



Octava Edición

2019 - 2020

Nuevo método de prueba para determinar el potencial de fractura del ligante asfáltico

Autor:

Álvaro Gutiérrez Muñiz

Raymundo Benítez López

QUIMI-KAO S.A. de C.V.

1. RESUMEN

Uno de los principales daños en los pavimentos flexibles es el agrietamiento y el ligante asfáltico juega un papel extremadamente importante, por esta razón es necesario tener un buen método de prueba para determinar la resistencia del ligante al agrietamiento y a la fractura dado que hasta el momento no contamos con uno. En América se ha tratado de controlar este daño por medio de la evaluación del parámetro " G^* sen δ " especificado en la norma AASHTO M320-19, pero no ha funcionado. Otros investigadores han desarrollado otros métodos como el de barrido de amplitud lineal "LAS" descrito en AASHTO TP 101-12 y el parámetro ΔT_c pero todos estos métodos no han sido totalmente aceptados.

En este estudio se propone un nuevo método de prueba para determinar el potencial de fractura del ligante asfáltico utilizando el reómetro de corte dinámico (DSR). Este método de prueba cubre la determinación de la Energía de Fractura (G_f) o la Energía Disipada (G_D) del ligante asfáltico obtenidas de la curva Fuerza-Desplazamiento. Los datos para la elaboración de esta curva se obtienen del reómetro de corte dinámico que realiza una prueba de barrido de amplitud aumentando esta linealmente a una temperatura intermedia y frecuencia constante. El método también incluye procedimientos para calcular otros parámetros relevantes derivados de la curva Fuerza-Desplazamiento, tales como la pendiente (m) posterior al pico de fuerza máxima. Estos parámetros se pueden usar para desarrollar un índice de flexibilidad (IF) y un índice de tenacidad (IT) para predecir la resistencia al agrietamiento del ligante asfáltico. Estos índices pueden usarse para determinar el potencial de fractura del ligante asfáltico original, después de RTFO, después de PAV, después de 2 veces PAV o cualquier condición de oxidación del mismo.

En este estudio, se evaluaron dos ligantes asfálticos utilizando este método propuesto obteniendo la energía de fractura y el índice de flexibilidad, estos parámetros se comparan con los parámetros de la mezcla asfáltica caliente fabricada con estos ligantes utilizando el método AASHTO TP 124-18 (Semi-Circular Bending Test "SCB").

En este estudio se evaluaron ligantes asfálticos con el mismo grado PG de 64-22 procedentes de varios países utilizando este método propuesto obteniendo la energía de fractura, el índice de flexibilidad, el índice de tenacidad y otros parámetros que nos permiten claramente identificar que cada uno de ellos presenta un potencial de resistencia a la fractura muy diferente.

Palabras clave: Energía de fractura, Índice de Tenacidad, Índice de Fractura, Índice de Flexibilidad, Resistencia a la fractura.

2. INTRODUCCIÓN

Desde finales de la década de 1990, la durabilidad y el agrietamiento del pavimento se han convertido en la principal preocupación en los pavimentos asfálticos. Antes de que surgiera en los Estados Unidos de Norteamérica el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHARP), la deformación permanente era la principal preocupación de estos pavimentos y por ello este programa se enfocó en solucionarla mediante las mejoras en la calidad del agregado, en el diseño de la mezcla y en el ligante asfáltico con la adición de polímeros, con estas mejoras prácticamente se ha logrado reducir esta deformación permanente, pero el problema de fisuración por fatiga y agrietamiento no se ha solucionado por lo que ahora es el momento de emplear todos los recursos para incrementar la durabilidad de los pavimentos asfálticos[1] y de ahí la motivación de proponer este nuevo método para determinar el potencial de fractura del ligante asfáltico.

Se suponía que las especificaciones del ligante asfáltico creadas en el programa SHARP referidas como Superpave establecidas en la norma AASHTO M 320-19, abordaban los problemas fisuración por fatiga y el agrietamiento transversal a baja temperatura creando para el control de la fisuración por fatiga el parámetro de $[G \cdot \sin \delta]$ limitándolo a 5000KPa como máximo a una temperatura intermedia utilizando el reómetro de corte dinámico y para el control de agrietamiento transversal a baja temperatura crearon el parámetro de la medición de la pendiente la curva de Rigidez-Tiempo $[m]$ limitada a el valor absoluto de 0.300 como mínimo en conjunto con el valor de la Rigidez "S" a el valor de 300MPa como máximo empleando el reómetro de viga de flexión (BBR). Los parámetros de control del BBR parecen estar haciendo un buen trabajo al abordar el agrietamiento transversal a baja temperatura, pero no así con el reómetro de corte dinámico "DSR" ya que el parámetro $[G \cdot \sin \delta]$ no ha funcionado, por lo que en muchos países se está realizando un extenso estudio para tratar de reemplazarlo [1] surgiendo la oportunidad de desarrollar nuevos métodos con sus respectivos parámetros de control.

En 2011, el Instituto de Asfalto de Estados Unidos de Norteamérica como parte de un estudio de la FAA sobre durabilidad y grietas en pavimentos de aeropuertos evaluó el parámetro ΔT_c como una medida de formación de grietas. Este es un valor determinado a partir de las mediciones del BBR de la Rigidez "S" y de la pendiente "m" a dos temperaturas (AASHTO T-313). Se determina la temperatura específica donde la rigidez "S" cumple con 300MPa y el valor de "m" cumple con 0.3 y estas temperaturas específicas se llaman temperaturas críticas de falla; estas temperaturas casi nunca son las mismas por lo que de aquí proviene este parámetro de control denominado delta (Δ) T_c . La temperatura crítica para "m" se resta de la temperatura crítica para "S" y se determina ΔT_c . Un valor para T_c "S" de -26.2 menos un valor de T_c "m" de -25.9 da un valor de -0.3 ΔT_c . El estudio de campo indicó que cuanto mayor y más negativa es la diferencia, más propenso es el agrietamiento del pavimento. Este parámetro ΔT_c se encuentra todavía en etapa de estudio y por lo tanto no ha sido aceptado en su totalidad [1]. Otro método propuesto para determinar la resistencia del asfalto al agrietamiento y la fatiga ha sido el de barrido de amplitud lineal "LAS" descrito en AASHTO TP 101-

12 (2018) pero también no han sido totalmente aceptado ya que algunos resultados han mostrado que entre más oxidado este un ligante asfáltico es más resistente a la fisuración por fatiga contrario a las experiencias de campo.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado y tratando de colaborar para en el control de la resistencia al agrietamiento y la fisuración de las mezclas asfálticas, en este estudio proponemos un nuevo método de prueba para determinar el potencial de fractura del ligante asfáltico utilizando el reómetro de corte dinámico (DSR), este método está basado en los mismos principios teóricos que el método AASHTO TP 124-18 que utiliza la geometría de curva semicircular (SCB) a Temperatura intermedia, por lo tanto, se obtienen los mismos parámetros como Energía de fractura (G_f), pendiente posterior al pico (m) e Índice de flexibilidad (FI) y estos parámetros describen la resistencia a la fractura y la fatiga del aglutinante de asfalto; también este nuevo método propuesto en este estudio está basado en los mismos principios teóricos del ensayo Fénix obteniendo los mismo parámetros tales como la energía disipada (G_D), índice de tenacidad (IT), índice de rigidez al corte (IRT) y tensión máxima ($T_{Máx}$).

El método AASHTO TP 124-18 consiste en determinar el esfuerzo necesario para fisurar una probeta semicilíndrica de mezcla asfáltica aplicando un esfuerzo de tensión indirecta para producir la fractura de esta y el ensayo Fénix consiste en determinar el esfuerzo necesario para fisurar una probeta semicilíndrica de mezcla asfáltica aplicando un esfuerzo de tracción en su plano diametral. Como podemos observar ambos métodos aplican un esfuerzo en forma de tensión para producir la fractura de la mezcla asfáltica y el método propuesto en este estudio utiliza un esfuerzo de corte para producir la fractura del ligante por lo que quizá nos sea difícil entender que empleando un esfuerzo de corte podamos lograr la fractura del ligante asfáltico pero existen tres convenciones estándar para definir desplazamientos relativos en materiales elásticos con el fin de analizar la propagación de grietas [2] según lo propuesto por Irwin [3] además, la fractura puede implicar una tensión uniforme o una combinación de estos modos [4] mostrados en la figura 1.

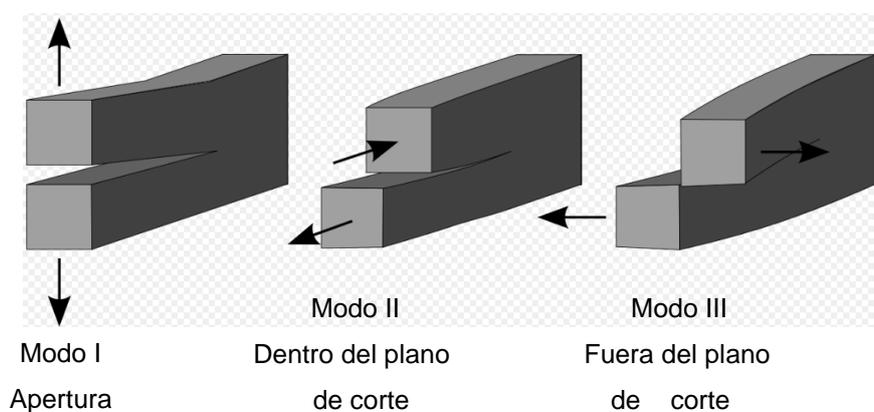


Figura 1.- Modos de separación de grietas por fractura.

Grieta en Modo I - Modo de apertura (un esfuerzo de tensión normal al plano de la grieta)

Grieta en modo II : Modo deslizante (un esfuerzo cortante que actúa en paralelo al plano de la grieta y perpendicular al frente de la grieta)

Grieta en modo III : Modo de rasgado (un esfuerzo cortante que actúa paralelo al plano de la grieta y paralelo al frente de la grieta)

La manera en que una grieta se propaga a través de un material da una idea del modo de fractura. Con la fractura dúctil, una grieta se mueve lentamente y se acompaña de una gran cantidad de deformación plástica alrededor de la punta de la grieta. Una grieta dúctil generalmente no se propagará a menos que se aplique un esfuerzo mayor y generalmente deje de propagarse cuando se elimine la carga. [4] En un material dúctil, una grieta puede progresar a una sección del material donde las tensiones son ligeramente más bajas y se detienen debido al efecto embotado de las deformaciones plásticas en la punta de la grieta. Por otro lado, con fractura frágil, las grietas se extienden muy rápidamente con poca o ninguna deformación plástica. Las grietas que se propagan en un material frágil continuarán creciendo una vez iniciadas.

La resistencia a la fractura, también conocida como resistencia a la rotura, es el estrés al que falla una muestra por fractura [7]. Esto generalmente se determina para un espécimen dado mediante una prueba de tracción, que traza la curva de tensión-deformación (ver figura 2). El punto final registrado es la resistencia a la fractura.

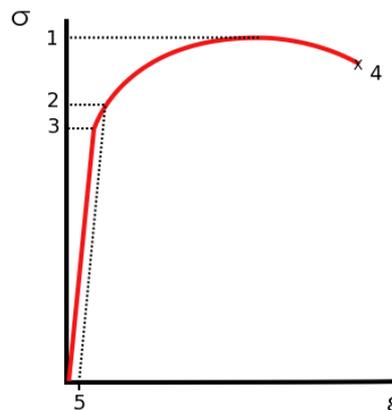


Figura 2.- Curva de tensión frente a deformación típica del aluminio. 1.-Resistencia a la tracción máxima. 2.-Resistencia al rendimiento (Yield Point). 3.-Tensión límite proporcional. 4.-Fractura. 5.-Tensión de compensación (típicamente 0.2%).

Con el objetivo de demostrar que es posible obtener la fractura del ligante asfáltico con este nuevo método propuesto que aplica un esfuerzo cortante para lograr una deformación y que esta va variando en forma lineal hasta llegar 100% de la misma, se realizaron dos corridas de prueba a una temperatura de 25°C y una frecuencia de 30Hz (a altas frecuencias el ligante asfáltico se comporta

como un sólido), una corrida con una muestra de ligante asfáltico grado PG 76-22 y otra con un ligante asfáltico grado PG 70-28, ambas clasificaciones de grado PG se hicieron conforme a la norma AASHTO M-320-19 y su grado de oxidación de la muestra en la corridas fue después de la pruebas RTFO AASHTO T-240 y PAV AASHTO R28 y con los datos generados se realizó la gráfica de la figura 3, donde podemos observar que la curva esfuerzo-deformación sigue el mismo patrón de conducta que el mostrado en la gráfica de la figura 2 confirmando que utilizando un esfuerzo cortante podemos producir la fractura del ligante asfáltico tal como utilizando un esfuerzo de tensión. En esta gráfica de la figura 3 podemos observar que el asfalto PG 76-22 es más rígido que el asfalto PG 70-28 por lo que el Stress máximo aparece con menor porcentaje de deformación y el inicio de la deformación plástica (Yield Point) ocurre a mayor porcentaje de deformación para este ligante PG 76-22.

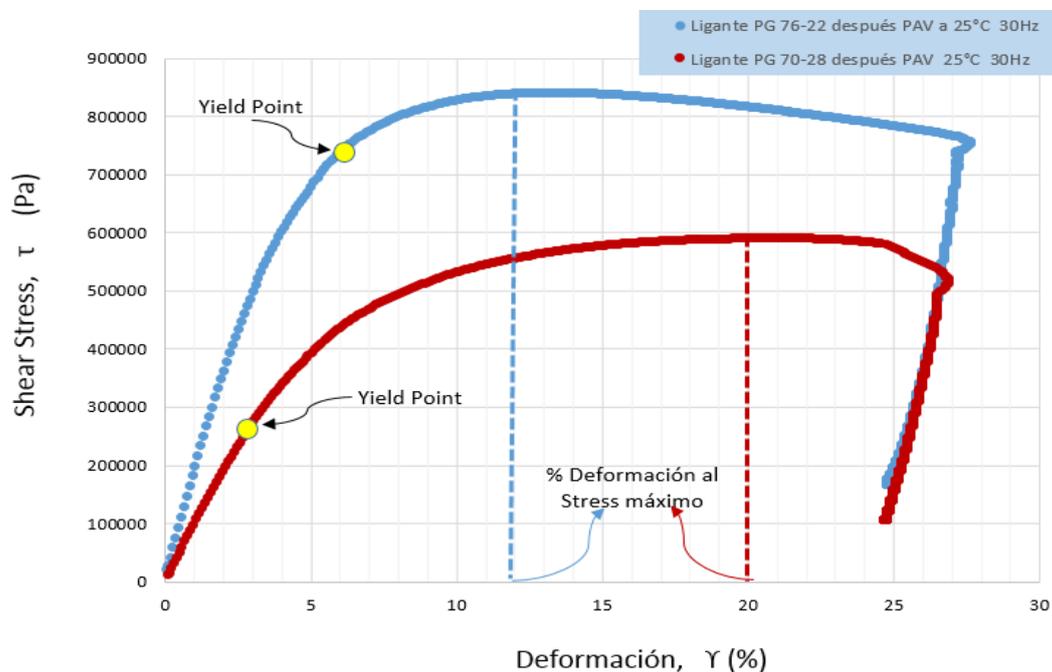


Figura 3.-Gráfica Esfuerzo-deformación de los ligantes asfáltico PG 76-22 y PG 70-28 elaborada utilizando los datos proporcionados por el nuevo método propuesto.

Al utilizar este método propuesto podemos determinar en forma muy precisa el Yield Point (punto de inicio de fluencia) que ocurre cuando el módulo elástico G' es igual al módulo viscoso G'' , es decir, cuando el ángulo de fase del ligante asfáltico es 45° . En las gráficas de tensión-deformación de los materiales a este punto se le conoce como resistencia al rendimiento (punto de 2 en la gráfica de la figura 2) y este punto es el indicativo de que a partir de este esfuerzo empleado para producir determinada deformación el material comienza a deformarse sin recuperarse pero no se rompe, este punto también se le conoce como inicio de plasticidad de los materiales puesto que a partir de este punto el módulo viscoso (también denominado módulo de pérdida puesto que es la energía que se utiliza para deformar el ligante) es mayor que el módulo elástico (también denominado módulo de almacenamiento puesto que es la energía que se utiliza para regresar el ligante a su forma original) y lo ideal es que un material presente este punto con la menor deformación posible para que tenga más

capacidad de deformarse antes de romperse, en la gráfica de la figura 3 podemos observar que el ligante PG 70-28 presenta un Yield Point a una deformación menor que el ligante PG 76-22 por lo que la grieta se propagará menos rápido que en comparación con el asfalto PG 76-22 y presentará una fractura más dúctil ya que muestra una mayor deformación plástica.

3. DESCRIPCIÓN DE ESTE NUEVO MÉTODO DE PRUEBA PARA EVALUAR EL POTENCIAL DE FRACTURA DEL LIGANTE ASFÁLTICO.

Este nuevo método de prueba cubre la determinación de la energía de fractura (G_f) y Energía Disipada (G_D) del ligante asfáltico derivadas de la curva de Fuerza-Desplazamiento. Los datos de esta curva se obtienen del reómetro de corte dinámico que realiza una prueba de barrido de amplitud (deformación) empleando incrementos de carga que aumentan linealmente a una temperatura intermedia y frecuencia constantes. Las temperatura de prueba al igual que la frecuencia son constantes durante la prueba pero éstas se pueden cambiar en función a la cantidad de formación a la cual se desea obtener la fractura, por ejemplo a temperaturas menores a 25°C y frecuencias mayores de 20Hz el ligante asfáltico se comporta como un sólido y la fractura ocurre a bajos porcentajes de deformación (ver gráfica de la figura 3) y a temperaturas de 25°C y frecuencias iguales o menores a 15Hz la curva fuerza desplazamiento nos permite observar cómo se deforma el ligante asfáltico después de aplicar la carga máxima por lo que se sugieren estos parámetros para realizar el ensayo, especialmente a 25°C y 10Hz. El ligante asfáltico utilizando en la prueba puede ser el original, después del ensayo RTFO (AASHTO T 240), después del ensayo PAV (AASHTO R28), después de 2 o más veces el ensayo PAV o cualquier condición de oxidación el ligante asfáltico.

Este nuevo método también incluye dos procedimientos para calcular otros parámetros relevantes derivados de la curva “Fuerza-Desplazamiento” o también llamada curva “Carga-Desplazamiento” y estos son:

1. Procedimiento ILLINOIS.- Este procedimiento está basado en los mismos parámetros que utiliza el método de prueba AASHTO TP 124-18 (Semi-Circular Bending Test “SCB”) y por lo tanto de la curva Fuerza-Desplazamiento se obtiene el valor absoluto de la pendiente [m] de la curva en la zona posterior a la fuerza máxima aplicada y con este valor en conjunto con la energía de fractura (G_f) se calcula el Índice de flexibilidad (IF) indicativo del potencial de resistencia de fractura del ligante, entre más alto sea el IF mayor será su potencial de resistencia a la fractura. El Índice de Flexibilidad se calcula dividiendo la Energía de Fractura entre el valor absoluto de la pendiente de la curva Carga-Desplazamiento en la zona posterior a la fuerza máxima por lo que para que el ligante tenga un alto Índice de Flexibilidad será necesario que tenga una gran cantidad de energía de fractura pero que también tenga la capacidad de deformarse en la zona posterior a la fuerza máxima de la curva carga-desplazamiento, esto es, que el valor negativo de la pendiente sea lo más cercano a 0, o en otras palabras que la pendiente presente el mayor ángulo posible y la interpretación física sería que un ligante asfáltico con un alto índice de Flexibilidad sería un ligante dúctil.

2. Procedimiento FÉNIX.- Este procedimiento está basado en los mismos parámetros que utiliza el ensayo FÉNIX[9] y por lo tanto de la curva Fuerza-Desplazamiento se obtienen los parámetros tales como el Índice de Rigidez al Corte (IRT), Tensión Máxima (Tmax) y el índice de tenacidad (IT) indicativo del potencial de resistencia de fractura del ligante, entre más alto sea mayor será su potencial de resistencia a la fractura. En este procedimiento se incluye un nuevo parámetro denominado Índice de Tenacidad Plástico (ITP).

3.1 Fundamentos teóricos de la prueba del método propuesto.

La prueba requiere de un reómetro de corte dinámico (DSR) y se lleva a cabo colocando una capa delgada de ligante asfáltico entre dos platos metálicos de 8 mm de diámetro de los cuales el inferior permanece fijo y el superior gira repetidamente en forma oscilatoria de tal forma que un solo ciclo de carga ocurre cuando la plato superior gira en dirección en contra de las manecillas del reloj desde su posición cero (A) a la posición (C), después gira en sentido de las manecillas del reloj hasta la posición (D), después gira en sentido contrario a las manecillas del reloj hasta la posición (A), tal como lo muestra la figura 4.

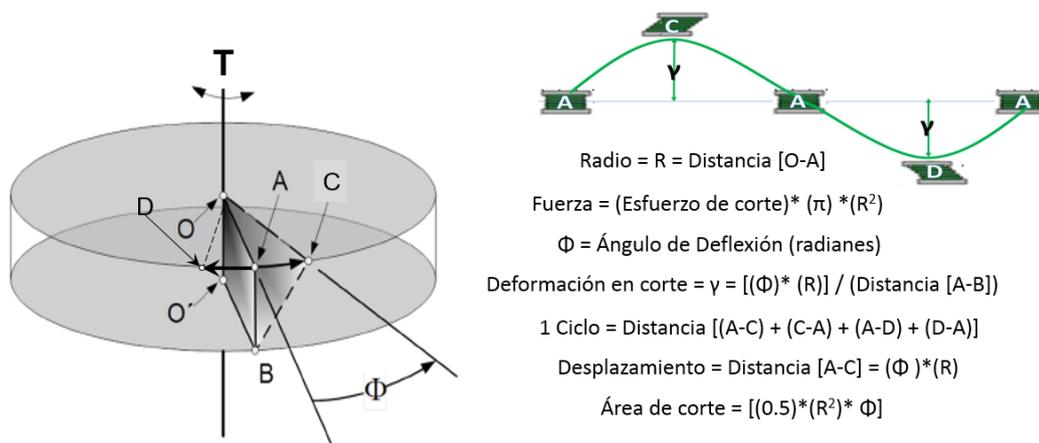


Figura 4.- Movimiento del plato superior durante la prueba del método propuesto.

La prueba comienza aplicando un esfuerzo de corte (Shear Stress) necesario para deformar la muestra del ligante asfáltico 0.1% (Initial Strain 0.1%) y después de 10 ciclos alcanza una deformación del 0.2% y así sucesivamente hasta completar el 100% de deformación por lo que la prueba realiza 1010 mediciones (1010 puntos) con 10100 ciclos totales. La rapidez con la que el equipo realiza los ciclos dependerá de la frecuencia de la prueba y así por ejemplo si la prueba se realiza a una frecuencia de 10Hz (10 ciclos por segundo) el tiempo que dura el reómetro deformando el ligante entre 0.1% y 0.2% será de un segundo por lo que el tiempo total de la prueba será de 1010 segundos, si cambiamos la frecuencia a 20Hz con 10100 ciclos totales entonces la prueba durará 505 segundos (la mitad del tiempo que con 10Hz) y si utilizamos 5Hz con 10100 ciclos totales entonces la prueba durará 2020 segundos (el doble de tiempo que con 10Hz). Esta deformación que sufre el

ligante la podemos entender más claramente observando la figura 5, dónde la deformación (Strain) será igual a la distancia [A-C] entre la distancia que existe entre los platos paralelos "h" y si esa distancia es de 1.000mm (recomendación) la deformación será igual al desplazamiento (este es igual al desplazamiento angular multiplicado por el radio) entre la distancia entre platos.

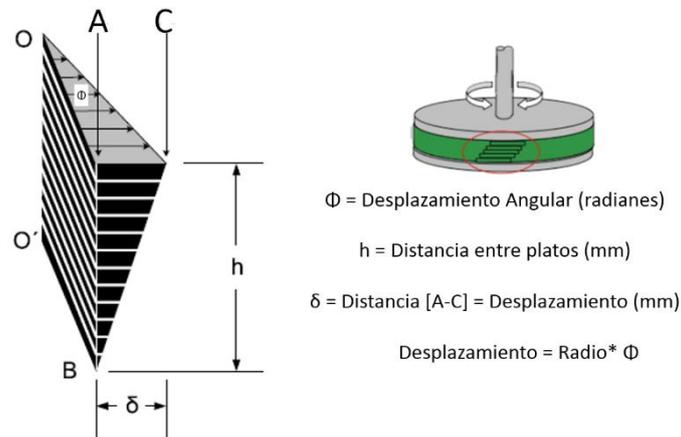


Figura 5.- Deformación del ligante asfáltico entre los platos paralelos al aplicar un esfuerzo cortante

Sabemos que la fractura es impulsada por tensiones que actúan para separar un plano atómico de otro, en cambio el comportamiento plástico es impulsado por tensiones de corte, deslizando un plano a lo largo de otro, estos dos mecanismos distintos se ilustran en la figura 6. Por supuesto los enlaces deben romperse durante el deslizamiento asociado con el inicio del comportamiento plástico, pero a diferencia de la fractura, se les permite reformar en nuevas posiciones. Este proceso puede generar un cambio sustancial en el material, incluso conducir a la fractura tal como al doblar una varilla metálica hacia adelante y hacia atrás varias veces para romperla o con el movimiento oscilatorio empleado en este nuevo método mostrado en la figura 4. La deformación "plástica" que es esencialmente un proceso de flujo viscoso, sigue leyes cinéticas similares a de los líquidos[8].

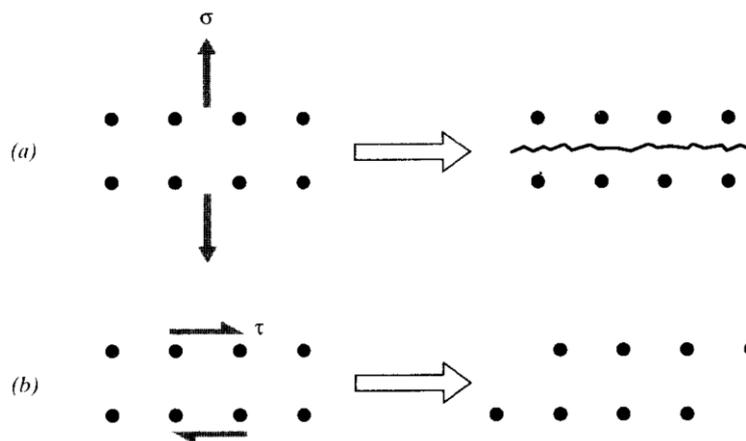


Figura 6.- La fractura es causada por un esfuerzo de tensión (a) y el deslizamiento es causado por un esfuerzo cortante (b) por lo que ambos esfuerzos pueden conducir a la fractura.

Los datos para la elaboración de la curva Fuerza-Desplazamiento se obtienen al calcular la Fuerza (kN) a partir de la multiplicación del esfuerzo de corte (shear stress) por el área del plato utilizado en la prueba y el desplazamiento se obtiene a partir de la multiplicación de la deflexión angular por el radio del plato y después de numerosas pruebas hemos encontrado que una deformación máxima del 100% y frecuencias menores a 20Hz es suficiente para lograr una forma ideal de la curva fuerza-desplazamiento; a partir de esta curva se pueden calcular diversos parámetros que nos han permitido establecer dos procedimientos para calcular el potencial de fractura de un ligante asfáltico y estos son: El Procedimiento ILLINOIS y El Procedimiento FENIX. El trabajo necesario para lograr la fractura del ligante será el área bajo la curva Fuerza-Desplazamiento y la energía de fractura será el trabajo de fractura dividido entre el área de fractura que será igual a $0.5 \cdot \text{radio}^2 \cdot \Phi$ porque el comportamiento plástico será impulsado por tensiones de corte deslizando un plano a lo largo de otro (ver figura 6) hasta llegar a la fractura, esto lo comprobamos con las fotografías mostradas en la figura 7, donde podemos observar que después de una corrida de prueba utilizando este método propuesto en este estudio, enfriamos a 0°C los platos y la muestra de ligante y después levantamos el plato superior logrando dañar la muestra lo suficiente para ver el área de fractura ya que ocurre un desprendimiento en forma de láminas de sus capas en el área del deslizamiento y esto nos permitió comprobar el área de fractura.

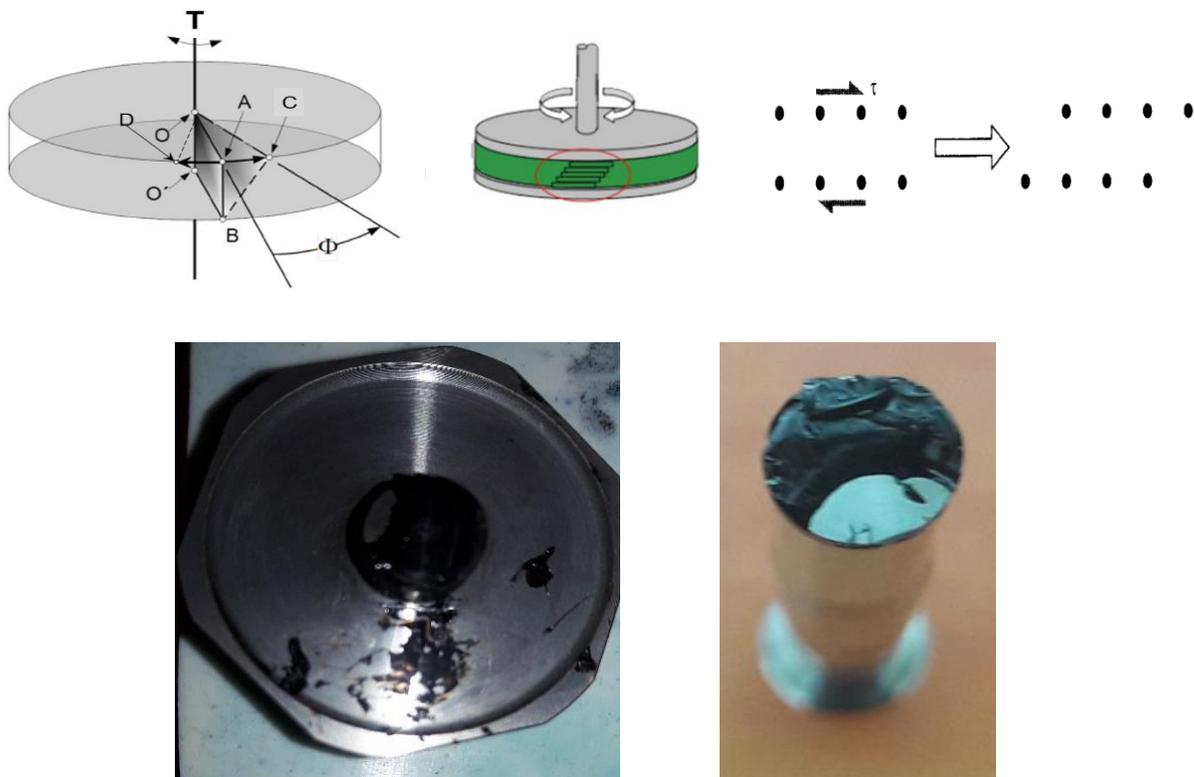


Figura 7.- Comprobación de la determinación del área de fractura ($\text{área} = 0.5 \cdot \text{radio}^2 \cdot \Phi$) para determinación del de la energía de fractura utilizando este método de prueba.

3.2 Descripción de los parámetros de este nuevo método de prueba.

En las líneas anteriores se ha argumentado los fundamentos teóricos de este nuevo método cuyos resultados nos permiten elaborar la curva “Carga-Desplazamiento” o curva “Fuerza-Desplazamiento” y a partir de esta curva se pueden calcular diversos parámetros para calcular el potencial de fractura de un ligante asfáltico. Estos parámetros son muy diversos por lo que los hemos agrupado en dos procedimientos: El Procedimiento ILLINOIS y El Procedimiento FENIX.

3.2.1 Procedimiento ILLINOIS.- Este procedimiento lo llamamos así, porque está basado en los mismos parámetros que utiliza el método de prueba AASHTO TP 124-18 (Semi-Circular Bending Test “SCB”). Estos parámetros obtenidos de la curva de carga-desplazamiento que se muestran en la figura 8 son: Trabajo de fractura (W_f), Energía de fractura (G_f), Pendiente posterior al pico (m), Desplazamiento en la carga máxima (U_{Max}), Índice de flexibilidad (IF) y el nuevo parámetro Yield Point (Punto de Fluencia).

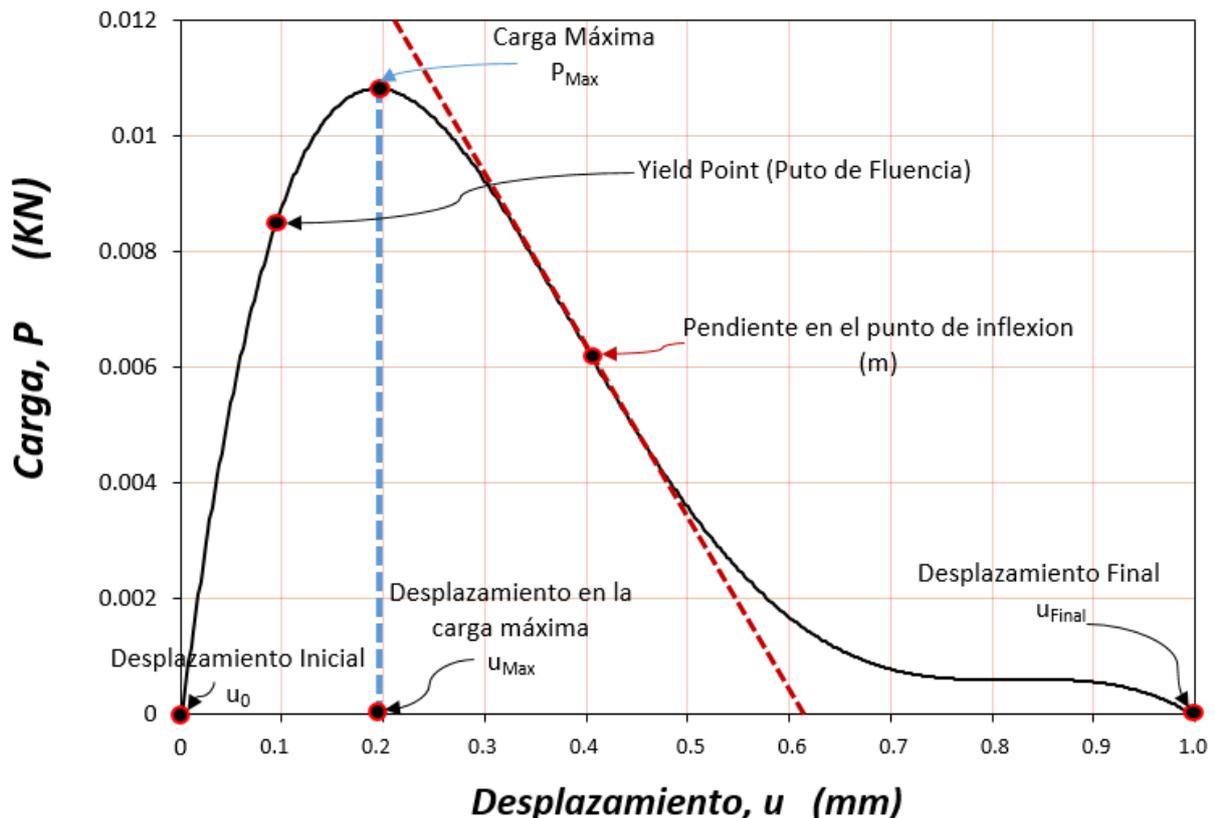


Figura 8.- Curva Carga-Desplazamiento elaborada con los datos obtenidos del método propuesto en este estudio, así como los parámetros del procedimiento ILLINOIS.

Desplazamiento "u" (mm): el desplazamiento se calcula utilizando los datos del porcentaje de deformación, la deflexión angular y la distancia de separación entre los platos que es de 1.000 mm (Gap). La prueba tiene 1010 datos de porcentaje de deformación y 10,1000 ciclos, esto significa que la prueba comienza con 0.1% de deformación con 10 ciclos y termina con 100% de deformación con 10 ciclos, sumando un total de 10100 ciclos. El desplazamiento se calcula utilizando la siguiente fórmula (I-1):

$$\text{Desplazamiento} = (\text{ángulo de deflexión}) * (\text{radio del plato en mm}) = \text{mm} \quad (I-1)$$

Las unidades del desplazamiento están en milímetros porque las unidades del área bajo la curva carga-desplazamiento son Julios y la carga está dada en kilo-Newtons.

Desplazamiento Inicial "u₀" (mm): El desplazamiento inicial es siempre 0.0mm.

Desplazamiento a la carga máxima "u_{Max}" (mm): Este desplazamiento ocurre cuando se obtiene la carga máxima.

Desplazamiento final "u_{Final}": El valor de este desplazamiento es 1.0 mm al llegar al 100% de la deformación cuando termina la prueba esto ocurre si se utiliza 1.000 mm de abertura entre platos. Cuando no se obtiene el 100% de la deformación (esto ocurre cuando la prueba se lleva a cabo utilizando una frecuencia igual o mayor a 20Hz), el desplazamiento final se calcula utilizando la fórmula (I-1).

Carga "P" (kN): El dato de la Carga o Fuerza se obtiene del esfuerzo cortante aplicado en cada % de deformación multiplicado por el área del plato, esto significa que tenemos 1010 datos de esfuerzo cortante, 1010 datos de deformación y 1010 datos de carga. Las unidades de la carga están en Kilo-Newton porque las unidades del desplazamiento son milímetros y las unidades del área bajo la curva de carga-desplazamiento son Julios. La Fuerza en kN se calcula a partir de la fórmula (I-2).

$$\text{Carga} = (\text{esfuerzo cortante en Pascales}) * (\pi) * (\text{radio}^2 \text{ en metros}) / 1000 = \text{kN} \quad (I-2)$$

Yield Point (Punto de Fluencia): Este punto ocurre cuando el Módulo de almacenamiento G' es igual al Módulo de pérdida G'' o cuando el ángulo de fase es igual a 45°[10]. El punto de fluencia indica el inicio del comportamiento plástico porque el módulo de pérdida es mayor que el módulo de almacenamiento. El punto de fluencia es expresado en milímetros y en cuanto menor sea este el ligante tendrá mayor facultad para deformarse plásticamente sin romperse.

Trabajo de fractura "Wf" (julios): El trabajo de fractura se calcula como el área bajo la curva de carga vs. desplazamiento (ver figura 8).

El área bajo la curva de carga-desplazamiento se calcula utilizando una técnica de integración numérica, es decir, los 1010 datos de carga-desplazamiento se ajustan a una ecuación polinómica con un grado de 6:

$$P = Au^6 + Bu^5 + Cu^4 - Du^3 + Eu^2 + Fu + G \quad (A,B,C,D, F y G \text{ son constantes}) \quad (I-3)$$

El área bajo la curva es la integral de la ecuación polinomial (I-3) entre los límites de la deformación inicial y la deformación final (generalmente estos valores son 0.0 y 1.00):

$$Wf = \int_{u_0}^{u_f} P(u)du = \text{Joules} \quad (I-4)$$

Energía de fractura (Gf): La energía de fractura Gf se calcula dividiendo el trabajo de fractura "Wf" que es el área bajo la curva carga-desplazamiento (ecuación I-4), entre el área del área de fractura (ecuación I-6) de acuerdo con la siguiente ecuación (I-5):

$$Gf = \frac{Wf \times 10^6}{(\text{Área de Fractura})} = \text{Joules/m}^2 \quad (I-5)$$

Área de fractura (mm²): El área de fractura es el área de corte que ocurre en el porcentaje de máxima deformación y dónde el ángulo de deflexión "Φ" es el máximo (ver figura 7) al que llega la prueba. Este valor es de 2.0 mm² cuando se utilizan platos paralelos de 8 mm de diámetro y la deformación total es del 100% con una abertura entre platos de 1.000mm. El área se calcula de acuerdo con la siguiente formulación I-6:

$$\text{Área de Fractura} = (0.5 * (\text{radio del plato en mm})^2 * \Phi) = \text{mm}^2 \quad (I-6)$$

Pendiente "m": El valor de la pendiente "m" en el punto de inflexión se determina derivando la ecuación polinomial de sexto orden (fórmula I-3) y poniendo los valores del desplazamiento de la línea recta que pasa por la mayoría de los puntos en la curva Carga-desplazamiento en la zona después de la carga máxima (ver figura 8 y 10) se calcula el valor de la derivada en cada uno de esos puntos y se selecciona el valor absoluto máximo (punto de inflexión) que será el valor de "m".

Índice de flexibilidad (IF): El índice de flexibilidad se puede calcular a partir de los parámetros obtenidos utilizando la curva Carga-Desplazamiento con la energía de fractura y el área de fractura conforme con la ecuación (I-7). El factor Z se utiliza para la conversión y el escalamiento de unidades. Z es igual a 0.0001 por así convenir a que los valores de IF estén el rango entre 0 y 20.

$$IF = \frac{Gf}{|m|} \times Z \quad (I-7)$$

Dónde |m| = Valor absoluto de la pendiente "m" (kN/mm).

3.2.2 Procedimiento FÉNIX.- Este procedimiento lo llamamos así porque está basado en los mismos parámetros que utiliza el ensayo FÉNIX[9], más la adición de un nuevo parámetro "Yield Point" (Punto de Fluencia) con el que calcula el nuevo índice de tenacidad plástico (ITP). Estos parámetros son obtenidos de la curva Carga-Desplazamiento que se muestran en la figura 9 y son: Índice de Rigidez a Tracción (IRT), Tensión Máxima (Tmax) y el índice de tenacidad (IT), Fuerza Máxima (F_{Max}), Deformación correspondiente a la fuerza máxima (d_M), Deformación al 50% de la Fuerza máxima en la zona después de esa (d_{0.5M}). En este procedimiento Fénix se ha incorporado otro nuevo parámetro

denominado Índice de Tenacidad Plástico (ITP) indicativo como la capacidad plástica o de fluidez del ligante asfáltico.

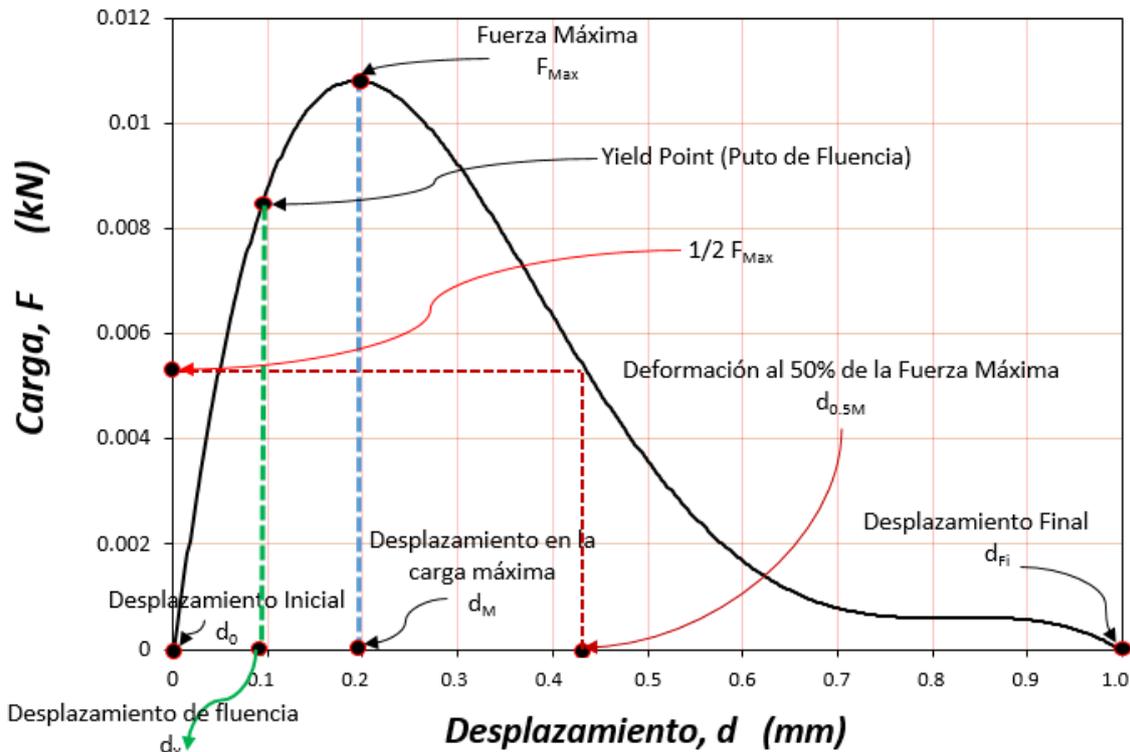


Figura 9.- Curva Carga-Desplazamiento elaborada con los datos obtenidos del método propuesto en este estudio, así como los parámetros del procedimiento FÉNIX.

Desplazamiento “d” (mm): el desplazamiento se calcula utilizando los datos del porcentaje de deformación, la deflexión angular y la distancia de separación entre los platos que es de 1.000 mm (Gap). La prueba tiene 1010 datos de porcentaje de deformación y 10,1000 ciclos, esto significa que la prueba comienza con 0.1% de deformación con 10 ciclos y termina con 100% de deformación con 10 ciclos, sumando un total de 10100 ciclos. El desplazamiento se calcula utilizando la siguiente fórmula (F-1):

$$\text{Desplazamiento} = (\text{ángulo de deflexión}) * (\text{radio del plato en mm}) = \text{mm} \quad (F-1)$$

Las unidades del desplazamiento están en milímetros porque las unidades del área bajo la curva carga-desplazamiento son Julios y la carga está dada en kilo-Newtons.

Desplazamiento Inicial “ d_0 ” (mm): El desplazamiento inicial es siempre 0.0mm.

Desplazamiento a la carga máxima “ d_M ” (mm): Este desplazamiento es el correspondiente a la fuerza máxima (F_{Max}).

Desplazamiento final “ d_F ”: El valor de este desplazamiento es 1.0 mm, que es el 100% de la deformación cuando termina la prueba siempre y cuando se utilice 1.000 mm de abertura entre platos. Cuando no se obtiene el 100% de la deformación (esto ocurre cuando la prueba se lleva a

cabo utilizando una frecuencia igual o mayor a 20Hz), el desplazamiento final se calcula utilizando la fórmula (F-1).

Carga “F” (kN): El dato de la Carga se obtiene del esfuerzo cortante aplicado en cada % de deformación multiplicado por el área del plato, esto significa que tenemos 1010 datos de esfuerzo cortante, 1010 datos de deformación y 1010 datos de carga. Las unidades de la carga están en Kilo-Newton porque las unidades del desplazamiento son milímetros y las unidades del área bajo la curva de carga-desplazamiento son Julios. La carga en kN se calcula a partir de la fórmula (F-2).

$$\text{Carga (F)} = (\text{esfuerzo cortante en Pascales}) * (\pi) * (\text{radio}^2 \text{ en metros}) / 1000 = \text{kN} \quad (\text{F-2})$$

Yield Point (Punto de Fluencia) “d_y”: Este punto ocurre cuando el Módulo de almacenamiento G' es igual al Módulo de pérdida G'' o cuando el ángulo de fase es igual a 45°[10]. El punto de fluencia indica el inicio del comportamiento plástico porque el módulo de pérdida es mayor que el módulo de almacenamiento. El punto de fluencia es expresado en milímetros y en cuanto menor sea este el ligante tendrá mayor facultad para deformarse sin romperse y sin recuperar su forma original (plasticidad).

Trabajo de fractura “W_f” (julios): El trabajo de fractura se determina como el área bajo la curva Carga vs Desplazamiento (ver figura 9).

El área bajo la curva de carga-desplazamiento se calcula utilizando una técnica de integración numérica, es decir, los 1010 datos de carga-desplazamiento se ajustan a una ecuación polinómica con un grado de 6 (fórmula F-3):

$$F = Ad^6 + Bd^5 + Cd^4 - Dd^3 + Ed^2 + Fd + G \quad (A,B,C,D, F \text{ y } G \text{ son constantes}) \quad (\text{F-3})$$

El área bajo la curva es la integral de la ecuación polinomial (F-3) entre los límites de la deformación inicial y la deformación final (generalmente estos valores son 0.0 y 1.0):

$$Wf = \int_{d_0}^{d_f} F(d)d(d) = \text{Joules} \quad (\text{F-4})$$

Energía Disipada (G_D): La energía disipada “G_D” se calcula dividiendo el trabajo de fractura "W_f" que es el área bajo la curva carga-desplazamiento (ecuación F-4), entre el área del área de fractura (ecuación F-6) de acuerdo con la siguiente ecuación F-5:

$$GD = \frac{Wf \times 10^6}{(\text{Área de Fractura})} = \text{Joules/m}^2 \quad (\text{F-5})$$

Área de fractura (mm²): El área de fractura es el área de corte que ocurre en el porcentaje de máxima deformación y dónde el ángulo de deflexión "Φ" es el máximo (ver figura 7) al que llega la prueba. Este valor es de 2.0 mm² cuando se utilizan platos paralelos de 8 mm de diámetro y la deformación total es del 100% con una abertura entre platos de 1.000mm. El área se calcula de acuerdo con la siguiente formulación F-6:

$$\text{Área de Fractura} = (0.5 * (\text{radio del plato en mm})^2 * \Phi) = \text{mm}^2 \quad (\text{F-6})$$

Índice de Tenacidad (IT): Con el fin de valorar el comportamiento más o menos dúctil del ligante asfáltico, se ha definido un índice de tenacidad en donde se multiplica el área de la curva carga deformación en la zona post-pico por el desplazamiento realizado hasta reducir la carga al 50% de la máxima. La siguiente ecuación F-8 nos permite calcular este índice:

$$IT = \int_{dM}^{df} \frac{F(d)d(d)}{\text{Área de Fractura}} * (d0.5M - dM) = \left(\frac{\text{Joules}}{\text{m}^2}\right) * mm \quad (\text{F-8})$$

Nota: En la figura 9 se define como se determina d_i , d_M , $d_{0.5M}$

Índice de Tenacidad Plástico: Con el fin de valorar el comportamiento plástico del ligante asfáltico, se ha definido este índice y se calcula multiplicando el área de la curva desde el desplazamiento en la carga máxima hasta el desplazamiento final y esta área se multiplica por la diferencia entre las distancias $d_{0.5M}$ y d_Y conforme a la ecuación F-9:

$$ITP = \int_{dM}^{df} \frac{F(d)d(d)}{\text{Área de Fractura}} * (d0.5M - dY) = \left(\frac{\text{Joules}}{\text{m}^2}\right) * mm \quad (\text{F-9})$$

Nota: en la figura 8 se define como se determina d_i , d_M , d_Y , $d_{0.5M}$

Índice de Rigidez al corte (IRT): Este parámetro es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación entre el 25 y el 50% de la carga máxima y se calcula con la ecuación F-10:

$$IRT = 0.5 * \frac{FMax}{d50 - d0.25} \quad (\text{F-10})$$

3.3 Detalles del procedimiento en la etapa del DSR.

El aparato requerido es un reómetro dinámico de corte dinámico (DSR) que incluye un dispositivo de carga, un medio para controlar la temperatura de la muestra de prueba, dos platos paralelos de 8 mm de diámetro y componentes electrónicos para controlar el dispositivo de carga y para la adquisición de datos.

El procedimiento de prueba en el DSR es el siguiente:

- 1) Calentar el ligante asfáltico hasta que esté líquido utilizando la menor temperatura y tiempo posible y evitando que este en contacto con oxígeno, después mezclar para obtener una muestra homogénea, verter en el molde de silicón y esperar a temperatura ambiente hasta que se enfríe la muestra (tiempo máximo de permanencia en el molde 2 horas).
- 2) Calentar los platos paralelos de 8 mm hasta 70°C.
- 3) Transferir la muestra del ligante del molde de silicón al plato de 8 mm (no tocar con las manos).
- 4) Bajar el plato superior hasta 2000 mm de abertura entre platos (gap) y esperar 10 minutos.
- 5) Disminuir la temperatura hasta 25°C y esperar 3 minutos.
- 6) Bajar el plato superior hasta 1050 mm de abertura y recortar la muestra (trimming).

- 7) Bajar el plato superior hasta 1000 mm de abertura.
- 8) Seleccionar la frecuencia de prueba.
- 9) Seleccionar la temperatura de prueba y esperar 10 minutos.
- 10) Correr la prueba con un movimiento oscilatorio del plato superior en modo de control de deformación. El esquema de carga consta de intervalos lineales de tiempo de amplitud de deformación constante, donde cada intervalo es seguido por otro intervalo de amplitud de deformación incrementada en forma lineal de la siguiente manera: 0.1 por ciento, 1.0 por ciento, 2.0 por ciento, 3.0 hasta el 100 por ciento. El esfuerzo de corte máximo y la deformación de corte máxima se registran cada 10 ciclos de carga (si usamos una frecuencia de 5Hz cada 2s, si usamos una frecuencia de 10Hz cada 1 s, si usamos una frecuencia de 30Hz cada 0.333 s) junto con el Ángulo de fase (δ , grados), Módulo de corte dinámico (G^* , Pa), Torque (mN·m), Ángulo de deflexión (Φ , radianes), Módulo de almacenamiento (G' , Pa), Módulo de pérdida (G'' , Pa).
Número total de puntos: 1010
Rango de deformación (γ) = De 0.1% a 100% (el rango de deformación se aplica en forma lineal).
Número total de ciclos = 10,100
Tiempo de prueba: depende de la frecuencia utilizada en la prueba (para 1Hz 10100s, para 5Hz 2020s, para 10Hz 1010s, para 30Hz 336,67s).
Duración de un punto: depende de la frecuencia utilizada en la prueba (para 1Hz 10s, para 5Hz 2s, para 10Hz 1s, para 30Hz 0.3333s).
- 11) Fin de la prueba.

4. RESULTADOS y DISCUSIONES.

Como ya se mencionó anteriormente, este nuevo método de prueba para evaluar la resistencia potencial de fractura del ligante asfáltico propone dos procedimientos para interpretar los resultados de la curva Carga-Desplazamiento: el procedimiento ILLINOIS, que utiliza los mismos parámetros especificados en el procedimiento AASHTO TP 124-18 y el procedimiento FÉNIX que utiliza los mismos parámetros especificados en el ensayo Fénix, debido a esto los resultados de evaluación del potencial de resistencia a la fractura de los asfálticos utilizando este método propuesto los clasificaremos en dos puntos conforme al procedimiento empleado y así tenemos que el punto 4.1 se muestran los resultados de los parámetros empleando el procedimiento Illinois y en el punto 4.2 los resultados empleado el procedimiento Fénix.

4.1 Resultados y discusiones empleado el procedimiento ILLINOIS.

El procedimiento ILLINOIS propuesto en este estudio utiliza los mismos parámetros especificados en el procedimiento AASHTO TP 124-18 (Semi-Circular Bending Test "SCB") (ver fórmulas que comienzan con la letra l sección 3.2.1), y es por ello se comparan los resultados de los parámetros obtenidos con este método utilizando dos ligantes asfálticos uno grado PG 76-22 y otro grado PG 70-

28 con los resultados de los parámetros de la mezcla asfáltica elaborado con estos ligantes y utilizando el procedimiento AASHTO TP 124-18.

En la gráfica de la figura 10 podemos observar los resultados obtenidos del DSR como la carga y el desplazamiento de la muestra del ligante asfáltico grado PG 76-22 después de RTFO (línea continua de color azul) y los resultados de la ecuación polinomial grado 6 (puntos de color negro) con un excelente índice de regresión. También podemos observar el cálculo del valor de la pendiente “m” al derivar la ecuación polinomial y darle los valores del desplazamiento en la zona de la línea recta que toca el mayor número de puntos de la curva después de la carga máxima (línea recta color rojo) seleccionando el valor de “m” como el valor absoluto máximo de todos los esos puntos (renglón amarillo) ya que utilizando este valor nos dará el Índice de Flexibilidad (IF) más bajo. El trabajo de fractura (Wf) sería la integral de la ecuación polinómica utilizando los límites de 0 y 1 y la energía de fractura (Gf) sería el trabajo de fractura entre el área de fractura (generalmente este valor es 2mm² usando los platos de 8mm separados 1.000mm y logrando el 100% de deformación) y el índice de flexibilidad (IF) sería la energía de fractura entre el valor de la pendiente “m” y multiplicada por el factor Z (0.0001).

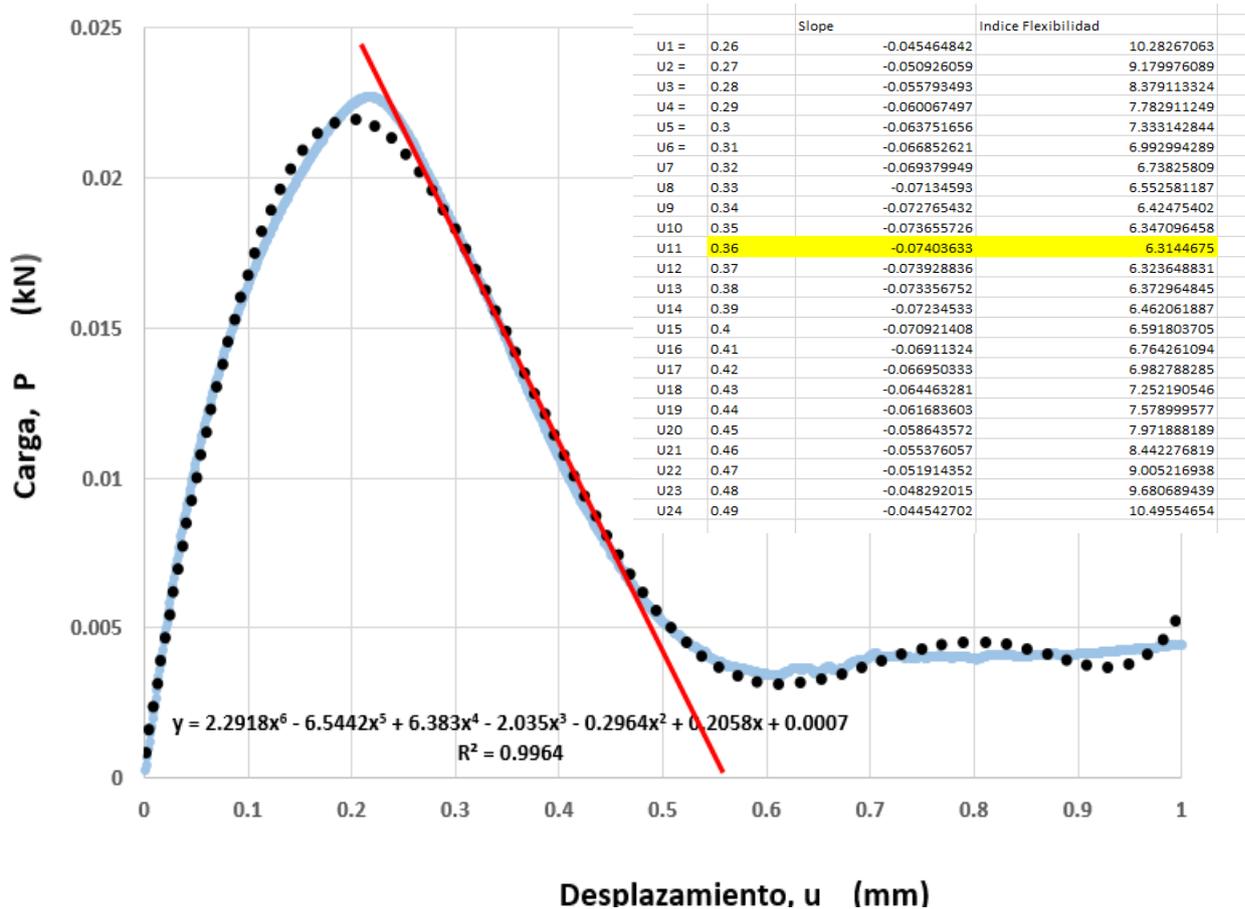


Figura 10.- Gráfica Carga-Desplazamiento del ligante asfáltico grado PG 76-22 después de RTFO

En la gráfica de la figura 11 se muestran los resultados de los ligantes asfálticos grados PG 76-22 y 70-22 ambos después de la prueba de RTFO porque se trató de igualar el grado de oxidación del ligante asfáltico contenido en las mezclas asfálticas utilizadas en el ensayo del método AASHTO TP 124-18 cuyos resultados son mostrados en la gráfica de la figura 12.

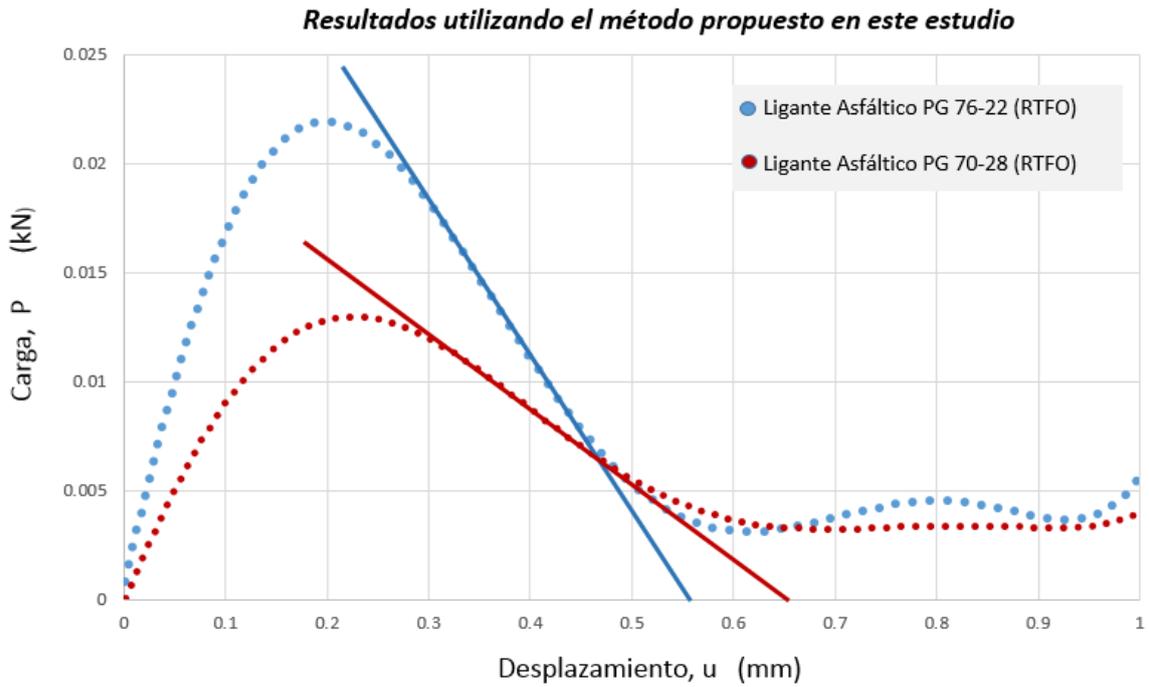


Figura 11.- Gráfica Carga-Desplazamiento de los ligantes asfálticos PG 76-22 y PG 70-28 después de RTFO utilizando el método y el procedimiento ILLINOIS propuestos en este estudio.

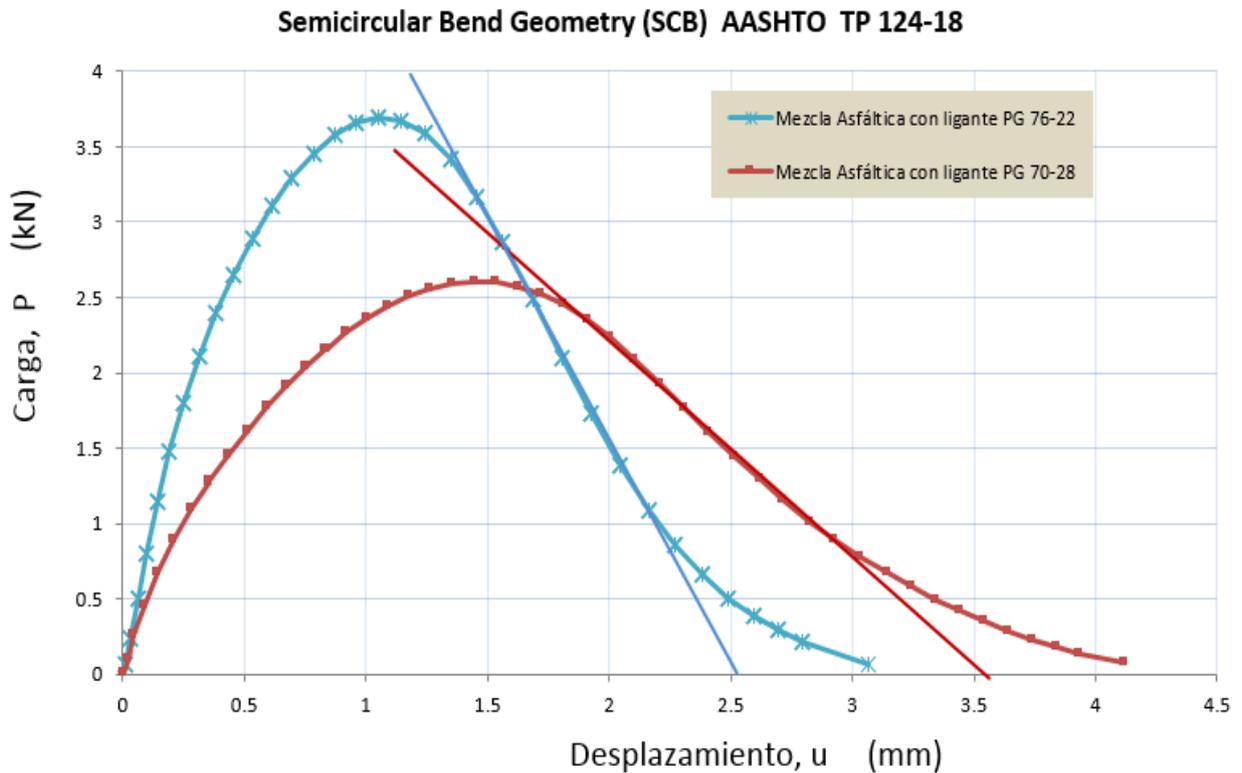


Figura 12.- Gráfica Carga-Desplazamiento de las mezclas asfálticas fabricadas con los ligantes asfálticos PG 76-22 y PG 70-28 utilizando el método AASHTO TP 124-18 (Semi-Circular Bending Test "SCB").

Al comparar las gráficas de las figuras 11 y 12 nos damos cuenta de que las curvas Carga-Desplazamiento siguen un mismo patrón de conducta, es decir, tanto el ligante asfáltico grado PG 76-22 como su mezcla asfáltica presentaron mayor área bajo la curva, mayor Carga, menor desplazamiento a la carga máxima y menor pendiente, pero para poder establecer un patrón más compartivo se elaboró la tabla 1 donde se manifiestan todos los parámetros de este nuevo método propuesto utilizando el procedimiento ILLINOIS y se comparan con los parámetros del método de mezcla AASHTO TP124-18.

	Parámetros utilizando este nuevo método de prueba con el procedimiento ILLINOIS (Ligante asfáltico)		Parámetros utilizando el método de prueba de mezclas asfálticas AASHTO TP 124-18	
	76-22	70-28	76-22	70-28
Grado PG del ligante utilizado	76-22	70-28	76-22	70-28
Grado de oxidación del ligante asfáltico en la prueba	Después de RTFO	Después de RTFO	No es conocido. La mezcla se dejó envejecer en el horno por 2 horas a 150°C	No es conocido. La mezcla se dejó envejecer en el horno por 2 horas a 150°C
Temperatura de Prueba (°C)	25	25	25	25
Frecuencia (Hz)	10	10	Referida como: 50mm/min	Referida como: 50mm/min
Desplazamiento a la carga máxima "u _{máx} " (mm)	0.200	0.230	1.05	1.44
Relación u _{máx}	$(0.200 / 0.230) = 0.87$		$(1.05/1.44) = 0.73$	
Carga Máxima, P _{máx} (kN)	0.023	0.013	3.7	2.6
Relación Carga Máxima P _{máx}	$(0.023 / 0.013) = 1.77$		$(3.7/2.6) = 1.42$	
Trabajo de Fractura "Wf" (Joules)	0.00935	0.00645	6.0315	5.9366
Relación Wf	$(0.00935 / 0.00645) = 1.45$		$(6.0315/5.9366) = 1.02$	
Área de Fractura (mm ²)	2	2	2998.8	3083.39
Energía de Fractura Gf (Joules/m ²)	4675	3225	2011.31	1925.03
Relación Gf	$(4675 / 3225) = 1.45$		$(2011.31/1925.03) = 1.05$	
Índice de Flexibilidad (IF)	6.31	9.06	6.27	12.42
Relación IF	$(6.31 / 9.06) = 0.70$		$(6.27/12.42) = 0.51$	
Pendiente (m)	-0.0740363	-0.035593725	-3.21	-1.55
Relación (m)	$(-0.0740363 / -0.035593725) = 2.08$		$(-3.21/-1.55) = 2.07$	

Tabla 1.- Parámetros de este nuevo método propuesto utilizando el procedimiento ILLINOIS y parámetros utilizando el método de mezcla AASHTO TP 124-18.

Los resultados de la tabla 1 manifiestan que el comportamiento del potencial de fractura es debido principalmente al ligante asfáltico ya que al comparar la relación de cada parámetro utilizando el nuevo método con el método de mezcla AASHTO TP 124-18 estas son similares ya que siguen la misma proporción, ya que:

- La relación de cada parámetro de los ligantes y de la mezcla es siempre igual, es decir, cuando la relación de un parámetro específico de los ligantes es menor a uno, también lo es para la mezcla o cuando la relación de un parámetro específico de los ligantes es mayor a uno, también lo es para la mezcla y esta relación no es exactamente igual dado que los ligantes de las mezclas (la mezcla se mantuvo en el horno por 2 horas a 150°C) no tienen el mismo grado de oxidación que los ligantes (condición RTFO).
- La relación del desplazamiento cuando se aplica la carga máxima es de 0.87 para los ligantes asfálticos y de 0.73 para la mezcla asfáltica, estos valores son muy similares y menor a uno porque esta deformación a la carga máxima ocurre a mayor deformación para el ligante PG 70-28 que para el ligante PG 76-22 indicativo de que es más dúctil.
- La relación de la carga máxima es de 1.77 para los ligantes asfálticos y de 1.42 para la mezcla asfáltica, estos valores son muy similares y mayor a uno porque el ligante PG 76-22 es más rígido (es necesario utilizar más fuerza para deformarlo) que el ligante PG 70-28, estos valores podrían ser más similares si se tuviera el mismo grado de oxidación, es decir, el grado de oxidación de los ligantes es después de la prueba de RTFO (163°C durante 85 minutos pero con inyección de aire) y el de los ligantes en la mezcla es después de dejar esta en el horno 2 horas a una temperatura de 150°C según el método AASHTO TP 124-18.
- La relación de la Energía de Fractura es de 1.45 para los ligantes asfálticos y de 1.05 para la mezcla asfáltica, estos valores son muy similares y mayor a uno porque el ligante PG 76-22 es más rígido que el ligante PG 70-28.
- La relación del Índice de Flexibilidad es de 0.70 para los ligantes asfálticos y de 0.51 para la mezcla asfáltica, estos valores son muy similares y menor a uno porque el ligante PG 70-28 presenta un mayor índice que el ligante PG 76-22 indicativo de ser un ligante más tenaz y por lo tanto su potencial de resistencia a la fractura será mayor en esta condición de grado de oxidación.
- La relación de el valor de la pendiente en la parte de la curva Carga-Desplazamiento y posterior a la carga máxima, es de 2.08 para los ligantes asfálticos y de 2.07 para la mezcla asfáltica, estos valores son muy similares y mayor a uno porque el ligante PG 70-28 presenta un menor valor de la pendiente (mayor ángulo o mayor inclinación hacia la izquierda) que el ligante PG 76-22.

Los resultados de la tabla 1 manifiestan que el ligante asfáltico PG 70-28 presenta una mayor potencial de resistencia a la fractura basados en que el índice de flexibilidad es mayor tanto como para solamente el ligante determinado con este nuevo método propuesto siguiendo el procedimiento ILLINOIS como para la mezcla (fabricada elaborada con el mismo ligante) determinado con el método AASHTO TP 124-18, pero es necesario aclarar que el ligante fue sometido a la condición de oxidación de la prueba de RTFO ((AASHTO T 240) y el ligante de la mezcla tiene otra condición de oxidación (2 horas a 150°C).

Para conocer el potencial de resistencia a la fractura de estos dos ligantes a otras condiciones de oxidación más severas, oxidamos las muestras de los ligantes asfálticos PG 76-22 y PG 70-28 utilizando la prueba PAV (AASHTO R28) y dos veces PAV y después se sometieron estas muestras al método propuesto en este estudio donde los resultados de la curva carga-desplazamiento son mostrados en las gráficas de la figuras 13 y 14 y los resultados de los parámetros de la curva Carga-Desplazamiento obtenidos utilizando el procedimiento ILLINOIS son mostrados en la tabla 2.

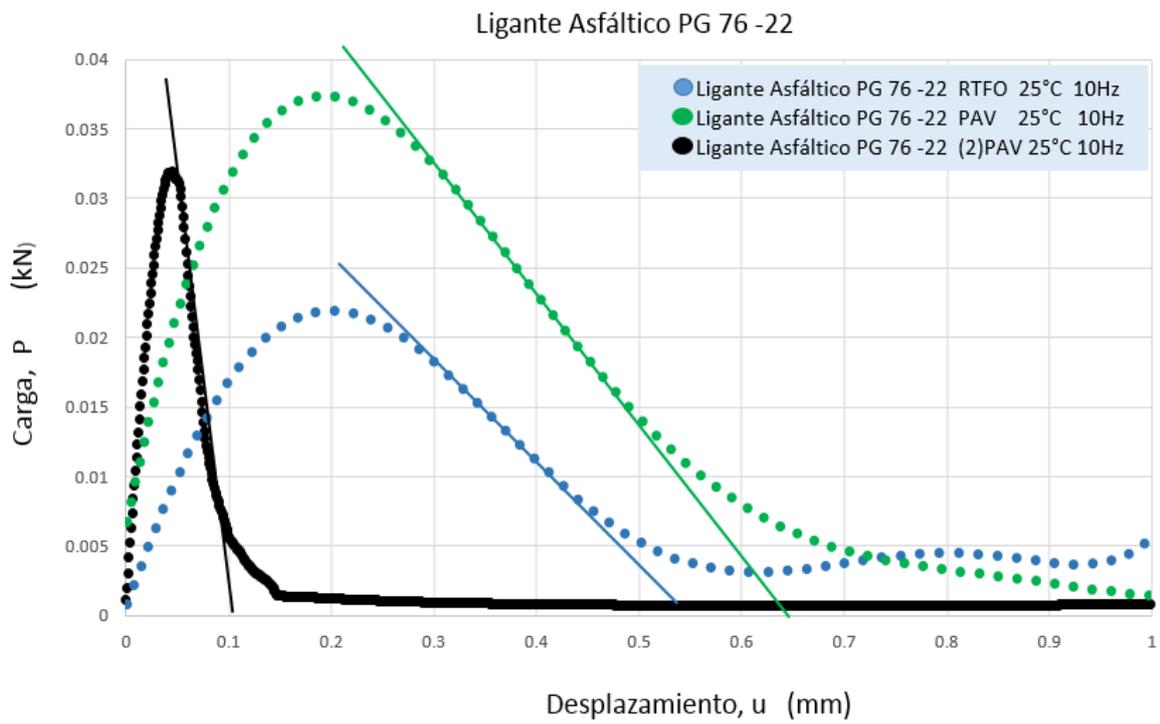


Figura 13.- Gráfica Carga-Desplazamiento del ligante asfáltico PG 76-22 después de RTFO, después de PAV y después de dos veces PAV utilizando el método propuestos en este estudio.

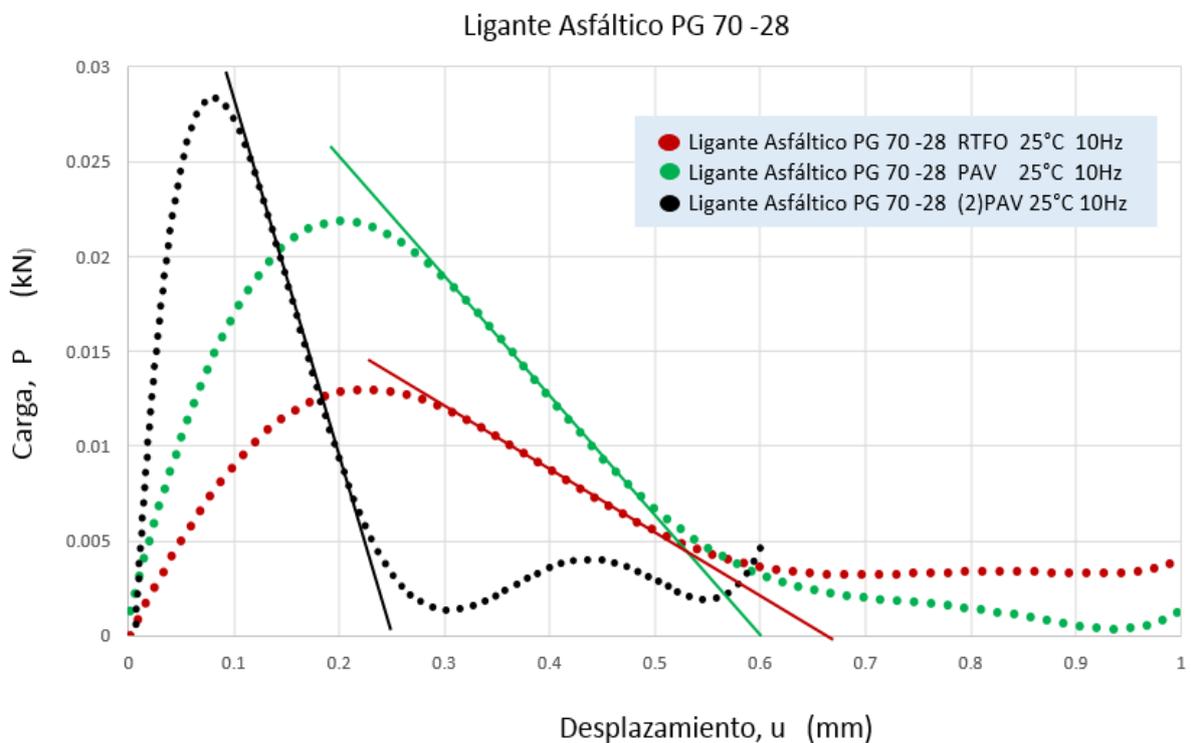


Figura 14.- Gráfica Carga-Desplazamiento del ligante asfáltico PG 70-28 después de RTFO, después de PAV y después de dos veces PAV utilizando el método propuestos en este estudio.

Condición de oxidación del ligante asfáltico	Ligante Asfáltico PG 76-22			Ligante Asfáltico PG 70-28		
	RTFO	P A V	Dos veces PAV	RTFO	P A V	Dos veces PAV
Desplazamiento en la carga máxima "u _{máx} " (mm)	0.200	0.190	0.050	0.230	0.210	0.110
Carga Máxima P _{máx} (KN)	0.023	0.0375	0.0320	0.013	0.022	0.030
Trabajo de Fractura "Wf" (Joules)	0.0135636	0.016478	0.00223	0.00645	0.00873	0.00413
Energía de Fractura, Gf (Joules/m ²)	4675	8239	2072	3225	4365	7499
Índice de Flexibilidad, IF	6.31	8.51	0.21	9.06	6.56	2.01
Pendiente (m)	-0.074036	-0.096785	-1.006854	-0.035594	-0.066569	-0.374674
Ángulo de la pendiente (°)	175.76	174.49	134.82	177.96	176.19	159.46
Yield Point (Punto de Fluidez) (mm)	0.000	0.0576	0.0773	0.000	0.0131	0.0656
Nota: todos los resultados fueron obtenidos utilizando una temperatura de 25°C y una frecuencia de 10Hz						

Tabla 2.-Resultados de los parámetros de control utilizando el procedimiento ILLINOIS de los ligantes PG 76-22 y PG 70-28 después de RTFO, PAV y dos veces PAV.

Los resultados de la tabla 2 y de las figuras 13 y 14, manifiestan que el comportamiento del potencial de fractura de cada ligante asfáltico depende de su grado de oxidación ya que el ligante PG 70-28 en comparación con el ligante PG 76-22 presenta un potencial de resistencia a la fractura mayor después de RTFO, menor después de PAV y mayor después de dos veces PAV.

Utilizando los resultados de la tabla 2 y de las figuras 13 y 14 podemos discutir los siguiente:

- El *Desplazamiento en la carga máxima* "u_{Max}" sucede a menor valor conforme se incrementa la oxidación del ligante asfáltico, esto sucedió con los dos ligantes y manifiesta una pérdida de ductilidad conforme se incrementa la oxidación del asfalto. Otra observación es que el ligante PG 70-28 manifiesta este desplazamiento de la carga máxima con menor valor respecto al ligante PG 76-22 porque es más dúctil.

- El valor de la *Carga Máxima* " P_{Max} " se incrementa conforme se incrementa el grado de oxidación del ligante asfáltico, esto sucedió con ambos ligantes aunque el ligante PG 76-22 después de dos veces PAV mostró menos valor de carga máxima respecto a después de PAV indicándonos una alta degradación.
- El valor de la *Energía de Fractura* " G_f " se incrementa conforme se incrementa el grado de oxidación del ligante asfáltico, esto sucedió con ambos ligantes aunque el ligante PG 76-22 después de dos veces PAV mostró menos valor respecto a después de PAV indicándonos una alta degradación.
- El valor del *Índice de Flexibilidad* tuvo un comportamiento diferente en cada ligante, para el ligante grado PG 70-28 fue disminuyendo conforme el aumento del grado de oxidación y para el ligante PG 76-22 aumento conforme se oxidó hasta la prueba de PAV y después de dos veces PAV el valor disminuyó drásticamente. Consideramos que este parámetro es el principal para determinar el potencial de resistencia a la fractura del ligante asfáltico lo que nos permite decir que después de RTFO (que simularía los primeros años de servicio de la mezcla asfáltica) el ligante PG 70-28 tendría un mayor potencial de resistencia porque el IF es de 9.06 y del ligante PG 76-22 es de 6.31, pero después de un tiempo de servicio más prolongado (aproximadamente entre 6 y 8 años que es lo que simula la prueba PAV) bajará su potencial de resistencia porque el IF es de 6.56 y en cambio el ligante PG 76-22 aumenta su potencial de resistencia respecto a los primeros años de servicio porque su IF aumentó de 6.31 a 8.51. Después de un prolongado tiempo de servicio (entre 12 y 16 años) el ligante PG 70-28 presentará un bajo potencial de resistencia porque el IF es de 2.01 pero el ligante PG 76-28 prácticamente estará totalmente sin potencial de resistencia a la fisura ya que su IF es de 0.21.
- El valor de la *pendiente* para todos los ligantes mostró un mismo patrón de conducta de ir aumentando negativamente, es decir, el ángulo de la pendiente es menor conforme se aumenta el grado de oxidación del asfalto (esta afirmación es la reportada por diversos investigadores que dan gran importancia al grado de inclinación de la pendiente ya que entre mayor sea el ángulo mayor será su resistencia a la fractura). Se observa que el asfalto PG 76-22 después de PAV disminuyó muy poco su ángulo de la pendiente respecto a después de RTFO (de 175.76° cambió a 174.49°), pero después de dos veces PAV el ángulo de la pendiente disminuyó drásticamente por lo que esta información nos da lugar a investigar la oxidación de ligantes asfálticos a largo plazo.
- El valor del Yield Point (Punto de Fluidez) los ligantes mostró un mismo patrón de conducta de ir aumentando, es decir, conforme se va oxidando el asfalto se pierde la capacidad de hacerse plástico (deformarse sin romperse). Es importante señalar que el Yield Point de ambos ligantes después de RTFO es de cero ya a la temperatura de prueba de 25°C el módulo de pérdida (módulo viscoso G'') es mayor que el módulo de almacenamiento (módulo elástico G') desde el inicio de la prueba.

Con el objetivo de evaluar el potencial de fractura de diversos ligantes asfálticos procedentes de diferentes países pero con el mismo grado PG de 64-22 (este grado PG es el que más se utiliza en el mundo) y el valor de la prueba de penetración a 25°C osciló entre 50 y 80 décimas de milímetro para todos ellos, utilizamos este nuevo método de prueba evaluándolos después de ser oxidados por las pruebas RTFO (AAHSTO T-240) y PAV (AAHSTO R28) y se elaborando su respectiva curva de Carga-Desplazamiento determinando los parámetros de control utilizando el procedimiento ILLINOIS.

La gráfica de la figura 15 muestra la curva Carga-Desplazamiento de todos estos ligantes aclarando que en la prueba se utilizó este método propuesto con una temperatura de 25°C y una frecuencia de 10Hz.

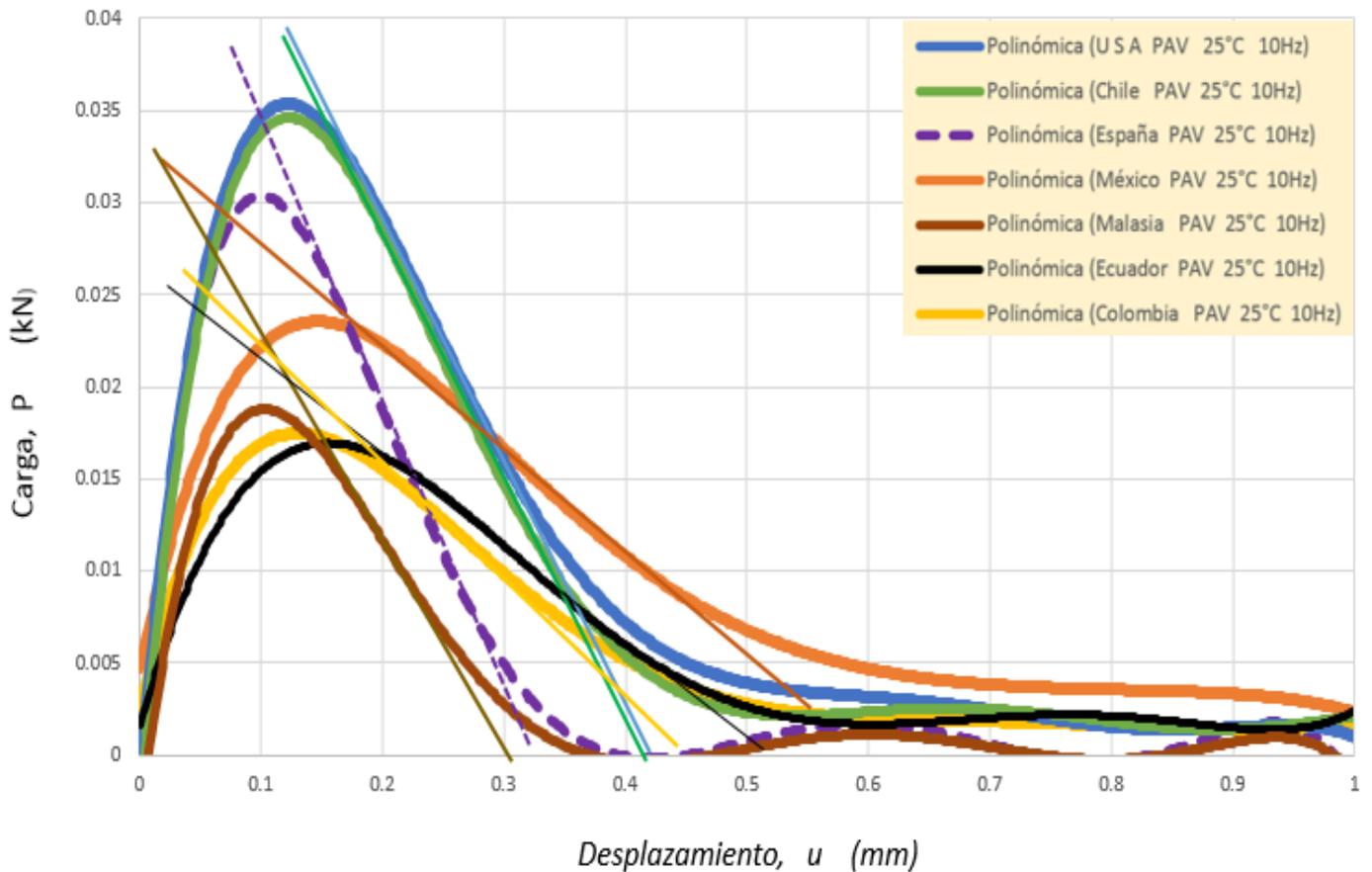


Figura 15.- Gráfica Carga-Desplazamiento de ligantes asfálticos después de PAV con el mismo grado PG de 64-22 pero procedentes de diferentes países.

En la tabla 3 se muestran los parámetros utilizando el método Illinois de la curva Carga-Desplazamiento de todos estos ligantes asfálticos grado PG 64-22 aclarando que en la prueba se utilizó este método propuesto con las condiciones físicas de una temperatura de 25°C, una frecuencia de 10Hz y el ligante asfáltico utilizado fue después de haber sido oxidado en las pruebas de RTFO y PAV.

País de procedencia del asfalto	México	España	USA	Colombia	Ecuador	Chile	Malasia
Grado PG (AASHTO M320-19)	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22
Condición de oxidación del ligante asfáltico	PAV						
Desplazamiento en la carga máxima “ $u_{máx}$ ” (mm)	0.143	0.100	0.120	0.130	0.155	0.130	0.105
Carga Máxima $P_{máx}$ (KN)	0.0235	0.0305	0.0352	0.0175	0.0165	0.0346	0.0188
Trabajo de Fractura “ W_f ” (Joules)	0.0100221	0.006407	0.013429	0.006041	0.006232	0.015648	0.003781
Energía de Fractura, G_f (Joules/m ²)	5011.05	3203.57	5314.3	3020.55	3116.19	4823.81	1890.48
Índice de Flexibilidad, IF	7.90	1.94	3.84	5.13	5.42	3.36	1.80
Pendiente (m)	-0.06341	-0.16537	-0.13811	-0.058822	-0.05754	-0.14359	-0.10533
Ángulo de la pendiente (°)	176.37	170.61	172.14	176.63	176.71	171.83	173.99
Yield Point (Punto de Fluidez) (mm)	0.0617	0.0288	0.0288	0.0466	0.0496	0.0308	0.000
Nota: todos los resultados fueron obtenidos utilizando una temperatura de 25°C y una frecuencia de 10Hz							

Tabla 3.-Resultados de los parámetros de control utilizando el procedimiento ILLINOIS de los diferentes ligantes asfálticos PG 64-22 después de PAV.

Los resultados de la tabla 3 y de la figura 15, manifiestan que cada ligante asfáltico presenta un diferente potencial de resistencia a la fractura basando fundamentalmente en el Índice de Flexibilidad “IF” a pesar de que todos ellos tienen el mismo grado PG de 64-22.

Utilizando los resultados de la tabla 3 y de la figura 15 podemos discutir los siguientes:

- El asfalto procedente de México fue el que mostró el mayor Índice de Flexibilidad y el asfalto de Malasia mostró el menor Índice de Flexibilidad por lo que después de un periodo de servicio de un pavimento que contenga estos ligantes y considerando una condición ideal de estar aplicados en el mismo lugar, el pavimento que contiene el ligante de Malasia debería de presentar mayor aparición de fisuras.
- El Asfalto de México presentó el mayor Índice de Flexibilidad porque mostró una alta cantidad de Energía de Fractura “ G_f ” dado que aunque no fue el ligante que requirió un mayor fuerza máxima si requirió que esta se presentará a una alta deformación máxima “ $u_{máx}$ ” y el ángulo

de la pendiente fue de los más altos indicando que la capacidad de resistir la formación de fractura.

- Los ligantes asfálticos de USA y Chile presentaron una resistencia a la fractura muy parecida dado que mostraron la mayor Carga Máxima " P_{Max} " y ángulos de la pendiente bajos, indicativos que son ligantes con un comportamiento más rígido.
- Los ligantes asfálticos de Malasia y España fueron los que presentaron una menor resistencia a la fractura dado que el Índice de Flexibilidad de ambos fue muy bajo pero su comportamiento de cada uno es diferente, es decir, el asfalto de España es rígido porque se deforma muy poco al aplicarle la fuerza y esto lo comprobamos porque la Fuerza Máxima ocurre a una baja deformación máxima " u_{max} " y su comportamiento después de la carga máxima presenta un ángulo de la pendiente muy bajo, de hecho fue el ligante que mostró el menor ángulo; en cambio el ligante de Malasia aunque presenta un ángulo de la pendiente mayor al de España la deformación máxima " u_{max} " es muy baja y lo más grave es que se acompaña de una Fuerza Máxima menor que el ligante de España.
- El Asfalto de México fue el que mostró su comportamiento plástico (Yield Point) a una deformación mayor indicativo de que requiere más energía para pasar a la zona plástica
- deformar más sin sufrir daños en su estructura molecular respecto a los otros ligantes y esto es complementado con una gran área bajo la curva en la zona post-pico.

4.2 Resultados y discusiones empleado el procedimiento FENIX.

El procedimiento FENIX propuesto en este estudio utiliza los mismos parámetros especificados en el procedimiento del ensayo FENIX (ver fórmulas que comienzan con la letra F sección 3.2.1), y es por ello que se comparan los resultados de los parámetros obtenidos con este método propuesto utilizando dos ligantes asfálticos, uno grado PG 76-22 y otro grado PG 70-28 con los resultados de los parámetros de la mezcla asfáltica elaborado con estos ligantes y utilizando el ensayo AASHTO TP 124-18 (Semi-Circular Bending Test "SCB") pero con los parámetros del ensayo FENIX (ver figura 9).

En la gráfica de la figura 16 podemos observar la curva Fuerza-Desplazamiento utilizando los resultados obtenidos del DSR de la muestra del ligante asfáltico grado PG 76-22 después de RTFO (línea continua de color azul tono fuerte) y los resultados de la ecuación polinomial grado 6 (puntos de color azul tono bajo) con un excelente índice de regresión. El trabajo de fractura (W_f) sería la integral de la ecuación polinómica mostrada en la figura 16 con los límites entre 0.0 y 1.0 y la energía disipada (G_D) sería el trabajo de fractura entre el área de fractura (generalmente este valor es 2mm^2 usando los platos de 8mm separados 1.000mm y logrando el 100% de deformación) y con el fin de valorar el comportamiento más o menos dúctil del ligante asfáltico, se ha definido un índice de tenacidad (IT) en donde se multiplica el área de la curva carga deformación en la zona post-pico por el desplazamiento realizado hasta reducir la carga al 50% de la máxima. La ecuación F-8 mostrada en la sección 3.2.2 nos permite calcular este índice.

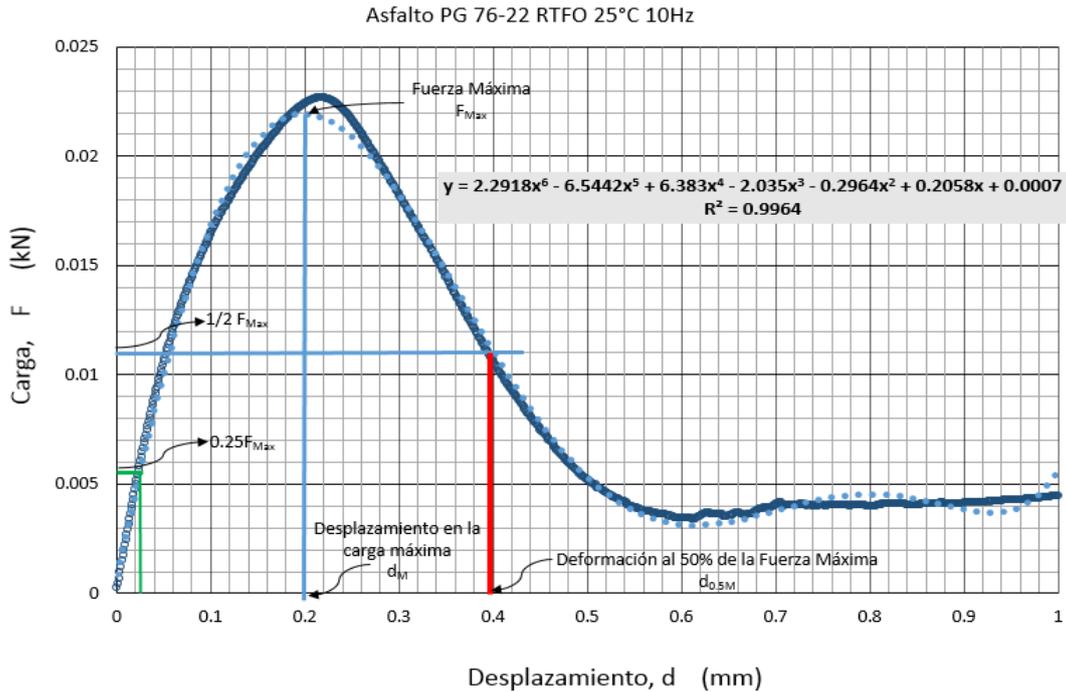


Figura 16.- Gráfica Carga-Desplazamiento del ligante asfáltico grado PG 76-22 después de RTFO utilizando los parámetros del procedimiento FENIX.

En la gráfica de la figura 17 podemos observar la curva Fuerza-Desplazamiento de la mezcla asfáltica fabricada con el ligante asfáltico PG 76-22; estos datos se obtuvieron utilizando el ensayo AASHTO TP 124-18 pero los parámetros son obtenidos utilizando el procedimiento FENIX.

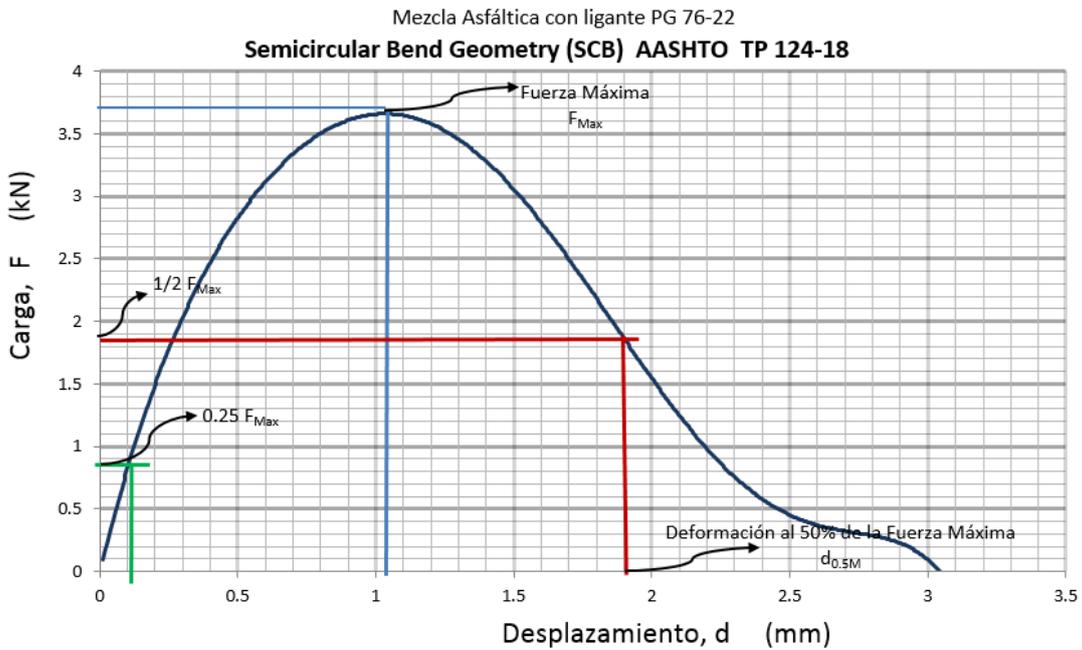


Figura 17.- Gráfica Carga-Desplazamiento de la mezcla asfáltica fabricada con el ligante asfáltico PG 76-22 utilizando el método AASHTO TP 124-18 (Semi-Circular Bending Test "SCB") y mostrando los parámetros del procedimiento Fenix.

En la gráfica de la figura 18 podemos observar la curva Fuerza-Desplazamiento utilizando los resultados obtenidos del DSR de la muestra del ligante asfáltico grado PG 70-28 después de RTFO (línea continua de color rojo) y los resultados de la ecuación polinomial grado 6 (puntos de color rojo) con un excelente índice de regresión.

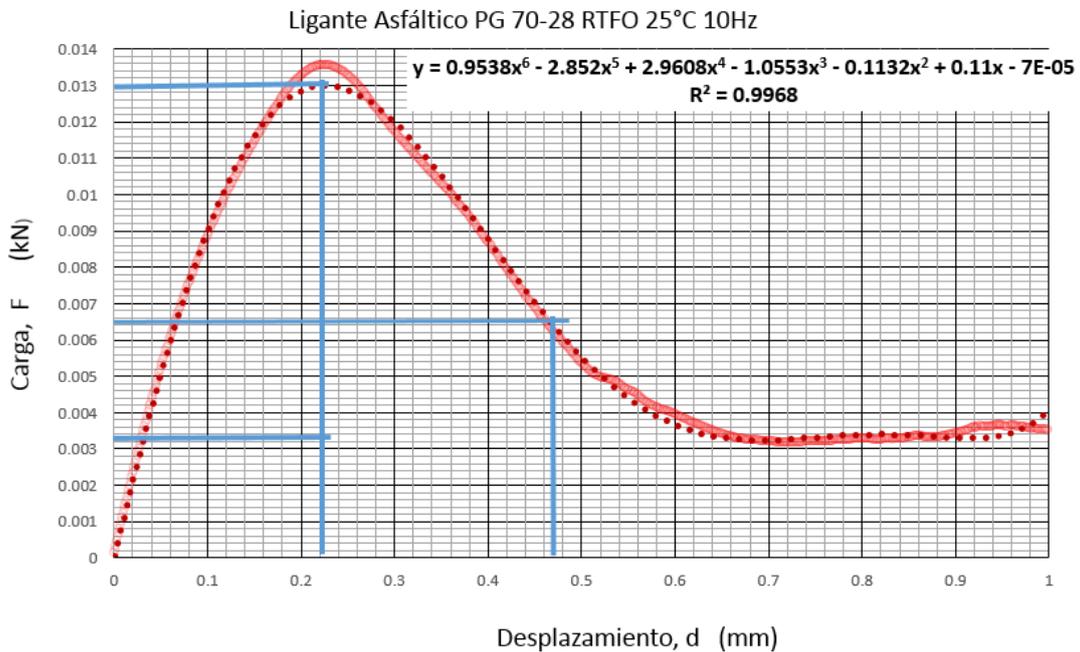


Figura 18.- Gráfica Carga-Desplazamiento del ligante asfáltico grado PG 70-28 después de RTFO utilizando los parámetros del procedimiento FENIX.

En la gráfica de la figura 19 podemos observar la curva Fuerza-Desplazamiento de la mezcla asfáltica fabricada con el ligante asfáltico PG 70-28; estos datos se obtuvieron utilizando el ensayo AASHTO TP 124-18 pero los parámetros son obtenidos utilizando el procedimiento FENIX.

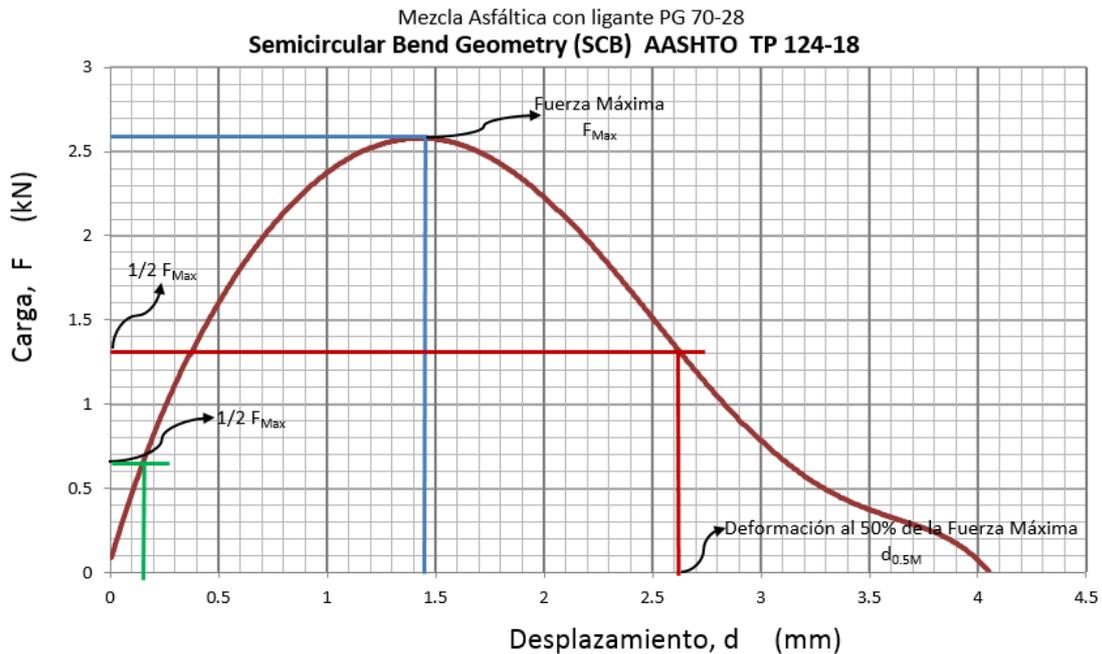


Figura 19.- Gráfica Carga-Desplazamiento de la mezcla asfáltica fabricada con el ligante asfáltico PG 70-28 utilizando el método AASHTO TP 124-18 (Semi-Circular Bending Test "SCB") y mostrando los parámetros del procedimiento Fenix

En la tabla 4 se muestran los parámetros de control empleando el procedimiento FENIX de los ligantes asfálticos PG 76-22 y PG 70-28 y de la mezcla asfáltica fabricada con estos ligantes utilizando la prueba AASHTO TP 104-18 pero con los parámetros del procedimiento Fénix.

	Parámetros utilizando este nuevo método de prueba con el procedimiento FENIX (Ligante asfáltico)		Parámetros utilizando el método de prueba de mezclas asfálticas AASHTO TP 124-18 pero con el procedimiento FENIX.	
	76-22	70-28	76-22	70-28
Grado PG del ligante utilizado	76-22	70-28	76-22	70-28
Grado de oxidación del ligante asfáltico en la prueba	Después de RTFO	Después de RTFO	No es conocido. La mezcla se dejó envejecer en el horno por 2 horas a 150°C	No es conocido. La mezcla se dejó envejecer en el horno por 2 horas a 150°C
Temperatura de Prueba (°C)	25	25	25	25
Frecuencia (Hz)	10	10	Referida como: 50mm/min	Referida como: 50mm/min
Desplazamiento a la carga máxima "dm" (mm)	0.200	0.230	1.02	1.44
Relación dm	$(0.200 / 0.230) = 0.87$		$(1.02/1.44) = 0.73$	
Desplazamiento a 0.5% de $F_{Máx}$ $d_{0.5M}$ (mm)	0.390	0.470	1.90	2.62
Relación $d_{0.5M}$	$(0.390 / 0.470) = 0.83$		$(1.90 / 2.62) = 0.73$	
Carga Máxima, $F_{Máx}$ (kN)	0.023	0.013	3.7	2.6
Relación Carga Máxima $F_{Máx}$	$(0.023 / 0.013) = 1.77$		$(3.7/2.6) = 1.42$	
Trabajo de Fractura "Wf" (Joules)	0.00935	0.00645	6.0315	5.9366
Relación Wf	$(0.00935 / 0.00645) = 1.45$		$(6.0315/5.9366) = 1.02$	
Área de Fractura (mm ²)	2	2	2998.8	3083.39
Energía Disipada G_D (Joules/m ²)	4675	3225	2011.31	01925.03
Relación G_D	$(4675 / 3225) = 1.45$		$(2011.31/1925.03) = 1.05$	
Energía Disipada en zona Post-pico G_D (Joules/m ²)	3120	2350	1141	1103
Relación G_D en zona post-pico	$(3120 / 2350) = 1.33$		$(1141 / 1103) = 1.04$	
Índice de Tenacidad IT ((Joules/m ²)*mm)	561.6	611.0	1004.0	1290.5
Relación IT	$(561.6 - 611.0) = 0.92$		$(1004.0 - 1290.5) = 0.78$	
Índice de rigidez ITR ((Joules/m ²)* mm)	0.031430	0.018056	1.0	0.5
Relación ITR	$(0.031430 / 0.018056) = 1.74$		$(1.0 / 0.5) = 2.0$	

Tabla 4.- Parámetros de los ligantes asfálticos PG 76-22 y PG 70-28 utilizando este nuevo método propuesto utilizando el procedimiento FENIX y parámetros de la mezcla asfáltica con estos ligantes utilizando el método de mezcla AASHTO TP 124-18 con los parámetros FENIX.

Los resultados de la tabla 4 y las gráficas de las figuras 18 y 19 manifiestan que el comportamiento del potencial de fractura es debido principalmente al ligante asfáltico ya que al comparar la relación de cada parámetro utilizando el nuevo método (procedimiento Fénix) con el método de mezcla AASHTO TP 124-18 (parámetros Fénix) estas son similares ya que siguen la misma proporción, ya que:

- La relación de cada parámetro de los ligantes y de la mezcla es siempre igual, es decir, cuando la relación de un parámetro específico de los ligantes es menor a uno, también lo es para la mezcla o cuando la relación de un parámetro específico de los ligantes es mayor a uno, también lo es para la mezcla y esta relación no es exactamente igual dado que los ligantes de las mezclas (la mezcla se mantuvo en el horno por 2 horas a 150°C) no tienen el mismo grado de oxidación que los ligantes (condición RTFO).
- La relación del desplazamiento cuando se aplica la carga máxima es de 0.87 para los ligantes asfálticos y de 0.73 para la mezcla asfáltica, estos valores son muy similares y menor a uno porque esta deformación a la carga máxima ocurre a mayor deformación para el ligante PG 70-28 que para el ligante PG 76-22 indicativo de que es más dúctil.
- La relación de la carga máxima es de 1.77 para los ligantes asfálticos y de 1.42 para la mezcla asfáltica, estos valores son muy similares y mayor a uno porque el ligante PG 76-22 es más rígido (es necesario utilizar más fuerza para deformarlo) que el ligante PG 70-28, estos valores podrían ser más similares si se tuviera el mismo grado de oxidación, es decir, el grado de oxidación de los ligantes es después de la prueba de RTFO (163°C durante 85 minutos pero con inyección de aire) y el de los ligantes en la mezcla es después de dejar esta en el horno 2 horas a una temperatura de 150°C según el método AASHTO TP 124-18.
- La relación de la Energía de Fractura es de 1.45 para los ligantes asfálticos y de 1.05 para la mezcla asfáltica, estos valores son muy similares y mayor a uno porque el ligante PG 76-22 es más rígido que el ligante PG 70-28.
- La relación del Índice de Tenacidad es de 0.92 para los ligantes asfálticos y de 0.78 para la mezcla asfáltica, estos valores son muy similares y menor a uno porque el ligante PG 70-28 presenta un mayor índice que el ligante PG 76-22 indicativo de ser un ligante más tenaz y por lo tanto su potencial de resistencia a la fractura será mayor en esta condición de grado de oxidación.
- La relación del índice de rigidez al corte "IRT" es de 1.74 para los ligantes asfálticos y de 2.0 para la mezcla asfáltica, estos valores son muy similares y mayor a uno porque el ligante asfáltico PG 76-22 es más rígido que el ligante PG 70-28.

Los resultados de la tabla 4 manifiestan que el ligante asfáltico PG 70-28 presenta un mayor potencial de resistencia a la fractura basados en que el índice de tenacidad "IT" es mayor tanto como para solamente el ligante determinado con este nuevo método propuesto siguiendo el procedimiento FENIX como para la mezcla (fabricada elaborada con el mismo ligante) determinado con el método AASHTO TP 124-18 (con parámetros FENIX), pero es necesario aclarar que el ligante (sin agregado) fue sometido a la condición de oxidación de la prueba de RTFO ((AASHTO T 240) y el ligante de la mezcla tiene otra condición de oxidación (2 horas a 150°C).

Para conocer el potencial de resistencia a la fractura de estos ligantes, pero con otras condiciones de oxidación más severas, oxidamos las muestras de los ligantes asfálticos PG 76-22 y PG 70-28 utilizando la prueba PAV (AASHTO R28) y dos veces PAV y después se sometieron estas muestras al método propuesto en este estudio utilizando los procedimientos FENIX donde los resultados de la curva carga-desplazamiento son mostrados en las gráficas de las figuras 20 y 21 y los resultados de los parámetros de la curva Carga-Desplazamiento obtenidos utilizando el procedimiento FENIX son mostrados en la tabla 5.

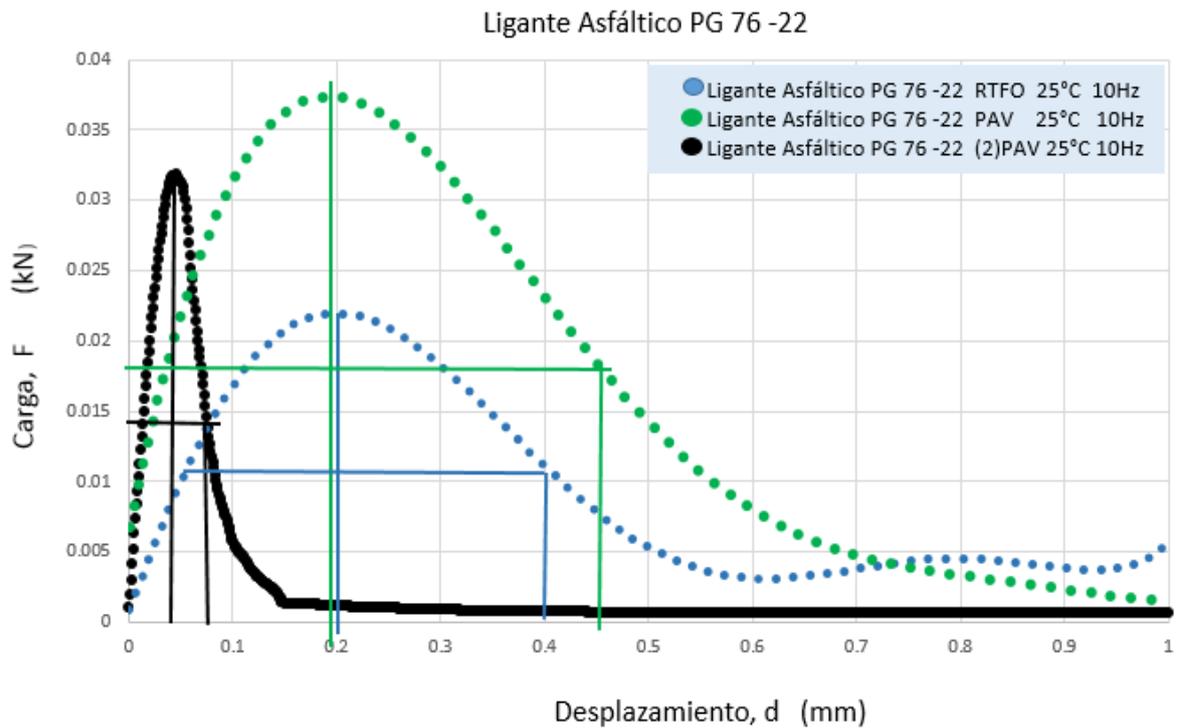


Figura 20.- Gráfica Carga-Desplazamiento del ligante asfáltico PG 76-22 después de RTFO, después de PAV y después de dos veces PAV utilizando el método propuestos en este estudio y el procedimiento FENIX.

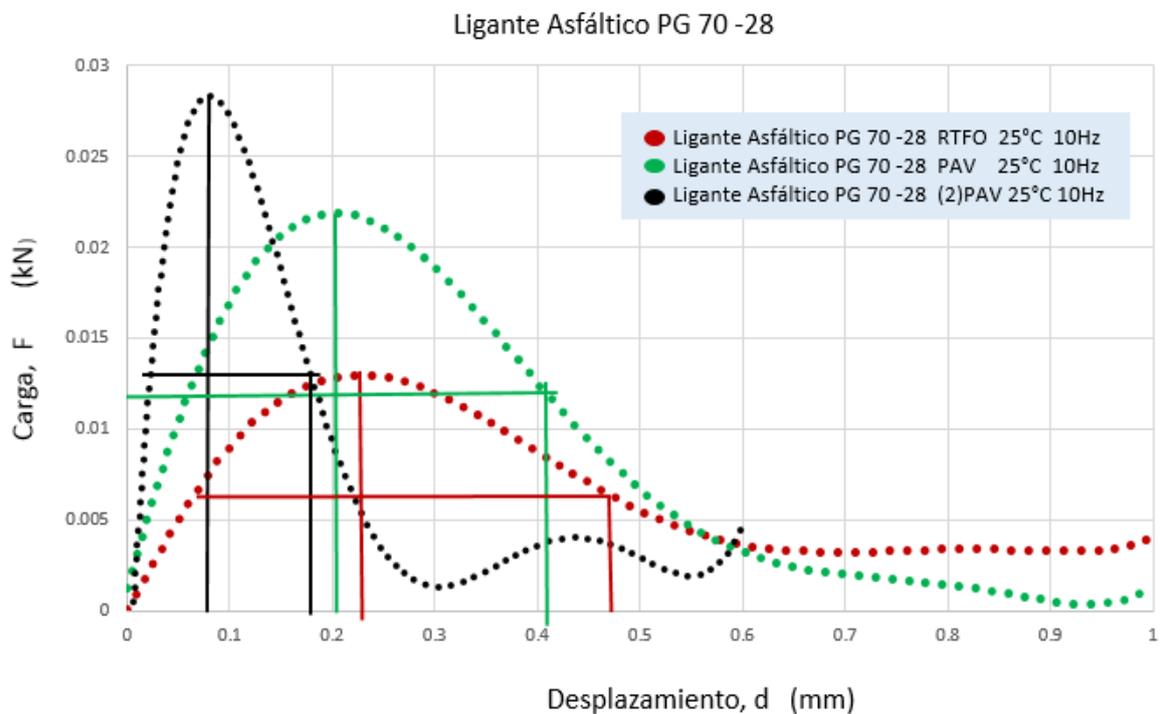


Figura 21.- Gráfica Carga-Desplazamiento del ligante asfáltico PG 70-28 después de RTFO, después de PAV y después de dos veces PAV utilizando el método propuestos en este estudio y el procedimiento FENIX.

Condición de oxidación del ligante asfáltico	Ligante Asfáltico PG 76-22			Ligante Asfáltico PG 70-28		
	RTFO	P A V	Dos veces PAV	RTFO	P A V	Dos veces PAV
Desplazamiento en la carga máxima "d _m " (mm)	0.205	0.195	0.042	0.210	0.205	0.105
Desplazamiento a 0.5% de F _{Máx} d _{0.5M} (mm)	0.390	0.44	0.075	0.470	0.425	0.166
Carga Máxima F _{Máx} (KN)	0.022	0.0375	0.032	0.013	0.022	0.03
Energía Disipada G _D (Joules/m ²)	4675	8238.5	2072.18	3225	4365	7499.8
Energía Disipada en zona Post-pico G _D (Joules/m ²)	3120	5505	1240.7	2350	2798.5	3733.8
Índice de Tenacidad, IT ((Joules/m ²)*mm)	561.6	1348.7	40.94	611.0	605.7	227.8
Índice de rigidez ITR (Joules/m ²)* mm	0.0314	0.05068	0.21622	0.01806	0.03006	0.0815
Índice de Tenacidad Plástico ITP (Joules/m ²)* mm	1216.8	2105.1	6.204	1104.5	1186.6	371.13
Yield Point (Punto de Fluidez) "dy" (mm)	0.000	0.0576	0.075	0.000	0.001	0.066
Nota: todos los resultados fueron obtenidos utilizando una temperatura de 25°C y una frecuencia de 10Hz						

Tabla 5.-Resultados de los parámetros de control utilizando el procedimiento FENIX de los ligantes PG 76-22 y PG 70-28 después de RTFO, PAV y dos veces PAV.

Los resultados de la tabla 5 y de las gráficas de las figuras 20 y 21, manifiestan que el comportamiento del potencial de fractura de cada ligante asfáltico depende de su grado de oxidación ya que el ligante PG 70-28 en comparación con el ligante PG 76-22 presenta un potencial de resistencia a la fractura basado en el mayor índice de Tenacidad después de RTFO, el menor después de PAV y el mayor después de dos veces PAV.

Utilizando los resultados de la tabla 5 y de las gráficas de las figuras 20 y 21 podemos discutir lo siguiente:

- El *Desplazamiento en la carga máxima* "d_{máx}" sucede a menor valor conforme se incrementa la oxidación del ligante asfáltico, esto sucedió con los dos ligantes y manifiesta una pérdida de ductilidad conforme se incrementa la oxidación del asfalto. Otra observación es que el ligante PG 70-28 manifiesta este desplazamiento de la carga máxima con mayor valor respecto al ligante PG 76-22 porque es más dúctil.

- El valor de la *Carga Máxima* " F_{Max} " se incrementa conforme se incrementa el grado de oxidación del ligante asfáltico, esto sucedió con ambos ligantes aunque el ligante PG 76-22 después de dos veces PAV mostró menos valor de carga máxima respecto a después de PAV indicándonos una alta degradación.
- El valor de la *Energía de Fractura* " G_f " se incrementa conforme se incrementa el grado de oxidación del ligante asfáltico, esto sucedió con ambos ligantes aunque el ligante PG 76-22 después de dos veces PAV mostró menos valor respecto a después de PAV indicándonos una alta degradación.
- El valor del *Índice de Tenacidad* " IT " tuvo un comportamiento diferente en cada ligante, para el ligante grado PG 70-28 fue disminuyendo conforme el aumento del grado de oxidación y para el ligante PG 76-22 aumento conforme se oxidó hasta la prueba de PAV y después de dos veces PAV el valor disminuyó drásticamente. Basándonos en que este parámetro es el principal para determinar el potencial de resistencia a la fractura del ligante asfáltico nos permite decir que después de RTFO (que simularía los primeros años de servicio de la mezcla asfáltica) el ligante PG 70-28 tendría un mayor potencial de resistencia porque el IT es de 611 y del ligante PG 76-22 es de 561.6, pero después de un tiempo de servicio más prolongado (aproximadamente entre 5 y 8 años que es lo que simula la prueba PAV) bajará su potencial de resistencia porque el IT es de 1348.7 y en cambio el ligante PG 76-22 aumenta su potencial de resistencia respecto a los primeros años de servicio porque su IT aumento de 561.6 a 1348.7. Después de un prolongado tiempo de servicio (entre 10 y 16 años) el ligante PG 70-28 presentará un bajo potencial de resistencia porque el IT es de 227.8 pero el ligante PG 76-28 prácticamente estará totalmente sin potencial de resistencia a la fractura ya que su IT es de 40.9.
- El valor del *Índice de Tenacidad Plástico* " ITP " tuvo un comportamiento diferente en cada ligante y mostró el mismo patrón que el índice de tenacidad.
- El valor del *Índice de Rigidez al Corte* " ITR " se incrementa conforme se incrementa el grado de oxidación del ligante asfáltico, esto sucedió con ambos ligantes, incluso el ligante PG 76-22 después de dos veces PAV mostró el mayor valor indicándonos una alta rigidización a bajas deformaciones.
- El valor del *Yield Point (Punto de Fluides)* " dy " los ligantes mostraron un mismo patrón de conducta de ir aumentando, es decir, conforme se va oxidando el asfalto se pierde la capacidad de hacerse plástico (deformarse sin romperse). Es importante señalar que el Yield Point de ambos ligantes después de RTFO es de cero ya a la temperatura de prueba de 25°C el módulo de pérdida (módulo viscoso G'') es mayor que el módulo de almacenamiento (módulo elástico G') desde el inicio de la prueba.

Con el objetivo de evaluar el potencial de fractura de diversos ligantes asfálticos procedentes de diferentes países pero con el mismo grado PG de 64-22 (este grado PG es el que más se utiliza en el mundo) y el valor de la prueba de penetración a 25°C osciló entre 50 y 80 décimas de milímetro para todos ellos, utilizamos este nuevo método de prueba evaluándolos después de ser oxidados por las pruebas RTFO (AASHTO T-240) y PAV (AASHTO R28) y se elaboró su respectiva curva de Carga-Desplazamiento determinando los parámetros de control utilizando el procedimiento FENIX.

La gráfica de la figura 22 muestra la curva Carga-Desplazamiento de todos estos ligantes aclarando que en la prueba se utilizó este método propuesto con una temperatura de 25°C y una frecuencia de 10Hz.

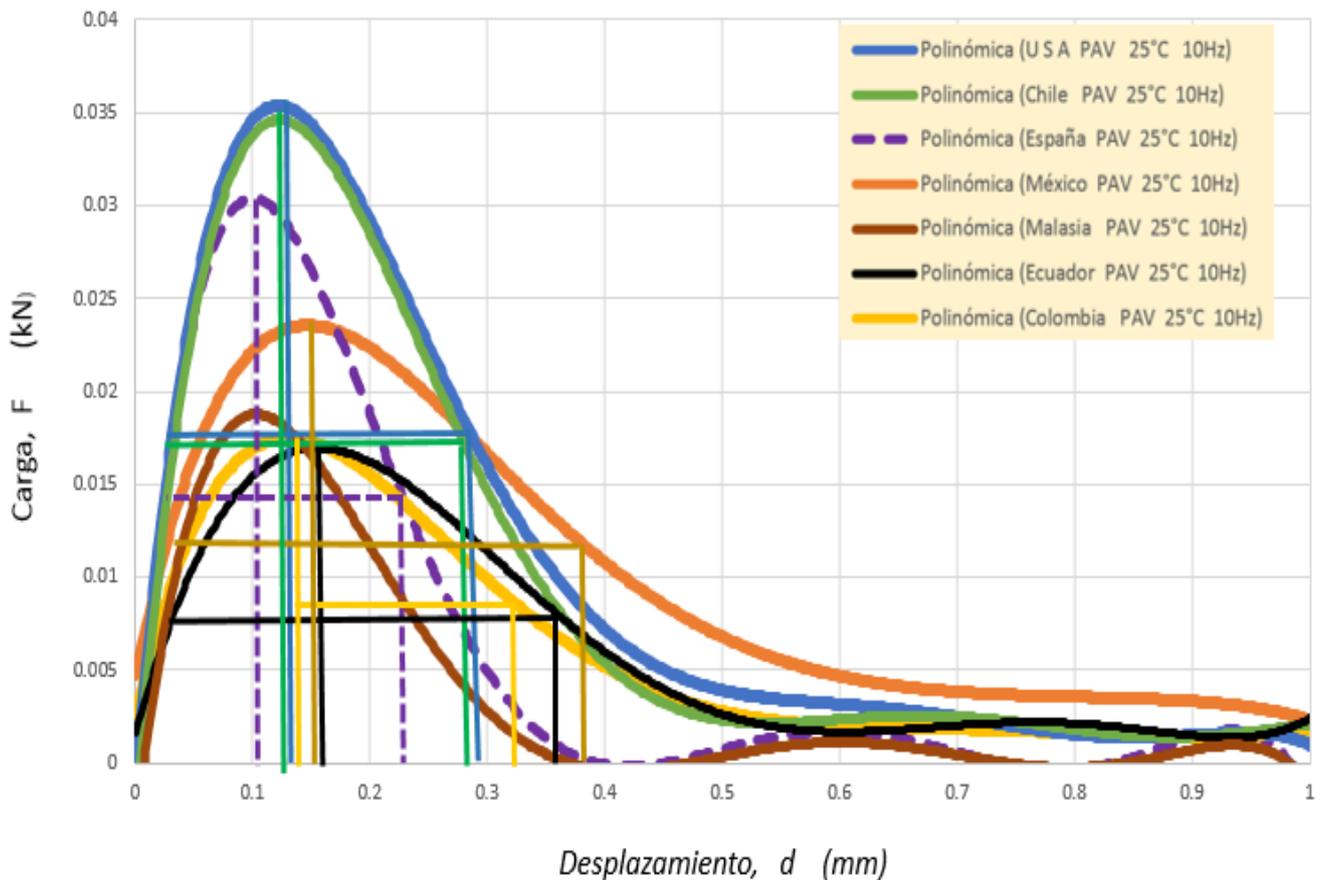


Figura 22.- Gráfica Carga-Desplazamiento de ligantes asfálticos después de PAV con el mismo grado PG de 64-22 pero procedentes de diferentes países.

En la tabla 6 se muestran los parámetros utilizando el método Illinois de la curva Carga-Desplazamiento de todos estos ligantes asfálticos grado PG 64-22 aclarando que en la prueba se utilizó este método propuesto con las condiciones físicas de una temperatura de 25°C, una frecuencia de 10Hz y el ligante asfáltico utilizado fue después de haber sido oxidado en las pruebas de RTFO y PAV.

País de procedencia del asfalto	México	España	USA	Colombia	Ecuador	Chile	Malasia
Grado PG (AASHTO M320-19)	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22
Condición de oxidación del ligante asfáltico	PAV	PAV	PAV	PAV	PAV	PAV	PAV
Desplazamiento en la carga máxima "d _m " (mm)	0.143	0.100	0.120	0.130	0.155	0.130	0.105
Desplazamiento a 0.5% de F _{Máx} d _{0.5M} (mm)	0.380	0.210	0.282	0.320	0.350	0.280	0.220
Carga Máxima F _{Máx} (KN)	0.0235	0.0305	0.0352	0.0175	0.0165	0.0346	0.0188
Energía Disipada G _D (Joules/m ²)	5011.1	3203.6	5341.3	3020.6	3116.2	4823.8	1890.5
Energía Disipada en zona Post-pico G _D (Joules/m ²)	3743.6	2174.4	3850.1	2180.8	2170.7	3256.8	1253.3
Índice de Tenacidad, IT ((Joules/m ²)*mm)	887.2	239.2	623.7	414.4	423.3	488.5	144.4
Índice de rigidez ITR (Joules/m ²)* mm	0.04417	0.08472	0.0880	0.03739	0.02989	0.07864	0.05663
Índice de Tenacidad Plástico ITP (Joules/m ²)* mm	1191.6	394.0	974.9	596.2	652.1	811.6	276.2
Yield Point (Punto de Fluidez) "d _y " (mm)	0.0617	0.0288	0.0288	0.0466	0.0496	0.0308	0.000
Nota: todos los resultados fueron obtenidos utilizando una temperatura de 25°C y una frecuencia de 10Hz							

Tabla 6.-Resultados de los parámetros de control utilizando el procedimiento FÉNIX de los diferentes ligantes asfálticos PG 64-22 después de PAV.

Los resultados de la tabla 6 y de la figura 22, manifiestan que cada ligante asfáltico presenta un diferente potencial de resistencia a la fractura basando fundamentalmente en el Índice de Tenacidad "IT" a pesar de que todos ellos tienen el mismo grado PG de 64-22.

Utilizando los resultados de la tabla 6 y de la figura 22 podemos discutir los siguiente:

- El asfalto procedente de México fue el que mostró el mayor Índice de Tenacidad y el asfalto de Malasia mostró el menor Índice de Tenacidad por lo que después de un periodo de

servicio de un pavimento que contenga estos ligantes y considerando una condición ideal de estar aplicados en el mismo lugar, el pavimento que contiene el ligante de Malasia debería de presentar mayor aparición de fisuras.

- El Asfalto de México presentó el mayor Índice de Tenacidad porque mostró una alta cantidad de Energía de Fractura “Gf” dado que fue el segundo ligante que requirió un mayor fuerza máxima y esta se presentó a una alta deformación máxima “d_m” y además fue el ligante que mostró la máxima deformación ó el máximo desplazamiento realizado hasta reducir la carga al 50% de la máxima “d_{0.5m}”.
- Los ligantes asfáltcos de USA y Chile presentaron una resistencia a la fractura muy parecida dado que mostraron la mayor Carga Máxima “P_{Max}” y mayor Energía disipada “G_D” pero su comportamiento en la zona post-pico no fue muy bueno dado que su “d_{0.5m}” fue bajo.
- Los ligantes asfáltcos de Malasia y España fueron los que presentaron una menor resistencia a la fractura dado que el el Índice de Tenacidad de ambos fue muy bajo su comportamiento es rígido porque se deforma muy poco al aplicarle la fuerza ya su d_m de ambos ligantes fue la más baja.
- El Asfalto de México fue el que mostró su comportamiento plástico (Yield Point) a una deformación mayor indicativo de que se puede deformar más sin sufrir daños en su estructura molecular respecto a los otros ligantes y esto es complementado con una gran área bajo la curva en la zona post-pico.

4.3 Resultados y discusiones comparando el procedimiento ILLINOS con el FENIX.

El método de prueba propuesto en este estudio proporciona los datos necesarios para la obtención de la curva Carga-Desplazamiento y de esta curva podemos obtener diversos parámetros que los agrupamos en dos procedimientos: el procedimiento Illinois cuyo parámetro principal es el Índice de Flexibilidad “IF” y el procedimiento Fénix cuyo parámetro principal es el Índice de Tenacidad.

En todos los datos obtenidos en este estudio se observó que a mayor Índice de Flexibilidad mayor Índice de Tenacidad y para establecer una correlación entre ambos parámetros mostrados en la tabla 7, elaboramos la gráfica de la figura 23 donde podemos apreciar que la relación lineal presenta un índice de regresión (R²) de 0.7457 indicativo de que hay cierta de relación entre ambos parámetros y en la figura 24 podemos apreciar que la relación polinomial de tercer orden presenta un índice de regresión R² de 0.9745 y nos indica que ambos parámetros son muy similares para valores muy bajos (entre 1 y 3) o muy altos (entre 6 y 9) y hay cierta imprecisión para valores intermedios (entre 3 y 6).

	México	España	USA	Colombia	Ecuador	Chile	Malasia	USA	USA
Grado PG	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	70-28	76-22
Condición de oxidación	P A V	P A V	P A V	P A V	P A V	P A V	P A V	P A V	P A V
Índice de Tenacidad IT	887.2	239.2	623.7	414.4	423.3	488.5	144.4	605.7	1348.7
Índice de Flexibilidad IF	7.90	1.94	3.84	5.13	5.42	3.36	1.80	6.56	8.51
<i>Todos los datos son obtenidos con el método propuesto en este estudio utilizando una temperatura de 25°C, una Frecuencia de 10Hz.</i>									

Tabla 7.- Índice de Flexibilidad e Índice de Teneacidad de diversos ligantes asfálticos grado PG 64-22

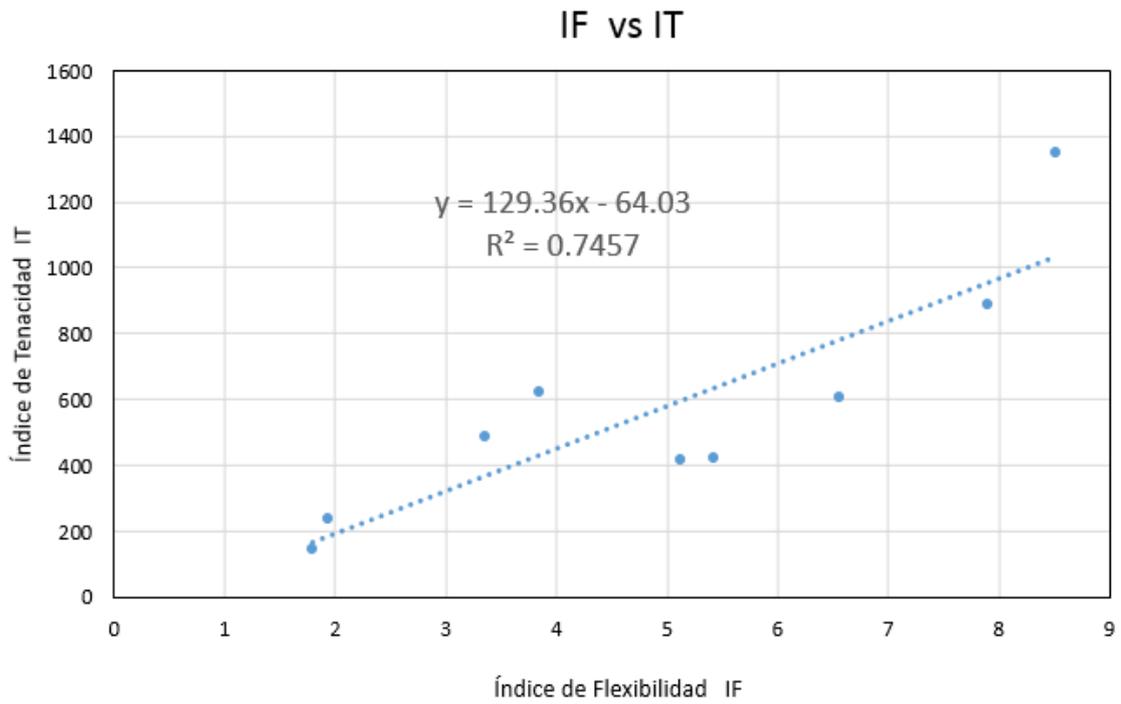


Figura 23.- Comparación lineal entre el Índice de Flexibilidad y el Índice de Tenacidad de diferentes asfaltos después de PAV.

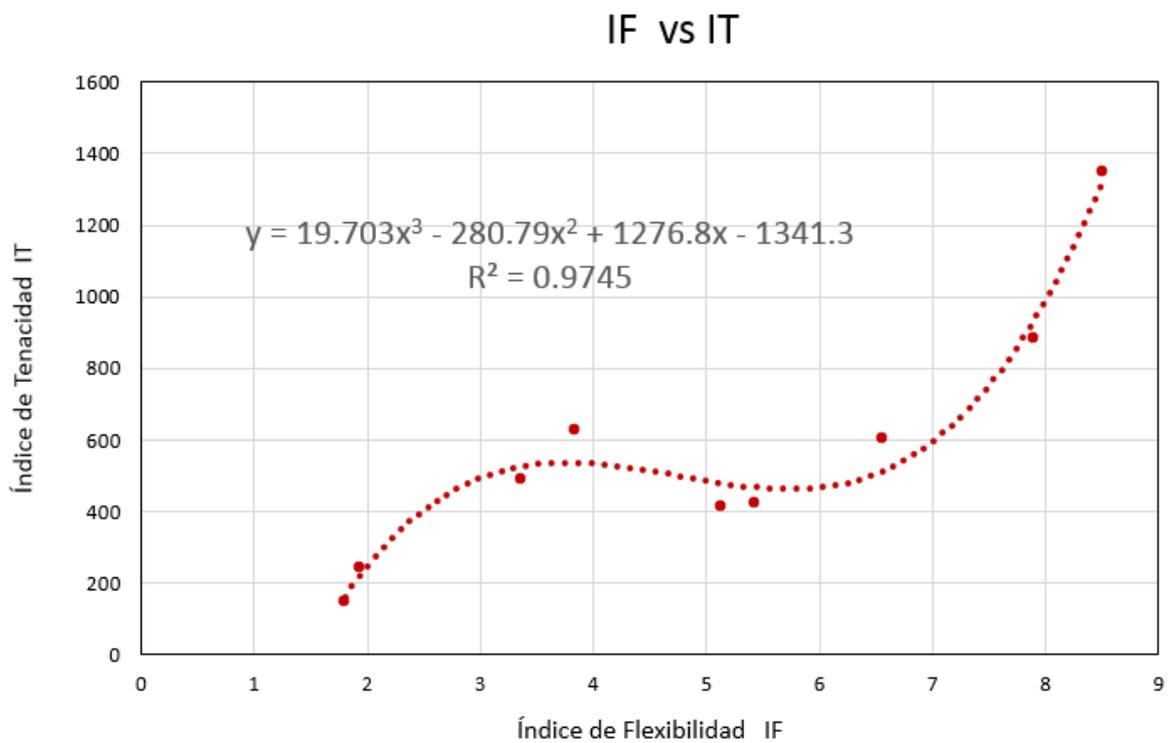


Figura 24.- Comparación polinomial entre el Índice de Flexibilidad y el Índice de Tenacidad de diferentes asfaltos después de PAV.

4.4 Resultados y discusiones al variar la temperatura.

El método de prueba propuesto en este estudio proporciona los datos necesarios para la obtención de la curva Carga-Desplazamiento a cualquier temperatura de ensayo; todos los resultados anteriores han sido obtenidos a la temperatura de 25°C dado que es la condición más utilizada en los ensayos para determinar el potencial de fractura de las mezclas asfálticas, pero utilizando este método propuesto el ensayo puede hacerse a cualquier temperatura tal como lo muestra la gráfica de la figura 25, donde observamos que el ligante asfáltico grado PG 70-22 después de PAV presenta diferentes curvas en función de la temperatura de prueba y claramente se puede observar como el ángulo de la pendiente de la curva en la zona post-pico va aumentando conforme baja la temperatura de tal forma que podemos observar que la resistencia a la fisuración disminuye conforme baja la temperatura, este mismo patrón de conducta lo muestran todos los ligantes y en este estudio solo se muestra este ejemplo donde el ligante tiene un grado PG 70-22 y es procedente del país de México.

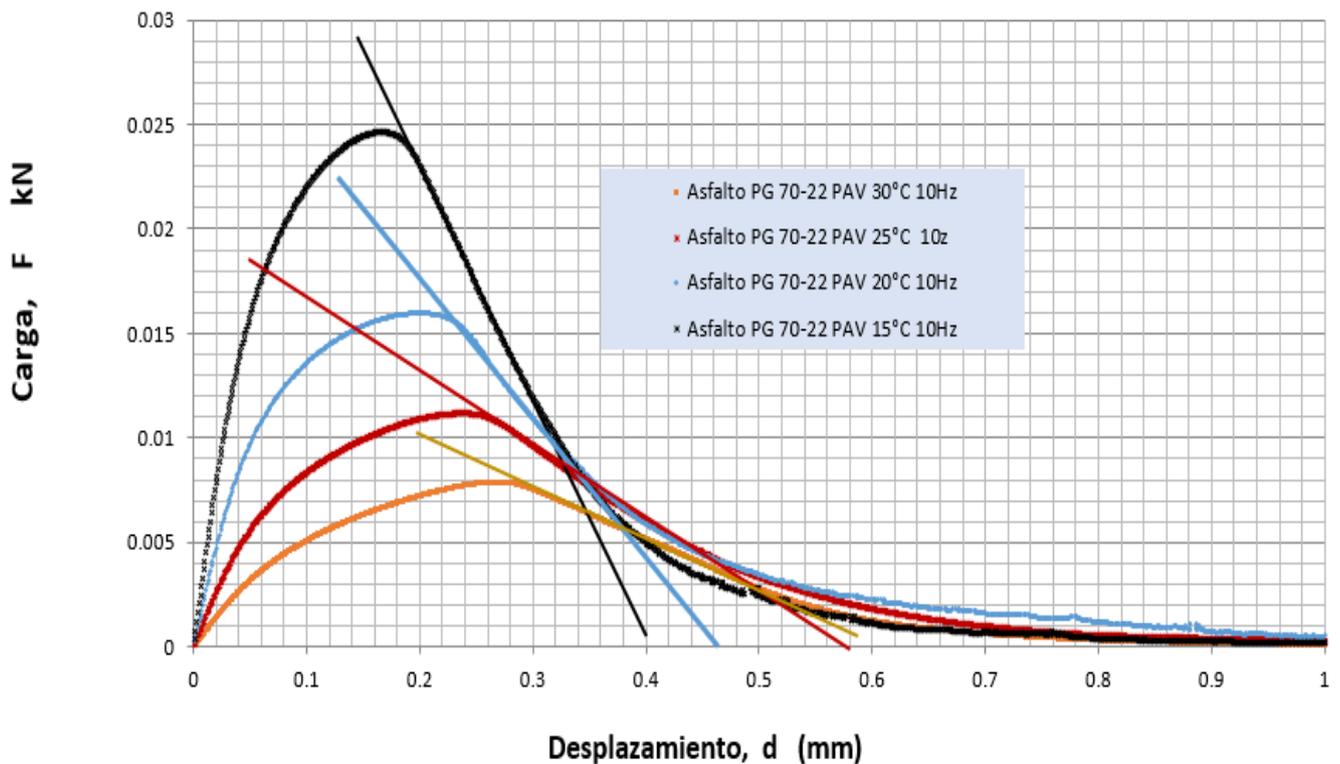


Figura 25.- Variación de la pendiente conforme cambia la temperatura para un ligante asfáltico PG 70-22 después de PAV utilizando una frecuencia de 10Hz.

Cuando la temperatura del ensayo es menor a 10°C se tienen problemas de falta de adhesión del ligante a los platos por lo que se obtienen datos erróneos, en futuras pruebas se utilizarán platos de 8mm con pequeñas ranuras trando de solucionar estos problemas o se utilizarán altas frecuencias a temperaturas entre 20° y 25°C para poder sustituir esta condición de bajas temperaturas por el principio de superposición tiempo temperatura.

En la la tabla 8 se muestran los resultados de la Energía de Fractura “Gf” y el Índice de Flexibilidad “IF” del ligante asfáltico PG 70-22 después de PAV a diferentes temperaturas (ver figura 25), a la temperatura de 15°C el ligante muestra una alta energía de fractura pero un ángulo de la pendiente bajo por lo que nos da un Índice de flexibilidad bajo, en cambio a 30°C el ligante mostró la energía de fractura más baja pero al tener un ángulo de la pendiente muy alto nos da un alto Índice de Flexibilidad pero no fue tan alto como a 25°C por lo que el patrón de conducta no es de forma lineal y esto nos indica que hay un punto máximo y por ello es muy importante determinar a que temperatura se hará el ensayo.

Temperatura de Prueba (°C)	Energía de Fractura G _f (Joules/m ²)	Índice de Flexibilidad IF
15	3535.12	3.85
20	2931.19	5.79
25	2146.79	6.45
30	1536.55	6.30

Tabla 8. Energía de Fractura e Índice de Flexibilidad del ligante PG 70-22 después de PAV con 10Hz a diferentes temperaturas.

En la la tabla 9 se muestran los resultados de la Energía Disipada “G_D” en toda la curva y en la zona post-pico así como el Índice de Tenacidad “IT” del ligante asfáltico PG 70-28 después de PAV a diferentes temperaturas (ver figura 25) y podemos observar que a la temperatura de 20°C este ligante mostró el mayor Índice de Tenacidad y a 30°C mostró el menor Índice de Tenacidad por lo que el patrón de conducta no es lineal y nos indica que hay un punto máximo y por ello es muy importante determinar a que temperatura se hará el ensayo.

Temperatura de Prueba (°C)	Energía Disipada G _D (Joules/m ²)	Energía Disipada en zona post-pico G _D (Joules/m ²)	Índice de Tenacidad IT ((Joules/m ²)*mm)
15	3535.12	2454.21	417.22
20	2931.19	2036.27	427.72
25	2146.79	1395.15	313.91
30	1536.55	918.71	200.28

Tabla 9. Energía de Fractura e Índice de Flexibilidad del ligante PG 70-22 después de PAV con 10Hz a diferentes temperaturas.

Al comparar los datos de la tabla 8 y 9, el mayor Índice de Flexibilidad fue a 25°C y el mayor Índice de Tenacidad fue a 20°C y en la gráfica de la figura 25 observamos que la curva a los 20°C (línea azul) es la que muestra un comportamiento más tenaz por lo que el Índice de Teneacidad es el mejor parámetro para detectar la teneacidad del ligante que el Índice de Flexibilidad ya que este nos indica que la curva a 25°C (línea roja) que no es la más dúctil ni la más tenaz.

4.5 Resultados y discusiones al variar la frecuencia.

El método de prueba propuesto en este estudio proporciona los datos necesarios para la obtención de la curva Carga-Desplazamiento a cualquier frecuencia de ensayo; todos los resultados anteriores han sido obtenidos a una frecuencia de 10Hz. En las gráficas de las figuras 26 y 27 podemos observar que en las frecuencias de 20 y 30Hz la muestra de los ligantes PG 76-22 y PG 70-28 después de PAV y 20°C se fractura totalmente y no pudo llegar hasta el desplazamiento de 1.0mm ó los 1010 ciclos y es por esto que no recomendamos estas frecuencias cuando se quiera calcular el Índice de Flexibilidad o el Índice de Tenacidad; estas altas frecuencias de 20 y 30 Hz podrían servir para simular la fisuración a bajas temperaturas. Por lo que respecta a utilizar frecuencias menores a 5Hz no lo recomendamos porque los tiempos de prueba son muy largos y en algunas pruebas no obtuvimos repetibilidad y por lo tanto las dos mejores frecuencias para utilizar este nuevo método de prueba con los parámetros sugeridos en este estudio son 5 y 10Hz.

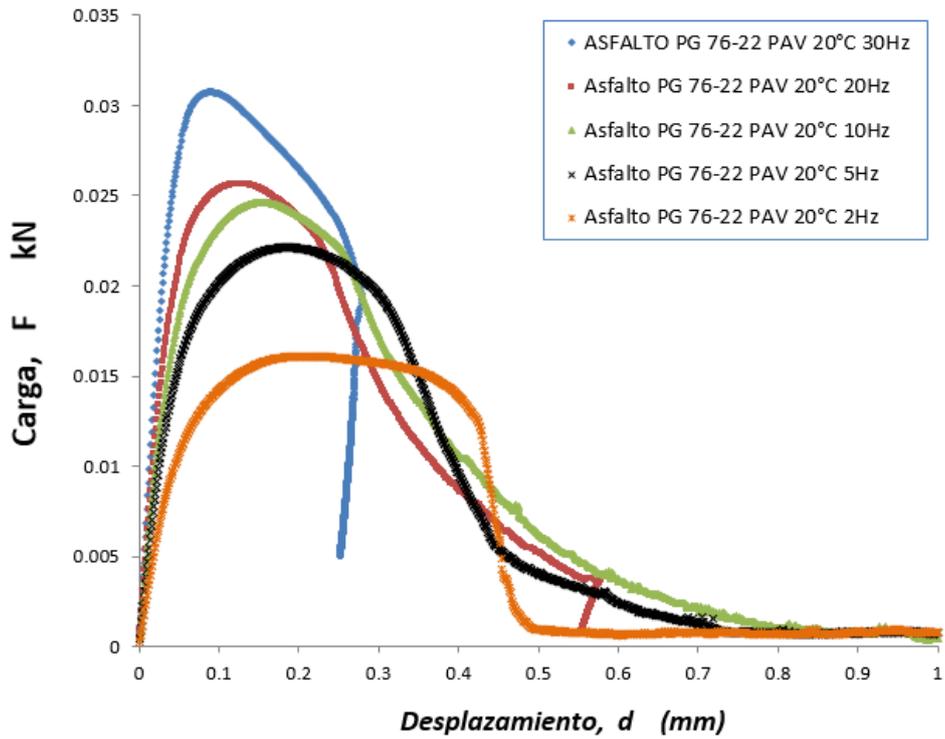


Figura 26.- Curva Carga-desplazamiento del ligante asfáltico PG 76-22 después de PAV a 20°C pero con diferentes frecuencias.

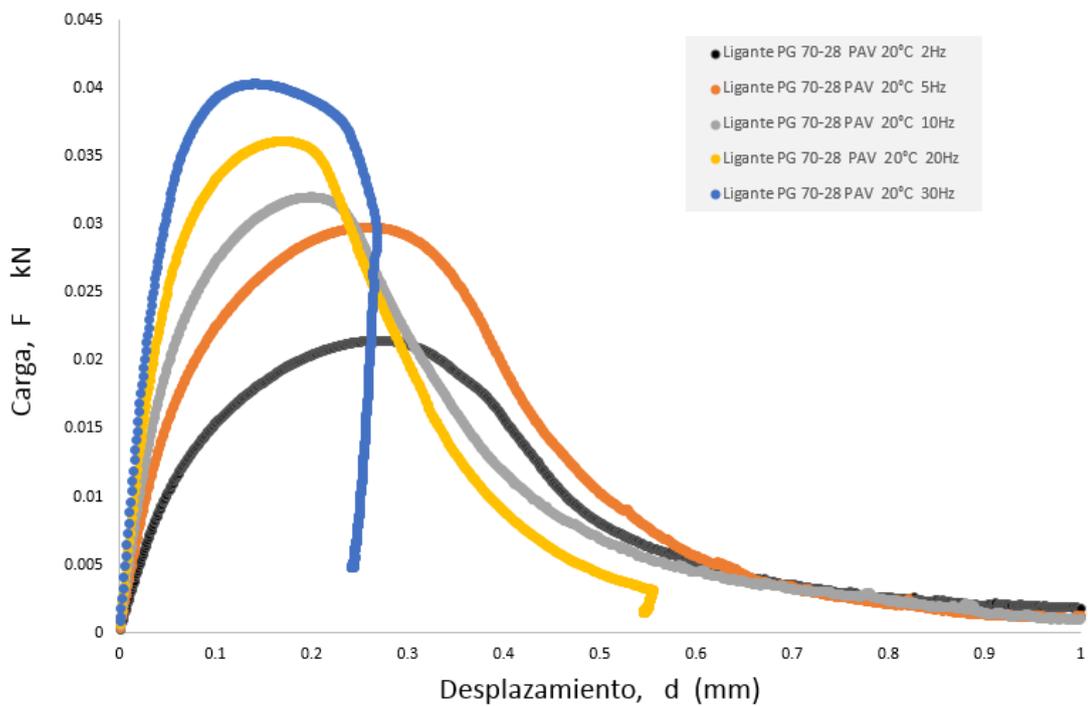


Figura 27.- Curva Carga-desplazamiento del ligante asfáltico PG 70-28 después de PAV a 20°C pero con diferentes frecuencias.

En la gráfica de la figura 28 podemos observar los resultados de diferentes curvas Carga-desplazamiento para un mismo ligante asfáltico grado PG 70-28 después de RTFO a una misma temperatura de 20°C y diferentes frecuencias y podemos observar que conforme aumentamos este ángulo de la pendiente de la curva en la zona post-pico va disminuyendo y la carga aplicada va aumentando indicándonos que a mayor frecuencia el ligante se comporta como sólido elástico y de esto dependerá que frecuencia seleccionemos para predecir el potencial de fractura de nuestro ligante y esta información nos sirve para que cuando en una prueba tengamos problemas de falta de adhesión del ligante con el plato del reómetro podamos hacer cambios en el procedimiento sugerido en este documento tal como aumentar la temperatura a 30° o 35°C y utilizar bajar frecuencia. También podemos observar en esta gráfica de la figura 27 que una vez más a bajas frecuencias (1Hz) la curva Carga-Desplazamiento no proporciona datos confiables ya que en la zona post-pico la curva no baja lo suficiente y no nos indica el comportamiento de la capacidad del ligante para controlar la fisura. También observamos que a la frecuencia de 20Hz observamos un rompimiento antes de llegar a la deformación del 100%.

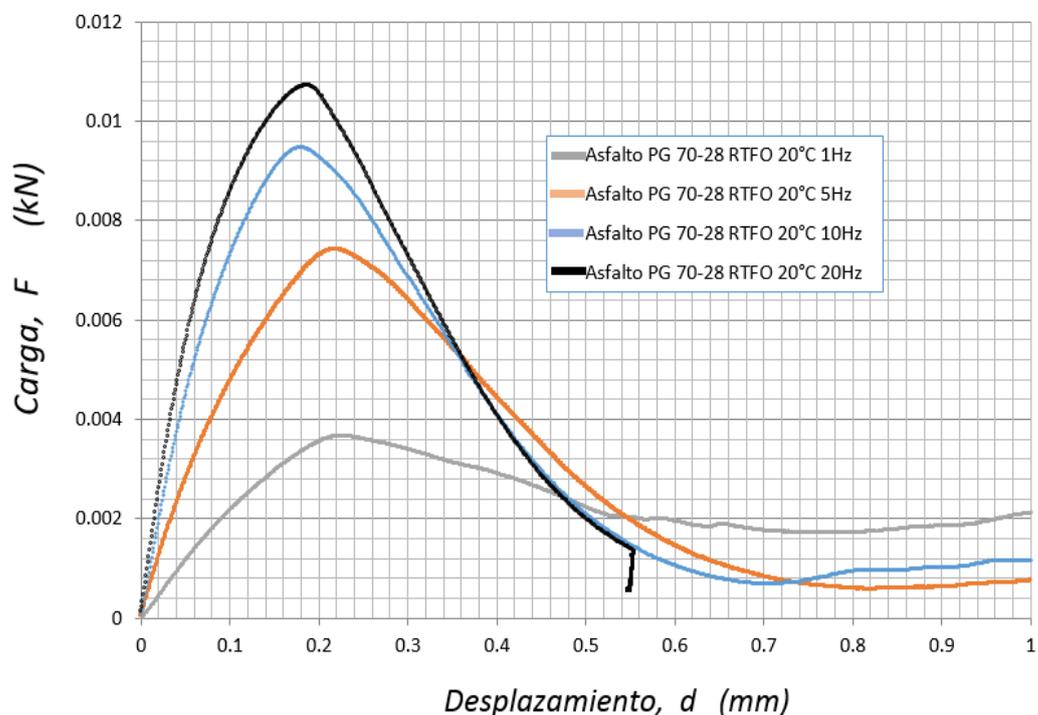


Figura 28.- Curva Carga-desplazamiento del ligante asfáltico PG 70-28 después de RTFO a 20°C pero con diferentes frecuencias.

4.6 Resultados y discusiones de la repetibilidad de este nuevo método.

Con el objetivo de evaluar la repetibilidad (precisión) de este nuevo método de prueba propuesto en este estudio, se utilizaron cuatro muestras de un ligante asfáltico grado PG 76-22 después de RTFO a 25°C y 10Hz para elaborar la curva carga-Desplazamiento calculando el Índice de Flexibilidad con el procedimiento Illinois y el Índice de tenacidad con el procedimiento Fénix de cada una de estas muestras y se determinó la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación; estos resultados son mostrados en la gráfica de la figura 29 y la tabla 10.

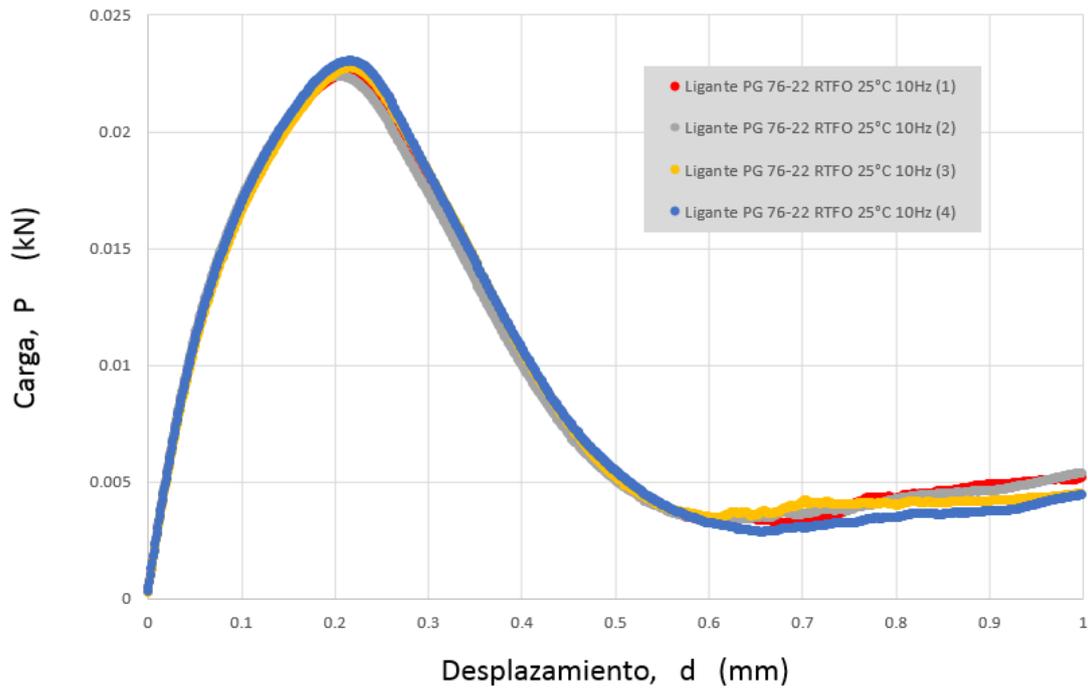


Figura 29.- Curva Carga-desplazamiento del ligante asfáltico PG 76-22 después de RTFO por cuadruplicado para estudio de precisión.

	Índice de Flexibilidad	Índice de Tenacidad (Joules/m ²)*mm
Muestra 1	6.47	639.48
Muestra 2	6.43	620.28
Muestra 3	6.29	633.64
Muestra 4	6.20	609.51
Media	6.3475	625.7275
Desviación estándar	0.125	13.4712221
Coefficiente de variación	1.969279244	2.152889573

Tabla 10. Coeficiente de variación entre cuatro muestras de un ligante asfáltico PG 76-22 después de RTFO a 25°C y 10Hz.

Como podemos observar en la figura 29 y tabla 10 el coeficiente de variación es muy bajo tanto para el Índice de Flexibilidad (procedimiento Illinois) como para el índice de tenacidad (procedimiento Fenix), es decir, la dispersión relativa de un conjunto de datos es muy baja lo que nos garantiza que el procedimiento tiene mucha precisión y por lo tanto sugerimos hacer el ensayo solamente dos veces y en caso de tener prisa con un solo ensayo nos daría confianza de tener una gran aproximación. Esta precisión solo es lograda si se sigue estrictamente el procedimiento descrito en el punto 3.3 de este documento y una de las variables más importantes fue el tiempo de reposo de la muestra de ligante después de que es colocada en el molde de silicón, en la gráfica de la figura 30 podemos observar que cuatro muestras del ligante asfáltico grado PG 76-22 que estuvieron en reposo en el molde de silicón por menos de dos horas presentaron casi la misma curva Carga-Desplazamiento, pero esa misma muestra que se dejó en reposo por 24 horas presentó un comportamiento totalmente diferente en la zona después de la carga máxima (zona postpico) indicándonos que el ligante asfáltico sufre de arreglo de sus moléculas que origina una disminución de su resistencia al potencial de fractura y entonces surge la duda de que si en el procedimiento de prueba utilizamos como parámetro de control 2 horas de reposo ó 24 horas y esta duda la resolveremos en un futuro próximo y para el

caso de 24 horas de reposo tendremos que bajar la frecuencia para observar un mejor comportamiento en la zona después de la carga máxima.

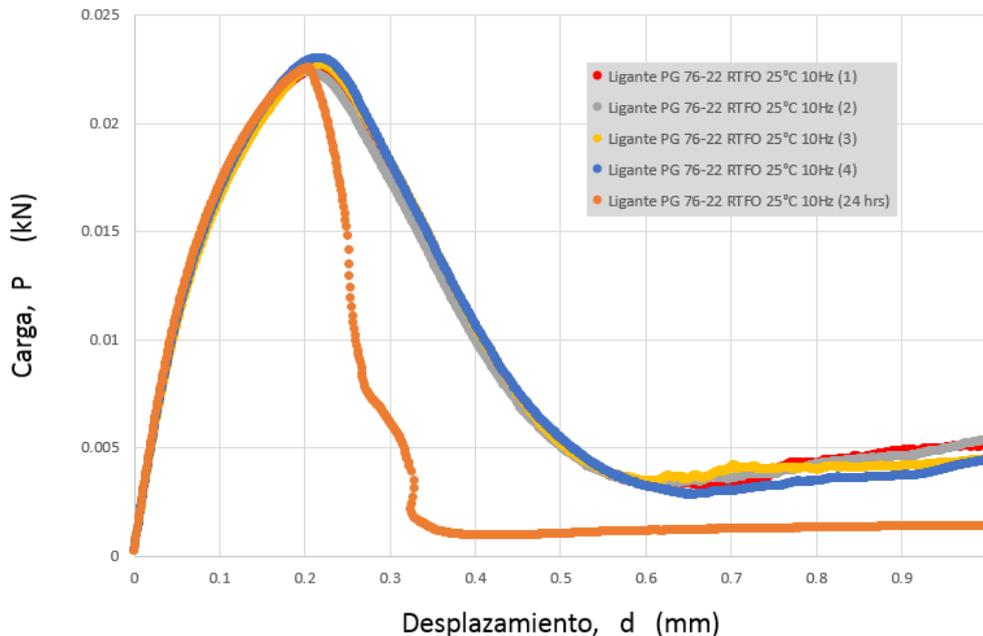


Figura 30.- Curva Carga-desplazamiento del ligante asfáltico PG 76-22 después de RTFO por cuadruplicado con un tiempo de reposo de 2 horas como máximo y una muestra de este ligante con un tiempo de reposo de 24 horas.

4.7 Ligante Asfáltico resistente a la deformación permanente y a la fisuración por fatiga.

Teniendo en cuenta que nuestro planeta requiere de una optimización del uso de la energía para reducir las altas concentraciones de Dióxido de carbono existentes en la atmósfera, debemos de construir pavimentos que proporcionen al usuario una gran seguridad y confort además de incrementar la vida útil de los mismos por medio de mejores diseños, mejores calidades de los agregados y mejores calidades de los ligantes asfálticos.

Este estudio pretende lograr una nueva forma de seleccionar el mejor ligante asfáltico resistente a la deformación permanente y resistente a la fisuración por fatiga. Para el parámetro del control de la deformación permanente utilizaremos el valor del Compliance “Jnr” obtenido conforme al método de prueba AASHTO T350 “Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer” utilizado en la especificación AASHTO M 332-19 “Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test” y para el control de la fisuración por fatiga utilizaremos el valor del Índice de Flexibilidad o el Índice de Tenacidad obtenidos conforme este nuevo método de prueba mostrado en este estudio.

La resistencia que ofrece un material a ser deformado la determinamos por medio de su Módulo, es decir, un material con un alto módulo será un material rígido ya que requiere de mucho esfuerzo para deformarse. Cuando utilizamos un esfuerzo cortante lo contrario al Módulo de corte complejo “G* (Pa)” es Compliance “J” (Pa⁻¹), es decir, es la recíproca del módulo y hablando en términos de las propiedades mecánicas de los materiales decimos que lo contrario a la rigidez sería la flexibilidad pero en este método de prueba AASHTO T350 el valor de Compliance se calcula utilizando la deformación no recuperada que indica la plasticidad del ligante y es por ello que para este ensayo el Compliance se especifica con la letra jota mayúscula y con el subíndice nr (deformación no recuperada) “Jnr” y debido a que la esencia de este premio “JUAN ANTONIO FERNÁNDEZ DEL CAMPO” es utilizar la lengua española la traducción al español de Compliance “Jnr” la traduciremos como Plasticidad.

Entre más bajo sea este valor de "Jnr" indica que tenemos menos plasticidad y ya aplicando estos conceptos al ligante asfáltico definimos que a la temperatura máxima del pavimento el ligante deberá de tener el valor más bajo posible de "Jnr" para que sea resistente a la deformación permanente (plástica). El método de prueba AASHTO T350 calcula el valor de Plasticidad (Compliance) "Jnr" del ligante asfáltico aplicando un esfuerzo en forma de creep de 100Pa y otro de 3200Pa durante un segundo para después dejarlo recuperarse por 9 segundos y en este momento se mide la deformación no recuperada y se calcula el valor de "Jnr" dividiendo el esfuerzo empleado entre esta deformación no recuperada por eso la letra J tiene como subíndice las letras nr, esta aplicación del esfuerzo y relajación se hace diez veces por cada diferente esfuerzo aplicado y se saca el promedio del valor de Jnr a la temperatura de prueba que será la temperatura máxima del pavimento.

Un ligante asfáltico resistente a la deformación permanente deberá de tener un valor de Plasticidad "Jnr" a 3.2KPa lo más bajo posible (menor a 0.5 KPa⁻¹) y un alto Índice de Flexibilidad (mayor a 7) y en la gráfica de la figura 31 podemos observar estos valores de control y hasta el momento no hemos encontrado un ligante con un alto desempeño (índice de flexibilidad mayor a 10 y Jnr menor 0.5KPa⁻¹), este ligante ideal sería un ligante flexible (dúctil) a la temperatura intermedia y rígido a alta temperatura. En la determinación del Índice de Flexibilidad recomendamos que el ligante sea después de ser oxidado en RTFO y PAV y el ensayo debe de hacerse a la temperatura promedio del pavimento que en muchas ocasiones es de 25°C. Para la determinación del valor Jnr recomendamos que el ligante sea después de ser oxidado en RTFO (inicio del ciclo de vida del pavimento) y el ensayo debe de hacerse a la temperatura máxima del pavimento que en la mayoría de los casos es de 64°C.

La gráfica de la figura 31 sería la nueva propuesta de este estudio para el grado de selección de un ligante asfáltico de alto desempeño que se basa en un ligante resistente a la fisuración por fatiga con un Índice de Flexibilidad entre 10 y 14 pero también resistente a la deformación permanente (plástica) con un valor de Plasticidad "Jnr" a 3.2KPa entre 0 y 0.5KPa⁻¹.

	México	España	USA	Colombia	Ecuador	Chile	Malasia	USA	USA
	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	70-28	76-22
Jnr a 64°C KPa ⁻¹ RTFO	2.7	1.9852	2.1695	2.1599	1.9865	2.2607	2.9249	0.3735	0.0704
IF 25°C PAV	7.9	1.94	3.84	5.13	5.42	3.36	1.8	6.56	8.51

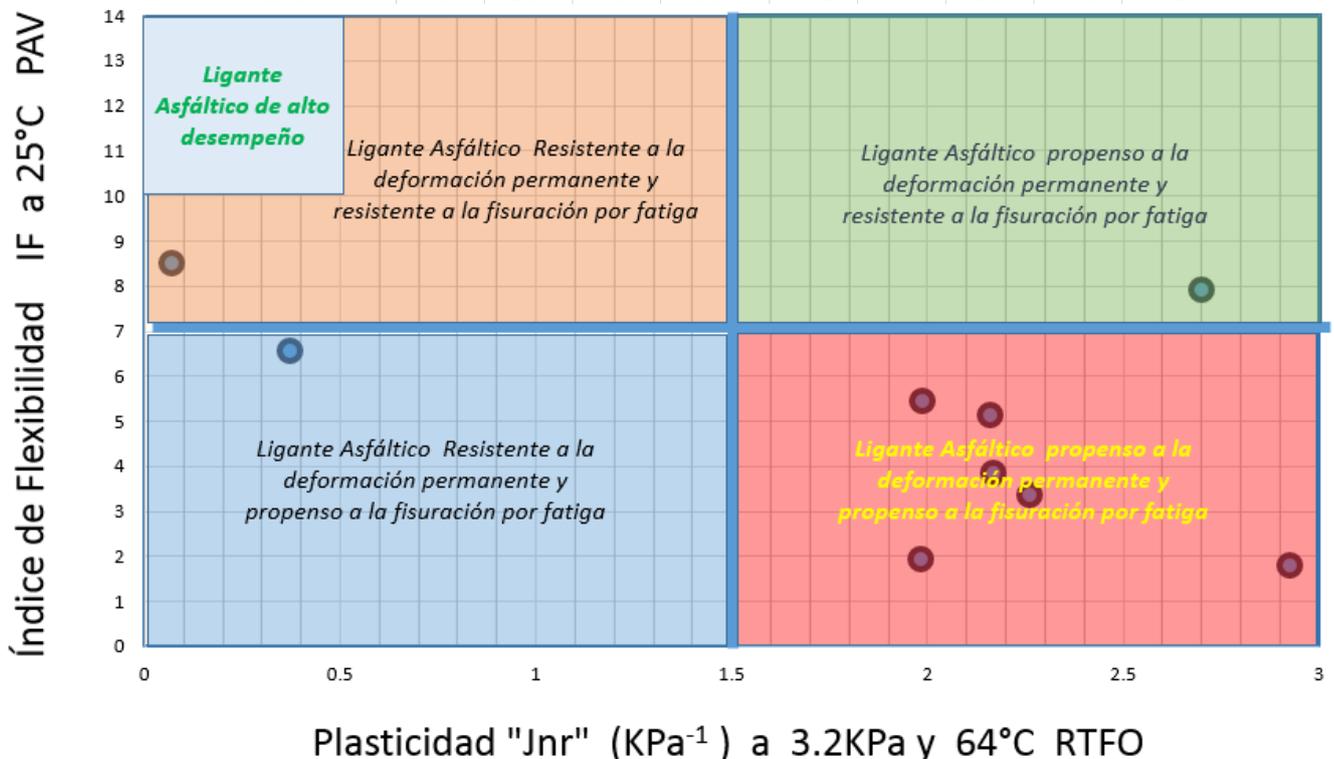


Figura 31.- Gráfica para la selección de un ligante asfáltico resistente a la fisuración por fatiga (alto Índice de Flexibilidad) y resistente a la deformación permanente (bajo valor de Plasticidad Jnr a 3.2KPa).

Un ligante asfáltico resistente a la deformación permanente deberá de tener un valor de Plasticidad "Jnr" a 3200Pa lo más bajo posible (menor a 0.5 KPa⁻¹) y un alto Índice de Tenacidad (mayor a 800 (Joules/m²)*mm) y en la gráfica de la figura 32 podemos observar estos valores de control y hasta el momento no hemos encontrado un ligante con un alto desempeño (Índice de Tenacidad mayor a 1500 y Jnr menor 0.5KPa⁻¹), este ligante ideal sería un ligante flexible (dúctil) a la temperatura intermedia y rígido a alta temperatura. En la determinación del Índice de Tenacidad recomendamos que el ligante sea después de ser oxidado en RTFO y PAV y el ensayo debe de hacerse a la temperatura promedio del pavimento que en muchas ocasiones es de 25°C. Para la determinación del valor Jnr recomendamos que el ligante sea después de ser oxidado en RTFO (inicio del ciclo de vida del pavimento) y el ensayo debe de hacerse a la temperatura máxima del pavimento que en la mayoría de los casos es de 64°C.

La gráfica de la figura 32 sería la otra nueva propuesta de este estudio para el grado de selección de un ligante asfáltico de alto desempeño que se basa en un ligante resistente a la fisuración por fatiga con un Índice de Tenacidad entre 1500 y 2000 (Joules/m²)*mm pero también resistente a la deformación permanente (plástica) con un valor de Plasticidad "Jnr" a 3.2KPa entre 0 y 0.5KPa⁻¹.

	México	España	USA	Colombia	Ecuador	Chile	Malasia	USA	USA
	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	70-28	76-22
Jnr a 64°C KPa ⁻¹ RTFO	2.7	1.9852	2.1695	2.1599	1.9865	2.2607	2.9249	0.3735	0.0704
IT 25°C PAV	887.2	239.2	623.7	414.4	423.3	488.5	144.4	605.7	1348.7

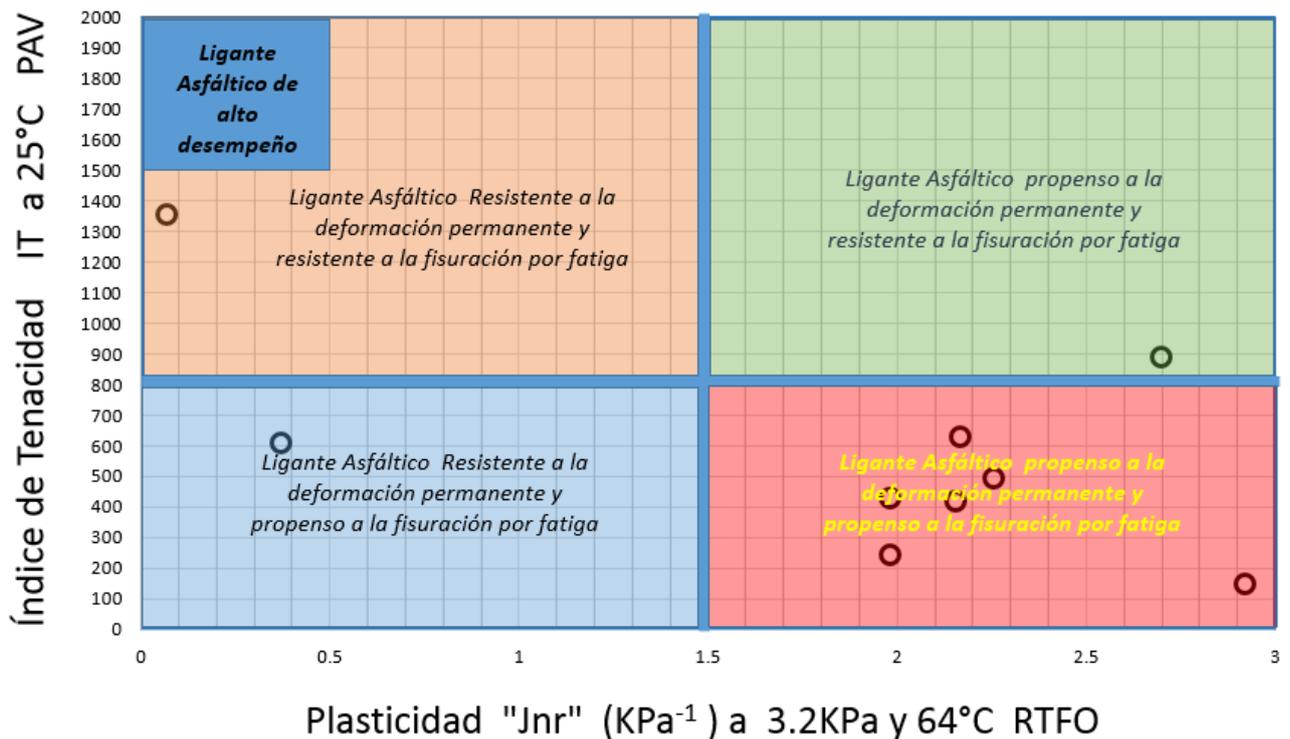


Figura 32.- Gráfica para la selección de un ligante asfáltico resistente a la fisuración por fatiga (alto Índice de Tenacidad) y resistente a la deformación permanente (bajo valor de Plasticidad "Jnr" a 3.2KPa).

Con la selección de un ligante asfáltico resistente a la fisuración por fatiga y resistente a la deformación permanente podremos hacer nuestro diseño de la mezcla asfáltica variando contenidos de asfalto, granulometría, agregados y vacíos para lograr una mezcla asfáltica resistente a la fisuración por fatiga y resistente a la deformación permanente.

5. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones Generales

- *El método de prueba propuesto en estudio proporciona los datos necesarios para elaborar una gráfica de la carga aplicada en forma de esfuerzo cortante a una muestra de ligante asfáltico a ciertas condiciones de temperatura y frecuencia ocasionando que el ligante se deforme en forma progresiva generando una curva de carga (fuerza) vs desplazamiento que nos proporciona diversos parámetros que nos permiten determinar el potencial de fractura de cualquier ligante asfáltico.*
- *El método de prueba propuesto en estudio proporciona los datos necesarios para elaborar la gráfica carga vs desplazamiento obteniendo los parámetros de Índice de Flexibilidad (IF) e Índice de Tenacidad (IT) con una excelente repetitibilidad (precisión), es decir con un coeficiente de variación del 2%.*
- *El método de prueba propuesto en estudio proporciona los datos necesarios para elaborar la gráfica carga vs desplazamiento a diferentes temperaturas.*
- *El método de prueba propuesto en estudio proporciona los datos necesarios para elaborar la gráfica carga vs desplazamiento a diferentes frecuencias.*
- *El método de prueba propuesto en estudio proporciona los datos necesarios para determinar con excelente precisión el Punto de Fluidez (Yield Point) del ligante asfáltico a una determinada temperatura y frecuencia.*
- *Los parámetros de Índice de Flexibilidad (IF) e Índice de Tenacidad (IT) obtenidos con el método propuesto en este estudio en conjunto con el valor de Plasticidad (Jnr) obtenido utilizando la prueba MSCR AASHTO T350, nos permiten determinar un ligante asfáltico resistente a la fisuración por fatiga y resistente a la deformación permanente (plástica) y con este ligante el diseñador de la mezcla asfáltica podrá encontrar la formulación óptima de la misma.*

5.2 Conclusiones Particulares generadas de los datos obtenidos del método propuesto

5.2.1 Conclusiones conforme a la gráfica Carga vs Desplazamiento

- *La curva siempre describe una carga máxima a la que le corresponde un determinado desplazamiento, los ligantes más rígidos presentaron una alta carga máxima expresada en kiloNewtons a un desplazamiento menor en comparación con los ligantes más dúctiles.*
- *El desplazamiento total del ligante en la prueba es de 1.0 mm siempre y cuando la frecuencia utilizada en la misma sea menor a 20Hz.*
- *A temperaturas altas la curva presenta bajo valor de la carga máxima y alto valor de la carga en la zona de mayor desplazamiento y a temperaturas bajas alto valor de carga máxima y bajo valor de carga en la zona de máximo desplazamiento.*
- *La pendiente de la curva en la zona posterior a la carga máxima manifiesta el grado de ductilidad (flexibilidad) del ligante, entre mayor sea el ángulo de la pendiente el ligante será más dúctil y tendrá más capacidad de deformarse sin romperse. Un mismo ligante a diferentes temperaturas manifiesta diferentes ángulos de la pendiente, a mayor temperatura mayor ángulo y a menor temperatura menor ángulo.*
- *La curva carga vs desplazamiento de los ligantes asfálticos PG 70-28 y PG 76-22 después de ser oxidados en la prueba RTFO(AASHTO T 240) fueron muy similares a la curva carga vs desplazamiento de la mezcla asfáltica fabricada con estos ligantes obtenido siguiendo el método de prueba AASHTO TP 124-18, es decir, el ligante PG 70-28 presentó una curva con menor carga máxima pero con mayor ángulo de la pendiente en la zona posterior a la carga*

máxima por lo que este método propuesto sigue un patrón de conducta muy similar al método AASHTO TP 124-18.

- Al comparar las curvas carga vs desplazamiento de los ligantes asfálticos (después de ser oxidados en la prueba PAV AASHTO TP 240) procedentes de diferentes países pero con el mismo grado PG de 64-22 AASHTO M 320-19, estas fueron muy diferentes indicándonos que así será su potencial de fractura contradictorio al grado PG que indica que este potencial será igual para todos los ligantes.

5.2.2 Conclusiones conforme a los parámetros propuestos

- Los parámetros obtenidos de la curva Carga vs Desplazamiento fueron obtenidos con dos metodologías denominadas Illinois y Fénix, en la primera el principal parámetro de control es el Índice de Flexibilidad (IF) que determina la flexibilidad del ligante asfáltico basado en la pendiente de la curva en la zona próxima después de la carga máxima y en la segunda el parámetro principal es el Índice de Tenacidad (IT) que determina la tenacidad del ligante asfáltico basado en obtener la mayor área bajo la curva en la zona de mayor desplazamiento.
- El Índice de Tenacidad es mejor parámetro que el Índice de Flexibilidad para la medición de la tenacidad del ligante asfáltico.
- Índices de Flexibilidad menores de 3 y mayores de 6 mostraron una buena correlación con el Índice de Tenacidad, pero en valores entre 3 y 7 se observó una correlación de 0.75.

5.2.2.1 Conclusiones utilizando los parámetros del método ILLINOIS

- El Índice de Flexibilidad de los ligantes asfálticos PG 70-28 y PG 76-22 después de ser oxidados en la prueba RTFO (AASHTO T 240) fueron muy similares al Índice de Flexibilidad de la mezcla asfáltica fabricada con estos ligantes obtenido siguiendo el método de prueba AASHTO TP 124-18, es decir, el ligante PG 70-28 presentó el mayor Índice de Flexibilidad en ambos ensayos.
- Al comparar el Índice de Flexibilidad de los ligantes asfálticos (después de ser oxidados en la prueba PAV AASHTO TP 240) procedentes de diferentes países pero con el mismo grado PG de 64-22 (AASHTO M 320-19), el ligante procedente de México fue el que mostró el mayor Índice de Flexibilidad de 7.9 indicativo de que mejor será su potencial de resistencia a la fractura y en cambio el grado PG indica que este potencial será igual para todos los ligantes.
- El Índice de Flexibilidad de los ligantes asfálticos disminuye con la oxidación del mismo y mostró un valor muy bajo después de que el ligante es sometido dos veces en la prueba PAV.
- El Índice de Flexibilidad de un ligante asfáltico no varía en forma lineal con respecto a la temperatura, si no que presenta un punto máximo por lo que es necesario especificar a que temperatura fue determinado el mismo.
- El Índice de Flexibilidad de un ligante asfáltico varía conforme a la frecuencia que se aplique.
- La Energía de Fractura "Gf" de un ligante asfáltico es inversamente proporcional a la temperatura para una misma condición de oxidación y frecuencia.
- El Índice de Flexibilidad (IF) en conjunto con el valor de Plasticidad (Jnr) obtenido con la prueba MSCR AASHTO T350 nos permite determinar un ligante asfáltico resistente a la fisuración por fatiga y resistente a la deformación permanente (plástica).

5.2.2.2 Conclusiones utilizando los parámetros del método FÉNIX

- El Índice de Tenacidad de los ligantes asfálticos PG 70-28 y PG 76-22 después de ser oxidados en la prueba RTFO (AASHTO T 240) fueron muy similares al Índice de Tenacidad de la mezcla asfáltica fabricada con estos ligantes obtenido siguiendo el método de prueba AASHTO TP 124-18 pero utilizando los parámetros del ensayo Fénix, es decir, el ligante PG 70-28 presentó el mayor Índice de Tenacidad en ambos ensayos.
- Al comparar el Índice de Tenacidad de los ligantes asfálticos (después de ser oxidados en la prueba PAV AASHTO TP 240) procedentes de diferentes países pero con el mismo grado PG de 64-22 (AASHTO M 320-19), el ligante procedente de México fue el que mostró el mayor Índice de Tenacidad de 887.2(Joules/m²)*mm, indicativo de que mejor será su potencial de resistencia a la fractura y en cambio el grado PG indica que este potencial será igual para todos los ligantes.
- El Índice de Tenacidad de los ligantes asfálticos disminuye con la oxidación del mismo y mostró un valor muy bajo después de que el ligante es sometido dos veces en la prueba PAV.

- *El Índice de Tenacidad de un ligante asfáltico no varía en forma lineal con respecto a la temperatura, si no que presenta un punto máximo por lo que es necesario especificar a que temperatura fue determinado el mismo.*
- *El Índice de Tenacidad de un ligante asfáltico varía conforme a la frecuencia que se aplique.*
- *La Energía Disipada "G_D" de un ligante asfáltico es inversamente proporcional a la temperatura para una misma condición de oxidación y frecuencia.*
- *El Índice de Tenacidad (IT) en conjunto con el valor de Plasticidad (Jnr) obtenido con la prueba MSCR AASHTO T350 nos permite determinar un ligante asfáltico resistente a la fisuración por fatiga y resistente a la deformación permanente (plástica).*

6. REFERENCIAS

1. ASPHALT, Magazine of the Asphalt Institute. *Summer*, 2019. Volume 34: page range 25-28.
2. Rolfe, John M. Barsom, Stanley T. (1999). Fracture and fatigue control in structures : applications of fracture mechanics (3. ed.). West Conshohocken, Pa.: ASTM. ISBN 0803120826.
3. Jin, C.T. Sun, Z.-H. (2012). Fracture mechanics. Waltham, MA: Academic Press. ISBN 9780123850010.
4. Campbell, edited by F.C. (2012). Fatigue and fracture : understanding the basics. Materials Park, Ohio: ASM International. ISBN 978-1615039760.
5. Andriescu, A., S. A. M. Hesp, and J. S. Youtcheff. Essential and Plastic Works of Ductile Fracture in Asphalt Binders. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1875, 2004, pp. 1–8. <http://dx.doi.org/10.3141/1875-01>.
6. Morcou, Hintz, C., R. Velasquez, C. Johnson, and H. Bahia. Modification and Validation of the Linear Amplitude Sweep Test for Binder Fatigue Specification. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2207, 2011, pp. 99–106.
7. Degarmo, E. Paul; Black, JT .; Kohser, Ronald A. (2003), Materiales y procesos en la fabricación (novena edición), Wiley, p. 32, ISBN 0-471-65653-4.
8. MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS. David Roynance, 2008, Capítulo 5.
9. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE FISURACIÓN EN LAS MEZCLAS BITUMINOSAS MEDIANTE EL DESARROLLO DE UN NUEVO ENSAYO EXPERIMENTAL - ENSAYO FÉNIX -Realizada por: GONZALO ALFONSO VALDÉS VIDAL Director: DR. FÉLIX EDMUNDO PÉREZ JIMÉNEZ Barcelona–España 2011.
10. Applied Rheology (primera edición). Thomas G. Mezger, p. 109 ISBN 978-3-9504016-0-8.

***Declaración de aceptación de las bases
del premio internacional a la
innovación en carreteras “Juan
Antonio Fernández del Campo” en su
octava edición.***

[REDACTED]

[REDACTED]