



TRABAJO ESENCIAL DE FRACTURA DE LIGANTES A TEMPERATURAS INTERMEDIAS POR DUCTILÓMETRO NO CONVENCIONAL



Dr. Delmar Salomon
 Presidente
 Pavement Preservation Systems
 8100 W. Marigold Street 140614
 Garden City, Idaho, 83714, USA
 delmar@pavementpreservation.com



Dr. Ing. Simon A.M. Hesp
 Professor
 Department of Chemistry Queen's University
 90 Bader Lane, Kingston, Ontario
 CANADA, K7L 3N6
 simon@chem.queensu.ca

Resumen

Existen ensayos tradicionales para ligantes, a pesar de los avances reológicos del Superpave, que se siguen empleando mundialmente para comprender empíricamente el comportamiento del ligante asfáltico a temperaturas bajas, altas e intermedias. Sin embargo, sigue mucho debate sobre cuáles son los mejores ensayos a temperaturas intermedias para comprender la fatiga. La ductilidad tradicional sin esfuerzo y la de ductilidad con esfuerzo son bien conocidas. Otra manera de emplear el ductilómetro y menos conocida es en el ensayo denominado, por sus siglas en inglés, DENT “Double Edge Notched Tensión” y que consiste en hacer muescas en ambos lados del ligante asfáltico para así concentrar las tensiones y asegurar de que se produzca una fractura en esa ubicación. Las muescas son importantes en la determinación de la energía esencial para la fractura. En la provincia de Ontario, Canadá se emplea con buen éxito para la identificación y comportamiento de ligantes a temperaturas intermedias. A continuación describimos la norma, técnica y resultados.

Introducción

La resistencia de un ligante asfáltico es la tensión crítica para iniciar un fallo mecánico. La falla mecánica definitiva es la fractura del ligante. El parámetro que describe la capacidad del ligante asfáltico para absorber energía es la tenacidad. Esa energía es el trabajo esencial de fractura que puede ser un ligante dúctil o frágil (quebradiza).

Cuando existe el riesgo de que un pavimento se fracture es imprescindible entender cómo las propiedades del cemento asfáltico son influenciadas por este tipo de falla. A bajas temperaturas donde hay congelación se presta poca atención ya que las fisuras están inhibidas en gran extensión por el congelamiento de la subrasante, mientras que a altas temperaturas la habilidad del cemento asfáltico de fluir y auto repararse contribuye a evitar en gran medida la fractura. En cambio, a temperaturas intermedias desde el descongelamiento hasta las temperaturas del medio ambiente, los ligantes del asfalto pueden fallar en una manera dúctil bajo la carga repetitiva de los neumáticos que lo lleva a un tipo de fractura difundida denominada fatiga. La fatiga normalmente no es motivo de preocupación en pavimentos de gran espesor debido a que las tensiones son reducidas. Para diseños más delgados, sin embargo, puede resultar en una reducción significativa del ciclo de vida, especialmente cuando los ligantes asfálticos no tienen la requerida tolerancia a la deformación bajo tensión con severas restricciones en la mezcla, por ejemplo: burbujas de aire, cera, ácido, y ligantes de parafinas de petróleo modificadas.

Tensión de doble borde endentado (geometría de las probetas utilizadas para los ensayos del MTEF, probeta

doblemente entallada), norma de laboratorio, LS-299 – Asphalt Cement’s Resistance to Fatigue Fracture Using Double-Edge-Notched Tension Test (DENT) (MTO (2014)), determina un (desplazamiento típica apertura de fisura (DTAF); desplazamiento aproximado del doble endentado con una grieta típica. El parámetro crítico CTOD (por sus siglas en inglés, Crack Tip Opening Displacements) provee una medida de la tolerancia a la tensión de una fibra muy delgada del cemento asfáltico en estado dúctil y bajo una severa restricción, por ejemplo: en la punta de la grieta o fisura que se propaga, o entre dos partículas grandes de agregado.

La norma de laboratorio LS-299 DENT especifica el uso de muestras endentadas con anchos de 5mm, 10mm, y 15mm, y un análisis más fundamental, basado en energía (ecuaciones 1 y 2), comparado con un ensayo de fuerza-ductilidad convencional. Sin embargo, el ensayo se efectúa fácilmente con un equipo de ductilidad ampliamente disponible (Figura 1).

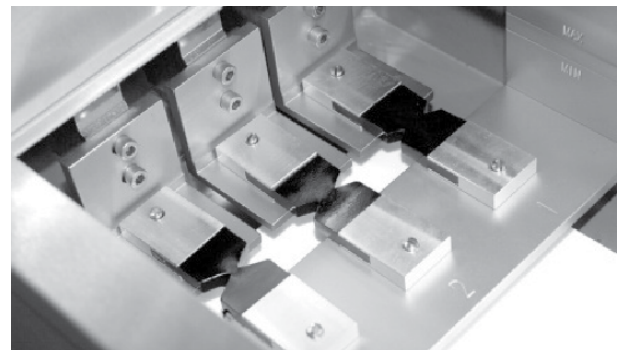


Figura 1. MTEF ensayando probetas con ligantes de 5, 10 y 15 mm de largo (L). El ensayo se hace en un equipo de ductilidad convencional con capacidad para medir la fuerza.

Descripción de la Norma y Equipo

Basado en el Método Esencial del Trabajo de Fractura (METF), de Ontario, Canadá, llamado ensayo de

Ensayando por duplicado muestras DENT con tres diferentes ligantes (L) es posible determinar con precisión el trabajo esencial específico de fractura (W_e) para romper una fibra delgada de cemento asfáltico de acuerdo con una relación simple (Cotterell y Reddell 1977):

$$W_t = W_e + W_p = w_e \times BL + \beta w_p \times BL^2 \quad (1)$$

$$w_t = W_t/BL = w_e + \beta w_p L \quad (2)$$

Donde W_t , W_e y W_p , son la energía total o trabajo de fractura, es decir la energía total consumida, la energía esencial, y la energía no esencial o de fractura plástica; la energía específica de falla J/m^2 , y son igual a un factor de forma que se aplica al volumen de la zona plástica (igual a $\pi/4$ para una forma circular); L es el longitud del ligante (m), y B es el espesor de la muestra (m).

De acuerdo con la Ecuación 2, la energía específica total de la falla (W_t) es determinada primero para cada longitud del ligante de la energía total de la falla, (por ejemplo, el área debajo de la curva fuerza-desplazamiento), y el área de la sección transversal del ligamento BL . La (W_t) energía total, es subsecuentemente graficada contra L para determinar ambos W_e y w_p de la intercepción y la pendiente (Figura 3(d)).

Finalmente un valor crítico aproximado se calcula dividiendo W_e por el promedio de la sección neta de los picos de estrés en el ligamento menor del espécimen ($\sigma_{n,5mm}$ (N/m²)):

$$CTOD \sim W_e / \sigma_{n,5mm} \quad (3)$$

Extrapolando a una longitud cero del ligante, es posible de obtener la propiedad esencial W_e y el CTOD, los cuales proveen una medida más realista de la resistencia a la falla dúctil comparado con, por ejemplo, las medidas de ductilidad y de fuerza-ductilidad, o cualquier medición con un reómetro entre las placas paralelas.

Figura 2. Muestras de DENT mostrando (Izq.) una zona plástica elíptica llevada a fallar sin que el cemento asfáltico se desgarre en una línea recta, y (Der.) una falla dúctil con significativa elasticidad y un ligamento desgarrado para un ligante de un polímero modificado.



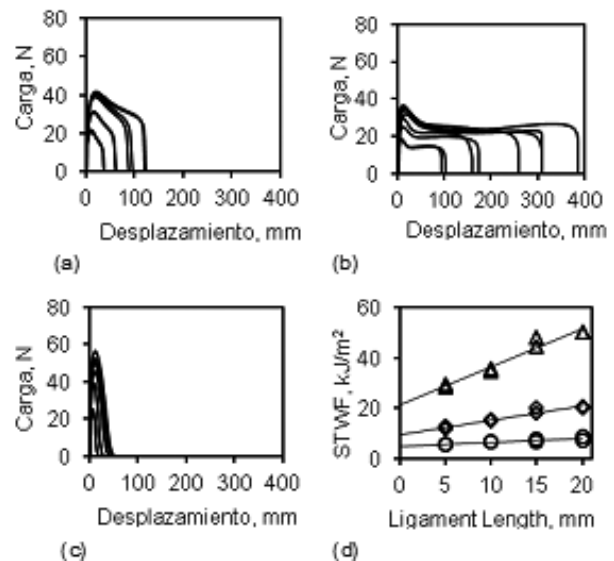
La Figura 2 provee imágenes de muestras DENT que han fallado:

(Izq.) Ilustra un resultado característico de un cemento asfáltico no modificado y con aire soplado.

(Der.) Ilustra un distintivo resultado diferente para un ligante de polímero modificado.

La Figura 3 provee curvas de desplazamiento de fuerzas básicas y datos procesados de acuerdo a la ecuación 2 para tres ligantes modificados de la Tabla 1. Estos gráficos demuestran en general, que el método es altamente reproducible.

Figura 3. Curvas básicas de fuerza-desplazamiento de muestras DENT con ligamentos de 5, 10, 15 y 20 mm: (a) elastomérico reactivo terpolímero-modificado PG 64-34, (b) estireno butadieno-modificado PG 64-34, y (c) PG 58-34 oxidado (soplado) (Johnson et al. 2014). Nota: La norma LS-299 solamente requiere ensayos de muestras de ligamentos de 5, 10 y 15 mm.



La Figura 3 provee curvas de desplazamiento de fuerzas básicas y y resultados de acuerdo a la ecuación 2 para tres ligantes modificados descritos en la Tabla 1. Estos gráficos demuestran en general, que el método es altamente reproducible.

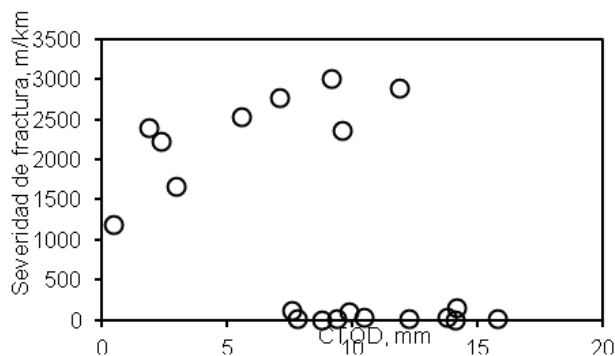
Tabla 1. Resultados de ligantes con cualidades idénticas de baja temperatura DENT

Ligante	Grado Superpave XX-YY, °C	W_e , kJ/m ²	βw_p , MJ/m ²	CTOD, mm
1	64-34	9.6	0.56	23
2	64-34	8.1	0.28	12
3	64-34	6.4	0.23	13
4	64-34	8.3	0.70	22
5	64-34	21.5	1.50	58
6	58-34	4.8	0.15	9
7	52-34	5.0	0.13	13

Mientras que los ligantes más rígidos muestran un CTOD reducido, la cantidad y el tipo de modificación también tiene una influencia importante pero el actual comportamiento es difícil de predecir. La experiencia ha demostrado que los ligantes de calidades idénticas al Superpave™ pueden mostrar una considerable variación en sus propiedades de falla dúctil. La Tabla 1 muestra las propiedades determinadas a 15°C y 50 mm/min para una serie de ligantes con calidades casi idénticas al PG XX-34 como el que se ha usado en una prueba de pavimento en Ontario (Johnson et al. 2014).

La Figura 4 muestra la severidad de la fractura en comparación con el LS-299 CTOD. Como resultado de usar en el CTOD un límite un poco arbitrario de alrededor de 7.5 mm (como está indicado por la línea de trazos), se obtiene una precisión del 85% para predecir tanto un comportamiento bueno o pobre. Los tres ligantes que superaron el límite de 7.5 mm pero tuvieron un comportamiento pobre, no cumplieron los requisitos de calidad a baja temperatura.

Figura 4. Indicaciones de fractura contra CTOD (Desplazamiento de la grieta en una fractura típica) para 20 contratos en Ontario (Hesp et al. 2009).



Comparación con Otros Ensayos y Conclusiones

Una validación más rigurosa, acelerando la carga a 19°C, fue obtenida con los resultados del último experimento de la Federal Highway Administration's Accelerated Loading Facility (FHWA ALF) (Gibson et al. 2012). De todas las propiedades evaluadas de los ligantes para predecir el comienzo y la progresión del CTOD (Desplazamiento de la grieta en una fractura típica), se obtuvo la mejor correlación con un valor compuesto de 0.99 (Tabla 2).

Tabla 2 FHWA ALF Validación de ensayos para la fatiga.

Ensayo de ligante para fatiga	Puntuación compuesta
CTOD aproximado	0.99
Energía de rendimiento del ligante	0.88
Barrido de tiempo DSR*	0.88
Falla en Deformación DTT	0.81
Superpave G* sin?	0.75
Barrido de tiempo en deformación	0.67
W*	0.55
BBR m-value	0.54
Barrido de esfuerzo	0.69**

*DSR = reómetro de corte dinámico. Nota: DETALLES EN Gibson et al. 2012.
** tendencia incorrecta.

Ya que el CTOD da una medición precisa de la tolerancia de la tensión dúctil bajo una limitación severa de la tensión, ha sido posible proveer con precisión las propiedades específicas en el comportamiento de la fatiga para un cemento asfáltico. Una investigación extensa en pavimentos en uso ha suministrado la muy buscada correlación con indicaciones de fractura.

Usando cementos asfálticos, extraídos y reciclados de 20 contratos en Ontario que variaban entre 8 a 16 años de edad, ha sido posible validar el ensayo DENT con datos de comportamiento en el campo.

Referencias

- Cotterell, B., J.K. Reddel. The Essential Work of Plane Stress Ductile Fracture. International Journal of Fracture, 13(3), 1977, 267-277.
- Gibson, N., X. Qi, A. Shenoy, G. Al-Khateeb, M.E. Kutay, A. Andriescu, K. Stuart, J.S. Youtcheff, T. Harman. Performance Testing for Superpave and Structural Validation. Report No. FHWA-HRT-11-045, FHWA, U.S. Department of Transportation, November 2012.
- Hesp, S.A.M., A. Soleimani, S. Subramani, T. Phillips, D. Smith, P. Marks, K. Tam. Asphalt pavement cracking: analysis of extraordinary life cycle variability in Eastern and Northeastern Ontario. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 10(3), 2009, pp. 209-227.
- Johnson, K.-A., S.A.M. Hesp, and A. Andriescu. Double-edge-notched tension testing for the fatigue grading of straight and modified asphalt binders. Submitted for Publication, International Journal of Pavements, 2014.
- Ministry of Transportation of Ontario, LS-299 – Method of Test for Asphalt Cement's Resistance to Fatigue Fracture Using Double-Edge-Notched Tension Test (DENT). Revision 29, MTO Laboratory Testing Manual, 2014.
- Para información visite: www.hespresearchgroup.ca