

# Ecuaciones constitutivas de módulo resiliente de materiales tratados con asfalto espumado

## Constitutive equations of resilient modulus for materials treated with foamed asphalt

SANDY JAZMÍN PARDO HERREÑO<sup>1</sup> - SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ<sup>2</sup>

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Profesora titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

sandypardo@mail.escuelaing.edu.co - sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/02/2019 Aceptado: 03/03/2019

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

En años recientes se han hecho esfuerzos considerables para entender las propiedades mecánicas y el comportamiento de los materiales estabilizados con asfalto espumado. Muchos estudios están orientados a la obtención del módulo resiliente ( $M_r$ ), de tal forma que, independientemente del modelo de análisis, se puedan aplicar valores confiables de este parámetro a las capas de tales materiales en los métodos de diseño de estructuras de pavimento de naturaleza empírico - mecánica.

En este trabajo se presentan las ecuaciones constitutivas del  $M_r$ , obtenidas sobre mezclas con diferentes proporciones en peso de granular/RAP (100/0 %, 85/15 %, 70/30 % y 50/50 %) y espuma de asfalto (60/70  $^{1/10}$  mm) de las refinerías de Barrancabermeja y Apiay (Colombia), de dos procedencias distintas. Las mezclas se elaboraron siguiendo la metodología propuesta por la Academia del Asfalto de Sudáfrica, en la guía técnica *Bitumen Stabilized Materials* TG2, de 2009. Las probetas fabricadas se ensayaron para determinar el  $M_r$ , según la norma INV E-156-13. Con los resultados obtenidos se evaluaron los modelos del  $M_r$  en función de los esfuerzos principales (primer invariante de esfuerzos - $\theta$ ), del esfuerzo desviador - $\sigma_d$  o del esfuerzo cortante octaédrico -  $\tau_{oct}$ . Se confirma para los materiales evaluados una dependencia significativa del estado de esfuerzos.

**Palabras claves:** asfalto espumado, estabilizaciones, módulo resiliente, reciclaje de pavimentos.

### Abstract

In recent years, considerable efforts have been made to understand the mechanical properties and behavior of materials stabilized with foamed bitumen. Many studies are aimed at obtaining the Resilient Modulus -  $M_r$ , so that, independently of the analysis model, reliable values of this parameter can be applied to the layers of these materials in the design methods of pavement structures of an empirical nature - mechanistic. This article shows the constitutive equations of  $M_r$ , obtained on mixtures with different proportions by weight of granular / RAP (100/0 %, 85/15 %, 70/30 % and 50/50 %) and asphalt foam (60 / 70  $^{1/10}$  mm) from the refineries of Barrancabermeja and Apiay, Colombia, from two different origins. The mixtures were developed following the methodology proposed by the Asphalt Academy of South Africa, in the Technical Guide - Bitumen Stabilized Materials, TG2 of 2009. The manufactured test pieces were tested to determine the  $M_r$ , according to standard INV E-156-13. With the results obtained, the  $M_r$  models were evaluated according to the main stresses (first invariant stress - $\theta$ ), the deviating stress - $\sigma_d$  or the octahedral shear stress -  $\tau_{oct}$ . A significant dependence of the stress state is confirmed for the evaluated materials.

**Keywords:** foamed asphalt, stabilizations, resilient modulus, pavement recycling.

## INTRODUCCIÓN

La aplicación de nuevas tecnologías en pavimentos y la necesidad de lograr un desarrollo sostenible con materiales reciclados, como por ejemplo los provenientes del fresado de las capas asfálticas, hacen de los nuevos procesos constructivos una oportunidad tentadora para reducir los costos de inversión y aumentar la vida útil de las vías en Colombia.

Las técnicas de reciclaje en frío, en especial la de recuperación total de espesores, conocida como Full Depth Reclamation (involucra las capas asfálticas –RAP, Reclaimed Asphalt Pavement, por su sigla en inglés– y parte de la capa granular) se han venido utilizando en el país desde principios de los años noventa. A comienzos de 1992, se empezó a intensificar la técnica del reciclaje en frío en Colombia, utilizando emulsiones asfálticas como ligante. Por ende, se ha venido ganando experiencia y conocimiento sobre la importancia del reciclado de pavimentos (Carlos, 2009); sin embargo, con los avances de la tecnología también se ha hecho una apuesta por utilizar espuma de asfalto, la cual aún no es muy conocida en el país, a pesar de los grandes adelantos documentados a escala internacional.

En las concesiones, el reciclaje en frío se ha convertido en una técnica muy usada para la rehabilitación de pavimentos existentes y se prevé que se incremente en las denominadas de cuarta generación (4G). Entre los agentes estabilizadores usados, además del cemento y de las emulsiones asfálticas, los asfaltos espumados están ganando mayor aceptación.

Con la implementación y el creciente empleo de los materiales que contienen RAP, tratados con asfalto espumado en Colombia, se hace necesario realizar un permanente control de las variables de diseño para lograr un buen comportamiento de este material, lo que justifica el estudio del módulo resiliente.

Por otro lado, el Centro de Estudios Geotécnicos, en los laboratorios de Suelos y Pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, ha sido pionero en la implementación y estudio de esta tecnología en Colombia, en especial en la caracterización de las espumas de asfalto y en el diseño de las estabilizaciones que se logran con los materiales reciclados.

## MÓDULO RESILIENTE DE MATERIALES ESTABILIZADOS CON ESPUMA DE ASFALTO.

Jenkins y Collins (Guía Técnica *Bitumen Stabilized Materials*, TG2, 2009) describen las mezclas con asfalto espumado y las destacan por su capacidad de aumentar la flexibilidad y la resistencia de los materiales granulares, en razón de que la espuma de asfalto envuelve las partículas más finas que los conforman y generan puentes de contacto entre sus partículas [2].

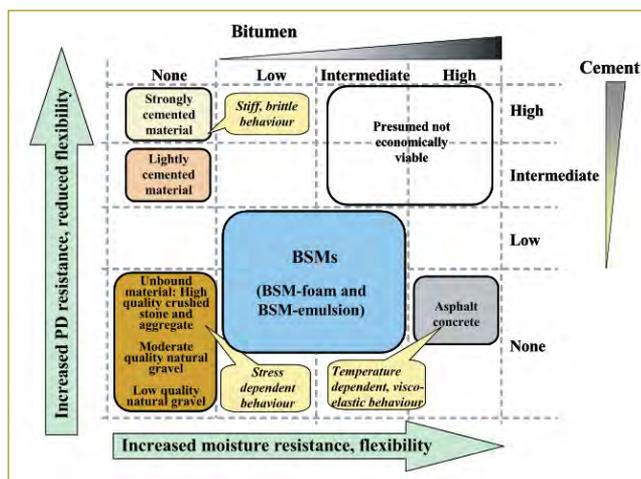


Figura 1. Comportamiento conceptual de los materiales para pavimentos (Asphalt Academy, 2009).

Para el diseño y la evaluación del desempeño de las mezclas tratadas con asfalto espumado normalmente se evalúan dos propiedades principales: la resistencia a la tracción y la flexibilidad de la BSM, en forma indirecta con el ensayo de tracción indirecta (ITS). Aunque esta prueba no produce resultados altamente repetibles, es el método más económico para investigar la eficacia del betún. Además, se dispone de antecedentes de datos históricos [3].

No obstante, con el fin de evaluar el comportamiento de las mezclas tratadas con espuma de asfalto (BMS) de manera más detallada y modelar el comportamiento de la rigidez se debe realizar el ensayo de módulo resiliente, el cual sirve para determinar la reacción de un material cuando la carga es retirada, ya que recupera parte de la deformación inducida; la capacidad de recuperación de dicho material es lo que comúnmente se denomina la resiliencia de los materiales. La relación entre el esfuerzo desviador y la correspondiente deformación unitaria recuperada se denomina módulo resiliente.

El módulo resiliente (MR) de un material estabilizado con asfalto se puede medir en laboratorio si se somete un espécimen a un ensayo de carga repetitiva [4].

Otra forma de medir el módulo resiliente en el laboratorio para materiales granulares es con el ensayo descrito en la norma INV E-156-2013, el cual se realiza sobre probetas de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura; se aplica un esfuerzo axial cíclico, repetido, de magnitud, duración y frecuencias fijas, a un espécimen cilíndrico de ensayo, debidamente preparado y acondicionado. Durante las aplicaciones del esfuerzo dinámico desviador, el espécimen está sometido a un esfuerzo estático en su contorno, proporcionado por medio de una cámara de presión triaxial. Se mide la deformación axial total resiliente (recuperable) de respuesta del espécimen y se calcula el módulo resiliente relacionando el esfuerzo axial desviador con la deformación unitaria axial resultante.

En un estudio sobre la respuesta resiliente de los BSM con asfalto espumado, desarrollado por Dal Ben con la dirección de Jenkins, se evaluó el comportamiento del módulo resiliente para tres tipos de agregados (100 %RAP, 50/50 RAP y material granular y 100 % material granular), y se hicieron ensayos triaxiales cíclicos, variando las condiciones de temperatura y de presión de confinamiento.

Los valores de Mr iniciales, que varían entre 200 y 600 MPa para el 100 % de RAP, entre 400 y 700 MPa para la combinación de 50/50 y entre 700 y 1000 MPa para el 100 % de material granular, muestran un mejor comportamiento de este tipo de material (DalBen, 2014). Otros investigadores han reportado valores similares e incluso inferiores (100 a 400 MPa) al Mr inicial que desarrollan los BSM con FA [6].

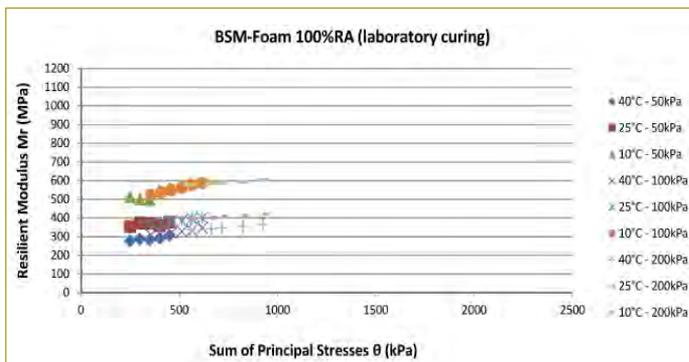


Figura 2. Variación del Mr en mezcla con 100 % de RAP (DalBen, 2014).

Otro resultado importante de las investigaciones del módulo resiliente es que éste aumenta con el tiempo, en estudios de laboratorio y en evaluaciones en tramos experimentales realizadas a largo plazo [7].

## ECUACIONES CONSTITUTIVAS DEL MR

Existen diferentes modelos aplicados para caracterizar el comportamiento de la rigidez de los materiales granulares no ligados; sin embargo, en el presente estudio se pretende verificar la aplicabilidad de dichas modelaciones en materiales semiligados. En la bibliografía existente se explican principalmente tres modelos desarrollados por Uzan en sus investigaciones; dichos modelos han sufrido modificaciones con el propósito de involucrar el mayor número de variables que influyen en el comportamiento de la rigidez de los materiales granulares, con el fin de obtener ecuaciones constitutivas que representen de manera más acertada el comportamiento del módulo resiliente.

### Modelo K-θ

Es una descripción práctica no lineal del módulo elástico del material granular. En este modelo el módulo elástico se expresa en función de la suma de las tensiones, representada por la siguiente ecuación:

$$M_r = K_1 \theta^{k_2} \quad (1)$$

Donde:

θ = suma de los esfuerzos principales ( $\sigma_1 + 3\sigma_3$ ).

k1 y k2 = parámetros de regresión.

En este modelo siempre se parte de un esfuerzo desviador igual a cero. Las constantes del material k1 y k2 dependen de la densidad y del contenido de humedad del material de ensayo (Pérez et al., 2002). El modelo k-θ tiene el inconveniente de no considerar el efecto del esfuerzo desviador sobre las propiedades resilientes y, además, de asumir una relación de Poisson ( $\nu_r$ ) [9].

### Modelo de Uzan

Uzan propuso un modelo en el que se tiene en cuenta la resistencia al corte y dilatación de manera más adecuada que en el primer modelo.

$$M_r = K_1 \theta^{k_2} \sigma d^{k_3} \quad (2)$$

Donde:

$\sigma d$  = esfuerzo desviador ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ).

$\theta$  = suma de los esfuerzos principales ( $\sigma_1 + 3\sigma_3$ ).

$k_1, k_2$  y  $k_3$  = parámetros de regresión.

En este modelo, Uzan especificó que el módulo resiliente de una capa granular no es solamente una función del esfuerzo volumétrico ( $\theta$ ), sino también de la magnitud de la deformación cortante inducida principalmente por el esfuerzo cortante o por el esfuerzo desviador [10].

### Modelo $\tau$ octaédrico

Un planteamiento llevado a cabo, más tarde, por Uzan para el análisis en tres dimensiones (3-D) consiste en sustituir el esfuerzo desviador efectivo por la tensión efectiva tangencial octaédrica [4].

$$M_r = K_1 P_0 \left( \frac{\theta}{P_0} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{OCT}}{P_0} + 1 \right)^{k_2} \quad (3)$$

En este caso, empleó un esfuerzo de referencia  $p_0$  de 100 kPa, igual a la presión atmosférica. En el modelo de Uzan se mantiene constante la relación de Poisson y el esfuerzo desviador inicial de partida sigue siendo igual a cero. Al aplicar el modelo en 3D de Uzan a los mismos resultados experimentales de los modelos, se obtuvo un buen ajuste del modelo, con un coeficiente de determinación de 0,98 (Pérez et al., 2002) [11].

## MATERIALES

### Agregados vírgenes

El material granular proviene de la cordillera Oriental (departamento de Cundinamarca), de la formación Guadalupe, que son rocas areniscas duras de la era terciaria, las cuales son sometidas a procesos de trituración terciarios, con el fin de obtener los tamaños de partículas adecuados para cumplir con las especificaciones de la norma Inviás 2013; el material cumple con lo especificado en el TG2 (figura 3).

### RAP

El RAP utilizado para la preparación de las mezclas proviene del reprocesamiento de capas asfálticas de pavimentos de la ciudad de Bogotá.

### Mezclas de agregados y RAP

Para el estudio se hicieron cuatro combinaciones de agregados en las siguientes proporciones: material granular/RAP (100 - 0 %, 85-15 %, 70-30 % y 50-50 %).

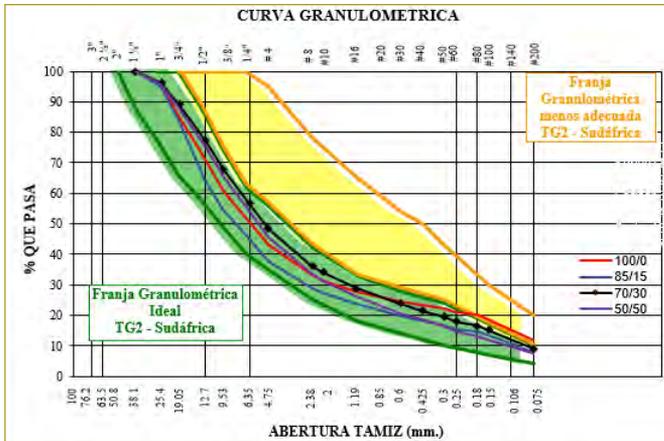
Una vez realizadas las combinaciones de los agregados se procede a determinar la granulometría combinada y a comparar con la franja granulométrica propuesta por la metodología de la Academia del Asfalto de Sudáfrica en el manual TG2; como se puede observar, todas las combinaciones de granular/RAP cumplen con la recomendación granulométrica (figura 3).

A continuación se presenta un resumen de los parámetros de caracterización, para cada una de las mezclas (tabla 1).

**Tabla 1**  
Parámetros de caracterización de las mezclas

Tipo de mezcla	Pasa tamiz N.º 4 (%)	Pasa tamiz N.º 200 (%)	Índice de plasticidad	Humedad óptima (%)	Densidad seca (kN/m³)
100/0	43	11,8	NP	8,4	20,5
85/15	38	7,8	NP	7,6	20,5
70/30	48	9,0	NP	8,2	22,45
50/50	46	7,5	NP	7,2	22,25

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.** Curva granulométrica y mezclas de agregado/RAP.  
Fuente: Elaboración propia.

**Asfalto**

Los asfaltos utilizados son clasificados por grado de penetración como 60/70 (1/10 mm) de las refinerías de Barrancabermeja y Apiay (Colombia), los cuales para la investigación se denominaron B1, B2 y A1; además, cumplen con las especificaciones propuestas por el Instituto Nacional de Vías (Invías) en su versión del año 2013.

*Caracterización de la espuma de asfalto*

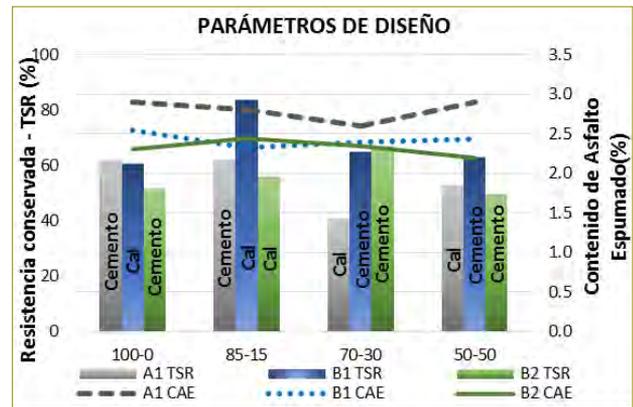
Para la caracterización de la espuma de asfalto se realizaron variaciones de las temperaturas del asfalto entre 140 y 170 °C y en las concentraciones de agua desde 2,0 %, con incrementos de 0,5 % hasta alcanzar el 4,0 %. Los resultados de relación de expansión variaron entre 12,0 y 34,0, mientras que los resultados de vida media mostraron valores entre 12,9 y 15,5 s, cumpliendo de esta manera con los requisitos especificados por la Academia del Asfalto en el manual del TG2.

En la tabla siguiente se hace un resumen de los resultados obtenidos de las características del asfalto por utilizar en el presente estudio, en el que se seleccionó una temperatura óptima de 160 °C y 2,5 % de concentración de agua, teniendo en cuenta que con estas condiciones la espuma de asfalto presentaba un buen comportamiento de manejabilidad y trabajabilidad; además, cumple con los parámetros de aceptación propuestos por la metodología TG-2 (tabla 2).

**METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

**Fabricación de las probetas para ensayo de módulo resiliente**

Las probetas de Mr se fabricaron con el llenante y contenido de asfalto óptimo encontrado, siguiendo las recomendaciones expuestas por la Academia del Asfalto de Sudáfrica en el manual del TG2. Más adelante se muestra un resumen de los tipos de llenante y contenido óptimo de asfalto que mostraron un mejor comportamiento de los tres parámetros evaluados (ITS seco, ITS húmedo y TSR o resistencia conservada) para cada una de las combinaciones propuestas (tabla 3).



**Figura 4.** Parámetros de diseño de mezcla para los diferentes tipos de asfalto.

**Tabla 2**  
Resumen de las características de la espuma óptima para asfaltos 60/70 (1/10 mm)

Tipo de asfalto	Temperatura (°C)	Concentración de agua FWC	Razón de expansión (ER)	Vida media (HL) s.
B1	160	2.5	12.0	15.5
B2	160	2.5	18.0	13.1
A1	160	2.5	34.0	12.9

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3**  
Resumen de resultados de mezclas con tres tipos de asfalto

Tipo de asfalto	100-0			85-15			70-30			50-50		
	LL	CAE	TSR									
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
A1	Ce	2.90	62	Ce	2.81	62	C	2.60	41	C	2.90	44
B1	C	2.55	61	C	2.30	84	Ce	2.40	65	Ce	2.40	63
B2	Ce	2.30	52	C	2.45	56	Ce	2.35	67	Ce	2.20	50

Fuente: Elaboración propia

Nota: (LL: llenante, CAE: contenido de asfalto escogido, TSR: Resistencia conservada).

Con el llenante y el contenido óptimo de asfalto se fabricaron las probetas para determinar el Mr, las cuales se hicieron con los lineamientos de la norma 156 del 2013 del Instituto Nacional de Vías (Invías), para especímenes de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. Teniendo en cuenta el tamaño máximo nominal de las partículas del agregado, la compactación se hizo con un equipo vibratorio en cinco capas y un molde partido.

**Curado**

El curado de las briquetas se realizó en horno a 40 °C durante 72 horas sin sellar, como recomienda la Academia del Asfalto para nivel 1 de diseño en el manual del TG2 (Asphalt Academy, 2009). El proceso de curado acelerado simula el curado en campo y se considera apropiado para simular la ganancia de resistencia.

**Ensayos de módulo resiliente**

Se realizaron pruebas de módulo resiliente para cada una de las mezclas de evaluación (cuatro mezclas), basado en la norma Invías 156/2013, sin control de temperatura. Las presiones de confinamiento usadas fueron las establecidas para materiales de base y subbase en la norma Invías 156/2013, tabla 156-2.

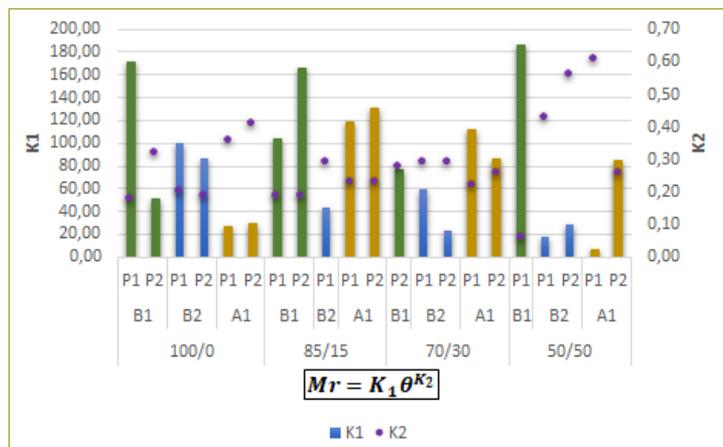
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En la tabla siguiente se resumen los valores de módulo resiliente obtenidos a partir del ensayo dinámico y los valores de k1, k2, k3 y R<sup>2</sup> para los tres modelos evaluados (tabla 4).

**Modelo K-θ**

Para el modelo K-θ aplicado en las diferentes mezclas se obtienen valores de K1 que oscilan entre 0,09 y 185,66, donde el valor más alto es el obtenido con el asfalto B1 y el más bajo es el obtenido con el asfalto B2 y valores de K2 que varían entre 0,06 y 0,61; los valores más altos son los de las mezclas 50/50 fabricadas con los distintos tipos de asfalto, lo que evidencia que estas mezclas tienen mayor dependencia del estado de esfuerzos (figura 5).

Es importante mencionar que de acuerdo con diversas investigaciones, estos valores de K2 se obtienen en mezclas para las cuales la correlación entre el módulo resiliente y el invariante de esfuerzos es baja (Jenkins & Mulusa, 2008), por lo que el modelo K-θ no es el modelo que representa en forma adecuada el comportamiento de las mezclas hechas en el presente trabajo de investigación.



**Figura 5.** Valores de K1 y K2 para los diferentes tipos de mezclas. Modelo K-θ.

**Tabla 4**  
Resumen de resultados de módulo y valores de K para los diferentes modelos

Descripción			Módulo		K-θ			Uzan				T octaédrico			
MEZ.	ASF	CAE	Mín.	Máx.	k1	k2	R <sup>2</sup>	k1	k2	k3	R <sup>2</sup>	k1	k2	k3	R <sup>2</sup>
100/0	B1	2,4	177	634	51,43	0,32	0,71	103,2	0,00	0,28	0,88	3,18	0,00	0,61	0,89
100/0	B2	2,3	197	421	101,55	0,20	0,55	26,66	0,00	0,46	0,88	1,19	0,00	0,95	0,83
100/0	A1	2,9	108	527	26,77	0,36	0,50	89,47	0,00	0,27	0,72	2,08	0,00	0,62	0,67
85/15	B1	2,3	212	672	108,6	0,24	0,26	83,45	0,00	0,29	0,75	2,17	0,00	0,66	0,73
85/15	B2	2,5	123	377	43,41	0,25	0,65	60,37	0,06	0,18	0,71	1,74	0,19	0,18	0,66
85/15	A1	2,8	249	737	137,65	0,23	0,32	103,96	0,00	0,32	0,74	2,89	0,00	0,68	0,68
70/30	B1	2,4	145	590	37,36	0,38	0,58	39,32	0,00	0,46	0,89	1,15	0,00	0,95	0,83
70/30	B2	2,4	170	471	30,4	0,25	0,49	33,85	0,02	0,25	0,66	0,87	0,12	0,34	0,66
70/30	A1	2,6	230	559	118	0,22	0,53	117,5	0,00	0,27	0,86	2,77	0,00	0,59	0,85
50/50	B1	2,4	190	420	294,5	0,01	0,05	160,2	0,00	0,47	0,98	2,61	0,00	0,37	0,21
50/50	B2	2,2	90	340	18,41	0,42	0,77	23,02	0,00	0,47	0,98	1,12	0,07	0,82	0,95
50/50	A1	3,0	100	520	14,5	0,49	0,54	12,61	0,00	0,64	0,88	1,07	0,00	1,28	0,79

Fuente: Elaboración propia.

### Modelo de Uzan

Con este modelo se obtienen valores de K1 que varían entre 12,69 y 160,19, y al igual que en el modelo K-θ los valores más altos se encontraron en las briquetas fabricadas con asfalto B1 y los más bajos con asfalto B2. Así mismo, se observa que los resultados de K2 varían entre 0,00 y 0,09 lo que corrobora la baja dependencia de los materiales tratados con asfalto espumado del estado de esfuerzos; por otro lado, los resultados de K3 muestran valores entre 0,16 y 0,64, lo que representa una

mayor dependencia de las mezclas al esfuerzo desviador que al invariante de esfuerzos θ, registrando resultados opuestos a los propuestos por autores como Santagata, Jenkins y Campagnoli.

La inclusión del esfuerzo desviador en la modelación del comportamiento de las mezclas genera que los valores de R<sup>2</sup> aumenten de 0,47 en promedio a 0,77.

Por otra parte, se observa que con el incremento del contenido de RAP el comportamiento de las mezclas es distinto para cada uno de los tipos de asfalto: para el tipo B1 se genera una mayor correlación entre el Mr y el σd, para el tipo B2 la correlación entre Mr y θ es variable, con picos en la mezcla 85/15 y la 50/50, mientras que para el tipo A1 la mezcla conserva una relación Mr-θ constante, lo que representa valores de K2 similares (figura 6).

### Modelo τ octaédrico

El modelo τ octaédrico arroja valores de K1 que varían entre 0,85 y 3,37, pero los valores más altos son los obtenidos en las briquetas fabricadas con asfalto B1 y los más bajos con asfalto B2. En este modelo se observa que los resultados de K2 varían entre 0,00 y 0,19 lo que corrobora la baja dependencia de los materiales tratados

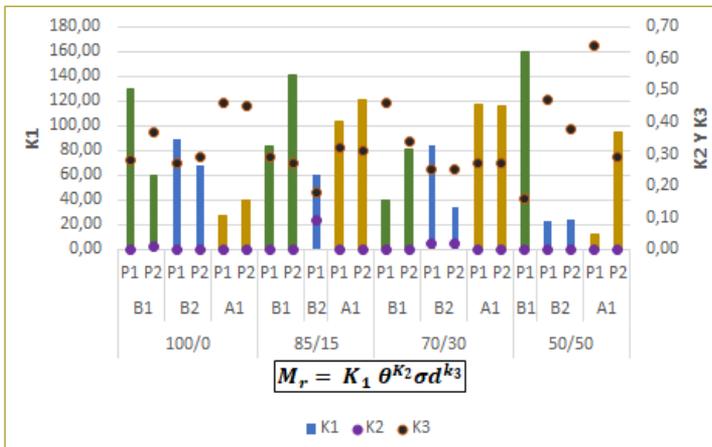


Figura 6. Valores de K1, K2 y K3 para los diferentes tipos de mezclas, modelo universal.

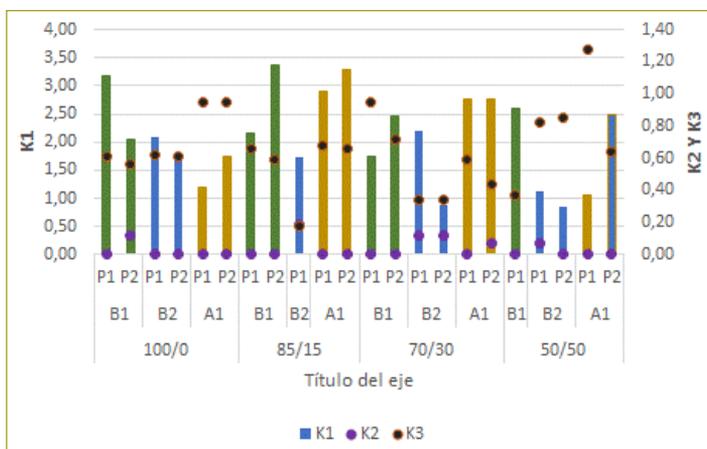


Figura 7. Valores de K1, K2 y K3 para los diferentes tipos de mezclas, modelo  $\tau$  octaédrico.

con asfalto espumado del estado de esfuerzos; por otro lado, los resultados de K3 muestran valores entre 0,18 y 1,28, lo que representa una mayor dependencia de las mezclas al esfuerzo desviador que al invariante de esfuerzos  $\theta$ ; esto da resultados opuestos a los propuestos por autores como Santagata, Jenkins y Campagnoli.

Igualmente, se observa que con el incremento del contenido de RAP la dependencia de la mezcla con el esfuerzo desviador aumenta, por lo que los valores de K3 son más altos para las mezclas 50/50 (figura 7).

### CONCLUSIONES

- Los valores de módulo resiliente para todas las mezclas realizadas mostraron resultados acordes con lo encontrado en la bibliografía existente, que varían entre 150 MPa y 737 MPa.
- En el presente estudio no se encontró una tendencia definida entre el comportamiento del módulo resiliente y el incremento del RAP. Posiblemente se debe a que se tienen variables adicionales, como la gradación, el contenido de asfalto y el tipo de llenante utilizado para la fabricación de las probetas.
- Se observa en general que, contrario a lo indicado en la bibliografía técnica relacionada, los resultados de Mr son mucho más dependientes del esfuerzo

desviador -  $\sigma_d$ , que del invariante de esfuerzos  $\theta$ ; es decir, los modelos que mejor representan la rigidez del material corresponden al modelo Uzan y el  $\tau$  octaédrico o universal. No obstante, Ebels (2008) también encuentra en su trabajo que no existe una correlación directa entre el invariante de esfuerzos y el módulo resiliente para los materiales analizados en su proyecto.

- Los valores de k2 para los modelos Uzan y  $\tau$  octaédrico muestran una tendencia a 0 en la mayoría de las mezclas evaluadas, lo que convierte en 1 el término evaluado, en este caso el invariante de esfuerzos  $\theta$ , lo que confirma la menor dependencia de las mezclas del estado de esfuerzos.

### REFERENCIAS

[1] Carlos, J. (2009). Estudio de las ventajas del "reciclado in situ" en caliente de pavimentos flexibles. Bogotá: Universidad de La Salle.

[2] Jenkins, K. J., & Mulusa, W. K. (2009). Updating Bituminous Stabilized Materials Guidelines: Mix Design Report, Phase II Task 2 - Development of a Simple Triaxial Test, 1-58.

[3] Asphalt Academy (2009). TG2-A guideline for the Design and construction of Bitumen Stabilised Materials (2<sup>nd</sup> ed.). Pretoria: Asphalt Academy.

[4] Wirtgen GmbH (2012). Wirtgen Cold Recycling Technology (1st ed.) (Wirtgen GmbH, Ed.). Windhagen, Alemania.

[5] DalBen, M. (2014). Resilient response and performance of bitumen stabilized materials with foam incorporating reclaimed asphalt. Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy (Engineering) at Stellenbosch University (January).

[6] Ebels, L. (2008). Characterisation of material properties and behaviour of cold bituminous mixtures (March).

[7] González, A. (2009). An experimental study of the deformational and performance characteristics of foamed bitumen stabilised pavements.

[8] Fu, P., Jones, D., Harvey, J. T., Bukhari, S. A., & Ave, O. S. (2009). Laboratory Test Methods for Foamed Asphalt Mix Resilient Modulus, 10(1), 187-212. doi:10.3166/RMPD.10.187-212.

[9] Hicks, R. G., & Monismith, C. L. (1971). Factors Influencing the Resilient Properties of Granular Materials. Transportation Research Record 345, Transportation Research Board. Washington, D.C.: National Research Council, pp. 15-31.

[10] Uzan, J. (1985). Characterization of Granular Material. Transportation Research Record 1022, TRB. Washington, D.C.: National Research Council, pp. 52-59.

[11] Jingang, W., Jenkins, K. J., Molenaar, A. A., & Shaopeng, W. (2011). Evaluation of Resilient Modulus Models for A High Quality Crushed Stone (p. 12).