



7ª. SEMANA TÉCNICA DEL ASFALTO



Módulo resiliente de materiales estabilizados con asfalto espumado

Foamed asphalt stabilized materials Resilient Modulus

Sandra X. Campagnoli M.¹, Dairo S. Puentes P.²

1, 2: Centro de Estudios Geotécnicos, Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia
sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co

RESUMEN

En años recientes se han venido desarrollando esfuerzos considerables para entender las propiedades mecánicas y el comportamiento de los materiales estabilizados con asfalto espumado, particularmente de los obtenidos en los procesos de reciclaje profundo de pavimentos. Muchos estudios están orientados a la obtención del Módulo Resiliente - Mr, de tal forma que, independientemente del modelo de análisis, se puedan aplicar valores confiables de este parámetro a las capas estabilizadas con asfalto espumado en los métodos de diseño de estructuras de pavimento de naturaleza empírico – mecanística.

En este trabajo se presentan los valores del Mr que se midieron en los laboratorios de suelos y pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito sobre materiales estabilizados con asfalto espumado en procesos de reciclaje profundo. Se incluyen los modelos de comportamiento del Mr en función del estado de esfuerzos principales (primer invariante de esfuerzos $-\theta$), del esfuerzo desviador $-\sigma_d$ y del esfuerzo cortante octaédrico $-\tau_{oct}$. Dadas las limitaciones de espacio, se presenta una breve revisión bibliográfica del estado del arte relacionado con el comportamiento de los materiales estabilizados con asfalto espumado, de los métodos para evaluar su rigidez y se dan órdenes de magnitud del Mr.

Siguiendo los lineamientos propuestos por la Academia del Asfalto de Sudáfrica, en la Guía Técnica – *Bitumen Stabilised Materials*, TG2 de 2009, con las concentraciones de asfalto espumado establecidas como óptimas en los respectivos procesos de diseño, se fabricaron 4 mezclas con diferentes proporciones de RAP, de material previamente estabilizado con emulsión asfáltica (ambos materiales procedentes de pavimentos existentes) y de material granular de aporte. Con cada mezcla se compactaron probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, sobre las cuales, después de un proceso de curado, se determinó el Mr en ensayos triaxiales cíclicos, aplicando la norma INV E-156-13 – “Módulo resiliente de suelos y agregados”.

En general, se observa una fuerte dependencia del módulo respecto del estado de esfuerzos, y los valores obtenidos concuerdan con los reportados en otros estudios usando ensayos triaxiales cíclicos, por lo que se considera que pueden usarse como indicadores y órdenes de magnitud de la rigidez inicial que desarrollan los materiales estabilizados con asfalto espumado con proporciones de RAP que pueden llegar a ser relativamente importantes.

Palabras clave: Asfalto espumado, materiales estabilizados con asfalto espumado, módulo resiliente, recuperación total de espesores, reciclaje profundo de pavimentos.

ABSTRACT

In recent years considerable efforts have been developed to understand the mechanical properties and the behavior of foamed asphalt stabilized materials, particularly those obtained in Full Depth Reclamation process. Many studies are aimed to obtain Resilient Modulus - Mr, so that, regardless of the model of analysis, reliable values of this parameter can be applied into empirical – mechanistic methods for pavement design to the layers stabilized with foam bitumen.

The Mr results, obtained at the soil and pavement laboratories of the Colombian School of Engineering Julio Garavito, on foam bitumen stabilized materials are presented in this paper. Mr Models behavior, in function of the state of stress (first stress invariant $-\theta$), deviator stress $-\sigma_d$ and octahedral shear $-\tau_{oct}$, are also presented. Given the limitations of space, we present a brief review of the state of the art related to the behavior of foam bitumen stabilized materials, to methods to evaluate its rigidity and Mr orders of magnitude.

Following the guidelines proposed by the Asphalt Academy of South Africa in the Technical Guide - Bitumen Stabilized Materials, TG2-2009, with the foam bitumen concentrations, established as optimal, in the respective processes of mix design, a total of 4 mixtures with different proportions of RAP, previously stabilized bitumen emulsion (both materials from existing pavements) and quarry granular material, were manufactured. With each mixture, cylindrical specimens of 100 mm diameter and 200 mm high were compacted, and then, after a curing process, the Mr was determined in a cyclic triaxial tests, applying the Colombian standard –INV E-156-13 - "Resilient modulus of soil and aggregates".



7ª. SEMANA TÉCNICA DEL ASFALTO



In general, strong dependence of the Resilient Modulus is observed with the state of stress and It values are consistent with those reported in other studies, using cyclic triaxial tests, considering that can be used as indicators and orders of magnitude of the initial stiffness that develop foam bitumen stabilized materials containing proportions of RAP which can become relatively important.

Keywords: foam bitumen, foam bitumen stabilized materials, resilient modulus, Full Depth reclamation, deep recycling.

1 INTRODUCCIÓN

Los procesos in-situ de reciclaje profundo, también conocidos como recuperación total de espesores de pavimentos asfálticos – FDR, (por sus siglas en Ingles *Full Depth Reclamation*), en los cuales se involucran, en diferentes proporciones, tanto capas asfálticas como materiales granulares de la capa de base subyacente, existentes en el pavimento, para ser tratadas con asfalto espumado – FA (*Foam Asphalt*), dando lugar a una capa de base estabilizada, constituyen una técnica prometedora para la rehabilitación de estructuras de pavimento flexibles.

Durante las últimas dos décadas, se ha rehabilitado exitosamente un volumen importante de carreteras alrededor del mundo empleando procesos de reciclaje in-situ, usando FA. Se cuenta con numerosas experiencias en Noruega, los Países Bajos, Rusia, Arabia Saudita, Irán, China, Norte y Sur América, entre otros, y muy especialmente en Nueva Zelanda, Australia y Sur África.

A pesar de su enorme volumen de aplicación, los métodos predominantes de diseño de las mezclas, así como los de diseño estructural del pavimento, son altamente empíricos. Tan solo en años recientes se están realizando esfuerzos orientados a comprender mejor el comportamiento de los materiales estabilizados con ligantes bituminosos – BSM (por sus siglas en ingles *Bitumen Stabilised Materials*), particularmente con FA, obtenidos en procesos de FDR y para desarrollar los métodos de diseño empírico – mecánicos para el cálculo de la respuesta estructural del pavimento que, como es bien sabido, requieren el módulo resiliente – M_r de las capas, como uno de los parámetros de entrada.

El M_r caracteriza la resistencia de los materiales del pavimento a la deformación resiliente generada por las cargas aplicadas del tránsito, definiéndose de manera general como la relación entre la magnitud de los esfuerzos aplicados y la deformación recuperable resultante. En una estructura típica obtenida de un proceso de FDR, el M_r de la capa estabilizada con FA influye en las deformaciones y en la vida a la fatiga de las capas asfálticas que se encuentran sobre ella y en la manera como se distribuyen las cargas del tránsito para reducir los esfuerzos transmitidos a las capas inferiores.

Los ensayos empleados en la actualidad para evaluar las propiedades de los BSM con FA, particularmente el M_r , en general fueron desarrollados originalmente para otros materiales usados corrientemente en la construcción de pavimentos. Por ejemplo, en algunos estudios se han aplicado los protocolos del ensayo triaxial cíclico; AASHTO T307, INV-E-156-13 que se ejecutan normalmente sobre suelos y granulares no ligados, con algunas modificaciones asociadas a la magnitud, la frecuencia y la secuencia de aplicación de las cargas, así como a la temperatura de ensayo, para tener en cuenta la naturaleza visco-elástica del asfalto presente en el BSM. También, de manera más frecuente, se aplican los protocolos del ensayo de tracción indirecta – TI (ASTM D7369-11, LTPP P07, EN 12697-26 o INV E749-13) usados tradicionalmente para determinar el M_r de mezclas asfálticas en caliente – HMA (por sus siglas en inglés *Hot Mix Asphalt*). Los valores de M_r obtenidos en cada uno de estos métodos de ensayo, difieren considerablemente. Estudios recientes, concluyen que el ensayo de tracción indirecta sobreestima la rigidez del material y no es



7ª. SEMANA TÉCNICA DEL ASFALTO



representativo del estado de esfuerzos al que realmente se encuentra sometida la capa tratada en el pavimento en servicio (Fu et al., 2009).

En este trabajo se presentan los valores de M_r medidos en los laboratorios de suelos y pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito sobre materiales estabilizados con asfalto espumado en procesos de reciclaje profundo. Se incluyen los modelos de comportamiento del M_r en función del estado de esfuerzos principales (primer invariante de esfuerzos $-\theta$), del esfuerzo desviador $-\sigma_d$ y del esfuerzo cortante octaédrico $-\tau_{oct}$. Dadas las limitaciones de espacio, se presenta una breve revisión bibliográfica del estado del arte relacionado con el comportamiento de los materiales estabilizados con asfalto espumado, de los métodos para evaluar su rigidez y se dan órdenes de magnitud del M_r .

Siguiendo los lineamientos propuestos por la Academia del Asfalto de Sudáfrica, en la Guía Técnica – *Bitumen Stabilised Materials*, TG2 (Asphalt Academy, 2009) con las concentraciones de asfalto espumado previamente establecidas como óptimas en los respectivos diseños, se fabricaron 4 mezclas con diferentes proporciones de RAP (21%, 38%, y 55%), de material previamente estabilizado con emulsión asfáltica -BE (64%, 47% y 30%) - ambos materiales procedentes de pavimentos existentes – 15% de material granular de aporte (2 fuentes diferentes – AP1 y AP2) y 1% de cal hidratada como llenante activo. Con el material de cada mezcla se compactaron, con la humedad óptima y la densidad seca máxima del Proctor Modificado, probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, sobre las cuales, después de un proceso de curado, se determinó el M_r en ensayos triaxiales cíclicos, aplicando la norma INV E-156-13 – “Modulo Resiliente de suelos y Agregados”, (República de Colombia - Ministerio de Transporte - Instituto Nacional de Vías, 2013).

2. COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES ESTABILIZADOS CON FA

Los BSM en los que se usa FA presentan un comportamiento claramente diferenciado de las HMA, aun cuando en la práctica incorporen los mismos ingredientes primarios – asfalto y agregados. En algunos casos, llenantes activos tales como cemento, cal o llenantes inertes como cenizas volantes o finos minerales se agregan en muy bajas proporciones, con el propósito de mejorar la trabajabilidad, incrementar la rigidez, la resistencia y, muy especialmente, reducir el daño inducido por la humedad. La selección del llenante activo es muy importante ya que cada uno de ellos contribuye de distinta manera en las propiedades mecánicas de las mezclas con FA (Halles, 2013).

El comportamiento de los BSM depende de la tasa de aplicación de llenante activo y del contenido de FA. Dependiendo de las cantidades de ellos que sean agregadas, las mezclas con un mismo material parental se pueden comportar como: un material granular (bajos contenidos de asfalto y de cemento), como un material cementado (alto contenido de cemento) o como un material ligado con asfalto (alto contenido de asfalto). En la figura 1 se ilustra el comportamiento de los BSM, respecto del de otros materiales usados corrientemente en la construcción de un pavimento.

Por otro lado, la forma de dispersión selectiva del FA en los agregados en un BSM – las partículas finas son encapsuladas por el asfalto para incrementar la cohesión de la mezcla, creando puntos de soldadura entre las partículas gruesas, que a su vez quedan relativamente descubiertas para preservar la fricción -, le imprimen características y propiedades notablemente diferentes frente a las HMA y aún frente a los mismos BSM en los que se usan emulsiones asfálticas como ligante.

7ª. SEMANA TÉCNICA DEL ASFALTO

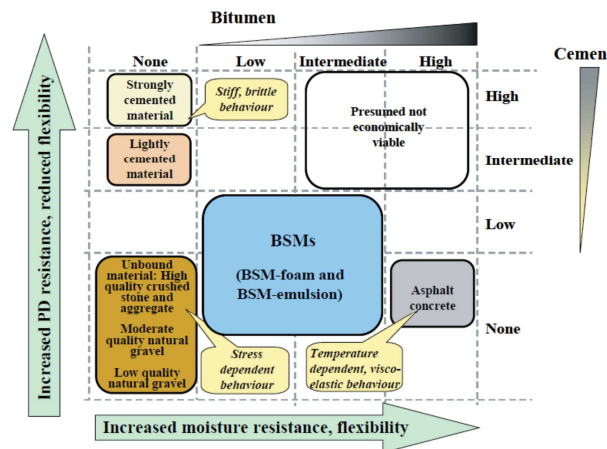


Figura 1: Marco conceptual del comportamiento de los materiales usados en pavimentos (Asphalt Academy, 2009)

Aun cuando la naturaleza de dispersión selectiva de los FA en la mezcla es evidente, los modelos de comportamiento y los métodos de análisis de los materiales estabilizados con FA son aún motivo de discusión. ¿Son los modelos constitutivos y los modelos de deterioro de los materiales granulares, de los materiales cementados o de los materiales asfálticos aplicables a las BSM con FA? (Lynch y Jenkins, 2013). En la figura 2 se aprecian las principales diferencias en las dosificaciones de los ligantes (asfalto y cemento) que se tienen en la aplicación de la tecnología en Sur África - RSA, Nueva Zelanda - NZ y Australia - AUS, países que orientan las metodologías de diseño de mezclas y de diseño, construcción y evaluación de estructuras de pavimento que involucran capas de MSB con FA. Mientras que, por un lado, la experiencia australiana contempla la fisuración por fatiga como el principal modo de deterioro de los BSM, asemejándose a una mezcla asfáltica, la experiencia Sudafricana sustenta en sus diseños la deformación permanente como el principal mecanismo de falla, aproximándose al comportamiento de un material granular – de aquí nace la expresión: los BSM con FA son “granulares con esteroides” (Lynch y Jenkins, 2013), (Leek et al., 2014).

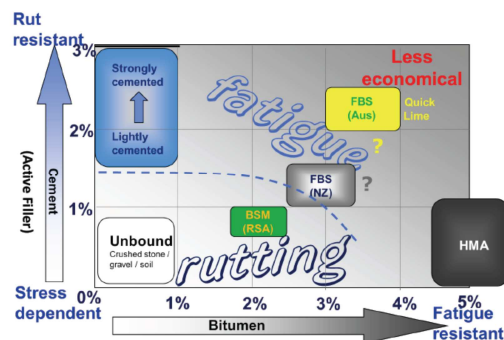


Figura 2: Rangos de tasas de aplicación de ligantes en los países con las mejores prácticas en BSM con FA (Lynch & Jenkins, 2013)

Dada la variedad de factores que influyen significativamente en el comportamiento de los materiales estabilizados con FA- inclusión o no de llenantes activos, bajos vs. altos contenidos de asfalto, temperatura de los agregados en la elaboración de la mezcla y en servicio, entre otros - se puede

entonces pensar para los BSM en un rango de funciones de desempeño, en lugar de una sola, para considerar en el modelo de análisis. Estos factores, por supuesto también afectan el Mr del material, es decir, la capacidad de distribuir los esfuerzos generados por las cargas del tránsito.

3. Mr DE MATERIALES ESTABILIZADOS CON FA

Las concepciones de comportamiento de los materiales estabilizados con FA mencionadas en el numeral anterior, explican de alguna manera el empleo de los diferentes métodos de ensayo reportados en la literatura técnica para la obtención de sus Mr. Principalmente, se usan para la determinación del Mr de los materiales estabilizados con espuma de asfalto, el ensayo de Tracción Indirecta (IT) cuando se asimilan los BSM a mezclas asfálticas y se sustentan en la experiencia australiana, y el Triaxial Ciclico (TX) cuando su comportamiento se considera semejante al de un material granular, con dependencia del estado de esfuerzos.

Sufian y otros, evaluaron en laboratorio la influencia del contenido de cemento, del tiempo de curado y de la humedad sobre las propiedades de resistencia de mezclas de diferentes proporciones de RAP y piedra triturada (CR), estabilizadas con emulsión y FA. En la figura 3 se muestra el comportamiento del Mr frente a estos parámetros de las mezclas elaboradas con FA. Independientemente de las tendencias de comportamiento exhibidas, se aprecia que los valores del Mr oscilan entre 400 MPa a un poco más de 15000 MPa. Aun cuando en el estudio no se indica el método de ensayo seguido para la obtención del Mr, los valores obtenidos permiten presumir que corresponde al ensayo de IT. (Sufian et al., 2014)

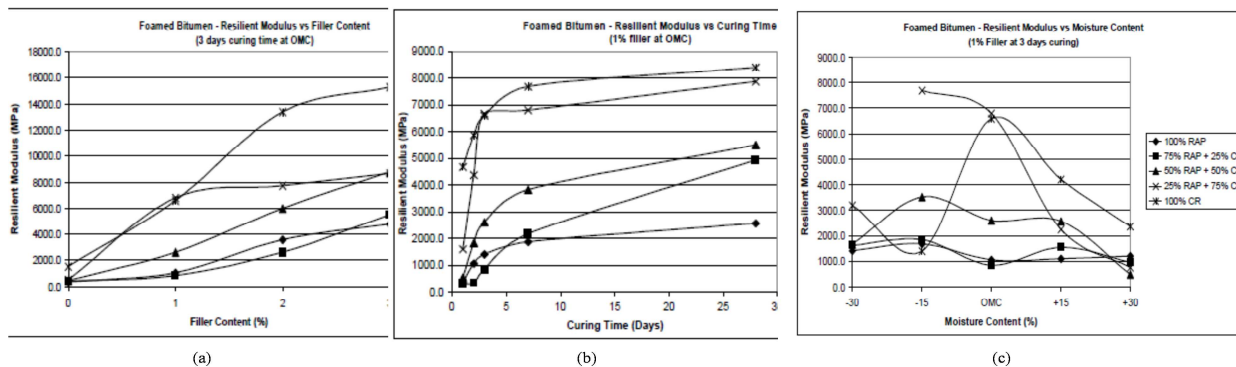


Figura 3: Variación del Mr con (a) Contenido de cemento, (b) Tiempo de curado y (c) Humedad (Sufian et al., 2014)

Ljubic y otros, caracterizaron en el laboratorio las propiedades de rigidez de 5 mezclas estabilizadas con FA de materiales típicos encontrados en Slovenia, incluyendo 1,5% de cemento como llenante activo, diferentes concentraciones de RAP y material granular. Los valores obtenidos del Mr, para muestras secas y después de sumergidas, aplicando la norma de ensayo EN 12697 26 (Ensayo IT) junto con las especificaciones de la autoridad de carreteras de Australia - Austroads, se presentan en la figura 4. Como puede verse, los Mr varían desde algo más de 3000 MPa hasta cerca de 7000 MPa, cumpliéndose en general con las especificaciones de la Agencia Australiana en relación con la magnitud de la rigidez requerida según el tránsito (Ljubic et. all, 2012).

7ª. SEMANA TÉCNICA DEL ASFALTO

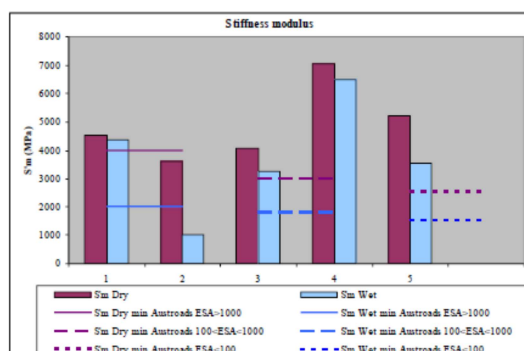


Figura 4: Mr y Especificaciones de Austroads, (Ljubic et. all, 2012)

En un estudio sobre la respuesta resiliente de los BSM con asfalto espumado, desarrollado por Dal Ben bajo la dirección de K. Jenkins, se realizaron ensayos triaxiales cíclicos, variando las condiciones de temperatura y de presión de confinamiento, reportando valores de Mr iniciales, que varían entre 300 y 700 MPa para muestras curadas en el laboratorio que contienen 50% y 100% de RAP. En la figura 5 se pueden ver algunos de estos resultados, (DalBen, 2014). Valores similares e incluso inferiores (100 a 400 MPa) del Mr inicial que desarrollan los BSM con FA han sido reportados por otros investigadores, (Ebels, 2008), (Gonzalez, 2009), (Jiitareekul, 2009), (Halles, 2013).

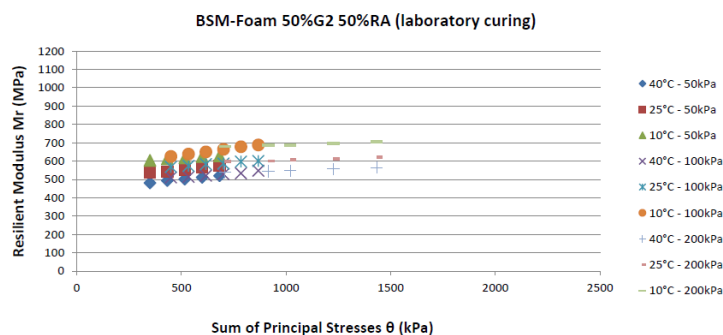


Figura 5: Mr obtenido en ensayos triaxiales cíclicos (DalBen, 2014)

Resulta importante mencionar que el Mr de los BSM con FA se incrementa con el tiempo. Así ha sido demostrado tanto en estudios de laboratorio como en evaluaciones en tramos experimentales realizadas a largo plazo, como se puede ver en (Ebels, 2008), (Lynch y Jenkins, 2013), (Halles, 2013) y (DalBen, 2014).

Las diferencias en los valores de Mr reportados en los estudios de los autores mencionados confirman lo ya indicado en este documento y señalado por Fu y otros, como parte de la investigación detallada en el reporte UCPRC-RR-2008-07 – *En la evaluación de la rigidez de los BSM con asfalto espumado, el ensayo de Tracción Indirecta arroja valores irreales del Mr (superiores a 5000 MPa), considerándose que el ensayo Triaxial es más apropiado al ser más representativo del estado de esfuerzos y sus resultados son más consistentes con los valores de Mr*



7ª. SEMANA TÉCNICA DEL ASFALTO



obtenidos por retro cálculo a partir de medidas de deflexión con FWD en pavimentos en servicio, (M_r de 500 a 3000 MPa) - (Fu et al., 2009), (Jones et al., 2008), (Fu, 2009).

4. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO PARA LA PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL M_r .

4.1 Agregados

Los agregados usados en el estudio corresponden al fresado de capas asfálticas (RAP) y de bases estabilizadas con emulsión asfáltica (BE) subyacentes, existentes en el pavimento, y a un material granular de aporte, proveniente de dos fuentes. Las proporciones de RAP, BE, AP¹ o AP², dadas como porcentaje de peso seco de la mezcla son: **M1**- (21%, 64%, 15%¹), **M2** - (21%, 64%, 15%²), **M3** - (38%, 47%, 15%¹) y **M4** - (55%, 30%, 15%¹). Como se muestra en la figura 6, las curvas granulométricas se encuentran dentro de las franjas recomendadas como ideales para los BSM con FA según la experiencia Sudafricana y dentro de la especificación relacionada del INV – ART.461.

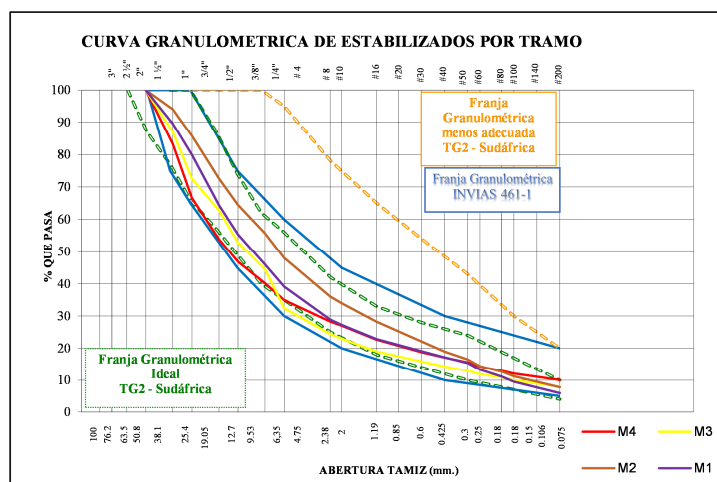


Figura 6: Curvas granulométricas de las mezclas de RAP, BE y material de aporte AP.

4.2 Cemento Asfáltico

Para la fabricación de los BSM se usó cemento asfáltico 60-70 procedente de la refinería de Barrancabermeja, el cual fue espumado en planta de laboratorio WLB-10S a 160°C, con la inyección de 2,5% de agua, condiciones para las cuales se alcanzaron una relación de expansión – ER de 12 y una vida media – HL de 16 s

4.3 Selección de llenante y de la concentración óptima de asfalto espumado

La selección del tipo de llenante y del contenido óptimo de asfalto espumado se realizó siguiendo el procedimiento propuesto por la Academia del Asfalto de Sudáfrica, en la Guía Técnica – *Bitumen Stabilised Materials*, TG2 de 2009, (Asphalt Academy, 2009), el cual se resume en el diagrama de flujo de la figura 7.

7ª. SEMANA TÉCNICA DEL ASFALTO

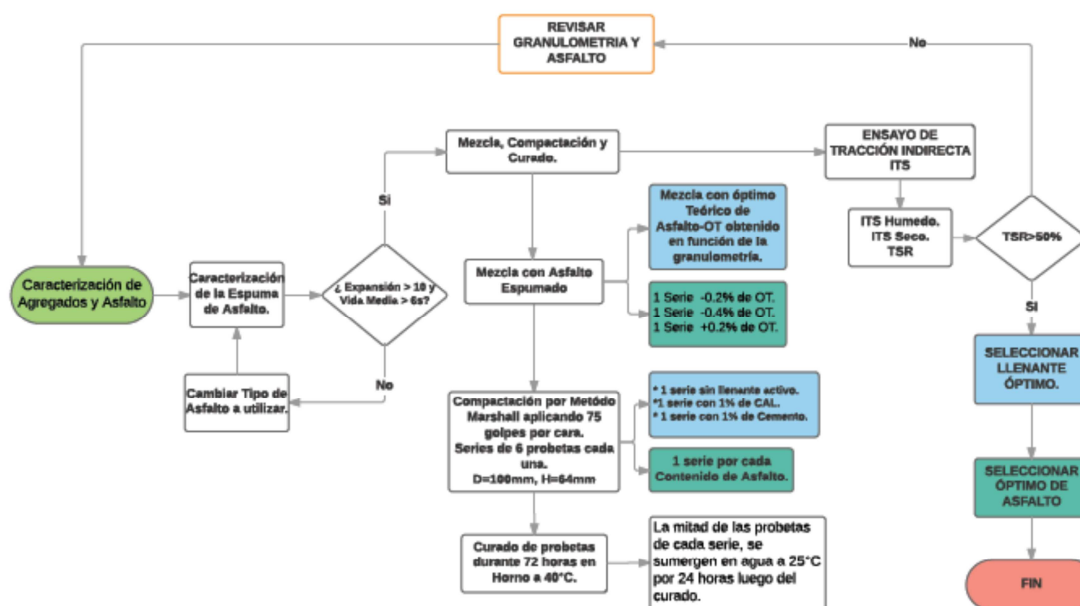


Figura 7: Diagrama para la selección del llenante y de la concentración óptima de asfalto espumado. Elaboración propia.

4.4 Preparación de muestras para obtener el Mr

Con el llenante (cal, para todas las muestras) y la concentración de asfalto encontrados como óptimos, se fabricaron probetas compactadas con la humedad óptima y la densidad seca máxima del Proctor Modificado, de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, las cuales fueron curadas en horno a 40°C durante 72 h, después de lo cual se ensayaron en el aparato triaxial. En la tabla 1 se resumen las características y propiedades de las mezclas del estudio. Se incluyen los valores de resistencia a la tracción indirecta - (ITS), en seco y en húmedo, junto con la resistencia conservada (TSR) de probetas tipo Marshall fabricadas con la humedad óptima y las concentraciones de cal y asfalto espumado indicadas.

Tabla 1: Características y propiedades mecánicas de las muestras tratadas con asfalto espumado

PROPIEDAD	M1	M2	M3	M4
Humedad óptima (%)	8.1%	8.5%	7.9%	7.7%
Peso Unitario Seco Máximo (kN/m ³):	21.75	19.05	19.42	19.42
Peso Unitario Seco Probetas (kN/m ³):	21.58	18.4	18.8	19.24
% Densidad Respecto a máxima	99%	97%	97%	99%
Llenante Óptimo CAL	1%	1%	1%	1%
Asfalto Espumado (%)	2.3%	2.3%	2.4%	2.5%
ITS Seco (KPa)	377.0	380.3	412.0	368.4
ITS Humedo (KPa)	219	252.9	228.3	221.1
TSR (%)	58.0%	66.0%	55.4%	60.0%

5. RESULTADOS

La rigidez de las muestras se determinó en ensayos triaxiales cíclicos, siguiendo la norma de ensayo INV E-156-13 – “Modulo Resiliente de suelos y agregados”, obteniendo los resultados que se resumen en la tabla 2, donde también se presentan los valores de las constantes experimentales,

obtenidas en cada uno de los modelos de ajuste aplicados. En la Figura 8 se presenta, para cada muestra ensayada, la relación entre el M_r y el primer invariante de esfuerzos - θ .

Tabla 2: Rangos de M_r y constantes experimentales encontradas con los modelos aplicados

		RANGO DE MÓDULO RESILIENTE		Valores de Constantes para cada Modelo							
				Mr = A θ ^{k1} σ _d ^{K2}			Mr = K1 θ ^{k2}		Mr = K1 * Pa * (θ/Pa) ^{k2} *(τ _{OCT} /Pa + 1) ^{k3}		
MUESTRA	LLENANTE 1%	MÍNIMO (MPa)	MÁXIMO (MPa)	A	K1	K2	K1	K2	K1	K2	K3
M1	CAL	167	555	57.7	0.01	0.401	43.4	0.382	301.9	0.009	0.403
M2		257	392	147.9	0.01	0.157	155.9	0.126	1240.5	0.009	0.147
M3		423	833	169.5	0.001	0.278	182.2	0.211	1089.0	0.002	0.278
M4		320	837	106.3	0.001	0.371	102.7	0.305	594.6	0.000	0.373
Mr:	Modulo Resiliente en MPa	Pa: Presión Atmosférica 0.1MPa					σ _d : Esfuerzo desviador (MPa)				
K1, K2, K3	Constantes experimental	θ: Primer Invariante de esfuerzos									

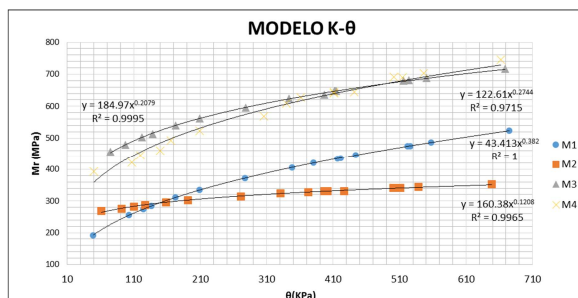


Figura 8: Variación del M_r con el primer invariante de esfuerzos θ

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la tabla 3 se presentan los coeficientes de correlación obtenidos al aplicar cada uno de los modelos constitutivos. Estos valores indican la clara dependencia que exhiben los materiales tratados con asfalto espumado respecto del estado de esfuerzos, con un comportamiento similar al de un granular no ligado, teniendo mayor rigidez a mayor nivel de confinamiento.

Tabla 3: R^2 de los modelos de comportamiento

MUESTRA	Valores de Correlación - R^2				
	$M_r = A \theta^{k1} \sigma_d^{K2}$		$M_r = K1 \theta^{k2}$	$M_r = K1 * Pa * (\theta / Pa)^{k2} * (\tau_{OCT} / Pa + 1)^{k3}$	
	θ	σ_d	θ	θ	τ_{OCT}
M1	0.8475	0.9784	1.0000	0.8621	0.9790
M2	0.855	0.9414	0.9965	0.8543	0.9404
M3	0.8437	0.9642	0.9995	0.8445	0.9645
M4	0.8491	0.9767	0.9715	0.8483	0.977

Las muestras 3 y 4 con mayor contenido de RAP (38% y 55%) exhibieron comportamiento similar, con valores de M_r comprendidos entre 300 y 800 MPa. Las muestras 1 y 2, con iguales concentraciones de RAP y BE (21% y 64% respectivamente), presentaron tendencias de comportamiento del módulo ligeramente diferentes, quizás atribuible al material de aporte usado para fabricar la muestra 2 que dio lugar a una mezcla con mayor presencia de arena, mostrando una menor dependencia del módulo con respecto al nivel de confinamiento.



7ª. SEMANA TÉCNICA DEL ASFALTO



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El comportamiento que exhiben los materiales estabilizados con bajos contenidos de asfalto espumado ($< 3\%$) y de llenante activo ($< 1\%$) se aproxima más al de un material granular, pudiendo considerarse como un material granular débilmente ligado con asfalto. Los resultados obtenidos en este estudio así lo confirman.
- De acuerdo con estudios realizados por reconocidas universidades y agencias de transporte que lideran los desarrollos de la tecnología de los asfaltos espumados, aplicados al reciclaje de pavimentos y a la estabilización de suelos, para la determinación del M_r de los materiales estabilizados se debe preferir el ensayo triaxial cíclico sobre el ensayo de tracción indirecta, debido a que refleja mejor la dependencia del estado de esfuerzos que presentan estos materiales.
- Mientras que en el ensayo de tracción indirecta se sobreestima la rigidez de los materiales estabilizados con asfalto espumado (M_r superior a 5000 MPa) en el ensayo triaxial cíclico los M_r no superan los 3000 MPa, y sus valores concuerdan con los obtenidos en tramos experimentales y evaluaciones del comportamiento a largo plazo de pavimentos en servicio, obtenidos por retrocálculo a partir de medidas de FWD.
- Los M_r obtenidos en el presente estudio a través de pruebas triaxiales cíclicas llevadas a cabo sobre probetas compactadas con la humedad óptima y curadas en laboratorio, de mezclas de RAP (21%, 38% y 55%), material estabilizado con emulsión BE (64%, 47% y 30%), 15% de material granular de aporte (dos fuentes), 1% de cal como llenante activo y la concentración de asfalto espumado (2,3%, 2,4% o 2,5%) establecida como óptima en los procesos previos de diseño de las mezclas, se encuentran entre 200 y 800 MPa. Estos valores coinciden con los reportados en la literatura técnica relacionada.
- En tres de las cuatro muestras evaluadas en el estudio se presentó una fuerte dependencia del módulo respecto del estado de esfuerzos y, en la gran mayoría de los casos, los valores de R^2 obtenidos son superiores a 0,9.
- Es necesario continuar con estudios de comportamiento de los materiales estabilizados con asfalto espumado, usando materiales propios, en particular asfaltos, incluyendo además de la evaluación de su rigidez en función del estado de esfuerzos, el efecto de la temperatura y de la velocidad de aplicación de la carga.
- En los últimos años la tecnología de los asfaltos espumados aplicada en los procesos de reciclaje profundo para la rehabilitación de pavimentos ha tenido un desarrollo notable, dando lugar a una rápida evolución de los protocolos para el diseño de mezclas, así como de las especificaciones de materiales y construcción relacionados. Esto hace necesaria la revisión y la actualización de la norma de ensayo *I.N.V. E 785-13 Diseño de mezclas de agregados con cemento asfáltico espumado* y del Artículo 461: *Reciclado de pavimento asfáltico en frío en el lugar empleando ligantes bituminosos*, de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías.



7ª. SEMANA TÉCNICA DEL ASFALTO



REFERENCIAS

- (1) Asphalt Academy. (2009). *Technical Guideline : Bitumen Stabilised Materials -TG2*.
- (2) DalBen, M. (2014). Resilient response and performance of bitumen stabilized materials with foam incorporating reclaimed asphalt. *Thesis Presented in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy (Engineering) at Stellenbosch University*, (January).
- (3) Ebels, L. (2008). Characterisation of material properties and behaviour of cold bituminous mixtures. *Dissertation Presented for the Degree of Doctor of Philosophy (Engineering) at Stellenbosch University, South Africa*.
- (4) Fu, P. (2009). Micromechanics for Foamed Asphalt Stabilized Materials. *Dissertation Submitted in Partial Satisfaction of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering in the UNIVERSITY OF CALIFORNIA DAVIS*, (December).
- (5) 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
- (6) Gonzalez, A. (2009). An experimental study of the deformational and performance characteristics of foamed bitumen stabilised pavements. *A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in the University of Canterbury*.
- (7) Halles, F. (2013). Stiffness evolution mechanism of recycled mixes with foamed bitumen and cement.
- (8) Jiitareekul, P. (2009). An investigation into cold in place recycling of asphalt pavements. *Thesis Submitted to the University of Nottingham for the Degree of Doctor of Philosophy*.
- (9) Jones, D., Fu, P., Harvey, J., & Halles, F. (2008). Full-Depth Pavement Reclamation with Foamed Asphalt: Final Report. *Research Report: UCPRC-RR-2008-07*, (April).
- (10) Leek, C., Nikraz, H., & Chegenizadeh, A. (2014). Engineering characterisation of in situ foamed bitumen. *Australian Geomechanics Vol 49 No 1*, *49*(1), 133–142.
- (11) Ljubic, A., Baselj, R., Zavrtnik, N., Kozamernik, M., & Zore, D. (2012). Qualitative characterization of foamed bitumen stabilised mixes. *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 13-15th June 2012, Istanbul*, (June 2012), 13–15.
- (12) Lynch, A., & Jenkins, K. (2013). Materials recycled using foamed bitumen stabilisation: What is their long term load spreading capacity. *15th International Flexible Pavements Conference of AAPA, 15th INTER*, 1–18.
- (13) República de Colombia - Ministerio de Transporte - Instituto Nacional de vías. (2013). Normas de ensayo de Materiales 2013.
- (14) Sufian, Z., Aziz, N. A., Yazip, M., Zain, M., Rosli, M., & Akin, E. (2014). Influence of Active Filler, Curing Time and Moisture content on the Strength Properties of Emulsion and Foamed Bitumen Stabilized Mix. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, *4*, 135–141.