

Artículo de Investigación/Research Article

## **Influencia de la Temperatura de Compactación Sobre la Resistencia Bajo Carga Monotónica de Mezclas Asfálticas Modificadas con Grano de Caucho Reciclado de Llantas**

### **Influence of Compaction Temperature on Resistance Under Monotonic Loading of Crumb-Rubber Modified Hot-Mix Asphalts**

Hugo A. Rondón-Quintana<sup>1</sup>  
Yennifer Molano-Mora<sup>2</sup>  
Angélica M. Tenjo-Lancheros<sup>3</sup>

Fecha de recepción: 14 de junio de 2012  
Fecha de aceptación: 31 de agosto de 2012

- 
- 1 Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá-Colombia, harondonq@udistrital.edu.co
  - 2 Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá-Colombia, ymolanom@correo.udistrital.edu.co
  - 3 Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá-Colombia, angelicamtl@gmail.com

**Resumen**

El presente estudio, evaluó en laboratorio la influencia de la temperatura de compactación sobre la resistencia mecánica bajo carga monotónica (Marshall) de mezclas asfálticas en caliente modificadas con grano de caucho reciclado (Gcr), haciendo énfasis en su aplicación en la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia), ya que bajo las condiciones climáticas de dicha ciudad, se ha reportado en obra disminución de la temperatura de compactación con respecto a la óptima (hasta 30°C). Las mezclas fueron fabricadas modificando por vía húmeda los dos cementos asfálticos que se producen en Colombia (CA 60-70 y CA 80-100), se emplearon dos granulometrías y fueron compactadas bajo temperaturas de 120, 130, 140 y 150°C, siendo esta última la temperatura de compactación inicial o de referencia de las mezclas. Como conclusión general, se reporta que la disminución de la temperatura de compactación (hasta 30°C), genera una pequeña disminución en la resistencia bajo carga monotónica de las mezclas modificadas ensayadas. Adicionalmente, se observa un incremento de dicha resistencia cuando se compactan bajo una temperatura de 10°C por debajo de la de referencia. Las mezclas convencionales (sin Gcr) por el contrario experimentaron un decaimiento lineal en su resistencia de hasta 34%.

**Palabras clave**

Mezclas asfálticas, asfaltos modificados, Gcr, temperatura de compactación, resistencia bajo carga monotónica.

**Abstract**

The influence of compaction temperature on resistance under monotonic loading (Marshall) of Crumb-Rubber Modified (CRM) Hot-Mix Asphalt (HMA) was evaluated. The emphasis of this study was the application in Bogotá D.C. (Colombia). In this city the compaction temperature of HMA mixtures decreases, compared to the optimum, in about 30°C. Two asphalt cements (AC 60-70 and AC 80-100) were modified. Two particle sizes distribution curve were used. The compaction temperatures used were 120, 130, 140 and 150°C. The decrease of the compaction temperature produces a small decrease in resistance under monotonic loading of the modified mixtures tested. Mixtures without CRM undergo a lineal decrease in its resistance of up to 34%.

**Keywords**

Asphalt mixture, modified asphalt, CRM, compaction temperature, resistance under monotonic loading.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Generalidades

La llanta proveniente de neumáticos usados es tal vez uno de los elementos que más se desechan en el mundo. Aproximadamente 300 millones de llantas de neumático son desechadas anualmente en los Estados Unidos (Putman, 2005; Shenet *al.*, 2007; Zhonget *al.*, 2002). De acuerdo con Botero *et al.* (2005), en Puerto Rico se produce un neumático de desecho por habitante por año (1 neu/hab/año). Según Neto *et al.* (2003), en Brasil se producen anualmente cerca de 45 millones de llantas, de las cuales 30 millones son desechadas. Magalhães *et al.* (2003) menciona que en Brasil existen aproximadamente 900 millones de neumáticos colocados de manera inapropiada en el medio ambiente. Para el caso de México se estima que anualmente se desechan unos 25 millones de llantas con un peso aproximado de 250 000 toneladas.

Este valor equivale a un cuarto de llanta por habitante por año. Colombia no es la excepción en este tema, de acuerdo con el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010), un estudio realizado por la Unión Temporal OCADE LTDA / SANIPLAN / AMBIENTAL S.A., concluyó que durante el año 1999 se generaron 1 981 375 unidades de llantas usadas para la ciudad de Bogotá D.C. Para mediados de agosto del año 2010 se estimó una generación de llantas usadas en la ciudad de Bogotá D.C. de 2 642 938, es decir, un 25% más que el año 1999. Adicionalmente, en el marco nacional se estimó para el año 2008 un consumo de 4 493 092 de llantas. Estos desechos generan un alto impacto negativo al ambiente, ya que por lo general son almacenados, incinerados al aire libre o utilizados como fuente alterna de energía en hornos artesanales que no cuentan con la tecnología y los sistemas de filtrado apropiados para disminuir los gases y compuestos que contaminan el aire de la atmósfera.

Las llantas de los neumáticos desechados pueden ser reutilizadas. Uno de los usos más empleados en el mundo, es la de aprovechar el grano de llanta de neumático molido o triturado (Gcr), para modificar las propiedades del cemento asfáltico y/o mezclas asfálticas. Cuando se utiliza esta técnica, se pretende mejorar el com-

portamiento que experimentan las mezclas tradicionales, cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente. Por lo general, las propiedades que se intentan mejorar son la rigidez, la resistencia bajo carga monotónica, al ahuellamiento, a la fatiga, al envejecimiento, y disminuir la susceptibilidad térmica. El uso de esta tecnología, es también frecuente cuando es necesario que la capa asfáltica posea una vida útil más larga de lo normal, o aplicaciones especializadas en donde el uso de asfaltos modificados permiten espesores más delgados de capas asfálticas de lo que normalmente se requiere. La tecnología de modificar materiales asfálticos con caucho no es reciente. A mediados del siglo XIX apareció en Inglaterra la primera patente de un ligante asfáltico modificado con caucho natural (Allison, 1967). Estudios sobre modificación de asfaltos con grano de llanta triturada (Gcr) han sido desarrollados desde los años 50 (Hanson *et al.*, 1994). Sin embargo, fue solo hasta los años 60 que Charles H. MacDonald descubrió con éxito una forma de incorporar el Gcr al asfalto, y a dicha mezcla la denominó «asfalto-caucho». Una descripción histórica detallada sobre el tema de asfaltos y mezclas modificadas con Gcr puede ser consultada en Carlson y Zhu (1999).

Cuando se utiliza la tecnología de los asfaltos modificados, la mayor parte de los ligantes que se modifican utilizan polímeros elastoméricos. Dentro de la gama de los elastómeros, los más utilizados son el caucho natural o látex obtenido de la Hevea (más conocida como árbol de caucho), el estireno-butadieno-estireno (SBS por sus siglas en inglés), cauchos sintéticos derivados del petróleo (SBR) y el caucho triturado de llanta de neumático Gcr. De todos los anteriormente mencionados, aquel que ofrece los mayores beneficios ambientales, técnicos y económicos para modificar las propiedades de mezclas asfálticas es el Gcr.

Actualmente, Colombia cuenta con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías – INVIAS (2007), para la caracterización de cementos asfálticos (CA) modificados. Dentro de la clasificación general se cuentan con cinco tipos de CA modificado: el tipo I utiliza como modificador polímeros del tipo Etileno Vinil Acetato (EVA) o Polietileno, y se recomienda su utilización para la fabricación de mezclas drenantes. Los tipos II, III y IV utilizan copolímeros del tipo estirénico como

modificadores, tales como el Estireno-Butadieno-Estireno (SBS). El tipo II se recomienda para la fabricación de mezclas drenantes y de concreto asfáltico; el tipo III se recomienda para la fabricación de mezclas discontinuas y de concreto asfáltico en zonas de alta exigencia, y el tipo IV para la fabricación de mezclas antirreflectivas como las del tipo arena-asfalto. El tipo V es un CA modificado para la elaboración de mezclas de alto módulo. Para el caso de la ciudad de Bogotá D.C., se cuenta con una especificación para la *Aplicación de Grano de Caucho Reciclado (Ger) en mezclas asfálticas en caliente (vía húmeda)*, según Resolución No. 3841 del 5 de septiembre de 2011 (Instituto de Desarrollo Urbano – IDU y Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2011). En dicha especificación se describen los objetivos, alcances, tipos de materiales, condiciones para el recibo de los trabajos, la forma de producción del asfalto-caucho y la forma de medida y pagos entre otros aspectos. Para hacer un resumen de los aspectos más importantes de la especificación, en las Tablas 1 a 3 se presentan los intervalos recomendados para realizar la modificación del cemento asfáltico con el Ger, los requisitos mínimos de calidad que debe cumplir el asfalto-caucho y las mezclas fabricadas con este ligante. Dichas especificaciones, son producto principalmente de estudios realizados en laboratorio y pista de prueba a escala real (carrusel de fatiga) por el IDU & la Universidad de Los Andes (2002, 2005).

Tabla 1. Valores característicos recomendados para modificar el CA con el Ger.

Fuente: Autores

| Variables                             | Unidad                        | Mínimo | Máximo |
|---------------------------------------|-------------------------------|--------|--------|
| Cantidad de Ger                       | % (sobre la masa del ligante) | 10     | 20     |
| Tiempo de reacción                    | Minuto                        | 55     | 75     |
| Velocidad de agitación en laboratorio | rpm                           | 100    | 750    |
| Temperatura de mezclado               | °C                            | 155    | 170    |

Un estado del conocimiento completo sobre el tema, la descripción de las ventajas y desventajas de la utilización del asfalto modificado con Ger, así como la justificación técnica, económica y

ambiental de dicha utilización en Colombia puede ser consultada en Rondón (2011).

Tabla 2. Especificación de asfalto modificado con Gr. Fuente: Autores

| Característica                       | Unidad                   | Norma de ensayo | Mínimo | Máximo |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------------|--------|--------|
| Viscosidad Brookfield 163°C          | Pa-s                     | ASTM D 4402-87  | 1,5    | 3,0    |
| Penetración a 25°C                   | 0,1 mm                   | INV E-706       | 40     | 60     |
| Punto de ablandamiento               | °C                       | INV E-712       | -      | 55     |
| Pruebas al residuo después del RTFOT |                          |                 |        |        |
| Pérdida de masa                      | %                        | INV E-720       | -      | 1      |
| Penetración                          | % (penetración original) | INV E-706       | 65     | -      |
| Recuperación elástica                | %                        | AASHTO T-301-95 | 50     | -      |

Tabla 3. Propiedades mínimas de mezclas modificadas con asfalto-Gr. Fuente: Autores

| Ensayo  | Norma        | Valores admisibles   |
|---|--------------|----------------------|
| Marshall  |              |                      |
| Compacidad  | INV. E-748   | =97%                 |
| Resistencia conservada tras inmersión                               | INV. E-738   | >75%                 |
| Ahuellamiento, Máxima velocidad de deformación en 105 a 120 minutos | INV. E-756   | >75%<br>20 mm/min    |
| Módulo a 15°C y 10 Hz   | INV. E-754   | >4600 MPa            |
| Fatiga, $\epsilon_6$ (15°C, 25 Hz)                                  | NF P 989-261 | 1800x10 <sup>6</sup> |

## 1.2 Resumen Estado del Conocimiento

Estudios sobre el efecto de la temperatura de compactación en las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente convencionales (sin modificador) y modificadas han sido

ampliamente reportados desde los años 50 (p.e., Kennedy *et al.*, 1984; Parker, 1950; Serafinet *al.*, 1967; Shiva, 2010; West *et al.*, 2010). La mayor parte de dichos estudios reporta un deterioro de la respuesta mecánica de las mezclas analizadas cuando decae la temperatura de compactación (p.e., Covarrubias *et al.*, 2009; Reyes *et al.*, 2006). Por ejemplo, Newcomb *et al.* (1992) reportó un incremento lineal en el módulo resiliente de mezclas asfálticas, cuando aumentó la temperatura de compactación. Aschenbrener & Far (1994), reportaron un incremento en la resistencia a la deformación permanente de mezclas con el aumento en dicha temperatura. De la misma forma, Azariet *al.* (2003) reportaron un incremento en las propiedades de resistencia al corte. Sin embargo, en este último estudio no se obtuvieron variaciones significativas en la resistencia a fatiga, evaluada bajo el modo de carga de deformación controlada. Otros estudios concluyen que el efecto de la temperatura de compactación es insignificante sobre las propiedades de las mezclas (p.e., Bahia *et al.* 2000; Huner & Brown, 2001; McGenniset *al.*, 1996). Crawley (1985) por ejemplo, evaluó la respuesta que experimentaron mezclas asfálticas construidas *in situ*, compactándolas a temperaturas de 149°C y 107°C. Después de 3,5 años, se extrajeron muestras de las vías pavimentadas, encontrando propiedades similares. También se reporta de manera general, que la influencia de la temperatura de compactación sobre las propiedades de mezclas asfálticas en caliente, depende del tipo de ligante asfáltico utilizado y principalmente de la granulometría empleada (West *et al.*, 2010).

### 1.3 Objetivo

En el presente estudio, se evaluó el cambio que experimenta la resistencia bajo carga monotónica de mezclas asfálticas en caliente modificadas con Gcr, bajo diferentes temperaturas de compactación. Lo anterior debido a que en la ciudad de Bogotá D.C. se han reportado en obra disminución de la temperatura de las mezclas, desde su fabricación en la planta de asfaltos hasta su extensión y compactación, de hasta 30°C. Las mezclas que se estudiaron, fueron fabricadas modificando por vía húmeda los dos cementos asfálticos que se producen en Colombia (CA 60-70 y CA 80-100). Adi-

cionalmente, se emplearon dos granulometrías y fueron compactadas bajo temperaturas de 120, 130, 140 y 150°C, siendo esta última la temperatura de compactación inicial o de referencia de las mezclas. Las granulometrías analizadas, son dos de las tres que se especifican en la Resolución No. 3841 del 5 de septiembre de 2011 del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU y Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2011). Un estudio similar, con las granulometrías especificadas y empleando los dos asfaltos colombianos modificados con Gcr no se ha reportado a la fecha. La ciudad de Bogotá D.C., presenta un clima predominantemente frío, con temperaturas mínimas y máximas promedio de 5°C y 19°C respectivamente, presencia de lluvias periódicas en cualquier momento del día, humedad entre el 60% al 100% y altura promedio sobre el nivel del mar de 2640 m. Resistencia bajo carga monotónica se refiere a la obtenida cuando la carga se va aumentando gradualmente hasta que falla el material.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 Caracterización de Materiales**

En la Tabla 4 se presentan los valores obtenidos de los ensayos de caracterización al agregado pétreo. Se observa en esta tabla, que los valores de cada uno de los ensayos cumplen con el requisito mínimo de calidad exigido por las especificaciones del Instituto Nacional de Vías - INVIAS (2007) y del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU (2005), para fabricar mezclas de concreto asfáltico. A los cementos asfálticos CA 60-70 y CA 80-100, se les realizaron los ensayos que exige la especificación INVIAS (2007) e IDU (2005) para caracterizarlos y los resultados se presentan en la Tabla 5. El grano de caucho reciclado de llanta (Gcr) proviene de la empresa MUNDOLIMPIO. Este material presenta partículas de coloración negra que pasan el tamiz No. 40 en un ensayo de granulometría por tamizado.

Tabla 4. Caracterización del agregado pétreo. Fuente: Autores

| Ensayo   | Método         | Resultado |
|--|----------------|-----------|
| Peso específico                                | ASTM D 854-00  | 2,56      |
| Equivalente de arena                           | ASTM D 2419-95 | 83%       |
| Caras fracturadas                              | ASTM D 5821-01 | 92%       |
| Índice de alargamiento                         | NLT 354-91     | 9,1%      |
| Índice de aplanamiento                         | NLT 354-91     | 9,2%      |
| Ataque en Sulfato de sodio                     | ASTM C 88-99a  | 12,1%     |
| Microdeval                                     | ASTM D6928-03  | 19,3%     |
| Resistencia al desgaste Máquina de los Ángeles | ASTM C 131-01  | 21,5%     |

Tabla 5. Características generales de los CA 80-100 y CA 60-70. Fuente: Autores

| Ensayo                                   | Método       | Unidad                  | CA 80-100 | CA 60-70 |
|--|--------------|-------------------------|-----------|----------|
| Ensayos sobre el asfalto original        |              |                         |           |          |
| Penetración (25°C, 100 g, 5 s)           | ASTM D-5     | 0,1 mm                  | 83        | 65       |
| Índice de penetración                    | NLT 181/88   | -                       | -0,6      | -0,8     |
| Viscosidad absoluta (60°C)               | ASTM D-4402  | Poises                  | 1450      | 1800     |
| Ductilidad (25°C, 5cm/min)               | ASTM D-113   | cm                      | >105      | >105     |
| Punto de ablandamiento                   | ASTM D-36-95 | °C                      | 48        | 50       |
| Solubilidad en Tricloroetileno           | ASTM D-2042  | %                       | >99       | >99      |
| Contenido de agua                        | ASTM D-95    | %                       | <0,2      | <0,2     |
| Punto de inflamación                     | ASTM D-92    | °C                      | 300       | 285      |
| Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT |              |                         |           |          |
| Pérdida de masa                          | ASTM D-2872  | %                       | 0,7       | 0,6      |
| Penetración (25°C, 100 g, 5 s)           | ASTM D-5     | %(penetración original) | 67        | 73       |

Las granulometrías utilizadas para la fabricación de las mezclas asfálticas en caliente convencionales (sin aditivo), se presentan en la Tabla 6. Estas dos granulometrías son acordes con las estipuladas en la Resolución No. 3841 del IDU (2011). Para cumplir con las granulometrías especificadas en dicha Resolución, se modificó la composición original de los agregados pétreos, tomando como referencia los valores promedios en porcentaje de la franja granulométrica, que exige la especificación para la elaboración de las mezclas tipo 1 y 2 (ver Tabla 6).

Tabla 6. Granulometría mezclas tipo 1 y 2.  
Fuente: Resolución No. 3841 del IDU (2011)

| Mezcla Tipo 1 |            |        | Mezcla Tipo 2 |            |        |
|---------------|------------|--------|---------------|------------|--------|
| Tamiz         | Tamiz [mm] | % Pasa | Tamiz         | Tamiz [mm] | % Pasa |
| 1"            | 25,00      | 100,0  | 1"            | 25,00      | 100,0  |
| 3/4"          | 19,00      | 97,5   | 3/4"          | 19,00      | 97,5   |
| 1/2"          | 12,50      | 92,0   | 1/2"          | 12,50      | 85,0   |
| 3/8"          | 9,50       | 75,0   | 3/8"          | 9,50       | 67,5   |
| No. 4         | 4,75       | 50,5   | No. 4         | 4,75       | 35,0   |
| No. 8         | 2,36       | 37,5   | No. 8         | 2,36       | 18,0   |
| No. 200       | 0,075      | 8,5    | No. 200       | 0,075      | 3,0    |

Luego de realizar los ensayos al agregado pétreo y a los cementos asfálticos, se fabricaron cinco briquetas (compactadas a 75 golpes por cara) para cada porcentaje de asfalto de 5,0; 5,5; 6,0 y 6,5%, con el fin de realizar el diseño Marshall. La temperatura de mezcla y compactación de las briquetas fue de 150°C y 140°C respectivamente. Estas temperaturas fueron escogidas con base en el ensayo de viscosidad realizado a los cementos asfálticos, cumpliendo con el rango especificado para mezclas del tipo denso (viscosidad de mezcla de 170 cp y de compactación de 280 cp).

Los porcentajes óptimos de cemento asfáltico fueron de 6,0% y 5,5%, para el caso de las mezclas tipo 1 y 2 respectivamente (independientemente del tipo de CA utilizado). En estos porcentajes se

están cumpliendo los requisitos mínimos exigidos por las especificaciones INVIAS (2007) e IDU (2005), para mezclas de concreto asfáltico.

## 2.2 Modificación de Cementos Asfálticos

Una vez se obtuvo el porcentaje óptimo de CA, se adicionó a este por vía húmeda el Gcr en porcentajes de 13% y 15% con respecto al peso total de los asfaltos CA 60-70 y CA 80-100 respectivamente. Por vía húmeda se entiende que el aditivo (el Gcr en este caso), se adiciona a alta temperatura al CA y no al agregado pétreo. Estos porcentajes fueron escogidos con base en los estudios reportados por el IDU y la Universidad de Los Andes (2002, 2005), en donde se modificaron y caracterizaron, desde el punto de vista físico, químico y reológico, los asfaltos mencionados por vía húmeda. Es importante resaltar que estos estudios fueron la base sobre la cual fue redactada la Resolución No. 3841 del IDU (2011). La temperatura y el tiempo de reacción de mezcla de los asfaltos con el Gcr fueron de 165°C y 55 minutos respectivamente. Con el fin de verificar el criterio CALTRANS (viscosidad entre 1500 cp y 3000 cp) para la escogencia del porcentaje de adición de Gcr, se ejecutaron ensayos de viscosidad a 163°C medidos en un viscosímetro rotacional. En la Tabla 7 se presentan los ensayos realizados sobre los asfaltos modificados y se observa que cumplen con los requisitos mínimos de calidad que especifica la Resolución No. 3841 del IDU (2011) (ver Tabla 2).

## 2.3 Fabricación Mezclas Asfálticas Modificadas

En total se analizaron cuatro mezclas modificadas (tipo 1 y 2, fabricadas con CA 60-70 y CA 80-100), las cuales serán denotadas a partir de este momento como MAC-1AM, MAC-1BM, MAC-2AM y MAC-2BM. MAC significa mezcla asfáltica en caliente, el número el tipo de mezcla (granulometría), las letras A o B denotan el tipo de ligante asfáltico utilizado (CA 60-70 o CA 80-100 respectivamente) y la M que es modificada con Gcr. Si en la nomenclatura de la mezcla no aparece al final la letra M significa que la mezcla analizada es convencional (sin Gcr).

Tabla 7. Características de los CA 80-100 y CA 60-70 modificados con Gcr.  
Fuente: Autores

| Ensayo                                   | Método       | Unidad                        | CA 80-100 | CA 60-70 |
|--|--------------|-------------------------------|-----------|----------|
| Ensayos sobre el asfalto original        |              |                               |           |          |
| Penetración<br>(25°C, 100 g, 5 s)        | ASTM D-5     | 0,1 mm                        | 55        | 50       |
| Viscosidad<br>Brookfield (163°C)         | ASTM D-4402  | cP                            | 1995      | 2104     |
| Punto de<br>ablandamiento                | ASTM D-36-95 | °C                            | 56        | 57       |
| Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT |              |                               |           |          |
| Pérdida de masa                          | ASTM D-2872  | %                             | 0,5       | 0,5      |
| Penetración<br>(25°C, 100 g, 5 s)        | ASTM D-5     | %(de la penetración original) | 68        | 70       |
| Recuperación<br>elástica                 | AASHTO T-301 | %                             | 68        | 63       |

Con los asfaltos ya modificados, se fabricaron cinco briquetas por cada tipo de mezcla para ensayarlas en el aparato Marshall, con el fin de evaluar la respuesta que experimentan las mezclas bajo carga monotónica. Para las mezclas tipo MAC-1AM y MAC-1BM se utilizó en masa, con respecto al peso total de la mezcla, una cantidad de 6,0% de CA 60-70 y CA 80-100 modificados con 13% y 15% de Gcr respectivamente tal como se mencionó con anterioridad, y para el caso de las mezclas tipo MAC-2AM y MAC-2BM, el contenido de asfalto fue de 5,5% de CA 60-70 y CA 80-100 modificados con 13% y 15% de Gcr respectivamente. Las temperaturas iniciales de mezcla para la fabricación y compactación de las briquetas fueron de 170°C y 160°C. Estas temperaturas fueron escogidas con base en las especificaciones del IDU según Resolución No. 3841 del 5 de septiembre de 2011 (ver Tabla 1). Utilizando estas temperaturas, las briquetas se desmoronaban en el molde de compactación, por lo anterior dichas temperaturas fueron reducidas por ensayo y error hasta 160°C y 150°C respectivamente.

## 2.4 Fase Experimental

Las briquetas de mezcla asfáltica convencional y modificada fueron compactadas disminuyendo la temperatura 10°C, hasta alcanzar un máximo de disminución de 30°C. Lo anterior con el fin de evaluar la respuesta que experimentan, en especial las mezclas modificadas, cuando la temperatura de compactación se disminuye en 30°C. Para evaluar dicha respuesta, el parámetro utilizado fue la relación entre la Estabilidad y el Flujo ( $E/F$ ) obtenido del ensayo Marshall. Esta relación es llamada por algunos investigadores como «rigidez Marshall» y físicamente puede ser entendida como una resistencia mecánica evaluada en el estado de falla de las mezclas bajo carga monotónica.

## 3. RESULTADOS

En las Fig. 1 y 2 se presentan la evolución de la relación Estabilidad – Flujo ( $E/F$ ), con la temperatura de compactación de las muestras convencionales y modificadas. Las Fig. 1a) y 1b) esquematizan los resultados para las mezclas MAC-1A, MAC-1B y MAC-1AM, MAC-1BM respectivamente, y las Fig. 2a) y 2b) los resultados para las mezclas MAC-2A, MAC-2B y MAC-2AM, MAC-2BM respectivamente. Se observa que las mezclas con la granulometría tipo 1, tanto convencionales como modificadas, experimentan una mayor rigidez, entre 10% y 25% superior, en comparación con aquellas fabricadas con la gradación tipo 2. Lo anterior debido a que en esta granulometría (tipo 1), el agregado pétreo presenta mayor tamaño de partículas gruesas. Adicionalmente, se observa un incremento en la relación  $E/F$  cuando se utiliza el asfalto modificado con Gcr para fabricar las mezclas, debido principalmente al incremento en viscosidad que experimenta el ligante modificado con la adición del Gcr.

Para las mezclas convencionales, se observa de manera general que la relación  $E/F$  disminuye linealmente a medida que decae la temperatura de compactación. Las mezclas MAC-1A, MAC-1B, MAC-2A y MAC-2B, disminuyen la relación  $E/F$  en 20%, 22%, 33% y 34% respectivamente, cuando decae la temperatura de

compactación 30°C con respecto a la de referencia. El comportamiento que experimentaron las mezclas modificadas fue diferente en comparación con las convencionales. En las mezclas MAC-1AM, MAC-1BM, MAC-2AM y MAC-2BM, se observa un incremento de 21%, 23%, 30% y 17% respectivamente, en la relación  $E/F$  cuando disminuye la temperatura de compactación 10°C con respecto a la de referencia. La disminución de 30°C en la temperatura de compactación afectó ligeramente dicha relación, en especial para el caso de las mezclas con granulometría tipo 1. Se observa una disminución promedio de 10% en  $E/F$ , cuando decae la temperatura de compactación 30°C, para el caso de las mezclas MAC-1AM, MAC-2AM y MAC-2BM. Para el caso de la mezcla MAC-1BM, se observa un ligero incremento de 6,7%. Adicionalmente, se observa que un decaimiento de 20°C en la temperatura de compactación, no genera disminución en la relación  $E/F$  de ninguna de las mezclas asfálticas modificadas.

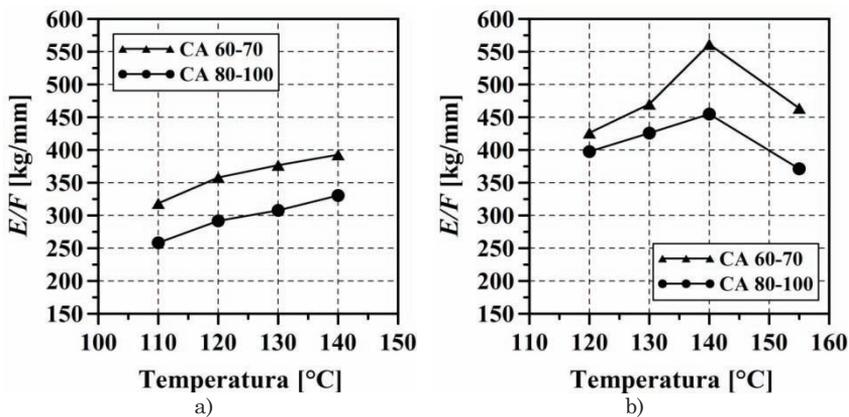


Fig. 1. Evolución de  $E/F$  con la temperatura de compactación. a) Mezclas MAC-1A y MAC-1B y b) Mezclas MAC-1AM y MAC-1BM. Fuente: Autores

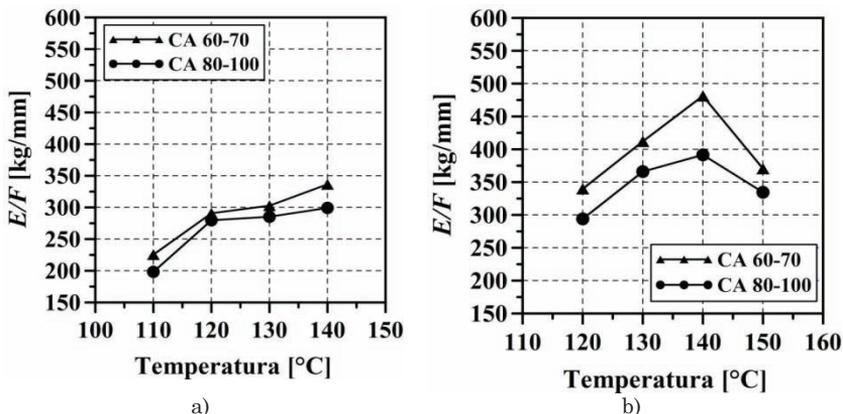


Fig. 2. Evolución de  $E/F$  con la temperatura de compactación. a) Mezclas MAC-2A y MAC-2B y b) Mezclas MAC-2AM y MAC-2BM. Fuente: Autores

#### 4. CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó en laboratorio, la influencia que tiene la disminución de la temperatura de compactación sobre la resistencia mecánica bajo carga monotónica, de mezclas de concreto asfáltico convencionales (sin modificador) y modificadas por vía húmeda con grano de caucho reciclado de neumáticos fuera de uso (Gcr).

Para el caso de las mezclas convencionales, se observa una disminución notable de dicha propiedad (entre 20% y 34%) cuando disminuye la temperatura de compactación en 30°C, con respecto a la de referencia (óptima obtenida del ensayo de viscosidad). Para el caso de las mezclas modificadas, en tres (MAC-1AM, MAC-2AM y MAC-2BM) de las cuatro mezclas analizadas en el presente estudio, la disminución promedio fue de tan solo 10%, reportándose en una de ellas (MAC-1BM) incluso un ligero incremento de 6,7%. Se observa un incremento en la resistencia bajo carga monotónica de las mezclas modificadas entre 17% y 30%, cuando disminuye en 10°C la temperatura de compactación. Adicionalmente se observa que en laboratorio, un decaimiento de 20°C en la temperatura de compactación, no genera disminución en la resistencia de las mezclas analizadas.

En términos generales, al decaer la temperatura de compactación, el mejor comportamiento en cuanto a resistencia mecánica bajo carga monotónica se refiere, lo experimentan las mezclas modificadas con Gcr.

Las conclusiones reportadas en el presente estudio son derivadas de estudios ejecutados en el laboratorio, por lo anterior se hace necesaria una futura investigación que evalúe y correlacione este estudio con mediciones obtenidas en campo. Así mismo, se prevé una futura fase experimental para evaluar en laboratorio, propiedades mecánicas bajo carga cíclica como módulo resiliente, leyes de fatiga y resistencia a la deformación permanente.

## 5. REFERENCIAS

- Allison, K. (1967). Those amazing rubber roads. *Rubber World*, 78(3-4), 47-52, 91-106.
- Aschenbrener, T., Far, N. (1994). *Influence of temperature and antistripping treatment on the results from the Hamburg Wheel-Tracking Device*. Final Report, CDOT-DTD-R-94-9, Colorado DOT, July.
- Azari, H., McCuen, R. H. y Stuart, K.D. (2003). Optimum compaction temperature for modified binders. *Journal of Transportation Engineering*, 129(5), September.
- Bahia, H.U., Hanson, D.I. (2000). *NCHRP Project 9-10 Superpave Protocols for modified asphalt binders, Draft Topical Report (Task 9)*. Prepared for the National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., May.
- Botero, J.H., Valentín, M.O., Suárez, O.M., Santos, J., Acosta, F.J., Cáceres, A. y Pando, M.A. (2005). Gomas trituradas: estado del arte, situación actual y posibles usos como materia prima en puerto rico. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. 5(1), 69-86.
- Carlson, D.D. ,Zhu, H. (1999). Asphalt-Rubber -an anchor to crumb rubber markets. Third Joint UNCTAD/IRSG Workshop

- on Rubber and the Environment International Rubber Forum, Veracruz, Mexico.
- Covarrubias, P.L., Ibáñez, I.C., Miró, R. y Garnica, P. (2009). Efecto de la temperatura de compactación sobre el módulo resiliente de las mezclas asfálticas. *Revista Carreteras*, (163), 8-20.
- Crawley, A.B. (1985). *An evaluation of lower mixing temperatures for bituminous paving mixes*. MSHD-RD-85-069, Mississippi DOT.
- Hanson, D.I., Foo, K.Y., Brown, R. and Denson, R. (1994). Evaluation and characterization of a rubber modified hot mix asphalt pavement. *National Center for Asphalt Technology*, (1436), 98-107.
- Huner, M.H., Brown, E.R. (2001). *Effects of re-heating and compaction temperature on hot mix asphalt volumetrics*. NCAT Report 01-04, National Center for Asphalt Tech., November.
- IDU - Instituto de Desarrollo Urbano (2005). *Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público en Bogotá D.C.*
- IDU - Instituto de Desarrollo Urbano (2011). *Especificación Técnica para la Aplicación del Grano de Caucho Reciclado (Gcr) en Mezclas asfálticas en Caliente por Vía Húmeda*. Bogotá D.C., Resolución No. 3841 de 5 de septiembre de 2011.
- IDU - Instituto de Desarrollo Urbano y Universidad de Los Andes (2002). *Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas*. Bogotá D.C.
- IDU - Instituto de Desarrollo Urbano y Universidad de Los Andes (2005). *Segunda fase del estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas – pista de prueba*. Bogotá D.C.
- INVIAS – Instituto Nacional de Vías (2007). *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*. Bogotá D.C. (Colombia).

- INVIAS – Instituto Nacional de Vías (2007a). *Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. V. I y II*. Bogotá D.C. (Colombia).
- Kennedy, T.W., Roberts, F.L. and McGennis, R.B. (1984). Effects of compaction temperature and effort on the engineering properties of asphalt concrete mixtures. *ASTM Special Technical Publications*, 829.
- Magalhães, J.H. and Soares, J.B. (2003). *The effect of crumb rubber gradation and binder-rubber interaction time on the mechanical properties of asphalt-rubber mixtures (dry process)*. In: Asphalt Rubber Conference.
- McGennis, R.B., Anderson, R.M., Perdomo, D. and Turner, P. (1996). *Issues Pertaining to Use of the Superpave Gyrotory Compactor, Transportation Research Record 1543*. TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Publicación Electrónica. <http://www.andesco.com/site/assets/media/camara/ambienta/1/Normativa/Resolucion%201457%20de%202010%20del%20MAVDT%20-%20Postconsumo%20llantas%20usadas.pdf>. Consultado en Octubre del 2010. Tomado ANDESCO Asociación Nacional de Empresarios de Servicios Públicos y Comunicaciones.
- Neto, S.A.D., Farias, M.M., Pais, J.C., Pereira, P. and Picado Santos, L. (2003). Properties of asphalt-rubber binders related to characteristics of the incorporated crumb rubber. *Asphalt Rubber* 2003, 1-13.
- Newcomb, D.E., Stroup-Gardiner, M., and Epps, J.A. (1992). *Laboratory and field studies of polyolefin and latex modifiers for asphalt mixtures*. Polymer modified asphalt binders, ASTM STP 1108.
- Parker, C.F. (1950). Use of steel-tired rollers. *Highway Research Board Bulletin No. 246*, Highway Research Board, National Research Council. Washington D.C.

- Putman, B.J. (2005). *Qualification of the effects of crumb rubber in crm binder*. Ph.D. dissertation, Clemson Univ.
- Reyes, O.J., Camacho, J.F. y Reyes, F.A. (2006). Influencia de la temperatura y nivel de energía de compactación en las propiedades dinámicas de una mezcla asfáltica. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (36), 121-130.
- Rondón, H.A. (2011). *Mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho de llanta (Gcr): estado del conocimiento y análisis de utilización en Colombia*. VI Jornadas de Pavimentos y Mantenimiento Vial, Bogotá D.C., Colombia, 2-4 de noviembre.
- Serafin, P.J., Kole, L.L. and Chritz, A.P. (1967). Michigan bituminous experimental road: Final Report. *AAPT* Vol. 36.
- Shen, J., Amirhanian, S.N. y Lee, S.-J. (2007). HP-GPC characterization of rejuvenated aged crm binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(6), June 1, 515-522.
- Shiva Kumar, M.J. (2010). *Effect of varying mixing & compaction temperature on Marshall properties of bituminous concrete mix*. RASTA-Center for Road Technology.
- West, R.C., Watson, D.E., Turner, P.A. and Casola, J.R. (2010). *Mixing and compaction temperatures of asphalt binders in hot-mix asphalt*. NCHRP Report 648, TRB.
- Zhong, X.G., Zeng, X. and Rose, J.G. (2002). Shear modulus and damping ratio of rubber-modified asphalt mixes and unsaturated subgrade soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6), 496-502.