



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

"DISEÑO Y EVALUACIÓN DE BASES ESTABILIZADAS CON ASFALTO ESPUMADO: METODOS DE PRUEBA Y PRONOSTICO DE DESEMPEÑO"

Mario Rigoberto Lucero Arellano¹, Francisco Javier Moreno Fierros^{1 2}.

¹ Alta Tecnología en Ingeniería de Pavimentos y Seguridad Vial S.A. de C.V., Cuernavaca, Morelos, México, mrlucero@alta-tecnologia.mx

² AT Laboratorio de Pavimentos S.A. de C.V., Cuernavaca, Morelos, México, fmoreno@alta-tecnologia.mx

Resumen

El presente artículo aborda la evaluación de materiales de pavimentos mediante ensayos mecánicos que respalden la propuesta de una alternativa para rehabilitar el pavimento de un tramo carretero considerando el reciclado de una parte del espesor existente, mediante la técnica de extraer los materiales mediante fresado (RAP), clasificarlos y adicionar agregados nuevos para adecuar su granulometría y estabilizar con asfalto espumado en un espesor equivalente en resistencia, para brindar otro ciclo de vida útil. Comparativamente es una técnica que permite reutilizar los materiales existentes en porcentajes altos, en este caso 75%; utilizar la mitad de ligante asfáltico para estabilizar (en forma de espuma asfáltica) y recurrir a un menor volumen de agregados nuevos para complementar la granulometría, todo ello para brindar a los usuarios de la carretera pavimentos de calidad, económicos y sostenibles.

Palabras Clave: Asfalto Espumado, Rehabilitación, Reciclado.

1. Introducción

La cada vez más frecuente cultura del reciclaje en diversos procesos de producción a nivel global, en la actualidad cobra relevancia para los medios y procesos de obtención de un bien duradero derivado de la escasez de recursos no renovables y del consumo de energía para su desarrollo. El incremento de la población es otro factor que ha incentivado el crecimiento del parque vehicular, condición que demanda más superficies pavimentadas para su circulación en la infraestructura carretera, que a su vez demanda mayores recursos económicos para su construcción y mantenimiento.

El tema que aquí se analiza, se refiere al reciclado de las capas superficiales de la estructura del pavimento deteriorado aplicando el aglutinante (asfalto espumado) que servirá para estabilizar una de las capas del pavimento; en ese proceso de fabricación se disminuye el consumo energético para generar la espuma de asfalto, así como todos los procesos indirectos involucrados que representan por el menor contenido de asfalto en la mezcla.

La técnica de estabilización con asfalto espumado (BAE), radica en construir bases granulares de pavimentos, mejorando su calidad portante a través de la mezcla de materiales reciclados de pavimentos existentes (RAP) y/o con material de aporte, en conjunto con un aglutinante asfáltico que ha sido sujeto a un proceso de calentamiento y posterior formación de espuma, como principales elementos; la adición de algún filler como complemento a la granulometría no es estrictamente vinculante. El efecto de la dispersión del asfalto espumado interactuando con la fracción fina de la mezcla estabilizada, mejora las características de la cohesión, disminuye el efecto de susceptibilidad a la humedad y no altera las condiciones del ángulo de fricción, condiciones que permiten un mejor desempeño de respuesta estructural del pavimento.



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

Los factores más importantes para generar el asfalto espumado son la cantidad de agua y la temperatura para el proceso de espumado del asfalto, los cuales determinan la calidad y comportamiento de la mezcla. Un mayor contenido de agua crea una mayor expansión y vida media más corta de la burbuja de espumado, mientras que una mayor temperatura generará un mejor espumado; con base en esto, se determinan las propiedades para el cemento asfáltico que se utilizará en el diseño de la mezcla. El agua debe ser libre de impurezas para prevenir la contaminación e interrupción de la inyección del agua al proceso de espumado del asfalto y formación de la mezcla.

Generalmente para mejorar las características químicas de la mezcla se utiliza algún filler activo. El propósito del filler es mejorar la adhesión del asfalto espumado con el agregado, la dispersión del asfalto en la mezcla, reducir el índice de plasticidad y con esto aumentar la rigidez y resistencia de la mezcla. El tiempo de adición del filler activo a la mezcla debe reducirse al mínimo tanto en laboratorio como en el campo, ya que el filler activo reacciona inmediatamente con la humedad del material, accionando la adherencia entre las partículas.

2. Características del proyecto analizado.

El caso de estudio forma parte de un eje troncal (ET-2), ubicado en una fisiografía que combina terreno sensiblemente plano (60%) con terreno montañoso (40%), con clima semicálido. La carretera es del tipo A2, cuenta con dos carriles de circulación y acotamientos (un carril por sentido de circulación); la sección de la corona es de 12 m; tiene un aforo de 5200 vehículos con la siguiente composición: A= 81.6%, B= 8.7% y C= 9.7%, con una previsión de crecimiento del 4.16% por la reactivación económica de la zona ante la próxima conexión con otro tramo carretero de cuota.

El proyecto presenta varias particularidades favorables por las cuales se consideró apropiado para implementar la solución de reciclar parte de la estructura superficial del pavimento, las cuales se mencionarán a continuación: se trata de un tramo carretero concesionado que será sujeto de un nuevo ciclo de intervenciones por cambios en el título de concesión; de acuerdo con los indicadores de la evaluación superficial y estructural, no alerta por indicios de deficiencias relevantes, con excepción de la cada vez más frecuente presencia de fisuras y agrietamiento longitudinal, transversal y en forma de bloques con severidad leve que se viene acumulando en el 8.3% del tramo y finalmente, la estructura promedio de pavimento existente es de tipo semirrígida constituida por 5 cm de carpeta asfáltica densa (CA), 10 cm de base asfáltica (BA) desplantadas sobre una base estabilizada con cemento Portland de 25 cm de espesor, como se observa en el perfil estratigráfico que se ilustra en la Figura 1.

De acuerdo con las características del deterioro superficial observado en el pavimento y la ejecución de la exploración geotécnica con calas (C) y pozos a cielo abierto (PCA), se planteó la hipótesis que la causa principal de la falla del pavimento es por la reflexión del agrietamiento desde la capa de base estabilizada con cemento (BEC) por efectos de su rigidez y contracción formando bloques, que reflejan de manera ascendente hacia las capas asfálticas las grietas generadas, sin que este comportamiento se considere una deficiencia estructural una vez analizada la respuesta mediante cuencas de deflexiones con equipo deflectómetro de impactos FWD.

Realizando la revisión del diseño estructural del pavimento para las condiciones de tránsito futuras se tiene que se requiere sanear la estructura actual hasta una profundidad de 23 cm mediante corte con perfiladora recuperando esos materiales como RAP, el cual se integrará con los materiales de la CA, BA y una parte de la BEC, cuya mezcla con asfalto espumado constituirán una base estabilizada con asfalto espumado (BAE) de 18 cm de espesor y superficialmente por una carpeta asfáltica (CA) de 5 cm de espesor, con lo cual la rehabilitación del pavimento mantiene su rasante actual.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

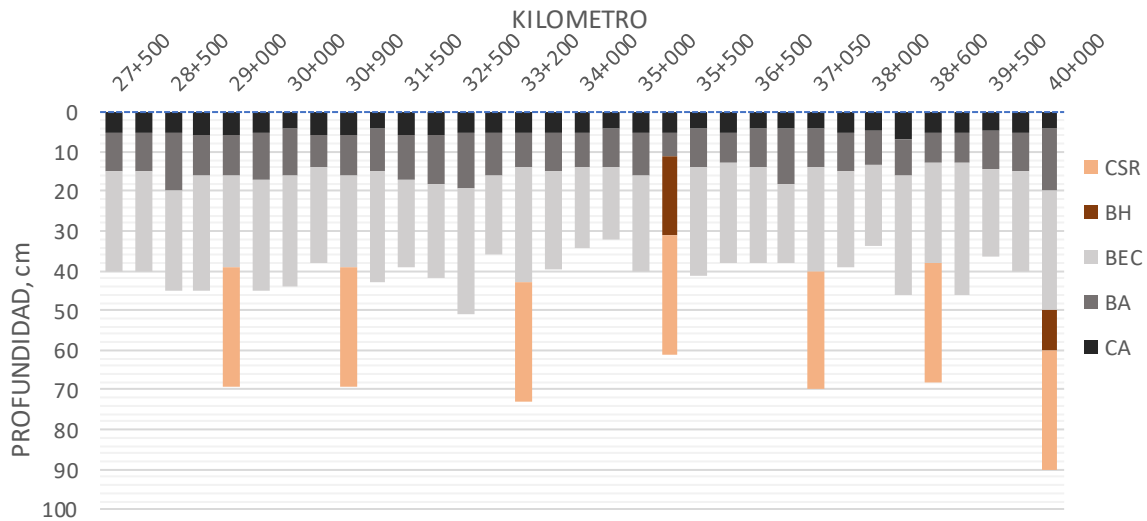


Figura 1. Perfil estratigráfico del proyecto analizado

3. Caracterización de los materiales del sitio y de aporte.

3.1 Propiedades del asfalto espumado: temperatura y cantidad óptima de agua para espumar (vida media y relación de expansión).

El objetivo de obtener las propiedades del asfalto es determinar a qué temperatura se realizará el procedimiento de espumado del asfalto y el porcentaje de adición de agua que permita las mejores propiedades de espumado (máxima relación de expansión y vida media) para una fuente particular de asfalto. Estas propiedades son medidas a diferentes temperaturas.

La relación de expansión es una medida de la viscosidad del asfalto espumado, calculado como la relación del máximo volumen de la espuma en relación con el volumen original del asfalto. La vida media es la medida de la estabilidad del asfalto espumado, calculado como el tiempo en segundos que el volumen de espuma decae a la mitad del volumen máximo; en la Tabla 1, se muestran las propiedades del cemento asfáltico PG 64-22 utilizado en el proceso para la fabricación de especímenes de este proyecto en el cual se define con 2% de porcentaje óptimo y 170 °C de temperatura del asfalto. En la Figura 2 se ilustra el comportamiento de las propiedades del asfalto al ser sometido a espumado a dos temperaturas de trabajo.

Tabla 1. Propiedades del asfalto utilizado PG 64-22

PROPIEDAD	OBTENIDO		REQUISITO
Temperatura, °C	160	170	-
Óptimo de agua, %	2.0	2.0	-
Vida media, s	6.0	7.0	6.0 mínimo
Relación de expansión, veces	14.0	14.0	8.0 mínimo



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

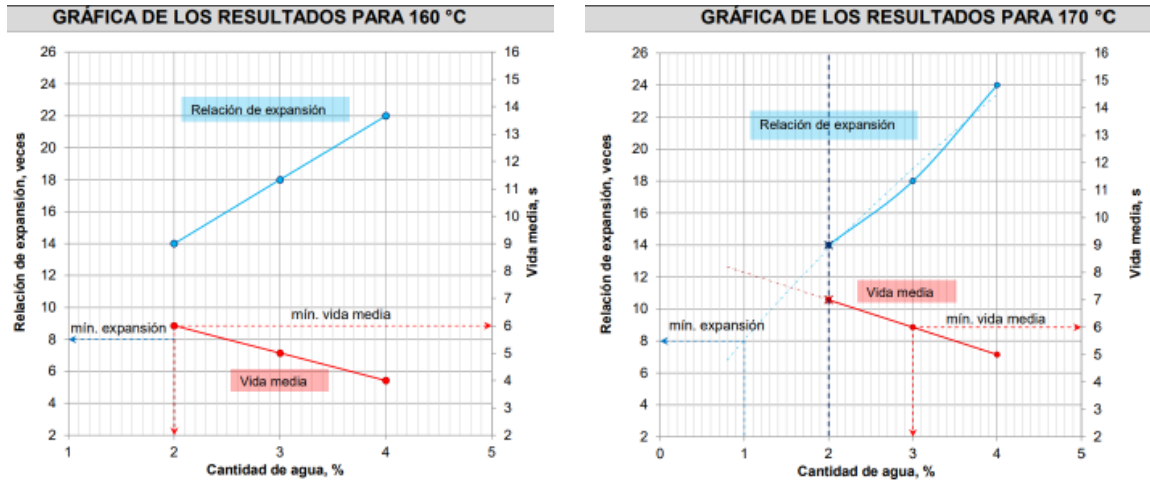


Figura 2. Comportamiento del asfalto PG 64-22 con temperaturas de espumado a 160 y 170°C

3.2 Granulometría

Con los materiales extraídos de la exploración mediante calas y PCA del tramo, se obtuvo material tipo RAP para su utilización en los ensayos para formación de una mezcla de (BAE), determinándose como primera actividad de ensayos de laboratorio la granulometría, para definir si se requiere complementar su composición de acuerdo a lo que establece la normativa para este tipo de capas granulares; de acuerdo con análisis la composición de la granulometría no se ajusta a los requerimientos de la diversidad de tamaños óptima que se necesita cumplir, por lo que es necesario recurrir a la utilización de material de aporte proveniente de bancos de materiales de la zona, con los cuales se logre complementar la variedad de tamaños que se necesitan para cumplir con la curva granulométrica.

Atendiendo la revisión del diseño estructural del pavimento, se requiere formar una BAE con un espesor de 18 cm, condición que implica que la contribución de agregados de la BEC en el proceso de recuperación es del orden del 15%. En la Figura 3a se muestran las diferentes curvas granulométricas obtenidas de los materiales extraídos (CA, BA, BEC) en conjunto con el agregado nuevo de aporte y en la Figura 3b la granulometría definida como óptima con la mezcla de diferentes proporciones de los materiales existentes y una proporción con agregados nuevos provenientes de los bancos de materiales de la zona que complementen la integración de una curva ideal. En este sentido la proporción de agregados en la mezcla teórica que cumple con la curva granulométrica resultó de 60% proveniente del material recuperado de las capas asfálticas existentes, 15% material de recuperación de la base estabilizada con cemento existente, 22% arena de banco (material de aporte) y 3% filler inerte necesario para cumplir con el contenido de finos de acuerdo con la curva granulométrica, indispensable para lograr la dispersión del asfalto en la mezcla; en este caso se utilizará carbonato de calcio (CaCO_3).

3.3 Masa Volumétrica Seca Máxima (MVSM) y Contenido de agua óptimo (w_o).

A partir de los materiales disponibles se propuso la mezcla de prueba mencionada en el inciso anterior consistente en 60% de RAP, 15% de BEC, 22% de arena y 3% Filler (carbonato de calcio) con lo



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

cual se llevará a cabo la investigación determinando en cada caso los resultados del comportamiento obtenido.

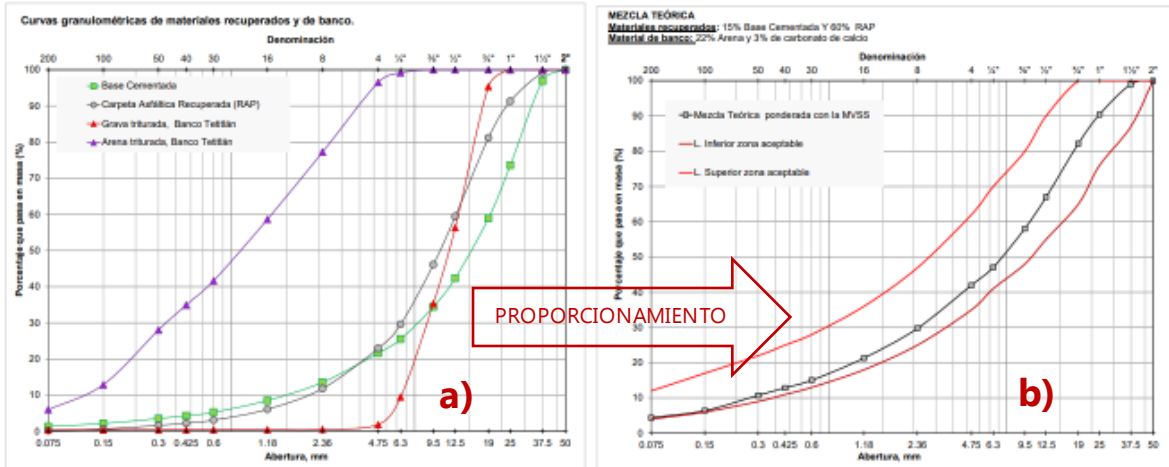


Figura 3. Granulometrías de las diferentes capas del pavimento y su proporcionamiento ideal

En la Figura 4, se muestra el resultado de la combinación granulométrica de materiales de RAP y material de aporte de banco, con los que también se generaron los ensayos de determinación de la masa volumétrica seca máxima con su contenido de agua óptimo, fórmula de trabajo que se utilizó en la caracterización para los posteriores ensayos.

Los resultados obtenidos fueron: $MVSM = 1972 \text{ kg/m}^3$ y $w_o = 6.4\%$.

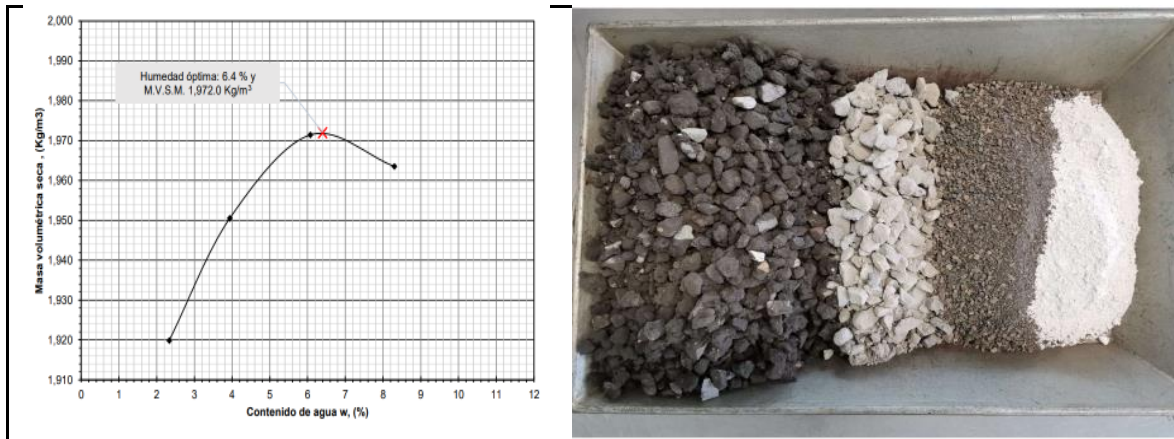


Figura 4. Masa volumétrica óptima a partir de granulometría ideal con RAP, aporte nuevo y filler

3.4 Valor Soporte de California (CBR) y Expansión (Exp)

Con las muestras de $MVSM$ y w_o , se realizaron ensayos de CBR y Exp con el objeto de comprobar que la resistencia y variación por expansión de la mezcla cumplan con las propiedades mecánicas previstas para este tipo de capas; de acuerdo con los resultados obtenidos el valor de $CBR = 111\%$



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

supera el parámetro especificado con una expansión mínima de $Exp = 0.009\%$. En las imágenes de la Figura 5 se ilustra el proceso y los resultados obtenidos.

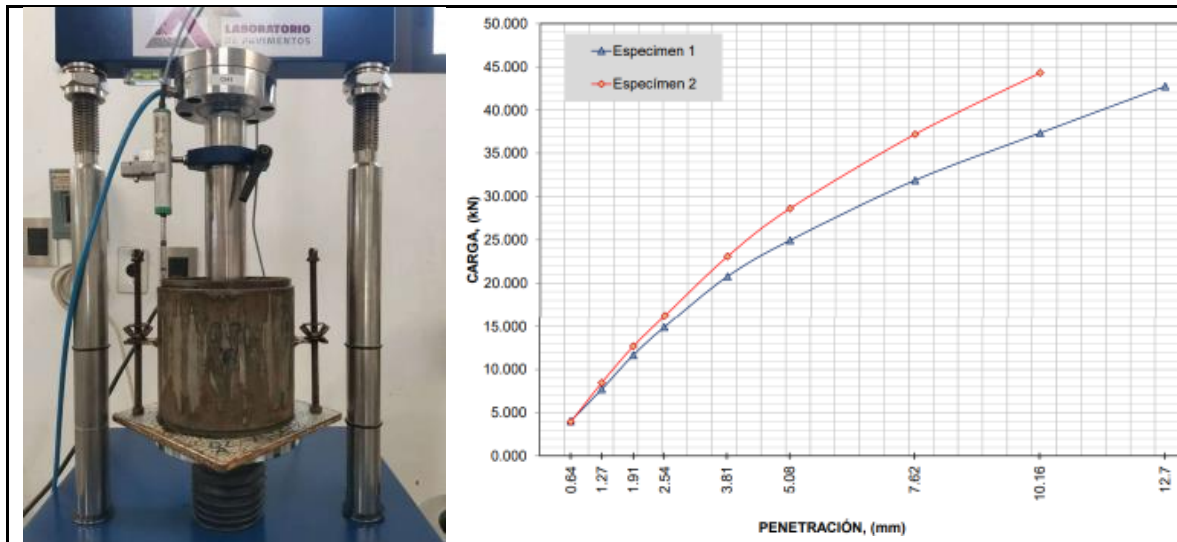


Figura 5. Ensayes de CBR y Exp para la mezcla ideal de BAE del proyecto

3.5 Resistencia a la tensión indirecta (ITS).

El ensayo de resistencia a la tensión indirecta, consiste en someter los especímenes cilíndricos de 15 cm de diámetro y altura promedio de 9.5 cm aproximadamente en condición seca y saturada a compresión aplicando una carga sobre el perímetro hasta llegar a la rotura, evaluando la susceptibilidad a la humedad y la resistencia a la tensión indirecta comparando los resultados para que en esta etapa se determine el tipo de filler activo a elegir, así como el contenido óptimo de asfalto.

La fabricación de los especímenes se realizó con las proporciones de diseño mencionadas anteriormente: 60% de RAP (CA y BA), 15% de BEC y 22% de arena (de banco), y 3.0% de carbonato de calcio como filler inerte. Se realizaron en total 18 especímenes, seis especímenes para cada contenido de asfalto, de estos seis especímenes: tres se ensayaron para condición seca (ITS Seco) y los otros tres para la condición saturada (ITS Saturado). Los contenidos de asfalto espumado evaluados fueron: 1.7, 2.0 y 2.3%. Considerando los resultados obtenidos, se obtuvo el contenido óptimo de asfalto espumado del 2.0%, cumpliendo con los requerimientos mínimos conforme al manual TG2 2020; con un resultado de ITS promedio de 228 kPa para la condición seca y 207 kPa para la condición saturada, así como un TSR del 91%, tal como se observa en las ilustraciones de la Figura 6.

3.6 Ensayes triaxiales.

Después de encontrar el valor óptimo de asfalto espumado para la mezcla de diseño, se fabricaron cinco cilindros de 15.2 cm de diámetro y 30 cm de altura aproximadamente, de los cuales cuatro fueron sometidos al ensayo triaxial con diferentes condiciones de confinamiento: 0, 50, 100 y 200 kPa (especímenes ensayados en condición de humedad de equilibrio), y el quinto espécimen se ensayó en condición saturada con un esfuerzo de confinamiento de 100 kPa.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

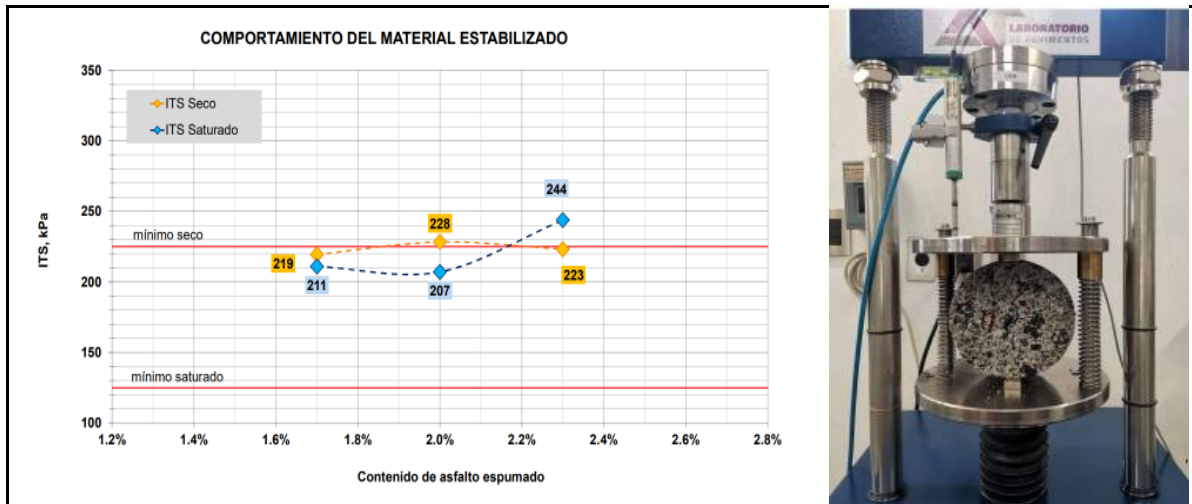


Figura 6. Comportamiento de las muestras estabilizadas en ensayos ITS seco y saturado

Finalmente, se trazaron los círculos de Mohr-Coulomb y envolventes de falla con el objetivo de conocer el valor de cohesión y el ángulo de fricción (propiedad obtenida de los especímenes en condición de humedad de equilibrio), y la cohesión retenida (obtenida del espécimen en condición saturada). Los resultados de la prueba fueron los siguientes: el ángulo de fricción interna de 42° , la cohesión de 253 kPa, y la cohesión retenida del 78%; cumpliendo con los valores mínimos requeridos según las especificaciones TG2 2020 (ángulo de fricción interna: 40° mínimo, cohesión: 250 kPa mínima y cohesión retenida: 75% mínima); resultados que cumplen y se ajustan a los rangos de valores para este tipo de materiales, los cuales se presentan en las imágenes de la Figura 7.

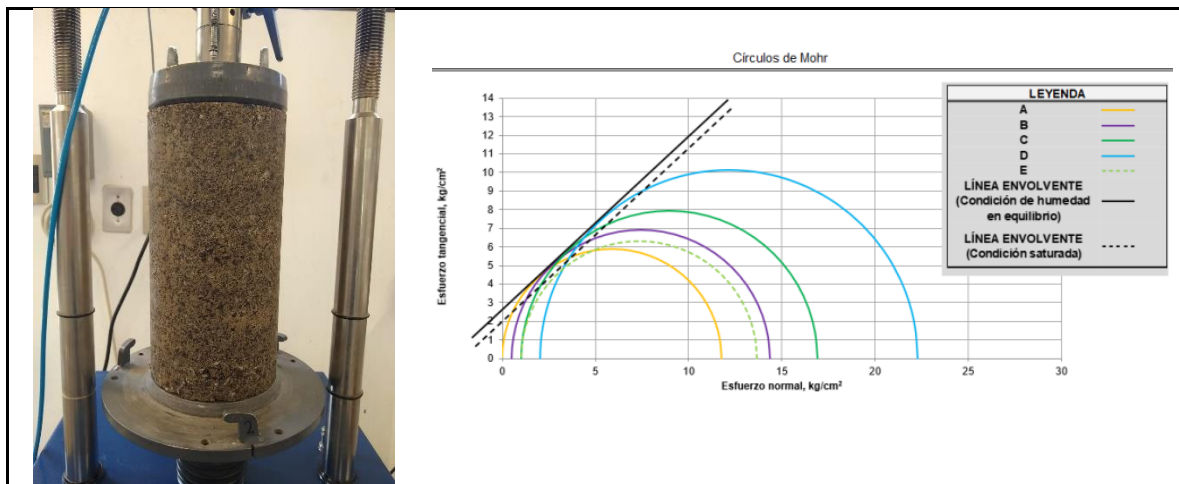


Figura 7. Resultados de desempeño de las muestras en ensayos triaxiales.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

3.7 Módulo de resiliencia (MR).

En una superficie sujeta a un gran número de aplicaciones de carga, los materiales que conforman la sección estructural de un pavimento tienden a fracturarse o bien a acumular deformación, dependiendo de su rigidez inicial y ésta es la causa de los principales deterioros que se observan en la superficie de los pavimentos. De hecho, los agrietamientos y deformaciones aparecen para niveles de esfuerzo inferiores a la resistencia de los materiales usualmente empleados en la construcción de pavimentos, bajo el efecto de esfuerzos cíclicos de compresión σ_c y de tensión σ_t que inducen deformaciones en el pavimento. La curva esfuerzo-deformación obtenida en un espécimen de material, sea concreto asfáltico o hidráulico, material granular o suelo cohesivo, sometido a aplicaciones de carga repetida es cualitativamente la definición del módulo de resiliencia.

De hecho, después de la aplicación de un gran número de ciclos, para los niveles de esfuerzo usuales en pavimentos, se alcanza un estado perfectamente resiliente en que toda deformación adicional es recuperable. Así entonces, es usual el realizar análisis de esfuerzos en pavimentos utilizando la Teoría de Burmister y suponer que las capas son elásticas utilizando como módulo de Young los valores de Módulo de Resiliencia obtenidos a partir de ensayos triaxiales cíclicos. En el caso de las muestras analizadas del estudio, se obtuvo como resultado un módulo de resiliencia (MR) recomendado para diseño estructural de pavimento de 1295 MPa. En la Figura 8 se muestran los resultados de los ensayos triaxiales bajo diversos niveles de esfuerzo de confinamiento.

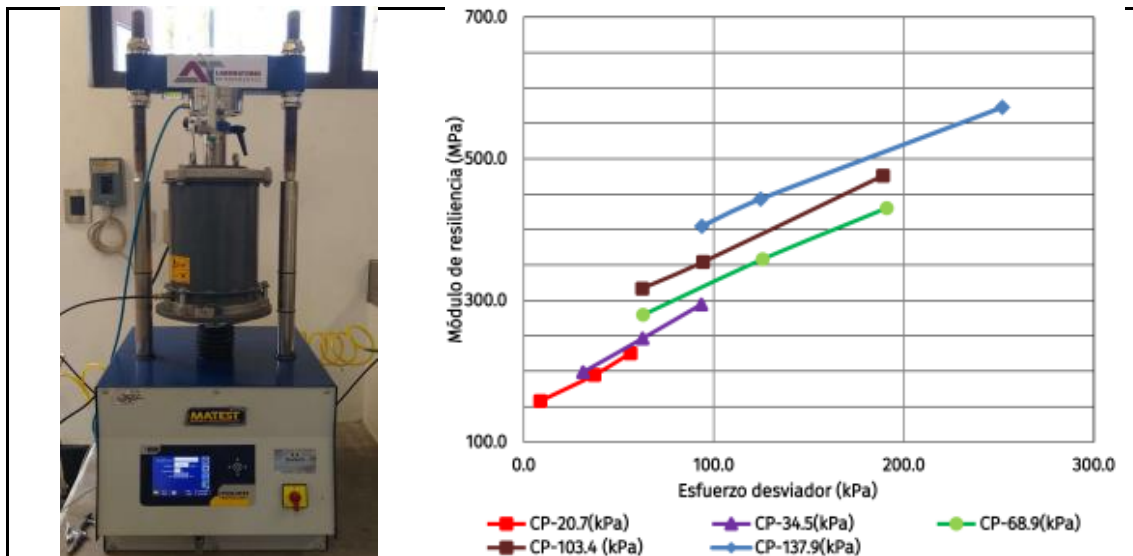


Figura 8. Resultados de desempeño mediante módulo de resiliencia (MR)

4. Deformación permanente por rodera con Rueda Cargada de Hamburgo (RCH) en muestras BAE.

Esta prueba permite medir la deformación permanente por rodera de muestras de mezcla asfáltica compactadas elaboradas en laboratorio o de aquellas que se tomen de una capa tendida y compactada, provocada por el movimiento cíclico concentrado de una rueda metálica cargada. Su aplicación principal es identificar aquellas mezclas susceptibles al desgranamiento causado por la falta de



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

adherencia entre el cemento asfáltico y el material pétreo, así como simular el daño por rodera provocado por el paso continuo de vehículos cargados.

La actual investigación consideró asimilar la metodología de los ensayos de Rueda Cargada de Hamburgo (RCH), a las muestras de mezclas de base con asfalto espumado, en el entendido que el resultado de éstas son muestras aglutinadas de agregados y asfalto disperso en pequeños puntos de contacto que generan un comportamiento mecánico, el cual se pretende conocer su desempeño al ser sometido en el ensaye RCH. El tema de la susceptibilidad al desgranamiento por humedad es relevante, en virtud de que al tratarse de una mezcla que subyace a la carpeta asfáltica o capa de rodadura, está más expuesta a los efectos de la humedad capilar o saturación en su caso, por presencia de nivel freático por lo cual cobra relevancia, pues no se trata de una base hidráulica y tampoco es una mezcla asfáltica como tal.

Las muestras cilíndricas elaboradas de BAE para la ejecución de ensayos en el equipo RCH, siguieron el mismo protocolo de preparación, elaboración y ejecución de los ensayos que se establecen en la metodología correspondiente. El resultado de las muestras de BAE corresponden con un comportamiento de deformación y fluencia del material, condición que se comprueba en la mezcla ensayada de base espumada en frío que resultó ser igualmente susceptible al desprendimiento y deformación permanente como se observa en las imágenes de la Figura 9. De acuerdo con los resultados, se tiene que una vez sometidas las muestras al ensaye, resistió 574 ciclos y se obtuvo una deformación permanente de 8.73 mm en la muestra de la rueda metálica 1 y de 9.03 mm en la muestra de la rueda metálica 2; como era de esperarse, no se alcanza un desempeño tan alto como en el caso de mezclas asfálticas en caliente, sin embargo, el resultado aproximado en ciclos de carga (574) es el equivalente a un 5.7%, respecto a los diez mil ciclos de un ensaye normal de mezclas de alto desempeño.



Figura 9. Ensaye RCH y su resultado en muestras de mezcla BAE

5. Normativa y protocolos de ensaye en mezclas BAE

Actualmente en México, se sigue trabajando para la implementación de protocolos de muestreo, ejecución y control para las mezclas BAE, de manera que apoyados en la normativa oficial se puedan tener elementos para un mayor control y desarrollo de mejores prácticas en su implementación como alternativa en proyectos de conservación y rehabilitación de pavimentos, toda vez que se trata de una



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

solución que permite aprovechar los recursos de pavimentos existentes, haciéndola una alternativa sostenible y económica.

Como referencia, en la Tabla 2 se indican los títulos de las normas para la infraestructura del transporte que recientemente en el año 2023 fueron aprobadas, con el fin contar con elementos técnicos y legales para la implementación de la tecnología BAE.

Tabla 2. Títulos de normativa mexicana para regulación de mezclas BAE

N-CSV-CAR-4-02-08/23	Construcción de bases con mezcla de material pétreo recuperado y cemento asfáltico espumado
N-CMT-4-04-001/23	Materiales pétreos recuperados para mezclas con cemento asfáltico espumado
N-CMT-4-05-008/23	Mezclas con material pétreo recuperado y cemento asfáltico espumado para bases

6. Campo de aplicación.

Con base en los diferentes ensayos para evaluar las características mecánicas de las mezclas con agregados pétreos reciclados para pavimentos mencionados en los incisos anteriores, se está en condiciones sólidas de justificar los parámetros de las variables de diseño para la revisión de diseños de pavimento que definen condiciones de resistencia o estabilidad de la capa analizada BAE.

En el caso del ensayo de módulo resiliente (MR) en las BAE, nos determina un dato importante para ser empleado en la definición del coeficiente estructural empleando el método de diseño de pavimentos de la AASHTO, que también es compatible en el caso del método de diseño del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Al ser una técnica relativamente nueva en México de estabilización de materiales reciclados se abre un amplio campo para investigación y aplicación en procesos constructivos sostenibles en caminos que requieren ser rehabilitados con relativamente menor presupuesto.

7. Conclusiones

- El estudio contempla un caso para la rehabilitación del pavimento en una carretera de primer orden, en la que es factible implementar la tecnología de estabilización con asfalto espumado en bases con agregados reciclados RAP y cemento asfáltico espumado para formar las BAE.

- Se aplicaron los ensayos y métodos de prueba que se establecen en la normativa nacional e internacional para este tipo de mezclas BAE, confirmando resultados que cumplen con la calidad y desempeño para este tipo de mezclas.

- Se confirma que aun con los bajos contenidos de cemento asfáltico de las mezclas BAE, presentan resistencias adecuadas, evaluadas a partir de ensayos de módulo resiliente, ITS y triaxiales.

- Como resultado de la investigación, se confirma que se puede establecer como método de prueba: la deformación permanente por rodadura con Rueda Cargada de Hamburgo (RCH)” en muestras BAE, con el objeto de evaluar su desempeño ante la solicitud de cargas cíclicas.



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

- Los ensayos de RCH realizados en muestras cilíndricas de mezclas BAE, presentan en proporción, un comportamiento similar al de una mezcla de alto desempeño, lo que confirma que el asfalto disperso en pequeños puntos de contacto que genera el proceso de espumado, también genera un buen comportamiento mecánico en una capa que utiliza como matriz una parte de agregados recuperados de RAP.

- Los parámetros obtenidos confirman resistencias y características mecánicas de la BAE para ser utilizadas en los métodos de diseño de pavimentos.

- El buen desempeño evaluado en la BAE, la califica como una técnica económica y sostenible que puede ser aplicada para rehabilitación de pavimentos, para la generación de un nuevo ciclo de vida competitivo con respecto a otras alternativas propuestas.

8. Referencias

- [1] Delgado, H., García, F., Campos, D., (2018). *Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado*. Publicación Técnica no.519. Sanfandila, Qro, Mex: Instituto Mexicano del Transporte.
- [2] Garnica, P., Perez, N, Gómez, J., (2018). *El concepto de módulo de resiliencia en el diseño de pavimentos. El caso de los suelos y materiales granulares*. Notas no.61 nov-dic 2001. Sanfandila, Qro, Mex: Instituto Mexicano del Transporte.
- [3] Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials TG2 (2020). *A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foadmed Bitumen Stabilised Materials*, Third Edition. Southern African Bitumen Association (SABITA).