

Evaluación de la energía de fractura mediante el ensayo DC (T) de mezclas asfálticas con RAP elaboradas en frío

José Rafael Bernal Padilla,
rbernal@kao.com

Carlos Coria Gutierrez,
ccoria@semgroupcorp.com

Jorge Alarcón Ibarra,
jorge.alarcon.ibarra@hotmail.com

La Energía de Fractura en las Mezclas Asfálticas se puede definir como la energía total disipada durante el proceso de fractura, parámetro que se ha utilizado en los últimos años para entender el comportamiento de inicio y propagación de fisuras en los pavimentos flexibles para predecir de mejor manera el comportamiento que tendrán a largo plazo.

En este trabajo se presenta el análisis del comportamiento a la fisuración de mezclas asfálticas fabricadas en frío con altas tasas de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) mediante el cálculo de la energía de fractura. En el marco de este proyecto de investigación se evaluaron mezclas asfálticas fabricadas en frío con cuatro porcentajes de RAP, 0% (mezcla de control), 30%, 50% y 100%. Así mismo, se estudió una mezcla fabricada en caliente con la misma granulometría y contenido de asfalto que la mezcla de control.

Posteriormente se realizó una comparativa entre el comportamiento de las mezclas convencionales (0% RAP - en frío y en caliente) y las mezclas asfálticas recicladas, a temperaturas de 10°C, 0°C y -10°C.

Con los resultados obtenidos se pudieron observar tendencias que permiten determinar que las mezclas asfálticas fabricadas en frío con altas tasas de RAP aumentan su rigidez significativamente, sin embargo, no llegan a los valores de rigidez que presentan las mezclas fabricadas en caliente.

Con base en los valores obtenidos, podemos concluir que el uso de RAP en mezclas fabricadas en frío, proporciona propiedades que permiten a las mezclas antes mencionadas alcanzar los índices de desempeño necesarios a edades tempranas.

Palabras Clave: Emulsiones Asfálticas, Mezclas Asfálticas en Frío, RAP, Energía de Fractura, manufacturing temperature.

The Fracture Energy in Asphalt Mixtures can be defined as the total energy dissipated during the fracture process, a parameter that has been used in recent years to understand the behavior of initiation and propagation of fissures in flexible pavements in order to better predict the behavior they will have in the long term.

In this paper we present the analysis of the behavior to the cracking of asphalt mixtures manufactured in cold with high rates of RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) by calculating the energy of fracture.

Within the framework of this research project, asphalt mixes manufactured in cold were evaluated with four percentages of RAP, 0% (control mixture), 30%, 50% and 100%. Likewise, a hot mix was studied with the same granulometry and asphalt content as the control mixture.

Subsequently, a comparison was made between the behavior of conventional mixtures (0% RAP - cold and hot) and recycled asphalt mixtures, at temperatures of 10°C, 0°C and -10°C.

With the obtained results it was possible to observe tendencies that allow to determine that asphalt mixtures manufactured in cold with high RAP rates increase their stiffness significantly, however, they do not reach the rigidity values that hot mixes present.

Based on the values obtained, we can conclude that the use of RAP in mixtures manufactured in cold, provides properties that allow the aforementioned mixtures to achieve the necessary performance indices at early ages.

Keywords: Asphalt Emulsions, Cold Asphalt Mixtures, RAP, Fracture Energy.

Evaluación de la energía de fractura mediante el ensayo DC (T) de mezclas asfálticas con RAP elaboradas en frío

1. Introducción

La Energía de Fractura, G_f , también llamada energía total disipada durante el proceso de fractura, G_D , proviene de dos fenómenos bien diferenciados, uno que se manifiesta por el desarrollo de mecanismos plásticos, expresado por la disipación plástica por unidad de área y otro por la fractura propiamente dicha, y que se gasta en separar dos planos atómicos.

Las metodologías desarrolladas para la obtención de la energía disipada en el proceso de fractura de las mezclas asfálticas se basan principalmente en el desarrollo de ensayos experimentales que representen el principal modo de falla de éstas frente al fenómeno de la fisuración. En estos procedimientos se puede determinar independientemente la energía de fractura y la resistencia o tensión máxima de fisuración. De estos ensayos se puede calcular la energía disipada en el proceso de fisuración mediante la gráfica de la curva de carga - desplazamiento resultante, como se ilustra en la Figura 1, sobre la que se tiene el trabajo total de la fractura, W_f , calculado como el área bajo la curva señalada. Posteriormente, al dividir este trabajo realizado por el área de ligamento o fractura de la muestra, se obtiene el valor de la energía total disipada durante el proceso de fractura, G_f .

damente los mecanismos de fractura en las mezclas asfálticas.

En este contexto, los ensayos a tracción son bastante utilizados en el campo de la ingeniería, especialmente en el campo de la mecánica de fractura, debido a que estos permiten determinar propiedades mecánicas de los materiales relacionadas con su resistencia y capacidad de deformación. A su vez, permiten determinar parámetros como deformación de rotura, módulo de rigidez, carga máxima o energía disipada en el proceso de fisuración; los cuales están directamente vinculados a la resistencia a la fisuración de las mezclas.

En los últimos años, han sido varios los investigadores que han estudiado los conceptos derivados de la mecánica de fractura aplicados en las mezclas asfálticas, De acuerdo a lo postulado por Oller [1], bajo el enfoque de la mecánica clásica de fractura, existe un límite superior o umbral del factor de intensidad de tensiones denominado factor de intensidad crítico de tensiones, KIC, y éste se alcanza cuando la tensión en la cabeza de la fisura comienza a propagarse. La finalidad de estos estudios ha sido investigar las propiedades mecánicas de fractura en mezclas asfálticas mediante el desarrollo de nuevos ensayos que permitan obtener parámetros mecánicos que entreguen información para una mejor caracterización de las respuestas de las mezclas asfálticas frente al proceso de fisuración

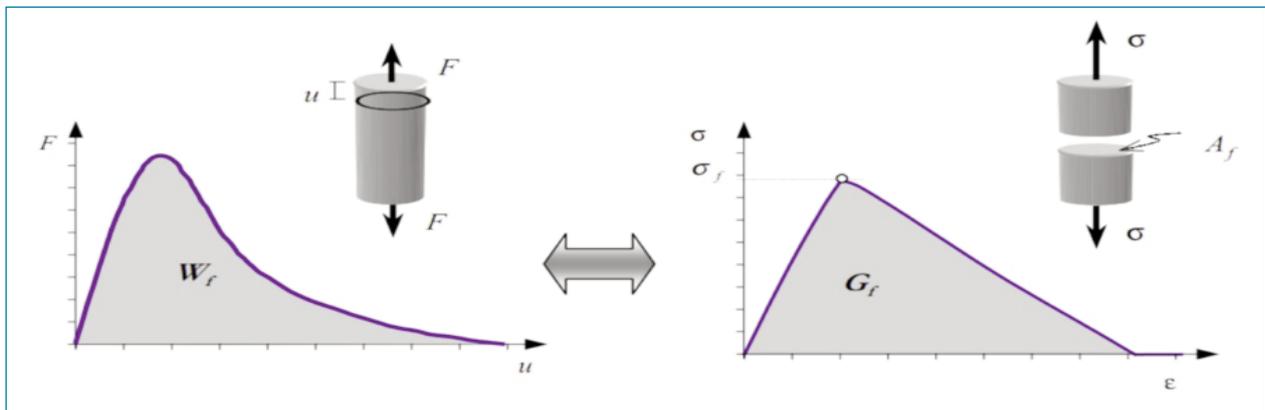


Figura 1. Forma esquemática de la obtención de la energía de fractura (Oller, 2011)

En el campo de las mezclas asfálticas, se han desarrollado varias metodologías experimentales que permiten representar y obtener una mejor comprensión de los mecanismos de iniciación y propagación de fisuras en mezclas bituminosas, y se basa en representar específicamente el comportamiento a fractura de estos materiales. Sin embargo, es en los últimos años, con el desarrollo de la ciencia de la mecánica de fractura de los materiales cuasi frágiles, que se han podido describir adecua-

bajo diferentes condiciones, ya sean climáticas, de materiales, de tipo y contenido de ligante, entre otras variables.

De manera simultánea, el equipo de investigación de la Universidad Politécnica de Cataluña liderado por el Catedrático Félix Pérez Jiménez [2], ha desarrollado nuevos procedimientos experimentales con el objetivo de evaluar y establecer nuevos parámetros que representen las propiedades mecánicas relacionadas con la resistencia a la fisuración en las

mezclas asfálticas.

Ahora bien, la importancia de determinar la energía de fractura en las mezclas asfálticas con RAP elaboradas en frío, se debe a que, como se ha observado en estudios realizados a mezclas elaboradas en caliente, el RAP rigidiza las mezclas asfálticas, llegando a valores que hacen susceptibles a este tipo de mezclas al efecto de falla por fatiga. Por otro lado, las mezclas asfálticas elaboradas en frío presentan un comportamiento tan dúctil a edades tempranas que cuando son sometidas a los esfuerzos generados por las cargas vehiculares, estas mezclas fallan por la falta de rigidez.

2. Resultados

Partiendo de las generalidades de diseño de las mezclas asfálticas evaluadas, se realizaron estudios volumétricos, los cuales permitieron determinar la humedad óptima de compactación, la cual fue a una pérdida del 70% de la humedad total, para posteriormente ser compactadas en un compactador giratorio. El acondicionamiento de las muestras evaluadas se realizó mediante un proceso de curado de 72 horas a una temperatura de 60°C. La emulsión utilizada fue de tipo super estable con un contenido de residuo asfáltico del 61%, el asfalto base fue un AC-20, proveniente de la refinería de Tula. La mezcla fabricada en caliente posee el mismo contenido asfáltico con respecto a la mezcla de control (0% RAP).

Como ya se ha mencionado, se han desarrollado diferentes métodos de prueba para la determinación de la energía de fractura de mezclas asfálticas, dentro de dichos métodos se encuentra el ensayo Disk-Shaped compact tensión test (disco compacto a tracción), ilustrado en la Figura 2, desarrollado por Wagoner en la Universidad de Illinois [3], el cual se basa en la utilización de una probeta de geometría circular para determinar la energía de fractura en las mezclas asfálticas.

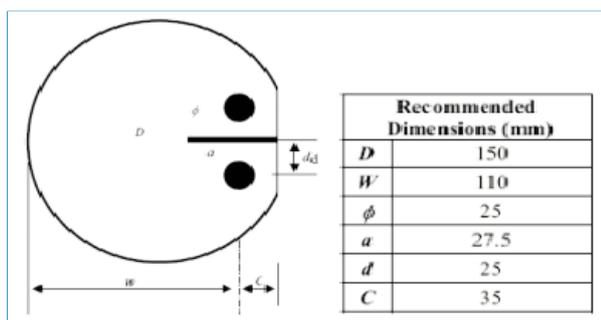


Figura 2. Geometría recomendada (Kim et al., 2009; Wagoner et al., 2005b)

El ensayo DC(T), actualmente se encuentra estandarizado a través de la norma ASTM D 7313-07 "Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt - Aggregate Mixtures using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry", fijando en su procedimiento una velocidad de desplazamiento de 0.017 mm/s y señalando que la temperatura de ejecución debe ser inferior a los 10°C. Para este proyecto de Investigación se evaluaron tres temperaturas de prueba, 10, 0 y -10°C. Los especímenes son colocados en el dispositivo de carga para posteriormente aplicar una carga a la velocidad antes mencionada hasta que la carga disminuye a un valor de 0.1 KN. Ahora bien, con la finalidad de caracterizar de una mejor manera a las mezclas evaluadas, nos apoyamos en las ecuaciones utilizadas en el ensayo Fénix.

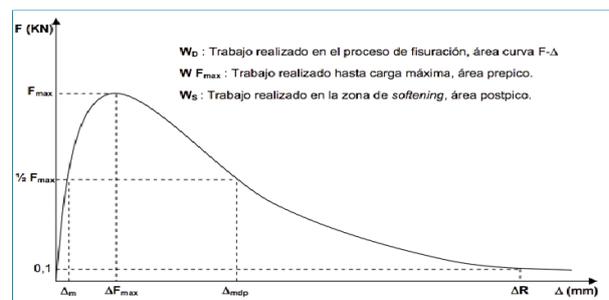


Figura 3. Curva carga - desplazamiento ensayo Fénix (Vidal, 2011)

A continuación se presentan las gráficas de las Curvas Carga - Desplazamiento.

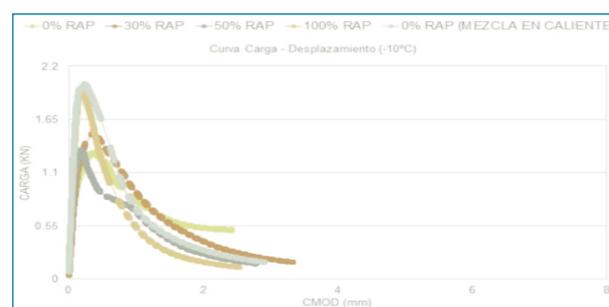


Figura 4. Curva Carga - Desplazamiento (-10°C)

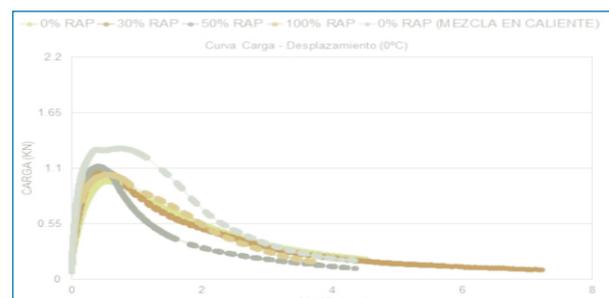


Figura 5. Curva Carga - Desplazamiento (0°C)

Evaluación de la energía de fractura mediante el ensayo DC (T) de mezclas asfálticas con RAP elaboradas en frío

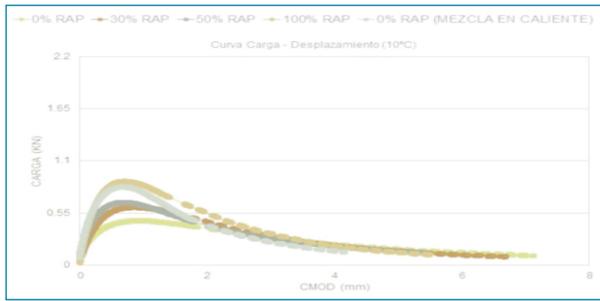


Figura 6. Curva Carga - Desplazamiento (10°C)

Mediante los resultados obtenidos de la curva carga - desplazamiento (Figuras 4, 5 y 6), se pueden obtener los parámetros que nos permitirán identificar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas relacionadas con su resistencia a la falla por fisuración.

2.1 Área (WD)

Se define el área bajo la curva Carga - Deformación.

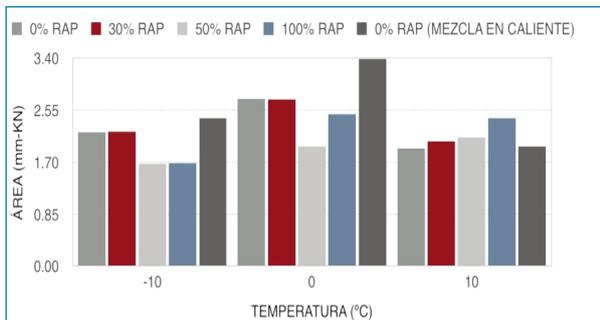


Figura 7. Área bajo las Curvas Carga - Desplazamiento

2.2 Carga máxima a tracción (Fmax)

Se define como la carga máxima registrada en el ensayo a tracción directa. (Vidal, 2011)

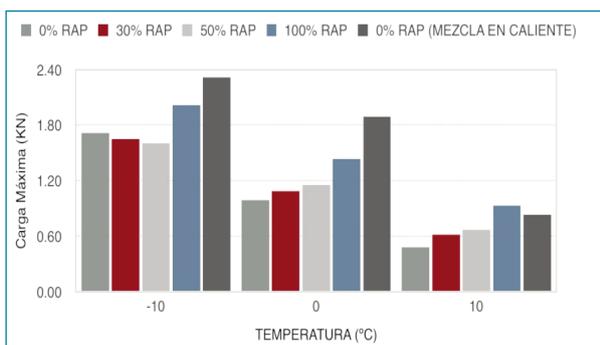


Figura 8. Carga Máxima (KN)

2.3 Desplazamiento a carga máxima (ΔFmax)

Se define como el desplazamiento realizado por el pistón cuando se registra la carga máxima a tracción. (Vidal, 2011)

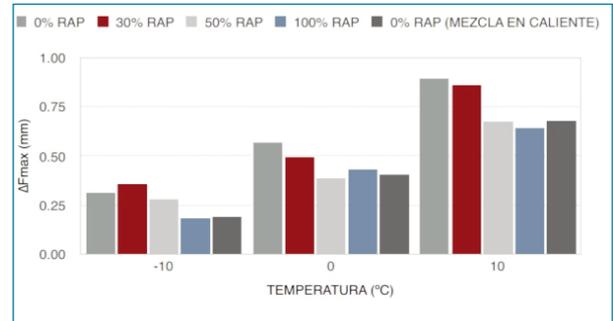


Figura 9. Desplazamiento a Carga Máxima (KN)

2.4 Resistencia a tracción (RT)

Se define como la relación entre la carga máxima registrada, Fmax y el área de ligamento o de fractura. La resistencia a tracción se calcula utilizando la ecuación siguiente:

$$R_T = \frac{1000 \cdot F_{Fmax}}{h \cdot l} \quad (1)$$

Dónde:

RT: Resistencia a tracción, (MPa)

Fmax: Carga máxima registrada (KN)

h: Espesor de la probeta (mm)

l: Longitud inicial de ligamento (mm)

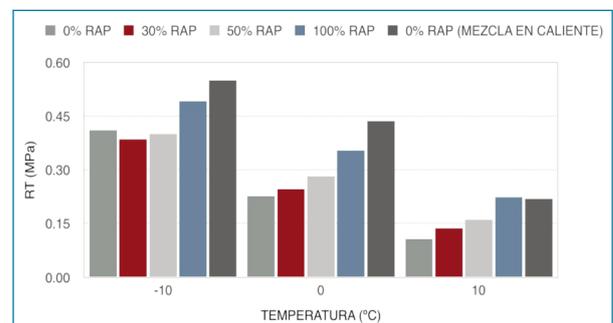


Figura 10. Resistencia a Tracción (MPa)

2.5 Desplazamiento de rotura (ΔR)

Se define como el desplazamiento en el cual la carga ha

caído hasta los 0.1 KN. Este parámetro entrega un valor importante, puesto que permite calcular las energías disipadas en el proceso de fractura de las mezclas, y a su vez, permite distinguir entre mezclas con iguales energías disipadas, GD, diferenciando las más frágiles de las más dúctiles. (Vidal, 2011)

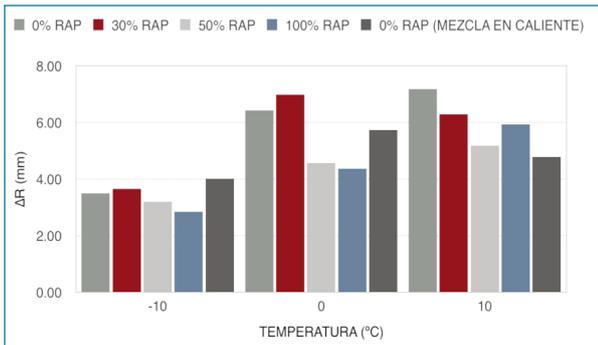


Figura 11. Desplazamiento de Rotura (ΔR)

2.6 Índice de rigidez a tracción (IRT)

Se define como la relación entre la mitad de la carga máxima, $1/2 F_{max}$, y el desplazamiento correspondiente a ese valor de carga antes de la carga máxima, Δ_m . Este índice indica una pseudo-rigidez del material, mostrando que tan flexible o rígida es la mezcla bituminosa evaluada. A mayor índice de rigidez a tracción, menos flexible es la mezcla. El índice de rigidez de tracción se calcula de acuerdo a la ecuación 2. (Vidal, 2011)

$$I_{RT} = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{Fmax}}{\Delta_m} \quad (2)$$

Dónde:

IRT: Índice de rigidez a tracción (KN/mm)

Fmax: Carga máxima registrada (KN)

Δ_m : Desplazamiento antes de la carga máxima a $1/2 F_{max}$ (mm)

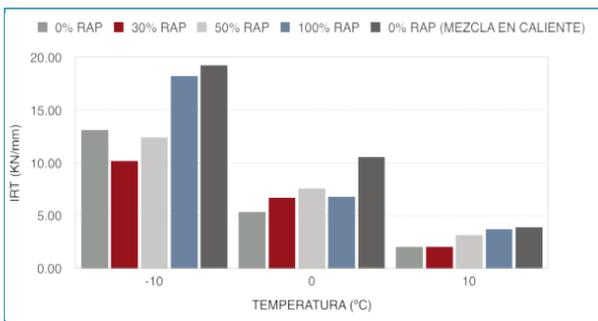


Figura 12. Índice de Rigidez a Tracción (KN/mm)

2.7 Desplazamiento al 50% Fmax postpico, (Δmdp)

Se define como el desplazamiento registrado por la mezcla una vez que la carga ha caído a la mitad del valor de su carga máxima. Este parámetro indica la capacidad que tiene la mezcla evaluada de admitir deformación, puesto que a medida que las mezclas son más dúctiles, y por ende más deformables, se obtienen mayores valores de Δ_{mdp} , mientras que para mezclas más frágiles se obtienen menores valores de Δ_{mdp} . (Vidal, 2011)

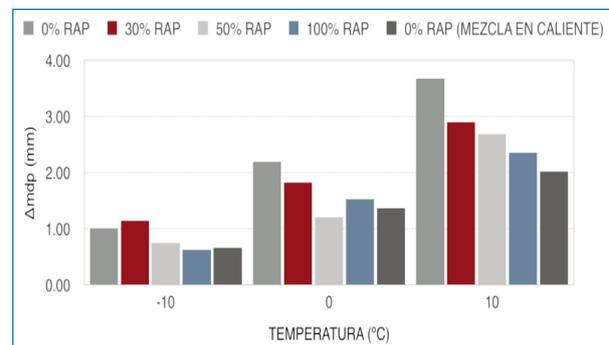


Figura 13. Desplazamiento al 50% Fmax postpico (Δmdp)

2.8 Energía disipada por unidad de superficie (GD)

Se define como el trabajo total realizado en el proceso de fisuración, W_D , dividido entre el área de ligamento o fractura, perpendicular a la fuerza aplicada. El cálculo del trabajo realizado se efectúa mediante la ecuación 3 y la energía disipada en el proceso de fisuración se calcula de acuerdo a la ecuación 4. (Vidal, 2011)

$$W_D = \sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i) \cdot (y_i) + 0.5 \cdot (x_{i+1} - x_i) \cdot (y_{i+1} - y_i) \quad (3)$$

Dónde:

W_D : Trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo curva carga - desplazamiento (KN - mm).

x_i : Desplazamiento registrado (mm).

y_i : Carga registrada (mm).

n : Punto en que la carga ha descendido a 0.1 KN.

$$G_D = \frac{W_D}{h \cdot l} \quad (4)$$

Evaluación de la energía de fractura mediante el ensayo DC (T) de mezclas asfálticas con RAP elaboradas en frío

Dónde:

GD: Energía disipada por unidad de superficie en el proceso de figuración (J/m²).

WD: Trabajo realizado en el proceso de figuración, área bajo curva carga - desplazamiento (KN - mm).

h: Espesor de la probeta (mm).

l: Longitud inicial de ligamento (mm).

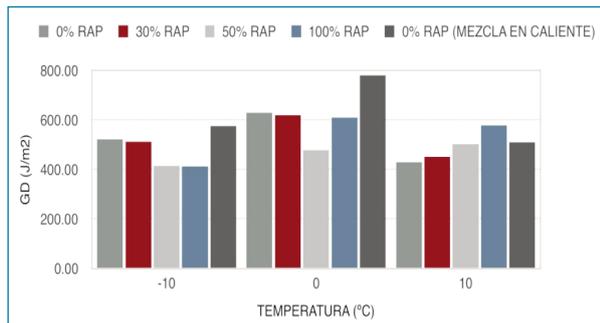


Figura 14. Energía disipada por unidad de superficie (GD)

2.9 Índice de energía (IE)

Se define como la energía disipada en el periodo de relajación o softening ponderada por la razón de su proporción respecto del total de la energía disipada en el proceso de fisuración. Este índice tiene la finalidad de evaluar la cantidad de energía disipada por el material una vez que éste ya ha alcanzado su resistencia máxima, ponderando las mezclas que sean capaces de disipar mayor energía en su fase de softening, respecto de la disipada en su fase de carga inicial hasta la carga máxima. Por tanto, para igualdad de valores de energía disipada en la fase de softening, este parámetro aumenta en las mezclas más dúctiles respecto de las más frágiles, puesto que su razón de proporción respecto del total de la energía disipada será mayor. Su expresión de cálculo se observa en la ecuación 5 y sus variables se muestran mediante la Figura 3 (Vidal, 2011)

$$I_E = \frac{W_s}{h \cdot l} \cdot \left(\frac{W_s}{W_D} \right) \quad (5)$$

Dónde:

IE: Índice de energía (J/m²).

WS: Trabajo realizado en la zona de softening, postpico (KN · mm).

WD: Trabajo realizado en el proceso de fisuración, área ba-

jo curva carga - desplazamiento (KN · mm).

h: Espesor de la probeta (m).

l: Longitud inicial de ligamento (m).

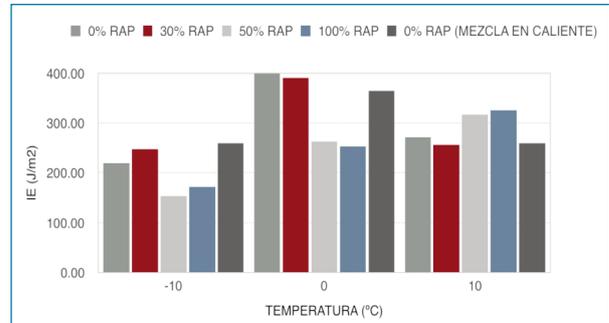


Figura 15. Índice de Energía (IE)

2.10 Índice de tenacidad (IT, (J/m²·mm)

Se define como la energía disipada en el periodo de relajación o softening multiplicada por un factor de fragilidad, el cual corresponde al desplazamiento realizado desde la carga máxima, Fmax, hasta que la carga ha caído a la mitad de su valor máximo. Este índice tiene la finalidad de evaluar la tenacidad de la mezcla bituminosa, considerándose ésta como la capacidad de la mezcla de mantener unidos sus componentes una vez que ya ha alcanzado su resistencia máxima. Por lo tanto, a medida que este parámetro aumenta, la mezcla es más tenaz, y por otra parte, a medida que este factor disminuye, la mezcla tiene un comportamiento más frágil. Su expresión de cálculo se observa en la ecuación 6 y sus variables se muestran mediante la Figura 3 (Vidal, 2011)

$$I_T = \frac{W_D - W_{Fmax}}{h \cdot l} \cdot (\Delta_{mdp} - \Delta_{Fmax}) \quad (6)$$

Dónde:

IT : Índice de tenacidad ((J/m²·mm).

WD: Trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo curva carga – desplazamiento (KN · mm).

WFmax: Trabajo realizado hasta carga máxima (KN · mm).

ΔFmax: Desplazamiento a Fmax (mm).

Δmdp: Desplazamiento a 1/2 Fmax post pico (mm).

h: Espesor de la probeta (m).

l: Longitud inicial de ligamento (m).

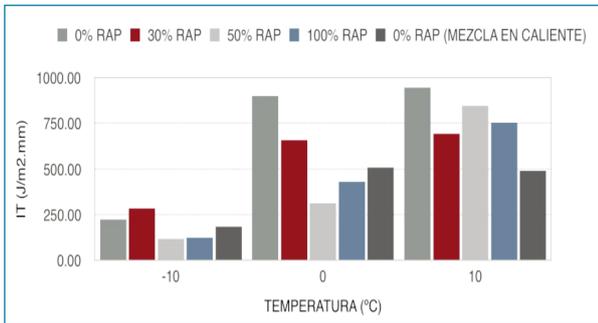


Figura 16. Índice de Tenacidad (IT)

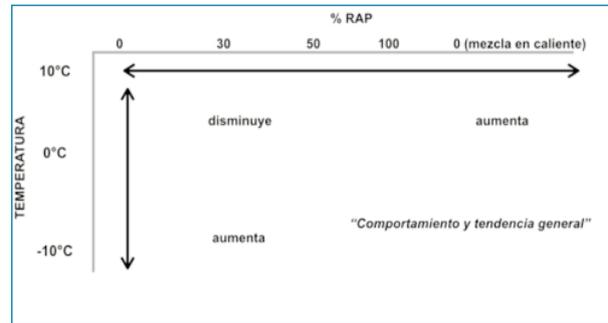


Figura 18. Esquema de tendencia y comportamiento general

3. Conclusiones

El uso de RAP en las mezclas asfálticas fabricadas en frío nos brinda la posibilidad de aumentar la rigidez de dichas mezclas como se observa en las gráficas de carga - desplazamiento, sin embargo, también se ha observado que el uso de RAP debe tener un carácter racional, ya que las mezclas con altas tasas de RAP, en particular la mezcla con un 100% de RAP, presenta un comportamiento postpico susceptible a la fatiga, ya que la mezcla ha llegado a rigidizarse más que la mezcla en caliente que se ha evaluado.

En cuanto a los otros parámetros observados en este artículo, derivados de las curvas carga - desplazamiento, se han encontrado tendencias generales en los siguientes y que se presentan de manera esquemática en las Figuras 17 y 18:

- Carga Máxima
- Desplazamiento Máximo (ΔF_{max})
- Desplazamiento de Rotura (ΔR)
- Desplazamiento al 50% F_{max} postpico (Δm_{dp})
- Índice de Tenacidad (IT)

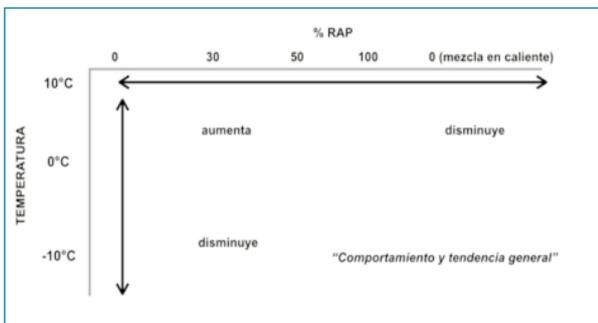


Figura 17. Esquema de tendencia y comportamiento general

- Resistencia a Tracción (MPa)
- Índice de rigidez a tracción (KN/mm)

De acuerdo a las muestras evaluadas no se encontraron comportamientos generales para los siguientes parámetros:

Trabajo realizado en la zona softening, postpico (Ws)

Índice de energía (IE)

Desplazamiento antes de la carga máxima a 1/2 F_{max} (Δm)

Trabajo realizado hasta carga máxima (WF_{max})

Ahora bien, los resultados obtenidos en este proyecto de investigación pueden variar si se presentan cambios en los materiales ensayados, tales como el origen del RAP, emulsión asfáltica, agregado de aportación, o bien, en las dosificaciones de humedad, emulsión; es decir, en cada diseño de mezcla en frío se vuelve imprescindible el diseño individual, así mismo, su evaluación de desempeño. Por lo que este estudio muestra resultados para un diseño específico y solo nos puede guiar ante resultados que se podrían esperar en otros estudios a realizar.

4. Bibliografía

- [1] Oller S. Fractura Mecánica. Un Enfoque Global, Centro Internacional de Métodos Numéricos, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2001.
- [2] Vidal, G. A. (2011). Evaluación del Proceso de Fisuración en las Mezclas Bituminosas Mediante el Desarrollo de un Nuevo Ensayo Experimental "Ensayo Fénix". Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- [3] Wagoner M., W. Buttlar and G. Paulino. Disk-shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture, Experimental Mechanics, Vol. 45, N° 3, pp 270-277, 2005b.

VIATOP®

Liderando las SMA
desde 1988

inside

VIATOP®

RETENMAJER IBÉRICA
S.L. Y CIA. S. COB.



Fibras diseñadas
por la naturaleza
Más compatible del grupo JRS

C/ Transversal de Gracia 95, 2º
08008 Barcelona
Tf. 903 262 888 - Fx. 903 262 887

www.jrsafrica.com - info@jrsafrica.com