

Empleo del parámetro energía de fractura para evaluación de mezclas con fibras

Luis Miguel Gutierrez Klinsky, luis.gutierrez@grupoccr.com.br

Vivian Silveira dos Santos Bardini, vivian.bardini@ict.unesp.br

Eduardo Gutierrez Klinsky, alfaxina@sc.usp.br

Kamil Elias Kaloush, kaloush@asu.edu

Valéria Cristina de Faria, valeria.faria@grupoccr.com.br

El desenvolvimiento de tecnologías ha introducido en las últimas décadas nuevos materiales en la construcción de pavimentos asfálticos. De forma general, los laboratorios de carreteras no han acompañado ese desarrollo con técnicas que puedan evaluar todos los beneficios del empleo de materiales más sofisticados. En este estudio, es evaluada la utilización del parámetro de energía de fractura para estudiar mezclas asfálticas modificadas por fibras, con el objetivo de evaluar la técnica para obtener parámetros relacionados a la reflexión de fisuras. Para eso, fue desarrollado un programa de ensayos en una mezcla asfáltica convencional y en una mezcla asfáltica con fibras de polipropileno y aramida. El ensayo semicircular bend (SCB) fue utilizado para determinar la energía de fractura de las mezclas asfálticas en temperaturas intermedias. Fue realizada una simulación por elementos finitos para describir la evolución de la fisuración en revestimientos asfálticos. Los resultados indican que el empleo del parámetro de energía de fractura, aliado al análisis por elementos finitos, tiene buen potencial para estimar la fisuración de mezclas asfálticas por reflexión. Los ensayos en laboratorio muestran que la incorporación de fibras de polipropileno y aramida produce aproximadamente 30% de incremento de resistencia a este tipo de fisuración.

Palabras Clave: Energía de fractura, elementos finitos, mezclas asfálticas, fibras de polipropileno y aramida.

New materials emerged the last decade to build more durable asphalt pavements. However, most of road laboratories did not follow the development of new techniques to be able to assess all the benefits of more sophisticated materials. In this study the fracture energy was evaluated to study hot mix asphalts modified with fibers. The main goal was to use this parameter to estimate the risk the reflective cracking in new asphalt layers. A laboratory program was developed to perform tests in a control hot mix asphalt and in a modified hot mix asphalt with polypropylene and aramid fibers. The semicircular bend test (SCB) was used to determine the fracture energy of the asphalt mixtures at intermediate temperatures. The results were used to analyze the cracking propagation in asphalt layers using finite element approach. Results showed that the fracture energy and the finite element analysis together can be used satisfactorily to estimate the reflection cracking of hot mix asphalt layers. The results from the laboratory program exhibited that the addition of polypropylene and aramid fiber improves about 30% the resistance of reflective cracking, when compared to the control asphalt mix.

Keywords: Fracture energy, finite elements, hot mix asphalt, polypropylene and aramid fibres.

1. Introducción

La fisuración de pavimentos asfálticos por la carga repetida de tráfico es uno de los defectos más comunes que afectan la vida útil, debido a la reducción de la capacidad estructural del

pavimento. Las fisuras también constituyen un medio de ingreso de humedad en las capas inferiores del pavimento, facilitando la evolución de otros tipos de defectos, como el bombeamiento de finos por ejemplo. El empleo de capas asfálticas con características adecuadas para resistir la reflexión

de fisuras es uno de los principales desafíos en la conservación y mantenimiento de carreteras.

Las fisuras en los revestimientos asfálticos pueden comenzar como microfisuras, que se conectan para formar las macrofisuras y se propagan debido a las tensiones de tracción o de corte, o por una combinación de estas. El estudio del comportamiento de la fisuración en mezclas asfálticas puede ayudar a comprender mejor los mecanismos de surgimiento y evolución de las fisuras en camadas asfálticas de pavimentos. El uso de la mecánica de la fractura es necesario para fundamentar los diferentes factores que afectan el comportamiento en la fisuración. Su empleo, como criterio de ruptura puede explicar tanto la tasa de crecimiento de las fisuras medidas en el laboratorio, así como su desempeño y resistencia a la fisuración en campo [1].

En este estudio fue empleado el ensayo laboratorio semicircular bend (SCB) para analizar la energía de fractura de mezclas asfálticas en temperaturas intermedias. Dos mezclas asfálticas fueron utilizadas, una llamada de control y la otra con fibras de polipropileno y aramida. De forma complementaria, fue realizada una simulación por elementos finitos para describir la evolución de la fisuración en revestimientos asfálticos.

Para eso, fue desarrollado un programa de ensayos en una mezcla asfáltica convencional y en una mezcla asfáltica con fibras de polipropileno y aramida. El ensayo semicircular bend (SCB) fue utilizado para determinar la energía de fractura de las mezclas asfálticas en temperaturas intermedias. Fue realizada también una simulación por elementos finitos para evaluar la evolución de la fisuración en una estructura de pavimento hipotética con el revestimiento asfáltico fisurado.

2. Fundamentación teórica

2.1 Energía de Fractura en mezclas asfálticas

El abordaje convencional de fatiga, con base en la deformación, no considera los efectos de las fisuras (macro y micro fisuras) en las mezclas asfálticas, es decir, no es considerada la redistribución de la tensión inducida por la variación geométrica [1]. La energía de fractura de mezclas asfálticas puede ser modelada efectivamente con el abordaje de micromecánica, que considera la propagación de las fisuras tanto en la superficie de los agregados como a través de estos.

El modelo que describe la fractura debe considerar: (a) de-

formación de fractura, (b) energía de fractura y (c) resistencia a tracción. Con estos parámetros, el modelo permite la determinación del límite para la falla local o global de la mezcla asfáltica [1]. Sin embargo, otros estudios también indican que la elasticidad del material debe ser incluida en el modelaje de la fractura [2].

Diversos factores pueden influenciar la energía de fractura de mezclas asfálticas, tales como, temperatura del ensayo, tipo de agregado, contenido de ligante asfáltico y el volumen de vacíos. En temperaturas bajas, el ligante asfáltico tiene energía de fractura próxima a la de los agregados, por lo que la mezcla asfáltica puede mostrar comportamiento frágil. El incremento de la temperatura reduce la energía de ruptura del ligante asfáltico, produciendo también la disminución de la energía de fractura de la mezcla asfáltica y un comportamiento más dúctil. Por otra parte, el incremento del contenido de asfalto, de aproximadamente 0,5%, aumenta la energía de ruptura de las mezclas asfálticas, apenas en las temperaturas más elevadas [3].

2.2 Ensayo de flexión en espécimen semicircular

El ensayo de flexión en espécimen semicircular ha sido utilizado en diversos estudios para evaluar la energía de fractura de mezclas asfálticas [4]. Consiste básicamente en aplicar una carga a un espécimen semicircular con una fisura inducida en el centro, en un sistema biapoyado, de manera que la región central de la base esté sometido a tensión de tracción, conforme muestra la Figura 1.

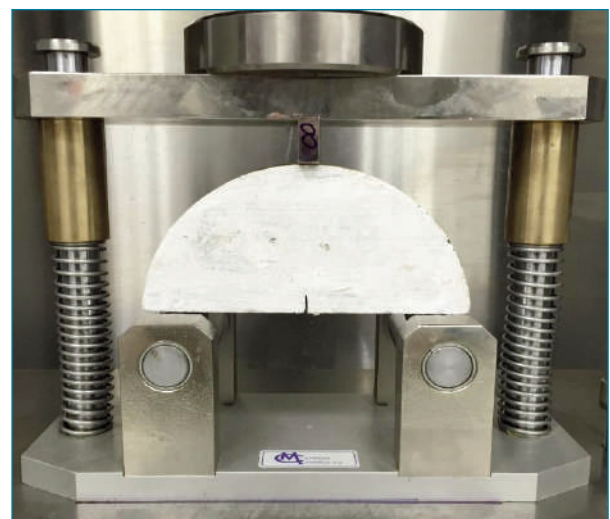


Figura 1. Configuración del ensayo de flexión en espécimen semicircular

La carga aplicada es usualmente por control de tasa de deformación constante y del ensayo es obtenida la carga máxima F_{max} y la deformación vertical ΔW . La deformación máxima (ϵ_{max}) obtenida con la carga máxima, conforme indica la ecuación a seguir:

$$\epsilon_{max} = \frac{\Delta W}{W} \times 100\% \quad (1)$$

donde W es la altura (mm), ΔW es el desplazamiento vertical en la fuerza máxima (mm). La tensión horizontal máxima es determinada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{max} = \frac{4,263 \times F_{max}}{D \times t} (N/mm^2) \quad (2)$$

donde D es el diámetro en mm, t es la espesura en milímetros y F_{max} es la fuerza máxima en N. De acuerdo con la recomendación del comité RILEM TC 50-FMC, la energía de fractura puede ser calculada por la relación entre el trabajo en la fractura, correspondiente al área debajo de la curva tensión versus desplazamiento, y el área de ligación, correspondiente al producto entre la longitud de ligación y la espesura del espécimen, antes de iniciar el ensayo, conforme presentado por la ecuación:

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (3)$$

donde G_f es la energía de fractura en J/m^2 , W_f es el trabajo en la fractura en J , dado por la ecuación:

$$W_f = \int P du \quad (4)$$

donde P es la carga aplicada en N, u es el desplazamiento en m, A_{lig} es el área de ligación dada por la ecuación:

$$A_{lig} = (r - a) \times t \quad (5)$$

donde r es el radio del espécimen en m, a es la longitud de la fisura inducida en m, t es la espesura del espécimen en m.

2.3 Empleo de fibras en mezclas asfálticas

En la búsqueda de mezclas asfálticas que puedan tener un desempeño mejor en los pavimentos, diferentes aditivos han sido incorporados a las mezclas asfálticas, tales como polímeros, caucho, fileres, mejoradores de adhesividad, entre otros. Las fibras asfálticas han sido utilizadas en mezclas asfálticas principalmente para mejorar la resistencia a fatiga y a la deformación permanente [5]. En general, las contribuciones de las fibras en las mezclas asfálticas son [6]:

- ayuda a fijar el asfalto en las mezclas asfálticas y evitar su escurrimiento en transporte;
- refuerza el mastique asfáltico;
- reduce la susceptibilidad a la temperatura del mastique asfáltico, debido a la red tridimensional formada.

Las fibras de carbono aumentan la rigidez de la mezcla asfáltica y la tornan más resistente al ahuellamiento en las temperaturas más altas, además de incrementar la resistencia a tracción. No obstante, sus beneficios pueden no ser notados en temperaturas bajas [7]. Las fibras de vidrio pueden incrementar la rigidez y la resistencia a tracción de las mezclas asfálticas, pero durante la construcción de revestimientos son necesarios cuidados especiales [8].

Las fibras de polipropileno han sido bastante utilizadas en la ingeniería civil, principalmente en el refuerzo secundario del concreto de cemento Portland. Debido a la adhesión entre las fibras de polipropileno y el asfalto, el mecanismo de refuerzo es distinto para el concreto asfáltico [9]. Estas fibras pueden atrasar la reflexión de fisuras en revestimientos asfálticos, causadas por movimientos horizontales y verticales de placas de concreto, y al mismo tiempo reducir el potencial de ahuellamiento [10].

Los casos más satisfactorios de empleo de fibras en mezclas asfálticas ha sido por la combinación de polipropileno y aramida. El polipropileno actuaría como un agente de adhesión, mientras que la aramida contribuye con un esfuerzo tridimensional. La combinación de estas fibras refuerza la resistencia al ahuellamiento y a la fatiga [11].

3. Análisis en laboratorio

3.1 Materiales y métodos

Para evaluación del uso de las fibras de polipropileno y aramida en mezclas asfálticas, fueron analizadas dos mezclas asfálticas, una de control y una con la inclusión de fibras. La mezcla asfáltica fue definida para atender la granulometría correspondiente a la Mix IVb del Instituto de Asfalto de los Estados Unidos, usualmente utilizada en el Estado de São Paulo, Brasil, con un ligante asfáltico convencional de penetración entre 30 y 45 dmm, denominado CAP 30/45. La Tabla 1 muestra los resultados de dosificación de dicha mezcla, realizada con el compactador Marshall, en la energía de 75 golpes por cara del espécimen.

Tabla 1. Resultados de la dosificación de la mezcla asfáltica de control

Contenido de asfalto (%)	4,7
Densidad real de los agregados	2,677
Densidad aparente de la mezcla asfáltica	2,379
Densidad aparente de la mezcla asfáltica	2,478
Volumen de vacíos (%)	4,0
Volumen de vacíos de agregado mineral (%)	14,1
Volumen de vacíos llenos de asfalto (%)	71,6

Las fibras fueron adicionadas a la mezcla asfáltica de control en la proporción de 0,5kg por tonelada de mezcla asfáltica. Las características de las fibras de polipropileno y aramida utilizadas son presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de las fibras de polipropileno y aramida

Propiedad	Fibras	
	Polipropileno	Aramida
	Fibra torcida fibrilada	Fibra multifilamento
Densidad	0,91	1,45
Resistencia a tracción (MPa)	483	3000
Longitud, mm	19	19
Resistencia Ácidos/álcalis	Inerte	Buena
Temperatura de Decomposición °C	157	> 450

Los datos de dosificación de la mezcla asfáltica de control fueron utilizados para preparar las muestras necesarias para el ensayo de flexión en espécimen semicircular. Para eso, fueron compactados especímenes de 150mm de diámetro y 180mm de altura en el compactador giratorio SUPERPAVE. Después de la compactación, los especímenes fueron serrados, descartando 1cm de la base y de la superficie, para obtener 3 discos de 50mm de espesura, siendo que de cada uno de ellos fue posible obtener 2 especímenes semicirculares para el ensayo en cuestión. En el centro de estos especímenes fue inducida una fisura de 10mm de profundidad y 1mm de abertura. La carga aplicada fue controlada a la velocidad de 1mm/min y la temperatura del ensayo fue mantenida a 25°C.

Tabla 3. Resultados del ensayo de flexión en espécimen semicircular en mezcla asfáltica de control

Especimen	4	5	6	Promedio	Desviación Estándar
Fuerza máxima (kN)	3,97	3,80	3,54	3,77	0,22
Desplazamiento en la fuerza máxima (mm)	1,46	1,25	1,57	1,43	0,16
Emax (%)	1,9467	1,67	2,09	1,90	0,22
omax (MPa)	2,26	2,16	2,01	2,14	0,12
Wf (J)	6,29	5,81	7,11	6,41	0,66
Gf (J/m ²)	1936	1789	2189	1971	203

Tabla 4. Pavimento utilizado para el cálculo de deflexiones introducidas en el modelaje de elemento finito

Camada del pavimento	Espesura (mm)	Módulo de Resiliencia (MPa)	Coefficiente de Poisson
Revestimiento asfáltico nuevo	80	4.500	0,3
Revestimiento asfáltico fisurado	150	4.000	0,3
Base granular	200	300	0,35
Sub base granular	200	250	0,35
Subrasante	-	100	0,4

3.2 Resultados

El monitoreo y adquisición de datos, del tipo fuerza versus desplazamiento, durante el ensayo de flexión en espécimen semicircular, permite obtener diferentes parámetros, como fue visto anteriormente. Los resultados de dichos parámetros son presentados en la Tabla 3 y 4, para la mezcla asfáltica de control y la mezcla asfáltica con fibras de polipropileno y aramida.

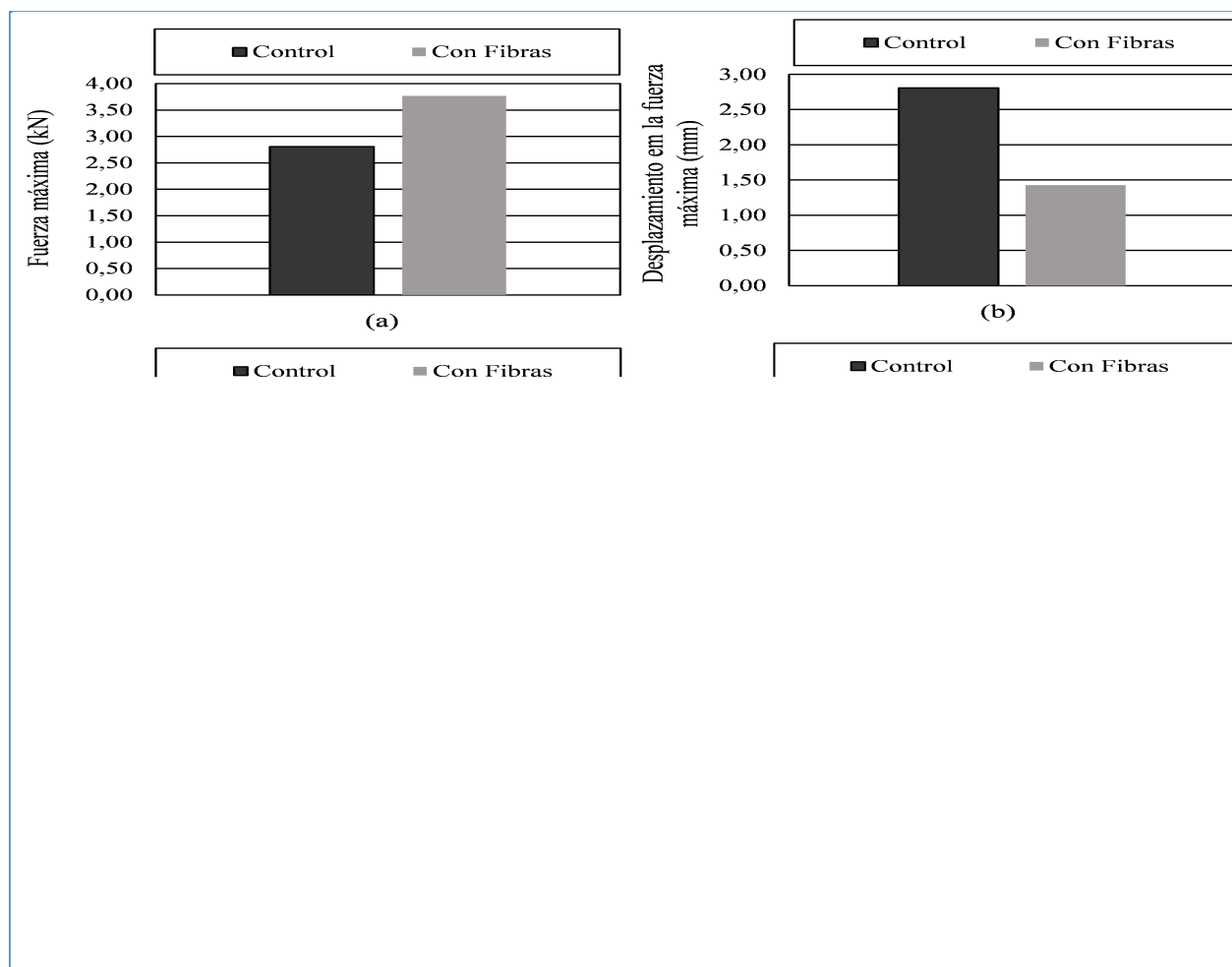
Los resultados mostrados en las Tablas 3 y 4 también son presentados gráficamente en la Figura 2. Puede notarse en la Figura 2a que la fuerza máxima para llegar a la ruptura fue mayor en la mezcla asfáltica con fibras, y al mismo tiempo el desplazamiento (Figura 2b) y la deformación máxima (Figura 2c) fueron inferiores en el momento de alcanzar la fuerza máxima.

Este comportamiento indica que las fibras actúan para resistir más carga produciendo una menor abertura de fisura en el pavimento.

En la Figura 2d es mostrada la resistencia a tracción de la mezcla asfáltica en la dirección horizontal. Puede verificarse que la mezcla asfáltica con fibras tiene una resistencia superior, lo que indicaría que serían necesarias tensiones más elevadas para poder conseguir incrementar la abertura de la fisura.

Las Figuras 2e y 2f muestran el trabajo y la energía de fractura obtenidas en el ensayo, respectivamente. Se observa que la mezcla asfáltica con las fibras de polipropileno y aramida tiene una energía de fractura mayor que la mezcla asfáltica de control, en aproximadamente 50%, lo que indicaría una mayor resistencia para el desarrollo de fisuras por fatiga en revestimientos asfálticos nuevos y, al mismo tiempo, podría soportar

Figura 2. Parámetros obtenidos en el ensayo de flexión en espécimen semicircular en la mezcla asfáltica de control y en la mezcla asfáltica con fibras. a) Fuerza máxima. b) Desplazamiento en la fuerza máxima. c) Deformación máxima. d) Tensión horizontal máxima. e) Trabajo. f) Energía de fractura



mejor defectos del tipo reflexión de fisuras.

4. Simulación de reflexión de fisura

Para analizar la posibilidad de reflexión de fisuras en un revestimiento asfáltico apoyado sobre otro revestimiento asfáltico fisurado, fue desarrollada una simulación por elementos finitos. Para ello, se empleó el modelador CASCA Versión 3.2, desarrollado por el Grupo de Mecánica de Fractura de la Universidad de Cornell. En la Figura 3 es mostrado el modelaje por elemento finito de una fisura existente en el pavimento, sobre el cual es construido un revestimiento asfáltico, que por ejemplo, podría ser reforzados con fibras de polipropileno y aramida.

fisura en el nuevo revestimiento asfáltico seguirá la misma dirección del pavimento existente (Baek, 2010). Asumiendo como válida esta hipótesis, se procedió a la creación de elementos de interfaz, como muestra la Figura 4, en la zona inmediatamente superior a la fisura existente, en la cual se presume que se propague la fisura.

El Software Franc2dL requiere que, en vez de cargas, sean aplicados desplazamientos para poder visualizar el comportamiento de los elementos de interfaz, después que se ha alcanzado el pico de desplazamiento que produce fractura. A raíz de esta necesidad, fueron introducidos las deflexiones de un pavimento, con las características presentadas en la Tabla 4, calculados por medio del software sudafricano mePADS. Se

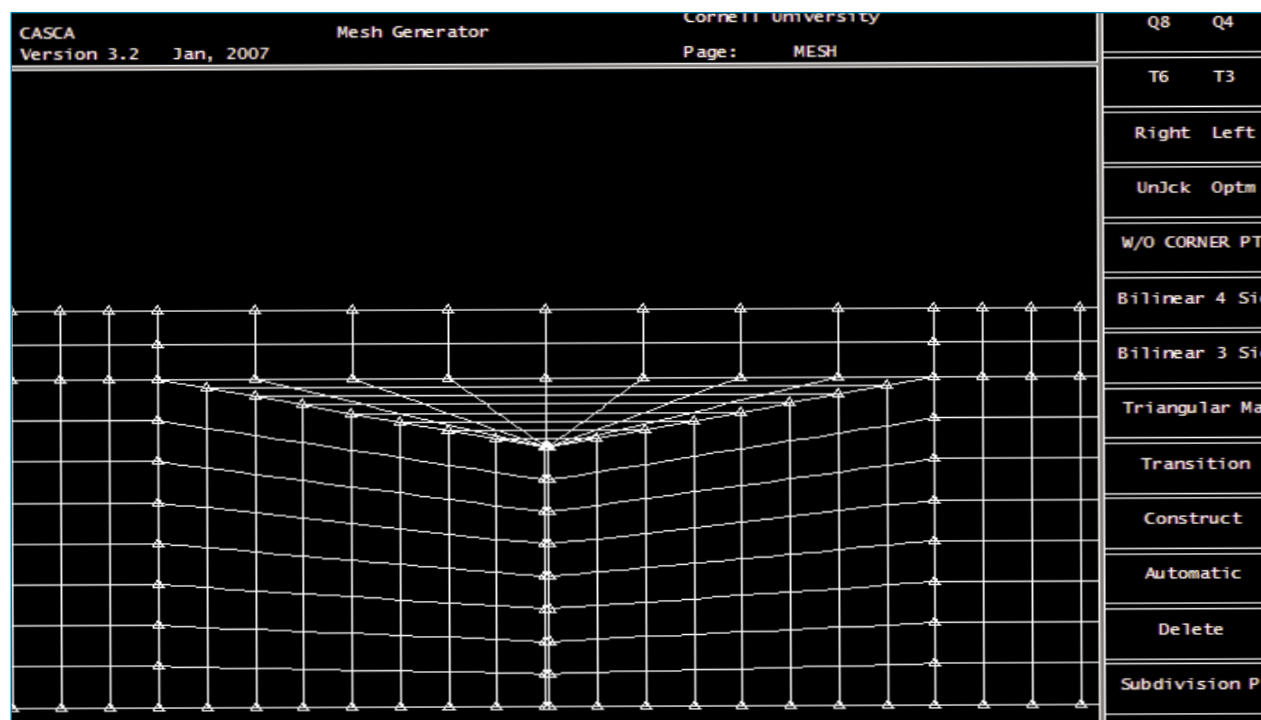


Figura 3. Modelaje por elementos finitos de un revestimiento asfáltico apoyado sobre una fisura de 2mm en un pavimento existente

Para el mallado fueron utilizados elementos finitos cuadrados de ocho nudos, Q8, disponibles en la biblioteca de elementos del programa. Fue considerada una fisura con abertura de 2mm, considerada como FC-2 por la Norma DNIT TER 005/2003. Para procesar el modelo creado fue utilizado el Software Franc2dL Versión 2.3, también desarrollado por el Grupo de Mecánica de Fractura de la Universidad de Cornell. Este programa permite evaluar la propagación de una fisura empleando diferentes herramientas de análisis.

Inicialmente se efectuó la evaluación considerando que la

consideraron las deflexiones en direcciones perpendiculares, hasta una distancia de 2.300mm de distancia del punto de aplicación de dos cargas de 20,5kN cada una, distanciadas 350mm entre sí, y con presión de llanta de 560kPa.

Una vez aplicadas las deflexiones en el modelaje se realizó el análisis elástico, considerando el estado plano de tensión con relajación dinámica, para tomar en cuenta los elementos de interfaz arriba de la fisura del pavimento existente. Se evaluaron las tensiones de tracción para las situaciones presentadas en la Tabla 5, conforme los resultados obtenidos en el ensayo de fle-

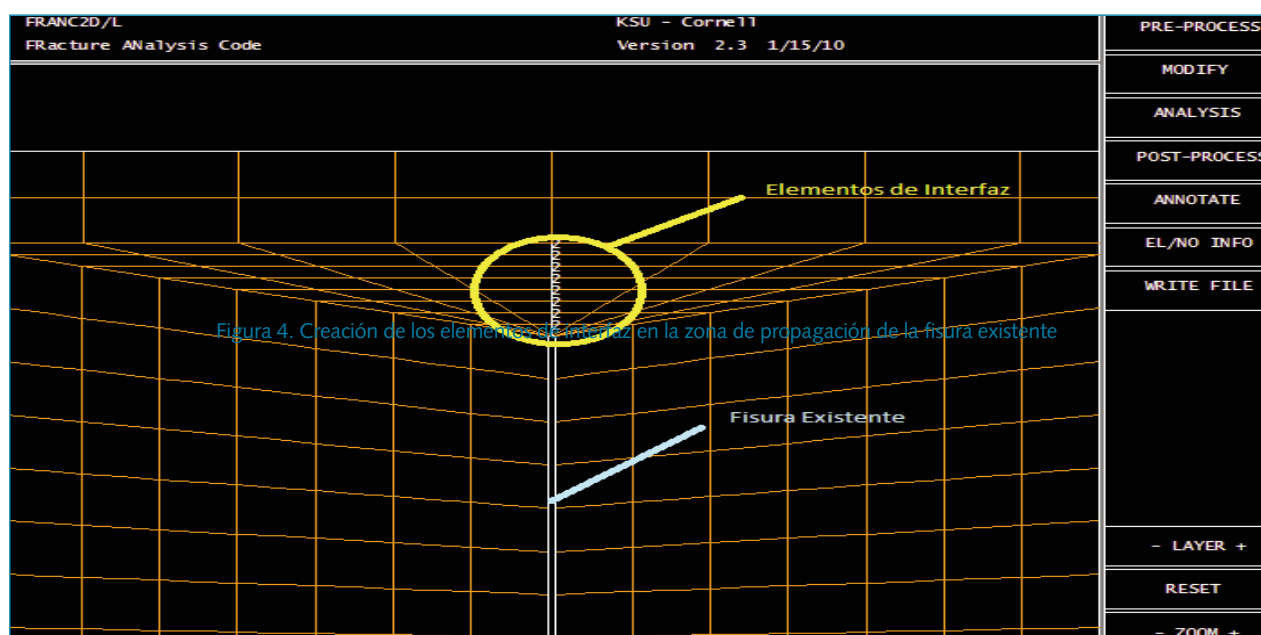


Figura 4. Creación de los elementos de interfaz en la zona de propagación de la fisura existente

xión de espécimen semicircular.

Vale notar que los elementos de interfaz se consideraron apenas en la mitad del espesor del revestimiento asfáltico nuevo, debido a que las tensiones de tracción por flexión son importantes en la propagación de fisuras hasta que la profundidad de esta alcanza la región comprimida del revestimiento asfáltico. A partir de este punto, son determinantes las tensiones originadas por tensiones de corte y efectos térmicos (NCHRP 669), y en este estudio se consideran paneas los efectos de flexión.

20,5kN, no producen la propagación de la fisura. Esto es verificado ya que las tensiones en las fibras a la fisura existente son no nulas y de tracción.

Con el objetivo de validar el modelo utilizado en FRANC2DL, se consideró el caso hipotético de inducir una fractura de 0,1mm, 0,5mm y 0,6mm, para una resistencia a tracción del concreto asfáltico de 1,0MPa. Eso podría representar, por ejemplo, un vehículo especial circulando sobre un concreto asfáltico con temperaturas negativas. Se puede observar en la Figura 6 que, para el desplazamiento de 0,6mm la curva de tensiones

Tabla 5. Casos analizados en el modelaje por elemento finito

Caso	Resistencia a Tracción (MPa)*	Desplazamiento a tracción (mm)
1	1,60	3,44
2	2,14	3,61
*Del ensayo de flexión de espécimen semicircular		

En la Figura 5 son presentados los resultados de las tensiones a tracción horizontales obtenidas a lo largo de la interfaz del revestimiento asfáltico nuevo, donde se presume que la fisura se propagará. Puede observarse en esa figura que el concreto asfáltico con fibras desarrolla tensiones un poco mayores que el concreto asfáltico de control, siendo que las mayores tensiones son alcanzadas 2mm arriba de la fisura existente.

Los valores anteriores indican que en ambos casos no existió fisura de interfaz, es decir que un ciclo de dos cargas de

de acerca a la fractura, para una deformación límite a tracción de 0,5mm, la fisura se propaga a una profundidad de 17mm, mientras que para una deformación de 0,1mm la propagación de fisuras es a partir de 35mm.

5. Conclusiones

En este estudio fue evaluado el posible empleo de una combinación de fibras de polipropileno y aramida en mezclas as-

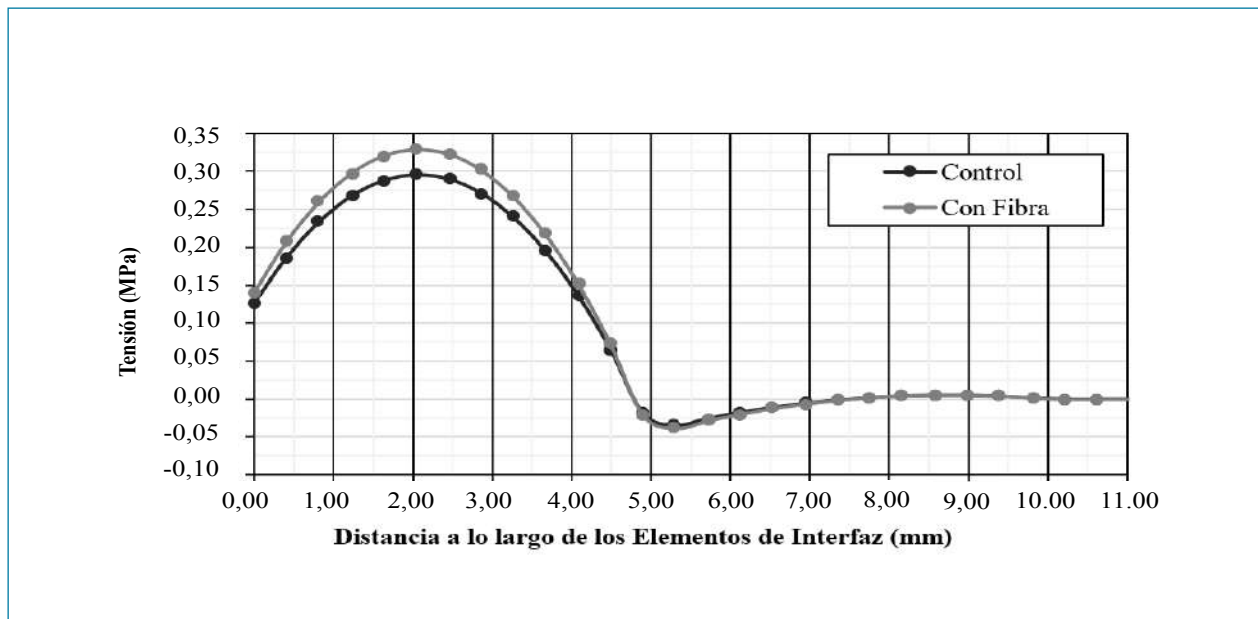


Figura 5. Tensiones en la zona de propagación de la fisura

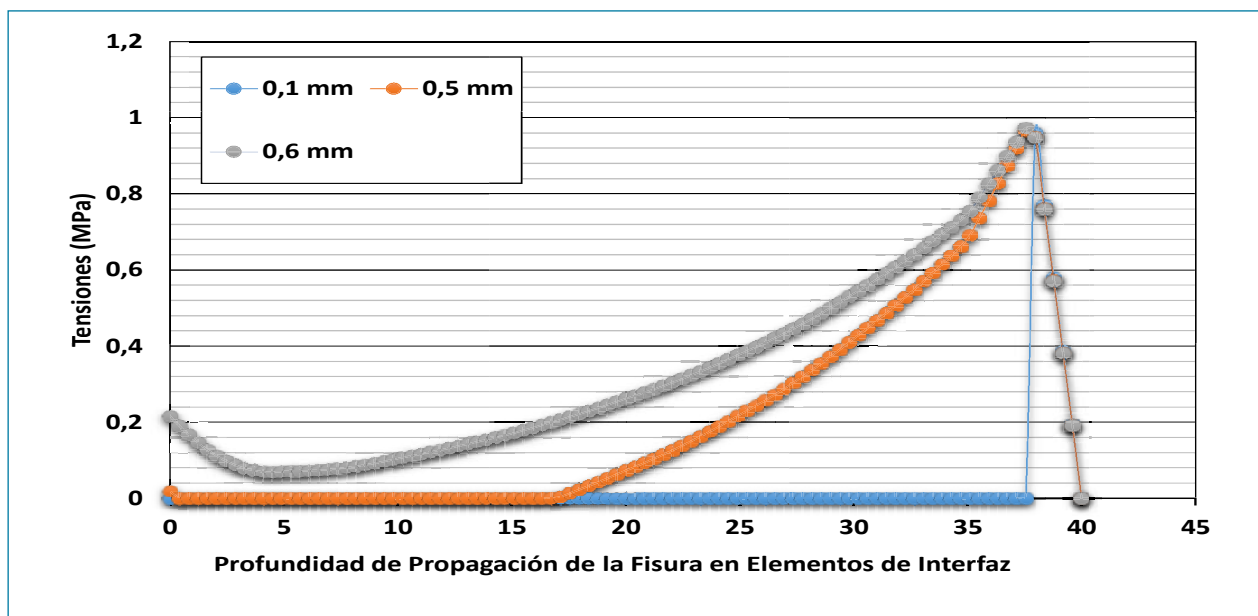


Figura 6. Propagación de fisuras en el elemento de interfaz del nuevo revestimiento asfáltico

fálticas. El ensayo de flexión de espécimen semicircular con fisura inducida fue utilizado para evaluar el potencial de mezclas asfálticas con fibras para resistir la fisuración del tipo reflectiva. Los resultados experimentales indican que la incorporación de estas fibras en la mezcla asfáltica incrementa la resistencia a tracción en la dirección horizontal y al mismo tiempo reducen el potencial de deformación. Este comportamiento significaría una mejor resistencia a la propagación de fisuras en nuevos revestimientos asfálticos apoyados sobre superficies con algún

nivel de fisuración.

La energía de fractura fue superior en la mezcla asfáltica con fibras, al ser comparada con la mezcla asfáltica de control. Este parámetro es usualmente asociado al potencial de una mezcla asfáltica para resistir a la fisuración por fatiga, lo que indicaría también que el empleo de fibras en las mezclas asfálticas podría retardar la fisuración de este tipo en pavimentos asfálticos nuevos.

Con relación al análisis y modelaje de elementos finitos, fue

posible verificar la potencialidad de esta técnica para simular la fisuración en revestimientos asfálticos apoyados sobre pavimentos deteriorados. Para los valores de resistencia a tracción obtenidos en el ensayo de flexión de espécimen circular, no fue observada la propagación de la fisura en una única aplicación de una carga doble de 20,5kN. Sin embargo, la simulación realizada para cargas mayores comprobó la efectividad del modelo para estimar la propagación de la fisura.

6. Bibliografía

- [1] Zhang, Z.; Roque, R.; Birgisson, B. Evaluation of Laboratory-Measured Crack Growth Rate for Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record*. No. 01-0272. pp. 65-75. (2001).
- [2] Jacobs, M. M. J.; Hopman, P. C.; Molenaar, A. A. A. Application of Fracture Mechanics Principles to Analyze Cracking in Asphalt Concrete. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Vol. 65, pp. 1-39. (1996).
- [3] Braham, A. F.; Buttlar, W. G.; Marasteanu, M. O. Effect of Binder Type, Aggregate, and Mixture Composition on Fracture Energy of Hot-Mix Asphalt in Cold Climates. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2001. Washington, D.C. pp.102-109. DOI: 10.3141/2001-12. (2007).
- [4] Biligiri, K. P.; Said, S.; Hakim, H. Asphalt Mixtures Crack Propagation Assessment using Semi-Circular Bending Tests. *International Journal of Pavement Research and Technology*. Vol. 5. No. 4. 9pp. (2012).
- [5] SHAOPENG, W.; QUNSHAN, Y.; NING, L.; HONGBO, Y. (2007) Effects of Fibers on the Dynamic Properties of Asphalt Mixtures. In *Fibers of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition*, Vol. 22, pp. 733-736.
- [6] SERFASS, J. P.; SAMANOS, J. (1996) Fiber-Modified Asphalt Concrete Characteristics, Applications and Behavior. In *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 65, pp. 193-230.
- [7] CLEVEN, M. A. (2000) Investigation of the Properties of Carbon Fiber Modified Asphalt Mixtures. M.S. thesis, Department of Chemical Engineering, Michigan Technological University, Houghton, MI.
- [8] ABTAHI, S. M.; SHEIKHZADEH, M.; HEJZI, S. M. (2010) Fiber Reinforced Asphalt-Concrete – A Review. In *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 871-877.
- [9] TAPKIN, S. (2008) The effect of Polypropylene Fibers on Asphalt Performance. In *Building and Environment*, Volume 43, Issue 6, pp. 1065-1074.
- [10] JIANG, T.; MCDANIEL, R. S. (1993) Application of Cracking and Sealing and Use of Fibers to Control Reflective Cracking. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1388, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 150-159.
- [11] KALOUSH, K. E.; BILIGRI, K. P.; ZEIADA, W. A.; CARY, C.; DWIVEDI, S.; REED, J.; RODEZNO, C. (2010) Evaluation of Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Material Characterization Tests. In *Journal of Testing and Evaluation*, Volume 38, Issue 4, pp. 1-12.



CARRETERA A ESTRENAR CADA DÍA

En Cepsa queremos cuidar y conservar las carreteras siempre en perfecto estado. Por ello, disponemos de una amplia gama de betunes convencionales, desde la Gama ELASTER de última generación en betunes modificados con polímeros, hasta masillas sellantes.

Mantener las carreteras es fácil con los Asfaltos de Cepsa.

Más información en el **91 265 47 13** o en **cepsa.com/asfaltos**



CEPSA

Tu mundo, más eficiente.