

INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL RELLENO MINERAL EN LA RESISTENCIA DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

ÓSCAR JAVIER REYES*
JHON FREDY RINCÓN**

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación fue determinar el efecto en la resistencia a tracción indirecta de reemplazar el relleno mineral por cemento, cal y ceniza volante con diferentes porcentajes. El estudio se inició con la caracterización de los materiales (agregados, asfaltos, cal, cemento y ceniza volante), seguido de la determinación del porcentaje óptimo de asfalto mediante el método Marshall. Se seleccionaron para el estudio la granulometría MD10 y el asfalto con penetración 60/70, así mismo se sustituyó el relleno mineral en porcentajes de 0, 25, 50, 75 y 100. Se encontró que existe un incremento en la resistencia del 58 % al reemplazar el 100 % de relleno mineral por cal, del 22 % al sustituir el 50 % de relleno por ceniza volante y el 5 % al reemplazar el 75 % por cemento. Con respecto a la deformación de las probetas, para todos los porcentajes de sustitución de cal y cemento, la mezcla soporta mayor deformación para la carga máxima, mientras para el reemplazo de ceniza volante, sólo al 100 % de reemplazo aumenta la deformación con la carga máxima.

PALABRAS CLAVE: resistencia a tracción indirecta; mezcla asfáltica; relleno mineral; ceniza volante; cal; cemento.

INFLUENCE OF CHARACTERISTICS OF MINERAL FILLER IN THE RESISTANCE OF ASPHALT MIXTURE

ABSTRACT

The main objective of the research was to determine the effect in the indirect tension strength when replacing mineral filler by cement, lime, and ash at different percentages. Materials were first characterized (aggregates, asphalt, lime, cement and fly ash). Then, using the Marshall method, was determined the optimum percentage of

* Ingeniero Civil y Magíster en Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes. Docente Asociado y director Grupo de Investigación Geotecnia. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. oscar.reyes@unimilitar.edu.co

** Ingeniero Civil. Ingeniero Auxiliar de Investigación, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. fredy.rincon@umng.edu.co

asphalt. Gradation m10 and asphalt with penetration 60/70 was chosen for the study, similarly, mineral filler was replaced on the percentages of 0, 25, 50, 75, 100. Strength was increased 58 % by substituting 100 % of mineral filler for lime, from 22 % to replace 50 % filler by fly ash, and 5 % by 75 % replacing cement, were the main findings of this study. In addition, it was found in relation to the deformation test, for all percentages of replacement of lime and cement, the mixture supports higher deformation to the maximum load. Whereas that, for replacement of fly ash, only 100 % replacement of the deformation increased with the maximum load.

KEY WORDS: indirect tensile test; asphalt mixture; filler; fly ash; lime; cement.

INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO RECHEADO MINERAL NA RESISTÊNCIA DE UMA MISTURA DE ASFALTO

RESUMO

O objetivo principal desta pesquisa foi determinar o efeito na resistência à tração indireta de substituir o recheado mineral por cimento, cal e cinza volante a diferentes percentagens. O estudo se iniciou com a caracterização dos materiais (áridos, asfaltos, cal, cimento e cinza volante), seguido da determinação da percentagem ótima de asfalto mediante o método Marshall. Selecionou-se para o estudo a granulometria MD10 e o asfalto com penetração 60/70, assim mesmo se substituiu o recheado mineral às percentagens de 0, 25, 50, 75 e 100. Encontrou-se que existe um aumento na resistência de 58 % ao substituir 100 % supérfluo mineral por cal, de 22 % ao substituir 50 % de recheado por cinza volante e 5 % ao substituir 75 % por cimento. Com relação à deformação das provetas, para todas as percentagens de substituição de cal e cimento, a mistura suporta maior deformação para a carga máxima, enquanto para a substituição de cinza volante, só a 100 % de substituição aumenta a deformação com a carga máxima.

PALAVRAS-CÓDIGO: resistência à tração indireta; mistura de asfalto; recheio mineral; cinza volante; cal; cimento.

1. INTRODUCCIÓN

El pavimento flexible es una estructura que se diseña mediante la realización de varios cálculos y modelos matemáticos, pero como complemento a éstos los ensayos de laboratorio desempeñan un papel importante, pues se encargan de evaluar las propiedades de los materiales que se van a usar para el desarrollo de una estructura, y, a su vez, garantizan que se cumpla con los requisitos impuestos por las especificaciones técnicas. Una de las principales propiedades mecánicas que se evalúan en el laboratorio es la resistencia máxima que soporta una mezcla asfáltica antes de fallar, y para medirla se utiliza un método simple y representativo del comportamiento del pavimento flexible, como es el ensayo de trac-

ción indirecta o más comúnmente llamado ensayo brasileño (Bianchetto, Miró y Pérez, 2007).

El ensayo a tracción indirecta por compresión diametral consiste en someter una muestra cilíndrica a una carga lineal a compresión estática o dinámica, en dos generatrices opuestas. Dado el desarrollo del plano determinado por las generatrices de aplicación de la carga, mediante un cálculo sencillo se pueden obtener la resistencia a tracción, la deformación y el módulo de rigidez del material ensayado (Subarroca y Ortiz, 2005).

Una de las propiedades principales de las mezclas asfálticas es su capacidad para deformarse sin llegar a la rotura, absorbiendo esfuerzos elevados y cíclicos. Este comportamiento de resistencia al corte



con sus dos componentes, la cohesión y la fricción, se observa en las mezclas asfálticas, siendo los áridos la estructura friccionante, y la cohesión, la mezcla de asfalto con las partículas finas o relleno mineral. En este artículo se presentan los resultados de la investigación de modificar el relleno natural de la mezcla asfáltica por cemento, cal o ceniza volante en diferentes porcentajes, con el objetivo de determinar su influencia en la resistencia, cohesión y adherencia.

2. BASES TEÓRICAS

Una probeta cilíndrica de pavimento a temperaturas bajas se comporta como un material elástico y lineal, por lo que es posible hacerle un análisis teórico de las distribuciones de los esfuerzos (Martínez, 2000). Tomas W. Kennedy y W. Ronald Hudson (1968) explican los esfuerzos que se originan cuando una probeta es ensayada diametralmente como la composición de dos planos principales de esfuerzos, uno vertical y otro horizontal. La magnitud del esfuerzo vertical es variable (figura 1a), mientras que la del esfuerzo a tracción es uniforme en casi todo su plano (figura 1b).

El análisis de rotura de probetas cilíndricas de mezclas asfálticas sometidas a compresión diametral muestra que la fisura inicial ocurre cuando el esfuerzo horizontal de tracción desarrollado en el plano vertical de la carga alcanza el valor de la resistencia a tracción del material.

Las probetas de pavimento se comportan como un sólido elástico ideal a temperaturas bajas; en el caso de las mezclas asfálticas la falla se da por rotura o por tracción; por consiguiente, la ecuación que describe la resistencia a la tracción indirecta es:

$$S_t = \frac{2 \cdot P_{m\acute{a}x}}{\pi \cdot t \cdot d} \quad (1)$$

donde:

- S_t : resistencia a la rotura por tracción indirecta
- $P_{m\acute{a}x}$: carga máxima o carga de rotura
- t : espesor de la probeta de la probeta
- d : diámetro de la probeta

Para el ensayo se utiliza una placa curva de carga de apoyo de 20 mm de ancho y a lo largo de la muestra, cuya función es reducir los esfuerzos de

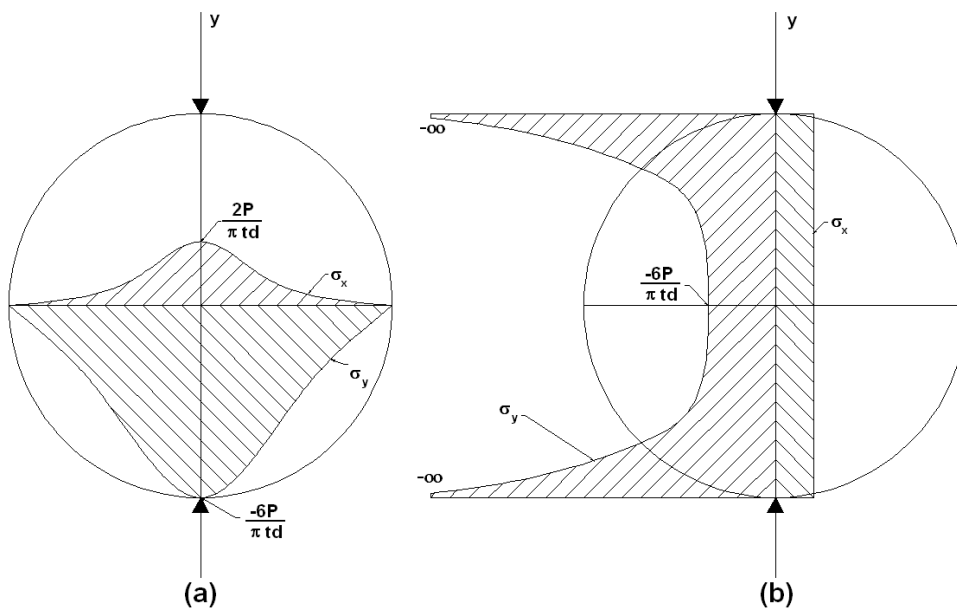


Figura 1. Distribución de esfuerzos teóricos sobre los planos diametral y vertical para el ensayo de tracción indirecta (Yoder y Witczak, 1975)

compresión vertical, para que la probeta no falle en los puntos de carga debido a los esfuerzos de compresión (figura 2), sino que lo haga por el esfuerzo de tracción desde el centro de la probeta. Se tiene como resultado la distribución de esfuerzos que muestra la figura 3 (Moreno, 2005).

3. METODOLOGÍA Y MATERIALES

En la figura 4 se presenta el diagrama de la metodología empleada en la investigación, empezando

por la selección de la granulometría, tipo de asfalto y caracterización de los materiales. Con la ayuda del método Marshall, se determinó el porcentaje óptimo de asfalto mediante el análisis de estabilidad, densidad y flujo (INVIAS, 1997); (Asphalt Institute, 1996). A continuación con este valor, se hicieron los reemplazos de relleno por cal, cemento y ceniza volante con diferentes porcentajes (25, 50, 75 y 100) (Reyes y Camacho, 2004). Por último, se realizaron los ensayos de tracción indirecta a 15 ° C según norma UNE-EN-12697-23.

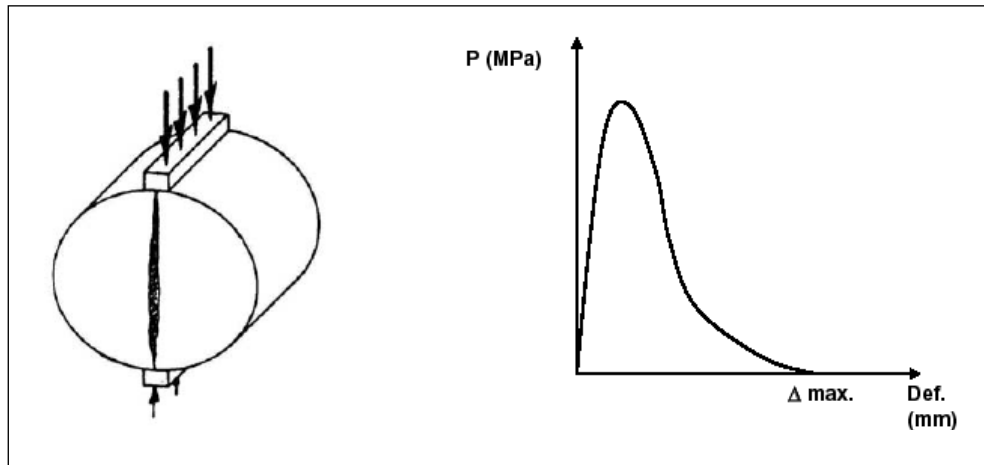


Figura 2. Configuración del ensayo y respuesta de la probeta (Pérez, Miró y Martínez, 2006; Cepeda, 2004)

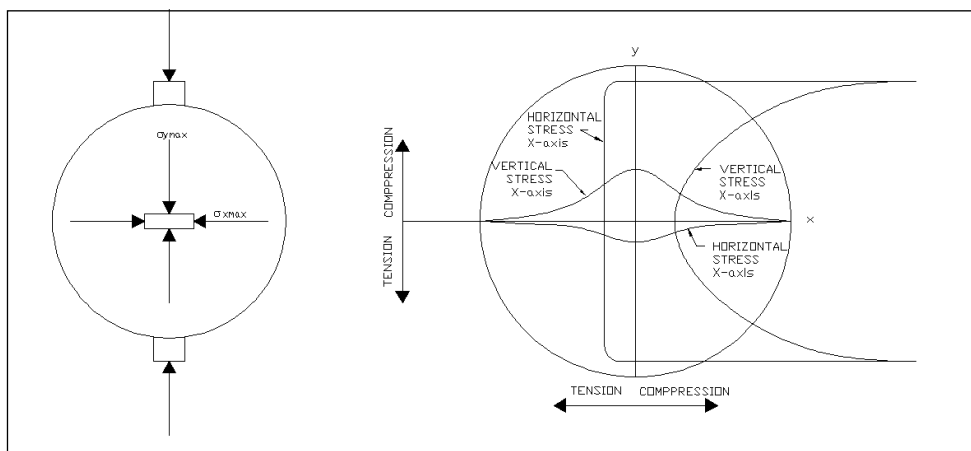


Figura 3. Distribución de esfuerzos en probeta sometida a una carga aplicada sobre placa de carga de apoyo curva. Fuente: Kennedy y Hudson (1968), Said (1996)

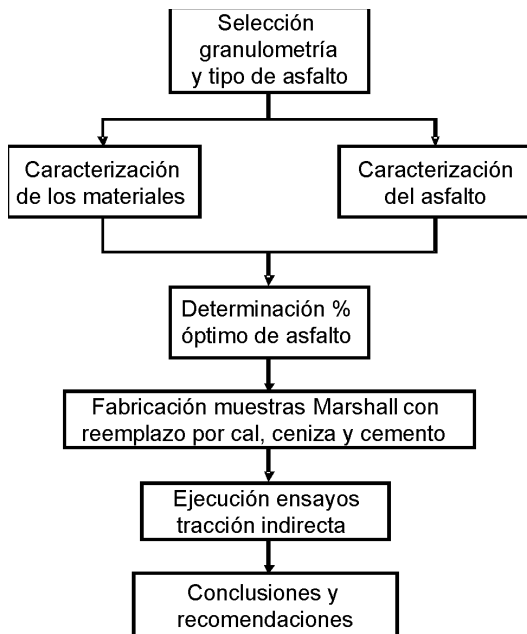


Figura 4. Metodología usada en la investigación

3.1 Selección de granulometría y tipo de asfalto

La granulometría usada en la investigación corresponde a la denominada MD10 en su parte media

(figura 5) y es la empleada para la construcción de pavimentos en la ciudad de Bogotá, según las especificaciones del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU, 2006) y el asfalto utilizado lo produce la refinera de Barrancabermeja.

3.2 Caracterización del material granular y el asfalto

El material granular se caracterizó realizando los ensayos de laboratorio que aparecen en la tabla 1.

Tabla 1. Características del material granular

Ensayo	Norma	Resultado
Absorción agregado grueso	ASTM C 127	3,36 %
Peso específico aparente	ASTM C 127	2,38
Absorción agregado fino	ASTM C 128	2,57 %
Peso específico aparente	ASTM C 128	2,46
Desgaste agregados	ASTM C 535	25,6 %

El asfalto se caracterizó aplicando los ensayos de laboratorio que aparecen en la tabla 2.

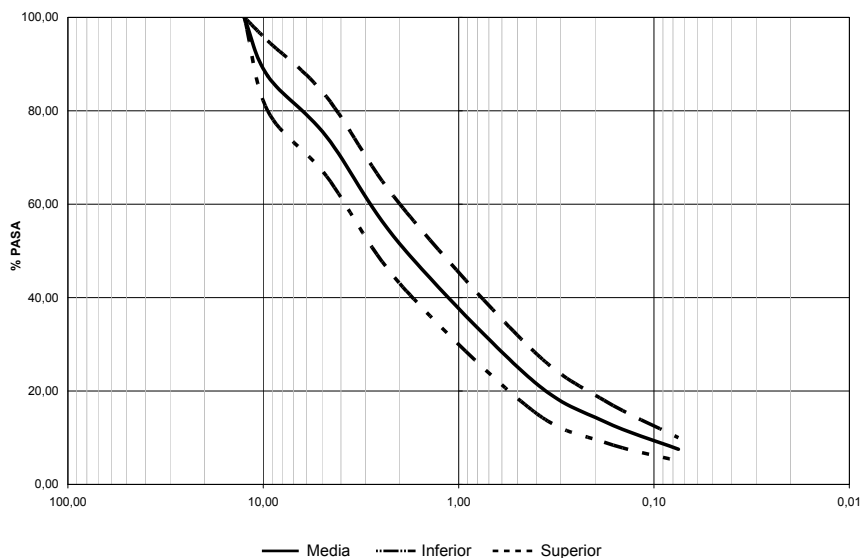


Figura 5. Granulometría usada en la investigación

Tabla 2. Características del asfalto

Ensayo	Norma	Resultado
Penetración	ASTM D 5-97	62
Ductilidad	ASTM D 113-99	115 cm
Viscosidad	ASTM D 2170-95	1500 poises
Punto de ablandamiento	ASTM D 36-95	43 °C
Punto de llama e ignición	ASTM D 3143-98	220 °C y 225 °C

Cemento 2,83 t/m³
 Ceniza volante 2,18 t/m³
 Cal 2,52 t/m³

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los pesos específicos de los tres materiales que se usaron como reemplazo de relleno natural fueron:

El porcentaje óptimo de asfalto determinado con el ensayo Marshall fue de 6,0, obtenido del análisis de las curvas de estabilidad (figura 6), densidad (figura 7) y flujo (figura 8).

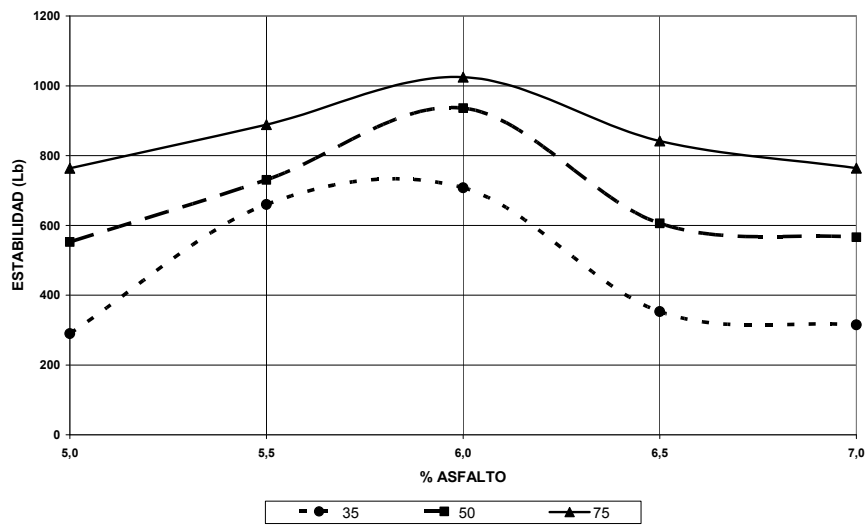


Figura 6. Estabilidad - % asfalto

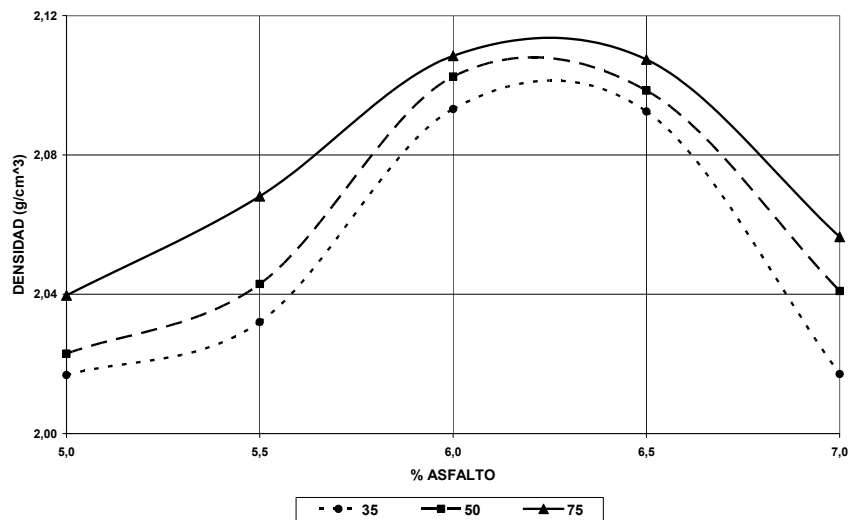


Figura 7. Densidad - % asfalto

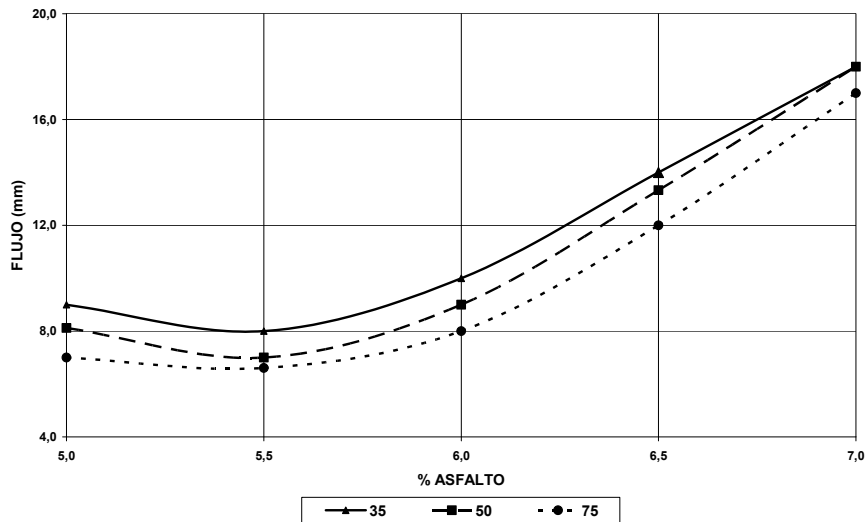


Figura 8. Flujo - % asfalto

Los resultados de la resistencia máxima alcanzada a tracción indirecta para las muestras modificadas con cal, cemento y ceniza volante a diferentes porcentajes se presentan en la figura 9.

De las figuras 9 y 10 se observa que al sustituir el relleno natural por cal y ceniza volante, la resistencia de las muestras sube sin importar el porcentaje sustituido, alcanzando incrementos máximos entre el 58 % y 22 % respectivamente. En el caso del cemento, se presentan solo incrementos de resistencia del orden del 5 % para el reemplazo del 75 % y del 2 % para el reemplazo del 50 %.

De otra parte, en las figuras 11, 12 y 13 se observan las curvas de desplazamiento contra resistencia de las muestras ensayadas.

De la figura 11 se observa que la probeta con relleno mineral soporta menor desplazamiento que las muestras con reemplazo con cal, evidenciando que, al introducir cal a la muestra, la mezcla asfáltica gana ductilidad, lo que se ve representado en soportar magnitudes mayores impuestas por el tráfico. Adicionalmente, se observa que se gana resistencia en el reemplazo de llenante mineral.

Las sustituciones más favorables en deformación fueron las de 25 % y 50 %, y en resistencia, las de 75 % y 100 %.

De la figura 12 se puede concluir que al reemplazar el relleno por ceniza volante al 100 %, la mezcla asfáltica soporta mejor las deformaciones e incrementa su resistencia. Para el caso del resto de porcentajes de reemplazo (25, 50 y 75), la resistencia de las muestras aumenta, pero disminuye su deformación, haciéndolas más susceptibles de fallos por fragilidad.

De la figura 13 se puede determinar que, para todos los reemplazos de relleno natural por cemento, la deformación de las mezclas aumenta, presentándose el mayor valor para el 100 % de reemplazo. Es importante resaltar que, aunque el incremento en resistencia no es significativo o en oportunidades disminuye con la sustitución, la capacidad para soportar deformaciones mejora en forma sustancial al introducirle cemento.

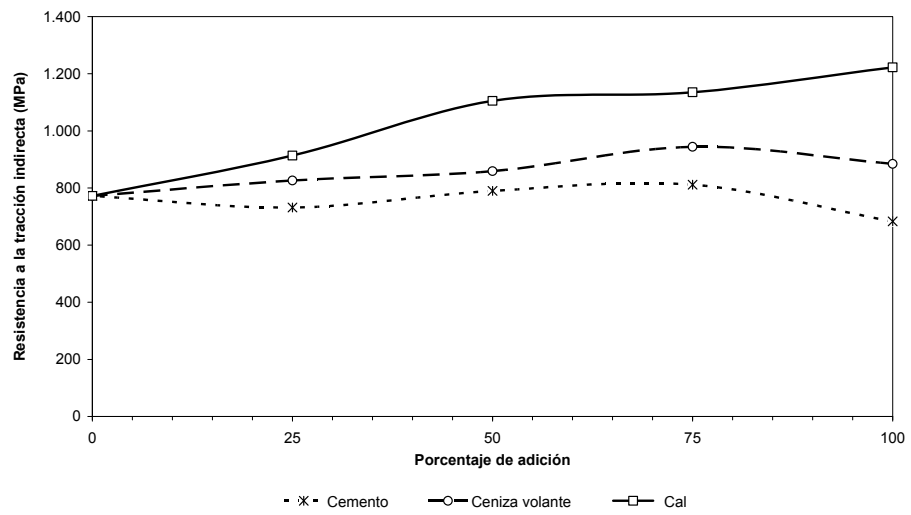


Figura 9. Resistencia a la tracción indirecta de mezcla asfáltica modificando el llenante mineral con cal, cemento y ceniza volante

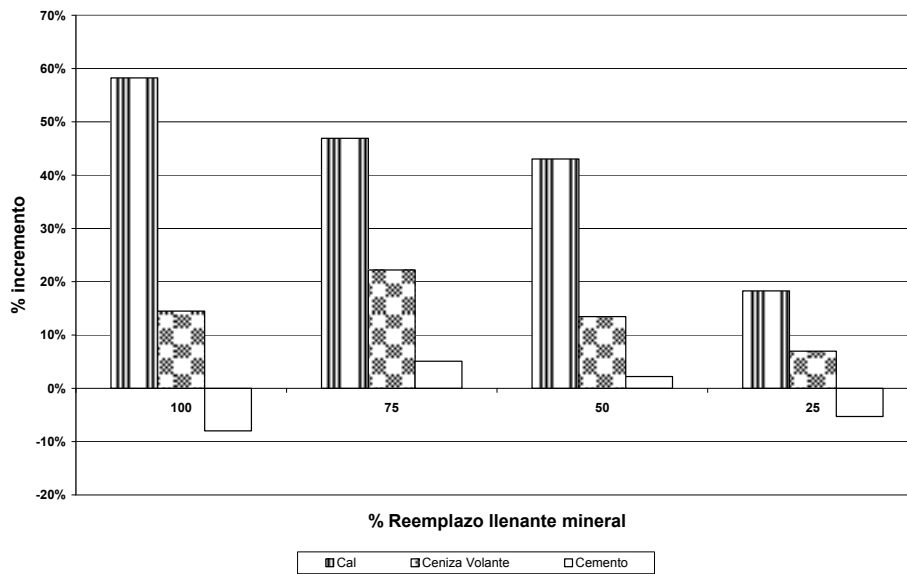


Figura 10. Incremento de la resistencia al reemplazar cal, cemento y ceniza volante por el llenante mineral

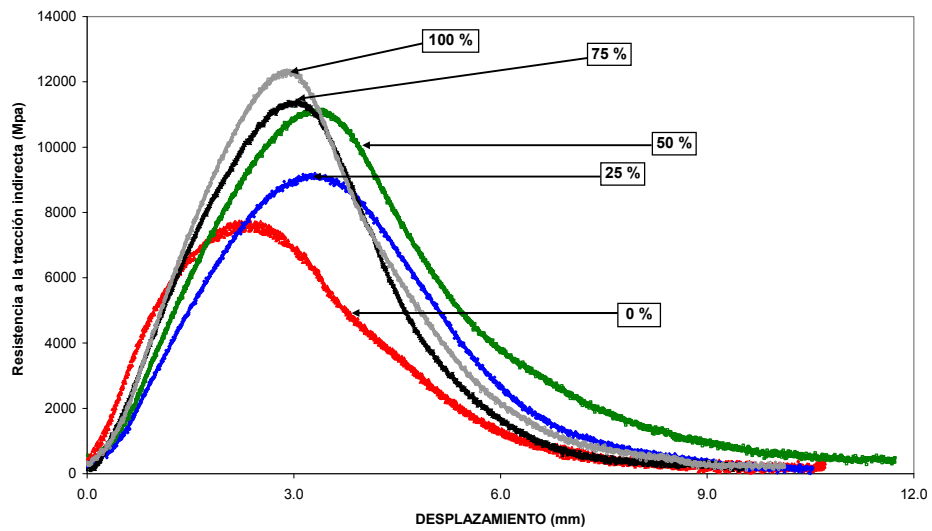


Figura 11. Resistencia a la tracción indirecta de muestras con reemplazo de cal contra desplazamiento

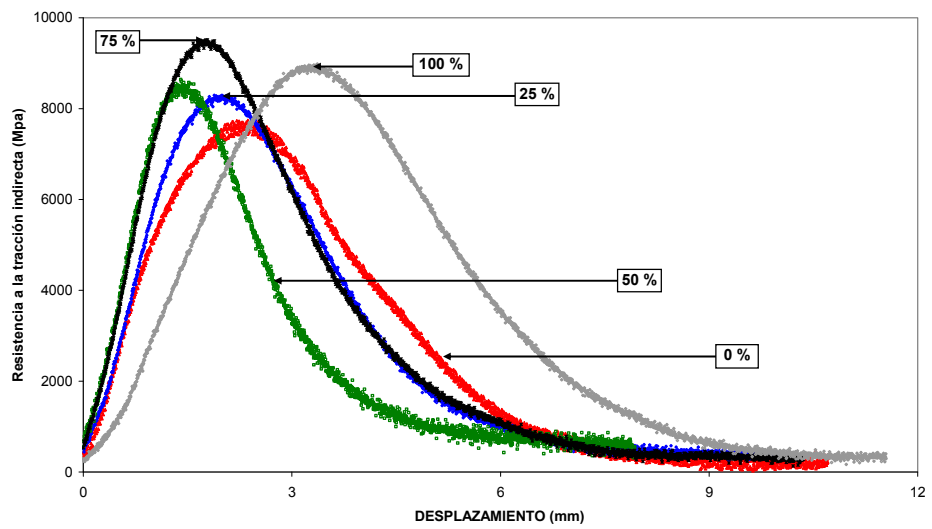


Figura 12. Resistencia a la tracción indirecta de muestras con reemplazo de ceniza volante contra desplazamiento

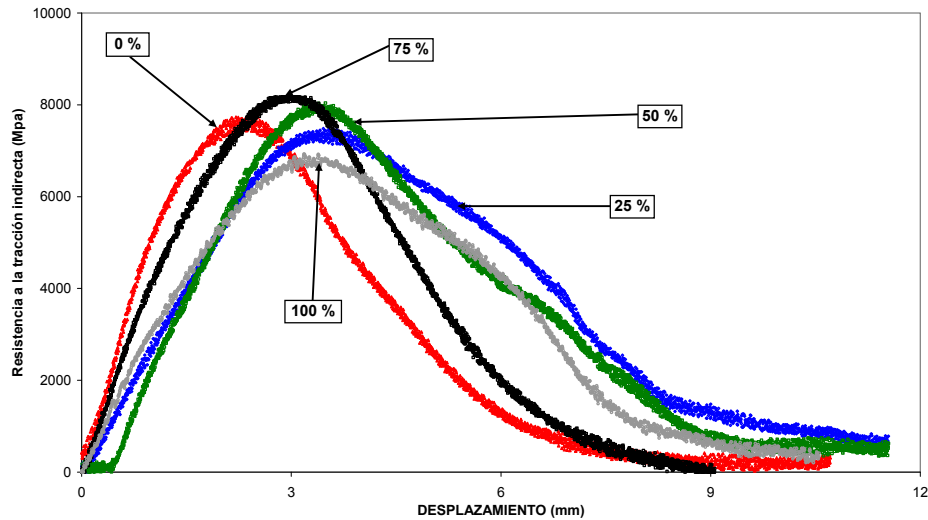


Figura 13. Resistencia a la tracción indirecta de muestras con reemplazo de cemento contra desplazamiento

5. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos de los ensayos hechos a las muestras con reemplazo de relleno natural por cal, cemento y ceniza volante, se puede concluir que:

La resistencia a la tracción indirecta de la mezcla asfáltica con granulometría MD-10 aumenta al sustituir el relleno natural por cal, cemento o ceniza volante.

El incremento máximo en la resistencia de la mezcla se obtuvo cuando se reemplaza el 100 % del relleno natural por cal.

Existe mayor ductilidad de la mezcla al reemplazar el relleno natural por cemento o cal en los diferentes porcentajes estudiados.

Para el caso del reemplazo del 100 % de relleno natural por ceniza volante, la deformación y resistencia aumentan, haciendo que la mezcla sea más dúctil y resistente a los esfuerzos del tráfico.

Para los reemplazos de relleno natural por cemento en todos los porcentajes estudiados, aunque no exista un incremento significativo en la resistencia máxima, la deformación aumenta, haciendo que la mezcla sea más dúctil y, por ende, más resistente a la fatiga.

La resistencia de la mezcla aumenta para altos reemplazos de relleno natural por cal (50 al 100 %) y para reemplazos medios (50 y 75 %) por cemento y ceniza volante.

Del análisis conjunto de la resistencia y la ductilidad de la mezcla, se puede establecer que los mejores comportamientos se producen cuando hay un reemplazo de relleno natural por cal, sin importar el porcentaje utilizado. Sin embargo, para cada material utilizado en el estudio, los óptimos ocurren cuando se reemplaza el 50 % de relleno natural por cal, seguido de la sustitución del 100 % por ceniza volante y, por último, el 25 % de cemento.



REFERENCIAS

- Asphalt Institute. *Performance graded asphalt binder specification and testing*. Serie 1. 1996.
- Asphalt Institute. *Superpave mix design*, Serie 2. (SP-2). 1996.
- Bianchetto, H., Miró, R. y Pérez, F. "Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de filleres comerciales". *Revista Infraestructura Vial*, No. 17 (feb. 2007). Costa Rica.
- Cepeda, Jorge. *Mejoras al diseño de mezclas asfálticas mediante el ensayo de compresión diametral*. México D. F., 2004.
- Instituto de Desarrollo Urbano –IDU–. *Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá*. 2006.
- Instituto Nacional de Vías –INVÍAS–. *Especificaciones técnicas*. Escuela Colombiana de Ingeniería. 1997.
- Kennedy, T. W. and Hudson, W. R. (1968). "Application of the indirect tensile test to stabilized materials". *Highway Research Record*, No. 235, Highway Research Board, pp. 36-48.
- Martínez, A. Aseguramiento de la calidad de mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución. Tesis doctoral del Departamento de Infraestructura del Transporte y Territorio de la ETSECCPB-UPC, Barcelona, 2000.
- Moreno Rubio, J. Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas. Tesina de especialidad ETSECCPB-UPC. Barcelona, 2005.
- Pérez, F.; Miró, R. y Martínez, A. *Ensayos de Mezclas bituminosas: nuevos criterios*. XVII Seminario de Ingeniería de Carreteras. Zaragoza, 2006.
- Reyes, Óscar y Camacho, Javier. "Incidencia en el ahuecamiento y propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica por la adición de desperdicio de llanta usada". *Revista Ingeniería y Competitividad*, vol. 6, No. 2 (dic. 2004).
- Said, Safwat F. Fatigue and stiffness properties of roadbase layer using indirect tensile test. Swedish Road and Transport Research Institute. Euroasphalt & Eurobitume Congress, 1996.
- Subarroca, Mar y Ortiz, J. *Aspectos que influyen en la repetibilidad del ensayo a tracción indirecta realizado sobre testigos de mezclas bituminosas caliente*. Madrid: Asefma, 2005.
- UNE-EN-12697-23 *Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas a 15 °C*. AENOR. 2007.
- Yoder, E. and Witczak, E. *Principles of pavement design*. John Wiley & Sons, 2nd ed. (USA), pp. 257-262, 1975.