformación bajo carga monotónica (equipo de operación manual)



Fuente: Autor

Figura 25. Comportamiento de la rigidez monotónica (equipo de operación manual)



Fuente: Autor

La mayor dificultad presentada al realizar la prueba usando un marco de carga de operación manual, es lograr mantener constante la aplicación de una carga a una velocidad de deformación específica. Además se intenta no someter la probeta a la acumulación de deformación que produzcan daño permanente en el material, para lo cual la aplicación de esfuerzos debe ser en un intervalo corto de tiempo y deformaciones pequeñas, en este caso se contó con un deformímetro análogo de una precisión de 0.001 pulgadas y en la Tabla 10, se determina la duración de la prueba para las diferentes velocidades de deformación hasta alcanzar como máximo una deformación de 1mm.

Tabla 10. Aplicación de la carga monotónica a las diferentes velocidades de deformación constante

Precisión del deformímetro		0.001	in
		0.0254	mm
Velocidad de deformación			
mm/min	1.27	15.2	50.8
líneas /s	0.83	9.97	33.33
Tiempo de duración de la prueba			
segundos	47.24	3.95	1.18
Deformación máxima alcanzada			
1	mm	≈	39.37 líneas

Fuente: Autor

4.2 EVALUACIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS DE LA REGIÓN (SANTANDER)

Partiendo de la importancia de determinar el módulo de rigidez dinámico de la mezcla asfáltica para realizar de forma más precisa la evaluación y diseño de las estructuras de pavimento flexible, es necesario definir la forma en que los diferentes materiales que componen la mezcla afectan la rigidez. Varios trabajos de investigación se han desarrollado para evaluar la influencia de los materiales sobre la rigidez de la mezcla asfáltica, entre los cuales se pueden consultar (IWANAGA; 2007) y (PICADO-SANTOS, CAPITAO y PAIS, 2003), mostrando un panorama en el cual la formulación de la mezcla y las metodologías de fabricación juegan un papel determinante en las características mecánicas finales.

De acuerdo al diseño experimental llevado a cabo, se puede determinar la influencia de los parámetros de diseño en la respuesta estructural de la mezcla asfáltica, esto se logra al apreciar los cambios que se presentan en la rigidez ocasionados al emplear en la fabricación de la mezcla asfáltica diferentes combinaciones de los niveles de cada parámetro de interés para el estudio. Los factores o parámetros de diseño de la mezcla que se evaluaron en el proyecto de investigación se enumeran en:

- **FACTOR 1: Contenido de asfalto.** Se elaboraron mezclas utilizando tres niveles diferentes de porcentaje: 4.5, 5.0 y 5.5%.
- **FACTOR 2: Tipo de asfalto.** Se fabricaron las probetas haciendo uso de dos tipos de asfalto, un asfalto convencional de penetración 60/70 y un asfalto modificado con adición de asfáltita de penetración 20/30.

- **FACTOR 3: Tipo de mezcla.** Para evaluar la influencia de la gradación empleada en el módulo dinámico, se elaboraron mezclas en caliente densas (MDC-2) y mezclas abiertas (M1).
- **FACTOR 4: Fuente del agregado.** Se utilizó material granular extraído de dos fuentes, las cuales fueron: Río Chicamocha y agregado del Río Rionegro.

A partir de lo anterior se determina la influencia de los parámetros de diseño en la rigidez de la mezcla, evaluando su efecto al realizar una comparación entre los diseños manteniendo constante 3 factores de los 4 factores evaluados en la mezcla. En la Figura 15, del numeral 3.1 se muestra la nomenclatura utilizada para facilitar el análisis de los diferentes diseños de mezcla asfáltica propuestos.

Por cada mezcla asfáltica propuesta se realizaron dos probetas adicionales con las mismas especificaciones de los 4 factores de diseño, los valores de módulo rigidez promediados de las réplicas fueron los utilizados para realizar el análisis de la influencia sobre la rigidez de la mezcla sometida a las pruebas bajo carga dinámica y monotónica.

4.2.1 Contenido De Asfalto

Cabe recordar que el segundo número de la nomenclatura empleada para la identificación de la probeta, indica el contenido de asfalto que posee la mezcla. El número 1 indica un contenido de asfalto de 4.5%, el número 2

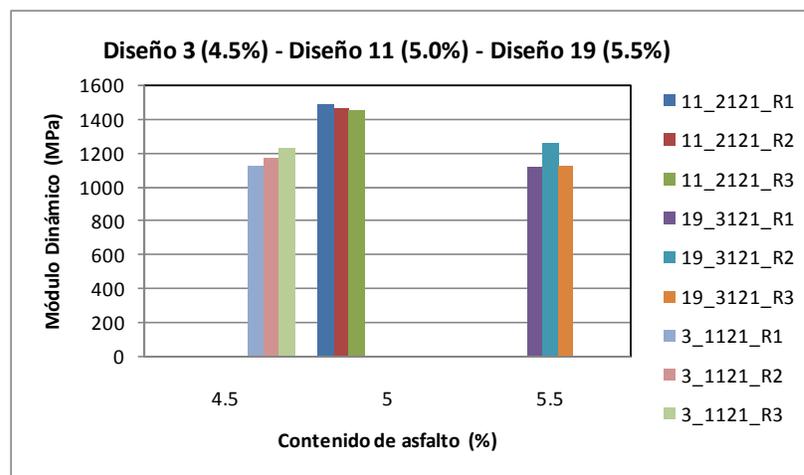
significa un contenido del 5.0% y por último el número 3 indica un contenido de asfalto de 5.5%.

- **Módulo Dinámico**

Los resultados encontrados se consolidan en la Tabla 11, en donde se aprecia la cantidad de asfalto óptimo requerido para obtener los mayores valores de módulo dinámico realizando la comparación entre las mezclas en las cuales solo variaba el contenido de asfalto y se mantenían los otros factores de diseño constantes (tipo de asfalto, el tipo de mezcla y la fuente de extracción del agregado).

En general las mezclas asfálticas elaboradas presentan un contenido óptimo de asfalto entre 5.0% a 5.5%.

Figura 26. Comportamiento de la rigidez según el contenido de asfalto de la mezcla asfáltica



Fuente: Autor

Tabla 11. Influencia del contenido de asfalto en la rigidez dinámica de la mezcla asfáltica

MÓDULO DINÁMICO									
DISEÑO	ASFALTO	MEZCLA	AGREGADO	OBSERVACIÓN	DISEÑO	ASFALTO	MEZCLA	AGREGADO	OBSERVACIÓN
1_1111	20/30	MDC-2	CHICAMOCHA	*	2_1112	20/30	MDC-2	RIONEGRO	5.5%
9_2111					10_2112				
17_3111					18_3112				
3_1121	20/30	M-1	CHICAMOCHA	5.0%	4_1122	20/30	M-1	RIONEGRO	5.0%
11_2121					12_2122				
19_3121					20_3122				
5_1211	60/70	MDC-2	CHICAMOCHA	5.5%	6_1212	60/70	MDC-2	RIONEGRO	4.5%
13_2211					14_2212				
21_3211					22_3212				
7_1221	60/70	M-1	CHICAMOCHA	5.0%	8_1222	60/70	M-1	RIONEGRO	5.0%
15_2221					16_2222				
23_3221					24_3222				

Fuente: Autor

- **Módulo Monotónico**

El comportamiento de la rigidez del material asfáltico sometido a una carga monotónica presentó la misma tendencia que la rigidez bajo el ensayo dinámico, los mayores módulos se presentan para contenidos de asfalto entre 5.0% y 5.5%. En la Tabla 12, se muestran la tendencia observada cuando se analiza el contenido de asfalto y su influencia en el módulo de rigidez monotónico.

Tabla 12. Influencia del contenido de asfalto en la rigidez monotónica de la mezcla asfáltica

MÓDULO MONOTÓNICO									
DISEÑO	ASFALTO	MEZCLA	AGREGADO	OBSERVACIÓN	DISEÑO	ASFALTO	MEZCLA	AGREGADO	OBSERVACIÓN
1_1111	20/30	MDC-2	CHICAMOCHA	*	2_1112	20/30	MDC-2	RIONEGRO	5.5%
9_2111					10_2112				
17_3111					18_3112				
3_1121	20/30	M-1	CHICAMOCHA	5.5%	4_1122	20/30	M-1	RIONEGRO	5.0%
11_2121					12_2122				
19_3121					20_3122				
5_1211	60/70	MDC-2	CHICAMOCHA	5.5%	6_1212	60/70	MDC-2	RIONEGRO	5.0%
13_2211					14_2212				
21_3211					22_3212				
7_1221	60/70	M-1	CHICAMOCHA	5.0%	8_1222	60/70	M-1	RIONEGRO	5.0%
15_2221					16_2222				
23_3221					24_3222				

Fuente: Autor

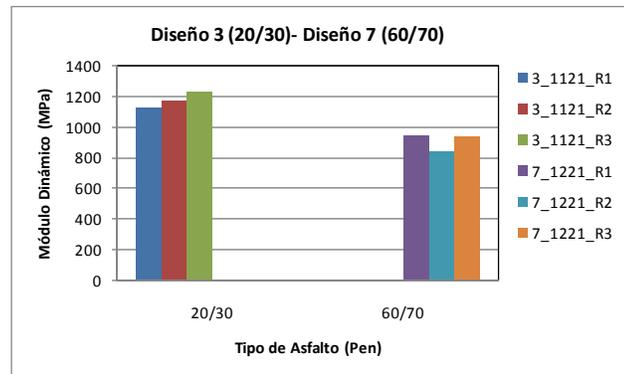
4.2.2 Tipo De Asfalto

Para tener en cuenta, el tercer número de la nomenclatura empleada para la identificación de la probeta, indica el tipo de asfalto que posee la mezcla. El número 1 indica un tipo de asfalto modificado de penetración 20/30, y el número 2 significa un tipo de asfalto convencional de penetración 60/70.

- **Módulo Dinámico**

En la Figura 27, se comparan las mezclas fabricadas con asfalto 20/30 con las mezclas que contienen asfalto 60/70, los resultados obtenidos para los diferentes diseños se muestran en la Tabla 13:

Figura 27. Comportamiento de la rigidez según el tipo de asfalto de la mezcla asfáltica



Fuente: Autor

El comportamiento de la rigidez de la mezcla asfáltica según el tipo de asfalto utilizado está relacionado con la fuente del agregado utilizado en la mezcla del concreto asfáltico. Para mezclas realizadas con agregado extraído de la fuente del Río Chicamocha predominan módulos mayores cuando se combina con asfalto de penetración 20/30. El asfalto 60/70 presenta mayores módulos dinámicos cuando se mezcla con agregado del Río Rionegro.

Tabla 13. Influencia del tipo de asfalto en la rigidez dinámica de la mezcla asfáltica

MÓDULO DINÁMICO																																																													
DISEÑO	% ASFALTO	MEZCLA	AGREGADO	OBSERVACIÓN	DISEÑO	% ASFALTO	MEZCLA	AGREGADO	OBSERVACIÓN																																																				
1_1111	4.5	MDC-2	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	2_1112	4.5	MDC-2	RIONEGRO	60/70 > 20/30																																																				
5_1211					6_1212					3_1121	4.5	M-1	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	4_1122	4.5	M-1	RIONEGRO	60/70 > 20/30	7_1221	8_1222	9_2111	5.0	MDC-2	CHICAMOCHA	*	10_2112	5.0	MDC-2	RIONEGRO	20/30 > 60/70	13_2211	14_2212	11_2121	5.0	M-1	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	12_2122	5.0	M-1	RIONEGRO	60/70 > 20/30	15_2221	16_2222	17_3111	5.5	MDC-2	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	18_3112	5.5	MDC-2	RIONEGRO	20/30 > 60/70	21_3211	22_3212	19_3121	5.5	M-1	CHICAMOCHA
3_1121	4.5	M-1	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	4_1122	4.5	M-1	RIONEGRO	60/70 > 20/30																																																				
7_1221					8_1222					9_2111	5.0	MDC-2	CHICAMOCHA	*	10_2112	5.0	MDC-2	RIONEGRO	20/30 > 60/70	13_2211	14_2212	11_2121	5.0	M-1	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	12_2122	5.0	M-1	RIONEGRO	60/70 > 20/30	15_2221	16_2222	17_3111	5.5	MDC-2	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	18_3112	5.5	MDC-2	RIONEGRO	20/30 > 60/70	21_3211	22_3212	19_3121	5.5	M-1	CHICAMOCHA	_ =	20_3122	5.5	M-1	RIONEGRO	60/70 > 20/30	23_3221	24_3222				
9_2111	5.0	MDC-2	CHICAMOCHA	*	10_2112	5.0	MDC-2	RIONEGRO	20/30 > 60/70																																																				
13_2211					14_2212					11_2121	5.0	M-1	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	12_2122	5.0	M-1	RIONEGRO	60/70 > 20/30	15_2221	16_2222	17_3111	5.5	MDC-2	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	18_3112	5.5	MDC-2	RIONEGRO	20/30 > 60/70	21_3211	22_3212	19_3121	5.5	M-1	CHICAMOCHA	_ =	20_3122	5.5	M-1	RIONEGRO	60/70 > 20/30	23_3221	24_3222																
11_2121	5.0	M-1	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	12_2122	5.0	M-1	RIONEGRO	60/70 > 20/30																																																				
15_2221					16_2222					17_3111	5.5	MDC-2	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	18_3112	5.5	MDC-2	RIONEGRO	20/30 > 60/70	21_3211	22_3212	19_3121	5.5	M-1	CHICAMOCHA	_ =	20_3122	5.5	M-1	RIONEGRO	60/70 > 20/30	23_3221	24_3222																												
17_3111	5.5	MDC-2	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	18_3112	5.5	MDC-2	RIONEGRO	20/30 > 60/70																																																				
21_3211					22_3212					19_3121	5.5	M-1	CHICAMOCHA	_ =	20_3122	5.5	M-1	RIONEGRO	60/70 > 20/30	23_3221	24_3222																																								
19_3121	5.5	M-1	CHICAMOCHA	_ =	20_3122	5.5	M-1	RIONEGRO	60/70 > 20/30																																																				
23_3221					24_3222																																																								

Fuente: Autor

- **Módulo Monotónico**

Cuando la mezcla asfáltica es sometida al ensayo con carga monotónica, la rigidez de la mezcla presenta un comportamiento similar al descrito cuando la probeta se somete a carga dinámica. En la Tabla 14, se registran los resultados obtenidos durante las pruebas.

Tabla 14. Influencia del tipo de asfalto en la rigidez monotónica de la mezcla asfáltica

MÓDULO MONOTÓNICO									
DISEÑO	% ASFALTO	MEZCLA	AGREGADO	OBSERVACIÓN	DISEÑO	% ASFALTO	MEZCLA	AGREGADO	OBSERVACIÓN
1_1111	4.5	MDC-2	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	2_1112	4.5	MDC-2	RIONEGRO	60/70 > 20/30
5_1211					6_1212				
3_1121	4.5	M-1	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	4_1122	4.5	M-1	RIONEGRO	60/70 > 20/30
7_1221					8_1222				
9_2111	5.0	MDC-2	CHICAMOCHA	*	10_2112	5.0	MDC-2	RIONEGRO	60/70 > 20/30
13_2211					14_2212				
11_2121	5.0	M-1	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	12_2122	5.0	M-1	RIONEGRO	60/70 > 20/30
15_2221					16_2222				
17_3111	5.5	MDC-2	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	18_3112	5.5	MDC-2	RIONEGRO	20/30 > 60/70
21_3211					22_3212				
19_3121	5.5	M-1	CHICAMOCHA	20/30 > 60/70	20_3122	5.5	M-1	RIONEGRO	60/70 > 20/30
23_3221					24_3222				

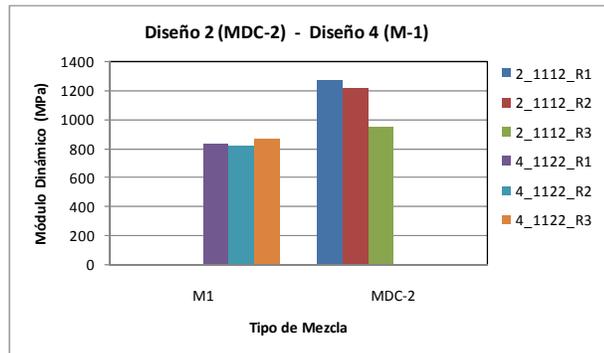
Fuente: Autor

4.2.3 Tipo De Mezcla

El cuarto número de la nomenclatura empleada para la identificación de la probeta, indica el tipo de mezcla del diseño. El número 1 indica que se uso una gradación densa MDC-2, y el número 2 significa un tipo de gradación abierta M-1.

Los resultados indican que el módulo de rigidez sin importar el contenido de asfalto, el tipo de asfalto y la fuente de agregado utilizado para la elaboración de la mezcla, se presentan mayores valores de rigidez cuando la mezcla posee una gradación densa MDC-2 el módulo de rigidez decrece con el aumento de la porosidad de la mezcla, ver Figura 28.

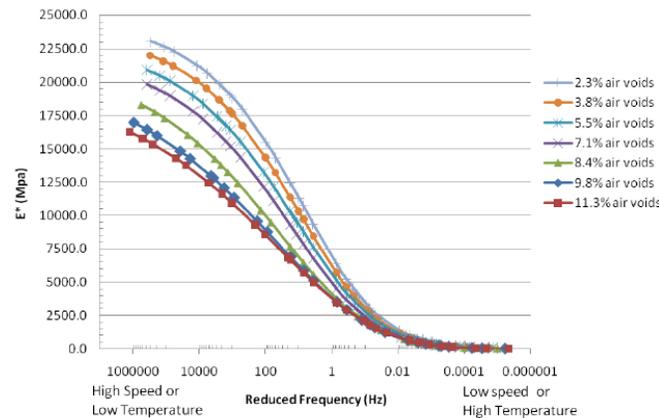
Figura 28. Comportamiento de la rigidez según el tipo de mezcla asfáltica



Fuente: Autor

La variable porosidad es altamente significativa en la rigidez de la mezcla, el estudio de (ROWE, HAKIMZADEH and BLANKENSHIP; 2008) presenta las curvas maestras de cada una de las mezclas con diferentes porcentajes de vacíos (entre 2.3% a 11.3%), las cuales a altas frecuencias y bajas temperaturas tienen una mayor diferencia de los módulos de rigidez, ver Figura 29.

Figura 29. Curva maestra para diferentes porcentajes de vacíos de la mezcla.



Fuente: (ROWE, HAKIMZADEH and BLANKENSHIP; 2008)

En las Tablas 15 y 16, se puede observar el comportamiento de la rigidez de la mezcla según la gradación utilizada, en los dos casos de pruebas llevadas a cabo sobre la mezcla, bajo carga dinámica y bajo carga monotónica.

Tabla 15. Influencia del tipo de mezcla en la rigidez dinámica de la mezcla asfáltica

MÓDULO DINÁMICO									
DISEÑO	% ASFALTO	ASFALTO	AGREGADO	OBSERVACIÓN	DISEÑO	% ASFALTO	MEZCLA	AGREGADO	OBSERVACIÓN
1_1111	4.5	20/30	CHICAMOCHA	MDC-2 > M-1	2_1112	4.5	20/30	RIONEGRO	MDC-2 > M-1
3_1121					4_1122				
5_1211	4.5	60/70	CHICAMOCHA	MDC-2 > M-1	6_1212	4.5	60/70	RIONEGRO	MDC-2 > M-1
7_1221					8_1222				
9_2111	5.0	20/30	CHICAMOCHA	*	10_2112	5.0	20/30	RIONEGRO	_=
11_2121					12_2122				
13_2211	5.0	60/70	CHICAMOCHA	_=	14_2212	5.0	60/70	RIONEGRO	M-1 > MDC-2
15_2221					16_2222				
17_3111	5.5	20/30	CHICAMOCHA	MDC-2 > M-1	18_3112	5.5	20/30	RIONEGRO	MDC-2 > M-1
19_3121					20_3122				
21_3211	5.5	60/70	CHICAMOCHA	MDC-2 > M-1	22_3212	5.5	60/70	RIONEGRO	MDC-2 > M-1
23_3221					24_3222				

Fuente: Autor

Tabla 16. Influencia del tipo de mezcla en la rigidez monotónica de la mezcla asfáltica

MÓDULO MONOTÓNICO									
DISEÑO	% ASFALTO	ASFALTO	AGREGADO	OBSERVACIÓN	DISEÑO	% ASFALTO	MEZCLA	AGREGADO	OBSERVACIÓN
1_1111	4.5	20/30	CHICAMOCHA	MDC-2 > M-1	2_1112	4.5	20/30	RIONEGRO	MDC-2 > M-1
3_1121					4_1122				
5_1211	4.5	60/70	CHICAMOCHA	MDC-2 > M-1	6_1212	4.5	60/70	RIONEGRO	MDC-2 > M-1
7_1221					8_1222				
9_2111	5.0	20/30	CHICAMOCHA	*	10_2112	5.0	20/30	RIONEGRO	_=
11_2121					12_2122				
13_2211	5.0	60/70	CHICAMOCHA	MDC-2 > M-1	14_2212	5.0	60/70	RIONEGRO	MDC-2 > M-1
15_2221					16_2222				
17_3111	5.5	20/30	CHICAMOCHA	MDC-2 > M-1	18_3112	5.5	20/30	RIONEGRO	MDC-2 > M-1
19_3121					20_3122				
21_3211	5.5	60/70	CHICAMOCHA	MDC-2 > M-1	22_3212	5.5	60/70	RIONEGRO	M-1 > MDC-2
23_3221					24_3222				

Fuente: Autor

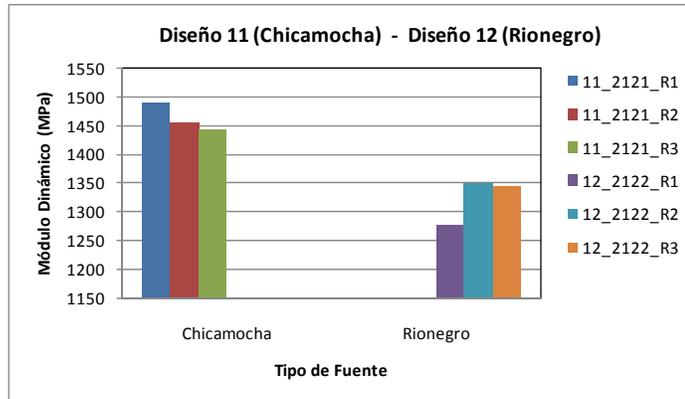
4.2.4 Fuente Del Agregado

Por último, se tiene el origen de la extracción del material granular con el que fue fabricada la mezcla asfáltica. El número 1 indica que la muestra de agregado fue extraída del Río Chicamocha y el número 2 corresponde a un material granular extraído del Río Rionegro.

- **Módulo Dinámico**

En la Figura 30, y en la Tabla 17, se observa la tendencia presentada por la rigidez de la mezcla asfáltica cuando se evalúa la influencia del origen del material granular.

Figura 30. Comportamiento de la rigidez según la fuente del agregado mineral



Fuente: Autor

Se observa una interacción entre el tipo de asfalto y el origen del material granular usado. El agregado extraído del Río Chicamocha presenta mayores módulos en los casos en los cuales la mezcla es fabricada con asfalto modificado 20/30.

Por otro lado el agregado del Río Rionegro tiene mayores módulos en las mezclas fabricadas con asfalto de penetración 60/70.

Tabla 17. Influencia de la fuente del agregado en la rigidez dinámica de la mezcla asfáltica

MÓDULO DINÁMICO									
DISEÑO	% ASFALTO	ASFALTO	MEZCLA	OBSERVACIÓN	DISEÑO	% ASFALTO	ASFALTO	MEZCLA	OBSERVACIÓN
1_1111	4.5	20/30	MDC-2	CHICAMOCHA > RIONEGRO	3_1121	4.5	20/30	M-1	CHICAMOCHA > RIONEGRO
2_1112					4_1122				
5_1211					7_1221				
6_1212	4.5	60/70	MDC-2	RIONEGRO > CHICAMOCHA	8_1222	4.5	60/70	M-1	RIONEGRO > CHICAMOCHA
9_2111					11_2121				
10_2112	5.0	20/30	MDC-2	.	12_2122	5.0	20/30	M-1	CHICAMOCHA > RIONEGRO
13_2211					15_2221				
14_2212	5.0	60/70	MDC-2	CHICAMOCHA > RIONEGRO	16_2222	5.0	60/70	M-1	RIONEGRO > CHICAMOCHA
17_3111					19_3121				
18_3112	5.5	20/30	MDC-2	CHICAMOCHA > RIONEGRO	20_3122	5.5	20/30	M-1	CHICAMOCHA > RIONEGRO
21_3211					23_3221				
22_3212	5.5	60/70	MDC-2	_="	24_3222	5.5	60/70	M-1	_="

Fuente: Autor

- **Módulo Monotónico**

Las mezclas asfálticas presentaron el mismo comportamiento al análisis realizado bajo carga dinámica. Se evidencia una interacción entre el tipo de asfalto usado en la preparación de la mezcla y el origen del material granular.

Tabla 18. Influencia de la fuente del agregado en la rigidez monotónica de la mezcla asfáltica

MÓDULO MONOTÓNICO									
DISEÑO	% ASFALTO	ASFALTO	MEZCLA	OBSERVACIÓN	DISEÑO	% ASFALTO	ASFALTO	MEZCLA	OBSERVACIÓN
1_1111	4.5	20/30	MDC-2	CHICAMOCHA > RIONEGRO	3_1121	4.5	20/30	M-1	CHICAMOCHA > RIONEGRO
2_1112					4_1122				
5_1211	4.5	60/70	MDC-2	RIONEGRO > CHICAMOCHA	7_1221	4.5	60/70	M-1	RIONEGRO > CHICAMOCHA
6_1212					8_1222				
9_2111	5.0	20/30	MDC-2	*	11_2121	5.0	20/30	M-1	CHICAMOCHA > RIONEGRO
10_2112					12_2122				
13_2211	5.0	60/70	MDC-2	RIONEGRO > CHICAMOCHA	15_2221	5.0	60/70	M-1	RIONEGRO > CHICAMOCHA
14_2212					16_2222				
17_3111	5.5	20/30	MDC-2	CHICAMOCHA > RIONEGRO	19_3121	5.5	20/30	M-1	CHICAMOCHA > RIONEGRO
18_3112					20_3122				
21_3211	5.5	60/70	MDC-2	CHICAMOCHA > RIONEGRO	23_3221	5.5	60/70	M-1	RIONEGRO > CHICAMOCHA
22_3212					24_3222				

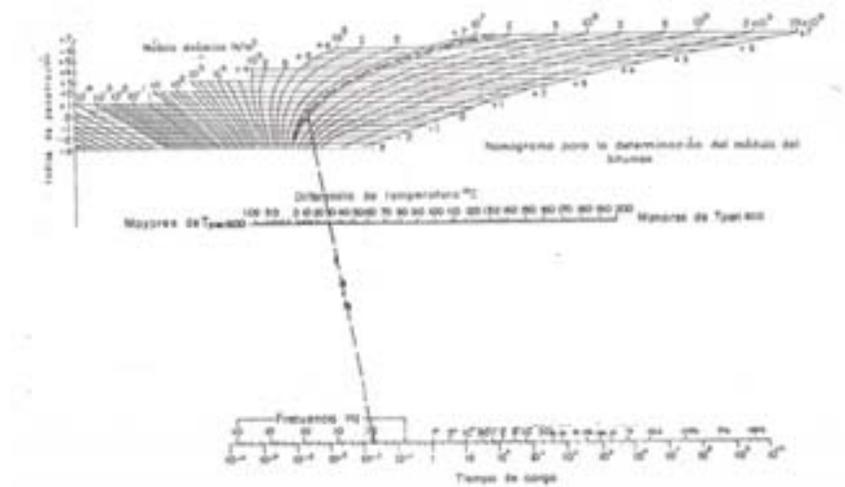
Fuente: Autor

4.3 EVALUACIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO

Se han desarrollado varios modelos empíricos y semi-empíricos para estimar de manera aproximada un valor de rigidez dinámico del material asfáltico, estos modelos utilizan como variables de entrada, las proporciones y las características mecánicas de los materiales que componen la mezcla asfáltica (ver numeral 2.3). Además se establecen correlaciones entre la rigidez de la mezcla determinada por metodologías de ensayo diferentes, un estudio preliminar para observar las posibilidades de relacionar resultados de pruebas monotónicas con los resultados obtenidos a partir de pruebas con carga repetitivas para evaluar el desempeño de las mezclas asfálticas (SILVA *et al*; 2007).

La metodología definida por Van Der Poel determina la rigidez del asfalto a partir de la susceptibilidad térmica del bitumen a través del parámetro de índice de penetración, además toma un delta de temperatura el cual es determinado como la diferencia entre una temperatura de referencia (penetración de 800×10^{-1}) y la temperatura de penetración del asfalto (requerida), por último la rigidez del bitumen depende del tiempo de carga en el cual se aplica un esfuerzo o deformación sobre el material, ver Figura 31. Partiendo de lo anterior, este proceso permite vislumbrar la capacidad de determinar la rigidez de la mezcla a partir de parámetros similares a los anteriormente expuestos, involucrando la sensibilidad a la temperatura y deformación de la mezcla.

Figura 31. Nomograma de Van Der Poel



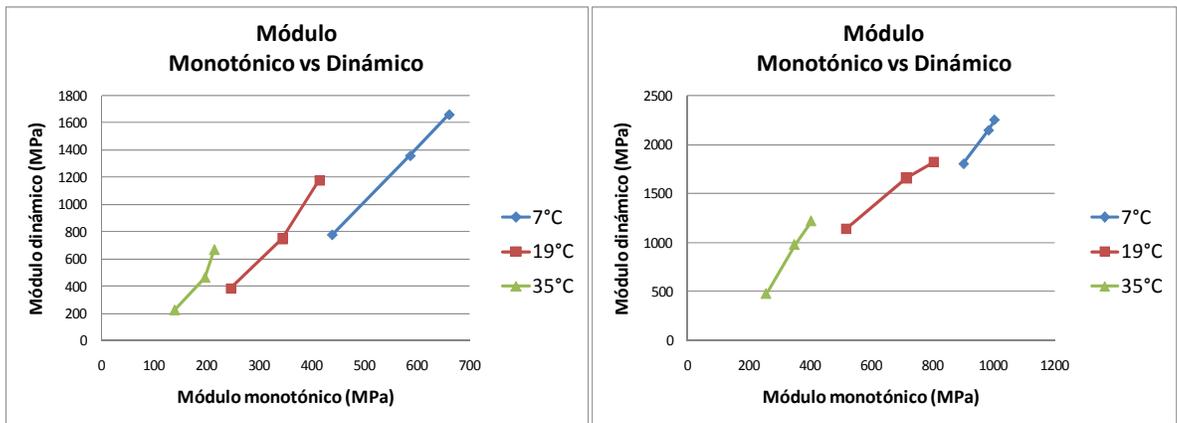
Fuente: (CASTRO, COLOSSIO Y QUISPE)

Con el propósito de determinar un valor de rigidez dinámico de la mezcla asfáltica, se ha planteado utilizar un modelo que incluya como variable independiente un valor de rigidez obtenido mediante una prueba en la cual se aplique una carga monotónica sobre el espécimen de concreto asfáltico, partiendo del hecho que siendo otro valor de rigidez de la mezcla, involucre implícitamente variables como la rigidez del asfalto y la composición de la mezcla, además de los factores externos en los cuales se determina la rigidez como lo son la temperatura y la velocidad de carga.

4.3.1 Relación Directa Entre Valores De Rigidez Dinámica Y Monotónica

El primer análisis llevado a cabo es observar la relación existente entre los datos obtenidos a través de las dos metodologías de ensayo utilizadas para determinar la rigidez de la mezcla asfáltica. En la Figura 32, se observa el comportamiento de los datos de las probetas 4_1122_R1 y 16_2222_R3, respectivamente.

Figura 32. Tendencia de los datos de la probeta 4_1122_R1 y 16_2222_R3

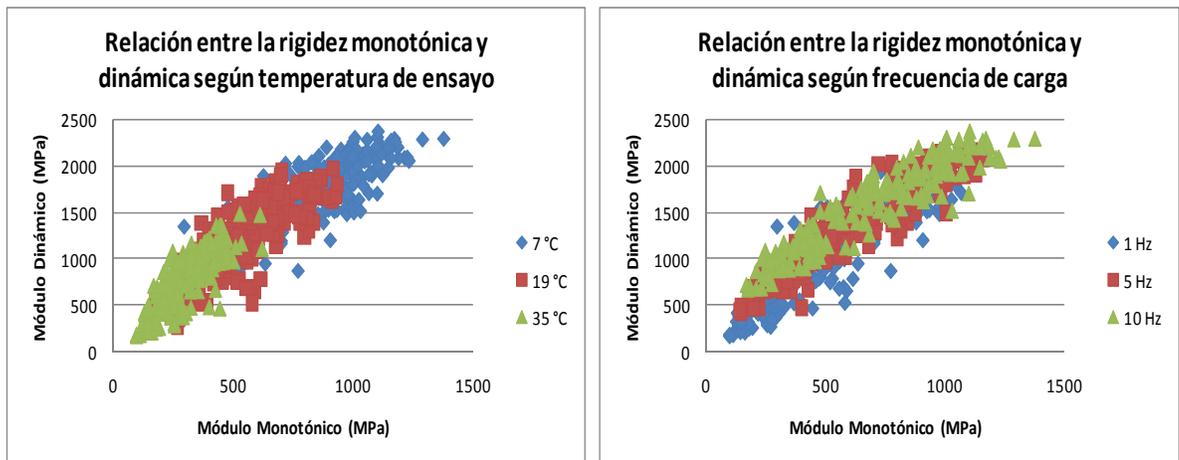


Fuente: Autor

Para las diferentes combinaciones de temperatura y frecuencia y/o velocidad de deformación, la tendencia de los resultados es no lineal. La relación en las medidas de rigidez se ve influenciada por la temperatura y la velocidad de deformación.

En la Figura 33 se grafica el módulo monotónico comparándolo contra el módulo dinámico para los 24 diseños de mezcla ensayados, mostrando la tendencia de los datos según la temperatura y la frecuencia y/o velocidad de deformación del ensayo realizado. El comportamiento en los dos ensayos guarda correlación teniendo en cuenta que el módulo aumenta a temperaturas menores y a frecuencias de aplicación de carga o deformación mayores.

Figura 33. Relación entre la rigidez monotónica y dinámica según temperatura y frecuencia de carga del ensayo



Fuente: Autor

Se evalúa el potencial de los parámetros: temperatura, velocidad de deformación, porcentaje de vacíos de aire y módulo monotónico para determinar qué conjunto de datos correlacionan de mejor manera los valores de módulo dinámico determinados en el laboratorio. Utilizando la regresión de los mejores subconjuntos la cual se encuentra disponible en software Minitab 16 (Demo), se determina la combinación de los factores que presentan la mejor correlación lineal, identificando los subconjuntos que

generan los valores de R^2 mayores, a partir de la combinación de las variables predictoras que se desean involucrar en el modelo. De esta forma, se puede obtener el conjunto de variables que proporcionan las varianzas más pequeñas para pronosticar la variable respuesta ($|E^*|$) y descartar del modelo predictores que no aporten a la precisión.

La regresión proporciona cuatro parámetros estadísticos:

- Coeficiente de determinación (R^2): Porcentaje de variación de la variable de respuesta que se explica por su relación con una o más variables predictoras. En general, mientras más alto sea R^2 , mejor se ajustará el modelo a sus datos. R^2 está siempre entre 0 y 100%.
- R^2 ajustado: Porcentaje de variación en la variable de la respuesta que es explicada por su relación con una o más variables predictoras, ajustado para el número de predictores en el modelo. Este ajuste es importante porque R^2 siempre aumentará para cualquier modelo cuando se agregue un nuevo término. Un modelo con más términos podría parecer tener un mejor ajuste simplemente porque posee más términos. Sin embargo, algunos aumentos en R^2 podrían atribuirse únicamente a razones aleatorias.

El R^2 ajustado es una herramienta útil para comparar la potencia explicativa de modelos con diferentes números de predictores. El R^2 aumentará solamente si el nuevo término mejora el modelo más de lo que se esperaría sólo por razones de probabilidad. Disminuirá cuando un predictor mejore el modelo menos que lo esperado por probabilidad.

- Cp de Mallows: Una estadística que se utiliza como ayuda al elegir entre modelos de regresión múltiple comparables. El Cp de Mallows compara la precisión y tendencia de todo el modelo para modelos con los mejores subconjuntos de predictores. Ayuda a alcanzar un equilibrio importante con el número de predictores en el modelo. Un modelo con demasiados predictores puede ser relativamente impreciso, mientras que uno con muy pocos puede generar estimados sesgados. Un valor del Cp de Mallows que se aproxima al número de predictores más la constante indica que el modelo es relativamente preciso y no tiene sesgo en la estimación de los verdaderos coeficientes de regresión y el pronóstico de respuestas futuras.
- Error estándar de la regresión (S): Utilizado como una medida del ajuste del modelo en regresión y ANOVA. S se mide en las unidades de la variable de respuesta y representa la distancia estándar a la que se ubican los valores de datos con respecto a la línea de regresión o la desviación estándar de los residuos. Para un estudio dado, mientras la ecuación mejor pronostique la respuesta, más bajo será el valor de S.

Figura 34. Regresión de los mejores subconjuntos

Vars	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	Cp de Mallows	S	M v o e n l o T o t c o (i n % " d i V C a c a) d o		
1	83.2	83.2	204.4	222.51			X
1	59.2	59.1	1344.4	347.21	X		
1	46.7	46.7	1931.8	396.44		X	
1	2.7	2.6	4015.4	535.75	X		
2	86.7	86.6	42.7	198.43		X	X
2	83.3	83.2	202.9	222.20	X		X
2	83.2	83.2	206.4	222.69	X		X
2	78.9	78.8	412.9	249.97		X	X
3	87.4	87.4	9.8	193.02		X	X
3	86.7	86.6	44.2	198.51	X		X
3	83.3	83.2	204.3	222.30	X	X	X
3	80.7	80.6	330.2	239.36	X	X	X
4	87.6	87.5	5.0	192.08	X	X	X

Fuente: Autor (Minitab 16_Demo)

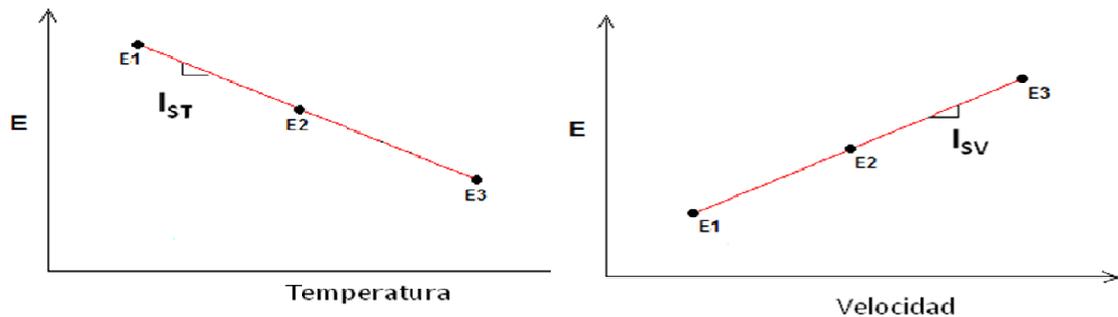
En la Figura 34, se observa que al utilizar cuatro variables para ajustar el modelo, se puede alcanzar un coeficiente de correlación ajustado de 87.5 con un Cp de Mallows de 5.0 con un error estándar de 192.08. En un primer análisis los datos se ajustaron a una relación lineal bajo los siguientes criterios:

Partiendo de los datos obtenidos mediante el ensayo bajo carga monotónica se determinó la sensibilidad a la temperatura y a la velocidad de aplicación de deformación que experimentó cada probeta sometida al ensayo.

Se determinó un índice de sensibilidad a la temperatura que refleja el comportamiento del módulo cuando es sometida la mezcla a temperaturas

de 7, 19 y 35 °C. El otro parámetro establecido es un índice de sensibilidad a la velocidad de deformación que expresa la variación del módulo a las diferentes velocidades de aplicación de la deformación 1, 7 y 15 mm/min, ver Figura 35.

Figura 35. Índices de sensibilidad a la temperatura y velocidad de deformación



Fuente: Autor

A partir de lo anterior se propone establecer una relación para obtener el módulo dinámico en función de algunas variables establecidas a través del ensayo con cargas monotónicas, estas variables son:

- Un módulo de referencia, el cual sería el valor correspondiente al módulo monotónico obtenido a la combinación de temperatura y velocidad de deformación propuesta en la investigación.
- El índice de sensibilidad a la temperatura.
- El índice de sensibilidad a la velocidad de deformación.

De las anteriores variables, la relación debe integrar la temperatura y la frecuencia a la que se desea hacer la predicción del módulo dinámico, se propone el siguiente modelo lineal:

$$|E^*| = f_1 M_{ref} + f_2 I_{ST} T + f_3 I_{SV} F_{eq} + f_4$$

Para ello se involucra la temperatura a la cual se desea encontrar el módulo dinámico. También debe encontrarse una velocidad de deformación equivalente que represente las diferentes frecuencias de 1, 5 y 10 Hz, la cual se determina como la velocidad de deformación dinámica que experimenta la probeta durante la ejecución del ensayo, esta velocidad de deformación depende de la frecuencia de aplicación de las cargas, de la temperatura a la cual se realiza el ensayo y de la porosidad de la mezcla.

$$F_{eq} = \left(\frac{f_5}{T (f_6 + \%V_a f_7)} \right) F f_8$$

En donde:

F_{eq} = Velocidad de deformación bajo carga dinámica (s^{-1})

T = Temperatura de ensayo, °C

Va = Porcentaje de vacíos de aire

F = Frecuencia de ensayo, Hz

Ajustando los datos por mínimos cuadrados se obtienen los siguientes coeficientes para la correlación propuesta:

Tabla 19. Coeficientes del modelo lineal ajustado para predecir el módulo dinámico de la mezcla

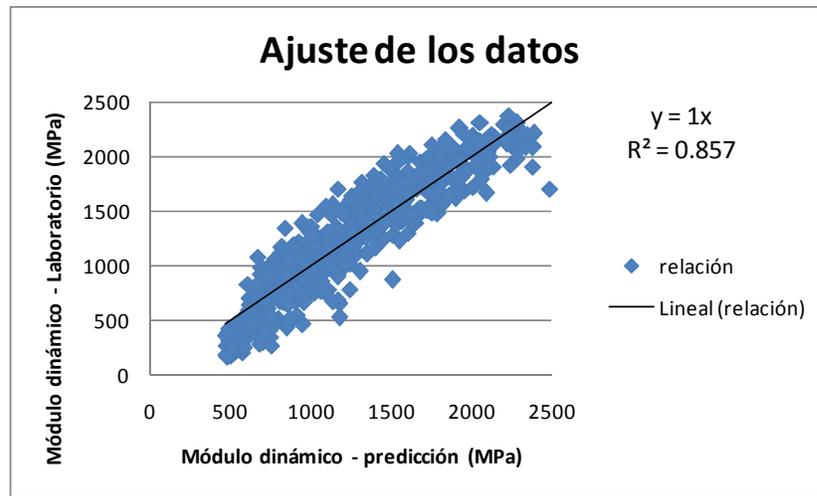
f1	1.43132
f2	0.16289
f3	1018.912
f4	409.353

f5	0.0020712
f6	-0.62257722
f7	0.05991821
f8	1.28291426

Fuente: Autor

Con el objetivo de determinar la aplicabilidad de la relación propuesta para predecir o estimar el valor de módulo dinámico, se debe comparar los resultados obtenidos en el laboratorio (real) con los obtenidos utilizando el modelo propuesto (predicción). En la Figura 36, se observa la relación entre los valores reales de módulo dinámico y los valores obtenidos de la relación propuesta. Para realizar la comparación se utiliza la gráfica en escala aritmética

Figura 36. Relación entre la rigidez dinámica obtenida en el laboratorio y el módulo a partir de la correlación propuesta



Fuente: Autor

Para evaluar la correlación que existe entre estos dos valores se definen como parámetros de bondad de ajuste el coeficiente de determinación R^2 , y la relación entre el error estándar estimado y la desviación estándar Se/Sy . Para modelos no lineales el valor de R^2 no siempre proporciona una medida de precisión del modelo, por lo tanto, para tomar cualquier decisión sobre una relación planteada se recomienda que sea evaluada basándose en el valor de SSE (suma de cuadrados del error) y el valor de la desviación estándar Sy de los valores observados con los valores ajustados por el modelo.

Para clasificar la precisión y exactitud de un modelo se han definido ciertos criterios de decisión según rangos propuestos en la NCHRP, en la Tabla 20, se presentan las diferentes categorías.

Tabla 20. Clasificación del ajuste según parámetros estadísticos

Criterio	R^2	S_e/S_y
Excelente	≥ 0.90	≤ 0.350
Bueno	0.70 - 0.89	0.36 - 0.55
Regular	0.40 - 0.69	0.56 - 0.75
Pobre	0.20 - 0.39	0.76 - 0.89
Muy pobre	≤ 0.19	≥ 0.90

Fuente: (OBULAREDDY; 2006)

El modelo lineal propuesto posee los parámetros estadísticos mostrados en la Tabla 21. Según los parámetros estadísticos definidos en la Tabla 19, la correlación proporciona un buen ajuste de los datos reales de módulo dinámico. Sin embargo, se observa que los datos de módulo dinámico para las combinaciones de temperatura de 35 °C y velocidades de deformación bajas presentan un sesgo hacia la parte inferior de la línea a 45° graficada en la Figura 35.

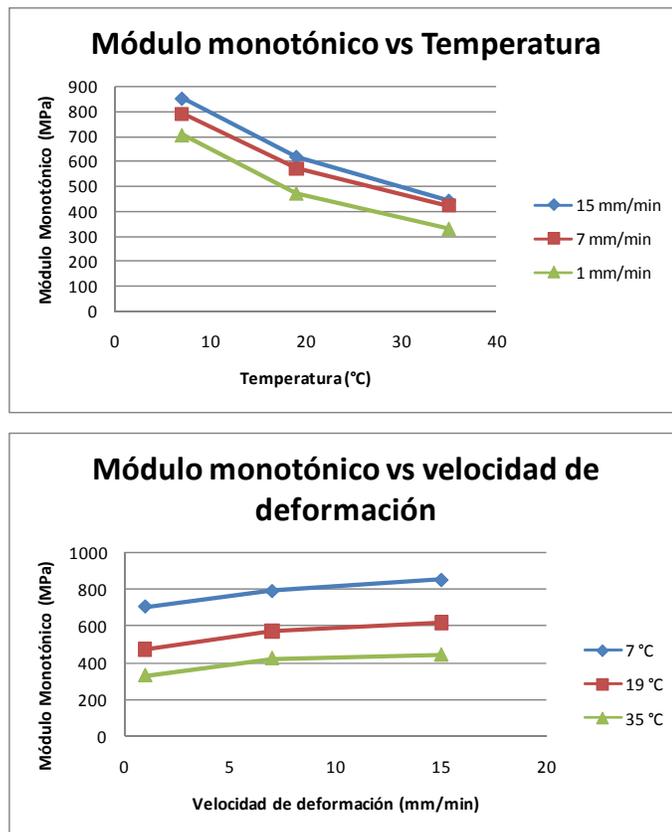
Tabla 21. Parámetros estadísticos del ajuste lineal

Parámetro	Escala aritmética
N° de puntos	594
N° de mezclas	23
S_e	206.25
S_y	544.57
S_e/S_y	0.3787
R^2	0.857

Fuente: Autor

Los índices de sensibilidad a la temperatura y la velocidad fueron calculados como la pendiente de la tendencia, por lo cual se asumía un comportamiento lineal que si bien es una aproximación al comportamiento no describe del todo el comportamiento de la rigidez en función de la temperatura y la velocidad de deformación, ver Figura 37.

Figura 37. Módulo monotónico en función de la temperatura y la velocidad de deformación



Fuente: Autor

Un nuevo ajuste teniendo en cuenta que el módulo dinámico es afectado de forma directamente proporcional a la velocidad de deformación e

inversamente con la temperatura y porcentaje de vacíos, se define una correlación que presenta una mejor distribución de los datos alrededor de la línea con pendiente de 45° (intercepto 0), para evitar sesgos en el modelo que sobre-estime o sub-estime el valor real del módulo de rigidez dinámico:

$$|E^*| = f_1(M_{monotónico}) + \frac{f_2(\dot{\epsilon})}{f_3 T^{f_4} + \%V_a^{f_5}}$$

En donde:

$|E^*|$ = Módulo dinámico, MPa

M = Módulo monotónico, MPa

$\dot{\epsilon}$ = Velocidad de deformación bajo carga dinámica (s^{-1})

T = Temperatura de ensayo, °C

Va = Porcentaje de vacíos con aire

$$\dot{\epsilon} = \left(\frac{f_6}{T (f_7 + \%V_a^{f_8})} \right) F^{f_9}$$

En donde:

$\dot{\epsilon}$ = Velocidad de deformación bajo carga dinámica (s^{-1})

T = Temperatura de ensayo, °C

Va = Porcentaje de vacíos de aire

F = Frecuencia de ensayo, Hz

Tabla 22. Coeficientes del modelo ajustado para predecir el módulo dinámico de la mezcla

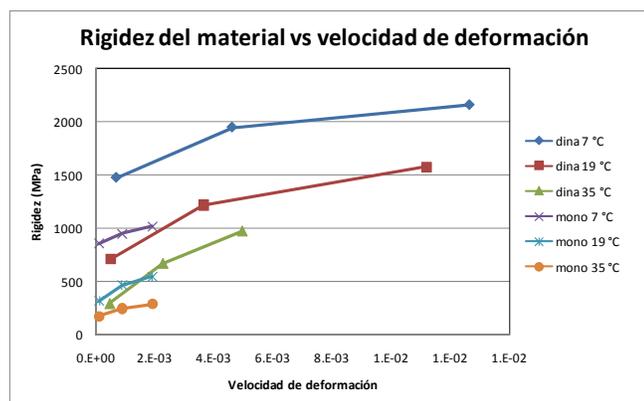
f1	1.8502656
f2	0.00017629
f3	0.00304595
f4	0.14144141
f5	-0.98286814

f6	0.0020712
f7	-0.62257722
f8	0.05991821
f9	1.28291426

Fuente: Autor

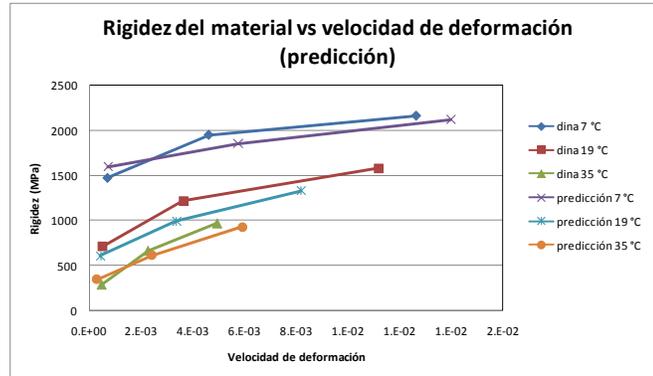
En la Figura 38 se grafican los valores de rigidez obtenidos en laboratorio bajo carga dinámica y carga monotónica en función de las velocidades de deformación. La Figura 39, muestra los valores de rigidez monotónico después de ser ajustados a través del segundo modelo propuesto.

Figura 38. Comportamiento de la rigidez de la mezcla asfáltica dependiendo de la velocidad de deformación. Probeta 3_1121_R3



Fuente: Autor

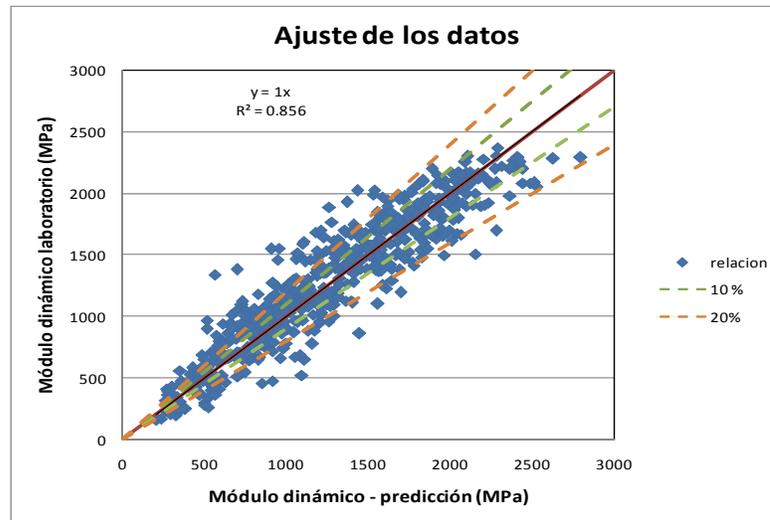
Figura 39. Comparación del módulo dinámico medido en el laboratorio contra el módulo de rigidez correlacionado a través del modelo. Probeta 3_1121_R3



Fuente: Autor

En la Figura 40, se observa la relación entre los valores reales de módulo dinámico y los valores obtenidos de la relación propuesta permitiendo observar la distribución de los datos que se presenta alrededor de la línea con intercepto 0.

Figura 40. Relación entre el módulo de rigidez dinámico ajustado y la rigidez determinada en el laboratorio



Fuente: Autor

El ajuste propuesto presenta los siguientes parámetros estadísticos mostrados en la Tabla 23.

Tabla 23. Parámetros estadísticos del ajuste

Parámetro	Escala aritmética
N° de puntos	594
N° de mezclas	23
S_e	206.20
S_y	542.81
S_e/S_y	0.3798
R^2	0.857

Fuente: Autor

El modelo determinado proporciona una buena correlación entre las medidas de rigidez calculadas a través del ensayo bajo carga monotónica y los módulos de rigidez dinámicos de la mezcla asfáltica. La relación proporciona una forma indirecta de determinar la rigidez dinámica a partir de una configuración diferente de ensayo en el cual se aplican cargas monotónicas, que si bien requirió de un equipo automatizado abre las puertas a seguir una línea de investigación en la cual se midan propiedades mecánicas fundamentales de la mezcla haciendo uso de metodologías más sencillas y económicas que permitan con cierto nivel de confiabilidad diseñar y controlar en la etapa de fabricación la homogeneidad de la estructura asfáltica con base en la rigidez del material obtenido a través del modelo de predicción sin que influya en la precisión de la correlación entre el comportamiento previsto y real de la estructura asfáltica.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proyecto de investigación llevado a cabo, logró evaluar el comportamiento de la rigidez de la mezcla asfáltica determinado por dos metodologías de ensayo diferentes, las cuales consistieron en: aplicar una carga dinámica (módulo de rigidez dinámico) y por otra parte, someter el espécimen a una carga monotónica (módulo de rigidez monotónico). A partir del proceso de experimentación realizado se logró concluir lo siguiente:

Se determinó una relación que permite estimar el módulo dinámico ($|E^*|$) de la mezcla asfáltica como función de: módulo monotónico (M), temperatura (T), velocidad de deformación ($\dot{\epsilon}$) y porcentaje de vacíos (V_a). El ajuste por el modelo propuesto para determinar de manera aproximada el valor de rigidez dinámico de la mezcla asfáltica tiene un coeficiente de correlación ajustado R^2 de 85.7% en una relación S_e/S_y igual a 0.38. El modelo no presenta sesgos que sobre-estime o sub-estime el valor real del módulo de rigidez dinámico.

La relación propuesta para estimar el valor de rigidez dinámico utilizando el valor de rigidez con carga monotónica, proporciona una confiabilidad razonable que permite usar esta metodología para determinar una aproximación del módulo dinámico y ser utilizado en los análisis mecánico – empíricos, teniendo presente que la relación es válida para las condiciones definidas en este proyecto.

FACTOR	RANGO
Temperatura	7, 19 y 35 °C
Frecuencia	10, 5, 1 hz
Contenido de asfalto	4.5, 5.0 y 5.5%
Tipo de asfalto	Penetración 20/30 y 60/70
Tipo de mezcla	Mezcla densa en caliente MDC-2 Mezcla abierta en caliente M-1
Fuente del agregado	Río Chicamocha Río Rionegro

La metodología propuesta tiene ventajas al querer relacionar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica como un conjunto: asfalto + agregado + vacíos, frente a otras metodologías que implican analizar separadamente las propiedades de cada fase que compone la mezcla asfáltica, implicando mayor cantidad de ensayos al querer caracterizar cada componente.

Se presentaron dificultades para ejecutar el ensayo con carga monotónica haciendo uso de un marco de carga manual, por tal motivo, se realizó en un marco de carga automatizado, aunque el propósito era proporcionar una metodología que fuera desarrollada en cualquier laboratorio con un equipo de bajo costo no se lograron obtener resultados apropiados con este tipo de máquina. Sin embargo fue posible identificar una relación que permite predecir los valores de módulo dinámico, a partir de ensayos que tienen una configuración diferente en la aplicación de los esfuerzos, desarrollando la prueba con un equipo automatizado.

El buen desempeño de un material asfáltico radica en gran parte de las proporciones empleadas para su elaboración y las características mecánicas de los materiales que lo componen. En este proyecto de investigación se realizó un diseño de experimentos que variaba cuatro factores de interés en el diseño de una mezcla: contenido de asfalto, tipo de asfalto, tipo de mezcla y fuente del agregado mineral, a continuación se enumeran algunas de las observaciones sobre la influencia que tienen estos factores sobre la rigidez del material:

- En general, todos los diseños presentan una tendencia a poseer un contenido óptimo de asfalto en el cual se obtienen valores de rigidez mayores, para las mezclas del presente proyecto el valor óptimo estuvo entre 5.0 % y 5.5%.
- Los módulos de rigidez de las mezclas densas en caliente MDC-2 presentaron valores mayores de rigidez respecto a los obtenidos para las mezclas de gradación abierta M-1, demostrando la sensibilidad de la rigidez a la variación de los vacíos de aire en la mezcla asfáltica.
- Se observó influencia en la rigidez de las mezclas asfálticas de la interrelación entre la naturaleza del agregado utilizado para la fabricación de las probetas y el tipo de asfalto. La rigidez de la mezcla aumentó cuando se combinaron en el diseño los siguientes factores: asfalto de penetración 60/70 - agregado de la Fuente el Río Rionegro, asfalto modificado 20/30 – agregado del Río Chicamocha.

- La rigidez del material determinada por la prueba dinámica y la prueba monotónica, aumenta cuando el material está a baja temperatura y los esfuerzos son aplicados con una frecuencia alta (velocidad de deformación), presentando un comportamiento más elástico en estas condiciones de prueba.

Se construyó una base de datos de módulos de rigidez dinámicos que permiten caracterizar el comportamiento de las mezclas que son usadas frecuentemente en la región de Bucaramanga, proporcionando un mayor conocimiento de los materiales que son empleados en la construcción de los pavimentos flexibles y un mayor control al momento de realizar los diseños.

Recomendaciones

Es importante ampliar las bases de datos de la rigidez de la mezcla asfáltica y conocer la respuesta mecánica de diversos materiales sometidos a gran variedad de niveles de esfuerzos, frecuencias de aplicación de cargas y temperaturas. Además, identificar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas usadas en los diseños de pavimentos flexibles que se construyen en las regiones de Colombia, teniendo presente la influencia que pueden llegar a tener en el desempeño de la mezcla, el origen de los materiales, las proporciones de mezclado y el tipo de materiales usados en su elaboración.

Con el propósito de utilizar en las pruebas de laboratorio un equipo de operación manual para relacionar los valores de módulo dinámico con pruebas o con variables de menor complejidad para ser determinadas, se recomienda experimentar cambiando la geometría de las probetas o la configuración de la aplicación de los esfuerzos. Un estudio similar a este debería adelantarse con ensayos de flexión de cuatro puntos.

Dotar de mayor número de sensores el ensayo para tener mayor certeza de los valores obtenidos de deformación.

Como consideración final se resalta la importancia de que se estén desarrollando en el país modelos de caracterización de las mezclas asfálticas, que permitan conocer la totalidad del espectro de rigidez que pueda presentar la mezcla asfáltica en diferentes temperaturas y frecuencias de carga. A partir de esto se pueden tomar mejores decisiones en el diseño de la mezcla, e incluir en el análisis valores de rigidez dinámicos que describan de forma más precisa la respuesta de la mezcla y así, dimensionar estructuras que posean un mejor desempeño, frente daños de fatiga y deformaciones.

BIBLIOGRAFÍA

ABBAS, Ala R. Simulation of the micromechanical behavior of asphalt mixtures using the discrete element method. Tesis doctoral. Washington: Washington State University; 2004. 180 p.

ABU ABDO, A. *et al.* Prediction of the dynamic modulus of Superpave mix e. Idaho: University of Idaho and Idaho Transportation Department; 2009. p. 305 – 314.

ADAM, Yassin E.; ZEGHAL, Morched and MOHAMED, ElHusseinH.. Complex modulus test protocol and procedure for determining Huet-Sayegh Model Parameters. Canadá: Institute for Research in Construction; 2006. 23 p.

AL-KHATEEB, Ghazi, *et al.* A new simplistic model for dynamic modulus predictions of asphalt paving mixtures. Journal of the AAPT, Vol. 75E; 2006. p. 1 - 40.

ALSHAMSI, Khalid Salim. Development of a mix design methodology for asphalt mixtures with analytically formulated aggregate structures. Tesis doctoral. Louisiana State University; 2006. 12 p.

AL-SUHAIBANI, A.; SHARAF, E. and AL-ABDULLATIF, A. A model for asphalt concrete modulus prediction from basic mix variables in Saudi Arabia. Saudi Arabia: King Saud University; 1997, Vol. 9, p. 1-12.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Standard method of test for determining

dynamic modulus of hot-mix asphalt concrete mixtures. TP 62-03. Washington D.C.: AASHTO; 2003. 12 p.

ARENAS ROMERO, Emilio y SERRRANO CORZO, Andrés Julián. Análisis comparativo de propiedades de deformación en las mezclas MDC-2, MDC-3, M1 y Stone matrix asphalt. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander; 2006. Anexo A. p. 62 – 71.

BANDYOPADHYAYA, Ranja, DAS, Animesh and BASU, Sumit. Numerical simulation of mechanical behaviour of asphalt mix. Elsevier: Construction and building Materials; 2008. p. 1051 – 1058.

BIRGISSON, Bjorn, *et al.* The use of complex modulus to characterize the performance of asphalt mixtures and pavements in Florida. Florida: University of Florida; 2004. Informe Técnico. p. 46 – 57.

BÖHM, H.J. A short introduction to basic aspects of continuum micromechanics. Vienna: Vienna University of Technology; 2008. 149 p.

BOULDI, Mark G. Gilsonite modified hard PEN binder study. American Gilsonite Company; 2002. 45 p.

CLYNE, Timothy R. *et al.* Dynamic and resilient modulus of MN/DOT asphalt mixture. Technical Report. Minnesota: University of Minnesota and Minnesota Department of Transportation; 2003. 67 p.

DAS, Animesh. On bituminous mix design. India: IIT Kanpur; 2004. 12 p.

DELGADO ALAMILL, Horacio *et al.* Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Publicación Técnica No

299. Sanfandila: Secretaría De Comunicaciones Y Transportes Instituto Mexicano Del Transporte; 2006. 98 p.

DI BENEDETTO, H. et al. Stiffness testing for bituminous mixtures. En: Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 34; March 2001. p. 68.

DOUGAN, Charles E. E* - Dynamic Modulus Test Protocol – Problems and Solutions. Technical Report. Connecticut: University of Connecticut, Connecticut Department of Transportation and Department of Transportation Federal Highway Administration; 2003. 70 p.

ELIZONDO, Fabián; ULLOA, Álvaro y BADILLA, Gustavo. Predicción de módulos resilientes en mezclas asfálticas mediante el modelo de Witczak. En: Infraestructura Vial No 19. Costa Rica; 2008. p. 38 – 48.

EPPS, Amy et al. Structural requirements of bituminous paving mixture. En: Transportation in the New Millennium, Publisher: Transportation Research Board. 2000. p. 2 -3.

FLINTSCH; Gerardo W. et al. Asphalt materials characterization in support of implementation of the proposed mechanistic-empirical pavement design guide. Virginia: Virginia Transportation Research Council; 2007. 45 p.

GARBA, Rabbira. Permanent deformation properties of asphalt concrete mixtures. Tesis doctoral. Norwegian University of Science and Technology; 2002. 201 p.

GARCÍA, Gabriel and THOMPSON, Marshall. HMA dynamic modulus - temperature relations. Illinois: Illinois Center for Transportation and University of Illinois at Urbana-Champaign; 2007. 91 p.

GARNICA ANGUAS, Paul *et al.* Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas. Publicación Técnica No 26. Sanfandila: Secretaría De Comunicaciones Y Transportes Instituto Mexicano Del Transporte; 2005. 104 p.

GOMEZ SERRANO, Ricardo Javier. Los modelos micromecánicos en la predicción de la reología de mezclas asfálticas. Tesis. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander; 2005.

GONZALEZ MARTINEZ, Carlos Daniel. Dos modelos micromecánicos de deformación con daño en materiales compuestos. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid; 2000. p. 5-18.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. Bogotá D.C: INVIAS, 2007.

INTERLAKEN TECHNOLOGY CORPORATION. Asphalt resilient modulus pre-programmed testing software.

IWANAGA, Fabio Issao. Avaliação da influência do tipo de agregado, do tipo de ligante, do tipo de moldagem e do tipo de fílerna vida de fadiga de misturas asfálticas densas. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2007. 119 p.

JIANG-MIAO, Yu et al. Study of microstructural finite element modelling of asphalt mixture. Proceedings of the 25 th Southern African Transport Conference. South Africa: Conference planners; 2006. p. 344 - 349

KING, Mark Harley. Determination of dynamic moduli in uniaxial compression for North Carolina hot mix asphalt concrete. Trabajo de grado. North Carolina: North Carolina State University; 2004. p. 3 -7.

LOULIZ, Amara; FLINTSC, Gerardo W. and MCGHE, Kevin. Determination of the in-place hot-mix asphalt layer modulus for rehabilitation projects using a mechanistic-empirical procedure. Final contract report. Virginia: Virginia Transportation Research Council and U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration; 2006. 20 p.

MCGAHAN, Jeremy. The development of correlations between HMA pavement performance and aggregate shape properties. Texas: Texas A&M University; 2005. 101 p.

MENDEZ, Adriana y NUÑEZ, Yudith Maritza. Mezclas de asfaltos naturales con asfaltos de refinería para producir asfaltos duros en la elaboración de mezclas con un alto módulo. Proyecto de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander; 2008. 104 p.

MOHAMED, ElHussein H and ZEGHAL, M. Testing technique to maintain asphalt concrete with in the visco-elastic response. En: 18th Engineering Mechanics Division Conference of ASCE, Blacksburg. Virginia: June 3-6, 2007. p. 1-6

MOMEN, Mostafa. Complex modulus determination of asphalt concrete using indirect tension test. North Carolina: North Carolina State University; 2004. P. 4 – 15.

MONISMIT, Carl L. Evolution of long-lasting asphalt pavement design methodology: a perspective. En: International symposium on design and construction of long lasting asphalt pavements. Alabama: Auburn University; 2004. 75 p.

N. SHASHIDHAR, N and SHENOY, A. On using micromechanical models to describe dynamic mechanical behavior of asphalt mastics. Elsevier: Mechanics of Materials; 2002. p. 657 – 669.

OBULAREDDY, Sandeep. Fundamental characterization of Louisiana HMA mixtures for the 2002 mechanistic-empirical design guide. Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College; 2006.p.68 p. 213.

OLARD, François. Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé. Lyon: L'institut National Des Sciences Appliquées De Lyon; 2003. p. 56 – 57.

PELLINEN, Terhi K., and XIAO, Shangzhi. Stiffness of hot-mix asphalt. Final Report. Indiana: Purdue University, Joint Transportation Research Program and Indiana Department of Transportation and The Federal Highway Administration; 2006. APPENDIX 2. P. 170 – 180.

PICADO-SANTOS, Luís; CAPITAO, Silvino D. y PAIS, Jorge C. Stiffness modulus and phase angle prediction models for high modulus asphalt concrete. Portugal: [s.n.]; 2003. 12 p.

POULIKAKOS, Lily D. et al. Mechanical properties of porous asphalt, recommendations for standardization. Datum: Swiss Federal Laboratory for Materials Testing and Research, Empa, Dübendorf, Switzerland Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) - Laboratoire des voies de circulation (LAVOC); 2006. p. 57.

ROBBINS AUBURN, Mary Marjorie. An investigation into dynamic modulus of hot-mix asphalt and its contributing factors. Alabama: Auburn University; 2009. p. 153

RONDÓN QUINTANA, Hugo Alexander y REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: tendencias, alcances y limitaciones. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Bogotá D.C.: Diciembre, 2007, Vol. 17-2, p. 41-65. ISSN 0124-8170.

ROWE, Geoffrey M.; HAKIMZADEH, Salman and BLANKENSHIP, Phillip. Evaluation of aspects of E* test using hma specimens with varying void contents. 2008. 16 p.

SEGURADO ESCUDERO, Javier. Micromecánica computacional de materiales compuestos reforzados con partículas. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid; 2004. p. 1- 22.

SILVA, Hugo M.R.D.; PAIS, Jorge C. and PEREIRA, Paulo A.A. Correlation between monotonic and repetitive test results in bituminous mixtures. En: Proceedings of the fifth international conference on maintenance and rehabilitation of pavements and technological control. Utah; 2007. p. 259 -264.

WITCZAK, M. W. and BARI, Javed. Development of a master curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures. Arizona: Arizona State University Research Project; 2004. P. 35.

WITCZAK, M.W. *et al.* Simple Performance Test for Superpave Mix Design. National Cooperative Highway Research Program. Washington D.C.: Arizona State University; 2002. 114 p.

YOU, Zhanping and DAI, Qingli. Review of advances in micromechanical modeling of aggregate – aggregate interactions in asphalt mixtures. Canada: J. Civ. Eng. Vol. 34, 2007. P. 239 – 252.

YOU, Zhanping; ADHIKARI, Sanjeev and DAI Qingli. Three-Dimensional Discrete Element Models for Asphalt Mixtures. En: Journal Of Engineering Mechanics © ASCE; 2008. p. 1053 – 1063.

ZOFKA, Adam *et al.* Development of simple asphalt test for determination of rap blending charts. Technical Report. Minnesota: University of Minnesota and Minnesota Department of Transportation; 2004. p. 10 15.

ANEXOS

ANEXO 1. FACTORES DE DISEÑO UTILIZADOS PARA REALIZAR LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Identificación de los diseños de las mezclas asfálticas

Diseño	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
1	C1	T1	G1	F1
2	C1	T1	G1	F2
3	C1	T1	G2	F1
4	C1	T1	G2	F2
5	C1	T2	G1	F1
6	C1	T2	G1	F2
7	C1	T2	G2	F1
8	C1	T2	G2	F2
9	C2	T1	G1	F1
10	C2	T1	G1	F2
11	C2	T1	G2	F1
12	C2	T1	G2	F2
13	C2	T2	G1	F1
14	C2	T2	G1	F2
15	C2	T2	G2	F1
16	C2	T2	G2	F2
17	C3	T1	G1	F1
18	C3	T1	G1	F2
19	C3	T1	G2	F1
20	C3	T1	G2	F2
21	C3	T2	G1	F1
22	C3	T2	G1	F2
23	C3	T2	G2	F1
24	C3	T2	G2	F2

ANEXO 2. DATOS DE MÓDULO DINÁMICO Y MONOTÓNICO

Código	Módulo Dinámico			Módulo Monotónico		
	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo (MPa)	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (MPa)
1_1111_R1	7	10	2174.4	7	15	953.9
1_1111_R1	7	5	1987.5	7	7	775.4
1_1111_R1	7	1	1930.1	7	1	733.0
1_1111_R1	19	10	1937.7	19	15	705.6
1_1111_R1	19	5	1630.9	19	7	642.0
1_1111_R1	19	1	1012.5	19	1	476.0
1_1111_R1	35	10	1483.9	35	15	531.6
1_1111_R1	35	5	1260.1	35	7	459.0
1_1111_R1	35	1	787.2	35	1	334.4
1_1111_R2	7	10	1976.6	7	15	803.6
1_1111_R2	7	5	1700.1	7	7	681.6
1_1111_R2	7	1	1193.1	7	1	607.5
1_1111_R2	19	10	1700.3	19	15	662.2
1_1111_R2	19	5	1380.9	19	7	570.2
1_1111_R2	19	1	1380.9	19	1	370.9
1_1111_R2	35	10	1355.2	35	15	447.8
1_1111_R2	35	5	1030.9	35	7	379.2
1_1111_R2	35	1	430.4	35	1	283.7
1_1111_R3	7	10	2087.2	7	15	1104.2
1_1111_R3	7	5	1765.2	7	7	869.3
1_1111_R3	7	1	1435.2	7	1	858.4
1_1111_R3	19	10	1691.1	19	15	748.9
1_1111_R3	19	5	1387.1	19	7	713.9
1_1111_R3	19	1	990.3	19	1	581.1
1_1111_R3	35	10	1472.6	35	15	615.5
1_1111_R3	35	5	1162.5	35	7	538.7
1_1111_R3	35	1	861.6	35	1	385.0
2_1112_R1	7	10	1903.1	7	15	851.2
2_1112_R1	7	5	1612.2	7	7	789.6
2_1112_R1	7	1	1187.1	7	1	704.8
2_1112_R1	19	10	1645.2	19	15	617.6
2_1112_R1	19	5	1333.3	19	7	570.4
2_1112_R1	19	1	924.5	19	1	471.8
2_1112_R1	35	10	1191.3	35	15	441.3
2_1112_R1	35	5	938.1	35	7	422.1
2_1112_R1	35	1	671.5	35	1	329.8
2_1112_R2	7	10	1842.2	7	15	761.1
2_1112_R2	7	5	1579.0	7	7	677.9
2_1112_R2	7	1	1111.7	7	1	603.8
2_1112_R2	19	10	1552.3	19	15	524.2
2_1112_R2	19	5	1268.1	19	7	474.9
2_1112_R2	19	1	822.5	19	1	366.7
2_1112_R2	35	10	1192.5	35	15	394.0
2_1112_R2	35	5	959.6	35	7	346.2
2_1112_R2	35	1	587.3	35	1	259.9
2_1112_R3	7	10	1543.9	7	15	560.6
2_1112_R3	7	5	1180.6	7	7	532.6
2_1112_R3	7	1	783.4	7	1	475.5
2_1112_R3	19	10	1313.6	19	15	399.1
2_1112_R3	19	5	966.0	19	7	369.3
2_1112_R3	19	1	676.7	19	1	362.7
2_1112_R3	35	10	955.8	35	15	356.2
2_1112_R3	35	5	646.0	35	7	325.4
2_1112_R3	35	1	475.4	35	1	291.9

Código	Módulo Dinámico			Módulo Monotónico		
	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo (MPa)	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (MPa)
3_1121_R1	7	10	2038.2	7	15	831.4
3_1121_R1	7	5	1888.5	7	7	630.9
3_1121_R1	7	1	1342.4	7	1	299.9
3_1121_R1	19	10	1499.1	19	15	482.2
3_1121_R1	19	5	1185.1	19	7	378.7
3_1121_R1	19	1	508.7	19	1	234.4
3_1121_R1	35	10	856.6	35	15	214.7
3_1121_R1	35	5	542.4	35	7	194.7
3_1121_R1	35	1	236.6	35	1	130.0
3_1121_R2	7	10	2108.2	7	15	970.3
3_1121_R2	7	5	1953.5	7	7	876.8
3_1121_R2	7	1	1446.0	7	1	596.9
3_1121_R2	19	10	1521.6	19	15	523.5
3_1121_R2	19	5	1181.6	19	7	436.6
3_1121_R2	19	1	555.6	19	1	269.3
3_1121_R2	35	10	804.6	35	15	266.2
3_1121_R2	35	5	636.2	35	7	226.5
3_1121_R2	35	1	288.8	35	1	159.9
3_1121_R3	7	10	2158.8	7	15	1019.2
3_1121_R3	7	5	1947.9	7	7	951.2
3_1121_R3	7	1	1475.1	7	1	858.0
3_1121_R3	19	10	1578.7	19	15	549.1
3_1121_R3	19	5	1218.6	19	7	465.5
3_1121_R3	19	1	711.1	19	1	319.8
3_1121_R3	35	10	972.6	35	15	289.2
3_1121_R3	35	5	670.4	35	7	246.0
3_1121_R3	35	1	294.2	35	1	177.8
4_1122_R1	7	10	1659.6	7	15	660.4
4_1122_R1	7	5	1357.5	7	7	586.6
4_1122_R1	7	1	777.4	7	1	438.6
4_1122_R1	19	10	1177.2	19	15	413.4
4_1122_R1	19	5	751.0	19	7	343.9
4_1122_R1	19	1	385.3	19	1	245.9
4_1122_R1	35	10	669.0	35	15	214.5
4_1122_R1	35	5	466.9	35	7	196.9
4_1122_R1	35	1	229.3	35	1	139.8
4_1122_R2	7	10	1495.7	7	15	774.8
4_1122_R2	7	5	1281.2	7	7	709.8
4_1122_R2	7	1	896.9	7	1	535.4
4_1122_R2	19	10	1166.8	19	15	506.2
4_1122_R2	19	5	862.1	19	7	419.0
4_1122_R2	19	1	264.1	19	1	273.5
4_1122_R2	35	10	717.0	35	15	279.4
4_1122_R2	35	5	469.5	35	7	224.1
4_1122_R2	35	1	202.2	35	1	165.6
4_1122_R3	7	10	1687.5	7	15	905.8
4_1122_R3	7	5	1430.2	7	7	794.7
4_1122_R3	7	1	943.0	7	1	637.9
4_1122_R3	19	10	1147.8	19	15	426.7
4_1122_R3	19	5	850.7	19	7	389.7
4_1122_R3	19	1	342.3	19	1	277.5
4_1122_R3	35	10	669.1	35	15	236.0
4_1122_R3	35	5	461.5	35	7	204.6
4_1122_R3	35	1	206.4	35	1	146.6

Código	Módulo Dinámico			Módulo Monotónico		
	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo (MPa)	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (MPa)
5_1211_R2	7	10	2174.6	7	15	1018.1
5_1211_R2	7	5	2078.6	7	7	993.9
5_1211_R2	7	1	1811.5	7	1	865.1
5_1211_R2	19	10	1721.8	19	15	768.6
5_1211_R2	19	5	1551.0	19	7	663.2
5_1211_R2	19	1	982.6	19	1	460.7
5_1211_R2	35	10	1209.7	35	15	478.1
5_1211_R2	35	5	905.4	35	7	358.8
5_1211_R2	35	1	565.2	35	1	256.1
5_1211_R3	19	10	1866.9	19	15	701.7
5_1211_R3	19	5	1617.4	19	7	628.7
5_1211_R3	19	1	1099.2	19	1	383.9
5_1211_R3	35	10	1155.4	35	15	415.8
5_1211_R3	35	5	1025.1	35	7	325.4
5_1211_R3	35	1	532.9	35	1	211.4

Código	Módulo Dinámico			Módulo Monotónico		
	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo (MPa)	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (MPa)
6_1212_R1	7	10	2199.2	7	15	1100.4
6_1212_R1	7	5	2059.4	7	7	1065.6
6_1212_R1	7	1	1818.8	7	1	937.3
6_1212_R1	19	10	1890.9	19	15	704.5
6_1212_R1	19	5	1701.7	19	7	691.5
6_1212_R1	19	1	1142.0	19	1	478.9
6_1212_R1	35	10	1355.8	35	15	432.9
6_1212_R1	35	5	1041.4	35	7	383.5
6_1212_R1	35	1	617.0	35	1	274.1
6_1212_R2	7	10	2197.1	7	15	1151.3
6_1212_R2	7	5	1897.4	7	7	1127.2
6_1212_R2	7	1	1806.3	7	1	946.5
6_1212_R2	19	10	1798.5	19	15	936.6
6_1212_R2	19	5	1676.0	19	7	843.8
6_1212_R2	19	1	1088.0	19	1	604.3
6_1212_R2	35	10	1361.4	35	15	454.6
6_1212_R2	35	5	996.6	35	7	366.0
6_1212_R2	35	1	713.6	35	1	305.3
7_1221_R1	7	10	1738.5	7	15	747.2
7_1221_R1	7	5	1481.8	7	7	651.7
7_1221_R1	7	1	1057.9	7	1	485.3
7_1221_R1	19	10	1241.7	19	15	445.7
7_1221_R1	19	5	1014.7	19	7	355.5
7_1221_R1	19	1	583.5	19	1	222.1
7_1221_R1	35	10	690.1	35	15	187.4
7_1221_R1	35	5	491.5	35	7	150.2
7_1221_R1	35	1	175.1	35	1	116.6
7_1221_R2	7	10	1618.9	7	15	669.0
7_1221_R2	7	5	1400.6	7	7	606.4
7_1221_R2	7	1	763.4	7	1	464.0
7_1221_R2	19	10	1091.5	19	15	367.7
7_1221_R2	19	5	952.3	19	7	287.5
7_1221_R2	19	1	459.0	19	1	189.7
7_1221_R2	35	10	656.2	35	15	179.5
7_1221_R2	35	5	418.9	35	7	150.4
7_1221_R2	35	1	162.6	35	1	101.6
7_1221_R3	7	10	1703.8	7	15	717.4
7_1221_R3	7	5	1544.3	7	7	636.5
7_1221_R3	7	1	933.9	7	1	476.0
7_1221_R3	19	10	1291.8	19	15	430.5
7_1221_R3	19	5	1037.8	19	7	341.2
7_1221_R3	19	1	563.0	19	1	181.8
7_1221_R3	35	10	707.2	35	15	173.1
7_1221_R3	35	5	450.3	35	7	145.3
7_1221_R3	35	1	178.8	35	1	101.7

Código	Módulo Dinámico			Módulo Monotónico		
	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo (MPa)	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (MPa)
8_1222_R1	7	10	2095.3	7	15	936.7
8_1222_R1	7	5	1924.7	7	7	920.8
8_1222_R1	7	1	1536.9	7	1	664.9
8_1222_R1	19	10	1423.9	19	15	561.6
8_1222_R1	19	5	1087.5	19	7	469.0
8_1222_R1	19	1	599.9	19	1	275.5
8_1222_R1	35	10	988.6	35	15	238.9
8_1222_R1	35	5	704.2	35	7	205.0
8_1222_R1	35	1	318.3	35	1	130.2
8_1222_R2	7	10	2102.0	7	15	1000.8
8_1222_R2	7	5	1960.9	7	7	948.4
8_1222_R2	7	1	1549.0	7	1	780.4
8_1222_R2	19	10	1462.3	19	15	617.6
8_1222_R2	19	5	1240.4	19	7	524.7
8_1222_R2	19	1	518.7	19	1	319.3
8_1222_R2	35	10	961.5	35	15	271.1
8_1222_R2	35	5	692.9	35	7	229.6
8_1222_R2	35	1	304.3	35	1	149.6
9_2111_R1	7	10	1509.8	7	15	1035.2
9_2111_R1	7	5	1495.6	7	7	1007.4
9_2111_R1	7	1	1195.6	7	1	909.2
10_2112_R1	7	10	2105.4	7	15	862.1
10_2112_R1	7	5	1951.5	7	7	860.8
10_2112_R1	7	1	1667.8	7	1	747.5
10_2112_R1	19	10	1509.8	19	15	728.4
10_2112_R1	19	5	1495.6	19	7	644.7
10_2112_R1	19	1	1195.6	19	1	560.7
10_2112_R1	35	10	1197.0	35	15	469.1
10_2112_R1	35	5	1081.1	35	7	416.5
10_2112_R1	35	1	712.6	35	1	318.0
10_2112_R2	7	10	1982.7	7	15	883.8
10_2112_R2	7	5	1849.9	7	7	831.1
10_2112_R2	7	1	1572.0	7	1	826.3
10_2112_R2	19	10	1533.9	19	15	821.7
10_2112_R2	19	5	1459.0	19	7	716.4
10_2112_R2	19	1	1210.1	19	1	607.1
10_2112_R2	35	10	1101.8	35	15	479.3
10_2112_R2	35	5	949.4	35	7	425.5
10_2112_R2	35	1	470.8	35	1	328.0
10_2112_R3	7	10	1859.5	7	15	907.8
10_2112_R3	7	5	1771.4	7	7	838.3
10_2112_R3	7	1	1400.8	7	1	819.1
10_2112_R3	19	10	1556.5	19	15	637.1
10_2112_R3	19	5	1360.9	19	7	598.8
10_2112_R3	19	1	1068.8	19	1	496.3
10_2112_R3	35	10	962.2	35	15	462.0
10_2112_R3	35	5	861.8	35	7	400.6
10_2112_R3	35	1	476.2	35	1	270.1

Código	Módulo Dinámico			Módulo Monotónico		
	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo (MPa)	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (MPa)
11_2121_R1	7	10	2114.5	7	15	1073.4
11_2121_R1	7	5	2010.9	7	7	901.8
11_2121_R1	7	1	1684.8	7	1	796.0
11_2121_R1	19	10	1808.0	19	15	769.7
11_2121_R1	19	5	1744.8	19	7	692.2
11_2121_R1	19	1	1347.9	19	1	642.8
11_2121_R1	35	10	1009.5	35	15	479.7
11_2121_R1	35	5	954.9	35	7	445.4
11_2121_R1	35	1	713.0	35	1	291.8
11_2121_R2	7	10	2125.5	7	15	1007.5
11_2121_R2	7	5	2029.6	7	7	778.4
11_2121_R2	7	1	1706.7	7	1	755.6
11_2121_R2	19	10	1790.3	19	15	674.7
11_2121_R2	19	5	1642.0	19	7	595.4
11_2121_R2	19	1	1243.0	19	1	499.5
11_2121_R2	35	10	1058.1	35	15	374.8
11_2121_R2	35	5	932.4	35	7	303.4
11_2121_R2	35	1	549.6	35	1	231.2
11_2121_R3	7	10	2162.3	7	15	1008.1
11_2121_R3	7	5	1986.4	7	7	858.5
11_2121_R3	7	1	1543.4	7	1	716.2
11_2121_R3	19	10	1823.8	19	15	679.0
11_2121_R3	19	5	1684.4	19	7	666.6
11_2121_R3	19	1	1157.7	19	1	566.4
11_2121_R3	35	10	1114.3	35	15	421.9
11_2121_R3	35	5	967.4	35	7	316.9
11_2121_R3	35	1	542.2	35	1	237.2
12_2122_R1	7	10	1993.7	7	15	1008.8
12_2122_R1	7	5	1858.2	7	7	913.1
12_2122_R1	7	1	1523.6	7	1	815.3
12_2122_R1	19	10	1581.8	19	15	686.7
12_2122_R1	19	5	1350.4	19	7	692.4
12_2122_R1	19	1	938.9	19	1	491.9
12_2122_R1	35	10	889.0	35	15	394.6
12_2122_R1	35	5	841.7	35	7	340.0
12_2122_R1	35	1	505.1	35	1	256.6
12_2122_R2	7	10	2054.1	7	15	1008.8
12_2122_R2	7	5	1868.2	7	7	905.2
12_2122_R2	7	1	1562.1	7	1	793.8
12_2122_R2	19	10	1713.0	19	15	788.6
12_2122_R2	19	5	1495.2	19	7	679.9
12_2122_R2	19	1	1145.2	19	1	512.8
12_2122_R2	35	10	1098.5	35	15	325.1
12_2122_R2	35	5	795.8	35	7	259.5
12_2122_R2	35	1	414.3	35	1	217.8
12_2122_R3	7	10	2018.8	7	15	971.1
12_2122_R3	7	5	1866.4	7	7	883.5
12_2122_R3	7	1	1485.8	7	1	704.0
12_2122_R3	19	10	1709.9	19	15	723.2
12_2122_R3	19	5	1473.0	19	7	710.6
12_2122_R3	19	1	1065.8	19	1	499.1
12_2122_R3	35	10	1131.3	35	15	377.5
12_2122_R3	35	5	895.6	35	7	299.4
12_2122_R3	35	1	456.5	35	1	200.0

Código	Módulo Dinámico			Módulo Monotónico		
	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo (MPa)	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (MPa)
13_2211_R1	7	10	2205.7	7	15	1165.3
13_2211_R1	7	5	2108.5	7	7	1100.5
13_2211_R1	7	1	1636.1	7	1	977.9
13_2211_R1	19	10	1603.3	19	15	730.5
13_2211_R1	19	5	1371.7	19	7	650.4
13_2211_R1	19	1	846.4	19	1	436.2
13_2211_R1	35	10	1031.9	35	15	435.0
13_2211_R1	35	5	908.6	35	7	370.4
13_2211_R1	35	1	363.8	35	1	243.9
13_2211_R2	7	10	2220.5	7	15	1120.4
13_2211_R2	7	5	2038.5	7	7	1022.5
13_2211_R2	7	1	1797.4	7	1	866.7
13_2211_R2	19	10	1699.0	19	15	695.3
13_2211_R2	19	5	1390.0	19	7	632.4
13_2211_R2	19	1	766.9	19	1	454.6
13_2211_R2	35	10	1124.9	35	15	513.9
13_2211_R2	35	5	663.6	35	7	430.1
13_2211_R2	35	1	410.4	35	1	308.8
13_2211_R3	7	10	1909.0	7	15	1028.7
13_2211_R3	7	5	1768.1	7	7	849.9
13_2211_R3	7	1	1612.3	7	1	590.7
13_2211_R3	19	10	1540.0	19	15	680.5
13_2211_R3	19	5	1768.1	19	7	619.8
13_2211_R3	19	1	753.8	19	1	459.0
13_2211_R3	35	10	1142.0	35	15	456.0
13_2211_R3	35	5	837.2	35	7	397.3
13_2211_R3	35	1	786.0	35	1	325.4
14_2212_R1	7	10	2084.0	7	15	1218.9
14_2212_R1	7	5	1918.5	7	7	1022.3
14_2212_R1	7	1	1601.6	7	1	988.8
14_2212_R1	19	10	1613.3	19	15	914.5
14_2212_R1	19	5	1386.5	19	7	841.3
14_2212_R1	19	1	782.5	19	1	530.8
14_2212_R1	35	10	1110.1	35	15	447.3
14_2212_R1	35	5	875.9	35	7	394.7
14_2212_R1	35	1	404.4	35	1	281.3
14_2212_R2	7	10	2088.4	7	15	1230.1
14_2212_R2	7	5	2078.9	7	7	1157.8
14_2212_R2	7	1	1703.2	7	1	1070.2
14_2212_R2	19	10	1715.5	19	15	766.5
14_2212_R2	19	5	1129.3	19	7	682.0
14_2212_R2	19	1	649.9	19	1	591.0
14_2212_R2	35	10	1107.5	35	15	461.3
14_2212_R2	35	5	476.4	35	7	404.4
14_2212_R2	35	1	368.4	35	1	281.0
14_2212_R3	7	10	2080.8	7	15	1193.8
14_2212_R3	7	5	1871.8	7	7	1040.8
14_2212_R3	7	1	1546.7	7	1	975.0
14_2212_R3	19	10	1652.7	19	15	886.1
14_2212_R3	19	5	1447.5	19	7	776.0
14_2212_R3	19	1	779.4	19	1	617.3
14_2212_R3	35	10	1105.4	35	15	624.3
14_2212_R3	35	5	970.8	35	7	505.9
14_2212_R3	35	1	461.4	35	1	448.2

Código	Módulo Dinámico			Módulo Monotónico		
	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo (MPa)	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (MPa)
15_2221_R1	7	10	2176.5	7	15	983.7
15_2221_R1	7	5	1973.2	7	7	803.7
15_2221_R1	7	1	1551.4	7	1	509.4
15_2221_R1	19	10	1748.4	19	15	655.1
15_2221_R1	19	5	1500.9	19	7	511.4
15_2221_R1	19	1	1043.6	19	1	367.1
15_2221_R1	35	10	1000.9	35	15	252.3
15_2221_R1	35	5	644.3	35	7	220.5
15_2221_R1	35	1	315.3	35	1	152.7
15_2221_R2	7	10	2154.4	7	15	1059.6
15_2221_R2	7	5	1959.9	7	7	991.7
15_2221_R2	7	1	1521.3	7	1	766.3
15_2221_R2	19	10	1679.4	19	15	674.1
15_2221_R2	19	5	1465.4	19	7	501.4
15_2221_R2	19	1	1018.5	19	1	351.3
15_2221_R2	35	10	1064.0	35	15	295.3
15_2221_R2	35	5	673.1	35	7	224.6
15_2221_R2	35	1	426.1	35	1	154.0
15_2221_R3	7	10	2282.2	7	15	1293.7
15_2221_R3	7	5	2047.8	7	7	1052.8
15_2221_R3	7	1	1734.1	7	1	884.7
15_2221_R3	19	10	1791.3	19	15	698.5
15_2221_R3	19	5	1537.9	19	7	571.9
15_2221_R3	19	1	1122.6	19	1	385.7
15_2221_R3	35	10	1076.5	35	15	252.2
15_2221_R3	35	5	830.6	35	7	229.8
15_2221_R3	35	1	364.7	35	1	140.6
16_2222_R1	7	10	2289.9	7	15	1176.3
16_2222_R1	7	5	2078.7	7	7	1161.7
16_2222_R1	7	1	1788.8	7	1	1045.5
16_2222_R1	19	10	1856.8	19	15	873.4
16_2222_R1	19	5	1493.5	19	7	768.8
16_2222_R1	19	1	1094.3	19	1	535.4
16_2222_R1	35	10	1130.1	35	15	443.0
16_2222_R1	35	5	889.1	35	7	370.9
16_2222_R1	35	1	480.2	35	1	276.1
16_2222_R2	7	10	2307.2	7	15	1105.6
16_2222_R2	7	5	2166.1	7	7	1121.7
16_2222_R2	7	1	1859.3	7	1	1014.9
16_2222_R2	19	10	1868.1	19	15	869.3
16_2222_R2	19	5	1228.0	19	7	800.4
16_2222_R2	19	1	1135.4	19	1	559.8
16_2222_R2	35	10	1092.8	35	15	428.7
16_2222_R2	35	5	869.5	35	7	372.8
16_2222_R2	35	1	438.3	35	1	294.4
16_2222_R3	7	10	2254.2	7	15	1003.8
16_2222_R3	7	5	2148.3	7	7	984.8
16_2222_R3	7	1	1805.3	7	1	902.1
16_2222_R3	19	10	1816.0	19	15	802.8
16_2222_R3	19	5	1656.5	19	7	714.3
16_2222_R3	19	1	1146.4	19	1	520.0
16_2222_R3	35	10	1216.9	35	15	404.5
16_2222_R3	35	5	977.1	35	7	349.4
16_2222_R3	35	1	479.2	35	1	256.7

Código	Módulo Dinámico			Módulo Monotónico		
	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo (MPa)	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (MPa)
17_3111_R1	7	10	2197.9	7	15	1190.9
17_3111_R1	7	5	2078.9	7	7	1094.3
17_3111_R1	7	1	1672.9	7	1	964.0
17_3111_R1	19	10	1673.1	19	15	931.6
17_3111_R1	19	5	1297.1	19	7	818.5
17_3111_R1	19	1	522.1	19	1	583.3
17_3111_R1	35	10	1102.1	35	15	453.0
17_3111_R1	35	5	867.4	35	7	398.0
17_3111_R1	35	1	565.4	35	1	268.6
17_3111_R2	7	10	2051.5	7	15	1237.7
17_3111_R2	7	5	2129.5	7	7	1123.0
17_3111_R2	7	1	1508.3	7	1	926.1
17_3111_R2	19	10	1959.0	19	15	922.7
17_3111_R2	19	5	1780.5	19	7	837.0
17_3111_R2	19	1	1080.1	19	1	602.6
17_3111_R2	35	10	1136.8	35	15	427.7
17_3111_R2	35	5	1015.6	35	7	372.6
17_3111_R2	35	1	691.5	35	1	251.0
17_3111_R3	7	10	2121.5	7	15	1043.4
17_3111_R3	7	5	1988.3	7	7	1021.5
17_3111_R3	7	1	1634.3	7	1	841.1
17_3111_R3	19	10	1819.9	19	15	852.6
17_3111_R3	19	5	1498.6	19	7	769.7
17_3111_R3	19	1	1031.6	19	1	543.8
17_3111_R3	35	10	1180.4	35	15	432.2
17_3111_R3	35	5	1033.4	35	7	389.5
17_3111_R3	35	1	657.1	35	1	261.2
18_3112_R1	7	10	2279.6	7	15	1063.2
18_3112_R1	7	5	2078.2	7	7	926.3
18_3112_R1	7	1	1481.1	7	1	746.3
18_3112_R1	19	10	1681.7	19	15	617.5
18_3112_R1	19	5	1460.6	19	7	551.0
18_3112_R1	19	1	663.6	19	1	341.0
18_3112_R1	35	10	1090.7	35	15	349.8
18_3112_R1	35	5	863.2	35	7	258.1
18_3112_R1	35	1	453.1	35	1	178.8
18_3112_R2	7	10	2290.5	7	15	1381.9
18_3112_R2	7	5	2154.2	7	7	1062.3
18_3112_R2	7	1	1520.7	7	1	936.7
18_3112_R2	19	10	1667.7	19	15	828.0
18_3112_R2	19	5	1494.9	19	7	745.2
18_3112_R2	19	1	724.9	19	1	420.7
18_3112_R2	35	10	1129.1	35	15	368.6
18_3112_R2	35	5	1003.0	35	7	313.5
18_3112_R2	35	1	435.1	35	1	193.4
18_3112_R3	7	10	2206.1	7	15	1185.5
18_3112_R3	7	5	2092.8	7	7	1094.6
18_3112_R3	7	1	1477.5	7	1	978.2
18_3112_R3	19	10	1839.5	19	15	809.1
18_3112_R3	19	5	1417.7	19	7	686.4
18_3112_R3	19	1	798.7	19	1	481.1
18_3112_R3	35	10	1104.3	35	15	376.7
18_3112_R3	35	5	883.9	35	7	306.4
18_3112_R3	35	1	404.9	35	1	221.5

Código	Módulo Dinámico			Módulo Monotónico		
	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo (MPa)	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (MPa)
19_3121_R1	7	10	1785.3	7	15	963.1
19_3121_R1	7	5	1733.6	7	7	842.1
19_3121_R1	7	1	1395.3	7	1	675.7
19_3121_R1	19	10	1252.9	19	15	687.8
19_3121_R1	19	5	1172.6	19	7	601.8
19_3121_R1	19	1	862.6	19	1	492.7
19_3121_R1	35	10	886.4	35	15	418.4
19_3121_R1	35	5	649.4	35	7	358.0
19_3121_R1	35	1	302.8	35	1	258.5
19_3121_R2	7	10	1978.2	7	15	1151.3
19_3121_R2	7	5	1894.4	7	7	1082.3
19_3121_R2	7	1	1524.5	7	1	901.5
19_3121_R2	19	10	1413.2	19	15	792.5
19_3121_R2	19	5	1267.9	19	7	671.8
19_3121_R2	19	1	967.8	19	1	560.9
19_3121_R2	35	10	1085.5	35	15	472.7
19_3121_R2	35	5	796.0	35	7	411.5
19_3121_R2	35	1	367.7	35	1	296.4
19_3121_R3	7	10	1922.7	7	15	1081.3
19_3121_R3	7	5	1801.3	7	7	998.9
19_3121_R3	7	1	864.3	7	1	774.8
19_3121_R3	19	10	1370.0	19	15	673.9
19_3121_R3	19	5	1241.4	19	7	593.8
19_3121_R3	19	1	912.3	19	1	475.8
19_3121_R3	35	10	956.9	35	15	435.6
19_3121_R3	35	5	769.9	35	7	367.8
19_3121_R3	35	1	280.8	35	1	259.3
20_3122_R1	7	10	1664.3	7	15	990.8
20_3122_R1	7	5	1485.3	7	7	878.0
20_3122_R1	7	1	1160.9	7	1	704.7
20_3122_R1	19	10	1113.0	19	15	588.7
20_3122_R1	19	5	1056.7	19	7	367.0
20_3122_R1	19	1	804.9	19	1	323.4
20_3122_R1	35	10	947.7	35	15	282.7
20_3122_R1	35	5	797.3	35	7	230.3
20_3122_R1	35	1	413.0	35	1	134.3
20_3122_R2	7	10	1922.6	7	15	994.6
20_3122_R2	7	5	1683.5	7	7	982.4
20_3122_R2	7	1	1311.7	7	1	710.6
20_3122_R2	19	10	1383.1	19	15	634.7
20_3122_R2	19	5	1301.6	19	7	541.4
20_3122_R2	19	1	920.0	19	1	371.7
20_3122_R2	35	10	961.7	35	15	280.3
20_3122_R2	35	5	777.2	35	7	244.8
20_3122_R2	35	1	395.3	35	1	137.5
20_3122_R3	7	10	1697.8	7	15	1104.8
20_3122_R3	7	5	1591.8	7	7	833.3
20_3122_R3	7	1	1206.0	7	1	590.4
20_3122_R3	19	10	1379.7	19	15	665.0
20_3122_R3	19	5	1017.8	19	7	583.7
20_3122_R3	19	1	548.2	19	1	394.4
20_3122_R3	35	10	962.0	35	15	263.8
20_3122_R3	35	5	766.3	35	7	226.9
20_3122_R3	35	1	367.1	35	1	155.0

Código	Módulo Dinámico			Módulo Monotónico		
	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo (MPa)	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (MPa)
21_3211_R1	7	10	2368.8	7	15	1108.6
21_3211_R1	7	5	2097.7	7	7	939.4
21_3211_R1	7	1	1386.7	7	1	881.1
21_3211_R1	19	10	1757.5	19	15	821.9
21_3211_R1	19	5	1435.3	19	7	686.4
21_3211_R1	19	1	743.5	19	1	522.3
21_3211_R1	35	10	1163.1	35	15	329.9
21_3211_R1	35	5	912.7	35	7	275.1
21_3211_R1	35	1	473.2	35	1	182.9
21_3211_R2	7	10	2269.7	7	15	1162.9
21_3211_R2	7	5	2075.6	7	7	1002.2
21_3211_R2	7	1	1550.7	7	1	998.2
21_3211_R2	19	10	1710.9	19	15	828.6
21_3211_R2	19	5	1374.0	19	7	780.8
21_3211_R2	19	1	690.1	19	1	577.6
21_3211_R2	35	10	1178.3	35	15	384.4
21_3211_R2	35	5	982.7	35	7	336.4
21_3211_R2	35	1	467.0	35	1	211.6
21_3211_R3	7	10	2254.8	7	15	1180.7
21_3211_R3	7	5	2127.5	7	7	1119.4
21_3211_R3	7	1	1632.1	7	1	1028.3
21_3211_R3	19	10	1657.5	19	15	849.8
21_3211_R3	19	5	1423.5	19	7	811.4
21_3211_R3	19	1	674.9	19	1	560.0
21_3211_R3	35	10	1182.6	35	15	458.7
21_3211_R3	35	5	924.4	35	7	335.5
21_3211_R3	35	1	426.3	35	1	231.7
22_3212_R1	7	10	2197.3	7	15	893.8
22_3212_R1	7	5	2022.6	7	7	722.6
22_3212_R1	7	1	1686.7	7	1	631.0
22_3212_R1	19	10	1701.7	19	15	482.3
22_3212_R1	19	5	1463.1	19	7	441.6
22_3212_R1	19	1	850.2	19	1	300.7
22_3212_R1	35	10	1031.8	35	15	319.0
22_3212_R1	35	5	822.7	35	7	272.7
22_3212_R1	35	1	344.9	35	1	169.7
22_3212_R2	7	10	2301.0	7	15	1011.8
22_3212_R2	7	5	2080.0	7	7	981.6
22_3212_R2	7	1	1588.2	7	1	586.5
22_3212_R2	19	10	1723.8	19	15	673.2
22_3212_R2	19	5	1514.4	19	7	508.9
22_3212_R2	19	1	944.7	19	1	322.2
22_3212_R2	35	10	1020.8	35	15	319.0
22_3212_R2	35	5	658.0	35	7	251.0
22_3212_R2	35	1	259.3	35	1	168.2
22_3212_R3	7	10	2209.8	7	15	1153.8
22_3212_R3	7	5	1997.4	7	7	1109.6
22_3212_R3	7	1	1582.1	7	1	810.4
22_3212_R3	19	10	1648.4	19	15	608.5
22_3212_R3	19	5	1306.3	19	7	492.5
22_3212_R3	19	1	525.7	19	1	295.2
22_3212_R3	35	10	1010.8	35	15	295.9
22_3212_R3	35	5	673.8	35	7	257.4
22_3212_R3	35	1	281.2	35	1	168.9

Código	Módulo Dinámico			Módulo Monotónico		
	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo (MPa)	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (MPa)
23-3221_R1	7	10	1936.8	7	15	920.3
23-3221_R1	7	5	1869.9	7	7	899.4
23-3221_R1	7	1	1553.9	7	1	764.6
23-3221_R1	19	10	1426.0	19	15	568.7
23-3221_R1	19	5	1261.4	19	7	487.8
23-3221_R1	19	1	913.4	19	1	352.7
23-3221_R1	35	10	864.5	35	15	309.5
23-3221_R1	35	5	676.5	35	7	271.2
23-3221_R1	35	1	312.8	35	1	179.5
23-3221_R2	7	10	1935.5	7	15	879.9
23-3221_R2	7	5	1845.3	7	7	787.5
23-3221_R2	7	1	1550.2	7	1	482.8
23-3221_R2	19	10	1381.9	19	15	576.3
23-3221_R2	19	5	1277.5	19	7	426.3
23-3221_R2	19	1	968.0	19	1	271.3
23-3221_R2	35	10	771.1	35	15	252.1
23-3221_R2	35	5	594.1	35	7	180.7
23-3221_R2	35	1	276.1	35	1	138.0
23-3221_R3	7	10	1959.0	7	15	963.9
23-3221_R3	7	5	1885.2	7	7	942.2
23-3221_R3	7	1	1554.7	7	1	800.0
23-3221_R3	19	10	1398.1	19	15	541.0
23-3221_R3	19	5	1272.3	19	7	427.1
23-3221_R3	19	1	901.3	19	1	270.0
23-3221_R3	35	10	821.8	35	15	244.9
23-3221_R3	35	5	644.2	35	7	221.0
23-3221_R3	35	1	259.3	35	1	140.4
24_3222_R1	7	10	1715.0	7	15	921.6
24_3222_R1	7	5	1623.1	7	7	881.1
24_3222_R1	7	1	1299.0	7	1	605.3
24_3222_R1	19	10	1400.0	19	15	665.9
24_3222_R1	19	5	1016.4	19	7	559.7
24_3222_R1	19	1	516.2	19	1	371.1
24_3222_R1	35	10	889.9	35	15	270.2
24_3222_R1	35	5	679.7	35	7	218.1
24_3222_R1	35	1	246.6	35	1	145.3
24_3222_R2	7	10	1906.6	7	15	1070.2
24_3222_R2	7	5	1803.5	7	7	1006.6
24_3222_R2	7	1	1453.6	7	1	844.5
24_3222_R2	19	10	1443.7	19	15	786.0
24_3222_R2	19	5	1260.5	19	7	645.2
24_3222_R2	19	1	872.6	19	1	435.4
24_3222_R2	35	10	872.1	35	15	352.2
24_3222_R2	35	5	705.6	35	7	292.5
24_3222_R2	35	1	251.7	35	1	197.1
24_3222_R3	7	10	1889.3	7	15	969.1
24_3222_R3	7	5	1818.5	7	7	919.3
24_3222_R3	7	1	1462.2	7	1	632.6
24_3222_R3	19	10	1468.4	19	15	760.4
24_3222_R3	19	5	1418.1	19	7	627.1
24_3222_R3	19	1	976.0	19	1	427.2
24_3222_R3	35	10	898.7	35	15	327.0
24_3222_R3	35	5	688.6	35	7	259.7
24_3222_R3	35	1	244.5	35	1	183.4