

COMPARACIÓN DEL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE POR EL MÉTODO MARSHALL Y POR EL MÉTODO DE DISEÑO BALANCEADO POR DESEMPEÑO

Y. F. Lopez¹, L. E. Sanabria², R. Carreño³, Corporación para la Investigación y Desarrollo en Asfaltos en el Sector Transporte e Industrial – CORASFALTOS, Bucaramanga

Recibido, Junio 12, 2012 – Aceptado Septiembre 3 de 2012
<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v6n2.a05>

Resumen—Un confiable diseño de pavimentos es crítico para el buen desempeño de la infraestructura vial y determinante en la reducción de costos de mantenimiento. Como un medio para optimizar el desempeño de las carreteras colombianas con un mínimo costo de mantenimiento, nuevos e innovadores métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente (HMA), capaces de producir mezclas superiores, con características de desempeño mayores, deben ser explorados. Es así como se realiza la evaluación del método de Diseño Balanceado por Desempeño como una alternativa innovadora y conocida en el mundo aunque desconocida en nuestro país; además se desarrolla una comparación de los resultados obtenidos con la metodología Marshall, tradicionalmente usada en Colombia.

Palabras clave— contenido óptimo de asfalto, Diseño Balanceado por Desempeño, grado de desempeño, Marshall, mezclas asfálticas.

Abstract— A reliable pavement design is critical for good performance of road infrastructure and decisive in reducing maintenance costs. As a means to optimize the performance of the Colombian roads with minimum maintenance cost, new and innovative methods for hot mix asphalt (HMA) design, capable of producing better HMA with greater performance characteristics, should be explored. Therefore, this research evaluates the Balanced Mix Design as an innovative alternative, known worldwide but unknown in our country; also develops a comparison of the results obtained with the Marshall methodology, traditionally used in Colombia.

Key Words—asphalt mix design, Balanced Mix Design, Marshall, optimum asphalt content, performance.

I. INTRODUCCIÓN

Las carreteras son un factor importante para el crecimiento económico de la nación, pero requieren una inversión sustancial de recursos para su construcción y mantenimiento. Por tal razón, un confiable diseño de pavimentos es crítico para el buen desempeño de la infraestructura vial y es determinante en la reducción de costos de mantenimiento. Una rápida evaluación de la infraestructura vial de Colombia muestra que en la actualidad el país cuenta con 163 000 km de carreteras, de los cuales sólo el 11% se encuentran pavimentados. Además, un dato importante es que sólo el 54,7% de las carreteras pavimentadas en Colombia a cargo de la nación (12 361 km) se encuentran en buen estado, el 29,5% en estado regular y el 15,8% en mal estado, reportándose fisuras y grietas de diferente naturaleza como las fallas más comunes [1].

Como un medio para optimizar el desempeño de las carreteras colombianas con un mínimo costo de mantenimiento, nuevos e innovadores métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente (HMA), deben ser explorados. Incuestionablemente, el incremento del tráfico y los impredecibles cambios climáticos extremos que ha sufrido el país en los últimos años, hacen inevitable la implementación de cambios en la forma en la que se diseñan los pavimentos hoy en día, más aún si se quiere lograr la construcción de pavimentos sostenibles. Adicionalmente, el incremento del uso de materiales reciclados, económicos y competitivos como soporte a la Revolución Verde, lleva a pensar que los métodos existentes para el diseño de mezclas asfálticas en caliente deben ser modificados para adecuarlos a estos materiales, ó que nuevos métodos de diseño deben ser desarrollados. Esto, junto con los recientes desafíos del sostenimiento económico, son las fuerzas impulsoras en la búsqueda de nuevos

¹Yuly Fernanda López Contreras, candidata a Doctora en Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Investigadora, CORASFALTOS, Bucaramanga, Colombia, (e-mail: yulyf.lopez@gmail.com).

²Luis Enrique Sanabria Grajales, Master en Gestión Tecnológica, Universidad Pontificia Bolivariana. Ingeniero Químico, Universidad Industrial de Santander. Director Ejecutivo, CORASFALTOS, Bucaramanga, Colombia, (e-mail: info@corasfaltos.com).

³Ricardo José Carreño Zagarra, Ingeniero Químico, Universidad Industrial de Santander, Jefe de Laboratorio, CORASFALTOS, Bucaramanga, Colombia, (e-mail: laboratorio@corasfaltos.com).

métodos de diseño para mezclas asfálticas que satisfagan las necesidades del siglo 21.

Inicialmente, el objetivo de este tipo de innovaciones es el de desarrollar una nueva generación de procedimientos para el diseño de mezclas HMA, que sean capaces de producir mezclas superiores, con características de desempeño como: mayor resistencia al ahuellamiento, mayor resistencia al craqueo, no susceptibles a daños causados por la humedad, durables, con tiempos de vida mayores, más trabajables y fáciles de compactar. En una palabra, una nueva generación de métodos de diseño de mezclas debe estar basada en el *desempeño*, así como poseer un potencial que permita balancear todos los requerimientos anteriormente mencionados, el régimen actual de tráfico, y las prevalecientes condiciones climáticas.

Por lo tanto, y teniendo en cuenta la importancia que tiene el desarrollo de un buen diseño de mezclas asfálticas en caliente sobre el desempeño del pavimento durante su tiempo de servicio, el presente artículo de investigación tiene como objetivo principal, evaluar el diseño de mezclas asfálticas por dos metodologías disponibles a nivel mundial: metodología Marshall (usada en Colombia) y el Método de Diseño Balanceado por Desempeño, desarrollado por el Departamento de Transporte del Estado de Texas, así como explorar las posibilidades de su aplicación a las mezclas asfálticas Colombianas. Estas mezclas asfálticas en caliente, fueron diseñadas teniendo en cuenta las condiciones climáticas y de tráfico del país. El análisis de datos está enfocado en encontrar un mejor uso de los principales materiales empleados para la fabricación de pavimentos flexibles. Se espera que con los mismos materiales sea posible obtener un mejor diseño que prediga con mayor certeza el comportamiento de la mezcla asfáltica durante su tiempo de servicio.

II. DISEÑO BALANCEADO POR DESEMPEÑO

El método de Diseño Balanceado por Desempeño, con frecuencia referido como método Hamburg-Overlay ó H-O, como su nombre lo indica se basa en el desempeño de la mezcla, siendo su concepto fundamentalmente centrado en el diseño de mezclas HMA que sean: resistentes al ahuellamiento, resistentes al craqueo, y no susceptibles a los daños causados por la humedad (p.ej., desprendimiento de la capa asfáltica, baches) [2]. Su filosofía está basada en el diseño y

selección de un contenido óptimo de asfalto (COA) que cumpla simultáneamente determinados requerimientos de ahuellamiento y craqueo prescritos por los ensayos de Hamburgo (HWTT) y Overlay (OT), respectivamente. Mediante esta metodología de diseño, mínimo tres niveles de contenido de asfalto (CA) deben ser probados a una densidad previamente determinada en laboratorio. La Fig.1 muestra una ilustración gráfica de la metodología de diseño.

Para esta metodología de diseño, el criterio limitante superior en la obtención del óptimo contenido de asfalto corresponde al ahuellamiento, evaluado mediante el ensayo de Hamburgo (HWTT) que permite simular el efecto del tráfico mediante el paso de una rueda sobre la muestra compactada y moldeada de acuerdo a la Fig. 2, en un total de hasta 20 000 pasadas, según el tipo de ligante seleccionado. Además, evalúa la sensibilidad de la mezcla a la humedad, ya que las muestras son sumergidas en agua durante el desarrollo de la prueba a una temperatura ajustable hasta 76°C, dependiendo de la temperatura que pueda alcanzar el pavimento en servicio. El valor estándar para este criterio es de 12,5 mm de ahuellamiento después de 20 000 pasos de la rueda para mezclas elaboradas con asfaltos de Grado de Desempeño (PG) igual o mayor a 76, 15 000 pasadas para mezclas con asfaltos de PG 70, y 10 000 pasadas para mezclas con asfaltos de PG 64 o menor [3-5]. Mezclas HMA con contenidos de asfalto que cumplan este criterio son evaluadas como aceptables y con un desempeño suficiente de resistencia al ahuellamiento en laboratorio. Sin embargo, en la Fig. 3 se muestran tres niveles de decisión sugeridos.

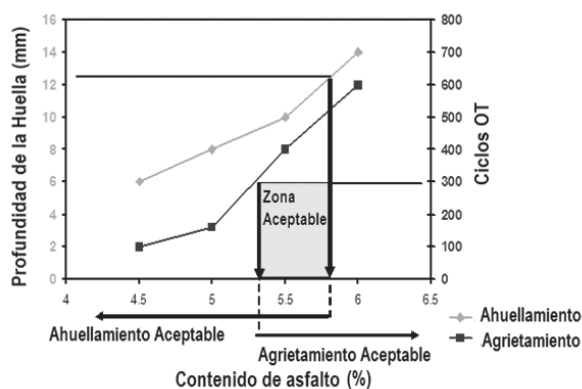


Fig. 1. Ilustración gráfica del concepto del método de Diseño Balanceado por Desempeño

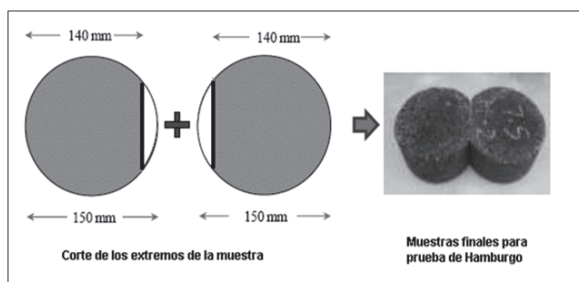


Fig. 2. Moldeo y fabricación de muestras para ensayo de Hamburgo.

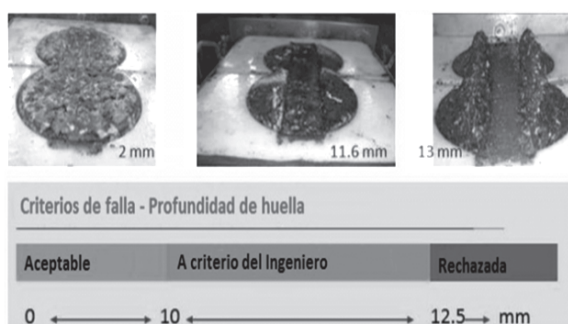


Fig. 3. Criterios de falla o aceptación para el ensayo de Hamburgo a 50°C.

Así mismo, el límite inferior para el contenido óptimo de asfalto aceptable está definido para esta metodología por la resistencia al craqueo, evaluada mediante el ensayo de Overlay (OT). Este ensayo es desarrollado para analizar la falla por craqueo reflexivo de las mezclas, el cual consiste en una prueba de desempeño simple para la caracterización de la resistencia potencial de la muestra al fisuramiento en laboratorio. La metodología para el ensayo OT consiste en aplicar a la muestra un desplazamiento controlado cíclico triangular en forma de onda, a un desplazamiento horizontal máximo de 0,63 mm y con una velocidad de carga de 10 segundos por ciclo como lo muestra la Fig.4. Las muestras deben ser compactadas y moldeadas de acuerdo a la Fig. 5. Mezclas asfálticas en caliente y/o con contenidos de asfaltos que resistan más de un determinado número de ciclos (300 ó 700 de acuerdo al tipo de mezcla) antes de sufrir falla por craqueo, son tentativamente aceptadas con un desempeño razonable en la resistencia al craqueo reflexivo en laboratorios como se ve en la Fig. 6 [3,5,6]. La metodología detallada de los ensayos de Hamburgo y Overlay Tester integrados al Diseño Balanceado por Desempeño puede ser consultada en [2] y [5].

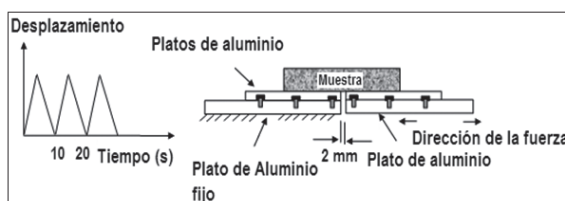


Fig. 4. Configuración para ensayo OT

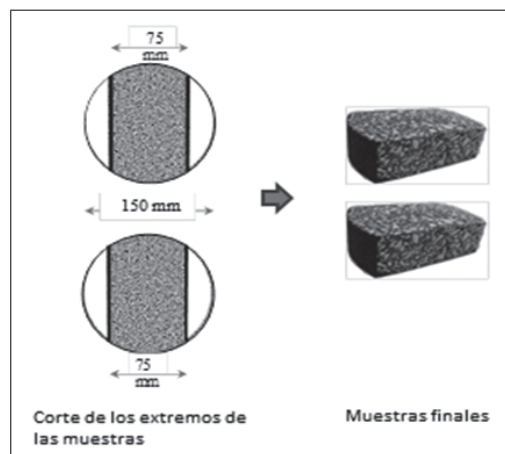


Fig. 5. Moldeo y fabricación de muestras para ensayo OT.

Criterios de selección OT				
Categoría	Muy Pobre	Marginal	Bueno	Excelente
Ciclos OT	1	50	200	700
Decisión	Rechazada	A criterio del Ingeniero	Aceptada	

Fig. 6. Criterios de falla o aceptación para el ensayo OT

De acuerdo a los límites establecidos y como se observa en la Fig. 1, una vez han sido desarrollados los ensayos HWTT y OT, con los resultados obtenidos se determina una zona aceptable dentro de la cual se encuentra el contenido óptimo de asfalto. De esta manera, un Diseño Balanceado por Desempeño incluye un contenido de asfalto dentro de la zona aceptable en la cual la HMA cumpla simultáneamente los requerimientos de desempeño de acuerdo a las pruebas HWTT y OT. Cualquier contenido de asfalto seleccionado como diseño dentro de esta zona es considerado representativo de resistencia al craqueo y ahuellamiento de la mezcla en laboratorio. Para tener en cuenta la variabilidad en la construcción de la mezcla, y en algunos casos la absorción del agregado pétreo, se recomienda seleccionar el contenido óptimo de asfalto sobre el límite superior, preferiblemente a una distancia en la zona aceptable de $\frac{3}{4}$ entre los límites inferior y superior.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de investigación aplicada incluye la selección de la gradación y caracterización de materiales (cemento asfáltico y agregado) empleados en la fabricación de cuatro mezclas asfálticas en caliente. Seguidamente, un número de especímenes fueron fabricados para determinar un óptimo contenido de asfalto mediante la metodología de Diseño Balanceado por Desempeño y el método tradicional Marshall. La aplicación de la metodología Marshall permitió desarrollar un análisis comparativo entre los valores de contenido óptimo de asfalto obtenidos por los dos procesos de diseño, teniendo en cuenta que el diseño Marshall es la metodología actualmente usada para el diseño de mezclas asfálticas en Colombia.

A. Selección de la Gradación

Los agregados usados para la fabricación de las 4 mezclas asfálticas fueron obtenidos de diferentes canteras a nivel nacional. La gradación seleccionada para todas las mezclas corresponde al tipo de mezclas densas MDC-2 (mezcla densa en caliente tipo 2) de acuerdo a las especificaciones colombianas del Instituto Nacional de Vías [7]. La selección de este tipo de gradación se basó en su amplio uso para la fabricación de carpetas de rodadura en carreteras de todo el territorio nacional. La distribución granulométrica se muestra en la Tabla 1.

TABLA. I
GRANULOMETRÍA MEZCLA DENSA EN CALIENTE TIPO 2 (MDC-2)

Tamiz N°	ESPECIFICACION MDC-2 / 07		Porcentaje pasante (%)			
	Mín.	Máx.	1	2	3	4
3/4"	100	100	100	100	100	100
1/2"	80	95	91	88	88	92
3/8"	70	88	78	77	79	81
#4	49	65	58	62	57	60
#10	29	45	38	41	35	39
#40	14	25	18	20	21	19
#80	8	17	11	11	17	12
#200	4	8	6,6	4,2	10,9	7,3

B. Caracterización de agregados y cementos asfálticos

En la Tabla 2 se resumen las características de los agregados empleados para la fabricación de las mezclas analizadas y ensayos desarrollados. De acuerdo a los resultados, los agregados usados cumplen con las especificaciones requeridas por el

Instituto Nacional de Vías, INVIAS, para la fabricación de mezclas asfálticas en caliente.

TABLA. II
CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS

ENSAYO	NORMA	AGREGADO	RESULTADO
Absorción del agregado grueso	INV – E – 223	1	1,10%
		2	0,93%
		3	0,53%
		4	0,80%
Gravedad específica aparente del agregado grueso	INV – E – 223	1	2,80
		2	2,942
		3	2,965
		4	2,836
Absorción del agregado fino	INV – E – 222	1	0,70%
		2	1,23%
		3	0,38%
		4	1,09%
Gravedad específica aparente del agregado fino	INV – E – 222	1	2,86
		2	2,867
		3	2,933
		4	2,797

Las cuatro muestras de ligante asfáltico empleadas en la fabricación de las mezclas, corresponden a asfalto proveniente de la refinera de Apiay. El ligante asfáltico número cuatro fue modificado con un mejorador de adherencia (Morelife). En la Tabla 3, se resumen los resultados de los ensayos desarrollados para la caracterización de cada una de las muestras.

TABLA. III
CARACTERÍSTICAS DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS

ENSAYO	NORMA	ASFALTO	RESULTADO
Penetración	INV E – 706 ASTM D – 5	1	67,3 (1/10mm)
		2	71,3 (1/10mm)
		3	62,0 (1/10mm)
		4	76 (1/10mm)
Ductilidad	INV E – 702 ASTM D – 113	1	>140
		2	>140
		3	>140
		4	>140
Viscosidad	INV E – 716 ASTM D – 2171	1	2279,546 poises
		2	1622,838 poises
		3	2012,75 poises
		4	1545,041 poises
Punto de ablandamiento	INV E – 712 ASTM D – 36	1	48,5 °C
		2	47,7 °C
		3	48,6 °C
		4	46,7 °C
PG	Tecnología SHRP	1	62 – 22
		2	62 – 22
		3	62 – 22
		4	58 – 22

C. Obtención del porcentaje óptimo de asfalto

Para un mismo número de agregado, estructura granulométrica y asfalto (asfalto 1 se mezcló con

agregado 1, de acuerdo a gradación 1 y así sucesivamente), se llevó a cabo el diseño de las mezclas asfálticas con cuatro porcentajes de asfalto diferentes (4,5%, 5,0%, 6,0%, y 6,5%), aplicando cada uno de los métodos propuestos, H-O y Marshall. El diseño por el método Marshall se desarrolló siguiendo la norma INV. E-748 [7]. Para el método de diseño Balanceado por Desempeño, H-O se utilizó la metodología expuesta en la sección anterior.

Para la evaluación de las mezclas por el método H-O, se fabricaron especímenes con los cuatro contenidos de asfalto diferentes para cada combinación de materiales, usando el compactador giratorio Superpave y de acuerdo a las especificaciones de cada ensayo. Veintiocho especímenes de cada mezcla fueron fabricados en CORASFALTOS y enviados al Instituto de Transporte de Texas para el desarrollo de los ensayos correspondientes (HWTT y OT). Dos pares de muestras para cada contenido de asfalto, fueron evaluadas mediante el HWTT, a una temperatura de 50 °C y a 60 °C, teniendo en cuenta la alta temperatura que puede alcanzar el pavimento en servicio, para un total de 16 muestras HWTT para cada combinación de materiales. Tres muestras por cada contenido de asfalto fueron sometidas al ensayo OT a una temperatura de 20 °C, para un total de 12 muestras OT para cada combinación de materiales.

En la Tabla 4, se muestran los resultados obtenidos para el contenido óptimo de asfalto para las cuatro combinaciones de materiales diseñadas de acuerdo a cada metodología.

TABLA. IV
RESULTADOS PARA EL CONTENIDO ÓPTIMO DE
ASFALTO

DISEÑO	NORMA	MEZCLA	COA
MARSHALL	INV – 799 – 07	1	4,9%
		2	4,9%
		3	4,5%
		4	4,9%
DISEÑO BALANCEADO POR DESEMPEÑO	Tex – 242 – F	1	No cumple los requerimientos
		2	5,7%
		3	No cumple los requerimientos
		4	5,3%

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados y el análisis correspondiente de los ensayos realizados a las diferentes mezclas de acuerdo al Diseño Balanceado por Desempeño, en términos de desempeño por resistencia al ahuellamiento y craqueo, seguido por el análisis del contenido óptimo de asfalto obtenido.

En general, se observa que los resultados para el contenido óptimo de asfalto por la metodología Marshall son menores que los obtenidos por el Diseño Balanceado por Desempeño. Incluso, este último rechaza dos de las cuatro combinaciones de materiales evaluadas, ya que de acuerdo a sus criterios de desempeño, los diseños evaluados no cumplen con los requerimientos mínimos para su aplicación en campo. Esto, confirma la necesidad de evaluar alternativas de diseño que garanticen el buen desempeño de los pavimentos en servicio, ya que de acuerdo a los resultados obtenidos para las mezclas 1 y 3 por el método Marshall, de usarse este contenido óptimo de asfalto, según método de Diseño Balanceado, tendrán un pobre desempeño por resistencia al ahuellamiento y el craqueo, aumentando los costos de mantenimiento y afectando significativamente la infraestructura vial. A continuación se presentan los hallazgos evidenciados durante el desarrollo del diseño por el método Balanceado por Desempeño.

Para la **mezcla número 1**, la curva descendente de la Fig. 7 muestra los resultados de HWTT. Teniendo en cuenta el PG 66-22 del asfalto, si se considera 10 000 pasadas como criterio de selección [3], solamente un 4,5% de contenido de asfalto (CA) puede ser considerado aceptable. Los demás diseños son categorizados como inadecuados, y deben ser rechazados. Sin embargo, la Fig. 8 muestra que los diseños correspondientes a bajos contenidos de asfalto, 4,5% y 5,0%, son altamente susceptibles al daño por humedad en términos de stripping o desprendimiento del ligante asfáltico de la superficie del agregado mineral, lo cual sugiere un alto potencial de presentarse baches, situación indeseable; también se presenta excesivo ahuellamiento a CA superiores (6,0% y 6,5%). Por lo tanto, todas las mezclas son clasificadas como insatisfactorias de acuerdo al desempeño por ahuellamiento, con la necesidad de ser rediseñadas y/o modificadas. Si el criterio de selección considerado es de 20 000 pasadas, con base en un análisis por extrapolación, el máximo nivel de diseño seleccionable de CA de la mezcla es de 3,4%.

Los resultados para el desempeño por craqueo representados en la curva ascendente de la Fig. 7, muestran que el CA mínimo para obtener resultados de laboratorio satisfactorios de acuerdo al ensayo OT, y teniendo en cuenta como criterio de selección 200 ciclos, corresponde a 6.1%. Si se toma 300 ciclos como criterio de selección, únicamente la muestra con un CA de 6.5%

cumpliría con los requerimientos de desempeño por craqueo. Los diseños HMA de 4.5% y 5.0% exhibieron un desempeño por resistencia al craqueo OT marginal, por lo tanto deben ser rediseñados ó modificados.

Por lo anterior, para esta combinación de materiales no existe una región o zona de balance de acuerdo al método de diseño balanceado por desempeño como se evidencia en la Fig. 7, ya que los diseños de mezcla HMA evaluados no cumplen con los requerimientos prescritos por el método de diseño en términos de desempeño por resistencia al ahuellamiento y craqueo. Por lo tanto, ninguna de las combinaciones evaluadas podría ser empleada en la fabricación de HMA para pavimentación de carreteras ya que presentaría un pobre desempeño, con altísima probabilidad de fallas por ahuellamiento, craqueo, y susceptibilidad a la humedad.

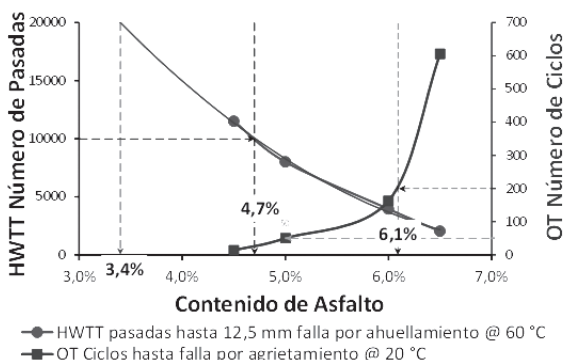


Fig. 7. Diseño Balanceado por desempeño para Mezcla 1

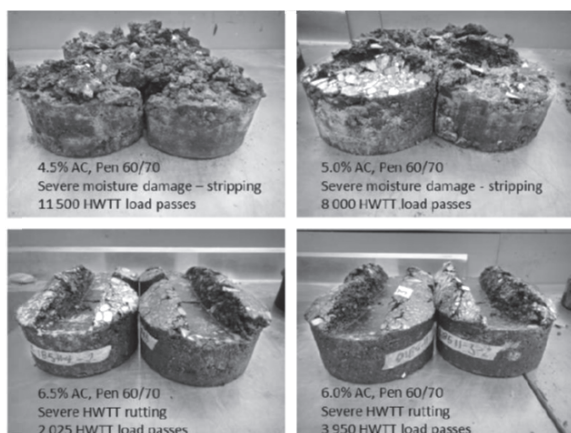


Fig. 8. Mezcla 1 después del ensayo HWT en baño de agua a 60°C.

Los resultados obtenidos para la **mezcla número dos** se presentan en la Fig. 9. Nuevamente, teniendo en cuenta los criterios de acuerdo a la metodología

H-O, si se tomara 10 000 pasadas como criterio de selección solamente sería aceptable el diseño con contenido de asfalto de 4,5%. Considerando la alta temperatura de la prueba (60°C) y tomando tentativamente 7 500 ó 5 000 pasos de la rueda como criterio de selección o falla, cualquier nivel de CA igual a 5.0% y menor que 6.0%, podría ser seleccionado como apropiado de acuerdo a los requerimientos de ahuellamiento en laboratorio. Para esta combinación de materiales, la mezcla HMA mostró leves signos de susceptibilidad a la humedad a niveles de CA menores que 5.0%. Por lo tanto, la combinación de materiales solamente puede ser considerada para su aplicación en áreas secas y moderadamente húmedas.

Los resultados del ensayo OT para la misma muestra, señalan que a bajos CA, 4.5% y 5.0%, el diseño de la mezcla HMA exhibe un desempeño por resistencia al agrietamiento marginal, menor de 50 ciclos OT. Estas muestras deben ser consideradas no satisfactorias y serían rechazadas y/o recomendado su rediseño ó modificación. Si se considera 200 ciclos como criterio de selección o falla, un CA de 6,1% podría ser considerado como satisfactorio y recomendado para su aplicación en campo. Dejando a discreción del ingeniero y considerando la temperatura a la cual fueron ejecutados los ensayos (20 °C), un mínimo contenido de asfalto de 5.3% puede ser viable si se considera la opción de tomar como criterio de selección 50 ciclos OT.

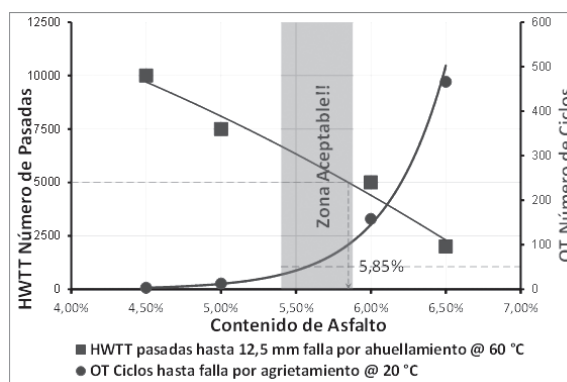


Fig. 9. Diseño Balanceado por desempeño para Mezcla 2

De acuerdo a los criterios de selección anteriormente establecidos, se concluyó que para la mezcla 2 un CA de 5,7% es suficiente para la fabricación de HMA con aplicación en zonas secas, moderadamente húmedas, y para carreteras con moderadamente altos volúmenes de tráfico.

Para la **mezcla número 3**, se encontró que de acuerdo al criterio de selección correspondiente al

grado PG del asfalto para el ensayo HWTT de 10 000 pasadas de la rueda, ninguno de los diseños ensayados cumple este requerimiento (Ver Fig. 10). Si se toma tentativamente el criterio de selección de 5000 pasadas, cualquier nivel de CA igual o menor que 5,0% podría ser suficiente para que el diseño de mezcla cumpliera con los requerimientos de ahuellamiento en laboratorio. Sin embargo, la mezcla HMA mostró leves signos de susceptibilidad a la humedad a niveles de AC menores que 5,0% como se muestra en la Fig. 11, por lo que esta combinación de materiales solo puede ser considerada para su aplicación en áreas secas a moderadamente húmedas.

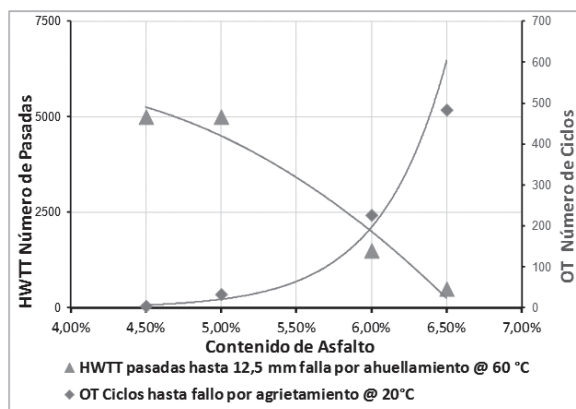


Fig. 10. Diseño Balanceado por desempeño para Mezcla 3

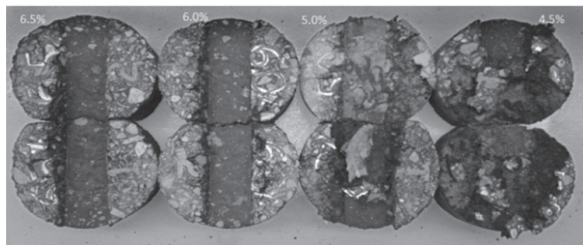


Fig. 11. Mezcla 3 después del ensayo HWTT en baño de agua a 60°C.

Con respecto al desempeño por resistencia al agrietamiento, la mezcla número 3 exhibió un desempeño marginal para valores de 4,5% y 5,0% de CA, menor a 50 ciclos OT. Tomando como criterio de selección 200 ciclos OT, un nivel mínimo de CA de 5,8% podría ser considerado como satisfactorio y recomendado para aplicación en campo. A discreción del ingeniero se deja la decisión de tomar como criterio de selección 50 ciclos OT, para lo cual sería viable un nivel de AC de 5,1%, aunque su aplicación se limitaría para volúmenes de tráfico moderadamente alto.

Como se evidencia en la Fig. 10, y de acuerdo a los resultados anteriormente expuestos, esta combinación de materiales no cumplió con los requerimientos del Diseño Balanceado por desempeño, por lo cual no se evidenció una zona aceptable dentro de la cual se contemple un contenido óptimo de asfalto. Se concluye entonces que la mezcla debe ser rechazada o rediseñada, teniendo en cuenta las propiedades de los materiales constituyentes, posibilidades de modificación del ligante asfáltico, modificación de la gradación de los agregados empleada y/o el cambio de la fuente de los agregados pétreos.

Finalmente, para la **mezcla número 4** los resultados de ahuellamiento, tomando como criterio de falla o aceptación 10 000 pasos de la rueda, se encontró que un contenido de asfalto de 4,5% podría ser seleccionado como apropiado para el cumplimiento de los requerimientos de ahuellamiento en laboratorio (Ver Fig. 12). No se evidenció desprendimiento de la capa asfáltica por lo tanto la mezcla HMA no es susceptible a sufrir daños por acción de la humedad, y puede ser considerada para su aplicación en zonas húmedas, así como para carreteras con altos volúmenes de tráfico.

Los resultados del ensayo OT para la mezcla 4, tomando como criterio de selección 200 ciclos, mostraron que un contenido de asfalto de 6,0% o mayor puede ser considerado satisfactorio para su aplicación en campo. Sin embargo, y dejando a criterio del ingeniero, si se toman 50 ciclos OT como criterio de falla o aceptación, cualquier nivel de AC mayor al 5,0% puede ser una opción viables para su aplicación en campo.

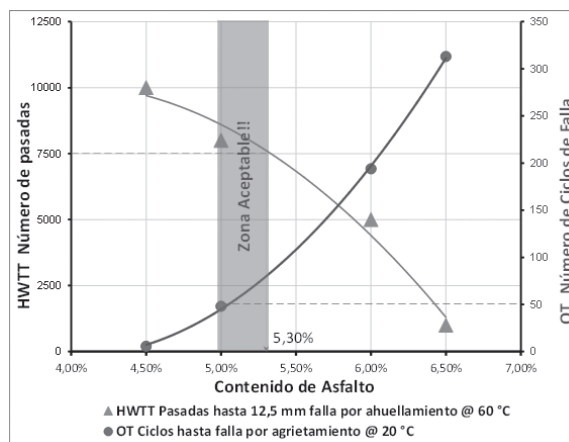


Fig. 12. Diseño Balanceado por desempeño para Mezcla 4

De acuerdo a los criterios de selección establecidos para esta combinación de materiales, se encontró una zona de aceptable dentro de la cual es posible obtener un COA. Para esta mezcla se recomienda un nivel de CA de 5,3% para aplicación en campo.

V. CONCLUSIONES

En este documento, se presentó el Diseño Balanceado por Desempeño como una alternativa innovadora para su aplicación en el diseño de mezclas asfálticas colombianas, capaz de producir mezclas asfálticas con desempeño superiores. Cuatro combinaciones de materiales fueron analizadas. De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- El Diseño Balanceado por Desempeño es una metodología alternativa de diseño que puede predecir con superior certeza el comportamiento de las mezclas asfálticas durante su tiempo de servicio, ya que tiene en cuenta el desempeño por resistencia al ahuellamiento y craqueo reflexivo de la mezcla para la obtención del contenido óptimo de asfalto.
- El contenido óptimo de asfalto obtenido por el método Marshall fue menor que el obtenido por el método de Diseño Balanceado por Desempeño.
- Las mezclas fabricadas con asfalto original presentaron signos de susceptibilidad a la humedad a bajos niveles de contenido de asfalto, menores a 5,0%. Únicamente en la mezcla número 4, fabricada con asfalto modificado no se evidenció daño por acción de la humedad, por lo tanto no presentará fallas como baches o desprendimiento de la capa asfáltica. Esto demuestra la efectividad de mejoradores de adherencia adicionados a las mezclas.
- Los resultados confirman la falta de compatibilidad entre los agregados y ligantes asfálticos colombianos, evidenciando la necesidad de utilización de agentes externos (aditivos) que involucrados en los diseños suministren una estabilidad en la mezcla asfáltica resultante.
- Para todas las combinaciones de materiales evaluadas, los diseños de las mezclas HMA 4,5% y 5,0% exhibieron un desempeño por resistencia al craqueo marginal, menor a 50

ciclos OT. Estos niveles de contenido de asfalto deben ser rechazados o rediseñados.

• Mientras el método tradicional Marshall en su metodología de evaluación expresa para todas las mezclas evaluadas, resultados considerados como acertados dentro de sus parámetros, el método de diseño balanceado por su parte, pone en evidencia el comportamiento de las mezclas al evaluar dinámicamente los materiales bajo diferentes condiciones de operación según el grado de desempeño del ligante utilizado.

• El método de diseño balanceado por desempeño muestra un mayor grado de exigencia dentro de su procedimiento de análisis, al incluir la evaluación del desempeño de la mezcla teniendo en cuenta la susceptibilidad que presenta el material ante la humedad, sometido al mismo tiempo a condiciones de cargas repetidas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Dr. Lubinda F. Walubita, investigador del Instituto de Transporte de Texas (Texas Transportation Institute, TTI), por su colaboración y su gran aporte técnico para la ejecución de los ensayos desarrollados para el desarrollo del presente proyecto.

REFERENCIAS

- [1] INVIAS. 2012. Instituto Nacional de Vías. Recuperado el 15 de Marzo de 2012, de www.invias.gov.co
- [2] Zhou, F., S. Hu, & T. Scullion (2006). Integrated Asphalt (Overlay) Mix Design with Balancing Both Rutting and Cracking Requirements. Technical Report 5123-1, TTI, TX, USA
- [3] TxDOT (2004). “*Standard Specifications for Construction and Maintenance of Highways, Streets, and Bridges.*” Austin, TX, USA.
- [4] TxDOT (2011). Online Manuals: <ftp://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/cmd/mpl/brsqc.pdf> Accessed September 2011, USA
- [5] Walubita L.F, V. Umashankar, X. Hu, B. Jamison, F. Zhou, T. Scullion, A. Epps Martin, & S. Dessouky (2010). New Generation Mix-Designs: Laboratory Testing and Construction of the APT Test Sections. Technical Report 0-6132-1, TTI-The Texas A&M University System, TX, USA. Web link: <http://tti.tamu.edu/documents/0-6132-1.pdf>
- [6] TxDOT (2009). Tex-248-F Manual - *Test Procedure for Overlay Test*. Texas Department of Transportation, TxDOT, Austin, TX, USA.
- [7] INVIAS. 2007. Normas Generales de Construcción de Carreteras. Ministerio del Transporte. Instituto Nacional de Vías.

BIOGRAFÍA



Yuly Fernanda López Contreras, candidata a Doctora en Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander. Ingeniera Química, Universidad Industrial de Santander. Investigadora, CORASFALTOS, Bucaramanga, Colombia. Intereses de investigación en fisicoquímica de asfaltos, agregados y mezclas asfálticas, aplicación de nanotecnología para la caracterización de materiales y pavimentos flexibles.



Luis Enrique Sanabria Grajales, Master en Gestión Tecnológica, Universidad Pontificia Bolivariana. Ingeniero Químico, Universidad Industrial de Santander. Director Ejecutivo, CORASFALTOS, Bucaramanga, Colombia. Sus investigaciones se centran en el estudio de las nanociencias y nanotecnología aplicada a los pavimentos flexibles.



Ricardo José Carreño Zagarra, Ingeniero Químico, Universidad Industrial de Santander, Jefe de Laboratorio, CORASFALTOS, Bucaramanga, Colombia. Intereses de investigación en asfaltos y emulsiones asfálticas, caracterización de agregados y mezclas para fabricación de concreto asfáltico y caracterización dinámica de pavimentos asfálticos.