

Evaluación de la energía de fractura en concretos asfálticos con propiedades anti-envejecimiento mediante la prueba de IDEAL-CT

Evaluation of fracture energy in asphalt concretes with anti-aging properties by IDEAL-CT test.

Daniel Mejía & Alexandra Ossa

Vías Terrestres, Instituto de Ingeniería UNAM, México, DMejial@iingen.unam.mx

RESUMEN: Esta investigación se centró en la evaluación de la energía de fractura de dos concretos asfálticos mediante el ensayo IDEAL-CT. El primer concreto fue fabricado con un cemento asfáltico de uso convencional y el segundo fue elaborado con un cemento asfáltico modificado con propiedades anti-envejecimiento. Ambos concretos fueron ensayados en estado seco y húmedo en condición original (sin envejecimiento) y después de ser sometidos a envejecimiento durante un año por intemperismo. Los resultados mostraron que el concreto con propiedades anti-envejecimiento presenta mayores valores de estabilidad y de energía de fractura G_f , pero con resultados de *CT-Index* menores en comparación con el concreto asfáltico convencional. Así mismo, los valores obtenidos de la pendiente $|m_{75}|$, indican que el concreto asfáltico de uso convencional presenta una mejor tolerancia al agrietamiento después de la falla, sin embargo, el concreto con propiedades anti-envejecimiento en todas las condiciones evaluadas presentó mejor resistencia antes y después del envejecimiento.

ABSTRACT: This research focused on the evaluation of the fracture energy of two asphalt concretes using the IDEAL-CT test. The first concrete was made with a conventional asphalt cement and the second was made with a modified asphalt cement with anti-aging properties. Both concretes were tested in dry and wet conditions in their original condition (without aging) and after being subjected to aging for one year due to weathering. The results showed that the concrete with anti-aging properties presents higher stability and fracture energy G_f values, but with lower *CT-Index* results compared to conventional asphalt concrete. Likewise, the values obtained for the slope $|m_{75}|$, indicate that the asphalt concrete for conventional use presents a better tolerance to cracking after failure; however, the concrete with anti-aging properties in all the conditions evaluated presented better resistance before and after aging.

Translated with DeepL.com (free version)

KEYWORDS: Energía de fractura, intemperismo, anti-envejecimiento.

1 INTRODUCCIÓN.

Uno de los deterioros más comunes en las capas de rodadura de los pavimentos asfálticos es el agrietamiento, este se puede clasificar teniendo en cuenta los diferentes tipos de mecanismos de falla y la propagación del mismo; por ende, se puede clasificar en agrietamiento térmico, agrietamiento por flexión, agrietamiento por fatiga desde el interior hacia la parte superficial y agrietamiento por fatiga desde la superficie hacia el interior de la carpeta asfáltica [Yan C. et al., 2020].

El agrietamiento ocurre mediante un proceso de disipación de energía. Es decir, el trabajo de tensión se convierte en energía de deformación elástica almacenada dentro del concreto asfáltico, este a su vez tiene una capacidad máxima de almacenamiento de energía, y cuando la energía almacenada alcanza su capacidad máxima, el concreto asfáltico se agrieta y la energía almacenada en el interior se convierte en energía superficial. Por tanto, cuanto mayor sea la capacidad del concreto asfáltico para almacenar energía, mejor será la resistencia al agrietamiento.

Por consiguiente, la importancia de la evaluación de la resistencia al agrietamiento en los concretos asfálticos es cada vez más prominente, ya que los diseños de las mezclas asfálticas son cada vez más complejos con el uso de diferentes elementos como materiales reciclados y aditivos modificadores de los cementos

asfálticos [Martin A. et al., 2019; West R. et al., 2013].

Para evaluar la resistencia al agrietamiento durante el diseño de la mezcla, se busca una prueba de calidad, con buen rendimiento y que sea efectiva durante esa etapa del diseño [Saha P. et al., 2022; Yan C. et al., 2020; Yin F. et al., 2018]. En este sentido, el ensayo de fisuración por tensión indirecta IDEAL-CT surgido hace algunos años, ha ganado atención con la determinación de la resistencia al agrietamiento mediante el índice de tolerancia al agrietamiento (*CT-Index*), además de medir otros parámetros en la curva carga-desplazamiento como son la energía de fractura G_f , la carga y desplazamiento máximo, y el valor de la pendiente $|m_{75}|$ correspondiente al 75% de la carga máxima, que también se utilizan para evaluar de mejor forma la resistencia al agrietamiento [ASTM D8558-19]. En este sentido, podríamos decir que la prueba IDEAL-CT sirve de apoyo durante el diseño de la mezcla asfáltica y como control de calidad de la misma [Saha P. et al., 2022].

Por otra parte, un punto importante en la evaluación del agrietamiento del concreto asfáltico es el potencial de agrietamiento, ya que este tiende a aumentar con el envejecimiento por oxidación del ligante, el cual se genera debido a la presencia del oxígeno, la variación de la temperatura y la radiación UV presente en el medio ambiente, generando degradación en la rigidez de la matriz asfáltica.

Actualmente, existen dos métodos para acelerar el envejecimiento del cemento asfáltico en laboratorio que se usan de manera general, el primero es a través del horno rotatorio de película delgada (RTFO), el cual, se encarga de simular el envejecimiento del cemento asfáltico durante la etapa de mezclado y construcción del pavimento asfáltico [ASTM D2872-12]. El segundo método, se realiza mediante una vasija de envejecimiento a presión (PAV), esta prueba se encarga de simular el envejecimiento del cemento asfáltico durante la etapa de servicio del pavimento [ASTM D6521-08]. No obstante, estos métodos de envejecimiento acelerado, no representan eficazmente el efecto del envejecimiento que ocurre en el cemento asfáltico de manera natural cuando esta sometido a las acciones del intemperismo.

Por tal motivo, el objetivo de esta investigación es la evaluación de la energía de fractura mediante la prueba IDEAL-CT de dos concretos asfálticos, el primero fabricado con un cemento asfáltico de uso convencional y el segundo fabricado con un ligante modificado que tiene propiedades anti envejecimiento. Evaluando ambos concretos en su condición original (sin envejecimiento), y después de ser sometidos a envejecimiento por intemperismo por un periodo de un año.

2 MATERIALES

Para desarrollar esta investigación se fabricaron 24 probetas cilíndricas de concreto asfáltico, considerando los siguientes materiales.

2.1 Cementos asfálticos

Se utilizaron dos cementos asfálticos, un de uso convencional con un grado de rendimiento PG 64-22. El segundo fue uno modificado con dióxido de titanio (TiO₂), con un grado de rendimiento PG 70-22 con propiedades que retardan el envejecimiento.

En este punto cabe aclarar que la principal función de la modificación del ligante con TiO₂, fue la de obtener un cemento asfáltico con propiedades fotocatalíticas, es decir, purificador de aire, sin embargo, esta investigación solo se enfocó en las propiedades anti envejecimiento que el TiO₂ proporciona al ligante, ya que la evaluación de las propiedades fotocatalíticas forman parte de otra investigación.

Los dos cementos asfálticos empleados se caracterizaron física y reológicamente, los resultados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización física y reológica de los cementos asfálticos empleados.

Prueba	Conv.	Mod.	ASTM Estándar
Penetración a 25° C, 100 g, 5 s; 10-1 mm mínimo.	68	76	D-2171
Punto de inflamación de Cleveland; °C, mínimo.	280	244	D-92
Punto de reblandecimiento; °C.	55	57	D-1525
Viscosidad Saybol-Furol a 135° C; s, mínimo.	120	288	4402
Viscosidad Rotacional Brookfield 135°C, (Pa.s)	0.346	0.481	4402
Grado de rendimiento (PG)	64-22	70-22	D-6373-16

2.2 Agregado pétreo

Como agregado pétreo se empleó un basalto, Figura 1, este fue sometido a las pruebas de caracterización descritas en la Tabla 2.

La distribución granulométrica del agregado pétreo empleada en el diseño volumétrico de la mezcla asfáltica se presenta en la Figura 2. Así mismo, los valores obtenidos en el diseño volumétrico con base en las especificaciones del Protocolo AMAAC se presentan en la Tabla 3 [AMAAC, 2008].

Tabla 2. Resultados de la caracterización del agregado pétreo.

Ensayo	Especificación	Resultado	Norma
Equivalente de arena	Mín. 40%	68 %	ASTM D2419
Angularidad	Mín. 30 %	41 %	AASHTO T304
Desgaste los Ángeles	Máx. 30 %	Tipo (B-D) 8 %	ASTM C1318
Forma de partículas planas y alargadas.	Máx. 10 %	N. ¾, ½ y ¼ < 1% N. ¾ 1.4 %	ASTM D4791
Intemperismo acelerado	Máx. 10 %	7 %	ASTM C88



Figura 1. Agregado pétreo empleado, basalto.

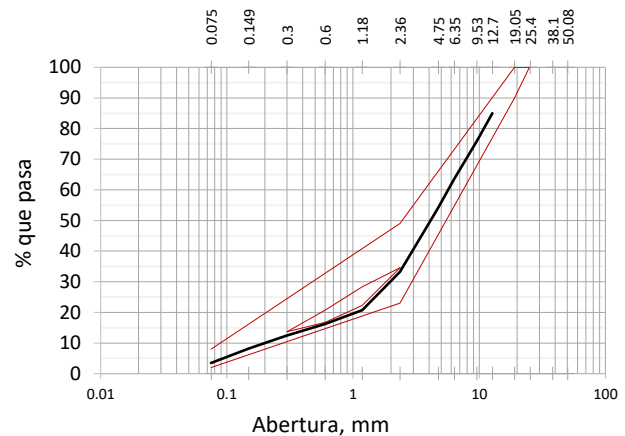


Figura 2. Distribución granulométrica del agregado pétreo para el diseño de la mezcla asfáltica.

Tabla 3. Resultados del diseño volumétrico.

Propiedad volumétrica	Mezcla de control	Especificación AMAAC
Gravedad específica bruta de la mezcla, Gsb.	2.41	---
Gravedad específica efectiva, Gse.	2.55	---
Vacíos del agregado mineral, VAM (%).	12.98	13
Contenido de asfalto efectivo, Pbe (%).	3.9	----
Vacíos de aire, Va (%).	3.9	4
Vacíos llenos con asfalto, VFA (%)	66.46	65-78
Proporción de polvo.	0.676	0.6-1.2

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Envejecimiento por efecto de intemperismo

Una vez fabricadas las 24 probetas cilíndricas, se colocaron 12 de ellas en un espacio en el exterior para someterlas por un año a efectos del intemperismo, es decir, a las condiciones naturales del medio ambiente como la humedad, temperatura, lluvia, aire y radiación UV. En la Figura 3, se observa el efecto antes y después de un año de intemperismo.



Figura 3. Efecto de un año de intemperismo en una probeta cilíndrica de concreto asfáltico. a) Probeta antes del ser sometida a intemperismo, imagen superior. b) Probeta después de un año de intemperismo, imagen inferior.

El lugar de exposición al intemperismo de las muestras cilíndricas de concreto asfáltico fue en el sur de la Ciudad de México. Con base los registros de la Dirección de Monitoreo Atmosférico CDMX, las condiciones promedio durante el año de exposición fueron las siguientes, Tabla 4.

Tabla 4. Condiciones ambientales durante los 6 meses de envejecimiento.

Intemperismo	Temperatura Promedio (°C)	Precipitación promedio (mm)	Vel. del aire promedio (km/h)
1 año	26	28	12

3.2 Ensayo IDEAL-CT

Para determinar la resistencia al agrietamiento del concreto asfáltico se realizó la prueba IDEAL-CT con base en la norma ASTM D 8225-19. Se evaluaron probetas de concreto asfáltico con un diámetro de 150 mm y un espesor de 90 mm aproximadamente. Se utilizó un dispositivo de carga servo-hidráulico para aplicar una tasa de desplazamiento de carga constante. A partir de la ecuación 1 se calculó el índice CT partiendo de la curva de desplazamiento de carga versus línea de carga.

$$CT_{index} = \frac{t}{62} * \frac{l_{75}}{D} * \frac{G_f}{|m_{75}|} * 10^6 \quad (1)$$

donde t es el espesor de la probeta, (mm), 62 es el valor para normalizar el espesor, (mm), l_{75} es el desplazamiento al 75% de la carga máxima posterior al pico, (mm), D diámetro de la probeta, (mm), G_f es la energía de falla, (J/m²), y se calcula con la ecuación 2.

$$G_f = \frac{W_f}{D * t} * 10^6 \quad (2)$$

donde W_f es el trabajo de fractura, (Joules).

$|m_{75}|$ es el valor absoluto de la pendiente al 75% de la carga máxima posterior al pico y al desplazamiento correspondiente, (N/m), ecuación 3.

$$|m_{75}| = \left| \frac{P_{85} - P_{65}}{l_{85} - l_{65}} \right| \quad (3)$$

donde P_{85} y P_{65} son el 85 % y 65 % de la carga máxima después del pico respectivamente, (kN), l_{85} y l_{65} son los desplazamientos al 85 % y 65 % de la carga máxima después del pico respectivamente, (mm).

La Figura 4 muestra la gráfica resultante de la carga (kN), contra desplazamiento (mm), típica de la prueba IDEAL-CT, (ASTM D8225-19).

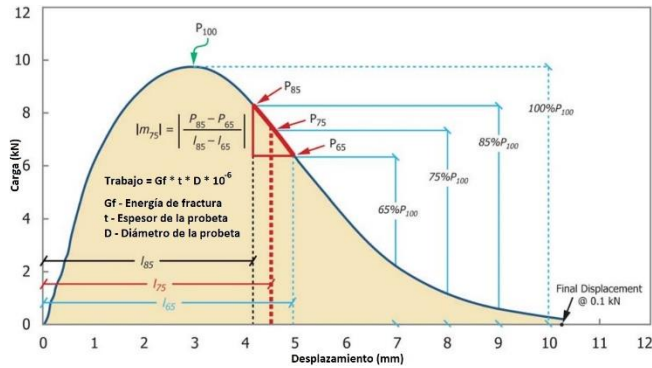


Figura 4. Curva de carga registrada (P) versus desplazamiento de la línea de carga (l). ASTM D8225-19.

Previo al ensayo de las probetas en condición original y con un año de intemperismo, se llevó a cabo un acondicionamiento saturado y seco el cual se describe en la Tabla 5.

Tabla 5. Acondicionamiento de probetas previo al ensayo IDEAL-CT.

Acondicionamiento	Etapas
Saturado	Saturación entre el 55 y 88%
	Congelación por 16 hrs. a $-18^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$
	Inmersión en agua caliente por 24 hrs. a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
Seco	Inmersión en agua caliente 2 hrs. antes de ensayar a $25^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$

Las probetas cilíndricas de concreto asfáltico se sometieron a tensión indirecta a lo largo del plano diametral con una carga de compresión aplicada a una velocidad constante de 50 mm/minuto a una temperatura de 25°C . Esta disposición de carga desarrolló una tensión de tensión uniforme, perpendicular a la dirección de la carga aplicada a lo largo del plano diametral vertical. El espécimen falló al dividirse a lo largo del diámetro vertical, como se muestra en la Figura 5. Durante el ensayo se capturaron los valores de carga y el correspondiente desplazamiento vertical. El índice de tolerancia al agrietamiento (CT Index) se determinó analizando la curva de carga-desplazamiento.



Figura 5. Ejecución del ensayo IDEAL-CT, concreto asfáltico en condición original.

4 RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la prueba IDEAL-CT para la condición original, con un acondicionamiento saturado y seco se presentan en la Tabla 6. Así mismo, se muestran los valores obtenidos (promedio de tres especímenes por condición), de la estabilidad, la energía de fractura y la pendiente al 75% de la carga máxima, posterior al pico.

Tabla 6. Resultados de la prueba IDEAL-CT, estado original (condición seca y saturada).

Condición	Convencional Original Seco	Convencional Original Saturado	Modificado Original Seco	Modificado Original Saturado
Estabilidad, (kN)	6.19	4.40	11.94	8.21
Energía de fractura, (J/m^2)	3994.22	2642.73	7231.84	4796.25
$ m_{75} $, (N/mm)	726.60	496.82	2626.32	1698.51
IDEAL-CT Index	185.67	123.42	96.24	66.80

Podemos observar que los resultados de estabilidad son mayores en el concreto fabricado con el cemento asfáltico modificado, aproximadamente mayor en un 50% en comparación con el de uso convencional. De igual forma, los valores de la energía de fractura G_f obtenidos con el cemento asfáltico modificado presentan un mejor comportamiento para disipar la energía. No obstante, los valores de la pendiente $|m_{75}|$, indican que el cemento asfáltico convencional después de la falla tiene un comportamiento más dúctil y un CT Index que sugiere una mejor resistencia al agrietamiento.

Por otra parte, los resultados promedio de las probetas con un año de intemperismo se muestran en la Tabla 7; donde los valores de estabilidad en el cemento asfáltico convencional se incrementaron ligeramente debido al efecto del envejecimiento, por su parte el ligante modificado, conservó el mismo valor en el estado seco e incrementándose muy poco en la condición saturada.

Por su parte, los resultados de la energía de fractura continúan siendo mayores en el cemento asfáltico modificado para la condición seca y húmeda, lo que indica que continúa disipando de mejor forma la energía.

Respecto al valor de la pendiente $|m_{75}|$, continuó con el mismo comportamiento, es decir, siendo menor en el cemento asfáltico convencional, indicativo de un comportamiento más dúctil.

Tabla 7. Resultados de la prueba IDEAL-CT, con 1 año de intemperismo (condición seca y saturada).

Condición	Convencional 1 año Seco	Convencional 1 año Saturado	Modificado 1 año Seco	Modificado 1 año Saturado
Estabilidad, (kN)	9.95	8.62	11.95	10.13
Energía de fractura, (J/m^2)	17187.13	11558.09	18220.91	12176.98
$ m_{75} $, (N/mm)	652.10	386.29	1059.46	691.92
IDEAL-CT Index	3041.12	2356.17	1681.80	1093.92

En cuanto a los resultados del CT Index después de un año de intemperismo, se obtuvieron valores por arriba de lo recomendado por la norma ASTM D 8225-19 (entre 31 y 255). Sin embargo, los valores recomendados son basados en probetas recién fabricadas y

no considera especímenes con envejecimiento. Por tanto, observando los valores del *CT Index*, podemos decir que después de un año de intemperismo los especímenes fabricados con el cemento asfáltico convencional tienen un mejor desempeño de resistencia al agrietamiento. En las gráficas de las Figuras 6 a la 9 se presentan las curvas de carga contra desplazamiento obtenidas antes y después del intemperismo para la condición seca y saturada.

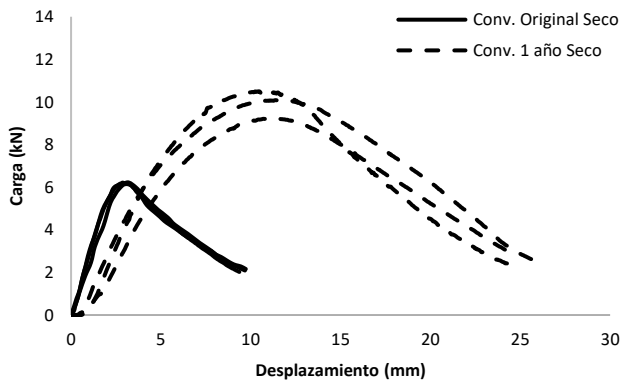


Figura 6. Curva de carga vs desplazamiento para la condición seca, antes y después del intemperismo. Probetas con cemento asfáltico convencional.

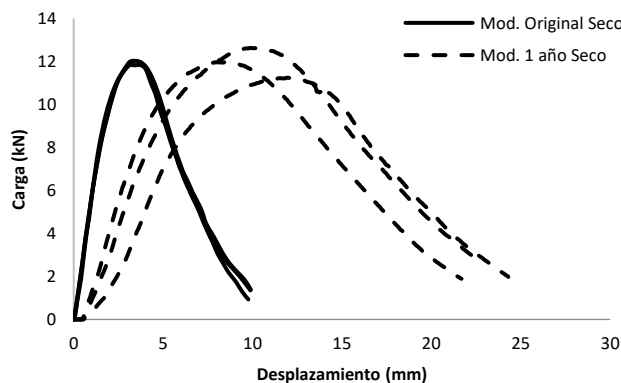


Figura 7. Curva de carga vs desplazamiento para la condición seca, antes y después del intemperismo. Probetas con cemento asfáltico modificado.

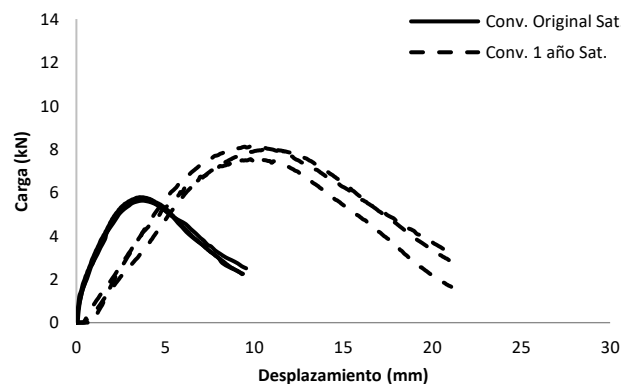


Figura 8. Curva de carga vs desplazamiento para la condición saturada, antes y después del intemperismo. Probetas con cemento asfáltico convencional.

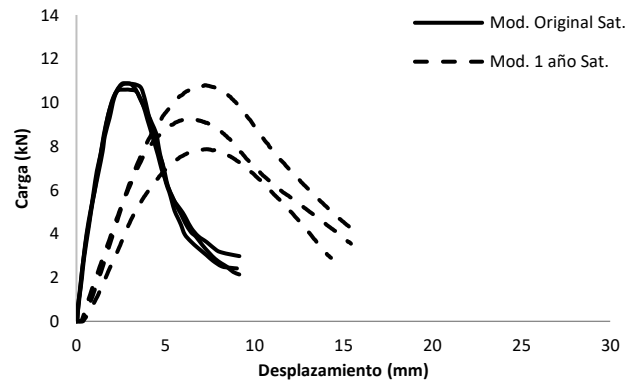


Figura 9. Curva de carga vs desplazamiento para la condición saturada, antes y después del intemperismo. Probetas con cemento asfáltico modificado.

El resumen de los resultados de *CT Index* y *Estabilidad* se presentan de manera gráfica en la Figura 10. De igual forma, el resumen de los resultados de G_f y $|m_{75}|$ se presentan de forma gráfica en la Figura 11.

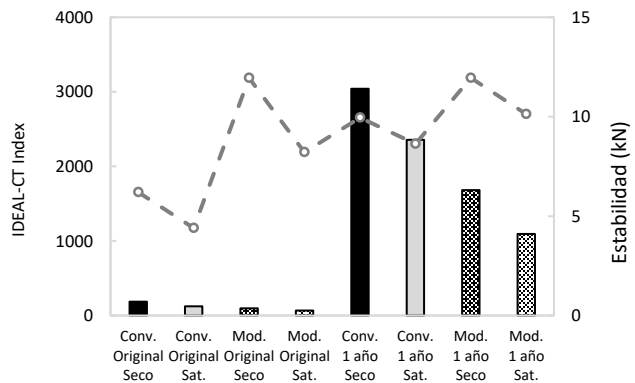


Figura 10. Resultados de *CT Index* (barras) y *Estabilidad* (línea discontinua) en estado original y después de un año de intemperismo, condición seca y saturada.

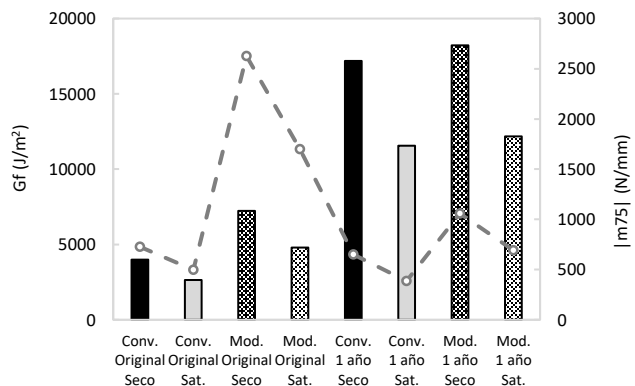


Figura 11. Resultados de G_f (barras) y $|m_{75}|$ (línea discontinua) en estado original y después de un año de intemperismo, condición seca y saturada.

5 CONCLUSIONES

En este estudio, se evaluó la energía de fractura de dos concretos asfálticos mediante el ensayo IDEAL-CT. El primer concreto fue fabricado con un cemento asfáltico de uso convencional y el segundo fue elaborado con un cemento asfáltico modificado con propiedades antienviejimiento. Ambos concretos fueron ensayados en estado seco y húmedo en condición original y después de ser sometidos a un año de intemperismo.

Con los resultados de las curvas de carga contra desplazamiento de la prueba IDEAL-CT, se obtuvieron los valores del *CT Index*, la *carga máxima o estabilidad* y el valor de la pendiente $|m_{75}|$ que corresponde al 75% de la carga máxima posterior al pico y al desplazamiento correspondiente. A partir del análisis de los resultados obtenidos se derivaron las siguientes conclusiones:

1. Los resultados de energía de fractura G_f , indicaron un mejor comportamiento en las probetas fabricadas con cemento asfáltico modificado en comparación con las de uso convencional, tanto en condiciones secas como saturadas. En la condición sin envejecimiento, la mejora fue de aproximadamente un 40%. Después de un año de envejecimiento, ambos tipos de concretos asfálticos mostraron resultados similares, aunque el modificado presentó un desempeño ligeramente superior, lo que sugiere que sus propiedades antienviejimiento mejoran su capacidad para disipar energía.
2. Los resultados del *CT Index* en su estado original mostraron valores más altos en el concreto fabricado con cemento asfáltico convencional. Esto se debe a que el ligante modificado aumentó su rigidez al incorporar el TiO_2 , lo que resultó en pendientes mayores después de la falla ($|m_{75}|$), lo que indica una menor ductilidad. Después de un año de envejecimiento, el *CT Index* siguió siendo mayor en el cemento asfáltico convencional. Sin embargo, es importante destacar que los valores del *CT Index* en ambos ligantes son muy elevados y superan las recomendaciones establecidos por la norma ASTM D855 8-19. A pesar de esto, estos resultados pueden servir como referencia para comprender el comportamiento del *CT Index* con el envejecimiento, aunque es necesario tener en cuenta que la normativa se aplica solo a probetas sin ningún tipo de envejecimiento.
3. Finalmente, los resultados de la estabilidad muestran que el concreto asfáltico modificado exhibe una mayor resistencia a la fractura, aunque con un comportamiento menos dúctil, lo que concuerda con los resultados de la pendiente después de la falla. Esta tendencia se mantiene tanto antes como después del envejecimiento, y se observa un menor valor para la condición húmeda en comparación con la condición seca para ambos tipos de concretos asfálticos analizados.

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Vías Terrestres del Instituto de Ingeniería, UNAM, por el apoyo brindado para la realización de esta investigación.

7 REFERENCIAS

- Asociación Mexicana del Asfalto, A. C. 00/2008. Desempeño de mezclas asfálticas. Protocolo AMAAC.
- ASTM. 2019. Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature. *ASTM D8558-19*. West Conshohocken, PA: ASTM.
- ASTM. 2012. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). *ASTM D2872-12*. West Conshohocken, PA: ASTM.
- ASTM. 2008. Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). *ASTM D6521-08*. West Conshohocken, PA: ASTM.
- Martin A. E., Kaseer F., et al. 2019. Evaluating the Effects of Recycling Agents on Asphalt Mixtures with High RAS and RAP Binder Ratios. *Pre-publication draft of NCHRP Research Report 927*, Transportation Research Board, Washington, D. C., 2019.
- Saha P., Apama S. L., Amaranatha M. 2022. Evaluation of fatigue characteristics of asphalt mixtures using Cracking Tolerance index (CTIndex), *Constr. Build. Mater.*, 342 (2022) 128030
- West R., Willis J.R. 2013. Marasteanu M., Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content. *NCHRP Report 752*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2013.
- Yan C., Zhang Y., Bahia H. U. 2020. Comparison between SCB-IFIT, un-notched SCB-IFIT and IDEAL-CT for measuring cracking resistance of asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.*, 252 (2020).
- Yin F., Garita J., Taylor A., West R. 2018. Refining the indirect tensile (IDT) Nflex Factor test to evaluate cracking resistance of asphalt mixtures for mix design and quality assurance. *Constr. Build. Mater.*, 172 (2018) 396–405.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.