

Influencia del empaquetamiento granular en el módulo resiliente de las mezclas asfálticas en caliente

Influence of granular packaging on the resilient module of hot asphalt mixes

Influência do empacotamento granular no módulo de resiliência de misturas asfálticas a quente

Para citar este artículo / To reference this article /
Para citar este artigo: Cárdenas Orduz, D. A. y Pérez Buitrago, G. (2016). Influencia del empaquetamiento granular en el módulo resiliente de las mezclas asfálticas en caliente. *Ingenio Magno*, 7(2), 25-42.

Diego A. Cárdenas-Orduz

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Facultad de Ingeniería, Vías y Transporte,
Grupo de Investigación y Desarrollo
en Infraestructura Vial (Grinfravial)
diego.cardenas@uptc.edu.co

Gonzalo Pérez-Buitrago

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Facultad de Ingeniería, Vías y Transporte,
Grupo de Investigación y Desarrollo
en Infraestructura Vial (Grinfravial)
gonzalo.perez@uptc.edu.co

Fecha de Recepción: 12 de abril de 2016
Fecha de Aceptación: 05 de Julio de 2016

Resumen

La granulometría es un requisito importante en el diseño de mezclas asfálticas, ya que influye en sus características mecánicas y dinámicas, al aportar resistencia friccional que contribuye a la estabilidad. La granulometría es una variable relativamente fácil de controlar. En las especificaciones de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías (Invías) se recomienda evaluar el empaquetamiento granular por el método de Bailey y reportar los resultados, pero no es un requisito de aceptación o rechazo del diseño de la mezcla. El módulo resiliente es un parámetro exigido para la verificación del diseño de la mezcla y para el dimensionamiento de estructuras de pavimento. Este artículo presenta los resultados experimentales del análisis del empaquetamiento granular con los tres parámetros del método Bailey para diferentes mezclas asfálticas fabricadas con materiales de la región de Boyacá; se utilizan tres gradaciones dentro de la franja granulométrica de una MDC-19 y tres dentro de la franja de Superpave. Las mezclas se diseñaron por el método Marshall acelerado por Ramcodes y los módulos resilientes se determinaron con el equipo de laboratorio NAT. Los resultados se comparan aplicando técnicas estadísticas de análisis de varianza y diagramas de cajas, para definir si presentan diferencias significativas y concluir si el empaquetamiento granular influye o no en la magnitud de los módulos resilientes. Como resultado de la investigación se deduce que la diferencia entre los módulos resilientes es significativa, con un nivel de confianza mayor al 95%.

Palabras clave: método Bailey, mezclas asfálticas, módulo resiliente de mezclas asfálticas, empaquetamiento granular.

Abstract

Grain-size measurement is an important requirement in the design of asphalt mixes as its mechanical and dynamic characteristics add frictional resistance which contributes to stability. Grain-size measurement is a relatively easy to control variable and in the INVÍAS specifications for construction of roads it is recommended to evaluate granular packaging according to the Bailey method and report the results, but it is not a requirement for acceptance or denial of the mix design. The resilient module is a parameter required for design mix verification and for dimensioning pavement structures. This article presents the experimental results of the analysis of granular packaging with the three parameters of the Bailey method for different asphalt mixes made with materials from the region of Boyacá, using three gradations within the grain-size range of an MDC-19 and three within the range of SUPERWAVE. The mixes were designed with the Marshall method accelerated by RAMCODES and the resilient modules were determined with NAT laboratory equipment. The results are compared using statistical analysis of variance and box diagrams to determine if there are significant differences and decide whether granular packaging influences the magnitude of the resilient modules or not. As a result of the study, it is determined that the difference between the resilient modules is significant with a confidence level greater than 95%.

Keywords: Bailey method, asphalt mixes, resilient module of asphalt mixes, granular packaging

Resumo

A granulometria é um requisito importante no projeto de misturas asfálticas, já que influencia suas propriedades mecânicas e dinâmicas ao proporcionar resistência de fricção que contribui para a estabilidade. A granulometria é uma variável relativamente fácil de controlar e nas especificações de construção de estradas e rodagem do

INVÍAS recomienda-se avaliar o empacotamento granular pelo método de Bailey e reportar os resultados. Este, no entanto, não é um requisito de aceitação ou rejeição do projeto de mistura. O módulo resiliente é um parâmetro necessário para a verificação do projeto da mistura e para o dimensionamento de estruturas de pavimento. Este artigo apresenta os resultados experimentais da análise do empacotamento granular com os três parâmetros do método Bailey para diferentes misturas asfálticas produzidas com materiais da região de Boyacá, utilizando três graduações dentro da faixa granulométrica de uma MDC-19 e três dentro da faixa SUPERPAVE. As misturas foram projetadas pelo método Marshall acelerado por RAMCODES e os módulos de resiliência foram determinados com o equipamento de laboratório NAT. Os resultados são comparados mediante a aplicação de técnicas estatísticas de análise de variância e diagramas de caixas para definir se apresentam diferenças significativas e concluir se o empacotamento granular influencia ou não na magnitude dos módulos de resiliência. Como resultado da pesquisa pode-se deduzir que a diferença entre os módulos de resiliência é significativa, com um nível de confiança maior que 95%.

Palavras Chave: método Bailey, misturas asfálticas, módulo de resiliência de misturas asfálticas, empacotamento granular.

1. Introducción

En la actualidad, el país presenta un déficit de infraestructura vial para atender las exigencias que demanda la apertura económica. Para enfrentarlo, se han venido aumentando significativamente el diseño y la construcción de nuevos proyectos de carreteras y dobles calzadas, las cuales requieren especificaciones de materiales de mejor calidad y procesos de diseño actualizados; la mayoría de la estructura de pavimentos es de tipo flexible.

El Instituto Nacional de Vías (Invías) ha realizado una actualización de las especificaciones generales de construcción de carreteras y las normas de ensayo para materiales de carreteras. Para el diseño de mezclas asfálticas en caliente, el artículo 450-13 del Invías (2013) recomienda, entre otros aspectos, evaluar el empaquetamiento granular de los agregados en el diseño preliminar y determinar el módulo resiliente como criterio de verificación.

El módulo resiliente debe ser evaluado para mezclas de alto módulo y opcionalmente para los otros tipos de mezclas. Los nuevos criterios de verificación del diseño

de las mezclas asfálticas densas en caliente incluyen, además, la adherencia, la resistencia al ahuellamiento y la resistencia a la fatiga.

El módulo define el comportamiento satisfactorio o no de la carpeta de concreto asfáltico durante su vida útil y es un parámetro importante para el dimensionamiento de la estructura de pavimento; por ello, es de gran relevancia conocer las propiedades mecánicas y dinámicas de cada capa que compone la estructura de pavimento flexible. El valor del módulo depende de la calidad de los componentes de la mezcla (asfalto y agregados) y, en especial, de la granulometría de los agregados, sin desconocer la importancia del diseño y la fabricación de la mezcla y la puesta en obra.

La evaluación de la influencia de la granulometría y el empaquetamiento granular en el valor del módulo resiliente de la mezcla asfáltica permite obtener un punto de comparación y definir un valor óptimo de rigidez con los mismos materiales. Ello generará un ahorro de recursos económicos, ya que a mayores módulos, menores serán los espesores de capa del pavimento con la misma calidad y duración. Igualmente permitirá

proponer ajuste a las especificaciones de construcción del Inviás.

2. Materiales y metodología

Los agregados utilizados provienen de una mina de caliza ubicada en el municipio de Sogamoso (Boyacá) y de una mina en el municipio de Paz de Río; son utilizados en la fabricación de mezclas en la planta de asfalto EMV. El cemento asfáltico es un AC 60-70 procedente de la refinería de Ecopetrol, localizada en Barrancabermeja (Santander).

Para el desarrollo de la investigación se realizaron los ensayos de laboratorio para la caracterización de los materiales granulares y el asfalto. También se verificaron a la luz de las normas de ensayo de materiales y las especificaciones generales de construcción de carreteras del Inviás (2013).

Luego de caracterizar los materiales utilizados, se realiza el diseño experimental y se definen las variables por tener en cuenta dentro de la investigación. En el estudio, la variable independiente es el empaquetamiento granular de las mezclas asfálticas. Para esto, se seleccionaron seis tipos de granulometrías, tres ajustadas a la franja granulométrica estipulada para una MDC-19 del Inviás y tres para las bandas de Superpave.

Además, se evalúa el empaquetamiento granular de los agregados para cada mezcla de la investigación, mediante el cálculo de los tres parámetros del método Bailey.

Para el diseño de la fórmula de trabajo de las mezclas asfálticas se aplica el método Marshall acelerado por Ramcodes; de este modo se determina el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para las mezclas asfálticas de la investigación.

Para cada una de las fórmulas de trabajo, se fabricaron tres probetas y se ensayaron a la tracción indirecta en el equipo NAT, para así obtener el valor experimental del módulo resiliente.

Finalmente, se hace un análisis de varianza (ANOVA) con los resultados del módulo resiliente obtenidos mediante los ensayos de laboratorio, para determinar si existieron o no diferencias significativas en las medias de los tratamientos. Además, se analiza la influencia de la granulometría y el empaquetamiento granular de las mezclas asfálticas con diagramas de cajas para cada temperatura de ensayo.

3. Desarrollo del trabajo

A. Caracterización de los materiales para las mezclas asfálticas

Los resultados de los ensayos de laboratorio para los agregados y el asfalto, la norma de ensayo y los valores admisibles de las especificaciones se presentan en las tablas 1 y 2.

Tabla 1. Ensayos de caracterización de agregados

ENSAYOS Y VALORES ADMISIBLES		NORMA DE ENSAYO	RESULTADOS
Desgaste en la máquina de los Ángeles, (máximo 25%)		INV E-218-13	23.0
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, (máximo 20%)		INV E-238-13	18.8
Perdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, (Máximo 18%)	Agregado grueso (Caliza)	INV E-220-13	3.57
	Agregado fino (Caliza)		10.04
	Agregado fino (Paz del Río)		4.09
Impurezas en agregado grueso, (máximo 0.5 %)		INV E-237-13	0.46
Índice de plasticidad, (NP)		INV E-125-13 INV E-126-13	NP
Equivalente de arena, (mínimo 50%)	Agregado fino (Arena natural)	INV E-133-13	37
	Agregado fino (Caliza)		51
	Agregado fino (Paz del Río)		84
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, (máximo 10%)		INV E-240-13	0
Índice de aplanamiento		INV E-213-14	16.3
Índice de alargamiento		INV E-213-14	19.5
Caras fracturadas, (mínimo 85%)		INV E-227-13	100
Angularidad de la fracción fina método A, (mínimo 45%)	Agregado fino (Arena natural)	INV E-239-13	41
	Agregado fino (Caliza)		47
	Agregado fino (Paz del Río)		47
Ensayo de adherencia en bandeja		INV E-740-13	86
Efecto del agua sobre las mezclas asfálticas sueltas		INV E-757-13	98

B. Dosificaciones granulométricas

Las curvas granulométricas utilizadas en la investigación corresponden a seis (6) tipos de granulometrías, tres (3) granulometrías dentro de la franja granulométrica del Invías (2013) (parte inferior, central y superior) y tres (3) granulometrías correspondientes con los puntos de control y la zona de restricción de la metodología

Superpave (Asphalt Institute, 1996) (parte inferior, central y superior). En la tabla 3 se muestran las granulometrías utilizadas y en la figura 1 se presentan las curvas de gradación respectivas.

Tabla 2. Ensayos de caracterización del asfalto AC 60-70

ENSAYOS	VALOR ADMISIBLE	RESULTADOS	NORMA DE ENSAYO
Penetración (100g, 5s, 25°C) en 0.1 mm	60 - 70	62	INV E-706-13
Punto de ablandamiento	48 - 54 °C	48.8 °C	INV E-712-13
Índice de penetración	-1.2 a +0.6	-1	INV E-724-13
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	> 100 cm	> 110 cm	INV E-702-13
Punto de inflamación	> 230 °C	253 °C	INV E-709-13
Punto de combustión	-	343 °C	INV E-709-13
Densidad (25°C)	-	1.007 g/cm ³	-
Viscosidad Brookfield			INV E-717-13
a 135 °C, 20 rpm	-	488.08 cP	
a 150 °C, 20 rpm	-	254.71 cP	
a 177 °C, 20 rpm	-	91.69 cP	

Tabla 3. Curvas granulométricas utilizadas en la investigación

TAMIZ	Ø (mm)	GRANULOMETRÍA INVIAS			GRANULOMETRÍA SUPERPAVE		
		G1	G2	G3	G4	G5	G6
3/4"	19.0	100	100	100	100	100	100
1/2"	12.5	80	87.5	95	92	95	98
3/8"	9.5	70	79	88	81	85.5	90
**	6.25	57.1	63.2	71.5	59.0	69.0	77.3
#4	4.75	52	57	65	51	62.5	72
#8*	2.36	31.3	39.2	47.2	33.1	49.2	52.4
#10	2.00	29	37	45	31	47.5	50
#16*	1.18	19.8	26.5	33.1	21.2	32.2	39.6
#30*	0.60	15.2	20.9	26.7	16.3	24.4	33.6
#40	0.425	14	19.5	25	15	22.5	32
#60*	0.30	10.5	15.5	20.5	12.2	17.7	24.5
#80	0.180	8	12.5	17	10	14	19
#100*	0.15	6.6	9.6	12.6	8.0	10.4	13.7
#200	0.075	4	5	6	4.5	5	6

* Se realizó una interpolación entre los tamices para obtener el porcentaje que pasa.

** El valor más cercano es el tamiz 4,75; sin embargo,

el valor más representativo es 6,45, por lo que se debe hacer una interpolación entre los tamices 9,5 y 4,75 mm para obtener el porcentaje que pasa.

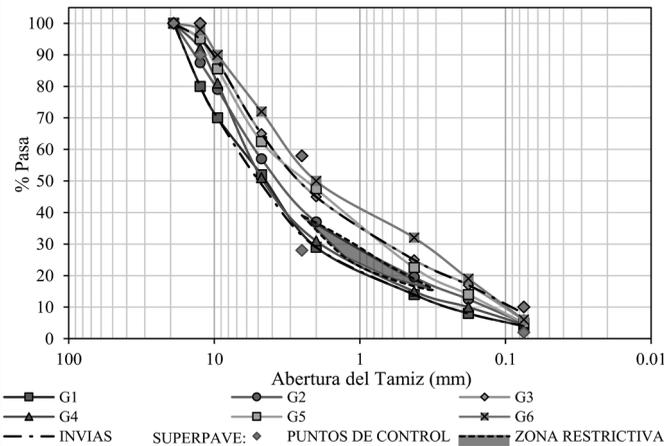


Figura 1. Curvas granulométricas

C. Evaluación del empaquetamiento granular por el método Bailey

La metodología Bailey se emplea para el diseño de empaquetamientos granulares óptimos a partir de las fracciones de agregado grueso, agregado fino y llenante mineral. (Vavrik *et al.*, 2002). El grado de empaquetamiento se encuentra definido por una serie de tamices de control así:

- Partículas de tamaño máximo nominal (TMN). Corresponde al mayor de tamiz, con respecto al primer tamiz que retiene más de un 10% de los agregados.
- Tamiz medio (TM) = 0,5*TMN.
- Tamiz de control primario (TCP) = 0,22*TMN. Esta abertura divide los agregados en gruesos y finos.
- Tamiz de control secundario (TCS) = 0,22*TCP. Esta abertura divide los agregados finos en arena gruesa y arena fina, concepto diferente al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) de Terzaghi.
- Tamiz de control terciario (TCT) = 0,22*TCS. Esta abertura divide la arena fina en dos fracciones.

Las aberturas de los tamices de control deben ser aproximados a tamices estandarizados de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM). Con los valores de los tamices de control se calculan tres parámetros representativos de la mezcla asfáltica, que se explican en los numerales siguientes.

1) Relación de agregados gruesos (CA)

La relación CA es utilizada para evaluar el empaquetamiento de los agregados gruesos en la mezcla, con el concepto de partículas interceptoras (son partículas que se encuentran en el rango de: [% pasa TM - % pasa TCP]). Estas no pueden llenar los vacíos generados por las partículas de mayor tamaño del agregado grueso (100 - % pasa TM). La relación se calcula según la ecuación [1]:

$$CA = \frac{(\% \text{ Pasa TM} - \% \text{ Pasa TCP})}{(100\% - \% \text{ Pasa TM})} \quad [1]$$

Un CA dentro del rango adecuado permite obtener una estructura de agregados balanceada, con lo cual se evita la segregación de la mezcla asfáltica y la dificultad en la compactación de la mezcla asfáltica en campo (Vavrik *et al.*, 2002).

2) Relación entre la fracción gruesa de los agregados finos (FAc)

La FAc representa la fracción más fina de los agregados finos, ya que si esta relación aumenta, también lo hace la fracción más fina de los agregados finos. Esta relación tiene una importante influencia sobre los vacíos en el agregado mineral (VAM), porque los vacíos en el agregado fino aumentan cuando esta relación decrece.

La relación se calcula según la ecuación [2]:

$$FAc = \frac{\% \text{ Pasa TCS}}{\% \text{ Pasa TCP}} \quad [2]$$

Un FAc dentro del rango adecuado evita una cantidad excesiva de arena natural o una excesiva cantidad de agregado fino (Vavrik *et al.*, 2002)

3) Relación entre la fracción fina de los agregados finos (FAf)

Esta relación analiza el empaquetamiento de la fracción o porción más fina de los agregados finos en la mezcla y, al igual que la relación FAc, tiene una importante influencia sobre los vacíos en el agregado mineral (VAM). La relación se calcula según la ecuación [3]:

$$FAf = \frac{\% \text{ Pasa TCT}}{\% \text{ Pasa TCS}} \quad [3]$$

Para el cálculo de las relaciones mencionadas, se hace uso de los tamices de control que se presentan en la tabla 4, en función de los diferentes valores de tamaño máximo nominal (TMN).

Tabla 4. Tamices de control para diferentes mezclas asfálticas

	TMN (mm)					
	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75
TM	19	12.5	9.5	*	4.75	2.36
TCP	9.5	4.75	4.75	2.36	2.36	1.18
TCS	2.36	1.18	1.18	0.6	0.6	0.3
TCT	0.6	0.3	0.3	0.15	0.15	0.075

* El valor más cercano es el tamiz 4,75; sin embargo, el valor más representativo es 6,25, por lo que se debe hacer una interpolación entre los tamices 9,5 y 4,75 mm para obtener el porcentaje que pasa.

Fuente: Vavrik *et al.* (2002).

Para garantizar un adecuado empaquetamiento granular de los agregados de las mezclas asfálticas, el método Bailey recomienda unos rangos para las relaciones explicadas, que se presentan en la tabla 5 para diferentes TMN.

Tabla 5. Rangos recomendados para las relaciones de los agregados

	TMN [mm]					
	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75
CA	0.80–0.95	0.70–0.85	0.60–0.75	0.50–0.65	0.40–0.55	0.30–0.45
FAc	0.35–0.50	0.35–0.50	0.35–0.50	0.35–0.50	0.35–0.50	0.35–0.50
FAf	0.35–0.50	0.35–0.50	0.35–0.50	0.35–0.50	0.35–0.50	0.35–0.50

Fuente: Vavrik *et al.* (2002).

D. Diseño de mezclas asfálticas y determinación del porcentaje óptimo de asfalto

El porcentaje óptimo de asfalto se determinó mediante el método de Marshall acelerado por Ramcodes (Sánchez-Leal, 2002). Este se basa en la aplicación del polígono de vacíos, calculado teóricamente con base en los valores de densidades relativas obtenidas en los ensayos de los agregados y en los valores de las especificaciones estipuladas para las variables de porcentaje de vacíos en la mezcla (V_a), en los agregados minerales (VAM) y llenos de asfalto (VFA).

El polígono de vacíos se representa gráficamente como isolíneas de los valores permitidos: la intersección de las líneas es la que lo construye. En las ecuaciones [4], [5] y [6] se presentan las expresiones que se emplean para el trazado de las isolíneas en el espacio G_{mb} - P_b (Delgado *et al.*, 2006):

$$G_{mb} = \left(1 - \frac{V_a}{100}\right) * G_{mm} \quad [4]$$

$$G_{mb} = \left(\frac{100 - VAM}{100 - P_b}\right) * G_{sb} \quad [5]$$

$$G_{mb} = \frac{VFA}{\left(\frac{100}{G_{mm}} + \frac{VFA(100 - P_b)}{100 * G_{sb}} - \frac{100 - P_b}{G_{sb}}\right)} \quad [6]$$

Donde G_{mb} es la gravedad específica neta de la mezcla bituminosa compactada; G_{mm} es la gravedad específica teórica máxima de la mezcla bituminosa; G_{sb} es la gravedad específica neta del agregado, y P_b es el porcentaje de ligante con respecto a la mezcla total

En la figura 2 se presenta un ejemplo gráfico de un polígono de vacíos, el cual permite obtener el porcentaje de asfalto para la mezcla. Usualmente se parte del valor correspondiente al centroide del polígono. Con este porcentaje de asfalto se fabrican tres briquetas para el ensayo de estabilidad y flujo Marshall, y se ajusta y se verifica el cumplimiento de requisitos de las especificaciones.

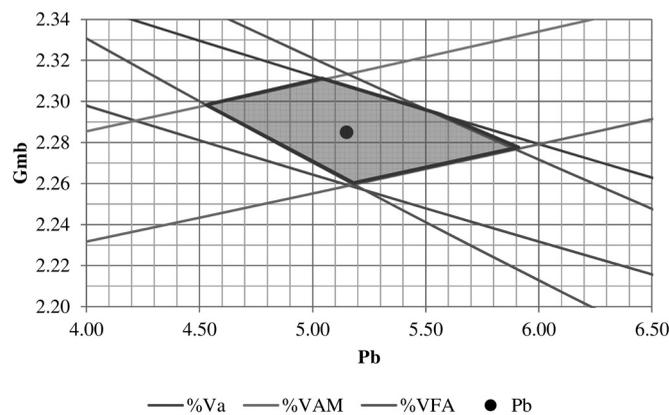


Figura 2. Polígono de vacíos para mezcla asfáltica

E. Ensayo de módulo resiliente

El módulo resiliente es el módulo elástico que se usará con la teoría elástica para el diseño racional de pavimentos flexibles. Es bien sabido que el comportamiento de las mezclas asfálticas no es completamente elástico, pues experimenta una deformación permanente después de cada aplicación de carga; sin embargo, si la carga es pequeña en comparación con la resistencia de la mezcla asfáltica y se aplica un gran número de repeticiones, la deformación bajo cada aplicación de carga es casi completamente recuperable (es proporcional a la carga) y puede ser considerada como elástica (Huang, 1993).

En Colombia, el ensayo para determinar el módulo resiliente es el de tracción indirecta, regido por la norma INV-E749-13 (Invías, 2013). Las probetas para los ensayos fueron fabricadas con el compactador giratorio, ensayadas a temperaturas de 5 °C, 25 °C y 40 °C y a una frecuencia de 10 Hz, en el equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) (figura 3). El ensayo de módulo resiliente consiste en aplicar pulsos de cargas de amplitud y duración preestablecidos, seguidos de un tiempo de reposo. El módulo resiliente total se calcula según la ecuación [7] (Invías, 2013):

$$E_T = \frac{P * (v + 0,27)}{S * D_T} \quad [7]$$

Donde E_T es el módulo resiliente total (MPa); P es la amplitud pulso de carga (N); v es el coeficiente de Poisson; S es el espesor probeta (mm), y D_T es la deformación resiliente total (mm)

F. Análisis de varianza

Un procedimiento común para probar las medias de la población se denomina análisis de varianza (ANOVA). Se supone que las seis granulometrías evaluadas son independientes; entonces, el modelo considerado para la investigación es el siguiente: se tomaron tres observaciones de módulo resiliente para cada una de las

seis granulometrías (la temperatura para cada análisis de varianza será constante).

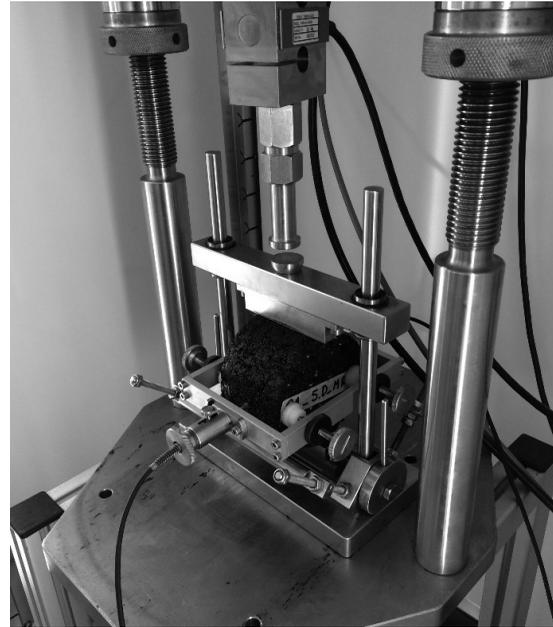


Figura 3. Ensayo de módulo resiliente en mezclas asfálticas, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC)

Se plantean las siguientes hipótesis:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$$

$$H_1 : \text{Las medias no son iguales}$$

Donde H_0 es la hipótesis nula y supone que no hay diferencias significativas entre los valores obtenidos de la variable (módulo resiliente). También supone que las diferencias en sus valores experimentales solo se deben a la aleatoriedad o al azar. Por su parte, H_1 es la hipótesis alterna que supone que sí hay diferencia en los resultados y que el empaquetamiento granular sí influye en el módulo resiliente.

Para probar la igualdad de las medias se utiliza la razón de Fisher F; mediante la razón de las varianzas $f = s_1^2 / s^2$,

donde f es un valor de la variable aleatoria, que tiene la distribución f_a con $k-1$ y $k(n-1)$ grados de libertad. (Walpole *et al.*, 2012).

Donde α es el nivel de significancia, n es el número de observaciones de la muestra y k es el número de muestras

4. Resultados y discusión

A. Empaquetamiento granular

Para comparar el empaquetamiento granular de cada granulometría propuesta en la investigación y evaluar su influencia en el módulo resiliente de las mezclas asfálticas, se evalúan los tres parámetros del método Bailey. En la tabla 6 se presenta un resumen de los porcentajes que pasan en los tamices de control de cada granulometría y el cálculo de los parámetros o las relaciones de Bailey.

Tabla 6. Evaluación de granulometría por el método Bailey

	G1	G2	G3	G4	G5	G6
TMN (mm)	19	19	12.5	12.5	12.5	12.5
TM	70.00	79.00	71.53	59.02	69.00	77.26
TCP	52.00	39.15	47.22	33.09	49.24	52.44
TCS	19.85	26.51	26.69	16.26	24.45	33.63
TCT	10.52	15.54	12.62	7.96	10.43	13.67
CA	0.60	1.90	0.85	0.63	0.64	1.09
FAc	0.38	0.68	0.57	0.49	0.50	0.64
FAf	0.53	0.59	0.47	0.49	0.43	0.41
CA	C	NC	NC	C	C	NC
FAc	C	NC	NC	C	C	NC
FAf	NC	NC	C	C	C	C

C: cumple; NC: no cumple.

Al comparar los valores obtenidos de las relaciones o los parámetros Bailey mostrados en la tabla 6 con los rangos de referencia del método dados en la tabla 5, se observa que las granulometrías G4 y G5 cumplen con los tres parámetros del método Bailey para empaquetamiento granular; la granulometría G1 cumple con los parámetros CA y FAc; las granulometrías G3 y G6 cumplen el parámetro FAf, y la granulometría G2 no cumple con ningún parámetro del método Bailey.

B. Diseño de mezclas asfálticas

El porcentaje de asfalto de la fórmula de trabajo obtenido

para las diferentes mezclas asfálticas investigadas, aplicando el método acelerado de Ramcodes, varió entre el 4,8% y el 5,5%. En la tabla 7 se relacionan los porcentajes óptimos de asfalto, la estabilidad y el flujo de las mezclas asfálticas de la investigación.

En la investigación se utiliza el porcentaje de cemento asfáltico óptimo que permite obtener el mejor desempeño para cada mezcla, con el objetivo de mantener como único tratamiento la granulometría. Los resultados de estabilidad en las granulometrías más gruesas G1 y G4 no cumplen con la especificación para un tránsito NT3,

pero cumplen para un tránsito NT2. Los resultados de flujo en las mezclas asfálticas G1 y G2 no cumplen para un tránsito NT3, pero cumplen para un tránsito NT2. La

mezcla asfáltica G4 tiene un flujo de 3,53 mm, por lo cual se puede decir que cumple el parámetro de flujo para un tránsito NT3.

Tabla 7. Porcentajes de asfalto óptimos de cada granulometría

PARÁMETRO	GRANULOMETRÍA INVIAS			GRANULOMETRÍA SUPERPAVE		
	G1	G2	G3	G4	G5	G6
Porcentaje de Cemento Asfáltico en la mezcla (Pb)	5	5.1	5.5	5.5	4.8	5.3
Estabilidad (N) NT2>7500 N NT3>9000N	8856.7	10664.9	9719.2	8351.1	10809.9	10520.9
Flujo (mm) NT2:2-4 NT3:2-3.5	3.68	3.85	3.35	3.53	3.46	3.23

Con los resultados de estabilidad y flujo se puede concluir que las mezclas asfálticas G1 y G2 cumplen los parámetros requeridos para un tránsito NT2, y las mezclas asfálticas G3, G4, G5 y G6 cumplen los parámetros requeridos para un tránsito NT3.

C. Módulo resiliente de las mezclas asfálticas

Los ensayos se realizaron en el equipo NAT de la UPTC, el cual trae programado el ensayo para

calcular el módulo resiliente de la mezcla asfáltica. En la tabla 8 se presentan los resultados de los módulos resilientes obtenidos. Al comparar la evaluación del empaquetamiento granulométrico con los resultados de módulo resiliente, se aprecia que la granulometría G5 (franja de Superpave) corresponde al mayor módulo resiliente y además cumple con los valores del método Bailey.

Tabla 8. Resultados ensayos de módulo resiliente

GRANULOMETRÍA	MÓDULO RESILIENTE (MPa)		
	5 °C	25 °C	40 °C
G1	11905.67	1715.67	321.00
G2	13626.33	1936.67	357.00
G3	11864.00	1935.00	366.00
G4	12315.33	1757.33	322.67
G5	13887.33	2365.33	436.00
G6	13311.33	2173.67	412.67

Al comparar la granulometría G5 con la granulometría semejante G2 (franja del Inviás), que no cumple

ningún parámetro del método Bailey, se observa que la diferencia entre los dos módulos es apreciable, pero

no se puede afirmar que es significativa hasta no realizar un análisis de varianza de los módulos resilientes.

Caso diferente sucede con la granulometría G4 (franja Superpave), la cual cumple con los tres parámetros del método Bailey. Al compararla con la granulometría semejante G1 (franja del Invías), que cumple dos parámetros del método Bailey, se observa que la diferencia entre los dos módulos no es apreciable.

Al comparar los resultados del módulo resiliente de las granulometrías G4 y G5, que cumplen los tres parámetros del método Bailey, se observa una gran diferencia entre estos, lo cual indica la influencia del tipo de granulometría gruesa o fina dentro de los resultados. Podemos decir que para obtener un mayor resultado de módulo resiliente, es necesario cumplir los tres parámetros de método Bailey, además de utilizar el punto medio de las franjas granulométricas estipuladas en las especificaciones.

En la figura 4 se presenta la variación del módulo resiliente en función de la temperatura de ensayo para las

mezclas investigadas. Se observa que la granulometría G5 presenta los mayores valores de módulo, seguida de la granulometría G6. Estas variaciones de los módulos resilientes se deben evaluar para conocer si la variación entre los resultados obtenidos es significativa.

El módulo resiliente depende en gran medida de la temperatura de ensayo. Con base en los valores de los ensayos realizados, y aplicando la técnica de regresión por mínimos cuadrados y utilizando el *solver* de Excel, se ajusta una función matemática del tipo dado en la ecuación [8]. Esta ecuación representa el comportamiento de cada granulometría. En la tabla 9 se presentan las constantes para cada granulometría, junto al coeficiente de determinación R^2 .

$$MR = A * e^{B * T} \quad [8]$$

Donde MR es el valor del módulo resiliente de la mezcla asfáltica; T es la temperatura de ensayo en $^{\circ}C$; A y B son parámetros de calibración del modelo, y e es el valor de la base de los logaritmos neperianos.

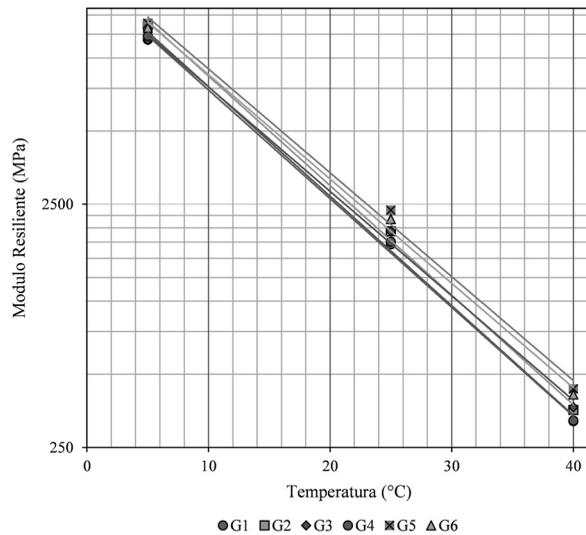


Figura 4. Módulo resiliente en mezclas asfálticas

Para comparar mejor los resultados de los módulos resilientes obtenidos a la temperatura media anual ponderada (TPMA) de Sogamoso (que es de 18°C, de acuerdo con los datos históricos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

[IDEAM]), en la figura 5 se observa claramente la tendencia de las granulometrías de la más fina a la más gruesa en forma de parábola (G1-G2-G3 franja granulométrica de una MDC-19 y G4-G5-G6 Superpave).

Tabla 9. Módulo resiliente estimado a la temperatura media anual ponderada (TMAP) de Sogamoso (18 °C)

GRANULOMETRÍA	A	B	R ²	T(°C)	MR(MPa)
G1	20631.15	-0.10289	0.99768	18	3237.44
G2	23756.42	-0.10377	0.99733	18	3669.27
G3	20396.72	-0.09888	0.99520	18	3440.22
G4	21472.35	-0.10368	0.99790	18	3321.86
G5	24083.16	-0.09838	0.99391	18	4098.71
G6	22904.45	-0.09879	0.99629	18	3869.45

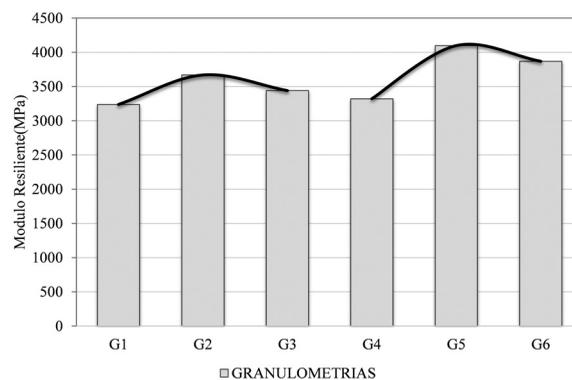


Figura 5. Variación de módulo resiliente a la TMAP de Sogamoso

D. Análisis de varianza

Para evaluar la diferencia entre los resultados de los ensayos de módulo resiliente, se hizo el análisis de varianza para los valores de módulos resilientes de las seis mezclas asfálticas y para cada temperatura de ensayo (5 °C, 25 °C y 40 °C). De la distribución f se obtiene el valor de $f_{\alpha}(5,12) = 3,11$. Con este valor se verifica la hipótesis planteada en la metodología.

Los resultados del ANOVA para las temperaturas de 5 °C, 25 °C y 40 °C se presentan en las tablas 10, 11 y 12, respectivamente. Al comparar el f calculado para los datos, se decide rechazar H_0 y concluir que las granulometrías no tienen la misma media de módulo resiliente. El valor Pr para todos los valores de f siempre son menores que 0,05.

Tabla 10. Análisis de varianza del módulo resiliente a temperatura de 5 °C

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADOS MEDIOS	<i>f</i>
Tratamientos	12106186.667	5	2421237.333	6.606
Error	4398033.333	12	366502.778	
Total	16504220.000	17		

R2	COEFICIENTE VAR.	ROOT MSE	PROMEDIO DATOS	Pr > <i>f</i>
0.73352068	0.04723	605.39473	12818.3333	0.0035600

Tabla 11. Análisis de varianza del módulo resiliente a temperatura de 25 °C

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADOS MEDIOS	<i>f</i>
Tratamientos	928024.944	5	185604.989	27.189
Error	81917.333	12	6826.444	
Total	1009942.278	17		

R2	COEFICIENTE VAR.	ROOT MSE	PROMEDIO DATOS	Pr > <i>f</i>
0.918889094	0.04172	82.6223	1980.611111	0.0000037

Tabla 12. Análisis de varianza del módulo resiliente a temperatura de 40 °C

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADOS MEDIOS	<i>f</i>
Tratamientos	32997.778	5	6599.556	11.472
Error	6903.333	12	575.278	
Total	39901.111	17		

R2	COEFICIENTE VAR.	ROOT MSE	PROMEDIO DATOS	Pr > <i>f</i>
0.826988945	0.06496	23.98495	369.2222222	0.000309

Además del ANOVA, se realizan diagramas de cajas para los resultados de cada temperatura, las cuales se presentan en las figuras 6, 7 y 8, donde se aprecia el comportamiento de los módulos resilientes para cada granulometría de la investigación. Al observar los diagramas, se deduce que es evidente que no todas las mezclas tienen el mismo módulo resiliente. La granulometría que tiende a pasar por el centro de las franjas granulométricas (Invías y Superpave) obtiene un mayor módulo que las granulometrías cercanas a los bordes de las franjas granulométricas de las

diferentes especificaciones. Igualmente, la mezcla de la granulometría G5 destaca del resto, como ya se ha mencionado en el análisis de los parámetros del método Bailey.

La varianza de las medias para las granulometrías G2 y G5 no es tan grande a una temperatura de 5 °C; como se observa en la figura 6, tienen similares medias de módulo resiliente. Caso contrario se evidencia con los resultados obtenidos a las temperaturas de 25 °C y 40 °C.

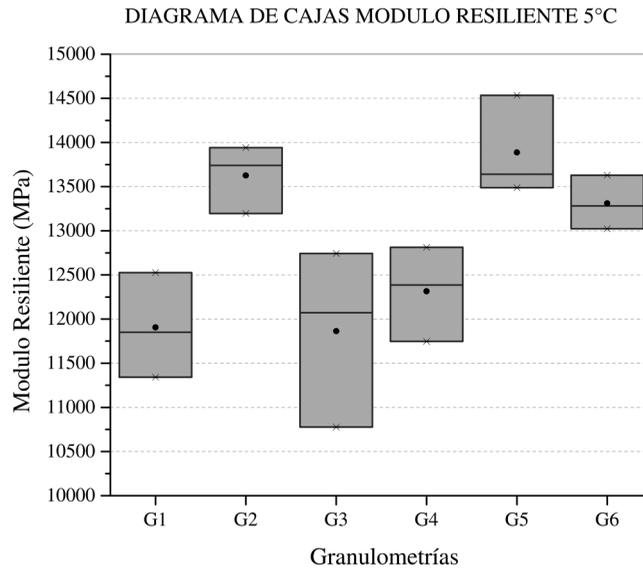


Figura 6. Variación del módulo resiliente, diagrama de cajas, 5 °C

En la figura 7 se puede observar un mejor comportamiento de la granulometría G5, comparada con las demás granulometría de la investigación.

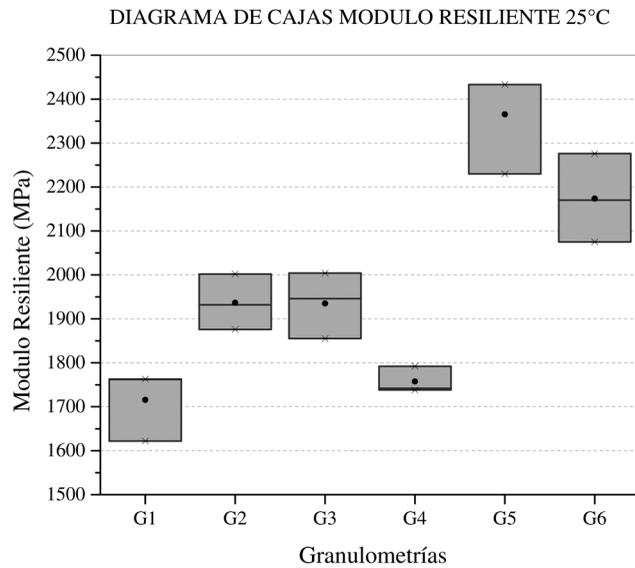


Figura 7. Variación del módulo resiliente, diagrama de cajas, 25 °C

En la figura 8 sucede un comportamiento similar, tal como se observó en el diagrama de cajas anterior.

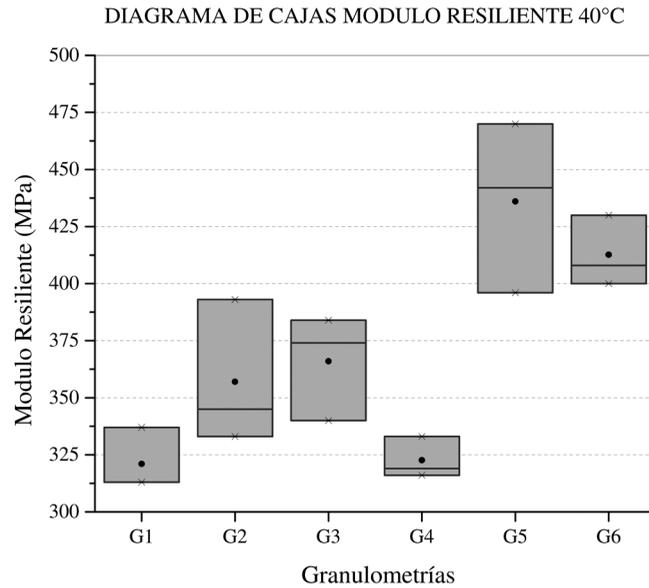


Figura 8. Variación del módulo resiliente, diagrama de cajas, 40 °C

Con base en los diagramas de cajas se observa que la variación de las medias de las mezclas G4 y G5, que cumplen los tres parámetros del método Bailey, es significativa. Esto se debe a la diferencia entre granulometrías (G4 es una granulometría gruesa y G5 es una granulometría por el punto medio de la franja granulométrica).

A 5 °C, 25 °C y 40 °C no hay diferencia en el comportamiento del módulo resiliente de las mezclas G1 y G4, debido a que la mezcla G4 cumple los tres parámetros del método Bailey y la mezcla G1 cumple dos parámetros del método Bailey, pero el parámetro que no cumple está fuera del rango tan solo 0,03; además, las dos granulometrías son gruesas. Por su parte, a 5 °C las mezclas G2 y G6 presentan los mayores valores de módulo resiliente.

Finalmente, a 25 °C y 40 °C las mezclas con mayores valores de módulo resiliente son G5 y G6. A 25 °C y 40 °C no hay diferencia en el comportamiento del

módulo resiliente de las mezclas G2 y G3. La mezcla G5 presenta el mayor valor de módulo resiliente. Esta granulometría cumple los tres parámetros del método Bailey y se encuentra en el punto medio de la franja granulométrica estipulada en las especificaciones.

5. Conclusiones

La granulometría de los agregados y el grado de empaquetamiento granular es una variable significativa para el resultado del módulo resiliente en las mezclas asfálticas en caliente, al tiempo que incide significativamente en el valor obtenido. De acuerdo con los resultados del ANOVA, se concluye que las variaciones entre las medias del módulo resiliente presentan diferencias significativas, y que la granulometría puede aumentar el módulo resiliente si se utiliza una granulometría con adecuado empaquetamiento granular de los agregados en la mezcla asfáltica.

El mejor comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas investigadas, medidas a través de su módulo resiliente, se logra cuando la gradación de los agregados tiende al punto medio de la franja o huso granulométrico estipulado por las especificaciones de construcción. Por ello, en las especificaciones de construcción de carreteras se debe exigir como parámetro de control granulométrico para el diseño de mezclas asfálticas el grado de empaquetamiento granular calculado por el método de Bailey.

El diseño de la granulometría por el método Bailey mejora el comportamiento de las mezclas asfálticas, debido a una mejor distribución de los agregados, pero se hace necesario realizar más investigaciones para observar su influencia en el comportamiento dinámico. Se recomienda especialmente recopilar más experiencias en la aplicación del método Bailey, con el fin de ajustar los rangos recomendados de los parámetros del método, de tal manera que los resultados obtenidos se adapten a las condiciones propias de nuestros materiales, en función de garantizar y optimizar la calidad de las mezclas asfálticas que se utilicen en la construcción de pavimentos flexibles de nuestras carreteras.

6. Referencias

Asphalt Institute (1996). *Manual SP-2 Superpave Mix Design*. Kentucky: Lexington.

Delgado Alamilla, H., Anguas, P. G., Villatoro Mendez, G. M. y Rodríguez Oropeza, G. (2006). *Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica*. Sanfandila: Instituto Mexicano de Transporte.

Huang, Y. H. (1993). *Pavement Analysis and Design*. Nueva Jersey: Prentice Hall.

Instituto Nacional de Vías (Invías) (2013a). *Especificaciones de construcción de carreteras*. Bogotá: Autor.

Instituto Nacional de Vías (Invías) (2013b). *Normas de ensayo para materiales*. Bogotá: Autor.

Sánchez-Leal, F. J. (2002). *Nuevo enfoque en el diseño y control de mezclas asfálticas*. Popayán: Universidad del Cauca.

Vavrik, W. R., Pine, W. J., Huber, G., Carpenter, S. H. y Bailey, R. (2002). *Bailey method for gradation selection in hot-mix asphalt mixture design*. Washington: National Research Council.

Walpole, R., Myers, R., Myers, S. y Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Ciudad de México: Pearson.