



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

NUEVA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS UTILIZADAS EN LOS RIEGOS DE SELLO

Álvaro Gutiérrez Muñiz¹

¹ QuimiKao S.A. de C.V., El Salto, Jalisco, México, agutierrez@kao.com

Resumen

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 entre 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, más sin embargo los números nos indican que el uso de estas emulsiones es bajo en comparación con el uso del asfalto caliente, por lo que una alternativa para hacer que el uso de estas emulsiones se incremente es mejorando la calidad de las mismas. El estadista William Deming afirmó que, todo proceso es variable y cuanto menor sea la variabilidad de este, mayor será la calidad del producto resultante, por lo que el desarrollo de nuevos métodos de prueba deberá disminuir la variabilidad del proceso para aumentar la calidad de estas emulsiones.

La principal aplicación en la que se utilizan las emulsiones asfálticas es la del Riego de Sello y se requiere de una fuerte innovación en los métodos así como sus especificaciones para controlar la variabilidad del proceso tanto de producción como de aplicación, por lo que en este estudio se proponen tres nuevos métodos que requieren la utilización del reómetro de corte dinámico, uno de estos controlará que el asfalto residual de la emulsión no emigre a la superficie a altas temperaturas del pavimento mediante la determinación de la energía de fluidez, otro controlará que el asfalto residual de la emulsión no sea frágil a bajas temperaturas mediante la determinación del Índice de flexibilidad y de tenacidad y el tercero controlará la viscosidad de la emulsión en la etapa de almacenamiento, de bombeo y de contacto con la grava. Se pretende que estos nuevos métodos de prueba sugeridos en este estudio incrementen la durabilidad de los riegos de sello con gravilla y con ello contribuir a la sostenibilidad en la industria del asfalto.

Palabras Clave: Energía de Fluidez, Índice de Flexibilidad, Emulsión Asfáltica, Energía de Fractura.

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 generándose 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 se almacena en la atmósfera aumentando la temperatura promedio global de nuestro planeta y al comparar esta tecnología de mezcla fría con la mezcla asfáltica en caliente resulta que las emulsiones se utilizan en menor



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

proporción ya que la IBEF (Federación Internacional de Emulsiones Bituminosas) reporta que cada año se producen más de 8 millones de toneladas de emulsión de asfalto en todo el mundo, lo que representa tan solo el 10% del consumo mundial de asfalto [1]. Una forma de fortalecer el uso de las emulsiones asfálticas es mejorando el control de calidad de estas partiendo de la definición de calidad del gran estadista estadounidense William Edwards Deming difusor del concepto de calidad total que afirma que, todo proceso es variable y cuanto menor sea la variabilidad del mismo, mayor será la calidad del producto resultante y si a esto añadimos el concepto de calidad según la norma ISO 9000 que es el grado en el que un conjunto de características inherentes a un objeto (producto, servicio, proceso, persona, organización, sistema o recurso) cumple con los requisitos, entonces estos requisitos que son los métodos de prueba y sus especificaciones nos deben de asegurar que el producto de nuestro proceso sea siempre el mismo. Una de las principales aplicaciones de las emulsiones asfálticas es el riego de sello con gravilla y los requisitos y especificaciones con que se cuenta no controlan la variabilidad del proceso de aplicación, en la figura 1 se muestran las etapas del proceso constructivo de esta aplicación [2] y por ejemplo en el paso dos que consiste en la distribución de la emulsión sobre la carpeta asfáltica, la viscosidad de la emulsión juega un papel importantísimo dado que se requiere que tenga una alta viscosidad en la etapa de reposo para que esta no se asiente pero requiere una baja viscosidad en la etapa de bombeo y salida de las espreas pero después se requiere que la emulsión inmediatamente adquiera una alta viscosidad para que la grava quede embebida en la misma entre 50 y 70% [9], el requisito con que contamos para control de esta etapa es por medio de la viscosidad Saybol Furol con una especificación de mínimo 100 segundos a 50°C o con otro equipo similar siguiendo el mismo principio desarrollado en el siglo XIX de medir el tiempo que tarda en fluir un determinado volumen de emulsión a través de un orificio de diámetro especificado, es por ello que en este estudio se propone un nuevo método de prueba para controlar la viscosidad de la emulsión asfáltica en esta etapa 2.



Figura 1. Etapas o pasos que deben de seguirse para la colocación de un riego de sello con gravilla.

En este estudio también se proponen otros dos nuevos métodos de prueba y sus especificaciones que evalúan las propiedades reológicas que debe de cumplir el residuo de la emulsión asfáltica, uno de ellos controlará que el asfalto no emigre a la superficie y el otro método controlará la pérdida de la grava debida a la fragilidad del asfalto dada por la oxidación de este y las bajas temperaturas [7].



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

2. Descripción de los Nuevos Métodos propuestos en este estudio para el control de calidad del riego de sello con gravilla.

Los nuevos métodos propuestos en este estudio para controlar la variabilidad existente en el proceso de aplicación de las emulsiones asfálticas en el riego de sello con gravilla, están basados en la medición de ciertas propiedades físicas fundamentales tanto de la emulsión como del residuo de esta obtenido utilizando la norma ASTM D 6934. La medición de estas propiedades se realiza utilizando un reómetro de corte dinámico que utiliza diferentes metodologías y sistemas de medición.

2.1 Nuevo método de prueba para determinar la viscosidad de la emulsión en la etapa de reposo, de bombeo y en la después de salir de la esprea (inyector) teniendo contacto con la superficie.

En la figura 1 observamos las etapas o pasos que deben de seguirse para la colocación de un riego de sello con gravilla y en la etapa dos la emulsión debe de tener varias características y estas son:

- A. Debe de ser estable al almacenamiento.
- B. Debe de ser fácil de bombear y salir de la esprea en forma muy uniforme.
- C. No debe de escurrirse en la superficie donde es colocada.

Para evaluar los puntos A,B y C, tenemos que desarrollar un método de prueba que consista en medir la viscosidad de la emulsión en tres etapas, en la primer etapa se mide la viscosidad de la emulsión a una baja velocidad de deformación para determinar la estabilidad al almacenamiento, en la segunda etapa se mide la viscosidad de la emulsión pero a una velocidad de deformación muy alta para simular el proceso del comportamiento de la emulsión al salir de las espreas de la barra irrigadora y en la tercer etapa se mide la viscosidad de la emulsión a una baja velocidad de deformación para simular el proceso de comportamiento de escurrimiento de la emulsión, es decir, la emulsión al salir de las espreas y tener contacto con la superficie debe de tener alta viscosidad para que no se escurra y quede con un espesor uniforme para que después la gravilla se embeba y tenga contacto para reaccionar químicamente originándose el rompimiento de la emulsión.

Para simular en el laboratorio este proceso, requerimos de un equipo especial que nos permita aplicar estas velocidades de deformación de corte y para ello contamos con el Reómetro de Corte Dinámico “DSR” el cuál ya se utiliza para hacer pruebas al asfalto según la normativa AASHTO M320 en la clasificación del grado PG del asfalto que sirve para controlar la calidad del asfalto en la aplicación de mezclas asfálticas en caliente y si ya se usa en este equipo de alta tecnología en este tipo de mezclas en caliente porque no utilizarlo en el control de calidad de las mezclas en frío fabricadas con emulsiones asfálticas. El sistema de medición también llamado “Geometría” que se utiliza para esta medición de viscosidad es el de los cilindros concéntricos (CC-27) [3]. Este nuevo método 2.1 para simular el paso A, aplica a la emulsión un esfuerzo cortante muy bajo para lograr una velocidad de deformación en corte de tan solo $0.1s^{-1}$ y nos proporciona muchos datos reológicos propios de la emulsión a esta baja velocidad de deformación que equivale a 0.078 rpm. Esta velocidad de deformación de $0.1s^{-1}$ es aplicada durante 25 segundos y cada 5 segundos se obtiene una lectura de viscosidad, inmediatamente después el reómetro para simular el paso B (bombeo y esparado) aplica un alto esfuerzo cortante para obtener una velocidad de deformación de $1000s^{-1}$ (776.13 rpm) durante un segundo y cada 0.1 segundo toma una lectura obteniendo 10 datos de viscosidad, inmediatamente después el reómetro para simular el paso C (contacto con la superficie) aplica un muy bajo esfuerzo cortante para obtener una velocidad de deformación de $0.1s^{-1}$ (0.078 rpm) durante 400 segundos y cada 0.5 segundos toma una lectura obteniendo 800 datos de viscosidad y todos los datos son obtenidos a temperatura constante y se sugiere que esta sea de $50^{\circ}C$ puesto esta es la temperatura a la que aplica la emulsión para este tratamiento superficial, en la figura 2 se muestra una fotografía de



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

la pantalla de la computadora que muestra el procedimiento y resultados de este nuevo método y sus condiciones.

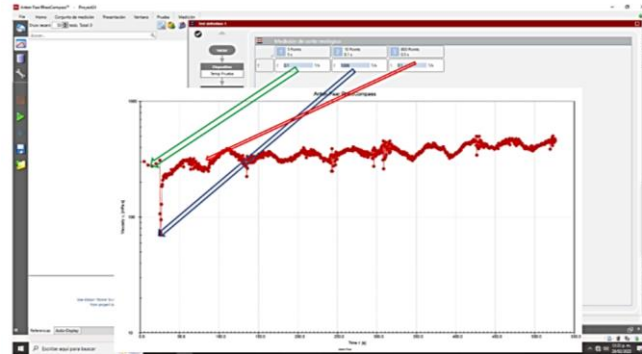


Figura 2. Fotografía de la pantalla de la computadora que muestra el nuevo método de prueba 2.1

En la figura 2 observamos la gráfica de viscosidad vs tiempo a las diferentes velocidades de deformación proporcionadas por el DSR, pero estos datos hay que modificarlos haciendo nuestras propias gráficas para hacer la evaluación en la etapa de reposo, bombeo y aplicación en la superficie. Por ejemplo, si queremos saber qué es lo que sucede en la etapa de reposo donde aplicamos un esfuerzo cortante para obtener una velocidad de deformación de $0.1s^{-1}$ aplicándolo por 25 segundos y cada 5 segundos hacemos la medición de la viscosidad entonces podemos generar una gráfica como la mostrada en la figura 3a donde lo que nos interesa conocer es la viscosidad en esos primeros 5 puntos y lo que hemos encontrado es que las emulsiones que muestran la mayor viscosidad como promedio de esos 5 puntos son la que menor asentamiento presentan, es decir, en esta gráfica de la figura 3a se observa que la emulsión “M” es la que tiene mayor viscosidad y es la que presentó menor asentamiento por 5 días y la emulsión “K” que fue la de menor viscosidad fue la que presentó mayor asentamiento. Por lo tanto la información que nos proporciona esta condición de velocidad de corte de $0.1s^{-1}$ es que emulsiones con valor mayor de $1800\text{ mPa}\cdot\text{s}$ a la temperatura de 25°C tendrán un asentamiento menor a 1%, por lo que se propone esta nueva especificación de mínimo $1800\text{ mPa}\cdot\text{s}$ (1800 centipoises) a 25°C para controlar el problema de asentamiento, en la gráfica de la figura 3b se observa esta alta correlación de 21 emulsiones entre el asentamiento menor a 1% y su especificación de $1800\text{ mPa}\cdot\text{s}$ a 25°C .

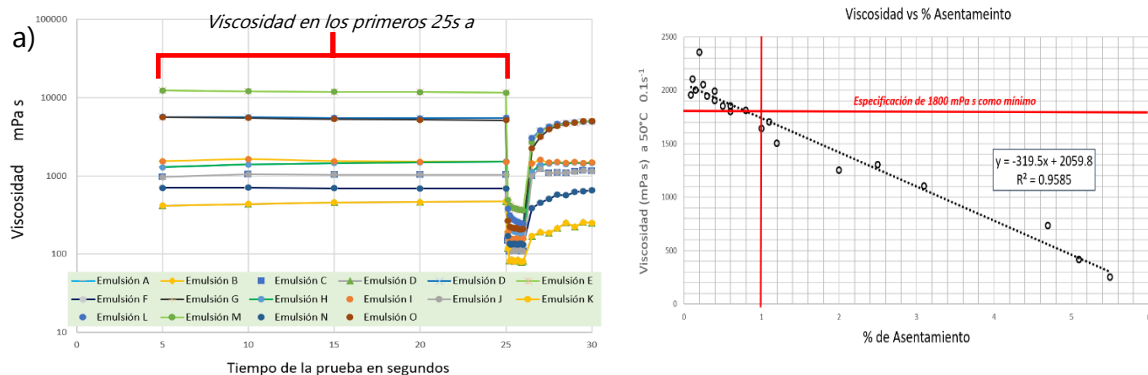


Figura 3. a) Gráfica de los datos a 25°C de la viscosidad de la emulsión al aplicar una velocidad de deformación de $0.1s^{-1}$ en los primeros 25 segundos tomando el dato de viscosidad cada 5 segundos. b) Gráfica que muestra la alta correlación de 21 emulsiones entre la viscosidad a 0.1 s^{-1} y el % de Asentamiento a 5 días a 25°C .



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

La segunda evaluación de los datos obtenidos con este nuevo método de prueba 2.1, consiste en la medición de viscosidad de la emulsión a la temperatura de 50°C puesto que es la temperatura a la cual se aplica este tipo de emulsión y una velocidad de deformación de 1000 s^{-1} , es decir, al someter la emulsión a un alto esfuerzo cortante que proporcione una velocidad de deformación de 1000 s^{-1} (776.13 rpm) se simula la etapa de bombeo de la emulsión en la que el motor de la bomba no se debe de forzar al pasar la emulsión a través de las espreas a una presión aproximada de dos atmósferas (29.4 psi) girando entre 400 y 600 rpm. Para evaluar la facilidad de bombeo de las emulsiones asfálticas de rompimiento rápido, se pidieron a varios fabricantes sus emulsiones así como que nos reportaran si tuvieron problemas en la etapa del bombeo y esparado a la temperatura de 50°C . Todas estas emulsiones fueron evaluadas con este nuevo método de prueba 2.1 en la etapa de la velocidad de deformación de 1000 s^{-1} durante un segundo tomando la lectura de viscosidad cada 0.1 segundos y estos datos son mostrados en la gráfica de la figura 4, donde se observa que las emulsiones B,C, y F no tuvieron problemas de bombeo y fueron las que tuvieron una viscosidad menor a $250\text{ mPa}\cdot\text{s}$, las emulsiones por arriba de los $250\text{ mPa}\cdot\text{s}$ comenzaron a tener problemas de bombeo por lo que sugerimos que a la temperatura de 50°C la viscosidad de la emulsión de rompimiento rápido debe de ser máximo $250\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ($0.250\text{ Pa}\cdot\text{s}$ unidades del sistema internacional) o su equivalente en otras unidades sería 250 centipoises.

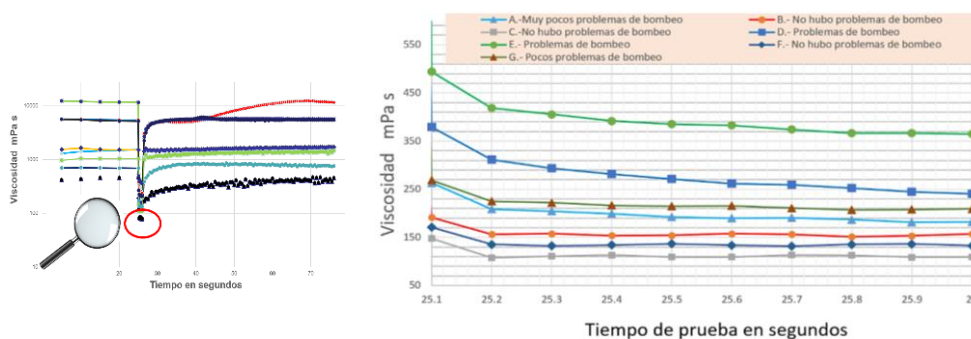


Figura 4.- Datos de viscosidad a 50°C y a 1000 s^{-1} de diferentes emulsiones asfálticas para riegos de sello.

La tercera y última evaluación de los datos obtenidos con este nuevo método de prueba 2.1 consiste en la evaluación de la viscosidad de la emulsión a la velocidad de deformación de 0.1 s^{-1} pero inmediatamente después de haber sido aplicado durante un segundo un alto esfuerzo de corte para lograr una velocidad de deformación de 1000 s^{-1} que simula la viscosidad al salir de la esprea. En la gráfica de la figura 5 se observa la viscosidad determinada con este nuevo método de prueba de 3 emulsiones asfálticas de rompimiento rápido que se utilizaron en la aplicación de un riego de sello con gravilla, se puede observar que la emulsión “A” fue la que mayor viscosidad mostró después del segundo a 1000 s^{-1} , pero también observamos que tan solo tardó medio segundo ($26.5-26.0=0.5$) en recuperar su viscosidad y esto es muy importante porque inmediatamente que la emulsión cae en la superficie recupera su viscosidad original y por lo tanto esta emulsión no se escurrirá en la superficie, este comportamiento de recuperar muy rápido su viscosidad después de ser sometida a una alta velocidad de deformación indica que la emulsión es muy poco Tixotrópica [3]; en cambio la emulsión “B” después de 10 segundos no recuperó su viscosidad original y además de presentar baja viscosidad tarda mucho en recuperarse después de ser sometida a altas velocidades de deformación y por lo tanto es una emulsión Tixotrópica y tendrá problemas de escurrimiento; la emulsión “C” tardó 5 segundos



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

(31-26=5) en recuperar su viscosidad original después de ser sometida a una alta velocidad de deformación por lo que podemos decir que esta emulsión C es ligeramente Tixotrópica pero dentro de un rango aceptable porque no mostró en campo problemas de escurrimiento.

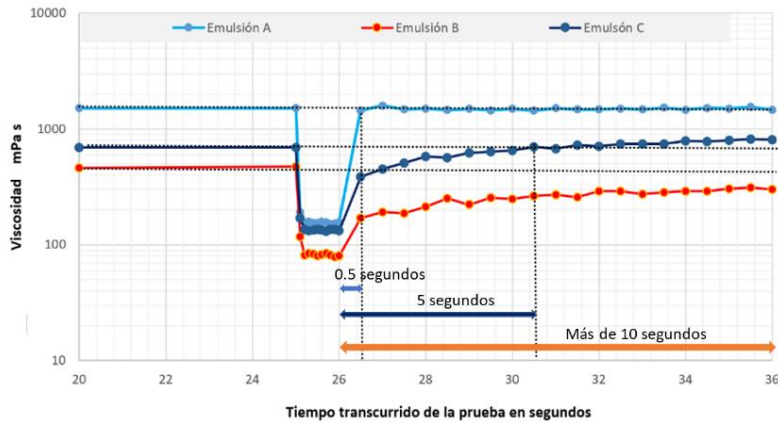


Figura 5.- Datos de viscosidad a 50°C y 0.1s^{-1} de tres emulsiones asfálticas para riegos de sello obtenidos inmediatamente después de la alta velocidad de deformación de 1000s^{-1} .

Para poder especificar que magnitud de viscosidad debe de tener la emulsión después de ser espreada, se analizaron 16 emulsiones que fueron aplicadas en campo y se recabó la información de su comportamiento en cuanto a que si exhibieron problemas de escurrimiento, estos datos son mostrados en la figura 6 donde los datos que nos interesan para este caso son los de viscosidad y esfuerzo cortante del segundo 26.5 al segundo 31 obteniendo un valor de viscosidad con el promedio de estos valores.

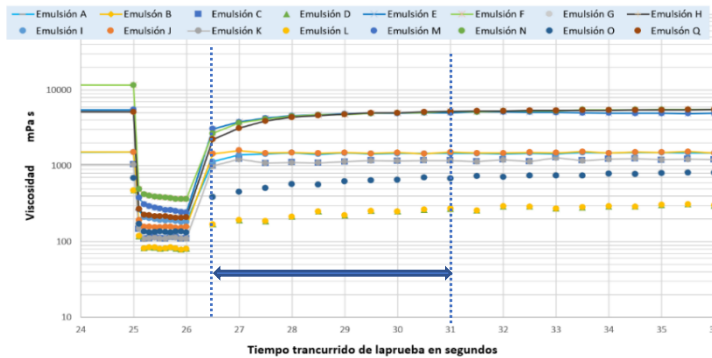


Figura 6.- Datos de viscosidad a 50°C y 0.1s^{-1} de 16 emulsiones asfálticas para riegos de sello obtenidos inmediatamente después de la alta velocidad de deformación de 1000s^{-1} .

En la gráfica de la figura 6 se puede observar que todas las emulsiones asfálticas presentaron un comportamiento Tixotrópico propio de las emulsiones asfálticas [3], también se comprobó con datos de aplicaciones de campo que las emulsiones D, G, L y O mostraron problemas de escurrimiento en carreteras sin pendientes y están son las que mostraron un promedio de viscosidad menor a $600\text{ mPa}\cdot\text{s}$, las emulsiones C y K mostraron muy poco escurrimiento y ambas están cerca de los $1000\text{ mPa}\cdot\text{s}$, las demás emulsiones con valores superiores a los $1200\text{ mPa}\cdot\text{s}$ no presentaron problemas de escurrimiento. En base a los anteriores resultados presentamos la propuesta de que la viscosidad a 50°C de una emulsión de rompimiento rápido para ser utilizada en un riego de gravilla debe de tener



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

un valor de mínimo 1200 mPa*s después de salir de la esprea, para determinar este valor es necesario utilizar este método de prueba 2.1 propuesto en este estudio y esta viscosidad se calcula como el promedio de los diez primeros valores de viscosidad a los 10 segundos, es decir, del segundo 26.5 al 31 del tiempo de prueba obtenidos después de que la emulsión se sometió a la velocidad de deformación en corte de 1000 s^{-1} , cabe aclarar que esta especificación es para zonas planas sin pendientes.

2.2 Nuevo método de prueba para evaluar que el asfalto residual de una emulsión tenga la suficiente rigidez a las temperaturas más altas del pavimento para que no fluya, es decir, calcularemos la energía de fluidez del residuo a esa temperatura.

En este punto 2.2 se establece un nuevo método de prueba para controlar que no fluya el residuo de la emulsión asfáltica de rompimiento rápido a temperaturas entre 50° y 80°C que son la temperaturas máximas de la superficie del pavimento, se debe de tener en cuenta que el asfalto a estas temperaturas es un líquido visco-elástico y no un líquido viscoso por lo que entonces ahora utilizaremos nuevamente el reómetro de corte dinámico pero utilizando un movimiento oscilatorio y no rotatorio tal como se utilizó en la evaluación de la viscosidad las emulsiones asfálticas que son líquidos viscosos, continuaremos aplicando un esfuerzo cortante y ahora lo que cambiará es que en lugar de tener una velocidad de deformación en corte tendremos una deformación unitaria de corte. Este nuevo método 2.2 requiere de un reómetro de corte dinámico (DSR) y se lleva a cabo colocando una muestra del residuo asfáltico entre dos platos metálicos de 25 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) [3], tal como lo muestra la figura 7.

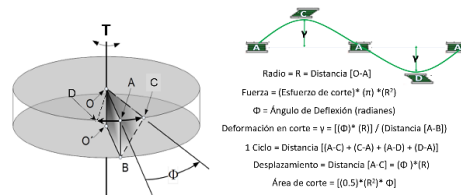


Figura 7. Movimiento del plato superior durante la prueba del método propuesto en el punto 2.2

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 incrementando cada 0.1% 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. 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, el área bajo la curva de esta gráfica será la *Energía de Fluidez* (Yield Energy) en Joules/m^3 [4] necesaria para que el asfalto fluya a la temperatura más alta del pavimento, esta curva obtenida describe dos comportamientos muy



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

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 (curva naranja) 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 (curva azul) 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 esta Energía de Fluidez en Joules/m³.

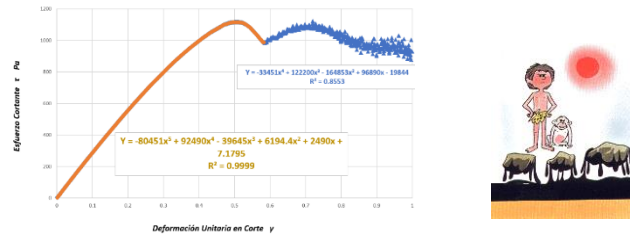


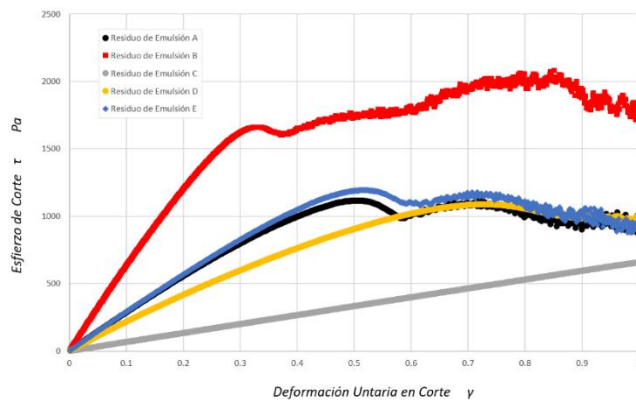
Figura 8. Gráfica de Esfuerzo cortante vs Deformación cortante del residuo de una emulsión asfáltica obtenida con este nuevo método de prueba 2.2, marcando los dos tipos de comportamiento para el cálculo del área bajo la curva.

Se ha evaluado la Energía de Fluidez de un gran número de emulsiones, pero en este estudio debido a limitación de páginas permitidas solo se muestran 5 emulsiones que serían las que más se aplican para este tratamiento superficial, en la tabla 1 se describen estos 5 tipos de emulsiones.

Tabla 1. Emulsiones asfálticas utilizadas en este estudio

	Emulsión A	Emulsión B	Emulsión C	Emulsión D	Emulsión E
Tipo de Asfalto	PG 64-22	PG 64-22 más polímero	PG 58-28	PG 64-22 más polímero	PG 70-16
Tipo de Emulsificante	Catiónico A	Catiónico A	Catiónico A	Catiónico A	Catiónico A
Dosis de Asfalto (%)	66	66	67	66	66
Dosis de emulsificante (%)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
pH	1.8	1.8	1.8	2.0	1.9
Dosis de Látex (%)	0	3.0	0	0	0

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 contante vs deformación de la figura 9.



	Emulsión A	Emulsión B	Emulsión C	Emulsión D	Emulsión E
Energía de Fluidez (Joules/m³)	832.98	1548.13	332.11	755.88	875.50
Compliance J_{nr,32KPa} (KPa⁻¹)	4.2299	1.4120	14.2427	6.2601	2.7210
G' / sen δ (KPa)	2.1112	5.4716	0.5038	1.7187	2.1929
Módulo de corte complejo G* (KPa)	2.0696	5.0464	0.5037	1.6213	2.1351
Módulo Elástico G' (KPa)	0.4090	1.9504	0.0164	0.5376	0.4867
Ángulo de fase δ (°)	78.6	67.3	88.1	70.63	76.8

Figura 9. Gráficas de Esfuerzo cortante vs Deformación cortante del residuo de varias emulsiones obtenidas con este nuevo método de prueba 2.2 para calcular el área bajo la curva que será la Energía de Escurrimiento en Joules/m³ a 70°C.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Observando los resultados mostrados en la figura 9, 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 Jnr), 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 Jnr y una relación lineal con las otras propiedades reológicas en todas las emulsiones tal como lo ilustran las gráficas de la figura 10.

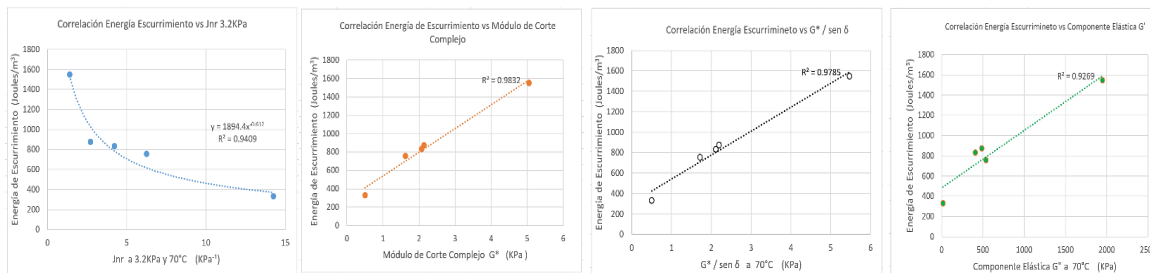


Figura 10. Gráficas que muestran una alta correlación Entre la Energía de Fluidez y diferentes propiedades reológicas.

Utilizando este nuevo método de prueba 2.2 para evaluar la Energía de Fluidez podemos controlar que el residuo de una emulsión asfáltica tenga como mínimo una Energía de Fluidez (Yield Energy) de 1400 Joules/m³ a la temperatura más alta del pavimento que generalmente oscila entre 60° y 70°C para que el asfalto no fluya (Blending), claro está que este nuevo método y su especificación deben de continuar evaluándose por varias empresas y 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 al escurrimiento (Bleeding). Cabe hacer mención que “The National Cooperative Highway Reserch Program” reporta un nuevo método de prueba para controlar el escurrimiento basado en la medición de Jnr a 3.2KPa⁻¹ 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 [7].

2.3 Nuevo método de prueba para evaluar que el asfalto residual de una emulsión tenga la suficiente flexibilidad a las temperaturas más bajas del pavimento para que la grava no se despegue por medio de evaluación del Índice de Flexibilidad.

En este punto 2.3 se establece un nuevo método de prueba para controlar que la grava no se desprenda debido a que el residuo de la emulsión asfáltica a temperaturas menores a 0°C se fragiliza debido a esta baja temperatura y a la oxidación del mismo, para esto nuevamente utilizaremos un reómetro de corte dinámico colocando una muestra del residuo asfáltico (este es obtenido después de colocar 50 gramos de emulsión en el horno a 120°C por 3 horas y después colocarlo en el horno de PAV por 20 horas a una presión de 2.1 MPa conforme a la norma AASHTO R28) entre dos platos metálicos de 8 mm de diámetro de los cuales el inferior permanece fijo y el superior gira repetidamente en forma oscilatoria (ver figura 7) para deformar la muestra del residuo comenzando con 0.1% (Initial Strain 0.1%) durante un ciclo y después con 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 ahora será con una



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

frecuencia de 20 Hertz (20 ciclos por segundo) porque a esta alta frecuencia el asfalto se comporta como un sólido frágil aunque la temperatura de prueba sea de 25°C [5 y 6].

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, estos datos son graficados obteniendo una curva de carga vs desplazamiento del residuo de una emulsión asfáltica [5,6 y 8] tal como lo muestra la gráfica de la figura 11.

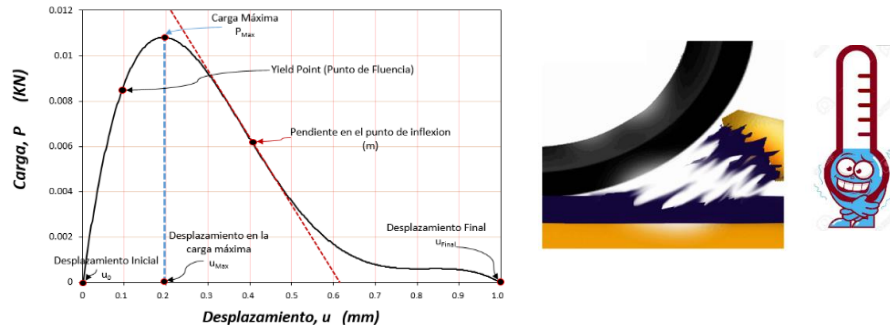


Figura 11.- Curva Carga-Desplazamiento elaborada con los datos obtenidos del método 2.3 propuesto en este estudio.

Los parámetros obtenidos de la curva de carga-desplazamiento que se muestran en la figura 11 son: Trabajo de fractura (Wf), Energía de fractura (Gf), Pendiente posterior al pico (m), Desplazamiento en la carga máxima (uMax) e 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 10,1000 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 cuyas unidades son milímetros se calcula utilizando la siguiente fórmula (I-1):

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

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 Joules. La Fuerza en kilonewtons se calcula a partir de la fórmula (I-2).

$$\text{Carga} = (\text{esfuerzo cortante en Pascales}) * (\pi) * (\text{radio2 del plato en metros}) / 1000 = \text{kN} \quad (I-2)$$

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:

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



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

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:

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

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):

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

Área de fractura (mm²): El área de fractura es el área de corte que ocurre en el porcentaje de máxima deformación y donde 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:

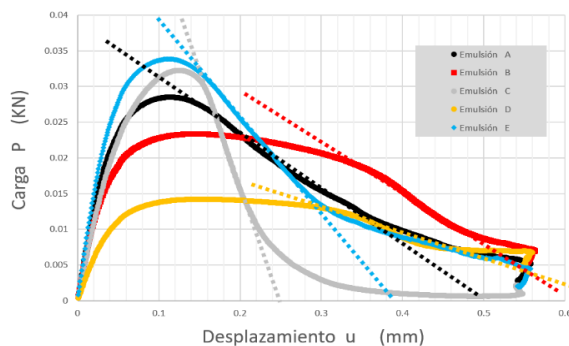
$$\text{Área de Fractura} = (0.5 * (\text{radio del plato en mm})^2 * \Phi) = \text{mm}^2 \quad (\text{I-6})$$

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 11) 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.

Dónde |m| = Valor absoluto de la pendiente "m" (kN/mm)
$$IF = \frac{Gf}{|m|} \times Z \quad (\text{I-7})$$

Los resultados de la Energía de Fractura e Índice de Flexibilidad a la temperatura de 25°C y 20 Hertz utilizando el nuevo método de prueba 2.3 utilizando el residuo asfáltico de las 5 emulsiones descritas en la tabla 1, son mostrados en la figura 12.



	Emulsión A	Emulsión B	Emulsión C	Emulsión D	Emulsión E
Energía de Fractura (Joules/m ²)	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

Figura 12. Gráficas de Fuerza vs Desplazamiento del residuo asfáltico de las emulsiones asfálticas de la tabla 1 obtenidas con este nuevo método de prueba para calcular el área bajo la curva que será la Energía de Fractura y con la pendiente obtener el Índice de Flexibilidad.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Basados en los resultados de la figura 12, 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 12 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 6.0.

3 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 2.1 para evaluar la viscosidad de las emulsiones asfálticas para riegos de sello, determina que la viscosidad de estas a la temperatura de 25°C debe ser de mínimo 1800 mPa*s utilizando una velocidad de deformación de 0.1s⁻¹ para evitar el asentamiento, de máximo 250 mPa*s a 1000 s⁻¹ para que sea bombeable a la temperatura de 50°C y de mínimo 1200mPa *s a 0.1 s⁻¹ para que no se escurra al tener contacto con la superficie a la temperatura de 50°C.

El nuevo método de prueba 2.2 para evaluar que el asfalto residual de una emulsión tenga la suficiente rigidez a las temperaturas más altas del pavimento, determina que la energía de fluidez necesaria para que este asfalto residual no fluya (Yield Stress) a esta temperatura debe de ser por lo mínimo 1400 Joules/m³.

El nuevo método de prueba 2.3 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.

4 Referencias

- [1] <https://www.ibef.net/es/emulsions-3/figuras-clave/>. International Bitumen Emulsion Federation.
- [2] Emulsiones Asfálticas. ISBN: 978-607-8134-00-7.
- [3] Applied Rheology (primera edición). Thomas G. Mezger, ISBN 978-3-9504016-0-8.
- [4] Introduction to Fracture Mechanics. David Roylance, Department of Materials Science of MIT.
- [5] “CARRETERAS” Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera Número 235, página 30.
- [6] “ASFALTICA” Revista Técnica de la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. Volumen 70 página 79.
- [7] National Cooperative Highway Research Program, report 837.
- [8] Método AASHTO TP 124-18 (Semi-Circular Bending Test “SCB”).
- [9] Application of Asphalt Emulsions, University of Arkansas, Certificate 2: Lesson 4, page 48.