

**VALIDACIÓN EN BUCARAMANGA DEL MODELO HWANG Y
WITCZAK PARA PREDECIR LA RIGIDEZ EN MEZCLAS
ASFÁLTICAS**

**LILIBETH GUERRERO RAMIREZ
ELVIA JUDITH ROMERO ARVILLA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
2008**

**VALIDACIÓN EN BUCARAMANGA DEL MODELO HWANG Y
WITCZAK PARA PREDECIR LA RIGIDEZ EN MEZCLAS
ASFÁLTICAS**

**LILIBETH GUERRERO RAMIREZ
ELVIA JUDITH ROMERO ARVILLA**

**Tesis De Grado Modalidad Investigación
Para Opta Título De:
Ingeniera Civil**

**Director:
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN
Ingeniero Civil, M. Sc., Ph D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
BUCARAMANGA
2008**

*A Dios que le debo todo lo que ha hecho de mí.
A las dos mujeres que más amo y adoro en mi vida, mi madre Carmen y
mi hermana (Mi bebé) Geiby; por creer en mí, por su paciencia, y por
haberme permitido demostrarles que todos sus esfuerzos y esperanzas
puestas en mí son una realidad.
A mis hermanos y a doña Tere por su comprensión.*

Lilibeth

*A mi hermano Carlos, el amor de mi vida
A mi madre Doris y mi padre Carlos, por su amor
A toda mi familia, por su paciencia conmigo*

Elvia

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a:

Ing. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, director del proyecto, por su orientación y valiosos conocimientos.

A los autores y autoras de los trabajos de grado en los que se fundamentó esta tesis.

A todos los docentes de la escuela de ingeniería civil por sus grandes y pequeños aportes en nuestra formación.

A las compañeras y compañeros que nos acompañaron en nuestro paso por la universidad.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1. MÓDULO DE RIGIDEZ DE MEXCLAS ASFALTICA	2
1.1.1. Módulo Resiliente.....	3
1.1.2. Módulo Complejo Dinámico	4
1.1.3. Módulo Dinámico.....	5
1.2. MODELOS DE PREDICCIÓN DE MÓDULO DINÁMICO.....	5
1.2.1. Método Bonnaure (Shell).....	6
1.2.2. Método AASHTO.....	8
1.2.3. Método Heukelom y Klomp.....	8
1.2.4. Método Hwang y Witczak.....	9
1.3. VARIABLES QUE AFECTAN AL MÓDULO	10
1.3.1. Temperatura.....	11
1.3.2. Frecuencia.....	11
1.3.3. Viscosidad.....	12
1.3.4. Porcentaje de vacíos.....	13
1.3.5. Porcentaje de asfalto.....	13
1.3.6. Porcentaje de finos.....	14
2. METODOLOGÍA.....	15
2.1. DESARROLLO DEL ESTUDIO.....	15
2.2. VARIABLES.....	16
2.2.1. Agregado.....	16
2.2.2. Porcentaje Asfalto.....	17
2.2.3. Porcentaje Vacios.....	18
2.2.4. Viscosidad del asfalto.....	18

2.2.5. Temperatura.....	19
2.2.6. Frecuencia.....	20
3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS.....	21
4. CONCLUSIONES.....	37
5. BIBLIOGRAFÍA.....	39
ANEXOS.....	42

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Carga Ondulatoria con Periodo De Descanso	2
Ilustración 2. Carga Sinusoidal	3
Ilustración 3. Nomograma Módulo Dinámico de la Mezcla Asfáltica Según Shell, (1978)	6
Ilustración 4. Nomograma Módulo Dinámico Del Asfalto Según Van Der Poel, (1954)	7
Ilustración 5. Nomograma Módulo Dinámico de la Mezcla Asfáltica Según AASHTO	8
Ilustración 6. Comportamiento Datos A1	21
Ilustración 7. Comportamiento Datos A1 Porcentaje De Asfalto En Volumen Entre 11 Y 12	22
Ilustración 8. Comportamiento Datos A1 Porcentaje De Asfalto En Volumen Entre 12 Y 13	22
Ilustración 9. Comportamiento Datos A1 Porcentaje De Vacios Entre 2 Y 4	23
Ilustración 10. Comportamiento Datos A1 Porcentaje De Vacios Entre 4 Y 5	23
Ilustración 11. Comportamiento Datos A1 Porcentaje De Vacios Entre 5 y 7	24
Ilustración 12. Comportamiento Datos A1 Porcentaje De Vacios Entre 7 y 9	24
Ilustración 13. Comportamiento Datos A1 Ajustados	25
Ilustración 14. Comportamiento Datos A1 Ajustados Fuente Sogamoso	25
Ilustración 15. Comportamiento Datos A1 Ajustados Fuente Chicamocha	26

Ilustración 16. Comportamiento Datos A1 Ajustados Fuente Bocas.....	26
Ilustración 17. Comportamiento Datos A2	27
Ilustración 18. Comportamiento Datos A2 Porcentaje De Vacíos Entre 7 Y 8	28
Ilustración 19. Comportamiento Datos A2 Porcentaje De Vacíos Entre 8 y 9	28
Ilustración 20. Comportamiento Datos A2 Porcentaje De Asfalto En Volumen 10.147	29
Ilustración 21. Comportamiento Datos A2 Porcentaje De Asfalto En Volumen 12.402.....	29
Ilustración 22. Comportamiento Datos B-P Respecto A La Temperatura Asfalto 60-70.....	31
Ilustración 23. Comportamiento Datos B-P Respecto a La Temperatura Asfalto 80-100	31
Ilustración 24. Comportamiento Datos B-PRO Respecto a La Temperatura Asfalto 60-70	32
Ilustración 25. Comportamiento Datos B-PRO Respecto a La Temperatura Asfalto 80-100	32
Ilustración 26. Comportamiento Datos B-TP Respecto a La Temperatura Asfalto 60-70.....	33
Ilustración 27. Comportamiento Datos B-TP Respecto a La Temperatura Asfalto 80-100	33
Ilustración 28. Datos C Respecto A La Temperatura Asfalto 60-70.....	34
Ilustración 29. Datos C Respecto A La Temperatura Asfalto 80-100	34
Ilustración 30. Datos C Modificados Respecto A La Temperatura Asfalto 60-70.....	35
Ilustración 31. Datos C Modificados Respecto A La Temperatura Asfalto 80-100.....	36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje De Finos (P200).....	17
Tabla 2. Porcentaje De Asfalto En Peso.....	17

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Módulo Resiliente.....	4
Ecuación 2. Módulo Complejo Dinámico	4
Ecuación 3. Módulo Dinámico.....	5
Ecuación 4. . Módulo de Rigidez De La Mezcla Asfáltica Según Heukelom y Klomp.....	8
Ecuación 5. Valor de n Para Módulo De Rigidez De La Mezcla Asfáltica Según Heukelom Y Klomp.....	9
Ecuación 6. . Valor de C_v Para Módulo de Rigidez De La Mezcla Asfáltica Según Heukelom y Klomp	9
Ecuación 7. . Valor de C'_v Para Módulo de Rigidez De La Mezcla Asfáltica Según Van Draat y Sommer.....	9
Ecuación 8. Modelo Para estimar El Módulo Dinámico Mezcla Asfáltica Según Hwang y Witczak	9
Ecuación 9. Viscosidad Del Asfalto Según Hwang y Witczak.....	10
Ecuación 10. Viscosidad del Asfalto Hwang y Witczak.....	18
Ecuación 11. Viscosidad del Asfalto 60-70 Válida Asfalto Barrancabermeja	19
Ecuación 12. Parámetro β_2 Calibrado Asfalto 60-70	35
Ecuación 13. Parámetro β_2 Calibrado Asfalto 80-100	35

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Características De Los Especímenes A1.....	43
Anexo 2. Características De Los Especímenes A2.....	44
Anexo 3. Contenido Caliza Y Cuarcita De Cada Tipo De Mezcla A2....	44
Anexo 4. Características De Los Especímenes B-P 60-70	45
Anexo 5. Características De Los Especímenes B-P 80-100	46
Anexo 6. Características De Los Especímenes B-TP 60-70.....	47
Anexo 7. Características De Los Especímenes B-TP 80-100.....	48
Anexo 8. Características De Los Especímenes B-PRO 60-70	49
Anexo 9. Características De Los Especímenes B-PRO 80-100.....	50
Anexo 10. Características De Los Especímenes C	51

RESUMEN

TITULO

VALIDACIÓN EN BUCARAMANGA DEL MODELO HWANG Y WITCZAK PARA PREDECIR LA RIGIDEZ EN MEZCLAS ASFÁLTICA*

AUTORAS

Lilibeth Guerrero Ramírez
Elvia Judith Romero Arvilla**

PALABRAS CLAVES

Módulo Dinámico, Mezcla Asfáltica, Pavimento Flexibe

RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN

El modelo propuesto por Hwang y Witczak para predecir el módulo dinámico en mezclas asfálticas está definido por la variación de la temperatura y la frecuencia de aplicación de carga, ya que a altas temperaturas y tiempos largos de aplicación de carga el módulo es bajo, mientras que a bajas temperaturas y tiempos cortos de aplicación de carga el módulo es alto. También está determinado por las propiedades del asfalto, la viscosidad, el porcentaje de vacíos y el agregado utilizado en la fabricación de las mismas o la fuente donde se extrae.

Para el desarrollo del estudio se contó con investigaciones realizadas en diversos trabajos, donde se obtuvieron resultados de mediciones de módulos, características de los ensayos realizados e información necesaria sobre los materiales de cada muestra; con los cuales se diseñó una metodología para calibrar y validar el modelo propuesto por Hwang y Witczak. Se estableció una comparación entre la fórmula para la determinación del módulo dinámico y los datos obtenidos en el laboratorio; se puso en evidencia cuales parámetros son más influyentes en la fórmula y cómo estos la afectan, además, si se ha incurrido en errores humanos o de medición. Demostrando la susceptibilidad de las mezclas asfálticas a la temperatura y al porcentaje de asfalto, lo que llevó a la calibración de estos parámetros.

*Proyecto de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. ING. EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN

ABSTRACT

TITLE

VALIDATION IN BUCARAMANGA OF THE MODEL TO PREDICT THE STIFFNESS IN ASPHALTIC MIX BY HWANG AND WITCZAK*

AUTHORS

Lilibeth Guerrero Ramírez
Elvia Judith Romero Arvilla**

KEYWORDS

Dynamic Modulus, Asphaltic Mix, Flexible Pavement.

SUMMARY OF RESEARCH

The model proposed by Hwang and Witczak to predict the dynamic modulus in asphaltic mixtures, is defined by the variation in temperature and frequency of application loading; as high temperatures and long periods of application load modulus is low, whereas low temperatures and short periods of application load modulus is high. The modulus is also determined by asphalt properties: viscosity, void percent and aggregates used on the manufacture of the mix or where the source is removed.

Development of the studies counted with research conducted at various jobs, where results were obtained from measurements of modules, characteristics of tests and information of materials needed for each sample, which was designed with a methodology to calibrate and validate the model proposed by Hwang and Witczak.

*Grade Work

**Faculty of Physique Mechanics Engineerings. Civil Engineering. ENGINEER EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN

INTRODUCCIÓN

Para nadie es secreto que los procedimientos de diseños de vías utilizados en nuestro país son copia de modelos extranjeros realizados a partir de experimentos con materiales diferentes a los disponibles; lo que obliga a calibrar dichos modelos a las particularidades de los materiales, características regionales y procesos constructivos. Uno de los elementos fundamentales en el diseño de pavimentos flexibles es el módulo dinámico que caracteriza y es determinante en el comportamiento de las mezclas asfálticas.

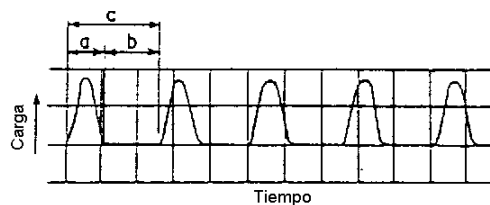
Un proyecto como el que se plantea en estas páginas, proporcionará información valiosa acerca de la precisión del modelo de Hwang y Witczak, con la intención de hacer que los diseños de pavimentos flexibles sean más fiables y acorde a los materiales y particularidades de la región.

1. MARCO TEÓRICO

A continuación, se describen los diferentes módulos para medir la rigidez de las mezclas asfálticas, los métodos para su predicción y las variables que intervienen o afectan en ella.

1.1. Módulos De Rigidez En Mezclas Asfálticas

El módulo de rigidez se puede considerar como la propiedad más importante debido a que se usa para establecer la resistencia en las mezclas asfálticas, para el diseño de la mezcla asfáltica para pavimento y para el diseño del espesor de la capa de pavimento asfáltico. Los ensayos diseñados para determinar la rigidez en mezclas asfálticas utilizan cargas de forma ondulatoria con un tiempo de descanso dado; con lo cual se busca simular lo que realmente ocurre en una vía: cuando una carga de rueda está a una distancia considerable de un punto dado del pavimento, el esfuerzo en ese punto es cero; cuando la carga está directamente sobre dicho punto, los esfuerzos en ese punto son máximos. También se puede determinar la rigidez mediante el empleo de cargas sinusoidales sin períodos de descanso.



- a = duración de la carga
- b = tiempo de reposo
- c = duración del ciclo

Ilustración 1. Carga Ondulatoria con Periodo De Descanso

considerarse elástica. La ecuación derivada para calcular el módulo resiliente es:

$$M_r = \frac{P(0.27 + \mu)}{H \cdot t}$$

Ecuación 1. Módulo Resiliente

Donde,

P = Carga aplicada en KN

H = Deformación vertical en m.

μ = Relación de Poisson

t = Espesor de la probeta en m.

1.1.2. Módulo Complejo Dinámico

Es una cantidad compleja en la cual la parte real (E') representa el almacenamiento de energía y la parte imaginaria (E'') corresponde a la disipación de ésta.

$$E = E' \pm iE''$$

Ecuación 2. Módulo Complejo Dinámico

Este módulo también ha sido usado para el diseño de pavimentos. En los ensayos para módulo complejo dinámico se aplican cargas sinusoidales sin periodos de descanso (véase Figura 4) y se determina con deformaciones elásticas e inelásticas. El módulo complejo es uno de varios métodos para describir la relación esfuerzo-deformación de los materiales visco-elásticos.

1.1.3. Módulo Dinámico

Básicamente es la relación entre la amplitud de la deformación unitaria máxima del material bajo una carga aplicada y la amplitud del esfuerzo; se denomina también como la magnitud del módulo complejo de una mezcla.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Ecuación 3. Módulo Dinámico

Donde,

E = Módulo Dinámico

σ = Esfuerzo

ε = Deformación unitaria

La diferencia principal que existe entre el módulo resiliente y módulo dinámico, aunque ambos están relacionados con la rigidez de la mezcla, es que el módulo resiliente se deduce con la deformación unitaria recuperable, mientras que el módulo dinámico se calcula utilizando la deformación unitaria máxima que se alcanza.

1.2. Modelos de Predicción De La Rigidez De Mezclas Asfálticas

A continuación se mencionan algunos modelos para predecir la rigidez de mezclas asfálticas propuestos por diferentes autores.

1.2.1. Método Bonnaure (Shell)

Este método consiste en usar el siguiente monograma que es aplicado para determinar el módulo dinámico de las mezclas asfálticas (Bonnaure, 1977).

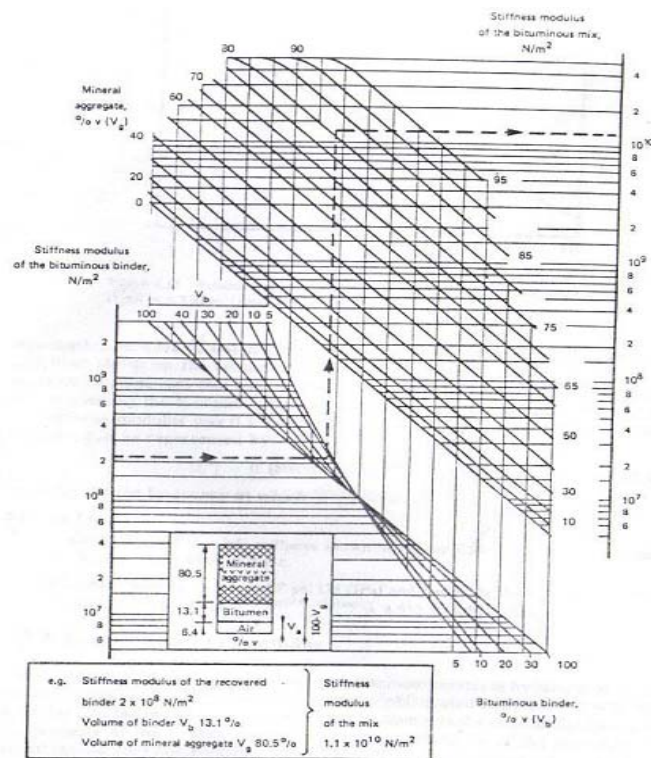
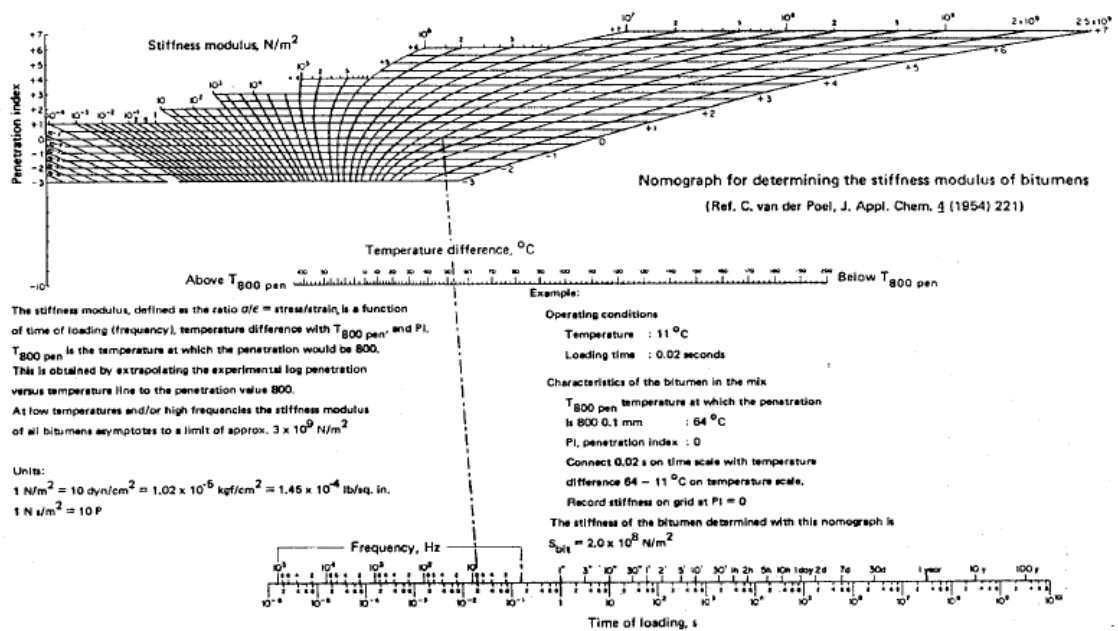


Ilustración 3. Nomograma Módulo Dinámico de la Mezcla Asfáltica Según Shell, (1978)

Los factores a considerar para encontrar el módulo dinámico de la mezcla asfáltica son el módulo dinámico del asfalto de la mezcla, el porcentaje en volumen del asfalto, el porcentaje en volumen del agregado, la gravedad específica del asfalto y del agregado y el peso específico aparente de la mezcla. Ésta última puede ser determinada por el método de desplazamiento de agua, especificado por AASHTO

(1989), "T166-83 Bulk Specific Gravity of Compacted Bituminous Mixtures."

Shell propone que en caso de no conocer el módulo dinámico del asfalto de la mezcla se use el monograma de Van Der Poel, (1954).



Van der Poel's Nomograph for the Prediction of Binder Stiffness
Ilustración 4. Nomograma Módulo Dinámico Del Asfalto Según Van Der Poel, (1954)

Los factores a ser considerados para entrar a este nomograma son el tiempo de carga, la temperatura y el índice de penetración (IP). La temperatura a ser usada es la diferencia entre la temperatura experimental y la temperatura donde la penetración es 800 o T_{R&B}, llamada temperatura normalizada².

² HYANG, Yang H. Pavement Analysis and Desing. Prentice Hall. New Yersy 1993. Pp 338 – 343.

1.2.2. Método AASHTO

Este método usa un monograma para hallar el módulo de Resiliencia. Si se conoce la Estabilidad Marshall en libras, se entra en la siguiente gráfica y se halla el respectivo valor del módulo³.

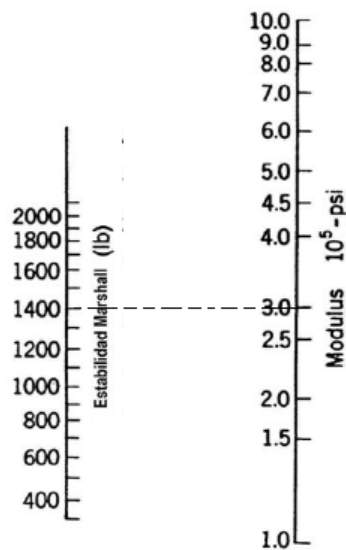


Ilustración 5. Nomograma Módulo Dinámico de la Mezcla Asfáltica Según AASHTO

1.2.3. Método Heukelom y Klomp

Heukelom y Klomp proponen la siguiente ecuación para calcular el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica S_m

$$S_m = S_b \left(1 + \frac{2,5}{n} * \frac{C_v}{1 - C_v} \right)^n$$

Ecuación 4. . Módulo de Rigidez De La Mezcla Asfáltica Según Heukelom y Klomp

³ Ing. José R. Harris Q Diseño de pavimento flexible – AASHTO. Pp 10.

Donde,

$$n = 0,831 \lg \left(\frac{4 * 10^4}{S_b} \right)$$

Ecuación 5. Valor de n Para Módulo De Rigidez De La Mezcla Asfáltica Según Heukelom Y Klomp

$$C_v = \frac{V_g}{V_g + V_b} = \frac{\text{Volumen de agregados}}{\text{Volumen (agregados + asfalto)}}$$

Ecuación 6. . Valor de C_v Para Módulo de Rigidez De La Mezcla Asfáltica Según Heukelom y Klomp

S_m y S_b son dados en MPa; esta fórmula sólo se aplica si S_b es superior a 10MPa y C_v tiene valores entre 0,7 y 0,9. Ya que esta fórmula es válida sólo para un porcentaje de vacíos de 3%, Fijin Van Draat y Sommer han sustituido el término C_v por el término C'_v para generalizar la ecuación y calcular el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica.

$$C'_v = \frac{C_v}{1 + \frac{v-3}{100}}$$

Ecuación 7. . Valor de C'_v Para Módulo de Rigidez De La Mezcla Asfáltica Según Van Draat y Sommer

Donde v es el porcentaje de vacíos⁴.

1.2.4. Método Hwang y Witczak

Hwang y Hwang y Witczak (1979) aplicaron las siguientes fórmulas de regresión para determinar el módulo dinámico (E^*)

$$E = 100000 * 10^{0,1}$$

Ecuación 8. Modelo Para estimar El Módulo Dinámico Mezcla Asfáltica Según Hwang y Witczak

⁴ MERCHAND, Jean Pierre, DANZATS, Michael, KOBISCH, Polt. Mecanique Des Chaussées. Pp 63.

Donde,

$$\beta_1 = \beta_3 - 0.000005\beta_2 - 0.00189\beta_2 f^{1.1}$$

$$\beta_2 = \beta_4^{0.5} T^{\beta_5}$$

$$\beta_3 = 0.553833 + 0.028829 (P_{200} f^{0.1703}) - 0.03476V_a + 0.070377\lambda + 0.931757f^{0.0274}$$

$$\beta_4 = 0.483V_b$$

$$\beta_5 = 1.3 + 0.49825/\log f$$

En el que f es la frecuencia de aplicación de carga en Hz; T es la temperatura en °F; P_{200} es el porcentaje en peso del agregado que pasa a través del tamiz No200; V_a es el volumen de vacíos en %; λ es la viscosidad del asfalto a 70°F en 10^6 poises y V_b es el volumen de bitumen en % de volumen.

Si no se dispone de datos de viscosidad para estimar λ , la siguiente ecuación propuesta por Hwang y Witczak puede ser usada

$$\lambda = 29508.2P^{-2.1939}$$

Ecuación 9. Viscosidad Del Asfalto Según Hwang y Witczak

En la cual $P_{77^\circ\text{F}}$ es la penetración a 77°F (25°C aproximadamente)⁵.

1.3. Variables Que Afectan La Rigidez De Las Mezclas Asfálticas

De acuerdo a los modelos planteados por los autores mencionados, a continuación se realiza una breve explicación de cómo afectan algunos parámetros la rigidez de las mezclas asfálticas.

⁵ HYANG, Yang H. Pavement Analysis and Design. Prentice Hall. New Jersey 1993.

1.3.1. Temperatura

La variación de las propiedades dinámicas en las mezclas asfálticas se da principalmente por el cambio de temperatura; pues un aumento de ésta genera una disminución en el módulo⁶, provocando que el asfalto presente características de un material elástico, con lo cual aparece un comportamiento viscoso que lo hace fluir y desplazarse con mucha facilidad, sin capacidad de recuperación o de regresar a su estado original a medida que la temperatura sigue aumentando⁷.

A temperaturas bajas el asfalto es rígido y se comporta como un sólido elástico que se deforma al ser cargado y retorna completamente a su forma original al ser descargado; pero va perdiendo poder de resistencia a las tensiones, volviéndose frágil y siendo susceptible de fisuración. Las fisuras se forman cuando una capa del pavimento asfáltico se contrae originando tensiones de tracción que excede la resistencia de tracción dentro de la capa asfáltica⁸. El grado de susceptibilidad a la fisuración está relacionado con su dureza y su capacidad para absorber las sollicitaciones inducidas por el tráfico.

1.3.2. Frecuencia

El aumento de la frecuencia de carga, que se manifiesta a través del movimiento de los vehículos pesados sobre la estructura, genera un

⁶ VIDAL VALENCIA, JULIAN. Comportamiento dinámico de mezclas asfálticas. Universidad Eafit, julio-septiembre, año/vol. 42, numero 143. Medellín, Colombia. p. 73.

⁷ REYES ORTIZ, Oscar J., CAMACHO TAUTA, Javier. Influencia de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas. Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte. 23: 26-42, 2008. p. 27.

⁸ GARNICA ANGUAS, Paul, GÓMEZ LÓPEZ, José y DELGADO ALAMILLA, Antonio Horacio. Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio. Secretaría de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte. Publicación Técnica No. 228. Sanfandila, Oro, 2003. p. 11-18.

aumento en el módulo dinámico a medida que la velocidad se incrementa, haciendo que el material responda de forma más rígida; este comportamiento es evidente a temperaturas bajas, pero en el caso de temperaturas altas cercanas al punto de ablandamiento del asfalto, el módulo varía muy poco y en algunos casos es igual. Así mismo, un alto módulo dinámico genera amortiguamientos más bajos, lo que indicaría que una mezcla asfáltica se deforma menos cuando la velocidad de los vehículos es mayor⁹. Al tener la frecuencia mayor influencia en el ahuellamiento de las capas asfálticas, para valores bajos de frecuencia, se presenta una mayor deformación permanente, ya que la carga permanece en contacto más tiempo con la capa¹⁰.

1.3.3. Viscosidad

La viscosidad es la característica que describe la resistencia de los líquidos a fluir, depende de la temperatura y del tipo de ensayo que se realiza. Cuando los ligantes asfálticos son poco viscosos, de alta penetración, provocan que las mezclas asfálticas sean muy susceptibles a las deformaciones plásticas o a la formación de roderas. Bajas velocidades aumentan la viscosidad. La baja viscosidad en el asfalto empleado, hace que la mezcla sea menos rígida o dura y por consiguiente más susceptible a las roderas y deben ser usados en espesores gruesos de pavimento en climas cálidos¹¹.

⁹ VIDAL VALENCIA, Julián. Comportamiento dinámico de mezclas asfálticas. Universidad Eafit, julio-septiembre, año/vol. 42, número 143. Medellín, Colombia. p. 73 y 87.

¹⁰ PÁEZ MORENO, Diego F., PEREIRA FERNÁNDEZ, Henry F. Estudio de ahuellamiento en mezclas asfálticas. Universidad de los Andes. Agosto de 2001. p.13.

¹¹ PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Capítulo 7, Conclusiones y recomendaciones. UPC. p. 162.

1.3.4. Porcentaje de vacíos

El porcentaje de vacíos influye en las propiedades de la mezcla, lo que conlleva a que a menor contenido de vacíos, mayor es la influencia del mismo en el ahuellamiento y se incrementa la resistencia de la mezcla a la deformación plástica; por otra parte, un incremento en los vacíos causan un incremento en las deformaciones permanentes para mezclas con granito y caliza, mientras que causan un decremento en las mezclas con agregados de gran tamaño¹². Las mezclas con bajo contenido de vacíos se comportan mejor que las mezclas con altos contenido de vacíos. Igualmente el porcentaje de vacíos no debe ser nulo pues estos garantizan que la mezcla se recupere ante deformaciones de carga.

1.3.5. Porcentaje de asfalto

Las propiedades del asfalto pueden influir fuertemente sobre el comportamiento ante las deformaciones plásticas de una mezcla asfáltica con altas temperaturas y en lo que se relaciona a fisuras transversales por bajas temperaturas. El empleo de modificadores asfálticos aumentan la resistencia a las altas temperaturas originando un comportamiento elástico de la misma, recuperando todas las deformaciones inducidas por las cargas del tráfico y evitando así la formación de roderas¹³.

¹²REYES ORTIZ, Oscar J., CAMACHO TAUTA, Javier. Influencia de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas. Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte. 23: 26-42, 2008. p. 27 y 29.

¹³ PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Capítulo 7, Conclusiones y recomendaciones. UPC. p. 162

Altos contenidos de asfalto causan bajos contenidos de vacíos en las mezclas y como resultado un incremento en la susceptibilidad a la deformación plástica de la mezcla. La reducción en el contenido de vacíos en la mezcla es resultado del incremento en el contenido de asfalto, el espacio destinado a los vacíos es rellenado con el ligante asfáltico. Introducir a la mezcla un contenido de asfalto mayor al debido, es equivalente a introducir lubricante entre las partículas de agregado y se ajusta en gran medida la red de contenidos de vacíos. Este fenómeno causa que la mezcla con alto contenido de asfalto sea también muy susceptible a las roderas¹⁴.

1.3.6. Porcentaje de finos

Los finos constituyen una fracción pequeña en el peso de la mezcla, debido a su tamaño tienen gran área superficial que afecta las características de las mezclas. Estos materiales al ser mezclados con el ligante asfáltico, influyen en la estabilidad y rigidez de las mezclas, en el contenido de vacíos, así como en la resistencia a la acción del agua y a las condiciones ambientales. El exceso de finos en la mezcla puede causar una estabilidad baja, permitiendo que se formen ondulaciones en la superficie¹⁵. La angularidad del agregado fino asegura un grado alto de la fricción interna del agregado fino y de la resistencia al ahuellamiento. La presencia menor de finos genera estructuras de la mezcla más resistentes a las cargas sobre las mismas¹⁶.

¹⁴ PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Capítulo 4, Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos. . UPC. p. 82.

¹⁵ Ing. Ernesto Urbáez e Ing. Vanessa Cardier. Análisis de las propiedades Marshall y estabilidad retenida en mezclas de concreto asfáltico en caliente disminuyendo los valores permisibles en el ensayo de equivalente de arena (utilizando especificaciones granulométricas superpave). Año 7. Números 1 al 6. Enero a Junio 2001. Número 60. p. 4.

¹⁶ OLIVEROS GARCÍA, Marco Aurelio. Caracterización de mezclas asfálticas bajo metodología SUPERPAVE. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Octubre de 1987 hasta Marzo de 1993. p. 6 y 15.

2. METODOLOGÍA

La validación del modelo de Hwang y Witczak para módulo dinámico se establece realizando un paralelo entre los resultados experimentales y los teóricos; se involucran variables que simulan las condiciones externas a las que está sometido el material y otras que caracterizan el bitumen.

2.1. Desarrollo Del Estudio

La presente investigación se dividió en tres etapas, en cada etapa se analizó un grupo de datos, cada uno con diferentes particularidades en los ensayos y en los ejemplares fallados.

En la primera etapa se estudiaron datos de dos investigaciones realizadas entre los años 2002 y 2004, las cuales se desarrollaron con diseño de briquetas mediante las normas INVIAS y ensayos realizados en el equipo NAT, Nottingham Asphalt Tester, que serán denominados A1, A2. En el grupo A2 se diseñaron probetas MCD-2, las cuales tienen como rasgo principal la utilización de de dos tipos de agregados, el primero son rocas de cuarcita (agregado hidrófilo o de baja adherencia con alto contenido de sílice) extraído de la cantera de Pescadero Santander y rocas de caliza (agregado hidrófobo o de alta adherencia con alto contenido de carbonato cálcico) proveniente de la planta de Calizas de Colombia en Curití Santander.

En una segunda etapa los datos son obtenidos de un trabajo donde se ensayaron tres tipos de mezclas MDC-2 sometidas a cargas casi

estáticas (velocidades bajas que originan frecuencias cercanas a cero), estos se denominaron B-PRO, B-TP, B-P según el diseño. Y por último, datos de ensayos realizados por CORASFALTOS, que serán denominados C, en estos ensayos se fallaron mezclas MDC-1 y MDC-2, sometidas a diferentes tipos de frecuencias y temperaturas.

2.2. Variables

En la fórmula de Hwang y Witczak se involucran seis variables, porcentaje de finos, porcentaje de asfalto, porcentaje de vacíos, viscosidad del asfalto a 70^of, frecuencia de aplicación de carga y temperatura de la muestra. Las primeras cuatro son propias de cada mezcla y dependen del diseño de la misma; las otras son externas a ella y simulan las condiciones bajo las que se encuentra sometido el pavimento asfáltico.

2.2.1. Agregado

En todos los estudios se usaron agregados provenientes de canteras del departamento de Santander como la del río Chicamocha, Sogamoso y Bocas, además de la cuarcita y caliza proveniente de Pescadero y Curití. A todos los agregados se le hicieron estudios de laboratorio que se pueden apreciar en los anexos correspondientes¹⁷.

¹⁷ RUEDA, Sergio y CIFUENTES Sergio. Variación de las propiedades mecánicas del concreto asfáltico sometido a ciclos de humedecimiento y secado. Bucaramanga. 2002. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander

CASTELLANOS, Alba y ACUÑA, Sandra. Influencia de las fracciones del árido, en el gradiente del deterioro de la adhesión asfalto agregado. Bucaramanga. 2004. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander.

CHAVEZ, Sergio. Relación entre propiedades mecánicas de concretos asfálticos bajo carga estática y dinámica. Bucaramanga. 2008. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander.

Las muestras fabricadas, poseen distintas granulometrías, a continuación se muestra la cantidad de finos que se uso en su diseño.

MATERIAL		% P200
A1	Bocas	7,38
	Chicamocha	8,02
	Sogamoso	5,72
A2	Todos los Datos	7,00
B	Todos los Datos	6,00
C	Datos No Disponibles	

Tabla 1. Porcentaje De Finos (P200)

2.2.2. Porcentaje Asfalto

El ligante usado en todos los casos es proveniente de la refinería de ECOPETROL en Barrancabermeja, se destinaron asfaltos 60-70 y 80-100, la cantidad usada en cada caso depende los resultados del ensayo Marshall.

MATERIAL	TIPO ASF.	% ASFALTO	
A1	Bocas	80-100	5,0
	Chicamocha	80-100	5,0
	Sogamoso	80-100	5,5
A2	A	80-100	5,5
	B	80-100	4,5
B	PRO	60-70 y 80-100	4,9
	TP	60-70 y 80-100	4,9
	P	60-70 y 80-100	4,8
C	Datos No Disponibles		

Tabla 2. Porcentaje De Asfalto En Peso

NÚÑEZ LOBO, Hugo. Asistencia técnica en el laboratorio de suelos y pavimentos de la corporación para la investigación y el desarrollo en asfaltos en el sector transporte e industrial – CORASFALTOS. 2008. Practica empresarial (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander.

Para la utilización de la fórmula de Hwang y Witczak, la cantidad de asfalto se debe expresar en porcentaje en volumen que se obtendría multiplicando el peso de la probeta por el porcentaje de asfalto dividido en el volumen de la misma. El porcentaje de asfalto en volumen de las muestras se aprecia en el anexo.

2.2.3. Porcentaje de Vacíos

En las briquetas estudiadas se pueden encontrar porcentajes de vacíos comprendidos entre 2.23 y 8.53. La cantidad de vacíos depende de la energía de compactación del espécimen y esta se determina según el nivel del tránsito (pesado, medio, liviano). En el anexo se muestran porcentajes de vacíos de cada espécimen.

2.2.4. Viscosidad del Asfalto

Para conocer la viscosidad del asfalto, Hwang y Witczak plantean la ecuación:

$$\lambda = 29508.2P^{-2.1939}$$

Ecuación 10. Viscosidad del Asfalto Hwang y Witczak

P es la penetración del asfalto a una temperatura específica y λ está en 10^6 Poises. Pero esta ecuación no se ajusta a los valores medidos en el asfalto utilizado. En un estudio realizado por Carlos Alberto Pareja Uribe¹⁸, para ECOPEPETROL sobre asfaltos de la refinería de Barrancabermeja, se estableció la siguiente relación viscosidad-tiempo para un asfalto 60-70

¹⁸ PAREJA URIBE, Carlos Alberto. Importancia de la química del asfalto en sus propiedades físicas.

$$\lambda = 10^{16} T^{-7.3243}$$

Ecuación 11. Viscosidad del Asfalto 60-70 Válida Asfalto Barrancabermeja

En la ecuación de módulo dinámico de Hwang y Witczak el valor de viscosidad usado es a una temperatura de 70°F o 21°C, usando la ecuación 11 se estima la viscosidad en aproximadamente $2.069 \cdot 10^6$ Poises para la briquetas que usen asfalto 60-70, para asfalto 80-100 se usara la ecuación 7 y se estima en $1.9713 \cdot 10^6$ Poises.

2.2.5. Temperatura

Las muestras A1 y A2 se ensayaron en el Nottingham Asphalt Tester bajo una única temperatura igual a 10°C, esta medida con errores de $\pm 1^\circ\text{C}$ a esta temperatura se disminuye la viscosidad de la mezcla y se aumenta la rigidez de la misma. Mientras que las probetas B se ensayaron bajo tres condiciones de temperatura, 15°C, 25°C y 35°C cada una. Los datos C utilizan temperaturas comprendidas entre 5 y 45 °C.

Para obtener la temperatura deseada las probetas se sumergen en agua durante cierto tiempo (de 3 a 4 horas) para que esta sea homogénea en toda la mezcla y además se conserve durante el ensayo. Para los datos B además se mantuvo la probeta sumergida en agua a la temperatura especificada en un recipiente metálico mientras se realizó el ensayo.

2.2.6. Frecuencia

La frecuencia de aplicación de carga para A1 y A2 fue de 10Hz o un tiempo de aplicación de 33 milisegundos que simulan el paso de un automóvil a 60 Km/h. En los valores B no se especifico la frecuencia de aplicación de carga sino que la velocidad de aplicación se mantuviera, que fueran muy pequeña (casi estática), se usaron velocidades del orden de 0.25"/min (6.4 mm/min), 0.60"/min (15.2 mm/min) y 2"/min (50.8 mm/min) se encontraron las frecuencias equivalentes. Mientras los datos C también manejan frecuencias de 10 Hz.

3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

Para validar el modelo se establece una comparación entre la fórmula de Hwang y Witczak para determinación de módulo dinámico y los datos obtenidos en el laboratorio. Se pone en evidencia los parámetros más influyentes en la fórmula y cuál o cuáles son los más significativos, además si se ha incurrido en errores humanos o de medición.

Si se graficara el módulo medido en laboratorio vs el módulo encontrado por la fórmula de Hwang y Witczak, si el modelo propuesto por Hwang y Witczak fuese correcto, se debería obtener una recta de pendiente igual a 1. Esto sería posible si los datos tuvieran correspondencia 1:1 y correlación $R^2 \approx 1$, pero siempre existe dispersión en los datos, errores en la medida y factores que tal vez no tiene en cuenta el modelo teórico, por lo tanto la correspondencia 1:1 es casi imposible de obtener. A continuación se aprecia la correspondencia del grupo de datos A1

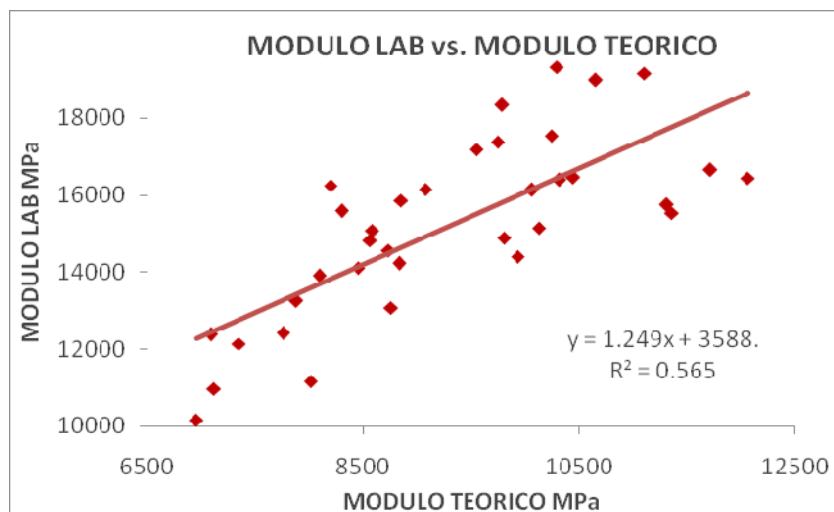


Ilustración 6. Comportamiento Datos A1

Como se puede observar, en la ilustración 6 la correlación es muy distante de 1. Se realiza la comparación separando por mezclas con valores de variables en diferentes intervalos, tratando de encontrar donde quizá se ajuste mejor la fórmula, como se muestra a continuación

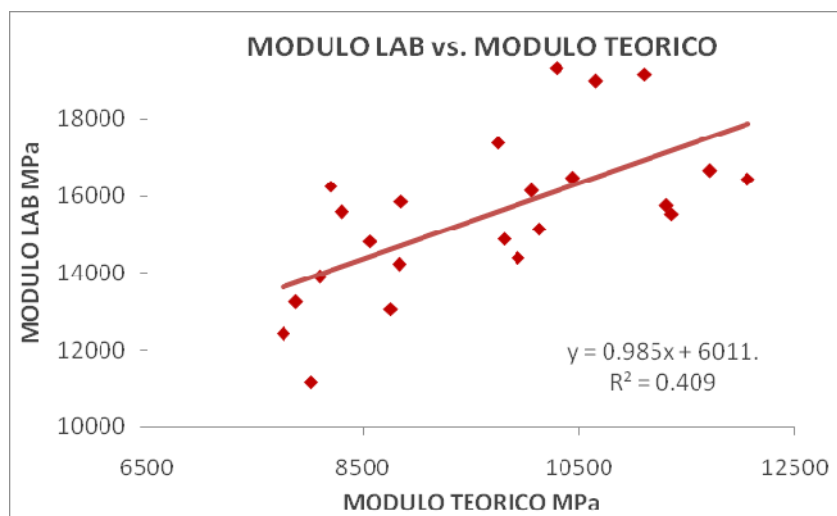


Ilustración 7. Comportamiento Datos A1 Porcentaje De Asfalto En Volumen Entre 11 Y 12

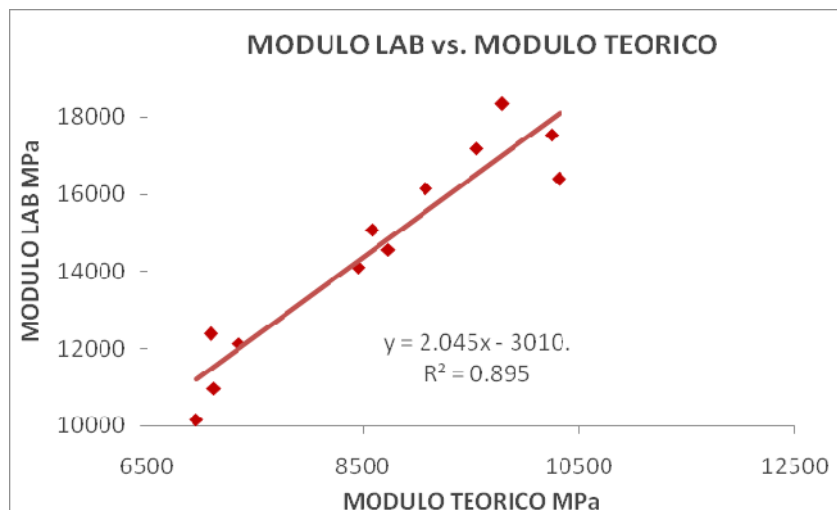


Ilustración 8. Comportamiento Datos A1 Porcentaje De Asfalto En Volumen Entre 12 Y 13

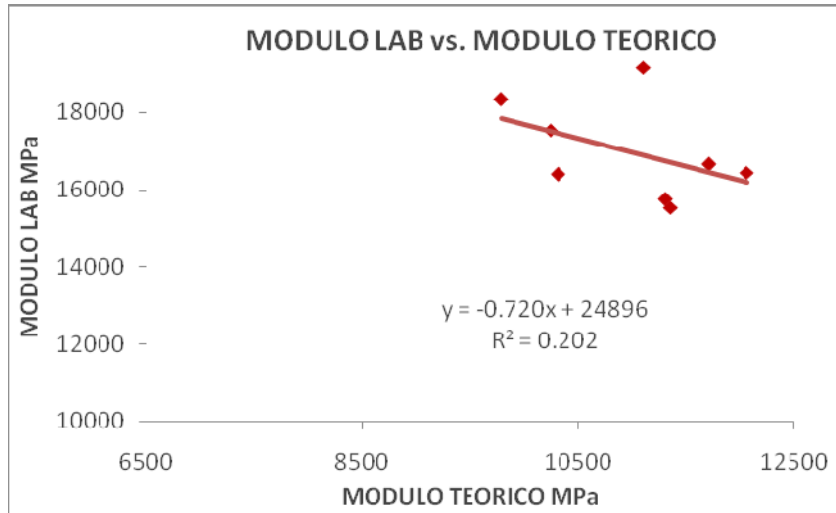


Ilustración 9. Comportamiento Datos A1 Porcentaje De Vacios Entre 2 Y 4

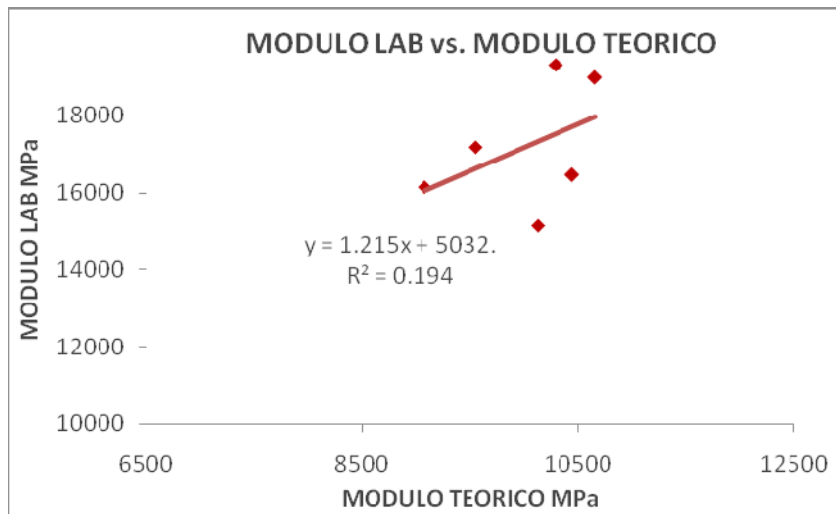


Ilustración 10. Comportamiento Datos A1 Porcentaje De Vacios Entre 4 Y 5

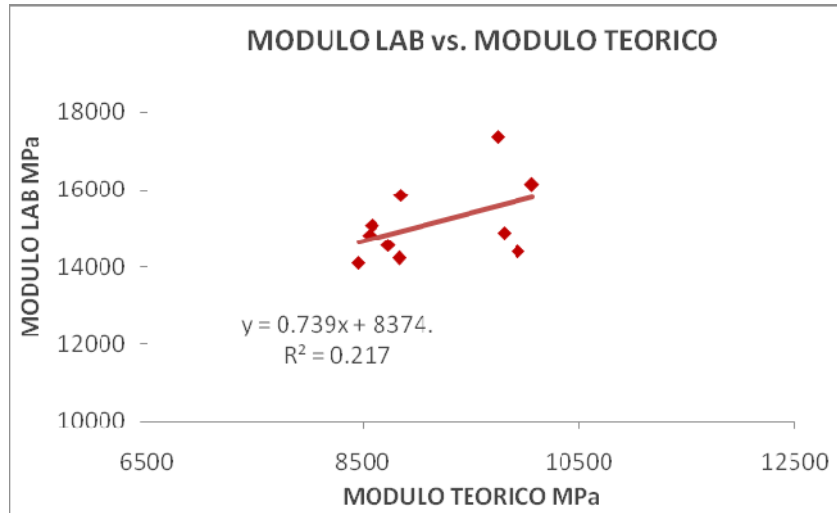


Ilustración 11. Comportamiento Datos A1 Porcentaje De Vacios Entre 5 y 7

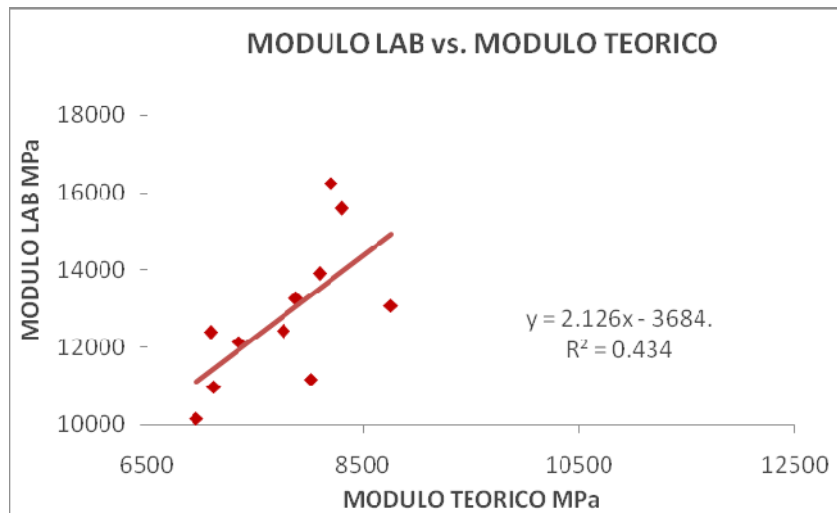


Ilustración 12. Comportamiento Datos A1 Porcentaje De Vacios Entre 7 y 9

En la ilustración 9 se puede percibir que este rango de datos no tiene la misma tendencia que los demás, se afirmara entonces que no se ajustan a la ecuación de Hwang y Witczak y se deben descartar. En la siguiente ilustración se presenta la grafica de correspondencia de los datos A1, luego de excluir los datos de porcentaje de vacios entre 2 y 4.

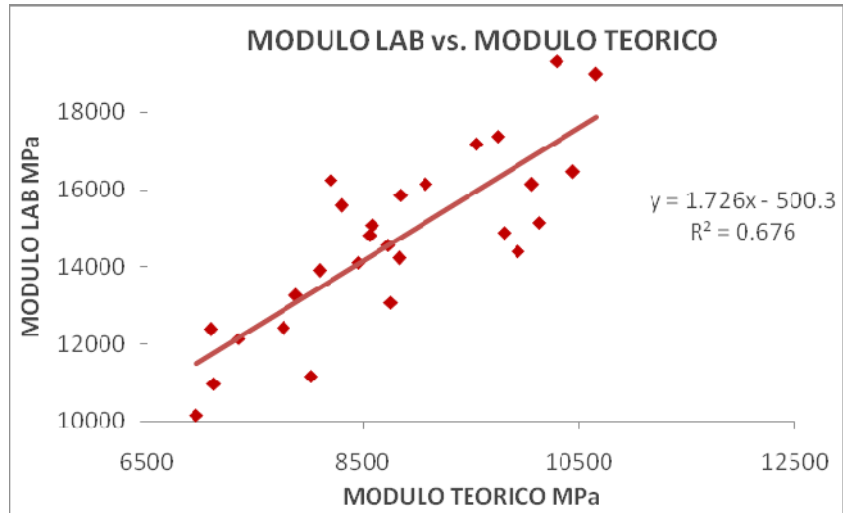


Ilustración 13. Comportamiento Datos A1 Ajustados

Aunque la correlación se aproxima un poco más a la ideal, aun es muy baja, por lo que ahora se separara según la cantera de procedencia o lo que se llamara naturaleza del agregado

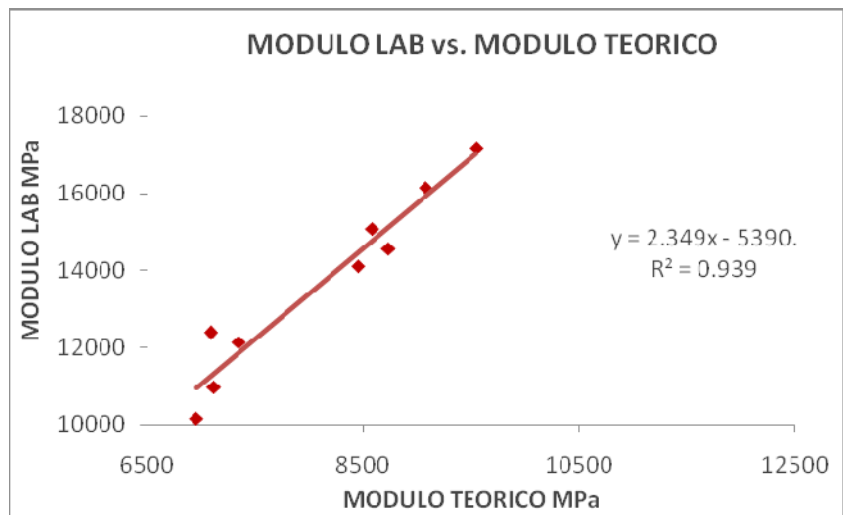


Ilustración 14. Comportamiento Datos A1 Ajustados Fuente Sogamoso

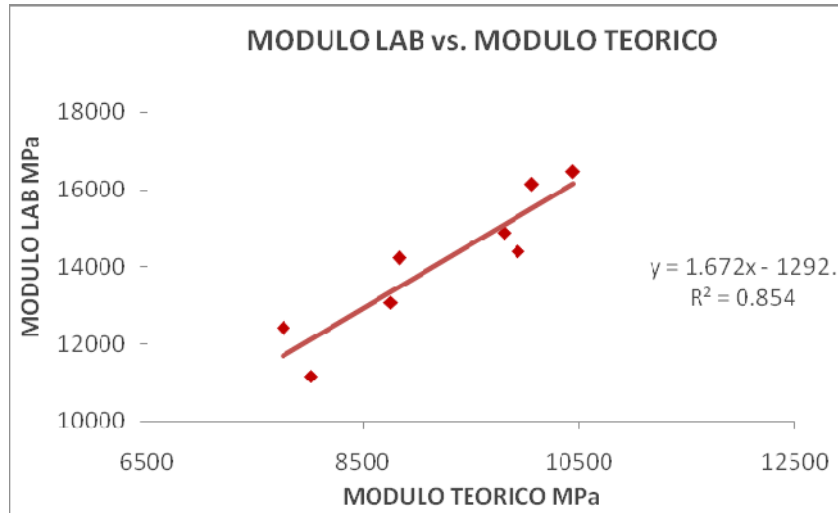


Ilustración 15. Comportamiento Datos A1 Ajustados Fuente Chicamocho

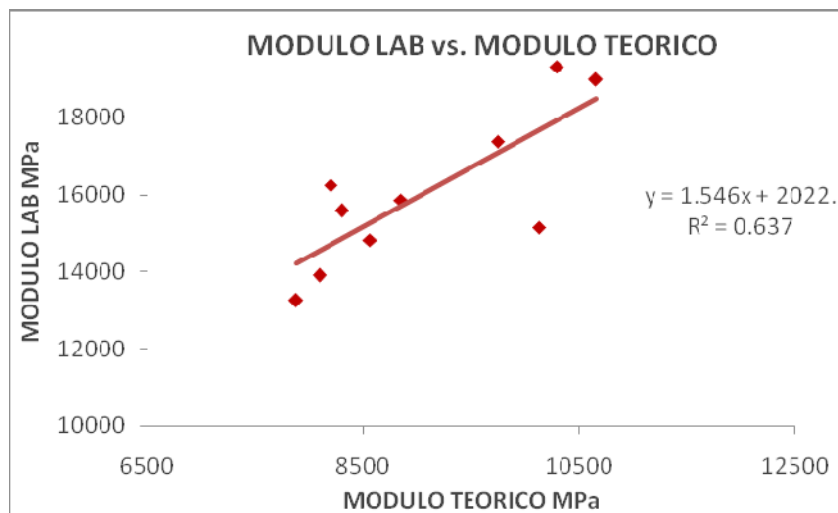


Ilustración 16. Comportamiento Datos A1 Ajustados Fuente Bocas

La separación de datos según la naturaleza del agregado resulta efectiva ya que la correlación aumenta y se aproxima un poco más a la unidad. Pero los valores de laboratorio son 70% mayores que los arrojados por la fórmula, esta se ajustaría simplemente con un factor de 1.7; pero sería aceptar que la fórmula de Hwang y Witczak está lejos de predecir valores semejantes a los reales (medidas de laboratorio). La

lejanía de los datos teóricos y los medidos en laboratorio se puede justificar ya que es posible que exista envejecimiento en el asfalto, lo que da respuesta al hecho que el estudio arroje una correspondencia demasiado elevada.

El análisis de la influencia del P200 no se muestra anteriormente ya que en el desarrollo de esta investigación se concluyó que no es un parámetro de gran influencia en el resultado obtenido en la fórmula de Hwang y Witczak, pues dichos valores no cambian significativamente con la disminución o aumento del porcentaje de finos en la mezcla.

Análogamente se realiza un análisis con los datos A2 como se presenta a continuación, se aclara que la ilustración 17 muestra el comportamiento de los datos excluyendo los que tienen porcentajes de vacíos menores a 4

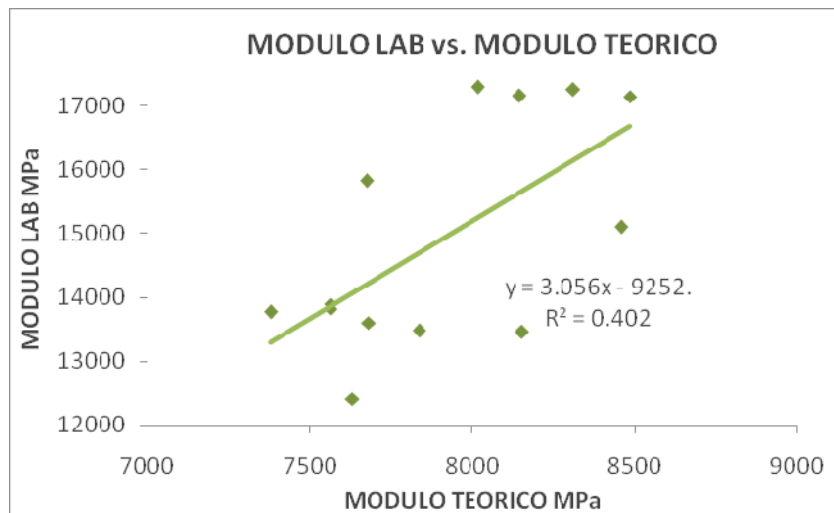


Ilustración 17. Comportamiento Datos A2

Los datos tampoco presentan una correlación aceptable por lo que se separa por rangos al igual que los datos anteriores

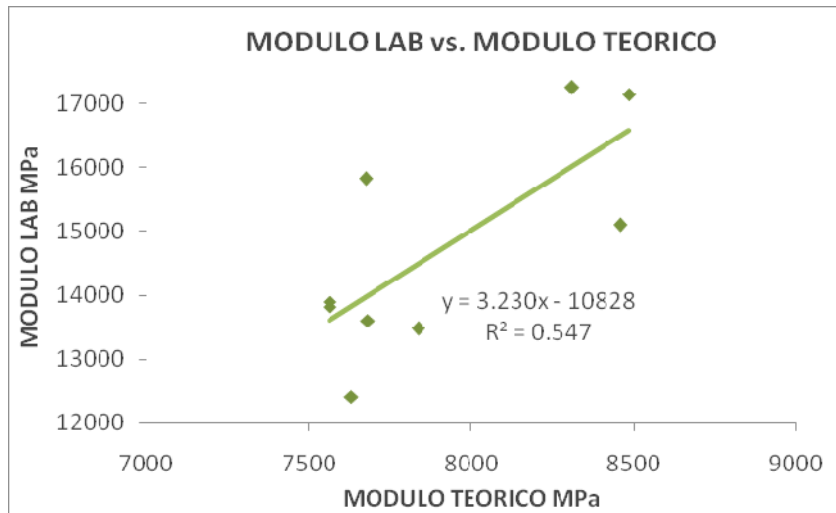


Ilustración 18. Comportamiento Datos A2 Porcentaje De Vacios Entre 7 Y 8

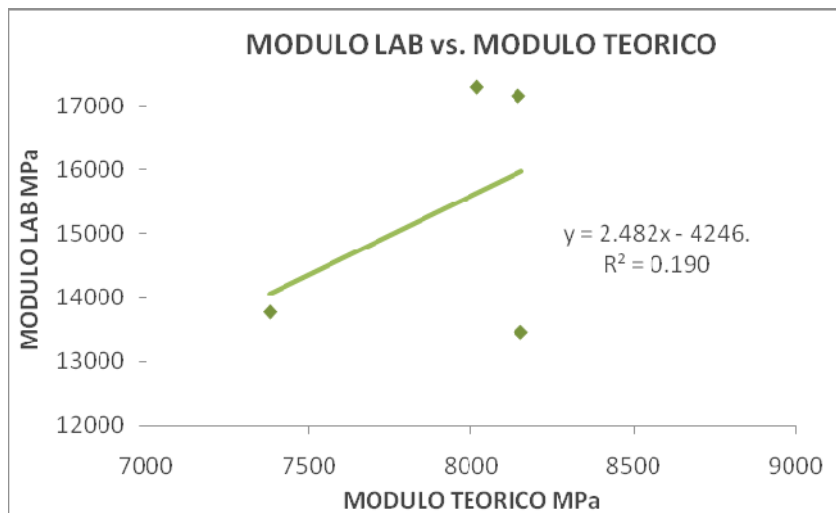


Ilustración 19. Comportamiento Datos A2 Porcentaje De Vacios Entre 8 y 9

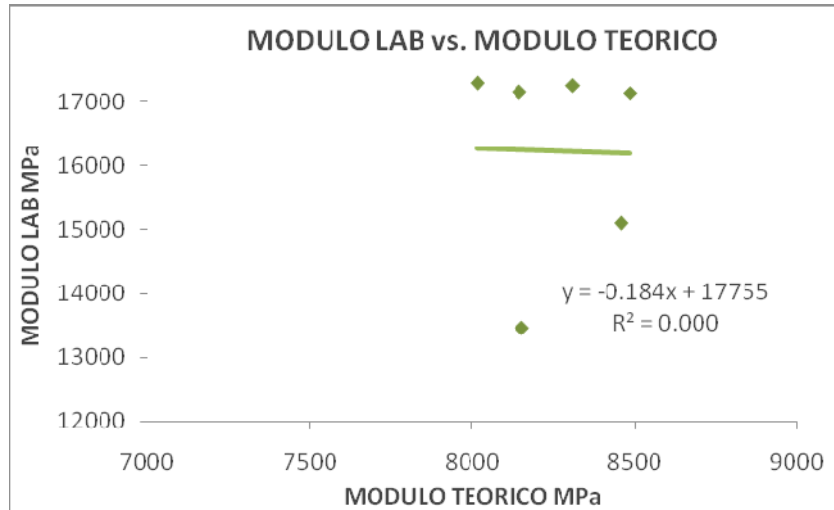


Ilustración 20. Comportamiento Datos A2 Porcentaje De Asfalto En Volumen 10.147

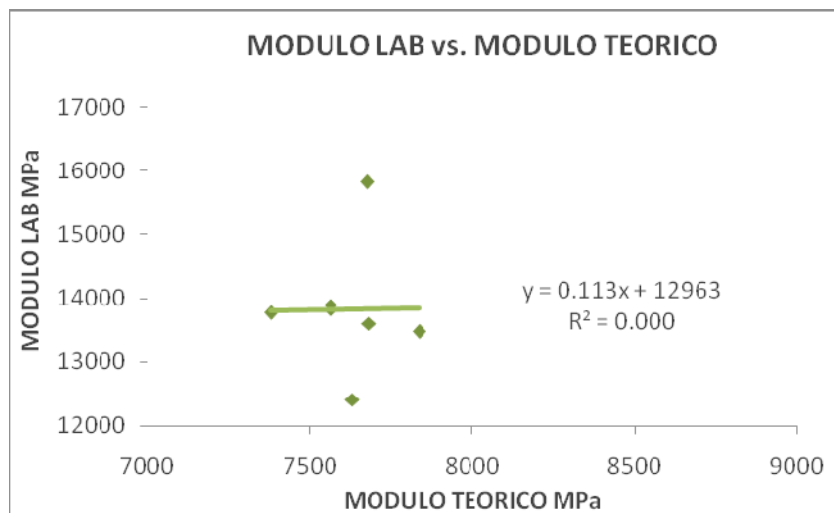


Ilustración 21. Comportamiento Datos A2 Porcentaje De Asfalto En Volumen 12.402

En la ilustración 20 y 21 se puede percibir que los datos no tienen la misma tendencia que los demás, no se puede afirmar que no se ajustan a la ecuación de Hwang y Witczak y deben omitirse ya que estaríamos descartando todos los especímenes A2. En este grupo de datos no se separa por naturaleza del agregado ya que para los datos con agregado

de cuarcita solo se usó porcentaje de asfalto igual a 12.402 y para agregados de caliza se uso 10.147.

En general los datos A no muestran un resultado tolerable, por ello se ajustó el coeficiente que acompaña el porcentaje de asfalto con el fin de hacerlo válido para los materiales usados en la región. El coeficiente se encontró, excluyendo los datos con porcentajes de vacíos menores a 4%, este valor corresponde a 0.076027; por lo que el parámetro β_4 de la fórmula de Hwang y Witczak resultaría $\beta_4 = 0.076027V_b$

Para los datos B se trato de establecer una frecuencia equivalente a las cuales se ensayaron los especímenes. Los resultados se pueden observar en el anexo.

Las siguientes graficas expresan las relaciones de la temperatura con los resultados de módulo obtenidos. Cabe resaltar que las frecuencias que se manejan en esta etapa son muy pequeñas, ya que en el ensayo se simulaban cargas casi estáticas. Entonces es importante comprender el comportamiento del módulo afectado por la temperatura, los datos se agruparon por tipo de de asfalto 60-70 o 80-100 y tipo de mezcla ya sea B-P, B-TP, o B-PRO.

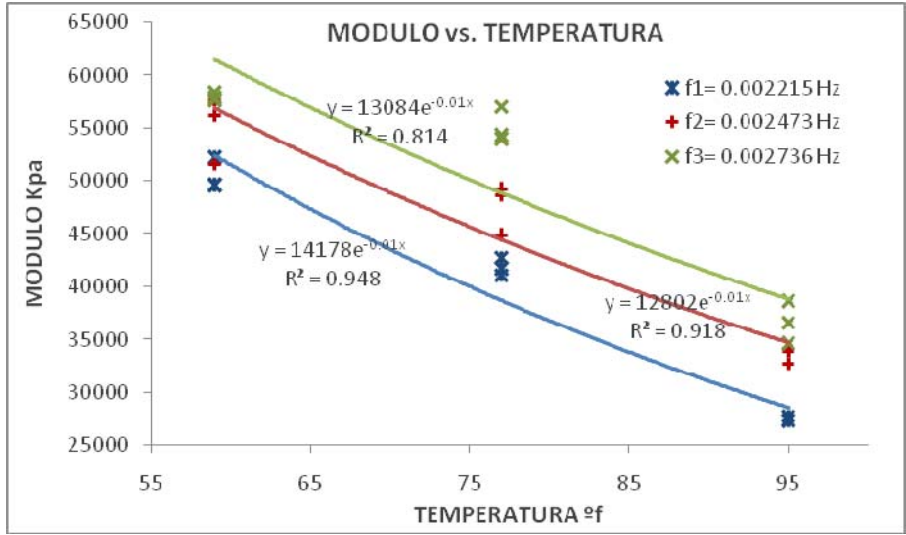


Ilustración 22. Comportamiento Datos B-P Respecto A La Temperatura Asfalto 60-70

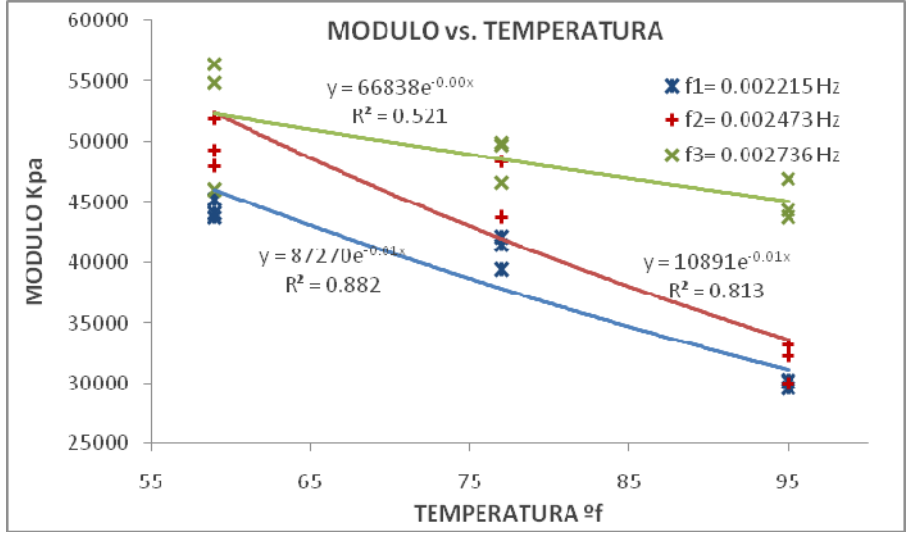


Ilustración 23. Comportamiento Datos B-P Respecto a La Temperatura Asfalto 80-100

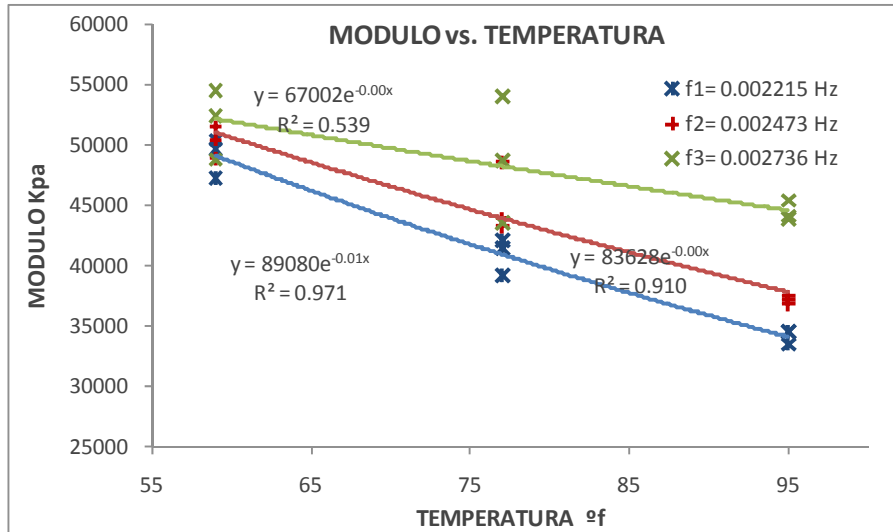


Ilustración 24. Comportamiento Datos B-PRO Respecto a La Temperatura Asfalto 60-70

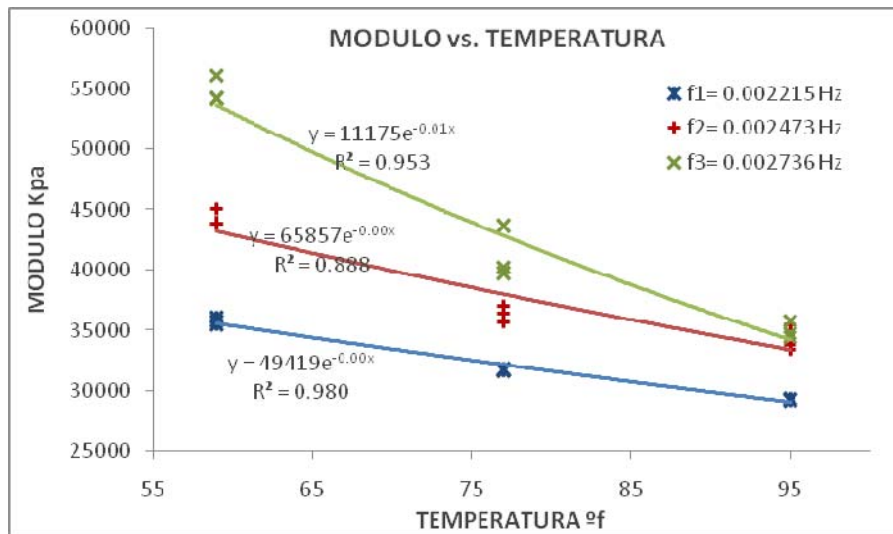


Ilustración 25. Comportamiento Datos B-PRO Respecto a La Temperatura Asfalto 80-100

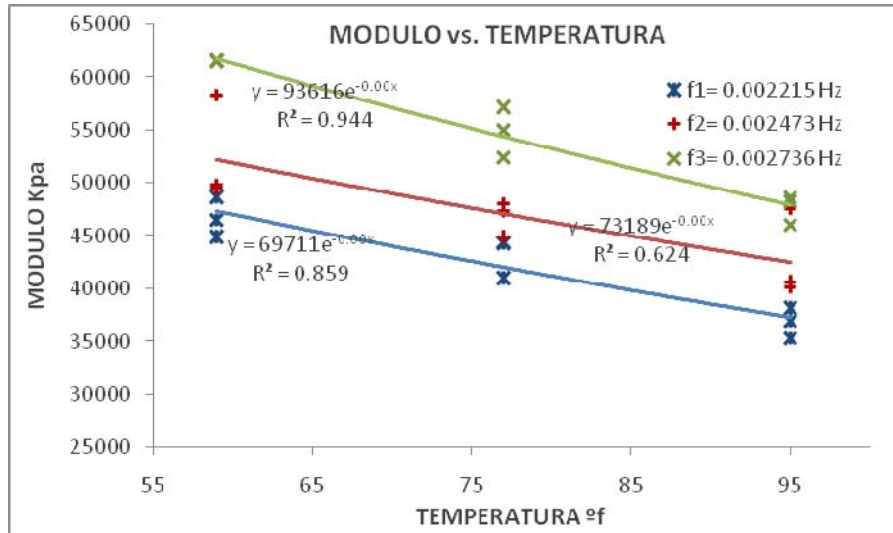


Ilustración 26. Comportamiento Datos B-TP Respecto a La Temperatura Asfalto 60-70

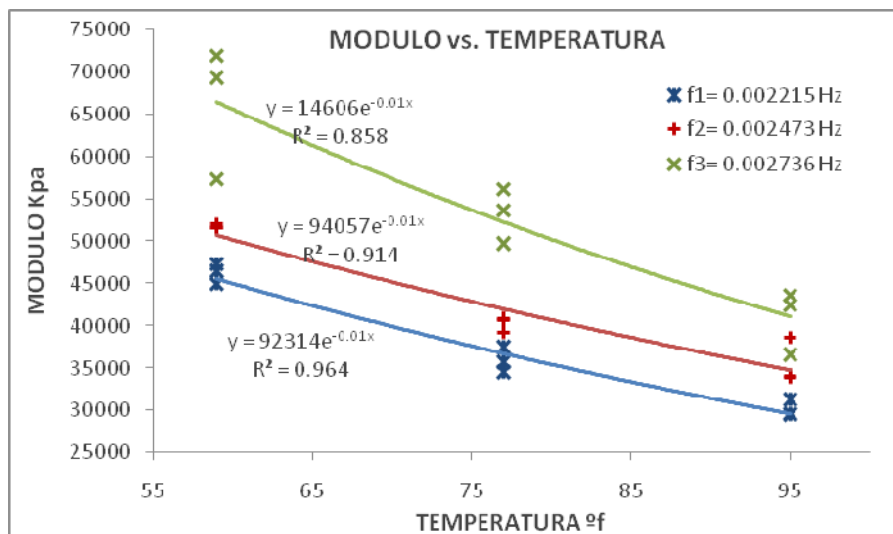


Ilustración 27. Comportamiento Datos B-TP Respecto a La Temperatura Asfalto 80-100

La variación de la velocidad no es apreciable, por tanto, las frecuencias equivalentes establecidas son muy similares entre sí, lo que prueba que el parámetro más influyente en este tipo de datos (datos sometidos a cargas casi estáticas) no es la velocidad de la carga, sino la

temperatura a la cual se realiza el ensayo, destacando la propiedad visco-elástica de la mezcla asfáltica.

A continuacion se analizaran los datos C, de los cuales se muestran varias graficas donde para asfaltos 60-70 y 80-100, se aprecia el comportamiento de los datos bajo frecuencia de 10Hz.

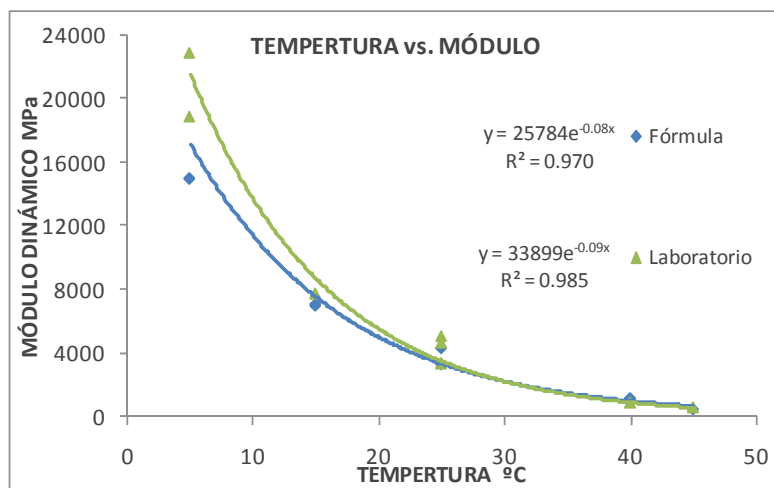


Ilustración 28. Datos C Respecto A La Temperatura Asfalto 60-70

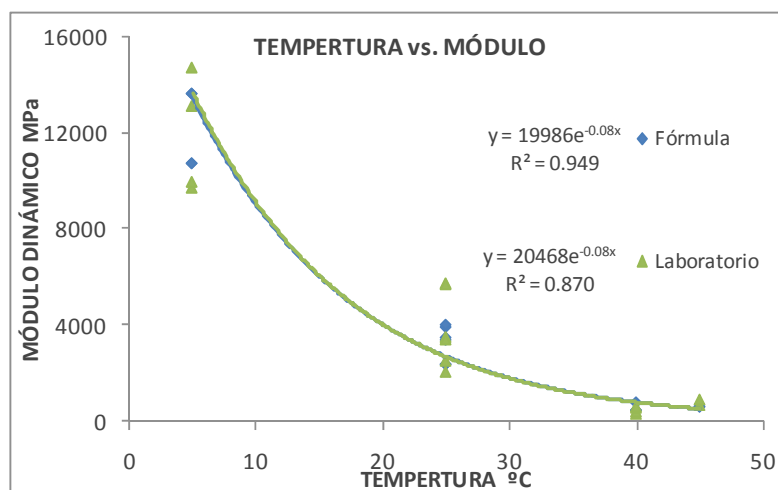


Ilustración 29. Datos C Respecto A La Temperatura Asfalto 80-100

Aunque en general el comportamiento de las gráficas es bueno, es necesario realizar un ajuste de los datos, por lo tanto se calibró el parámetro β_2 en donde interviene la temperatura, con el fin de ajustar los datos. Para cada tipo de asfalto 60-70 y 80-100, se encontró un valor diferente que corresponden respectivamente

$$\beta_2 = \beta_4^{0.5}(1.279T - 22.53)^{\beta_5}$$

Ecuación 12. Parámetro β_2 Calibrado Asfalto 60-70

$$\beta_2 = \beta_4^{0.5}(1.013T - 0.390)^{\beta_5}$$

Ecuación 13. Parámetro β_2 Calibrado Asfalto 80-100

Luego de usar las ecuaciones anteriores para mejorar los datos , las curvas de resultantes se presentan a continuación

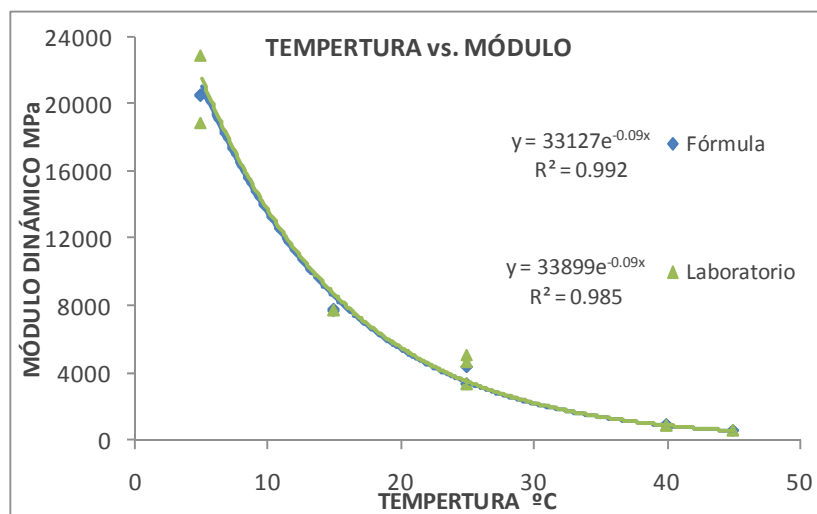


Ilustración 30. Datos C Modificados Respecto A La Temperatura Asfalto 60-70

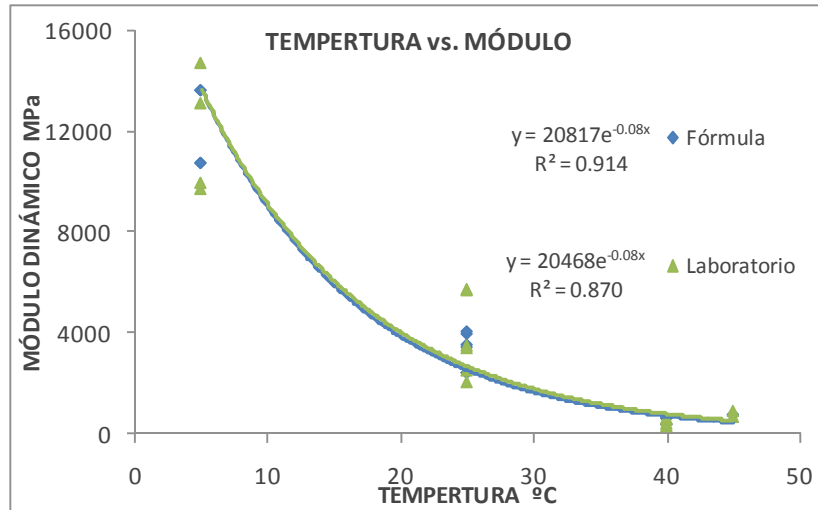


Ilustración 31. Datos C Modificados Respecto A La Temperatura Asfalto 80-100

Con esta calibración se demuestra que los asfaltos utilizados en la elaboración de las especímenes C, son más sensibles a la temperatura, que los usados originalmente para el planteamiento del modelo de Hwang y Witczak. Este ajuste al igual que el realizado a los datos A, solo es aplicable a los respectivos especímenes; ya que las muestras A presentan indicios de envejecimiento del asfalto y los datos C, poseen información insuficiente con la cual no se pueda llegar a conclusiones definitivas.

4. CONCLUSIONES

Los porcentajes de vacíos menores a 4 generan tendencias contrarias a los comportamientos normales de las gráficas y en consecuencia no se debe usar la fórmula de Hwang y Witczak para este rango de datos.

En la fórmula original de Hwang y Witczak, se le da una influencia mayor de la que tiene en realidad al porcentaje de asfalto, por lo que es necesario el ajuste del coeficiente que acompaña a dicho parámetro y hacerlo válido para los materiales de la región; el valor del coeficiente es 0.07607.

La naturaleza del agregado es un factor importante a la hora de realizar el análisis, ya que de esta manera se mejora considerablemente la correlación, en los datos que se analizan.

En la fórmula de Hwang y Witczak es necesario que se integre el envejecimiento del asfalto ya que es un parámetro fundamental para conocer la rigidez real del material.

La viscosidad del asfalto integrada al modelo de módulo dinámico de Hwang y Witczak no debería ser a 70°F como lo pide la fórmula, sino a la temperatura a la que se quiere conocer la rigidez de la mezcla asfáltica ya que es un material demasiado susceptible a los cambios térmicos.

El parámetro más influyente de datos sometidos a cargas casi estáticas es la temperatura a la cual se realiza el ensayo, destacando la propiedad visco-elástica de la mezcla asfáltica.

A temperaturas entre 15°C y 25°C el módulo dinámico tiene un cambio sustancial, donde, para temperaturas mayores el módulo alcanza valores cercanos a cero y es prácticamente el mismo, y a temperaturas superiores la mezcla asfáltica es más rígida y la diferencia para cada una se aprecia muy fácilmente.

El uso del ajuste de la temperatura es necesario en la predicción de la rigidez de mezclas asfáltica mediante la ecuación de Hwang y Witczak, ya que los asfaltos utilizados en la elaboración de las muestras analizadas son más sensibles a la temperatura, que los usados originalmente para el planteamiento del modelo de Hwang y Witczak.

La investigación realizada demuestra la importancia de la calibración de los módulos para la predicción de la rigidez en mezclas asfálticas a los materiales y condiciones particulares de la región, con el fin que su aplicación sea efectiva y permita un mejor modelamiento de los datos.

Se hace necesaria la continuación de esta investigación, mediante la utilización de bases de datos que permitan el uso de análisis estadístico, con el fin de aportar a la validación y calibración del modelo de Hwang y Witczak.

5. BIBLIOGRAFÍA

BOULDIN, Mark G. Estudio de Gilsonite modificados.

CASTELLANOS, Alba y ACUÑA, Sandra. Influencia de las fracciones del árido, en el gradiente del deterioro de la adhesión asfalto agregado. Bucaramanga. 2004. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander.

CHAVEZ, Sergio. Relación entre propiedades mecánicas de concretos asfálticos bajo carga estática y dinámica. Bucaramanga. 2008. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander.

GARNICA ANGUAS, Paul, GÓMEZ LÓPEZ, José y DELGADO ALAMILLA, Antonio Horacio. Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio. Secretaría de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte. Publicación Técnica No. 228. Sanfandila, Oro, 2003. p. 11-18.

MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. p.137-155.

OLIVEROS GARCÍA, Marco Aurelio. Caracterización de mezclas asfálticas bajo metodología SUPERPAVE. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Octubre de 1987 hasta Marzo de 1993. p. 6 y 15.

PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Capítulo 4 y 7. UPC. p. 162.

PÁEZ MORENO, Diego F., PEREIRA FERNÁNDEZ, Henry F. Estudio de ahuellamiento en mezclas asfálticas. Universidad de los Andes. Agosto de 2001. p.13.

PAREJA URIBE, Carlos Alberto. Importancia de la química del asfalto en sus propiedades físicas.

REYES LIZCANO, Fredy Alberto, MADRID AHUMADA, María Fernanda, SALAS CALLEJAS, Sandra Ximena. Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100). Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. p. 30.

REYES ORTIZ, Oscar J., CAMACHO TAUTA, Javier. Influencia de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas. Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte. 23: 26-42, 2008. p. 27 y 29.

RUEDA, Sergio y CIFUENTES Sergio. Variación de las propiedades mecánicas del concreto asfáltico sometido a ciclos de humedecimiento y secado. Bucaramanga. 2002. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander

Ernesto Urbáez e Ing. Vanessa Cardier. Análisis de las propiedades Marshall y estabilidad retenida en mezclas de concreto asfáltico en caliente disminuyendo los valores permisibles en el ensayo de equivalente de arena (utilizando especificaciones granulométricas

superpave). Año 7. Números 1 al 6. Enero a Junio 2001. Número 60. p.4.

VÁSQUEZ VARELA, Luis Ricardo. Curso de actualización en pavimentos. p. 143, 152 y 153.

VIDAL VALENCIA, Julián. Comportamiento dinámico de mezclas asfálticas. Revista Universidad EAFIT. Medellín-Colombia. Vol. 42. N° 143. 2006. Pp. 72-88.

NÚÑEZ LOBO, Hugo. Asistencia técnica en el laboratorio de suelos y pavimentos de la corporación para la investigación y el desarrollo en asfaltos en el sector transporte e industrial – CORASFALTOS. 2008. Practica empresarial (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander.

ANEXOS

FUENTE	ESPÉCIMEN	% P200	% DE ASFALTO	% DE VACIOS	FRECUENCIA HZ	VISCOSIDAD	T °f	MÓDULO MPa
BOCAS	1	7.38	11.703	3.52	10	1.971	48.2	19153.5
	3	7.38	11.703	4.04	10	1.971	48.2	18989
	4	7.38	11.703	4.47	10	1.971	48.2	19317
	5	7.38	11.703	4.67	10	1.971	48.2	15152
	6	7.38	11.703	5.15	10	1.971	48.2	17376.5
	7	7.38	11.703	6.36	10	1.971	48.2	15854
	8	7.38	11.703	6.77	10	1.971	48.2	14822.5
	9	7.38	11.703	7.16	10	1.971	48.2	15577
	10	7.38	11.703	7.32	10	1.971	48.2	16247
	11	7.38	11.703	7.47	10	1.971	48.2	13895.5
	12	7.38	11.703	7.81	10	1.971	48.2	13258
	CHICAMOCHA	1	8.02	11.348	3.01	10	1.971	48.2
2		8.02	11.348	3.37	10	1.971	48.2	16652
3		8.02	11.348	3.76	10	1.971	48.2	15538
4		8.02	11.348	3.81	10	1.971	48.2	15742
5		8.02	11.348	4.81	10	1.971	48.2	16456.5
6		8.02	11.348	5.27	10	1.971	48.2	16129
7		8.02	11.348	5.44	10	1.971	48.2	14410
8		8.02	11.348	5.6	10	1.971	48.2	14896
9		8.02	11.348	6.9	10	1.971	48.2	14229.5
10		8.02	11.348	7.01	10	1.971	48.2	13067.5
11		8.02	11.348	8.12	10	1.971	48.2	11163
12		8.02	11.348	8.53	10	1.971	48.2	12403
SOGAMOSO	1	5.72	12.487	3.16	10	1.971	48.2	16395.5
	2	5.72	12.487	3.25	10	1.971	48.2	17543.5
	3	5.72	12.487	3.82	10	1.971	48.2	18342
	4	5.72	12.487	4.13	10	1.971	48.2	17186
	5	5.72	12.487	4.76	10	1.971	48.2	16158.5
	6	5.72	12.487	5.24	10	1.971	48.2	14562
	7	5.72	12.487	5.46	10	1.971	48.2	15073.5
	8	5.72	12.487	5.65	10	1.971	48.2	14103.5
	9	5.72	12.487	7.4	10	1.971	48.2	12137
	10	5.72	12.487	7.8	10	1.971	48.2	10962.5
	11	5.72	12.487	7.86	10	1.971	48.2	12379.5
	12	5.72	12.487	8.09	10	1.971	48.2	10161.5

Anexo 1. Características De Los Especímenes A1

ESPÉCIMEN		% P200	% DE ASFALTO	% DE VACIOS	FRECUENCIA HZ	VISCOSIDAD	T °f	MÓDULO MPa	
A2	TIPO 1	A4	7	12,402	7,98	10	1.971	50	13823
		A6	7	12,402	7,79	10	1.971	50	13607
		B2	7	10,147	8,14	10	1.971	50	17157
		B3	7	10,147	8,34	10	1.971	50	17298
	TIPO 2	A10	7	12,402	7,8	10	1.971	50	15824
		A12	7	12,402	7,98	10	1.971	50	13897
		B1	7	10,147	5,58	10	1.971	50	16151
		B5	7	10,147	8,13	10	1.971	50	13454
	TIPO 3	A10	7	12,402	8,29	10	1.971	50	13769
		A12	7	12,402	2,23	10	1.971	50	12883
		B2	7	10,147	7,89	10	1.971	50	17256
		B3	7	10,147	7,63	10	1.971	50	17148
	TIPO 4	A7	7	12,402	7,54	10	1.971	50	13475
		A9	7	12,402	7,87	10	1.971	50	12409
		B3	7	10,147	7,67	10	1.971	50	15100

Anexo 2. Características De Los Especímenes A2

TIPO DE PROBETA	1	2	3	4
RETENIDO No. 40	Caliza	Cuarcita		
PASA No. 40	Cuarcita	Caliza		
RETENIDO No. 200			Caliza	Cuarcita
FILLER			Cuarcita	Caliza

Anexo 3. Contenido Caliza Y Cuarcita De Cada Tipo De Mezcla A2

ESPÉCIMEN	% P200	% DE ASFALTO	% DE VACIOS	VELOCIDAD (mm/min)	FRECUENCIA HZ	VISCOSIDAD	T °f	MÓDULO KPa	
B-P	1-60-70	6	11,496	2,49	6.4	0.002215	2,069	59	49559.31
		6	11,496	2,49	15.2	0.002473	2,069	59	56190.95
		6	11,496	2,49	50.8	0.002736	2,069	59	57557.16
		6	11,496	2,49	6.4	0.002215	2,069	77	42772.07
		6	11,496	2,49	15.2	0.002473	2,069	77	48623.61
		6	11,496	2,49	50.8	0.002736	2,069	77	53934.40
		6	11,496	2,49	6.4	0.002215	2,069	95	27395.51
		6	11,496	2,49	15.2	0.002473	2,069	95	33871.56
		6	11,496	2,49	50.8	0.002736	2,069	95	36630.70
	2-60-70	6	11,583	2,49	6.4	0.002215	2,069	59	49559.31
		6	11,583	2,49	15.2	0.002473	2,069	59	57557.16
		6	11,583	2,49	50.8	0.002736	2,069	59	58463.95
		6	11,583	2,49	6.4	0.002215	2,069	77	41646.86
		6	11,583	2,49	15.2	0.002473	2,069	77	44835.18
		6	11,583	2,49	50.8	0.002736	2,069	77	54241.28
		6	11,583	2,49	6.4	0.002215	2,069	95	27238.56
		6	11,583	2,49	15.2	0.002473	2,069	95	32755.48
		6	11,583	2,49	50.8	0.002736	2,069	95	38579.98
	3-60-70	6	11,583	2,49	6.4	0.002215	2,069	59	52149.11
		6	11,583	2,49	15.2	0.002473	2,069	59	51591.33
		6	11,583	2,49	50.8	0.002736	2,069	59	57793.05
		6	11,583	2,49	6.4	0.002215	2,069	77	41095.24
		6	11,583	2,49	15.2	0.002473	2,069	77	49208.66
		6	11,583	2,49	50.8	0.002736	2,069	77	57044.92
		6	11,583	2,49	6.4	0.002215	2,069	95	27766.88
		6	11,583	2,49	15.2	0.002473	2,069	95	34105.54
		6	11,583	2,49	50.8	0.002736	2,069	95	34557.61

Anexo 4. Características De Los Especímenes B-P 60-70

ESPÉCIMEN	% P200	% DE ASFALTO	% DE VACIOS	VELOCIDAD (mm/min)	FRECUENCIA HZ	VISCOSIDAD	T °f	MÓDULO KPa	
B-P	1-80-100	6	11,945	3,58	6.4	0.002215	1.971	59	44021.10
		6	11,945	3,58	15.2	0.002473	1.971	59	51855.92
		6	11,945	3,58	50.8	0.002736	1.971	59	54913.58
		6	11,945	3,58	6.4	0.002215	1.971	77	42027.66
		6	11,945	3,58	15.2	0.002473	1.971	77	48357.79
		6	11,945	3,58	50.8	0.002736	1.971	77	49712.60
		6	11,945	3,58	6.4	0.002215	1.971	95	29557.70
		6	11,945	3,58	15.2	0.002473	1.971	95	33206.16
		6	11,945	3,58	50.8	0.002736	1.971	95	44354.27
	2-80-100	6	12,039	3,58	6.4	0.002215	1.971	59	45124.06
		6	12,039	3,58	15.2	0.002473	1.971	59	49332.06
		6	12,039	3,58	50.8	0.002736	1.971	59	56418.26
		6	12,039	3,58	6.4	0.002215	1.971	77	41472.95
		6	12,039	3,58	15.2	0.002473	1.971	77	48357.79
		6	12,039	3,58	50.8	0.002736	1.971	77	49954.21
		6	12,039	3,58	6.4	0.002215	1.971	95	30308.12
		6	12,039	3,58	15.2	0.002473	1.971	95	32306.45
		6	12,039	3,58	50.8	0.002736	1.971	95	43673.15
	3-80-100	6	11,583	3,58	6.4	0.002215	1.971	59	43733.65
		6	11,583	3,58	15.2	0.002473	1.971	59	47924.83
		6	11,583	3,58	50.8	0.002736	1.971	59	45959.57
		6	11,583	3,58	6.4	0.002215	1.971	77	39351.73
		6	11,583	3,58	15.2	0.002473	1.971	77	43692.89
		6	11,583	3,58	50.8	0.002736	1.971	77	46656.83
		6	11,583	3,58	6.4	0.002215	1.971	95	30079.25
		6	11,583	3,58	15.2	0.002473	1.971	95	29987.10
		6	11,583	3,58	50.8	0.002736	1.971	95	46955.60

Anexo 5. Características De Los Especímenes B-P 80-100

ESPÉCIMEN	% P200	% DE ASFALTO	% DE VACIOS	VELOCIDAD (mm/min)	FRECUENCIA HZ	VISCOSIDAD	T °f	MÓDULO KPa	
B-TP	1-60-70	6	11,496	4,43	6.4	0.002215	2,069	59	46552.98
		6	11,496	4,43	15.2	0.002473	2,069	59	49455.46
		6	11,496	4,43	50.8	0.002736	2,069	59	61454.66
		6	11,496	4,43	6.4	0.002215	2,069	77	44255.88
		6	11,496	4,43	15.2	0.002473	2,069	77	48044.72
		6	11,496	4,43	50.8	0.002736	2,069	77	52465.72
		6	11,496	4,43	6.4	0.002215	2,069	95	35346.35
		6	11,496	4,43	15.2	0.002473	2,069	95	40108.82
		6	11,496	4,43	50.8	0.002736	2,069	95	48644.59
	2-60-70	6	11,672	4,43	6.4	0.002215	2,069	59	44841.73
		6	11,672	4,43	15.2	0.002473	2,069	59	49836.95
		6	11,672	4,43	50.8	0.002736	2,069	59	61454.66
		6	11,672	4,43	6.4	0.002215	2,069	77	44423.20
		6	11,672	4,43	15.2	0.002473	2,069	77	44841.73
		6	11,672	4,43	50.8	0.002736	2,069	77	55050.94
		6	11,672	4,43	6.4	0.002215	2,069	95	36994.43
		6	11,672	4,43	15.2	0.002473	2,069	95	40583.54
		6	11,672	4,43	50.8	0.002736	2,069	95	48314.05
	3-60-70	6	11,672	4,43	6.4	0.002215	2,069	59	48589.19
		6	11,672	4,43	15.2	0.002473	2,069	59	58331.94
		6	11,672	4,43	50.8	0.002736	2,069	59	61454.66
		6	11,672	4,43	6.4	0.002215	2,069	77	40917.63
		6	11,672	4,43	15.2	0.002473	2,069	77	47325.59
		6	11,672	4,43	50.8	0.002736	2,069	77	57114.77
		6	11,672	4,43	6.4	0.002215	2,069	95	38109.96
		6	11,672	4,43	15.2	0.002473	2,069	95	47559.98
		6	11,672	4,43	50.8	0.002736	2,069	95	46074.54

Anexo 6. Características De Los Especímenes B-TP 60-70

ESPÉCIMEN	% P200	% DE ASFALTO	% DE VACIOS	VELOCIDAD (mm/min)	FRECUENCIA HZ	VISCOSIDAD	T °f	MÓDULO KPa	
B-TP	1-80-100	6	11,496	5,89	6.4	0.002215	1.971	59	45024.52
		6	11,496	5,89	15.2	0.002473	1.971	59	51530.04
		6	11,496	5,89	50.8	0.002736	1.971	59	69276.86
		6	11,496	5,89	6.4	0.002215	1.971	77	34457.61
		6	11,496	5,89	15.2	0.002473	1.971	77	40769.11
		6	11,496	5,89	50.8	0.002736	1.971	77	56211.49
		6	11,496	5,89	6.4	0.002215	1.971	95	29662.88
		6	11,496	5,89	15.2	0.002473	1.971	95	34000.68
		6	11,496	5,89	50.8	0.002736	1.971	95	42502.77
	2-80-100	6	11,761	5,89	6.4	0.002215	1.971	59	46374.48
		6	11,761	5,89	15.2	0.002473	1.971	59	52104.99
		6	11,761	5,89	50.8	0.002736	1.971	59	72005.10
		6	11,761	5,89	6.4	0.002215	1.971	77	37414.65
		6	11,761	5,89	15.2	0.002473	1.971	77	40700.88
		6	11,761	5,89	50.8	0.002736	1.971	77	49652.77
		6	11,761	5,89	6.4	0.002215	1.971	95	29409.61
		6	11,761	5,89	15.2	0.002473	1.971	95	33916.54
		6	11,761	5,89	50.8	0.002736	1.971	95	43665.88
	3-80-100	6	11,496	5,89	6.4	0.002215	1.971	59	47367.46
		6	11,496	5,89	15.2	0.002473	1.971	59	51530.04
		6	11,496	5,89	50.8	0.002736	1.971	59	57417.55
		6	11,496	5,89	6.4	0.002215	1.971	77	35595.88
		6	11,496	5,89	15.2	0.002473	1.971	77	39191.34
		6	11,496	5,89	50.8	0.002736	1.971	77	53666.74
		6	11,496	5,89	6.4	0.002215	1.971	95	31199.55
		6	11,496	5,89	15.2	0.002473	1.971	95	38639.34
		6	11,496	5,89	50.8	0.002736	1.971	95	36500.80

Anexo 7. Características De Los Especímenes B-TP 80-100

ESPÉCIMEN	% P200	% DE ASFALTO	% DE VACIOS	VELOCIDAD (mm/min)	FRECUENCIA HZ	VISCOSIDAD	T °f	MÓDULO KPa	
B-PRO	1-60-70	6	11,433	4,67	6.4	0.002215	2,069	59	49761.04
		6	11,433	4,67	15.2	0.002473	2,069	59	51498.98
		6	11,433	4,67	50.8	0.002736	2,069	59	54515.47
		6	11,433	4,67	6.4	0.002215	2,069	77	42194.52
		6	11,433	4,67	15.2	0.002473	2,069	77	43318.05
		6	11,433	4,67	50.8	0.002736	2,069	77	48716.54
		6	11,433	4,67	6.4	0.002215	2,069	95	33528.29
		6	11,433	4,67	15.2	0.002473	2,069	95	37434.05
		6	11,433	4,67	50.8	0.002736	2,069	95	45459.17
	2-60-70	6	11,521	4,67	6.4	0.002215	2,069	59	50439.05
		6	11,521	4,67	15.2	0.002473	2,069	59	48890.11
		6	11,521	4,67	50.8	0.002736	2,069	59	52502.02
		6	11,521	4,67	6.4	0.002215	2,069	77	39218.70
		6	11,521	4,67	15.2	0.002473	2,069	77	48601.50
		6	11,521	4,67	50.8	0.002736	2,069	77	43604.65
		6	11,521	4,67	6.4	0.002215	2,069	95	34528.36
		6	11,521	4,67	15.2	0.002473	2,069	95	37252.05
		6	11,521	4,67	50.8	0.002736	2,069	95	44186.74
	3-60-70	6	11,433	4,67	6.4	0.002215	2,069	59	47316.64
		6	11,433	4,67	15.2	0.002473	2,069	59	50439.05
		6	11,433	4,67	50.8	0.002736	2,069	59	48832.12
		6	11,433	4,67	6.4	0.002215	2,069	77	41531.20
		6	11,433	4,67	15.2	0.002473	2,069	77	43972.87
		6	11,433	4,67	50.8	0.002736	2,069	77	54036.57
		6	11,433	4,67	6.4	0.002215	2,069	95	34528.36
		6	11,433	4,67	15.2	0.002473	2,069	95	36870.11
		6	11,433	4,67	50.8	0.002736	2,069	95	43887.89

Anexo 8. Características De Los Especímenes B-PRO 60-70

ESPÉCIMEN	% P200	% DE ASFALTO	% DE VACIOS	VELOCIDAD (mm/min)	FRECUENCIA HZ	VISCOSIDAD	T °f	MÓDULO KPa	
B-PRO	1-80-100	6	11,433	5,36	6.4	0.002215	1.971	59	36111.57
		6	11,433	5,36	15.2	0.002473	1.971	59	43800.86
		6	11,433	5,36	50.8	0.002736	1.971	59	54105.26
		6	11,433	5,36	6.4	0.002215	1.971	77	31614.99
		6	11,433	5,36	15.2	0.002473	1.971	77	35702.25
		6	11,433	5,36	50.8	0.002736	1.971	77	39655.83
		6	11,433	5,36	6.4	0.002215	1.971	95	29292.26
		6	11,433	5,36	15.2	0.002473	1.971	95	33370.42
		6	11,433	5,36	50.8	0.002736	1.971	95	34767.04
	2-80-100	6	11,262	5,36	6.4	0.002215	1.971	59	35483.82
		6	11,262	5,36	15.2	0.002473	1.971	59	45077.37
		6	11,262	5,36	50.8	0.002736	1.971	59	56136.01
		6	11,262	5,36	6.4	0.002215	1.971	77	31729.64
		6	11,262	5,36	15.2	0.002473	1.971	77	37027.96
		6	11,262	5,36	50.8	0.002736	1.971	77	40216.17
		6	11,262	5,36	6.4	0.002215	1.971	95	29131.24
		6	11,262	5,36	15.2	0.002473	1.971	95	33810.13
		6	11,262	5,36	50.8	0.002736	1.971	95	34474.60
	3-80-100	6	11,521	5,36	6.4	0.002215	1.971	59	35815.01
		6	11,521	5,36	15.2	0.002473	1.971	59	43800.86
		6	11,521	5,36	50.8	0.002736	1.971	59	54105.26
		6	11,521	5,36	6.4	0.002215	1.971	77	31614.99
		6	11,521	5,36	15.2	0.002473	1.971	77	36355.16
		6	11,521	5,36	50.8	0.002736	1.971	77	43599.42
		6	11,521	5,36	6.4	0.002215	1.971	95	29404.78
		6	11,521	5,36	15.2	0.002473	1.971	95	35483.82
		6	11,521	5,36	50.8	0.002736	1.971	95	35768.37

Anexo 9. Características De Los Especímenes B-PRO 80-100

ESPECIMEN	MEZCLA	% DE VACIOS	FRECUENCIA Hz	VISCOSIDAD	T °C	MODULO MPa	
C	60/70	MDC-1	4.61	10	2,069	25	3321
		MDC-1	4.82	10	2,069	25	3279
		MDC-1	4.61	10	2,069	45	545
		MDC-1	4.82	10	2,069	45	533
		MDC-2	4.05	10	2,069	5	22856
		MDC-2	4.1	10	2,069	5	18840
		MDC-2	4.05	10	2,069	25	5022
		MDC-2	4.1	10	2,069	25	4604
		MDC-2	4.05	10	2,069	40	859
		MDC-2	4.1	10	2,069	40	818
		MDC-2	5.06	10	2,069	5	4763
		MDC-2	5.42	10	2,069	5	7134
		MDC-2	5.06	10	2,069	25	3058
		MDC-2	5.42	10	2,069	25	3248
		MDC-2	5.06	10	2,069	40	776
		MDC-2	5.42	10	2,069	40	616
	80/100	MDC-1	5.00	10	1.971	25	5741
		MDC-1	4.70	10	1.971	25	5701
		MDC-1	5.00	10	1.971	45	699
		MDC-1	4.70	10	1.971	45	928
		MDC-2	4.32	10	1.971	5	9702
		MDC-2	4.33	10	1.971	5	9946
		MDC-2	4.32	10	1.971	25	2069
		MDC-2	4.33	10	1.971	25	2530
		MDC-2	4.32	10	1.971	40	332
		MDC-2	4.33	10	1.971	40	428
		MDC-2	3.5	10	1.971	5	14683
		MDC-2	3.5	10	1.971	5	13090
MDC-2	3.5	10	1.971	25	3513		
MDC-2	3.5	10	1.971	25	3414		
MDC-2	3.5	10	1.971	40	587		
MDC-2	3.5	10	1.971	40	644		

Anexo 10. Características De Los Especímenes C