

# Evaluación de la resistencia bajo carga monotónica de una mezcla asfáltica tibia con aditivo husil aplicado por vía seca al 1% y Escoria de Alto Horno.

*Strength assessment under monotonic load of a warm asphalt mix with HUSIL additive applied with dry method at 1% and with blast furnace slag*

Hugo Alexander Rondón Quintana<sup>1</sup>; Daniel Alberto Zuluaga Astudillo<sup>2</sup>; Viviana Andrea Ramos Santafé<sup>3</sup>; Oscar Rafael Osorio Peña<sup>4</sup>; Edward Arevalo Caro<sup>5</sup>

Página  
44

ESING

<sup>1</sup>I.C. MSc. PhD. \_ harondonz012@hotmail.com \_ Docente Universidad Distrital \_ Bogotá, Colombia.

<sup>2</sup>I.C. MSc. \_ daniel.zuluaga@esing.edu.co \_ Docente Escuela de Ingenieros Militares \_ Bogotá, Colombia.

<sup>3</sup>I.C. Esp. \_ vivisantafe29@gmail.com; <sup>4</sup>I.C. Esp. \_ oscarosorio6@hotmail.com; <sup>5</sup>I.C. Esp. \_ educomando@yahoo.com

Fecha de Recepción: 13/09/2018

Fecha de Aceptación: 10/11/2018

## RESUMEN

El proyecto evaluó el comportamiento bajo carga monotónica de una mezcla asfáltica tibia con aditivo HUSIL, aplicado por vía seca al 1% y con escoria de alto horno en su fracción fina, para ser comparada con una mezcla asfáltica en caliente convencional MDC-25, tomando como referencia las normas y especificaciones del Instituto Nacional de Vías - INVIAS.

Se emplearon diferentes dosificaciones de escoria de alto horno (12%, 19%, 37% y 51%), remplazando los agregados pétreos de la fracción fina y aplicando adicionalmente el aditivo HUSIL. Se ejecutaron un total de 220 probetas con las cuales se determinó que el porcentaje óptimo de asfalto a emplear fue de 5.5%.

Los mejores comportamientos en el ensayo de estabilidad y flujo los presentaron las dosificaciones de escoria de alto horno de 37% y 51% en peso (tamices No. 10, 40, 80 y 200). Establecidos estos porcentajes de escoria, se evaluó la mezcla asfáltica tibia adicionando el aditivo HUSIL al 1%, la temperatura de mezclado óptima resultante fue de 130 °C en el caso de la mezcla tibia (con y sin aditivo). Con base en lo anterior, se concluyó que la mezcla asfáltica con los materiales estudiados

y la formula de trabajo descrita, presenta un comportamiento bajo carga monotónica superior al de una mezcla asfáltica convencional tipo MDC-25 con agregados pétreos.

## PALABRAS CLAVE

Mezcla asfáltica, carga monotónica, ensayos de estabilidad y flujo.

## ABSTRACT

This project evaluated the behavior under monotonic load of a warm asphalt mix with HUSIL additive, applied with dry method at 1% and with blast furnace slag in its particle fraction, to be compared with an asphalt mix in conventional warm MDC-25, taking as reference the norms and specifications from the National Institute of Roads (in Spanish Instituto Nacional de Vías-INVIAS). Different dosages of blast furnace slag were employed (12%, 19%, 37% and 51%), replacing the stone aggregates from the particle fraction and applying additionally the HUSIL additive. It was executed a total of 220 samples with which was determined that the optimum percentage of asphalt to employ was of 5.5%. The best behaviors in the stability test and flow were shown by the dosage of blast furnace

Para citar este artículo / To cite this article

H.A. Rondón, D.A. Zuluaga, V.A. Ramos, O.R. Osorio, E.A. Caro. Evaluación de la resistencia bajo carga monotónica de una mezcla asfáltica tibia con aditivo husil aplicado por vía seca al 1% y Escoria de Alto Horno. Revista Ingenieros Militares, No. 13, pp 44. 2018.

slag of 37% and 51% of weight (sieves No. 10, 40, 80 y 200). Once established these percentages of slag, the warm asphalt mix was evaluated adding the HUSIL additive in 1%, and the resulting optimum mixing temperature was 130 °C in the case of the warm mix (with or without additive). According to the previous analysis, it is concluded that the asphalt mix with the studied materials and the described method of work, presents a behavior under monotonic load superior to any other conventional asphalt mix type MDC-25 with stone aggregates.

## KEYWORDS

Asphalt mix, monotonic charge, stability and flow tests.

## INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta la escasez de recursos naturales no renovables, el cambio climático y las actuales políticas ambientales a nivel global, se debe evaluar el empleo de materiales reciclados, no contaminantes, permitiendo mitigar el impacto ambiental que causa la construcción de estructuras de pavimento.

Algunos trabajos de investigación han evaluado el comportamiento de las estructuras de pavimento, con el reemplazo parcial o total del material pétreo por escoria de alto horno, escoria de acero y R.A.P. (Reclaimed Asphalt Pavement), tanto para las capas de base granular, subbase granular y afirmado, como en las capas asfálticas (base, intermedia y rodadura), ya sea con tecnología en caliente, tibia o en frío, obteniendo resultados satisfactorios.

En algunos casos las respuestas mecánicas son similares ó incluso superiores a las reportadas con agregados pétreos convencionales. También se ha investigado sobre la modificación del asfalto con aditivos químicos y Zeolitas (naturales y sintéticas) que causan disminución en la viscosidad del asfalto, con el fin de aumentar la manejabilidad de éste y reducir la Temperatura de mezclado en planta,

generando una mezcla asfáltica tibia WMA (por sus siglas en inglés).

En la actualidad no existe en Colombia normatividad ó especificaciones técnicas para la producción de mezclas asfálticas tibias (WMA), a pesar que se han patentado una gran variedad de aditivos químicos, que conllevan al comportamiento mencionado anteriormente. Para efecto de esta investigación se emplearon los parámetros, establecidos en la especificación INV-450-13, correspondiente a mezclas asfálticas densas en caliente, específicamente una de tipo MDC-25, para así poder tener un punto de comparación de los resultados.

Se incorporó a la mezcla asfáltica tipo MDC-25 un aditivo químico denominado HUSIL, el cual emula el accionar de una Zeolita sintética y que se aplica por vía seca (con el cemento asfáltico tipo CA 60/70 más el agregado pétreo). Adicionalmente, se utilizó escoria de alto horno que sustituye a la fracción fina de la franja granulométrica de la MDC-25, en los tamices No. 10, 40, 80 y 200.

Se construyeron un total de 220 probetas para ensayar en el equipo Marshall; con las cuales se evaluó el comportamiento bajo carga monotónica de la mezcla asfáltica tibia con gradación MDC-25, aplicándole el aditivo HUSIL por vía seca al 1% y en la que se reemplazó un porcentaje del material pétreo de su fracción fina, por escoria de alto horno reciclada; para posteriormente poderla comparar con el comportamiento de una mezcla asfáltica convencional tipo MDC-25.

Finalmente, se concluye de la mezcla asfáltica tibia que el contenido óptimo de cemento asfáltico es de 5,5%, la dosificación óptima de aditivo HUSIL por vía seca es del 1%. Las dosificaciones de escoria de alto horno con la que se obtuvieron mejores desempeños fueron de 37% y 51% en peso, reemplazando material en los tamices No. 10, 40, 80 y 200. Por último, la temperatura de mezclado con la cual se logra el mejor comportamiento fue de 130 °C.

Algunas de las investigaciones precedentes que respaldan el estudio de materiales alternativos para conformar una mezcla asfáltica sostenible, ecológica y que asegure respuestas mecánicas iguales ó superiores a las de una mezcla tradicional en caliente, se presentan a continuación:

“A través de la modificación por vía seca de un cemento asfáltico (tipo CA 60-70 fabricado por la Empresa Colombiana de Pétroleos S.A. - ECOPETROL) con un aditivo ampliamente trabajado por el grupo de investigación y desconocido por los productores de asfaltos (denominado HUSIL), se modificaron las características de viscosidad y trabajabilidad del material base (cemento asfáltico), con el fin de poder mezclarlo (en las plantas de asfaltos) con el agregado pétreo a temperaturas más bajas, y así fabricar una mezcla asfáltica que disminuya la producción de contaminantes a la atmósfera.

Por otro lado, el proyecto evalúa el comportamiento que experimenta la mezcla desarrollada cuando es sometida a cargas monotónicas, dinámicas y al daño por humedad, y el cambio que desarrollará en sus propiedades reológicas y mecánicas” [1], con ello se logró concluir que el “Aditivo químico disminuye la temperatura de la mezcla en 30 °C, así mismo contribuye con una adecuada trabajabilidad y composición volumétrica de la mezcla WMA. Adicionalmente, las mezclas WMA experimentan mayor resistencia bajo carga monotónica y dinámica a altas temperaturas de servicio, así como mayor resistencia al daño por humedad” [2].

Por su parte [3], adelantaron estudios con el objeto principal de remplazar agregados pétreos por R.A.P., adicionando un producto químico que espuma el asfalto denominado HUSIL, durante el proceso de mezcla, el producto químico fue agregado al cemento asfáltico 60/70 a 80 °C durante 5 minutos, “Está temperatura fue elegida ya que el aditivo espuma el asfalto a 80 °C actuando como una zeolita en liberación de agua”, para

así establecer su desempeño y poder compararla con una mezcla asfáltica caliente. Se midió la resistencia bajo carga monotónica y dinámica de una mezcla.

En conclusión a esta investigación se tiene que, “A pesar que el contenido de aditivo es bajo (HUSIL 1%), cambia las propiedades de la mezcla asfáltica, aumentando su rigidez y su servicio a temperaturas altas, reduce de manera significativa la temperatura en el proceso de producción de las mezclas (por los menos 30 °C), mejorando así la trabajabilidad y compactación. El mejor desempeño de una mezcla de WMA-R.A.P., es en zonas de alta temperatura, ya que a temperaturas bajas puede experimentar grietas a temprano plazo. La mezcla WMA-R.A.P., desarrolla mayor resistencia a daños por humedad comparada con una mezcla HMA-R.A.P.”

De otro lado [4], llevaron a cabo su trabajo de grado con el fin de adelantar una investigación bajo “Un programa de ensayos Marshall mediante el cual se determinaron las propiedades de la mezcla tibia y se compararon con las de una mezcla convencional. Se investigaron mezclas con los porcentajes de escoria del 20%, 37.5% y 51% y temperaturas de mezclado de 110 °C, 120 °C, 130 °C, utilizando porcentajes de asfalto del 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%.

Se concluyó que las mezclas estudiadas, con un porcentaje de escoria del 20% y temperaturas de mezclado entre 110 °C y 120 °C, para un porcentaje de asfalto del 6% se ajustan a los criterios de aceptación de Artículo 450-13 de las especificaciones del Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Estas mezclas son factibles de considerar en la construcción de capas asfálticas de pavimento, pero es necesario realizar investigaciones complementarias para verificar otras propiedades ingenieriles”. La fracción gruesa de escoria es muy porosa y por ende consume más asfalto.

Por su parte [5], realizó la caracterización de escoria de alto horno, determinando las propiedades físicas y químicas de ésta. A través de [6], se evaluó la resistencia mecánica de una mezcla asfáltica

tibia, empleando un aditivo químico líquido que espuma el asfalto. Sobre la mezcla se ejecutaron ensayos Marshall, de tracción indirecta, el cambio de composición volumétrica, la Rigidez bajo carga cíclica y la resistencia a la deformación permanente, se tomó como referencia granulométrica la mezcla asfáltica densa en caliente tipo MDC-25, y como ligante, cemento asfáltico tipo 60/70, para lo cual concluyeron, que el aditivo empleado es capaz de reducir la temperatura de la mezcla de referencia MDC-25 en 30°C, generando una mezcla tibia con composición volumétrica similar y de mayor rigidez y resistencia bajo carga monotónica y cíclica) [7], [8].

“Las mezclas asfálticas son la combinación de agregados pétreos y un ligante asfáltico”, “los diversos tipos de mezclas asfálticas están conformadas por agregados pétreos con granulometría y requisitos mínimos de calidad diferentes. Así mismo presentan diferencias en cuanto a su función dentro de la estructura de pavimento y al tipo de material asfáltico o ligante que utilizan” [9].

De acuerdo con [10] y [11], la disminución en la temperatura de fabricación de mezcla en la planta de asfaltos debe ser de 28°C para denominarse mezcla asfáltica tibia (WMA). La reducción de las temperaturas de mezclado y compactación traen consigo una disminución en las emisiones a la atmósfera [12]- [18]. Las temperaturas de mezcla y compactación de una WMA están entre 90-130°C y 100-135°C respectivamente [19].

La temperatura de fabricación de mezclas WMA se encuentra en un rango entre 17 a 56 °C menor que aquella requerida para manufacturar mezclas asfálticas en caliente (HMA por sus siglas en inglés). Una observación similar es reportada por [20] quien menciona que dicha disminución alcanza los 40 °C. Según [21], las mezclas WMA generan menores emisiones contaminantes durante su proceso de fabricación y construcción en comparación con mezclas HMA, y el ahorro de energía es de aproximadamente el 30% [22].

## METODOLOGÍA

En esta investigación, se empleó la metodología Marshall para determinar la resistencia a la deformación plástica de especímenes cilíndricos de la mezcla asfáltica. Éste procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de 4” de diámetro y 2½” de altura, cuyos materiales deben cumplir con las especificaciones de granulometría. Posteriormente, las probetas son falladas en la prensa Marshall determinado su estabilidad y su flujo, con lo cual se puede determinar el contenido óptimo de asfalto en una mezcla de tipo MDC-25. El cemento asfáltico utilizado fue uno de penetración 60-70, ver figura 1.

Las probetas de la Mezcla Asfáltica Tibia con gradación MDC-25, se elaboraron con cemento asfáltico tipo AC 60-70 producido por ECOPEPETROL y agregado pétreo proveniente del Río Coello en el Departamento de Tolima, los cuales fueron suministrados por la planta de asfalto CONCRESCOL S.A. La normatividad de referencia empleada para la ejecución de los ensayos de laboratorio y control de la mezcla asfáltica tibia y convencional, es la establecida por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) [7], [8].

Para la obtención de la escoria de alto horno se tienen como fuentes las siguientes siderúrgicas: Acerías Paz del Río ubicada en el municipio de Nobsa \_ Boyacá, DIACO ubicada en el Muña \_ Cundinamarca, SIDENAL ubicada en el municipio de Sogamoso \_ Boyacá, ACASA ubicada en el Km 2 vía termales en la ciudad de Manizales \_ Caldas y SIDOC en el municipio de Yumbo \_ Valle del Cauca.

Existen dos tipos de escoria, la de Acero que resulta de la producción en hornos de arco eléctrico y la de Hierro que resulta de la producción en Alto Horno, ver figura 2.



Figura 1. Cemento Asfáltico AC 60-70 Fuente: Autores.



Figura 2. Escoria de Alto Horno Fuente: Autores.

Al salir del alto horno, la escoria presenta forma líquida, supera los 1200°C. Según su proceso de enfriamiento, se puede clasificar en escoria Granulada (enfriamiento lento), Cristalizada (enfriamiento brusco con agua fría) ó Dilatada (se obtiene en el proceso de afinado del arrabio en el alto horno, en el que por oxidación se eliminan las impurezas existentes, principalmente fósforo y azufre) [23]. Para esta investigación se utilizó la de tipo granulada.

El Aditivo Husil, es un líquido en proceso de patente por el Ing. Hugo Alexander Rondón Quintana, que actúa como una Zeolita sintética, la cual disminuye la temperatura de producción de una mezcla asfáltica, para la investigación se denominará HUSIL. Este aditivo es un material inorgánico, no es inflamable y no es considerado peligroso o material contaminante. Es un material que presenta valores de pH entre 10 y 12, no es cancerígeno ni teratogénico [24]. En la Investigación se aplicará el aditivo HUSIL por vía seca, lo que indica que la Zeolita (HUSIL) se aplicará una vez los granulados y el cemento asfáltico estén mezclados, como se observa en la Figura 3.



Figura 3. Aditivo HUSIL. Fuente: Autores.

La estabilidad de una mezcla asfáltica es su capacidad para resistir desplazamiento y deformaciones bajo las cargas de tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas; un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos y ondulaciones que indican cambios en la mezcla.

El Flujo es medido en centésimas de pulgada, y representa la deformación de la Probeta. Las mezclas que contienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas [25].

## RESULTADOS

Se presentan a continuación los análisis de resultados obtenidos en el ensayo Marshall de la mezcla asfáltica tipo MDC-25 convencional y la modificada con escoria de alto horno al 0%, 12%, 19%, 37% y 51%; así como la mezcla asfáltica tibia WMA con escoria de alto horno, empleando cemento asfáltico AC 60-70 convencional y modificado con aditivo HUSIL al 1%, variando la temperatura de mezclado en 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C y 150 °C.

### Caracterización de materiales

Los materiales pétreos utilizados en las mezclas asfálticas provienen de la planta CONCRESCOL S.A., éstos cumplen con las especificaciones técnicas establecidas en el artículo 450-13, para la producción de mezclas tipo MDC-25.

De igual forma, el cemento asfáltico utilizado en la investigación (CA 60-70, producido en Barrancabermeja por ECOPETROL), cumple con los requisitos mínimos de calidad establecidos en el artículo 450-13, de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías INVIAS en su versión 2013.

El aditivo HUSIL inicialmente se agregó al asfalto en proporciones respecto a su porcentaje en masa (HUSIL/CA=0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 y 10.0%). El aditivo incrementa la gravedad específica de la mezcla asfalto-aditivo a medida que se incrementa el contenido de HUSIL, debido principalmente a que el aditivo presenta una mayor gravedad específica (1.32 g/cm<sup>3</sup>) que el asfalto CA 60-70 sin modificar (1.012 g/cm<sup>3</sup>).

El asfalto modificado con el aditivo incrementa su resistencia a inflammar a altas temperaturas. El aditivo tiende a rigidizar notablemente el asfalto, y las mayores rigideces se presentan en proporciones de HUSIL/CA= 0.75% y 1.0% (incrementa el punto de ablandamiento y disminuye la penetración). La ductilidad disminuye de manera lógica, ya que el aditivo se rigidiza cuando ocurre el enfriamiento del asfalto modificado.

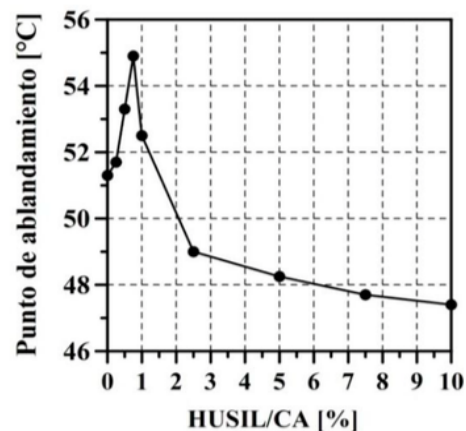
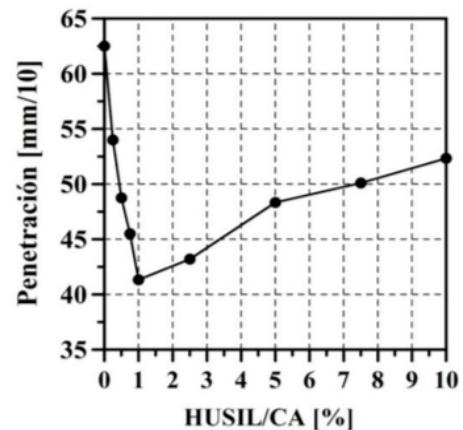


Figura 4. Penetración y punto de ablandamiento del cemento asfáltico CA 60-70 modificado con aditivo HUSIL Fuente: [1].

La escoria de altohorno empleada para sustituir el agregado pétreo en su fracción fina comprendida entre los tamices de 2,0 mm y 75µm (tamices No. 10 y 200), resulta como residuo en la producción del Hierro, la cual fue obtenida en la siderúrgica Acerías Paz del Río ubicada en el municipio de Nobsa-Boyacá.

En la caracterización de la escoria de alto horno empleada como agregado fino, se determinó que el material cumple con la mayoría de los parámetros evaluados, excepto la resistencia al desgaste y Micro-Deval. Sin embargo, se aceptó su uso, teniendo en cuenta que éste se empleó como material de lleno fino y la estructura o resistencia la dará el agregado pétreo grueso.

Adicionalmente, uno de los objetivos del proyecto es evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas convencional y tibia, con escoria de alto horno reciclada.

*Diseño mezcla asfáltica convencional MDC-25 con variación del contenido de asfalto – grupo 1 de ensayos*

Los resultados de estabilidad y flujo correspondientes a la mezcla asfáltica convencional MDC-25, se obtuvieron a partir del promedio de los valores obtenidos con cinco probetas para cada contenido de asfalto (4.5, 5.0, 5.5 y 6.0%), estos resultados se graficaron contra el contenido de ligante de los diferentes juegos de probetas, figura 5.

Se determinó que el contenido óptimo de asfalto corresponde a 5.5%, dado que con este porcentaje de asfalto se obtuvo la mayor estabilidad que corresponde a 1381,49 kg y el menor flujo con un valor de 3,76 mm. De la relación de estos dos valores se determinó la mayor Rigidez (E/F) de la mezcla (372,08 Kg/mm). El diseño de la mezcla cumple con lo establecido en la especificación 450-13 del INVIAS para una mezcla asfáltica MDC-25.

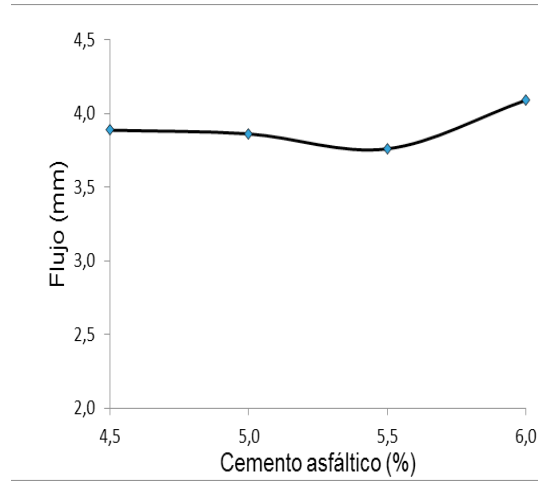
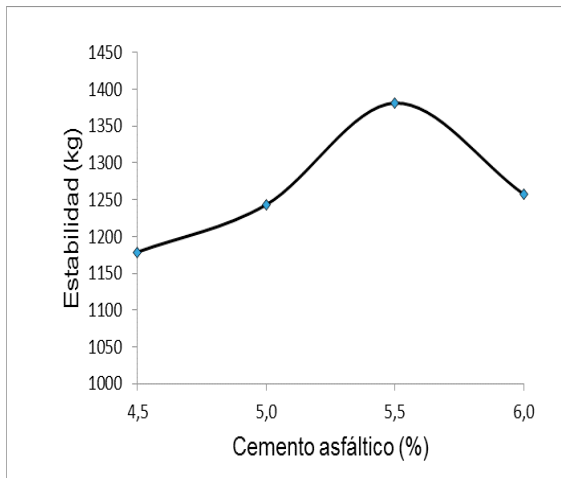


Figura 5. Estabilidad y Flujo en Mezcla convencional MDC-25 con variación de CA Fuente: Autores.

*Diseño mezcla asfáltica MDC-25 con escoria de alto horno, evaluando el porcentaje óptimo de asfalto para cada dosificación de escoria – grupo 2 de ensayos*

Para todas las mezclas MDC-25 con diferentes dosificaciones de escoria de alto horno en la fracción fina, se cumple con los parámetros de estabilidad establecidos por la norma 450-13 INVIAS; sin embargo con respecto al flujo, se cumple solamente en las dosificaciones del 19%, 37% y 51%.

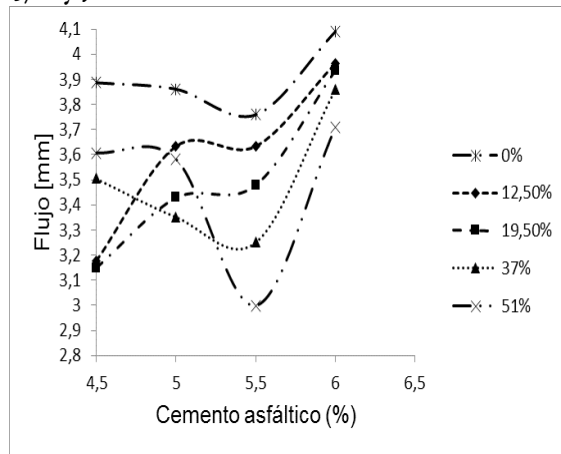


Figura 6. Estabilidad y Flujo del Diseño Marshall variando el contenido de escoria desde el tamiz No. 10 hasta el fondo Fuente: Autores.

Los mejores resultados de estabilidad y de flujo se obtuvieron en las mezclas con porcentaje de asfalto del 5,5%, con los mayores contenidos de escoria de alto horno, es decir en los que se incorporó un 37% y 51% respectivamente, ver figura 6. De igual forma se cumple con la relación Estabilidad/Flujo.

Los porcentajes de vacíos con aire se cumplen en todas las dosificaciones de escoria de alto horno para mezclas intermedias o de base, sin embargo, para mezclas de rodadura se cumple únicamente en las que se incorporó un 37% y 51%, ver figura 7.

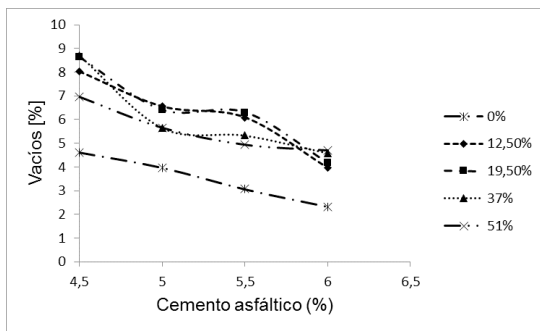


Figura 7. Porcentaje de Vacíos del Diseño Marshall variando el contenido de escoria desde el tamiz No. 10 hasta el fondo  
Fuente: Autores.

Los porcentajes de vacíos en los agregados pétreos se cumplen en todas las dosificaciones de escoria de alto horno, sin ninguna restricción.

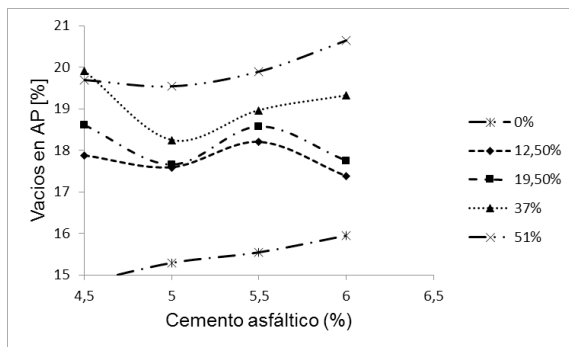


Figura 8. Vacíos AP del Diseño Marshall variando el contenido de escoria desde el tamiz No. 10 hasta el fondo  
Fuente: Autores.

La Densidad Bulk en todas las mezclas con dosificaciones de escoria de alto horno, es menor con respecto a la convencional y disminuye en la medida que se incorpora más porcentaje de escoria, razón por la cual la escoria debe utilizarse en las fracciones finas de la mezcla para que funcione como llenante y la fracción gruesa asuma los esfuerzos directos de la carga monotónica.

*Mezcla asfáltica tibia sin aditivo husil y con escoria de alto horno al 0%, 37% y 51%, evaluando la temperatura óptima de mezclado – grupo 3 de ensayos*

En el caso de la Mezcla tibia sin aditivo, el mejor comportamiento bajo carga monotónica se obtuvo con 51% de escoria de alto horno distribuida en los tamices No. 10, 40, 80 y 200, a una temperatura de mezclado óptima de 130 °C, de igual forma el mejor flujo se obtuvo con el 51% a 130°C. Ver figura 9.

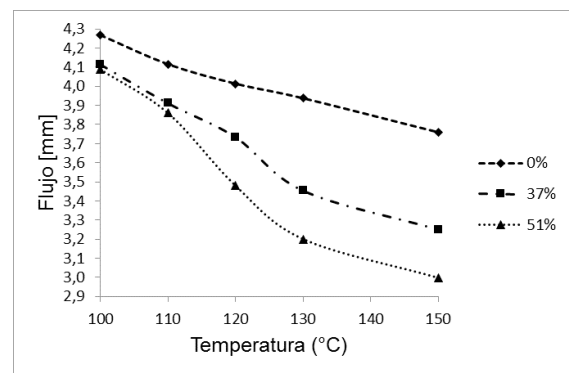
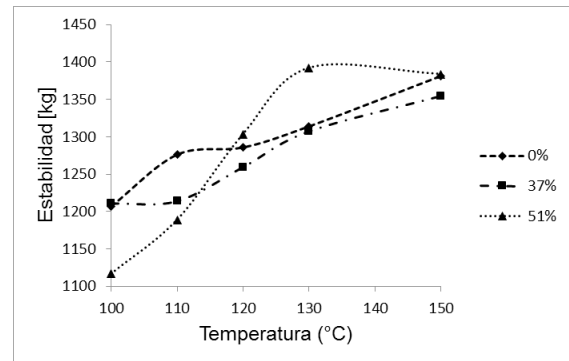


Figura 9. Estabilidad y Flujo del Diseño Marshall variando el contenido de escoria, temperatura y sin aditivo HUSIL  
Fuente: Autores.

La relación de vacíos en este grupo de ensayos está en el orden de 5,5% para mezclas con contenido de escoria de un 51%, y del orden de 5,4% en mezclas con contenido de escoria de un 37%.

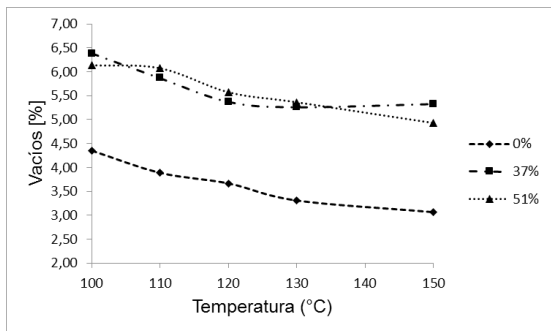


Figura 10. Porcentaje de Vacíos del Diseño Marshall variando el contenido de escoria, temperatura y sin aditivo HUSIL Fuente: Autores.

En temperaturas de mezclado inferiores a 130 °C en la mezcla tibia sin aditivo, no se cumple el parámetro de flujo de las especificaciones INVIAS. Para temperaturas superiores a 130 °C, aumenta la resistencia y el desempeño, pero ya no estaríamos hablando de una mezcla tibia sino en caliente, por lo tanto la temperatura óptima de mezclado se determina como 130°C.

En la mezcla asfáltica tibia cuando se emplea únicamente agregado pétreo sin escoria de alto horno, se presenta menor comportamiento bajo carga monotónica, es decir menor rigidez, al ser comparada con la mezcla tibia con escoria al 51%, incluso cuando se reporta mayor densidad y menor porcentaje de total vacíos.

*Mezcla asfáltica tibia con aditivo husil al 1% y con escoria de alto horno al 0%, 37% y 51%, evaluando la temperatura óptima de mezclado – grupo 4 de ensayos*

Los resultados de estabilidad obtenidos en el cuarto grupo de probetas con escoria de alto horno y aditivo HUSIL, denotan una mayor estabilidad con respecto a las mezclas sin aditivo y a la convencional MDC-25 con agregado pétreo.

Para el caso de las Mezclas tibias con aditivo, la mayor estabilidad y el menor flujo se obtiene con el 51% de escoria de alto horno a 130°C.

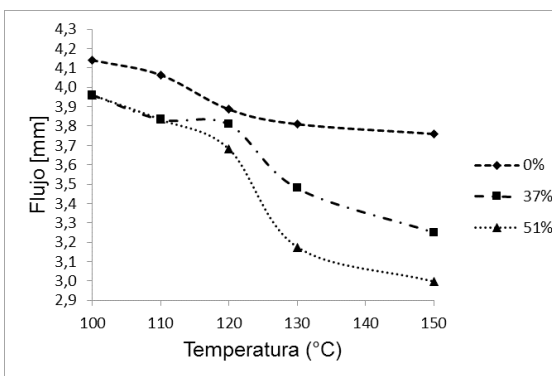
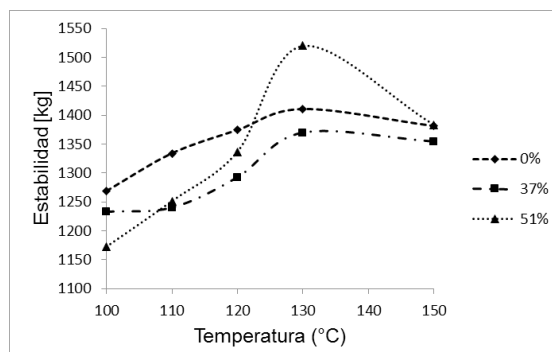


Figura 11. Estabilidad y Flujo del Diseño Marshall variando el contenido de escoria, temperatura y con aditivo HUSIL Fuente: Autores.

Los vacíos en este grupo de ensayos está en el orden de 4,5% para mezclas con contenido de escoria de 51%, y del orden de 4,4% en mezclas con contenido de escoria de 37%, con lo cual se reduce en un 1% el contenido de vacíos de la mezcla, lo cual además aumenta su densidad final.

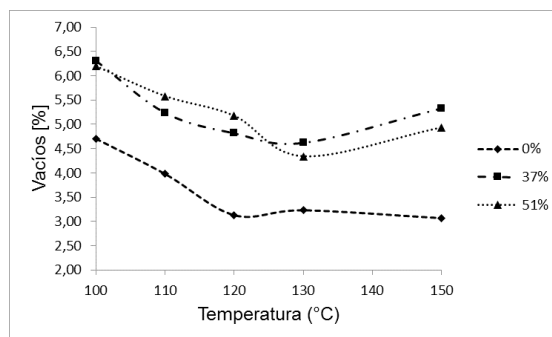


Figura 12. Porcentaje de Vacíos del Diseño Marshall variando el contenido de escoria, temperatura y con aditivo HUSIL Fuente: Autores.

Se concluye de la investigación que el aditivo HUSIL objeto del estudio, aplicado por vía seca al cemento asfáltico AC 60-70, en una dosificación del 1%, ayuda a mejorar la Rigidez de la mezcla asfáltica, generando un desempeño superior al de mezclas convencionales o modificadas con escoria y sin el aditivo.

## CONCLUSIONES

El material de escoria de alto horno es un elemento de menor densidad con respecto al agregado pétreo tradicional y por sus características porosas debe ser utilizado en la fracción fina de las mezclas, recomendablemente desde el tamiz No. 10 hasta el No. 200, esto para que cumpla sus funciones de llenante y así el agregado grueso convencional asuma los esfuerzos directos de la carga.

La caracterización de la escoria de alto horno determinó que el material cumple con la mayoría de los parámetros evaluados, excepto la resistencia al desgaste, sin embargo se aceptó el material para su uso en el proyecto, teniendo en cuenta que este se empleó como material de relleno fino y el esqueleto o resistencia la dio el agregado pétreo grueso.

Los resultados de caracterización, permiten concluir que el agregado pétreo cumple al igual que el cemento asfáltico CA 60-70, con los requisitos mínimos de calidad establecidos en el artículo 450-13, de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías INVIAS 2013.

De la caracterización del cemento asfáltico modificado con aditivo HUSIL se puede concluir que el asfalto modificado con el aditivo incrementa su resistencia a inflammar a altas temperaturas, el aditivo tiende a rigidizar notablemente el asfalto, las mayores rigideces se presentan cuando el aditivo se agrega en proporciones de HUSIL/CA= 0.75% y 1.0% (incrementa el punto de ablandamiento y disminuye la penetración).

La ductilidad disminuye de manera lógica, ya que el aditivo se rigidiza cuando ocurre el enfriamiento del asfalto modificado.

Los resultados de estabilidad y flujo correspondientes a la mezcla asfáltica convencional MDC-25, se obtuvieron a partir del promedio de cinco probetas para cada contenido de asfalto (4.5, 5.0, 5.5 y 6.0%). Finalmente se determinó que el contenido óptimo de asfalto correspondió a 5.5%.

Se concluye que la mezcla asfáltica MDC-25 con reemplazo de un porcentaje del material pétreo en su fracción fina (Tamices No. 10, 40, 80 y 200), por escoria de alto horno reciclada en dosificaciones del 12, 19, 37 y 51%, en general presenta un comportamiento aceptable bajo carga monotónica; se analiza que las menores densidades corresponden al porcentaje óptimo de asfalto 5.5%, lo cual es coherente, teniendo en cuenta que la escoria de alto horno es un material heterogéneo con alta porosidad. Entre mayor es la cantidad o dosificación de escoria aplicada a la mezcla, mayor porcentaje de vacíos en la mezcla habrá, esto conlleva a una densidad menor. Los porcentajes óptimos de escoria fueron de 37% y 51%.

Las demás dosificaciones de escoria de alto horno evaluadas (12% y 19%) tienen un comportamiento aceptable frente a la carga monotónica, pero en cuanto al flujo algunas probetas tuvieron valores superiores al máximo establecido por la normatividad aplicable, siendo entonces descartadas para las siguientes etapas.

En el caso de la Mezcla tibia sin aditivo, el mejor comportamiento bajo carga monotónica se obtuvo con 51% de escoria de alto horno distribuida en los tamices No. 10, 40, 80 y 200, a una temperatura de mezclado óptima de 130 °C. Es decir, que a mayor contenido de escoria de alto horno en la fracción fina, el desempeño bajo carga monotónica aumenta, pese a que su densidad disminuya.

Los resultados de estabilidad y flujo correspondientes a la mezcla asfáltica tibia WMA, con aditivo HUSIL y con las dosificaciones de

escoria optimas (0%, 37% y 51%), se alcanzaron a partir del promedio de cinco probetas para cada temperatura evaluada (100, 110, 120 y 130°C). Finalmente se determinó que la temperatura óptima de mezclado es 130°C y la dosificación óptima de escoria de alto horno fue de 51%.

La temperatura ideal de producción de las mezclas tibias con escoria de alto horno y con aditivo HUSIL al 1% aplicado por vía seca es de 130°C, dado que con temperaturas inferiores a los 125°C se genera una disminución representativa en la estabilidad y un aumento del flujo, que desfavorece las propiedades de calidad de la mezcla sometida a cargas monotónicas.

Se concluye de la investigación que el aditivo HUSIL objeto del estudio, aplicado por vía seca al cemento asfáltico AC 60-70, en una dosificación del 1%, ayuda a mejorar la rigidez de la mezcla asfáltica tibia, generando un desempeño superior al de mezclas convencionales o modificadas con escoria sin su aplicación, sumado a la disminución en la temperatura de mezclado. El aditivo HUSIL disminuye cerca de 20°C la temperatura de producción, con lo cual se reducen las emisiones contaminantes al medio ambiente, se disminuye el envejecimiento del ligante asfáltico y se puede dar una apertura más rápida al tráfico.

## REFERENCIAS

- [1] TOPOVIAL, «Desarrollo de una mezcla asfáltica tibia reciclada bajo criterios técnicos y medioambientales. (Universidad Distrital Francisco José de Caldas - UDFJC) y Pavimentos y Materiales de Ingeniería (Universidad Católica de Colombia - UCC)» Bogotá D.C., Agosto 2014.
- [2] H. A. Rondón Quintana, W. D. Fernandez Gómez y C. A. Zafra Mejía, «Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia usando un aditivo químico para espumar el asfalto» Revista facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, nº 78, Diciembre 2015.
- [3] H. A. Rondón Quintana, C. F. Urazán y S. B. Chavez, «Characterization of a Warm mix asphalt containing reclaimed asphalt paviments».
- [4] A. B. Barreto, K. M. Zapata y E. A. Garcés, «Evaluación de la resistencia de una mezcla tibia sustituyendo en su fabricación parte del agregado pétreo por escoria de alto horno» Bogotá, 2015.
- [5] D. Patiño, «Trabajo de grado ing. Civil, Facultad Tecnológica Universidad Distrital Francisco José de Caldas» 2016.
- [6] H. A. Rondón Quintana y W. D. Fernandez Gómez, «Mechanical resistance of a chemically-modified warem mix asphalt» Tecnura, nº 18, 2014.
- [7] INVIAS, «Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Norma INVIAS, Capítulo 4. Pavimentos Asfálticos» Bogotá D.C., Mayo 2013.
- [8] INVIAS, «Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, Secciones 700 Y 800. Materiales y Mezclas Asfáltica y Prospección de Pavimentos» Bogotá D.C., Mayo 2013.
- [9] H. A. Rondón Quintana y F. A. Reyes Lizcano, Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño., E. Ediciones, Ed., Bogotá D.C., Febrero 2015, pp. 37-38.
- [10] R. Bonaquist, Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt. NCHRP Report 691. Transportation Research Board - TRB, Washington D.C., 2011.
- [11] V. A. Sterling, Advanced Asphalt Technologies. Special Mixture Design Considerations and Methods for Warm Mix Asphalt: A Supplement to NCHRP Report 673: A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary. NCHRP Report 714, Transportation Research Boar., Washington D.C., 2012.

- [12] A. Romier, M. Audeon y F. Olard, Low-Energy Asphalt with Performance of Hot-Mix Asphalt. *Transportation Research Record*, 2006.
- [13] O. Kristjansdottir, S. Muench, L. Michael y G. Bur, Assessing Potential for Warm-Mix Asphalt Technology Adoption. *Transportation Research Record*, 2007.
- [14] N. Wasiuddin, S. Selvamohan, M. Zaman y M. Guegan, Comparative Laboratory Study of Sasobit and Aspha-Min Additives in Warm-Mix Asphalt. *Transportation Research Record*, 2007.
- [15] A. Chowdhury y J. W. Button, A Review of Warm Mix Asphalt. Report No. SWUTC/08/473700-00080-1, Texas Transportation Institute., Texas, Diciembre 2008.
- [16] S. Biro, T. Gandhi y S. Amirkhanian, Midrange Temperature Rheological Properties of Warm Asphalt Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 21., 2009.
- [17] M. Tao y R. Mallick, Effects of warm-mix asphalt additives on workability and mechanical properties of reclaimed asphalt pavement material. *Transp. Res. Rec.*, 2009, núm. 2126,, 2009, pp. 151-160.
- [18] A. Hearon y S. Diefenderfer, Laboratory Evaluation of Warm Asphalt Properties and Performance. *Airfield and Highway Pavements 2008*, ASCE, 2008.
- [19] Z. You y S. W. Goh, Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt: A Preliminary Study. *Int. J. Pavement Res. Technol.*, Vols. %1 de %21, No. 1, 2008., pp. 34-40.
- [20] H. Silva, J. Oliveira y C. Ferreira, Assessment of the Performance of Warm Mix Asphalts in Road Pavements. *Int. J. Pavement Res. Technol.*, Vols. %1 de %23, No. 3., 2010, pp. 119-127.
- [21] APAO, Warm Mix Asphalt Shows Promise for Cost Reduction, Environmental Benefit. Centerline, Asphalt Pavement Association of Oregon, Salem, Oregon, 2003.
- [22] A. Chowdhury y J. W. Button, A review of warm mix asphalt, Report No. SWUTC/08/473700-00080-1. College Station: Texas Transportation Institute, Texas, 2008.
- [23] G. Tovar y E. Arévalo Caro, «Empleo de la escoria de acero como material para conformar bases o subbases granulares,» Bogotá D.C., 2005.
- [24] H. A. Rondón Quintana, «HUSIL, Aditivo en proceso de patente el cual emula las propiedades químicas de la Zeolita, generando un espumado que ayuda a reducir la temperatura de mezcla para las Mezclas Densas en Caliente».
- [25] U. d. l. A. Puebla, «Pruebas de desempeño para mezclas asfálticas,» Universidad de las Américas Puebla, [En línea]. Available: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lic/caceres\\_m\\_ca/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/caceres_m_ca/capitulo4.pdf).