

# Nueva Metodología para el Control de Calidad de las Emulsiones Asfálticas Utilizadas en los Riegos de Sello con Gravilla

## New Methodology for Quality Control of Asphalt Emulsions Used in Chip Seal Applications

### INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Álvaro Gutiérrez Muñiz <sup>1</sup>

Historial del  
artículo:

### Resumen

<sup>1</sup>Quimi-Kao S.A. de C.V., El Salto, Jalisco, México.

Recibido  
14-11-2023  
Aceptado  
16-04-2024  
Publicado  
25-04-2024

Palabras Clave:  
Energía de Fluides  
Índice de  
Flexibilidad  
Emulsión Asfáltica  
Energía de  
Fractura

Las emulsiones asfálticas son una excelente alternativa ecológica en la construcción de los pavimentos flexibles, ya que el asfalto al estar disperso en agua en forma de pequeños glóbulos de tamaños ente 4 y 10 micras, presenta a temperatura ambiente una viscosidad muy baja respecto al asfalto sin emulsionar, permitiéndonos hacer mezclas con agregados a temperatura ambiente generando grandes ahorros de energía al dejar de calentar este agregado y si la obtención de esta energía proviene de la combustión de compuestos orgánicos entonces se deja de arrojar la atmósfera grandes cantidades de Dióxido de Carbono que es el principal gas que está aumentando en nuestra atmósfera generando un aumento en la temperatura promedio global de la tierra. La principal aplicación en la que se utilizan las emulsiones asfálticas es la del Riego de Sello con Gravilla y se requiere de una fuerte innovación para fortalecer esta tecnología motivando a investigadores y constructores a utilizar las emulsiones en más aplicaciones, por lo que en este estudio se propone un nuevo método para que el asfalto residual de la emulsión no emigre a la superficie (Exudación) solo por efecto de altas temperaturas del pavimento y no de dosificación de la emulsión mediante la determinación de la energía de fluides así como otro nuevo método para que el asfalto residual de la emulsión no sea frágil a bajas temperaturas mediante la determinación del Índice de flexibilidad y la Energía de Fractura.

Article history:

### Abstract

Received  
14-11-2023  
Accepted  
16-04-2024  
Available  
25-04-2024

Keywords:  
Flow Energy  
Flexibility Index  
Asphalt Emulsion  
Fracture Energy

Asphalt emulsions are an excellent ecological alternative in the construction of flexible pavements. Since asphalt is dispersed in water in the form of small globules ranging in size from 4 to 10 microns, it exhibits very low viscosity at room temperature compared to unemulsified asphalt. This allows us to mix it with aggregates at room temperature, leading to significant energy savings by eliminating the need to heat these aggregates. If the energy used for heating comes from the combustion of organic compounds, then large amounts of carbon dioxide, the primary gas contributing to global warming, are prevented from being released into the atmosphere. The main application of asphalt emulsions is in Chip Seal applications, and there is a need for significant innovation to strengthen this technology, motivating researchers and constructors to use emulsions in more applications. Therefore, this study proposes a new method to prevent asphalt residue from migrating to the surface (exudation) solely due to high pavement temperatures, rather than the emulsion dosage, by determining the flow energy. Additionally, another new method is proposed to prevent the asphalt residue from becoming brittle at low temperatures by determining the flexibility index and fracture energy.

\* Corresponding author at: Álvaro Gutiérrez Muñiz, Quimi-Kao S.A. de C.V, Km. 22.5 Carretera Guadalajara – El Salto, 45680 El Salto, Jal., Mexico. E-mail address: [agutierrez@kao.com](mailto:agutierrez@kao.com)

RIOC

journal homepage: <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/index>

Vol. 12, no. 01, pp. 1–9, Abril 2024

## 1. Introducción.

Las emulsiones asfálticas son una excelente alternativa ecológica en la construcción de los pavimentos flexibles, ya que el asfalto al estar disperso en agua en forma de pequeños glóbulos de tamaños ente 4 y 10 micras, presenta a temperatura ambiente una viscosidad muy baja respecto al asfalto sin emulsionar permitiéndonos hacer mezclas con agregados a temperatura ambiente generando grandes ahorros de energía al dejar de calentar este agregado y si la obtención de esta energía proviene de la combustión de compuestos orgánicos, entonces se deja de arrojar la atmósfera grandes cantidades de Dióxido de Carbono que es el principal gas que está creciendo en nuestra atmósfera generando un aumento en la temperatura promedio global de nuestro planeta.

La IBEF (Federación Internacional de Emulsiones Bituminosas) agrupa a los productores de emulsiones asfálticas para uso vial a través de sus asociaciones nacionales y sus socios además de intercambiar información técnica sobre emulsiones asfálticas, en particular sobre la producción y el uso de las mismas y ha reportado que cada año se producen más de 8 millones de toneladas de emulsión de asfalto en todo el mundo, lo que representa casi el 10% del consumo mundial de asfalto, pero la idea es que este porcentaje sea cada vez mayor y tenemos el orgullo que México ocupa el cuarto lugar como productor mundial y en el continente americano el segundo lugar, la figura uno muestra estos datos proporcionados por la IBEF.

### Principales Productores de Emulsiones Asfálticas



Figura 1. Datos de producción de emulsiones asfálticas de diferentes países proporcionados por la IBEF.

Las emulsiones asfálticas se utilizan tanto en las actividades de mantenimiento del pavimento como para su construcción ya que aseguran la durabilidad de las estructuras gracias a sus funciones de adherencia, curado y protección. Las principales técnicas de aplicación de las emulsiones son el Riego de Sello con Gravilla, la Microsuperficie, el Slurry Seal, el riego de niebla o sellado, el Scrub seal, El riego de impregnación, la Grava-Emulsión y las

Mezclas en frío con arena. De todas las anteriores tecnologías la que más se utiliza es el Riego de sello con gravilla y la ISSA (International Slurry Surfacing Association) define esta tecnología como la aplicación de un ligante asfáltico (asphalt binder) seguido de una aplicación uniforme de un agregado de una composición granulométrica determinada y después compactado con un rodillo neumático. La IBEF nos dice que los países de Francia y el Reino Unido reportan como la principal aplicación el Riego de Sello con Gravilla.

Dado que la principal aplicación en la que se utilizan las emulsiones asfálticas es la del Riego de Sello con Gravilla, se requiere de una fuerte innovación para fortalecer esta tecnología motivando a investigadores y constructores a utilizar las emulsiones en más aplicaciones, por lo que en este estudio se proponen dos nuevos métodos para solucionar los dos problemas que más se presentan en los riegos de sello con gravilla que son la migración del asfalto residual a la superficie (Exudación) y la fractura del asfalto residual a bajas temperaturas ocasionando la pérdida de la gravilla (Raveling). En la figura 2 se ilustran las etapas o los pasos que deben de seguirse para la colocación de un riego de sello con gravilla y estos son: Limpieza de la superficie, Distribución de la Emulsión Asfáltica, Distribución de la gravilla, Compactación con Rodillo Neumático y Apertura al tráfico a baja velocidad.



Figura 2. Etapas o pasos que deben seguirse para la colocación de un riego de sello con gravilla.

## 2. Metodología.

Los nuevos métodos propuestos en este estudio están basados en la medición de ciertas propiedades reológicas del asfalto residual de la emulsión y para explicar estas propiedades reológicas partimos de que el asfalto es un compuesto muy susceptible a la temperatura presentando un módulo aproximado de 0.300

Pascales a 140°C, un módulo aproximado de 1•103 Pascales a 64°C, un módulo aproximado de 1X106 Pascales a 25°C y un módulo aproximado de 1•108 Pascales a -22°C y un comportamiento visco-elástico debido a que exhibe un comportamiento viscoso (fluye ante una carga) y un comportamiento elástico (se deforma ante una carga) al mismo tiempo, de tal forma que podríamos representar el módulo de corte complejo ( $G^*$ ) como la resultante de un sistema de vectores formado por una componente elástica ( $G'$ ) y una componente viscosa ( $G''$ ); cuando una de las componentes es mayor el comportamiento que predomina es el de esta, es decir, si la componente elástica es mayor que la viscosa el comportamiento del asfalto será como un sólido visco-elástico (esto ocurre a bajas temperaturas) y cuando la componente viscosa es mayor que la elástica el comportamiento del asfalto será como un líquido visco-elástico (esto ocurre a altas temperaturas). Cuando la componente elástica y la viscosa son iguales en magnitud, el ángulo de fase es 45° representando un punto de transición llamado por algunos autores “punto de transición SOL-GEL”, otros autores lo llaman “Crossover Point” y otros autores lo llaman “punto de fusión”. Si comenzamos a incrementar la temperatura del asfalto por arriba de su punto de transición, el comportamiento de este comenzará como un líquido visco-elástico hasta alcanzar el comportamiento de un líquido viscoso con un ángulo de fase de 90°, pero si comenzamos a disminuir la temperatura del asfalto por debajo de su punto de transición, el comportamiento de este comenzará como un sólido visco-elástico hasta alcanzar el comportamiento de un sólido elástico con un ángulo de fase de 0°. En la figura 3 se explica en forma animada lo anteriormente mencionado.

de asfalto que observamos en la figura 3 estaría del lado del cubo de asfalto sólido y este estaría donde se encuentra la gota y ahora podemos decir que a altas frecuencias (equivalente a baja temperatura) el asfalto se comporta como un sólido elástico y a bajas frecuencias (equivalente a altas temperaturas) como un líquido viscoso, es por ello que cualquier ensayo en el que estremos el asfalto se debe de definir a que temperatura y a que frecuencia fue realizado.

Para obtener del asfalto los valores del Módulo de corte complejo, de Almacenamiento y de Pérdida se utiliza un reómetro de corte dinámico, que aplica un esfuerzo cortante utilizando un movimiento oscilatorio generando una deformación unitaria, es decir, al comparar el asfalto con una baraja de Naipes e imaginar que cada carta es un plano de las moléculas del asfalto y le aplicó una fuerza a la primer carta, entonces esta se desplazará a una determinada velocidad y una determinada distancia y la segunda carta con menos distancia que la anterior hasta que la última carta no tenga movimiento, entonces la fuerza aplicada entre el área de la carta será igual al esfuerzo cortante (shear stress) aplicado representado por la letra griega  $\tau$  (tau minúscula) y sus unidades en el sistema internacional serían Pascales dado que la fuerza está en Newtons y el área en metros cuadrados y un Newton sobre metro<sup>2</sup> es igual a un Pascal [ III ]. Esto lo observamos en la figura 4.

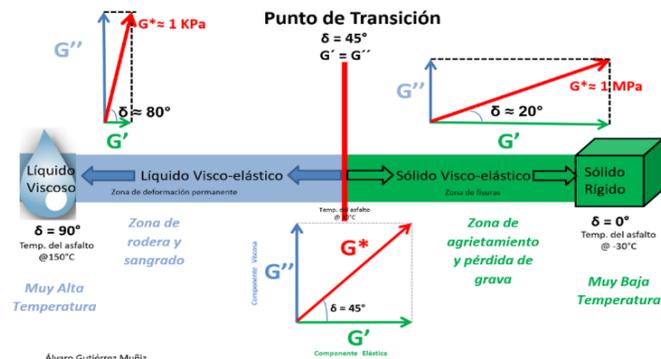


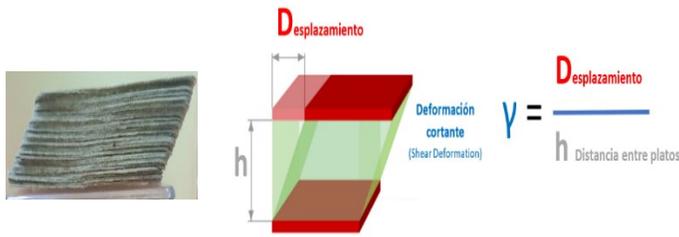
Figura 3. Propiedades reológicas del asfalto en función de la temperatura y a la frecuencia constante.

En la figura 3 podemos observar la variación del módulo del asfalto en función de la temperatura pero utilizando una frecuencia constante, es decir, el tiempo en que aplicamos el esfuerzo es constante y a altas temperaturas el asfalto se comporta como un líquido viscoso y a bajas temperaturas como un sólido elástico pero si ahora estresamos el asfalto pero a temperatura constante y variando la frecuencia entonces la gota



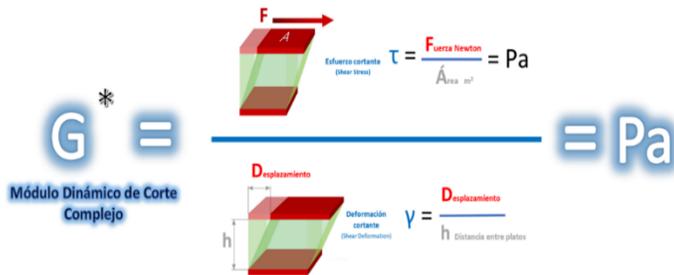
Figura 4. Explicación del esfuerzo cortante (Shear Stress) aplicado a el asfalto.

Continuando con nuestro ejemplo de la carta de Naipes dónde al aplicar un determinado esfuerzo cortante la primera carta se desplazará una determinada distancia (desplazamiento) y la segunda carta debido a la fricción se desplazará con menos distancia que la anterior y así sucesivamente hasta que la última carta no tenga movimiento, entonces la deformación unitaria o deformación en corte (shear deformation) de la carta será igual al desplazamiento entre el espesor de la baraja, es decir entre la distancia entre planos tal como se representa en la figura 5. La deformación en corte se representa con la letra griega gamma minúscula “ $\gamma$ ” y no tiene unidades, aunque en algunos casos por comodidad, pero no por cálculo se multiplica por 100 denominándose porcentaje de deformación en corte.



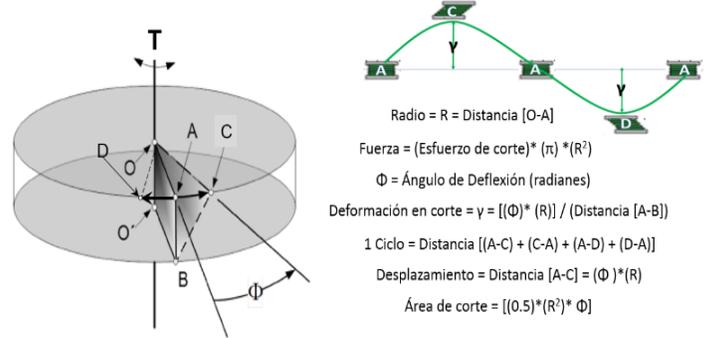
**Figura 5.** Explicación de la deformación unitaria en corte del asfalto al aplicar un esfuerzo cortante.

Ahora aplicaremos al asfalto el esfuerzo cortante en forma oscilatoria que ocasionará un desplazamiento que dividido entre la distancia generará el dato de una deformación unitaria y ahora la resistencia que ofrece este residuo es el módulo de corte complejo "G\*" que será igual al esfuerzo cortante (Pascales) entre la deformación unitaria (sin unidades) así que sus unidades serán Pascales. tal como lo ilustra la figura 6.



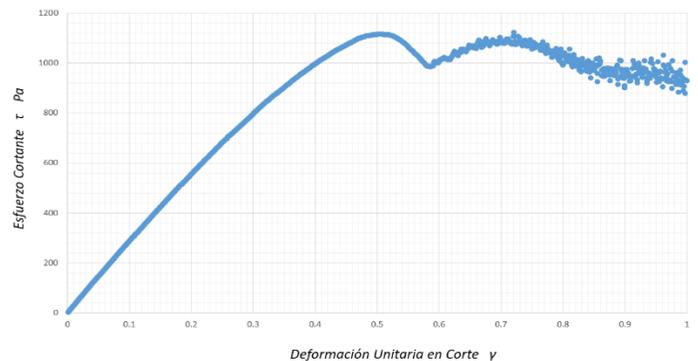
**Figura 6.** El módulo de corte complejo es igual a la relación entre el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y la deformación cortante ( $\gamma$ ).

Los nuevos métodos de prueba de este estudio, requieren de un reómetro de corte dinámico (DSR) y se llevan a cabo colocando una capa delgada del residuo asfáltico de la emulsión entre dos platos metálicos de 25 y 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 7.



**Figura 7.** Movimiento del plato superior durante la prueba de los métodos propuestos.

Para el método de la energía de fluidez, la prueba comienza aplicando un esfuerzo de corte (Shear Stress) necesario para deformar la muestra del residuo asfáltico en un 0.1% (Initial Strain 0.1%) durante un ciclo y después una deformación del 0.2% por un ciclo y así sucesivamente hasta completar el 100% de deformación, por lo que la prueba realiza 1010 mediciones (1010 puntos) con 10100 ciclos totales y la rapidez con la que el equipo realiza los ciclos será con una frecuencia de 2 Hertz (2 ciclos por segundo) y el tiempo que dura el reómetro deformando el residuo asfáltico entre 0.1% y 0.2% será de 5 segundos por lo que el tiempo total de la prueba será de 5050 segundos. Se utiliza esta baja frecuencia porque como ya lo mencionamos a baja frecuencia el asfalto se comporta como un líquido viscoso. Los principales datos reológicos generados durante la prueba son el esfuerzo de corte y la deformación de corte en cada punto y estos son graficados obteniendo una curva de esfuerzo vs deformación del residuo de una emulsión asfáltica tal como lo muestra la gráfica de la figura 8.



**Figura 8.** Gráfica de Esfuerzo cortante vs Deformación cortante del residuo de una emulsión asfáltica de rompimiento rápido obtenida con este nuevo método de prueba.

El científico David Roylance del departamento de ciencia e ingeniería de materiales del Instituto Tecnológico de Massachusetts, reporta que la energía de deformación por unidad de volumen de un material estresado es igual a:

$$U^* = \frac{1}{V} \int f dx = \int \frac{f}{A} dx/L = \int \sigma d\epsilon$$

U\* = Energía por unidad de volumen (Joules/m<sup>3</sup>)  
 σ = Esfuerzo cortante (Pa)  
 ε = Deformación unitaria

De la anterior ecuación del científico Roylance deducimos que la energía de deformación o de fluidez o de escurrimiento (Yield Energy en Joules/m<sup>3</sup>) del residuo de una emulsión asfáltica será igual al área bajo la curva del esfuerzo cortante vs deformación cortante dado que la integral del esfuerzo por la derivada de la deformación será igual al área bajo la curva y entonces tendríamos que calcular esta área de la figura 8, pero nos damos cuenta de que esta curva describe dos comportamientos muy marcados, el primero comienza con una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación y después se va perdiendo esta relación lineal hasta alcanzar un esfuerzo máximo para después disminuir en forma controlada pero después comienza una etapa dónde el esfuerzo y la deformación aumenta y disminuye en una forma desordenada debido a que la muestra sufre un alto estrés desorientando a las moléculas por lo que para calcular el área bajo la curva será necesario utilizar una ecuación para cada comportamiento y al final sumar las dos áreas para obtener la Energía de Fluidez (Yield Energy) y en la gráfica de la figura 9 mostramos la forma en que se deben de seleccionar las dos áreas.

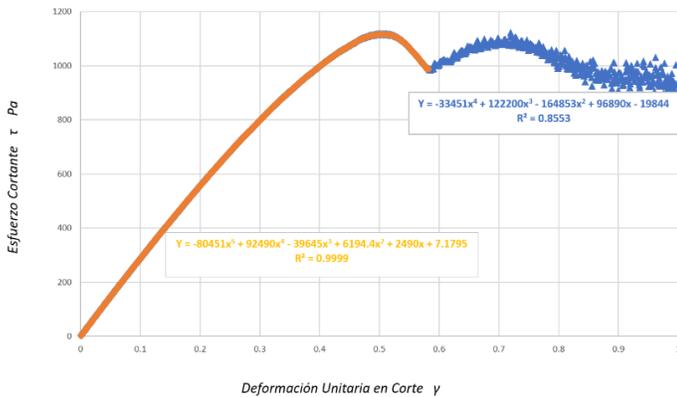


Figura 9. Gráfica de Esfuerzo cortante vs Deformación cortante del residuo de una emulsión asfáltica obtenida con este nuevo método de prueba marcando los dos tipos de comportamiento para el cálculo de área bajo la curva.

Para el método de la resistencia a la fisuración por fragilidad del residuo asfáltico de la emulsión, la prueba comienza aplicando un esfuerzo de corte (Shear Stress) necesario para deformar la muestra del residuo asfáltico en un 0.1% (Initial Strain 0.1%) durante un ciclo y después una deformación del 0.2% por un ciclo y así sucesivamente hasta completar el 100% de deformación por lo que la prueba realiza 1010 mediciones (1010 puntos) con 10100

ciclos totales y la rapidez con la que el equipo realiza los ciclos será con una frecuencia de 20 Hertz (20 ciclos por segundo) y el tiempo que dura el reómetro deformando el residuo asfáltico entre 0.1% y 0.2% será de 0.5 segundos por lo que el tiempo total de la prueba será de 505 segundos. Se utiliza esta alta frecuencia porque como ya lo mencionamos a alta frecuencia el asfalto se comporta como un sólido rígido. Los principales datos reológicos generados durante la prueba son el esfuerzo de corte que al multiplicarse por área de los platos de 8mm nos da la fuerza o carga y la deformación de corte en cada punto y estos son graficados obteniendo una curva de carga vs desplazamiento del residuo de una emulsión asfáltica tal como lo muestra la gráfica de la figura 10.

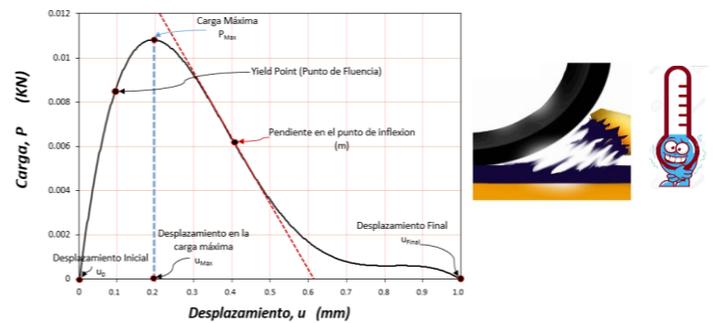


Figura 10. Curva Carga-Desplazamiento elaborada con los datos obtenidos del método propuesto en este estudio.

Los parámetros obtenidos de la curva de carga-desplazamiento que se muestran en la figura 10 son: Trabajo de fractura (Wf), Energía de fractura (Gf), Pendiente posterior al pico (m), Desplazamiento en la carga máxima (UMax), Índice de flexibilidad (IF).

**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 10,100 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):

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

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 "uMax" (mm):** Este desplazamiento ocurre cuando se obtiene la carga máxima.

**Desplazamiento final "uFinal":** 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).

$$Carga = \frac{Esfuerzo\ Cortante\ Pa \cdot \pi \cdot radio^2\ m}{100} = kN \quad (I-2)$$

**Trabajo de fractura "Wf" (Joules):** 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:

$$P = Au^6 + Bu^5 + Cu^4 - Du^3 + Eu^2 + Fu + G \quad (I-3)$$

(A,B,C,D, F y G son constantes)

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):

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

**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 de fractura (ecuación I-6) de acuerdo con la siguiente ecuación (I-5):

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

**Área de fractura (mm<sup>2</sup>):** 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 mm<sup>2</sup> 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:

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

**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. Análisis de resultados.

En este estudio se utilizaron 5 emulsiones asfálticas proporcionadas por diferentes productores y desde luego que con diferentes tipos de asfaltos que son los más utilizados tal como lo muestra la Tabla 1.

Tabla 1. Emulsiones asfálticas utilizadas en este estudio.

	Emulsión A	Emulsión B	Emulsión C	Emulsión D	Emulsión E
<b>Tipo de Asfalto</b>	PG 64-22	PG 64-22 más Látex de SBS	PG 58-28	PG 64-22 más SBS en el asfalto	PG 70-16
<b>Tipo de Emulsificante</b>	Catiónico A	Catiónico A	Catiónico A	Catiónico A	Catiónico A
<b>Dosis de Asfalto (%)</b>	66	66	67	66	66
<b>Dosis de emulsificante (%)</b>	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
<b>pH</b>	1.8	1.8	1.8	2.0	1.9
<b>Dosis de Látex (%)</b>	0	3.0	0	0	0

### 3.1. Análisis de resultados con el método que evalúa la Energía de Fluidez.

Los resultados de la Energía de Fluidez a la temperatura de 70°C de estas 5 emulsiones descritas en la Tabla 1 son observados en las gráficas de esfuerzo cortante vs deformación de la figura 11 y la tabla 2.

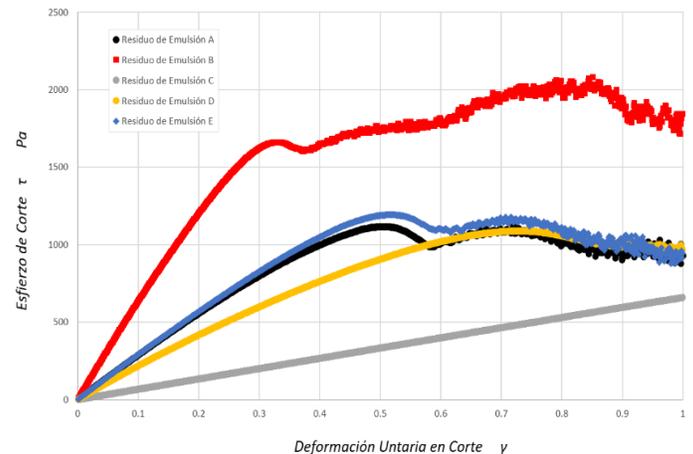
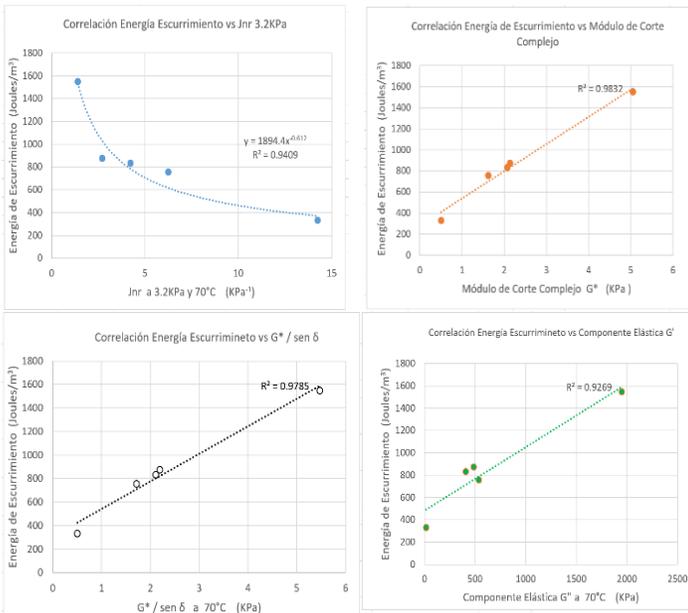


Figura 11. Gráficas de Esfuerzo cortante vs Deformación cortante del residuo de varias emulsiones asfálticas obtenidas con este nuevo método de prueba para calcular el área bajo la curva que será la Energía de Escurrimiento.

Tabla 2. Datos a 70°C de Energía de Fluidez junto con otros parámetros reológicos del residuo asfáltico de las 5 emulsiones descritos en la Tabla 1.

	Emulsión A	Emulsión B	Emulsión C	Emulsión D	Emulsión E
<b>Energía de Fluidez (Joules/m<sup>3</sup>)</b>	832.98	1548.13	332.11	755.88	875.50
<b>Complianace <math>J_{nr, 3.2KPa}</math> (KPa<sup>-1</sup>)</b>	4.2299	1.4120	14.2427	6.2601	2.7210
<b><math>G^* / \text{sen } \delta</math> (KPa)</b>	2.1112	5.4716	0.5038	1.7187	2.1929
<b>Módulo de corte complejo <math>G^*</math> (KPa)</b>	2.0696	5.0464	0.5037	1.6213	2.1351
<b>Módulo Elástico <math>G'</math> (KPa)</b>	0.4090	1.9504	0.0164	0.5376	0.4867
<b>Ángulo de fase <math>\delta</math> (°)</b>	78.6	67.3	88.1	70.63	76.8

Observando los resultados mostrados en las gráficas de la figura 11 y la Tabla 2, deducimos que la emulsión "B" fue la que mostró una mayor energía de fluidez y también fue la que mostró un menor valor de plasticidad (Compliance  $J_{nr}$ ), mayor Módulo de corte complejo, Módulo Elástico y relación  $G^*/\text{sen}\delta$ ; en sentido opuesto la emulsión "C" fue la que presentó menor energía de fluidez y menor rigidez de tal forma que se observa una relación potencial entre la energía de escurrimiento y el valor de  $J_{nr}$  y una relación lineal con las otras propiedades reológicas en todas las emulsiones tal como lo ilustran las gráficas de la figura 12.



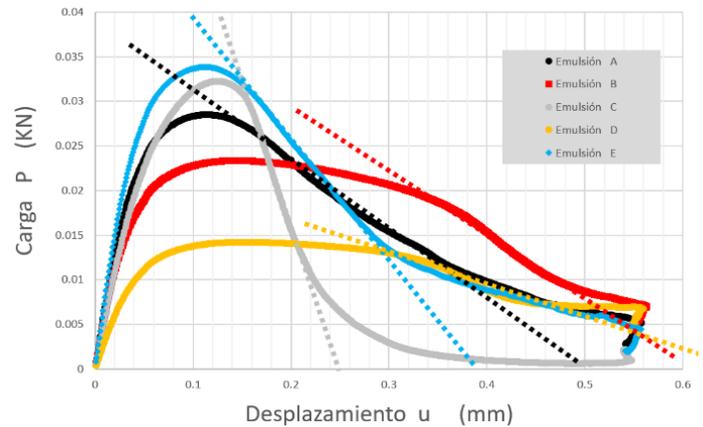
**Figura 12.** Gráficas que muestran una estrecha correlación Entre la Energía de Fluidez y diferentes propiedades reológicas.

Utilizando este nuevo método de prueba para evaluar la Energía de Fluidez (Exudación) podemos controlar que el residuo de una emulsión asfáltica tenga como mínimo una Energía de Fluidez (Yield Energy) de 1400 Joules/m<sup>3</sup> a la temperatura más alta del pavimento que generalmente oscila entre 60° y 70°C, claro está que este nuevo método y su especificación deben de continuar evaluándose por varias empresas y agencias del gobierno para fortalecer estos resultados, pero claramente se puede observar que este nuevo método es una alternativa para controlar que el residuo de la emulsión sea resistente a la exudación (Bleeding). Cabe hacer mención que “The National Cooperative Highway Reserch Program” reporta un nuevo método de prueba para controlar la exudación basado en la medición de la propiedad reológica Compliance no recovery “Jnr” a 3.2 KPa<sup>-1</sup> a la máxima temperatura del pavimento mostrando la importancia de una innovación en los métodos para el control de la calidad de las emulsiones asfálticas [VII]. NCHRP reporta que para alto tráfico se requiere un valor de “Jnr” de máximo 3.5 KPa<sup>-1</sup> por lo que el valor de Energía de Fluidez de 1400 Joules/m<sup>3</sup> es proporcional para este valor y para bajo tráfico se requiere un valor de “Jnr” de máximo 8 KPa<sup>-1</sup> por lo que el valor de Energía de 750 Joules/m<sup>3</sup> es proporcional para este valor.

### 3.2. Análisis de resultados con el método que evalúa la Energía de Fractura e Índice de Flexibilidad.

Los resultados de la Energía de Fractura e Índice de Flexibilidad a la temperatura de 20°C y una frecuencia de 20 Hz utilizando el segundo nuevo método de prueba manifestado en este estudio con el residuo asfáltico de las 5 emulsiones descritas en la tabla 1, son mostrados en las gráficas de Carga vs desplazamiento de la figura 13 y en la Tabla 3 y se muestran los resultados del Índice de Flexibilidad, valor de la pendiente y la Energía de Fractura.

Para evaluar la resistencia a la fractura del residuo de la emulsión asfáltica utilizando este nuevo método, la muestra de ligante asfáltico debe ser colocada dentro de los platos de 8mm en el DSR y debe de ser obtenida del proceso de colocar 50 gramos de emulsión en la charola estipulada en la prueba AASHTO R28-12 (ensayo PAV) y después esta misma conteniendo los 50 gramos de emulsión se coloca en un horno por 3 horas a 120°C para después dejarla enfriar por dos horas y proceder conforme esta prueba AASHTO R28 dónde la muestra del residuo de la emulsión es sometida a 100°C y 2.1MPa por 20 horas, estas condiciones simulan un proceso de envejecimiento del asfalto constante en el laboratorio y un proceso en campo que puede oscilar entre los 3 y 8 años. Recordamos que este nuevo método utiliza una frecuencia de 20 Hz para que el asfalto se comporte como un sólido rígido y una temperatura de 20°C, es decir, la baja frecuencia simula la condición de baja temperatura, aunque la prueba está a 20°C.



**Figura 13.** Gráficas de Fuerza vs Desplazamiento del residuo asfáltico de varias emulsiones asfálticas obtenidas con este nuevo método de prueba para calcular el área bajo la curva que será la Energía de Fractura y el Índice de Flexibilidad.

Tabla 3. Datos a 20°C y 20Hz de la Energía de Fractura e Índice de Flexibilidad del residuo asfáltico de las 5 emulsiones mostradas en la Tabla 1.

	Emulsión A	Emulsión B	Emulsión C	Emulsión D	Emulsión E
Energía de Fractura (Joules/m <sup>2</sup> )	4487.78	4817.79	2856.49	2991.68	4771.31
Índice de Flexibilidad, IF	5.29	6.28	1.15	6.71	3.50
Pendiente (m)	-0.084920	-0.076664	-0.248361	-0.044587	-0.136331
Ángulo de la pendiente (°)	175.15	175.59	166.05	177.45	172.22

Basados en los resultados de la gráfica de la figura 13 y la Tabla 3, el residuo de las emulsiones “D” y “B” mostraron mayor resistencia a la fractura debido a que presentaron un Índice de Flexibilidad de 6.71 y 6.28 respectivamente, cabe hacer mención que estas emulsiones contienen polímero. El residuo de la emulsión que presentó menor resistencia a la fractura fue la emulsión “C” con tan solo un índice de Flexibilidad de 1.15 y esta fue fabricada con un asfalto grado PG 58, en la gráfica de la figura 13 observamos el comportamiento frágil del residuo de esta emulsión “C” donde requerimos mucha fuerza para deformar el asfalto, pero después del esfuerzo máximo cae drásticamente y es por ello que el ángulo de la pendiente en este punto es el más bajo.

Utilizando este nuevo método de prueba para evaluar el Índice de Flexibilidad podemos controlar que el residuo de una emulsión asfáltica después de ser oxidado conforme la norma AASHTO R28 tenga como mínimo un Índice de Flexibilidad de mínimo 6.0.

#### 4. Conclusiones.

Los nuevos métodos de prueba, así como sus especificaciones propuestas en este estudio, están basados en la medición de propiedades físicas fundamentales obtenidas utilizando el reómetro de corte dinámico, lo que genera un importante avance tecnológico en el campo de las emulsiones asfálticas.

El nuevo método de prueba descrito en este estudio para evaluar que el asfalto residual de una emulsión tenga la suficiente rigidez a las temperaturas más altas del pavimento para que no emigre a la superficie solo en función de la temperatura y no por la dosificación de la emulsión, se determina por la energía de fluidez (Yield Stress) y esta energía debe de ser por lo mínimo 1400 Joules/m<sup>3</sup> para alto tráfico y 700 Joules/m<sup>3</sup> para bajo tráfico.

Los resultados de la energía de fluidez de los residuos de las emulsiones de la tabla 1, presentaron una gran relación lineal con el Módulo de Corte Complejo “G\*”, con el parámetro G\*/sen δ y con el Módulo Elástico “G”, así como una relación exponencial con el valor de Compliance a 3.2 KPa “J<sub>n3.2KPa</sub>” que es el parámetro más utilizado en los Estados Unidos de Norteamérica para evaluar el escurrimiento y la deformación permanente.

El nuevo método de prueba para evaluar que el asfalto residual de una emulsión tenga la suficiente resistencia a la fragilidad a las temperaturas más bajas del pavimento determina que el Índice de Flexibilidad de este asfalto residual debe ser mínimo de 6.0.

Los resultados del índice de Flexibilidad de los residuos de las emulsiones de la tabla 1 después de ser oxidados en la prueba AASHTO R28-12 (ensayo PAV), fueron muy diferentes y el residuo de la emulsión “C” que fue fabricada con un asfalto PG 58-28 mostró un valor de 1.15 lo que nos indica que este tipo de asfalto no se debe de usar para condiciones de bajas temperaturas porque se tendrán problemas de desprendimiento de la gravilla.

#### 5. Referencias.

- International Bitumen Emulsion Federation. (s. f.). Figuras clave. Recuperado de IBEF.
- Emulsiones Asfálticas. (ISBN: 978-607-8134-00-7). (2007). (p. 188).
- Mezger, T. G. (2007). Applied Rheology (1ra ed.). (p. 109). ISBN: 978-3-9504016-0-8.
- Roylance, D. (2007). Introduction to Fracture Mechanics. Department of Materials Science, MIT.
- CARRETERAS. (2019). Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera, Número 235, p. 30.
- ASFALTICA. (2018). Revista Técnica de la Asociación Mexicana del Asfalto A.C., Volumen no. 70, p. 79.
- National Cooperative Highway Research Program. (2019). Report 837.