

COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES*

Oscar Javier Reyes Ortiz**
Juan Ricardo Troncoso Rivera***
Javier Fernando Camacho Tauta****

Resumen: el propósito de la investigación de la cual se deriva este artículo consistió en determinar la incidencia de reemplazar el llenante mineral por cenizas volantes en la deformación permanente y las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica con granulometría 0/10 y asfalto CA60/70. Inicialmente se realizó la caracterización del material granular, cenizas volantes y asfalto. Se determinó el porcentaje óptimo de asfalto mediante el procedimiento Marshall, valor con el cual se construyeron las muestras para los ensayos mecánicos y de ahuellamiento con reemplazo de llenante mineral por ceniza volante. Se utilizaron diferentes porcentajes de reemplazo de llenante mineral por ceniza volante entre el 15% y el 100%. Entre los resultados obtenidos se determinó un incremento de la resistencia del 19% para un reemplazo del 20%. La deformación permanente disminuyó 10% y 38% para el reemplazo de 20% y 45%, respectivamente. Adicionalmente, se evaluó la rigidez Marshall y la velocidad de deformación y se obtuvo un porcentaje de adición favorable de ceniza volante de 25% con respecto al peso del llenante mineral.

Palabras clave: mezcla asfáltica, ceniza volante, relación estabilidad-flujo, deformación permanente.

* El artículo se deriva de la investigación realizada por medio del convenio 096/2004 entre Colciencias y la Universidad Militar Nueva Granada. Fecha de recepción: 9 de marzo de 2006. Fecha de aceptación para publicación: 21 de marzo de 2006.

** Ingeniero Civil, Universidad de los Andes. Candidato de doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña. Profesor Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: oreyes@umng.edu.co

*** Ingeniero Civil, Universidad Militar Nueva Granada. Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: juan.troncoso@umng.edu.co

**** Ingeniero Civil, Universidad Militar Nueva Granada. Candidato de doctorado, Universidad Técnica de Lisboa. Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: jcamacho@umng.edu.co

Abstract: the main objective of the associated research was determining the effect on the permanent deformation and the mechanical properties of an asphalt mixture with gradation 0/10 and asphalt 60/70 when the mineral filler is replaced by flying ashes. Characterization of granular, asphalt and flying ashes was initially performed. The design of the asphalt mixture follows the methodology proposed by Marshall; the samples for the mechanical tests and rutting with replacement of mineral filler for flying ash were constructed with the value determined with that method. The percentages used as replacement of mineral filler for flying ash vary between 15% and 100 %. The results show a positive effect of the replacement of the mineral filler for flying ashes. The resistance increases in 19% on average with a percentage of replacement of 20%. The permanent deformation, decreases in 10% and 38% for the replacement of 20 % and 45%, respectively. In addition, Marshall Stiffness and deformation velocity were evaluated; as a result, a positive percentage addition of flying ash of 25% with respect of the mineral filler weight was reached.

Key words: Asphalt mixture, flying ashes, stability-fluency relation, permanent deformation.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño, implementación y construcción de estructuras de pavimentos flexibles es la alternativa de pavimentación más económica como técnica en las obras de infraestructura vial para vías de segundo y tercer orden. Sin embargo, a pesar de esta consideración, estas obras han sufrido inconvenientes y fallas que han generado una disminución considerable en su efectividad y durabilidad, generando como consecuencia una incomodidad en los usuarios que utilizan estos corredores, ya que el mantenimiento en estas vías restringe su uso.

Tal afirmación ha llevado a buscar nuevas alternativas en lo que se refiere a los materiales que componen la mezcla asfáltica para mejorar su capacidad de respuesta mecánica y dinámica, por ejemplo, adiciones como las fibras de llantas usadas, agregados sintéticos, entre otros.

Las cenizas volantes producidas en las centrales termoeléctricas se han empleado principalmente como adición en mezclas de hormigón y en estabilización de bases granulares, pero no se ha profundizado su aplicación dentro de la dosificación en mezclas asfálticas, lo cual sería una alternativa de solución para mejorar la capacidad estructural de la mezcla asfáltica y mitigar el problema ambiental que genera este desperdicio ocasionado por la combustión del carbón, además de que se reducen los costos de los materiales empleados en la construcción de obras de infraestructura vial.

2. ANTECEDENTES

Las cenizas volantes son un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía y constituyen en sí partículas no combustibles removidas de las chimeneas de gases que no son captadas por medio de filtros electrostáticos [National Ready Mixed Concrete Association, 1998].

En el ámbito internacional las cenizas volantes son utilizadas en grandes cantidades, especialmente en la producción de cementos y concretos, rellenos estructurales y no estructurales, muros de contención, estabilización de desechos, bases y sub-bases para pavimentos, como acondicionador de suelos y, en algunos casos, en los pavimentos rígidos.

En la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional Rosario de Argentina se evaluaron las posibilidades de reutilización de un residuo industrial, producto de la calcinación incompleta de carbón en usinas de generación eléctrica, denominado ceniza volante, como relleno en mezclas asfálticas y agente estabilizante de suelos. La metodología del estudio comprendió la evaluación de la ceniza volante como agente modificador de la resistencia al envejecimiento del asfalto durante la elaboración de la mezcla en planta, colocación *in situ* y la valoración de la aptitud de este producto para actuar como agente estabilizante de suelos cuantificada a partir de distintos ensayos de resistencia, de caracterización elástica, de su comportamiento a la fatiga y de su deformación permanente, con el fin de determinar contenidos recomendados y campo de aplicación [Martínez, Andreoni, Poncino, 1997].

Se debe tener en cuenta que, para el caso de Colombia, las vías deben cumplir los criterios de diseño de acuerdo con las especificaciones del artículo 450 de las técnicas de construcción de carreteras [Invías, 2002], además de evaluar la rigidez en la mezcla asfáltica, ya que la fisuración prematura de las capas asfálticas depende de la estabilidad y el flujo.

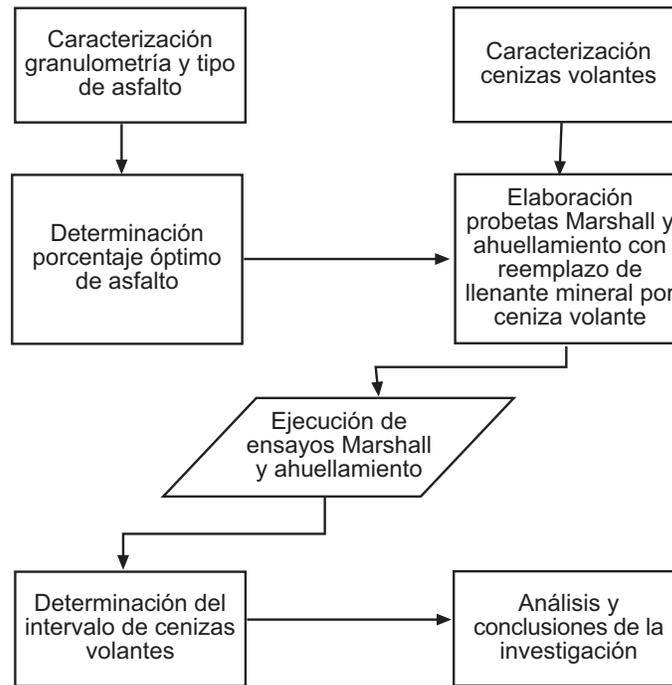
La utilización de las cenizas volantes en la construcción de carreteras se realiza en la estabilización de bases y sub-bases, pero no se han desarrollado estudios en los cuales se evalúe el comportamiento de las cenizas volantes en la mezcla asfáltica, el cual es objetivo de esta investigación.

3. METODOLOGÍA

La metodología empleada para el desarrollo de la investigación inició con la caracterización del material pétreo, el asfalto y las cenizas volantes. Posteriormente, se realizó el diseño Marshall para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto y, por último, se procedió a modificar la mezcla asfáltica reemplazando el llenante mineral (material pasa tamiz número 200) por cenizas volantes en porcentajes de 15%, 30%,

45%, 60%, 75%, 90% y 100% en peso con respecto al llenante mineral. Luego de construidas las muestras para los ensayos de Marshall y de ahuellamiento, se observa el intervalo de porcentajes de reemplazo del llenante mineral, en donde la incidencia de la ceniza volante en la mezcla asfáltica es positiva, y se procedió a profundizar el reemplazo cada 5% en este intervalo para determinar el porcentaje óptimo de ceniza volante que presente un comportamiento favorable. En la Figura 1 se presenta el diagrama de la metodología empleada que se describe a continuación.

Figura 1. Diagrama de la metodología de la investigación



Fuente: presentación propia de los autores.

- a. Caracterización de los materiales y determinación del porcentaje óptimo de asfalto: el material granular fue proporcionado por la empresa Murcia Murcia S.A. El material, conocido como grava, tiene un tamaño máximo de 2,54 cm., y arena con un porcentaje de trituración de 70%. El cemento asfáltico que se utilizó en el desarrollo experimental de esta investigación es conocido como asfalto 60/70.
- b. Caracterización del granular: el material granular se caracterizó por medio de los ensayos de laboratorio que se referencian en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la caracterización de los materiales pétreos

Ensayo	Norma	Resultado
Límite líquido	I.N.V. E - 125	N.L
Límite plástico	I.N.V. E - 126	N.P
Índice de plasticidad	I.N.V. E - 126	N.P
Equivalente de arena	ASTM D 2419	55.8 %
Resistencia al desgaste	ASTM C 131	16.0 %
Peso específico aparente agregado fino	ASTM C 128	3.070 gr/cm ³
Absorción agregado fino	ASTM C128	3.003 %
Peso específico aparente agregado grueso	ASTM C 127	2.641 gr/cm ³
Absorción agregado grueso	ASTM C 127	0.212 %

Fuente: los autores.

- c. Caracterización del asfalto: el asfalto empleado en la investigación posee las características que se relacionan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la caracterización del asfalto

Ensayo	Norma	Resultado
Punto de llama	ASTM D3143-98	293.0 °C
Punto de ignición	ASTM D3143-98	240.50 °C
Punto de ablandamiento	ASTM D36-95	47.50 °C
Viscosidad	ASTM D2170-95	1500
Penetración	ASTM D 5-97	67.5
Peso específico del asfalto sólido	ASTM D 70	0.992 (gr/cm ³)

Fuente: los autores.

- d. Caracterización de la ceniza volante: las características de las cenizas volantes pueden variar significativamente según la fuente de carbón mineral que se queme. La ceniza volante debe cumplir con las especificaciones dadas en la norma ASTM C-618. Para esta investigación se trabajó con cenizas volantes suministradas por la planta generadora de energía eléctrica Termopaipa IV, ubicada al nororiente de Colombia.

La caracterización de la ceniza volante se realiza desde el punto de vista químico y físico, teniendo en cuenta que la ceniza utilizada es tamizada por el tamiz número 200 (Figura 2), para que cumpla con la condición de tamaño máximo para llenante mineral. En el Cuadro 1 se observa la caracterización química de la ceniza volante.

Cuadro 1. Caracterización química de la ceniza volante

Porcentaje de óxidos												
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CAO	MGO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	BAO	SRO	MNO
61.3	23.5	4.2	1.2	1.0	0.73	0.53	1.27	0.31	0.68	0.15	0.2	0.02
Inquemados = 7,6%												

Fuente: Cementos Boyacá

Figura 2. Ceniza volante pasa tamiz número 200



Fuente: presentación propia de los autores.

La caracterización física realizada a la ceniza volante arroja como resultado un peso unitario de $2,162 \text{ g/cm}^3$ y una superficie específica de $6381 \text{ cm}^2/\text{g}$ para la muestra de material de tamiz pasa número 200.

- e. Porcentaje óptimo de asfalto: la granulometría que se empleó es la denominada 0/10, usada en la construcción de pavimentos en la ciudad de Bogotá de acuerdo con el *Reglamento técnico vial* [Uniandes, IDU, 2002]. El porcentaje óptimo de asfalto se determinó por medio del método Marshall (ASTM D 1559), con diez probetas (compacidad de 50 y 75 golpes), dos probetas para cada porcentaje de asfalto (4,5%, 5%, 5,5%, 6% y 6,5%). Las características evaluadas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Diseño del ensayo Marshall

Ensayo	Norma	Resultado	
Porcentaje de asfalto	ASTM D 1559	5 %	
Densidad	ASTM D 1559	2.358 gr/cm^3	
Estabilidad	ASTM D 1559	2867 Lbf	1301 Kg
Fluencia (0,01 pulgadas)	ASTM D 1559	11	2.8 mm

Fuente: los autores.

- f. Preparación de probetas Marshall (incidencia mecánica): el ensayo Marshall evalúa la fluencia y estabilidad del material con respecto al porcentaje de reemplazo del peso de llenante mineral por ceniza volante de acuerdo con la norma ASTM D 1559. A partir del porcentaje óptimo de asfalto, se procedió a preparar dieciséis probetas para el ensayo Marshall, una probeta (compacidad de 50 y 75 golpes) para cada reemplazo de ceniza volante en el llenante mineral (0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75%, 90% y 100%); a partir de estas probetas se determinó la estabilidad, densidad y flujo para cada modificación.

- g. Elaboración de probetas de ahuellamiento (incidencia dinámica): las probetas de ahuellamiento se construyeron con la densidad obtenida en los ensayos Marshall para cada porcentaje de reemplazo de llenante mineral por ceniza volante. Se procedió a realizar la construcción de probetas de ahuellamiento a compacidad de 50 y 75 golpes, con reemplazo de llenante mineral por ceniza volante en porcentajes de 0 a 100% de adición en intervalos de 15%. Los ensayos de ahuellamiento se realizaron teniendo en cuenta la norma INV E - 756, a temperatura constante de 40 °C, esfuerzo de 0,9 MPa y un total de 5.000 pasadas en 120 minutos.

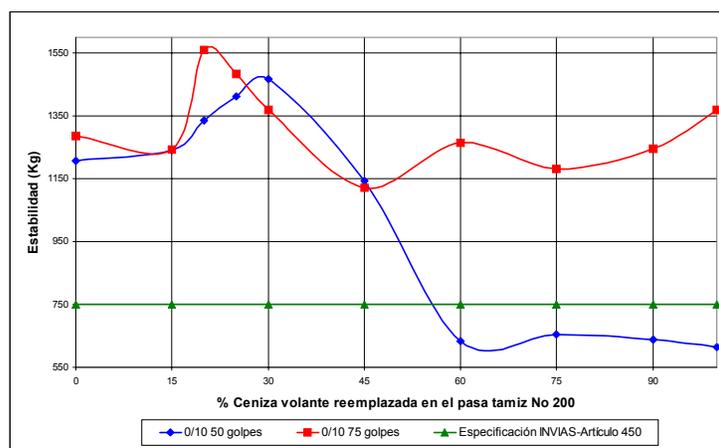
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados se refiere a la ejecución de los ensayos Marshall y ahuellamiento para cada reemplazo de llenante mineral por ceniza volante en porcentajes del 0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75%, 90% y 100%. Se determinó que el intervalo donde la ceniza volante presenta un comportamiento positivo en la mezcla asfáltica es en el rango de reemplazo de 15% a 30%, por lo cual se incrementó el número de muestras en este intervalo. A continuación se relacionan los resultados obtenidos en los intervalos mencionados.

a. Ensayo Marshall

En la Figura 3 se relacionan los resultados obtenidos en cuanto a la evaluación de la estabilidad al reemplazar el llenante mineral por ceniza volante en los porcentajes de 0%, 15%, 20%, 25%, 30%, 45%, 60%, 75%, 90% y 100%. Se observa el mejor comportamiento de la ceniza volante en los porcentajes de reemplazo por llenante mineral de 20% y 25%. Existe de igual forma un descenso relativo de la estabilidad a partir de un porcentaje del 45%, presentándose cambios aleatorios poco confiables en el momento del reemplazo del material.

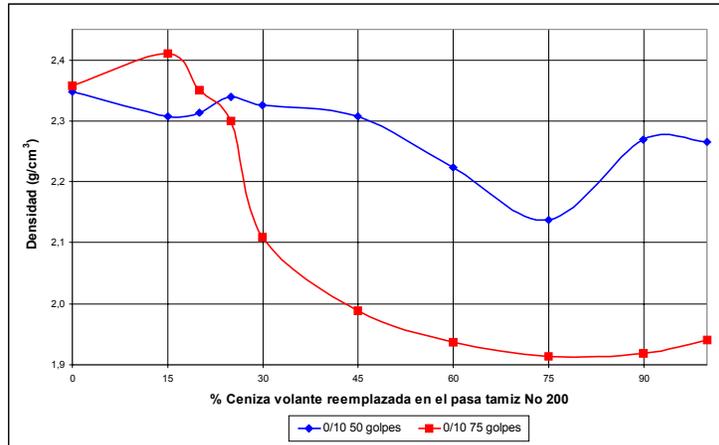
Figura 3. Variación de la estabilidad con respecto al reemplazo de ceniza en el tamiz pasa número 200



Fuente: presentación propia de los autores.

Para el análisis correspondiente a la densidad de la mezcla asfáltica se observa que desde el porcentaje de ceniza de 25%, la densidad disminuye gradualmente. Este comportamiento se puede observar en la Figura 4. La variación del flujo se muestra así mismo en la Figura 5.

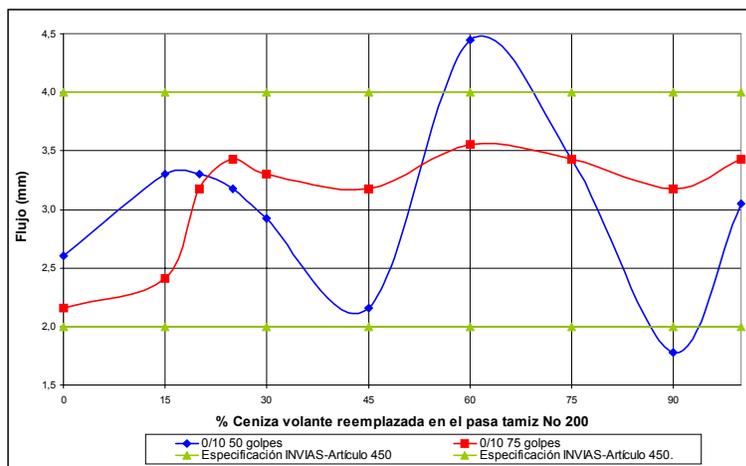
Figura 4. Variación de la densidad con respecto al reemplazo de ceniza en el tamiz pasa número 200



Fuente: presentación propia de los autores.

Para el análisis correspondiente al flujo en la mezcla asfáltica se puede concluir que el reemplazo de ceniza volante se mantiene en el rango de las especificaciones del Invias excepto en porcentajes de adición de ceniza volante mayores al 60%, donde no existe un comportamiento claro de la fluencia en la mezcla asfáltica.

Figura 5. Variación del flujo con respecto al reemplazo de ceniza en el tamiz pasa número 200



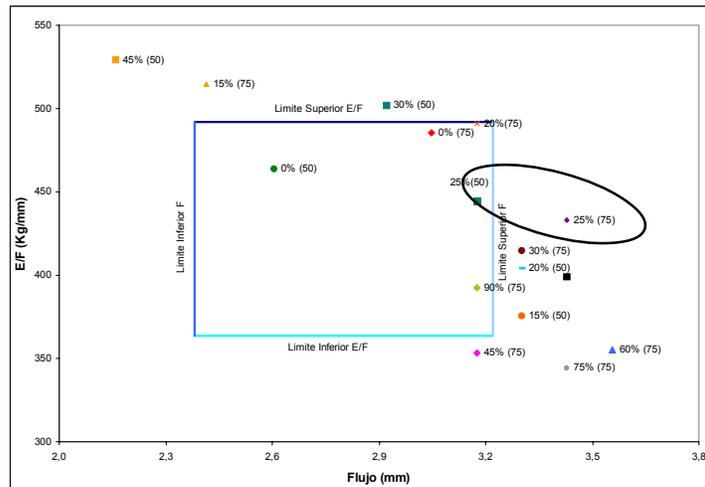
Fuente: presentación propia de los autores.

El comportamiento de la mezcla asfáltica es positivo en cuanto a sus propiedades mecánicas, especialmente en los porcentajes de reemplazo de llenante mineral por cenizas volantes de 20% y 25%.

b. Relación estabilidad-flujo

La relación estabilidad-flujo representa el grado de fragilidad o de ductilidad de una mezcla asfáltica, en donde se puede presentar fisuración temprana o ahuellamiento prematuro, respectivamente. Como valores de estabilidad-flujo se toman aquellos del ensayo Marshall óptimo y se hallan sus límites con respecto a los parámetros de control de calidad de la mezcla asfáltica descritos en el numeral 450.5.2.4 de las especificaciones del Artículo 450-2 de las especificaciones generales de construcción de carreteras [Invias, 2002]. La Figura 6 presenta el análisis de la relación estabilidad-flujo.

Figura 6. Variación de la relación estabilidad-flujo



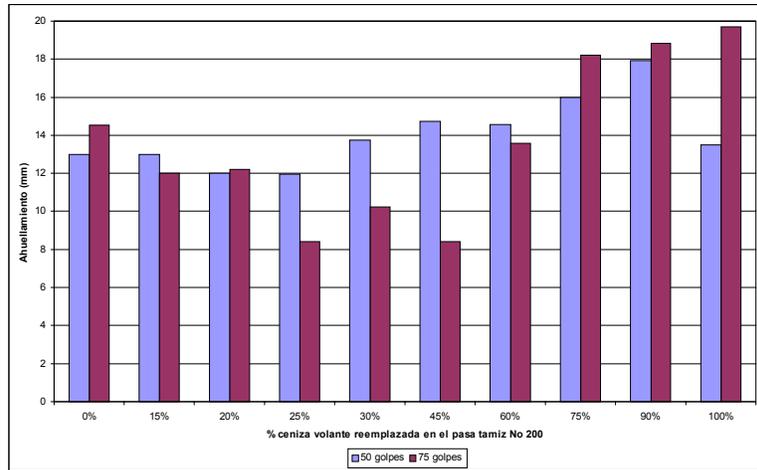
Fuente: presentación propia de los autores.

Se observa que el reemplazo de llenante mineral por ceniza volante en un porcentaje de 25% es favorable, debido a que mejora las propiedades de la relación estabilidad-flujo de la mezcla original y presenta un comportamiento semejante debido al grado de compactación; el flujo obtenido de esta muestra en 75 golpes está por fuera del límite superior del flujo con respecto al valor obtenido en el ensayo Marshall óptimo, pero no excede el flujo máximo de 4mm propuesto en las especificaciones de Invias.

c. Ensayo de deformación plástica

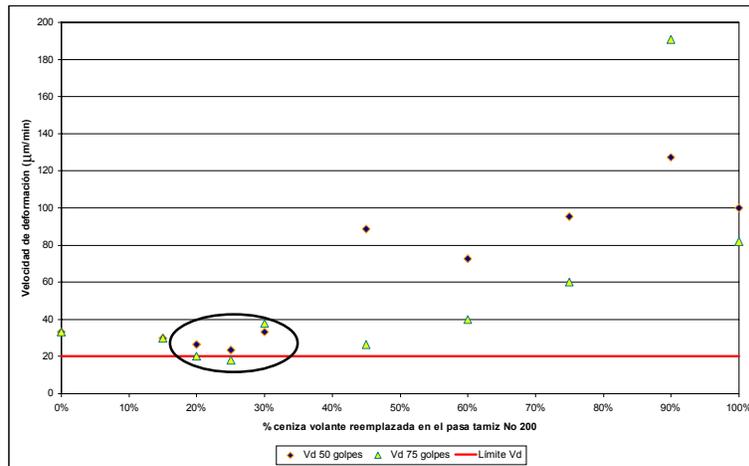
Los resultados obtenidos de los ensayos de ahuellamiento definen la deformación plástica admisible que la mezcla asfáltica presenta por la acción repetida de las cargas o por problemas de ductilidad. Los resultados del ensayo para cada reemplazo de llenante mineral por ceniza volante se muestran en las figuras 7 y 8.

Figura 7. Ahuellamiento con respecto al reemplazo de ceniza volante



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 8. Velocidad de deformación medida en cada porcentaje de reemplazo de ceniza volante



Fuente: presentación propia de los autores.

Desde el punto de vista de la velocidad de deformación medida en el intervalo 105-120 minutos, se deduce que el porcentaje de ceniza volante que posee el mejor comportamiento es aquel con el reemplazo de llenante mineral en 20 y 25%, debido a que está por debajo del rango de 20 mm/min, valor estipulado para una mezcla que tenga una temperatura de servicio menor a 24°C.

El comportamiento de la mezcla asfáltica evaluado en los parámetros de rigidez Marshall (relación estabilidad-flujo) y la velocidad de deformación, muestra el aumento de la resistencia de la mezcla asfáltica en un

porcentaje de reemplazo de llenante mineral por cenizas volantes de 25%, siendo favorable esta adición en la mezcla asfáltica.

5. CONCLUSIONES

Se observa que las cenizas volantes aumentan la resistencia de la mezcla asfáltica sin convertirla en una mezcla rígida que pueda llegar a presentar fisuración temprana por este aumento de rigidez.

Desde el punto de vista de gestión, el aumento en la resistencia mecánica y dinámica en la mezcla asfáltica determina que el periodo de intervención de las vías construidas con este material de desecho es más amplio con lo cual se convierte en una alternativa económica viable en el plan de mantenimiento y rehabilitación de vías en diferentes regiones del país.

Con estos resultados se abre un nuevo uso para las cenizas volantes y se contrarresta el problema ambiental que genera este desperdicio industrial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al programa de formación de jóvenes investigadores de Colciencias, a la Universidad Militar Nueva Granada por el apoyo para la realización de la investigación y a la firma Murcia Murcia S.A. por la donación del material pétreo.

REFERENCIAS

- Colombia. Invías. *Especificaciones generales de construcción de carreteras*. Bogotá: Invías, 2002.
- Martínez, F., Andreoni, R., Poncino, H. *Utilización de cenizas volantes como filler de mezclas asfálticas y agente estabilizador de suelos*. XII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Buenos Aires: s.d., 1997.
- Massaccesi, D.D., Iosco, O. *Evaluación de cenizas volantes de producción nacional para su empleo como "filler" en mezclas asfálticas*. II Congreso Latinoamericano del Asfalto. Mar del Plata: s.d., 1983.
- Moreno, I., Rodríguez, L. *Incidencia de las cenizas volantes en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, 2005.
- National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA). *Adiciones al Cemento. Publicación Técnica. Número 30*. Maryland: NRMCA, 1998.
- Reyes, F. *Diseño racional de pavimentos*. Bogotá: CEJA – ECI, 2003.
- Reyes, O., Camacho, J., Troncoso, J. *Incidencia de las cenizas volantes en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica*. V Jornadas Internacionales del Asfalto. s.d.: s.e., 2005.

- Reyes, O., Reyes, F. “Efecto del uso de desperdicio de una siderúrgica en bases y subbases granulares”. En: *Ingeniería de construcción*, 18 (3), 2003, 165-169.
- Santaella, L., Salamanca, R. “Comportamiento del concreto con bajos porcentajes de ceniza volante (Termopaipa IV) y agua constante. Publicación Técnica”. En: *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 14, 2004, 14-19.
- Uniandes, Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). *Reglamento técnico vial para la ejecución de obras en el sector vial de Bogotá, D.C.* Bogotá: Uniandes-IDU, 2002.