



# EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA Densa EMPLEANDO DISTINTOS AGREGADOS PÉTREOS DE MÉXICO

Víctor Hugo Blancas Herrera, Juan Adrián Ramírez Escobar<sup>2</sup>,  
Jesús Ramón Elías Hermosillo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Mega Asfaltos S.A. de C.V., Salamanca, Gto., México, MGA.mezclas@gmail.com

<sup>2</sup> Mega Asfaltos S.A. de C.V., Salamanca, Gto., México, adrian\_181294@hotmail.com

<sup>3</sup> Mega Asfaltos S.A. de C.V., Salamanca, Gto., México, laboratorio.jesuselias23@gmail.com

## Resumen

Actualmente en México las mezclas asfálticas de granulometría densa han sido desarrolladas bajo distintas metodologías de diseño, las cuales tienen como objetivo principal cumplir con parámetros relacionados al desempeño de la mezcla asfáltica; como son la susceptibilidad al daño inducido por humedad, a la deformación permanente y a la fatiga. En otros países como EE.UU. y España, en la etapa de diseño de las mezclas asfálticas se incluye la evaluación del agrietamiento en los pavimentos de una manera práctica, rápida y sencilla, mediante índices obtenidos en ensayos de tensión y flexión. La presente investigación tiene como objetivo evaluar la susceptibilidad al agrietamiento en ocho diferentes mezclas asfálticas, con distintos agregados pétreos de la región centro de México, bajo los ensayos de: agrietamiento por tensión indirecta (IDEAL CT), Índice de Flexibilidad de Illinois (I-FIT) y Fénix. Para lo anterior, se analizaron materiales pétreos de tres bancos de material; dos de ellos de origen basáltico: “La Gloria” y “Tonalá” y uno más de origen calizo: “Cerritos”; se realizó el diseño volumétrico y la selección del contenido óptimo de cemento asfáltico con un PG 64-16 y un PG 76V-22, bajo la metodología de Protocolo AMAAC para las mezclas “Cerritos”, “Gloria 3”, “Gloria 4” y “Tonalá” y se realizaron los ensayos de susceptibilidad al daño inducido por humedad, susceptibilidad a la deformación permanente y los tres ensayos de agrietamiento. Las mezclas elaboradas con asfalto PG 76V-22 presentan el mejor desempeño en el diseño, cumpliendo con el nivel II de Protocolo AMAAC existente en México y obteniendo valores superiores en los índices de agrietamiento en cada una de las pruebas realizadas; siendo el ensayo I-DEAL el más práctico y sencillo de realizar; sin embargo, el ensayo Fénix es el que mejor correlación presenta entre resultados.

**Palabras Clave:** Agrietamiento, mezcla asfáltica, tensión y flexión, tenacidad.

## 1 Introducción

El agrietamiento visto en mezclas de concreto asfáltico puestas en un pavimento flexible y provocado por sollicitaciones producidas por el medio ambiente y el tráfico, que se manifiestan mediante cambios térmicos de temperatura y diferentes tipologías y velocidades de aplicación de las cargas; es una de las causas más frecuentes de deterioro. Debido a las características reológicas de las mezclas asfálticas hacen que su comportamiento a la fisuración sea complejo de analizar, puesto que este depende de varios factores que hacen que este material se comporte de manera completamente diferente frente a dichas sollicitaciones.



Las grietas en los pavimentos flexibles se pueden presentar en varias formas o patrones geométricos, entre las más comúnmente observadas se encuentran las transversales, longitudinales, por fatiga (piel de cocodrilo) y agrietamiento en bloque, los cuales pueden ser producidos mediante diferentes mecanismos como el agrietamiento descendente, llamado también “top down cracking”, agrietamiento ascendente, agrietamiento por esfuerzos térmicos en la superficie y el agrietamiento por reflexión, este último, producido muchas veces por los esfuerzos de tracción en la capa inferior a la mezcla asfáltica.<sup>[1]</sup>

El diseño de una mezcla asfáltica consiste básicamente en la selección del tipo y granulometría del agregado a emplear, y de la selección del tipo y contenido de asfalto, de tal manera que se obtengan las propiedades deseadas en la mezcla y se satisfagan los requisitos específicos del proyecto. La selección apropiada de los materiales (con la calidad suficiente) que constituirán la mezcla y de sus proporciones correctas, requiere el conocimiento de las propiedades más significativas de las mezclas, y de su influencia en el comportamiento del pavimento.<sup>[2]</sup>

En los Estados Unidos, en el año 1985, se da inicio al programa SHRP (Strategic Highway Research Program), con la finalidad de satisfacer la necesidad de racionalizar el gasto y la inversión en la construcción y mantenimiento de las autopistas. Para ello, se destinaron inicialmente 150 millones de dólares con el objetivo de desarrollar nuevas especificaciones para materiales asfálticos que relacionarán directamente los ensayos de laboratorio con el comportamiento en servicio en los pavimentos. Uno de los principales resultados de este programa fueron las especificaciones Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements), que consideran un conjunto de ensayos y especificaciones para ligantes y mezclas asfálticas. Sin embargo, los procedimientos implementados durante el programa SHRP para el diseño y control de mezclas no evalúan de forma precisa el comportamiento de las mezclas en el pavimento. Por ello, muchas de las agencias de transporte en los Estados Unidos que a pesar de adoptar las metodologías de diseño volumétrico de mezclas propuestas en Superpave, principalmente en los niveles 2 y 3 (utilizados para el diseño de mezclas para tráfico medios y pesados), señalan la necesidad de ensayos complementarios a la metodología Superpave que permita evaluar el comportamiento real de las mezclas en servicio.<sup>[3]</sup>

En México, en el año 2008 surge una nueva guía de diseño para las mezclas asfálticas, por parte de la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (AMAAC) y cuyo nombre fue Protocolo AMAAC; propuesta que se encuentra muy adaptada a la metodología Superpave y que permite contar con un método que contemple las condiciones prevalecientes para el territorio nacional.<sup>[4]</sup> Dicha metodología de diseño, presenta 4 niveles de diseño en función de la importancia de la carretera determinada por el nivel de tránsito o el desempeño para la infraestructura que se requiere, sin embargo se debe tomar en consideración que la evaluación del desempeño de las mezclas asfálticas se enfoca principalmente en el control de deformaciones plásticas mediante el ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo, hasta un nivel II, dejando en un segundo plano el deterioro por fatiga o agrietamiento de las mezclas, provocado en la mayoría de los casos por la dificultad y adquisición del equipo de ensayo en los laboratorios y en campo.

La resistencia al agrietamiento en mezclas asfálticas de alto desempeño debe ser considerada en el diseño y optar por incluir ensayos desarrollados en otros países como Estados Unidos y España, que permiten obtener índices de manera rápida y sencilla, con materiales de nuestro país y equipos empleados en ensayos de tensión indirecta y directa para determinar la energía de fractura, como lo son los ensayos de agrietamiento por tensión indirecta (IDEAL CT), Índice de Flexibilidad de Illinois



(I-FIT) y Fénix. Por esta razón, la presente investigación tiene como objetivo evaluar la susceptibilidad al agrietamiento en ocho diferentes mezclas asfálticas, con distintos agregados pétreos de la región centro de México, bajo los ensayos de: agrietamiento por tensión indirecta (IDEAL CT), Índice de Flexibilidad de Illinois (I-FIT) y Fénix; de tal manera que, se inicie con la interpretación de datos de agrietamiento en nuestro país, a partir de mezclas vírgenes que contienen materiales pétreos totalmente triturados y que hoy en día se siguen utilizando en la mayoría de los diseños nuevos de mezclas asfálticas de granulometría densa fabricadas en caliente.

## 2 Metodología

En el presente trabajo de investigación, se desarrollaron ocho mezclas asfálticas elaboradas en laboratorio con las cuales se pretende evaluar la susceptibilidad al agrietamiento por medio de los ensayos de IDEAL CT, I-FIT y Fénix. Las mezclas elaboradas fueron diseñadas bajo la recomendación de Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013 “Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño”<sup>[5]</sup> a un Nivel II, designado para tránsito de medio a alto (0,3 a 30 millones de ejes equivalentes) y para carreteras estatales y federales. Los ensayos en la investigación incluyen: caracterización de los materiales pétreos, diseño volumétrico, susceptibilidad a la humedad (TSR), susceptibilidad a la deformación permanente, susceptibilidad al agrietamiento por tensión indirecta (IDEAL CT), susceptibilidad al agrietamiento mediante el ensayo de Índice de Flexibilidad (I-FIT) y susceptibilidad al agrietamiento mediante el ensayo Fénix.

### 2.1. Análisis de materiales y elaboración de mezclas asfálticas

Para definir cada una de las mezclas asfálticas de estudio, se obtuvieron materiales pétreos triturados de tres diferentes bancos de material con origen mineralógico distinto: material pétreo de origen calizo “Cerritos” del estado de San Luis Potosí, material pétreo de origen basáltico “La Gloria” del estado de Guanajuato y material pétreo de origen basáltico “Tonalá” del estado de Jalisco. Cada uno de ellos cumplió con las características de acuerdo a la normativa vigente.

Se definió el cemento asfáltico a emplear, el cual se seleccionó un asfalto convencional PG 64-16 y un asfalto modificado con polímero SBS PG 76V-22 de acuerdo con la normativa vigente N·CMT·4·05·004/18<sup>[6]</sup> de la SICT. Estos dos asfaltos, servirán para ser empleados en 4 mezclas distintas cada uno, en combinación con el esqueleto mineral definido a partir de la metodología de Protocolo AMAAC.

Las mezclas a evaluar se seccionaron en 4 grupos (Tabla 1) de acuerdo con la configuración de materiales pétreos empleados en cada diseño, manteniendo el contenido de asfalto para cada grupo y cambiando el tipo de cemento asfáltico mencionado anteriormente. Todas las mezclas presentan un tamaño nominal de 19 mm (3/4”) y fueron nombradas de acuerdo a su material de origen y al asfalto empleado para su fabricación.

Tabla 1. Mezclas asfálticas de granulometría densa a evaluar

Grupo	Mezcla	Origen del agregado pétreo	Contenido óptimo de asfalto (%Pb)	Tipo de asfalto empleado	Temperatura de mezclado, °C	Temperatura de compactación, °C
CER	CER-64	Caliza	4.0	PG 64-16	155	145
	CER-76	Caliza	4.0	PG 76V-22	175	165
GLO3	GLO3-64	Basalto	5.7	PG 64-16	155	145



	GLO3-76	Basalto	5.7	PG 76V-22	175	165
GLO4	GLO4-64	Basalto	7.5	PG 64-16	155	145
	GLO4-76	Basalto	7.5	PG 76V-22	175	165
TON	TON-64	Basalto	6.6	PG 64-16	155	145
	TON-76	Basalto	6.6	PG 76V-22	175	165

Como ya se mencionó anteriormente, para la obtención del contenido óptimo de asfalto se realizó el diseño volumétrico de acuerdo con la recomendación del Protocolo AMAAC, seleccionado inicialmente la estructura granulométrica para cada uno de los grupos de mezcla y cuyas curvas se observan en la Figura 1 de este apartado. Continuando con la metodología de diseño, esta hace referencia a obtener especímenes de ensayo de 150 mm de diámetro por  $115 \pm 5$  mm de altura (para la obtención del contenido de asfalto), mediante el compactador giratorio a razón de 100 giros (para un tránsito medio a alto) para la obtención del 4% de vacíos para un contenido de asfalto óptimo en la mezcla asfáltica. En la Tabla 2 se muestran las propiedades volumétricas de cada una de las mezclas y su contenido óptimo de asfalto, considerando que dicho porcentaje fue una constante por cada grupo de mezcla y referenciado respecto a la masa de la mezcla asfáltica.

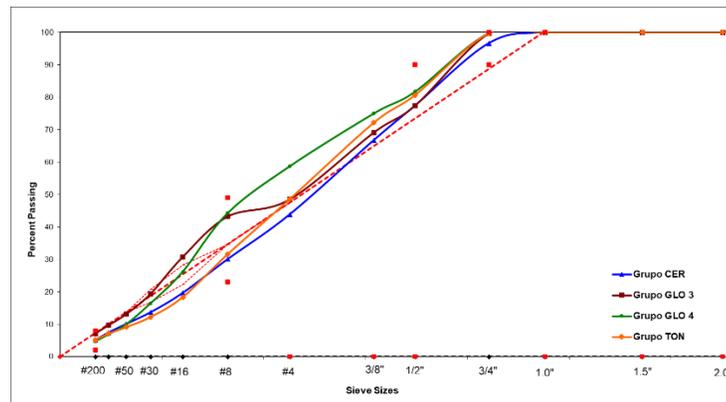


Figura 1. Curvas granulométricas seleccionadas por grupo de mezcla asfáltica

Tabla 2. Propiedades volumétricas de las mezclas evaluadas

Mezcla	Pb, %	Gmm	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	Pbe	DP	%Gmm @Ndes
CER-64	4.0	2.533	3.6	11	66	2.9	1.8	0.96
CER-76	4.0	2.531	4.1	11	62	3.0	1.7	0.96
GLO3-64	5.7	2.467	3.1	14	77	4.5	1.6	0.97
GLO3-76	5.7	2.460	4.0	15	73	4.5	1.6	0.96
GLO4-64	7.5	2.400	5.5	18	70	5.9	0.8	0.95
GLO4-76	7.5	2.396	4.3	18	76	5.9	0.8	0.96
TON-64	6.6	2.486	5.2	17	70	5.3	1.0	0.95
TON-76	6.6	2.474	4.1	17	75	5.6	0.9	0.96

Después de obtener las propiedades volumétricas, por mezcla se fabricaron con el compactador giratorio, a razón de giros y de masa, los especímenes correspondientes a los ensayos de desempeño a desarrollar en esta investigación, empleando la metodología de prueba correspondiente:

- i. Seis especímenes cilíndricos de 150 mm de diámetro por 95 mm de altura para la obtención de la resistencia de la mezcla asfáltica compactada al daño inducido por humedad por medio de la Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (ASTM D6931-17).<sup>[7]</sup>
- ii. Cuatro especímenes cilíndricos de 150 mm de diámetro por 60 mm de altura para la obtención de la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad mediante la Rueda Cargada de Hamburgo (AASHTO T 324-19).<sup>[8]</sup>
- iii. Cinco especímenes cilíndricos de 150 mm de diámetro por 62 mm de altura para la obtención del Índice de tolerancia al agrietamiento de la mezcla asfáltica mediante el ensayo de agrietamiento por tensión indirecta a temperatura de 25 °C (ASTM D 8225-19).<sup>[9]</sup>
- iv. Un espécimen cilíndrico de 150 mm de diámetro por 160 mm de altura con un porcentaje de vacíos de  $7 \pm 0.5\%$  para la obtención de la energía de fractura de la mezcla asfáltica mediante la prueba del índice de flexibilidad (AASHTO TP 124-18).<sup>[10]</sup>
- v. Cinco especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro por 62 mm de altura con un porcentaje de vacíos de  $7 \pm 0.5\%$  para la obtención de la resistencia, tenacidad y energía de fractura de la mezcla asfáltica mediante el ensayo Fénix (NLT-383/20).<sup>[11]</sup>

## 2.2. Ensayos de susceptibilidad al agrietamiento

### 2.2.1. Índice de tolerancia al agrietamiento (IDEAL CT)

El ensayo de IDEAL CT, fue desarrollado en la década de 1990 como parte de los programas denominados Innovations Deserving Exploratory Analysis (IDEA) administrados por el TRB (Transportation Research Board) norteamericano.<sup>[12]</sup> La prueba determina la resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas a través del Índice de tolerancia al agrietamiento (CTindex) bajo el método de la norma ASTM D8225-19 *Estándar Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature* y cuyo parámetro, se basa en la mecánica de fractura del material. Cuanto mayor sea el índice de tolerancia, la muestra contará con una mejor resistencia al agrietamiento.

Para la obtención de IDEAL-CT, se emplean especímenes sometidos a un pre-acondicionamiento de  $2h \pm 10$  min a temperatura de  $25 \pm 1$  °C, ya sea en una cámara ambiental o baño de agua, y probados a tensión indirecta en una prensa de carga con velocidad regulada que registre, procese y grafique una curva carga vs deformación como la que se observa en la Figura 2 siguiente.

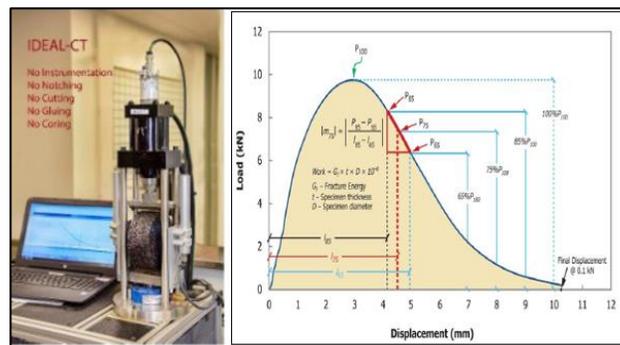


Figura 2. Ensayo IDEAL con representación de curva carga (P) vs deformación (l).

Ya con la curva carga-deformación, se procede a determinar el trabajo de fractura ( $W_f$ ), calculando el área bajo la curva, integrando la ecuación que genera dicha curva. Una vez obtenido el trabajo de fractura, se procede a determinar la energía de fractura ( $G_f$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$G_f = \frac{W_f}{Dxt} \times 10^6 \quad (1)$$

Donde  $W_f$  es el trabajo de fractura en Joules,  $D$  es el diámetro del espécimen en mm y  $t$  es el espesor del espécimen en mm.

Además, con la curva carga-deformación también se pueden obtener otros datos necesarios para estimar el índice de tolerancia de la prueba IDEAL CT (Figura 2), los cuales son las cargas y desplazamientos Post-pico al 65%, 75% y 85% de la carga máxima ( $P_{max}$ ). Con tales datos se puede obtener la pendiente en valor absoluto de la zona tangencial al 75% de la carga máxima posterior del pico, con la siguiente ecuación:

$$|m_{75}| = \left| \frac{P_{85} - P_{65}}{l_{85} - l_{65}} \right| \quad (2)$$

Por último, se procede a calcular el índice de tolerancia al agrietamiento CTindex por medio de la siguiente ecuación. El Instituto de Transportes de Texas (TTI) de EE. UU. recomienda un valor mínimo de CTindex de 50 o 70 dependiendo el sitio y especificación de proyecto.

$$CTindex = \frac{t}{62} \times \frac{l_{75}}{D} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \times 10^6 \quad (3)$$

Donde  $t/62$  es un factor de corrección para el espesor de la muestra.

### 2.2.2. Índice de Flexibilidad de Illinois (I-FIT)

La prueba del Índice de flexibilidad de Illinois fue desarrollada por el Centro de Transporte de Illinois (ICT) de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign (UIUC), la cual originalmente conocido como SCB-IL. La prueba establecida por la norma AASHTO TP 124 *Standard Metodo of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using the Flexibility Index Test (FIT)* consiste en aplicar un efecto de flexión en una viga circular de 50 mm de espesor (Figura 3), obtenida de cortar un espécimen de 150 mm de diámetro por 160 mm de altura, y con una muesca de profundidad de 15 mm  $\pm$  1 mm a lo largo del centro del lado plano de la misma.

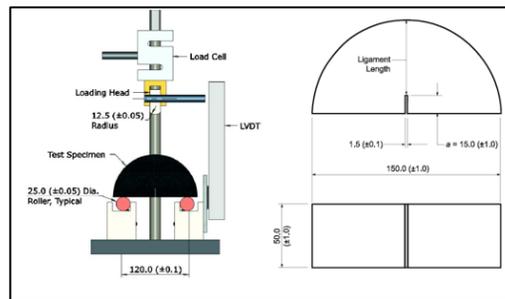


Figura 3. Ensayo I-FIT para la obtención de la energía de fractura.

El espécimen es acondicionado a una temperatura de  $25 \pm 0.5$  °C durante 2 horas  $\pm$  10 min. y posicionado sobre dos apoyos circulares para ser sometido a una carga constante de 50 mm/min hasta llegar a la falla después de su carga máxima o carga pico observada en la curva carga vs desplazamiento.

De la curva carga-desplazamiento se obtiene la energía de fractura ( $G_f$ ) de cada una de las muestras, calculada a partir de dividir el trabajo de fractura (área obtenida bajo la curva carga-desplazamiento) por el área de fractura (ecuación 1); la pendiente después del pico ( $m$ ) obtenida de la tangente del punto de inflexión después de la carga máxima y el Índice de Flexibilidad calculado a partir de los parámetros descritos anteriormente (ecuación 2). La especificación indica un valor mínimo de índice de flexibilidad de 8.0.

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \times 10^6 \quad (1)$$

Donde  $G_f$  es la energía de fractura en J/m<sup>2</sup> y  $A_{lig}$  es el área de fractura obtenida de multiplicar el espesor del espécimen por la longitud del ligamento o alto de la sección donde se efectúa la carga.

$$IF = \frac{G_f}{|m|} \times A \quad (2)$$

Donde IF es el índice de flexibilidad,  $|m|$  es el valor absoluto de la pendiente después de la carga pico en KN/mm y A es un factor para la conversión de unidades igual a 0.01.

### 2.2.3. Índice de Tenacidad mediante el ensayo Fénix

El ensayo Fénix fue desarrollado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña y normalizado por el CEDEX mediante la norma NLT 383/20 y permite determinar el comportamiento de las mezclas asfálticas en cuanto a resistencia y deformación a diferentes temperaturas. El ensayo mide el esfuerzo de tracción directa aplicado para producir una falla dúctil a temperatura media, realizando una pequeña abertura de 6 mm aproximadamente en la parte media de la probeta semicilíndrica de ensayo (Figura 4) para facilitar la zona de fisuración de la misma. El presente ensayo fue desarrollado en esta investigación con una temperatura de 25 °C.

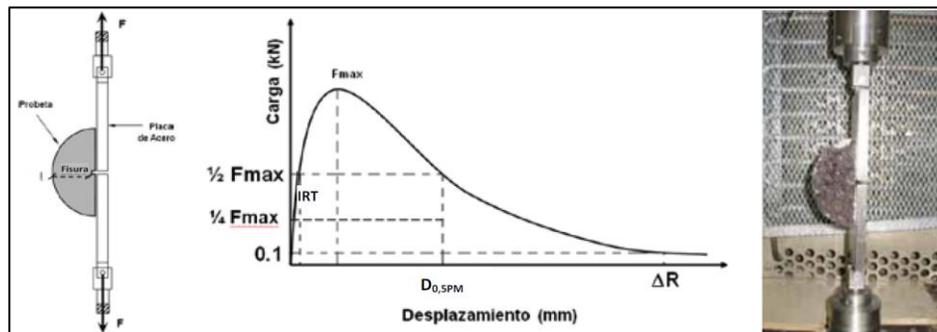


Figura 4. Ensayo Fénix para la obtención de la curva carga-desplazamiento.



La carga de tracción se aplica mediante dos placas pegadas a la probeta en su plano diametral que van sujetas a los anclajes de la máquina de prueba. La carga aplicada se realiza a una velocidad constante de deformación del pistón de aplicación de carga de 1 mm/min.

La energía de fractura en todo el proceso de fisuración del material,  $G_D$ , se determina de igual forma que los dos ensayos anteriores, calculado el área bajo la curva (trabajo de fractura,  $W_D$ ) y dividiéndolo entre el área de la sección donde es aplicada la falla. El parámetro índice de tenacidad (IT), puede ser determinado por medio de la ecuación (1). A su vez, se obtiene el índice de rigidez a tracción (IRT), por medio de la ecuación (2). Otros parámetros mecánicos de la mezcla como: carga máxima a tracción ( $F_{m\acute{a}x}$ ), desplazamiento a carga máxima ( $\Delta F_{m\acute{a}x}$ ) y desplazamiento de rotura ( $\Delta R$ ), pueden ser determinados de la misma curva carga – desplazamiento.

$$IT = \frac{W_D - W_{F_{max}}}{h \cdot l} \times (\Delta_{mdp} - \Delta_{F_{max}}) \quad (1)$$

Donde IT es el índice de tenacidad, adimensional;  $W_D$  = trabajo disipado en el proceso de fisuración en KN-mm;  $W_{F_{m\acute{a}x}}$  es el trabajo disipado hasta la carga máxima en KN-mm;  $\Delta_{mdp}$  es el desplazamiento a media carga máxima postpico en mm y  $\Delta_{F_{m\acute{a}x}}$  es el desplazamiento a la carga máxima  $F_{m\acute{a}x}$  en mm.

$$IRT = \frac{1/2 \cdot F_{max}}{\Delta_m} \quad (2)$$

Donde IRT es el índice de rigidez a tracción en KN/mm,  $F_{m\acute{a}x}$  es la carga máxima a tracción en KN y  $\Delta_m$  = desplazamiento antes de la carga máxima a media  $F_{m\acute{a}x}$ , representada en mm.

La Universidad Politécnica de Cataluña, recomienda que para tener mezclas tenaces y resistentes a la fisuración en el diseño de mezclas asfálticas tipo AC (de concreto asfáltico) los valores de IRT deberán ser mayores a 2.5 KN/mm para asfaltos con penetración 60/70 y de 3.0 KN/mm para asfaltos con penetración 40/50 y los valores de IT mayores a 75 J/m<sup>2</sup>·mm en el caso de emplear asfaltos 60/70 y de 50 J/m<sup>2</sup>·mm para asfaltos con penetración 40/50.

### 3 Análisis y discusión de Resultados

Los resultados obtenidos de la metodología de diseño a un Nivel II especificado por Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013 se presentan en la figura 5, obteniendo valores de TSR para todas las mezclas por encima del 80% a excepción de la mezcla CER-64 que presentó un valor de 78% en donde se observó fractura del agregado pétreo; mientras que, en el caso de la deformación permanente, las mezclas elaboradas con asfalto convencional PG 64-16 no cumplieron con el valor mínimo de 10 mm a los 10,000 ciclos establecidos por la recomendación de diseño, mostrando un incremento notable en la resistencia a la deformación permanente en las mezclas elaboradas con asfalto modificado con polímero tipo SBS PG 76V-22.

Como se observa en la figura 5, las mezclas asfálticas que mejor comportamiento presentaron, fueron las mezclas TON-64 y TON-76; teniendo en cuenta que en el caso de emplear un asfalto convencional PG 64-16 se presenta un valor de 93% en el ensayo de susceptibilidad a la humedad-TSR y de 15.47 mm en el caso de la deformación permanente. La deformación permanente para las mezclas con asfalto PG 64-16 no cumplió con el valor mínimo requerido, sin embargo, la mezcla

TON-64 fue la única que alcanzó los 10,000 ciclos de prueba, tomando en cuenta que para las otras mezclas se detuvo la prueba al observar un alto daño en los especímenes de ensayo.

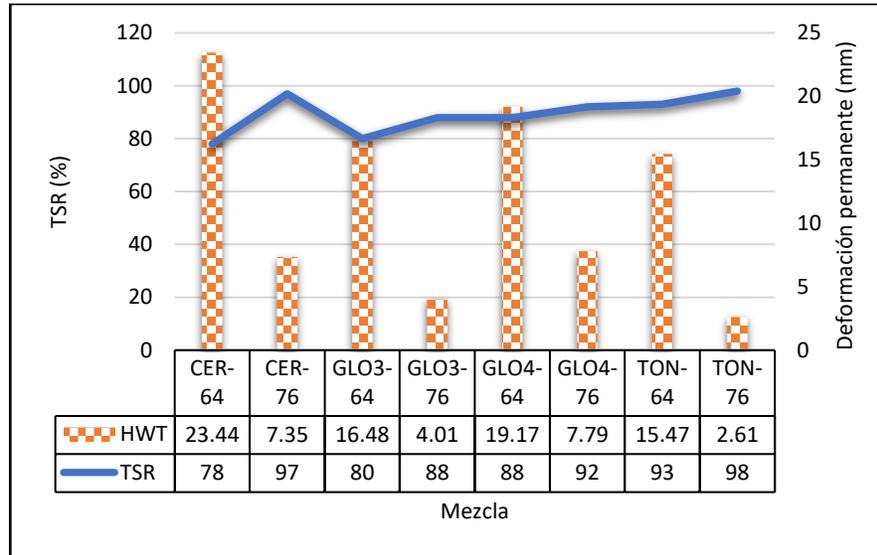


Figura 5. Resultados de los ensayos TSR y Rueda Cargada de Hamburgo.

### 3.1 Análisis de los índices de agrietamiento

Los resultados para conocer la susceptibilidad al agrietamiento de las diferentes mezclas elaboradas en la presente investigación, obtenidos de las pruebas I-DEAL, I-FIT y Fénix, se muestran en la Tabla 3. Es importante considerar que cada uno de ellos toman en cuenta la elaboración de una curva esfuerzo versus desplazamiento para la obtención de la energía de fractura (Gf) y de uno o más índices característicos del agrietamiento en mezclas asfálticas de granulometría densa.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de susceptibilidad al agrietamiento

Mezcla	I-DEAL		I-FIT		FÉNIX		
	Gf, J/m <sup>2</sup>	CTindex	Gf, J/m <sup>2</sup>	IF	Gf, J/m <sup>2</sup>	IT	IRT
CER-64	7233.9	125.4	1041.4	15.4	158.4	108.5	0.92
CER-76	7519.6	120.4	977.5	4.6	157.5	93.8	1.22
GLO3-64	8686.6	153.5	1083.5	6.5	206.2	191.3	0.80
GLO3-76	8703.6	139.8	972.5	5.4	301.7	219.7	1.41
GLO4-64	9979.9	572.0	1569.3	25.8	146.0	203.4	0.50
GLO4-76	12130.6	709.3	1375.1	12.2	263.3	403.7	0.74
TON-64	9629.9	616.4	1300.8	22.1	-	-	-
TON-76	11492.7	943.0	1496.0	25.7	-	-	-

Los valores obtenidos en la Tabla 3, fueron analizados mediante un estudio estadístico para eliminar los valores atípicos de las réplicas elaboradas para cada ensayo. Como se puede observar en dicha tabla, los valores obtenidos de energía de fractura (Gf) para cada una de las pruebas son distintos, pero mantienen una relación entre las diferentes mezclas diseñadas. En el caso del ensayo I-DEAL sus valores rondan por encima de los 7,000 J/m<sup>2</sup>, en el ensayo I-FIT los valores se encuentran entre 900 J/m<sup>2</sup> y 1500 J/m<sup>2</sup> y para el ensayo Fénix los resultados de energía de fractura se presentan

dentro de los 100 J/m<sup>2</sup> a los 300 J/m<sup>2</sup>. La diferencia entre estos rangos de valores de energía de fractura (Gf) es debido a la geometría de la sección transversal del espécimen donde se aplica la carga, siendo así que a menor área menor resistencia máxima soportada y por lo tanto menor energía de fractura de acuerdo al ensayo efectuado. Si se realiza una comparación entre las mezclas que mayores resultados obtuvieron de energía de fractura, las mezclas “GLO 4” son las que mayor energía presentan seguido de las mezclas “TON”, esto en el caso de los ensayos de I-DEAL Y I-FIT; mientras que, en el ensayo Fénix la mezcla GLO3-76 fue la que presentó un valor mayor de 301.7 J/m<sup>2</sup>, sin considerar que las mezclas “TON” que no se pudo efectuar su ensayo por problemas con el equipo de prueba.

Del cumplimiento de las especificaciones o recomendaciones dadas para cada uno de los ensayos de agrietamiento, se busca no sólo obtener mezclas que sean tenaces y resistentes al agrietamiento ante cargas repetidas provocadas por el tránsito o por cambios de temperatura; si no también, que la metodología de diseño ya existente, como es el caso de la metodología sugerida por Protocolo AMAAC, tenga cumplimiento en sus dos primeros niveles de desempeño, de tal manera que se asegure la calidad de la mezcla asfáltica mediante el análisis de su respuesta ante los parámetros de susceptibilidad a la humedad, resistencia a la deformación permanente y a la fatiga. De acuerdo con los ensayos realizados, en la Figura 6 se muestran diagramas de desempeño que permiten conocer cuáles son las mezclas que cumplen con todos los parámetros anteriormente mencionados.

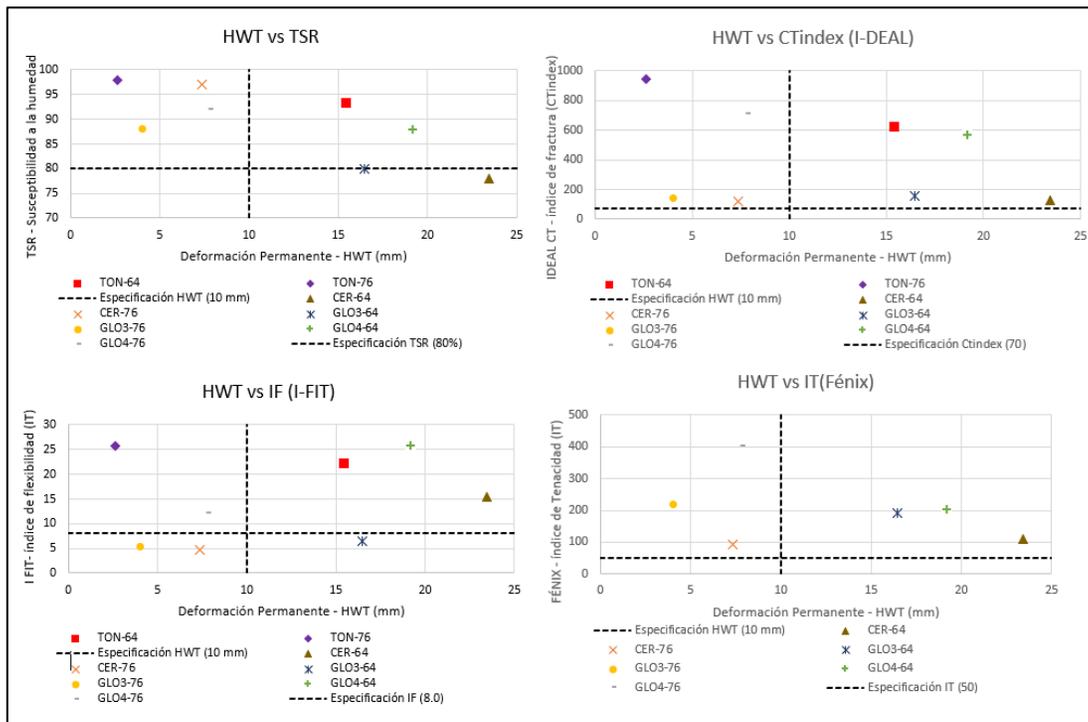


Figura 6. Diagramas de desempeño para el cumplimiento de diseño de las mezclas asfálticas.

De la Figura 6, se observa que las mezclas asfálticas que mejor desempeño presentaron desde el nivel I, nivel II y susceptibilidad al agrietamiento de acuerdo con las especificaciones fueron las mezclas elaboradas con asfalto PG 76V-22, las cuales se posicionan en el primer cuadrante en tres de los cuatro diagramas de desempeño, presentando el mejor comportamiento de resistencia a la humedad, a la deformación permanente y al agrietamiento. De igual manera se observa que las

mezclas que mejor se desempeñan en todos los ensayos son las mezclas del diseño de GLO4 y TON, tomando en cuenta que son las que mayor contenido de asfalto presentan.

En la Figura 7, se muestran las curvas generadas de fuerza vs desplazamiento por ensayo realizado de agrietamiento, para un espécimen representativo de cada mezcla evaluada. Como se puede observar, no existe una tendencia o similitud de comportamiento carga-desplazamiento entre los diferentes ensayos de agrietamiento por mezcla analizada, significando diferentes comportamientos a la hora de disipar la energía producto de la carga generada del propio ensayo.

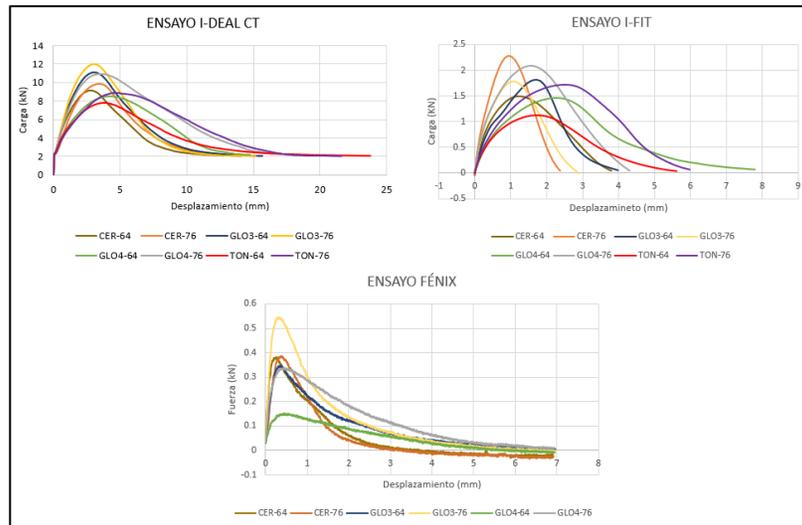


Figura 7. Curva Fuerza (KN) vs Desplazamiento (mm) de los diferentes ensayos

Si se observan cada una de las curvas fuerza vs desplazamiento de los diferentes ensayos, se puede interpretar que cada una de ellas tiene un comportamiento diferente antes de la carga máxima (carga pico) y después de la misma; este último, se conoce como la etapa de ablandamiento o “softening” del material y es donde se presenta el agrietamiento o falla visible. Los índices de agrietamiento relacionan la energía de fractura que representa el comportamiento de cada espécimen bajo todo el proceso de carga y el desplazamiento o pendiente durante el proceso de ablandamiento; es así que, los índices de agrietamiento pudieran ser interpretados como valores de comportamiento después del pico y cuyos valores pueden tener una alta correlación con la energía de fractura dependiendo si su agrietamiento es replicable en todos los especímenes ensayados. A continuación, se presenta en la Figura 8, las correlaciones obtenidas ( $R^2$ ) entre el índice de agrietamiento y la energía de fractura para cada uno de los ensayos y por mezcla evaluada.

En la Figura 8, se observa que el ensayo que mejor correlación presentó entre el índice de agrietamiento y la energía de fractura de cada espécimen ensayado fue el ensayo Fénix con valores de  $R^2$  mayores a 0.72, el cual puede ser atribuido a que la generación de la falla es inducida por la ranura que se le realiza previamente y a que la velocidad de aplicación de la carga durante el ensayo es 50 veces menor a la de los otros dos ensayos (1 mm/min).

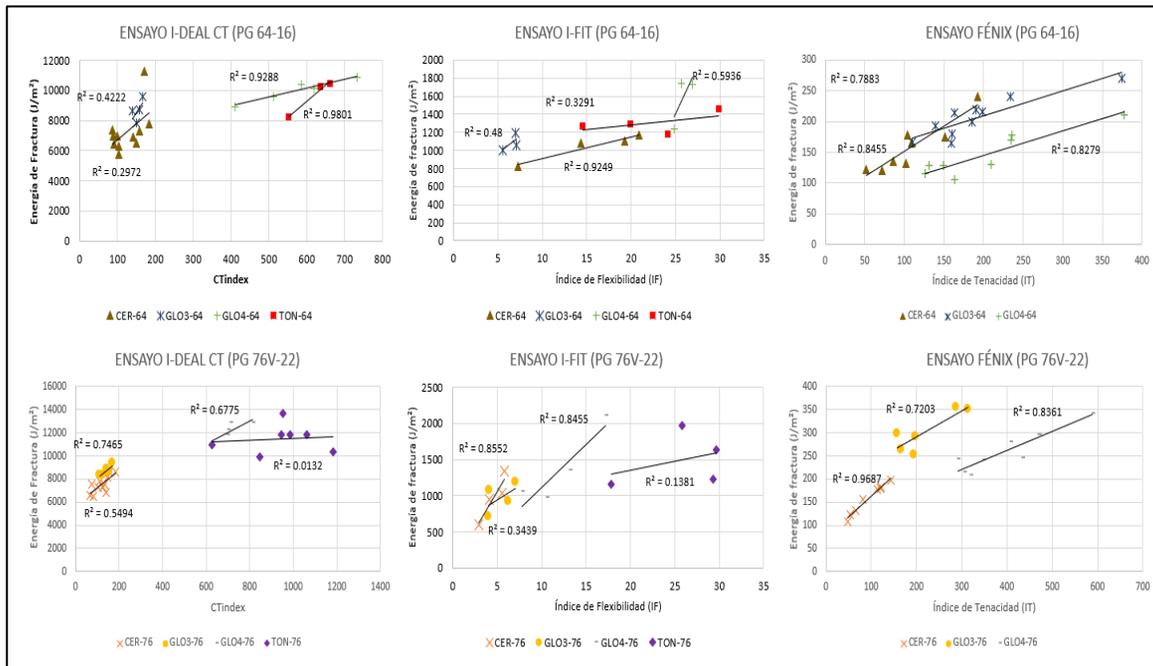


Figura 8. Correlación Índice de agrietamiento vs energía de fractura

#### 4 Conclusiones

- Las mezclas asfálticas diseñadas y elaboradas en laboratorio bajo la metodología de Protocolo AMAAC presentaron un buen comportamiento ante ensayos de susceptibilidad al agrietamiento.
- Las mezclas asfálticas elaboradas con asfalto modificado PG 76V-22 cumplieron con las propiedades volumétricas, con la resistencia al daño inducido por humedad y resistencia a la deformación permanente, especificados en la metodología de diseño en México; además de posicionarse como mezclas tenaces y resistentes al agrietamiento según los ensayos de I-DEAL, I-FIT y Fénix.
- De los ensayos de agrietamiento, se obtuvieron valores habituales de energía de fractura en mezclas asfálticas de granulometría densa, según la literatura.
- Las mezclas asfálticas con mayor contenido de asfalto (GLO 4 y TON), presentaron un índice de agrietamiento mayor en los tres ensayos efectuados y no se observó una diferencia considerable en sus valores, al emplear mezclas con asfalto convencional o mezclas con asfalto modificado.
- El ensayo I-DEAL puede ser una buena alternativa para conocer la susceptibilidad al agrietamiento, considerando que los especímenes ensayados no llevan ninguna modificación o corte en su estructura, pero deberá tomarse en cuenta que valores próximos al 70 especificado, condiciona el cumplimiento de la resistencia al agrietamiento en los otros dos ensayos.
- El ensayo Fénix presentó mayores valores de correlación entre el índice de agrietamiento y la energía de fractura, comparados con los otros dos ensayos y los cuales pueden ser atribuidos a la velocidad de aplicación de la carga en el ensayo.



- Los ensayos efectuados para la evaluación de la susceptibilidad al agrietamiento pueden ser una buena alternativa para el diseño de mezclas en México, tomando en consideración parámetros establecidos en otros países como referencia, pero sin dejar a un lado el control de calidad y monitoreo de la mezcla asfáltica puesta en servicio.

## 6 Referencias

- [1] Valdés 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.
- [2] Cepeda Aldape, J. B. (2002). *Análisis del comportamiento de mezclas asfálticas a fisuración por fatiga mediante la aplicación de un nuevo ensayo dinámico a tracción directa*. Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- [3] Brown R., P. Kandhal and J. Zhang (2001). *Performance Testing for Hot Mix Asphalt*. NCAT Report 01-05, National Center for Asphalt Technology.
- [4] Tinoco Zamudio, M. (2011). *Aplicación y revisión del Protocolo AMAAC 2008 mediante el análisis del estado del arte de las mezclas asfálticas y el seguimiento del tramo de prueba Sta. Rosa a la La Barca del km 13 al 17*. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.
- [5] Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013<sup>3</sup>. *Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño*. Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.
- [6] N-CMT-4-05-004/18. *Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*. Características de los Materiales, Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes.
- [7] ASTM D6931-17. *Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures*. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/D6931.htm>.
- [8] AASHTO T 324 (2016). *Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA)*. Recuperado de Techstreet: [https://www.techstreet.com/standards/aashto-t-324-16?product\\_id=1924308](https://www.techstreet.com/standards/aashto-t-324-16?product_id=1924308).
- [9] ASTM D 8225 (2019). *Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature*. ASTM International.
- [10] AASHTO TP 124 (2018). *Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using Semicircular Bend Geometry (SCB) at Intermediate Temperature*. American Association of State Highway and Transportation Officials 444 North Capitol Street N.W., Suite 249 Washington, D.C. 20001
- [11] NLT-383 (2020). *Evaluación de la Resistencia, Tenacidad y Energía de Rotura de las Mezclas Bituminosas mediante el Ensayo Fénix*. Redactada en la Cátedra de Caminos de la ETSICCP de Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya.
- [12] Navarrete Sánchez, E. F. (2021). *Empleo de la prueba "ideal" para el control del agrietamiento en mezclas asfálticas*. Guayaquil, Ecuador. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.