

ÁLVARO GUTIÉRREZ MUÑIZ

Ingeniero Químico investigador de asfaltos del grupo KAO



Nuevos métodos de prueba para las emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas tienen su principal aplicación en los tratamientos superficiales tales como el riego de sello con gravilla, el riego de liga y el microaglomerado en frío, es por ello que debemos de implementar la mejora continua de las mismas mediante la innovación y como ejemplo en los Estados Unidos de Norteamérica el NCHRP (National Cooperative Research Program) ha desarrollado nuevos métodos de prueba para controlar mejor los problemas que actualmente se están observando en estos tratamientos superficiales, estos nuevos métodos en conjunto con sus especificaciones están manifestados en el reporte de investigación número 837 y son ensayos tanto para la emulsión en función de su estabilidad al almacenamiento y su aplicación como para el residuo de la emulsión en función de su aplicación considerando las condiciones climáticas del lugar específico dónde estará actuando.

Los nuevos métodos de prueba para las emulsiones son los que se muestran en la siguiente tabla 1.

Propiedad	Método de prueba	Parámetros medidos
Estabilidad al almacenamiento	ASTM D6930 modificada	A: Viscosidad Rotacional B: Relación de separación a 24 h C: Relación de estabilidad a 24 h
Capacidad de salir de los inyectores de la barra del irrigador (rociado)	AASHTO TP 48 modificada	Viscosidad rotacional a alta velocidad de corte
Capacidad de mezclado	AASHTO TP 48 modificada	Viscosidad rotacional a 5 RPM
Escurrecimiento	AASHTO TP 48 modificada	Viscosidad rotacional a baja velocidad de corte

Tabla 1.- Nuevos métodos de prueba para las emulsiones asfálticas.

Las emulsiones asfálticas están compuestas de diferentes sustancias tales como agua, asfalto, emulsificante y modificadores formando un sistema complejo que requieren estar y mantenerse en forma homogénea durante los procesos de almacenamiento, bombeo, transporte y construcción y la estabilidad de la emulsión juega un papel muy importante en el éxito de la aplicación de las mismas ya que nos permite lograr esta homogenización en todos los procesos. El método de prueba utilizado actualmente para controlar dicha estabilidad consiste en colocar 500 mililitros de la misma en un probeta de vidrio de esa capacidad para después de un determinado periodo de tiempo de almacenamiento y a cierta condición de temperatura se determine el contenido de ligante residual a los primeros 50 mililitros (parte superior) y a los últimos 50 mililitros (parte inferior) y la diferencia que exista entre estos contenidos será el resultado de la estabilidad de la emulsión pero este ensayo no proporciona suficiente información sobre dicha estabilidad en los procesos anteriormente mencionados, es por ello que el NCHRP propone un nuevo ensayo para sustituir el anterior que consiste ahora en determinar la viscosidad de la emulsión en los primeros 50 mililitros y en los últimos 50 mililitros utilizando el viscosímetro rotacional y con estos resultados calculamos un índice de estabilidad (Rs) dividiendo la viscosidad de la parte superior entre la viscosidad de la parte inferior y este índice nos indicará la resistencia de la emulsión a la sedimentación o a la flotación y la especificación para una emulsión de riego de sello con gravilla es que este índice (Rs) debe de estar entre 0.5 y 1.5 después de 24 horas de almacenamiento a 60°C y para las emulsiones que se aplican en los microaglomerados este índice (Rs) debe de estar entre 0.2 y 1.5 después de 24 horas de almacenamiento a 25°C.

También para tener otro nuevo parámetro de evaluación de la estabilidad de la emulsión se chequea la viscosidad de la emulsión original así como la viscosidad de los 400 mililitros que no se usaron en la anterior prueba, es decir, se utiliza la emulsión que en la probeta queda por debajo de los primeros 50 mililitros y por encima de los últimos 50 mililitros y se mide su viscosidad y entonces se calcula el índice de degradación (Rd) dividiendo la viscosidad de la emulsión original entre la viscosidad de los 400 ml y este índice debe de tener un valor máximo de 2 para todo tipo de emulsión. Como podemos observar la estabilidad de la emulsión está íntimamente ligada con la viscosidad de la emulsión y debemos de hacer investigación constante sobre nuevos métodos de prueba para lograr esa mejora continua de la tecnología de las emulsiones asfálticas.

La viscosidad de la emulsión es también crítica en la aplicación del riego de sello con gravilla ya que debe de presentar una viscosidad muy baja en el periodo en que sale de la espina (inyector) de la barra irrigadora para que esta pueda ser fácilmente espreada (atomizada) con el objetivo de que al caer en la superficie sea distribuida con un espesor uniforme para que inmediatamente después adquiera más viscosidad para no perder este espesor hasta que tenga contacto con la grava reaccionando químicamente produciendo el rompimiento de la misma, este fenómeno lo podríamos comparar con la aplicación de una pintura en la pared de nuestro hogar, en el momento en que la pintura está en la cubeta requerimos que la pintura tenga una viscosidad alta para que sea estable y en el momento de aplicarla con la brocha requerimos que tenga una viscosidad baja para que no requiera un esfuerzo en distribuirla pero después debe de aumentar su viscosidad para que no se escurra o forme gotas, tal como lo muestra la figura 1.

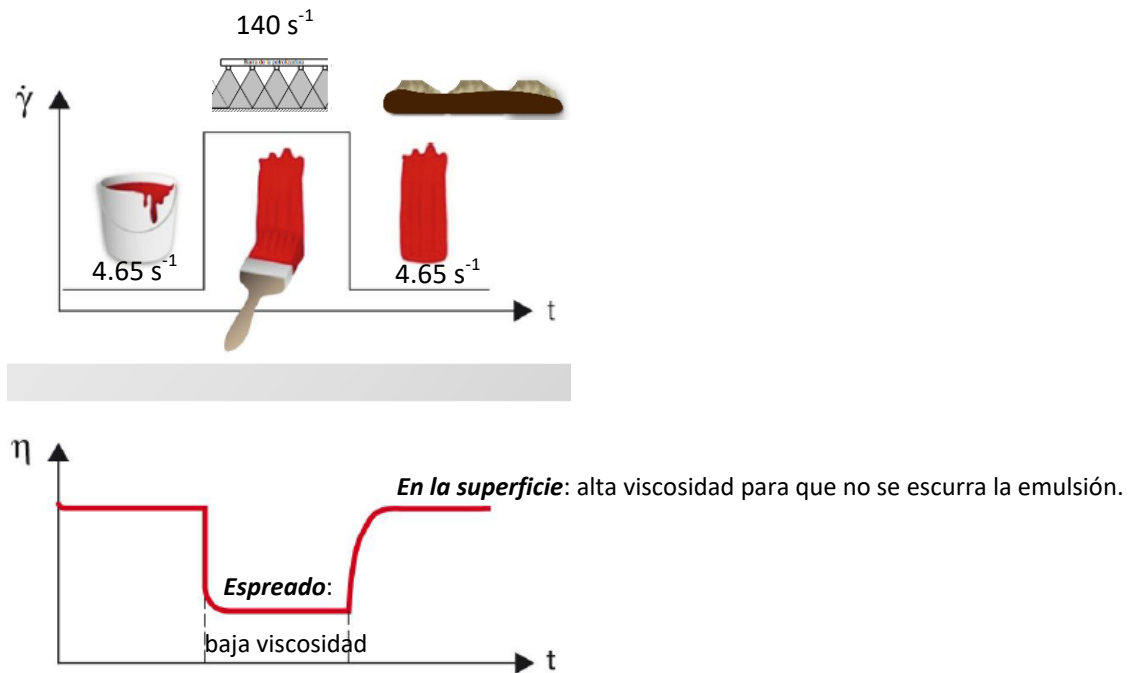


Figura 1.- Diferentes viscosidades de una pintura dependiendo de la etapa de aplicación y su comparación con una emulsión asfáltica para la aplicación de riego de sello con gravilla.

Este nuevo ensayo que contempla el ejemplo de la figura 1 consiste en checar la viscosidad de la emulsión en 3 etapas utilizando un viscosímetro rotacional, en la primera etapa se checa la viscosidad de la emulsión a una velocidad de deformación de 4.65 s^{-1} (5 rpm) durante 15 minutos, en la segunda etapa se checa la viscosidad de la emulsión a una velocidad de deformación de 140 s^{-1} (150 rpm) durante 5 minutos para simular el proceso del comportamiento de la emulsión al salir de las espreas de la barra irrigadora y en la tercera etapa se checa la viscosidad de la emulsión a una velocidad de deformación de 4.65 s^{-1} (5 rpm) durante 5 minutos 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 después tener contacto con la gravilla y reaccionar químicamente originándose el rompimiento de la emulsión.

Las especificaciones propuestas para estas etapas deben de realizarse a la temperatura de 60°C puesto que a esta temperatura se aplican las emulsiones asfálticas empleadas en los riegos de sello con gravilla y la especificación en la etapa dos que simula la salida de la emulsión de las espreas de la barra irrigadora deberá de tener una viscosidad máxima de 400 cP (0.400 Pa s) y la especificación en la etapa tres que simula el proceso de comportamiento de escurrimiento de la emulsión se sugiere una viscosidad mínima de 50 cP (0.050 Pa s).

Como podemos observar el método de prueba y las especificaciones mencionadas anteriormente contemplan variables que antes no se habían detectado y es por ello que antes de ser una especificación formal vale la pena estudiar y analizar las mismas dado que personalmente pienso que a este método le

falta contemplar el tiempo en que se logra conseguir la viscosidad máxima de la etapa tres, es decir, la medición de la tixotropía de la emulsión y lo comparo esto con la acción de poner salsa de tomate dulce sobre unas papas fritas, la salsa debe de tener una viscosidad muy baja cuando comprimimos la botella (aplicación del esfuerzo) para que salga la salsa con facilidad pero al caer la salsa en la papa debe de tener suficiente viscosidad para que no se escurra y esto debe de lograrse en el menor tiempo posible y si esto pasa entonces decimos que la salsa dulce de tomate tiene un bajo poder tixotrópico pero susceptible al esfuerzo cortante, es decir la emulsión asfáltica para esta aplicación debe de ser un fluido Pseudoplástico.

La razón por la cual disminuye la viscosidad de la emulsión en la etapa dos que simula la salida de la emulsión de las espreas de la barra irrigadora es porque los glóbulos de asfalto emulsionados cambian su forma debido a la alta velocidad d deformación, en la figura 2 podemos apreciar este cambio de la forma del glóbulo del asfalto que a muy baja velocidad de deformación (0.01 a 0.1 s⁻¹) tiene la forma muy parecida a una esfera y conforme aumentamos la velocidad de deformación la forma va cambiando hasta tomar la forma de una elipse ocasionando que la viscosidad disminuya, tal como si un balón de fútbol soccer cambiara a la forma de un balón de fútbol americano que viaja a mayor velocidad por tener menos fricción con el aire.

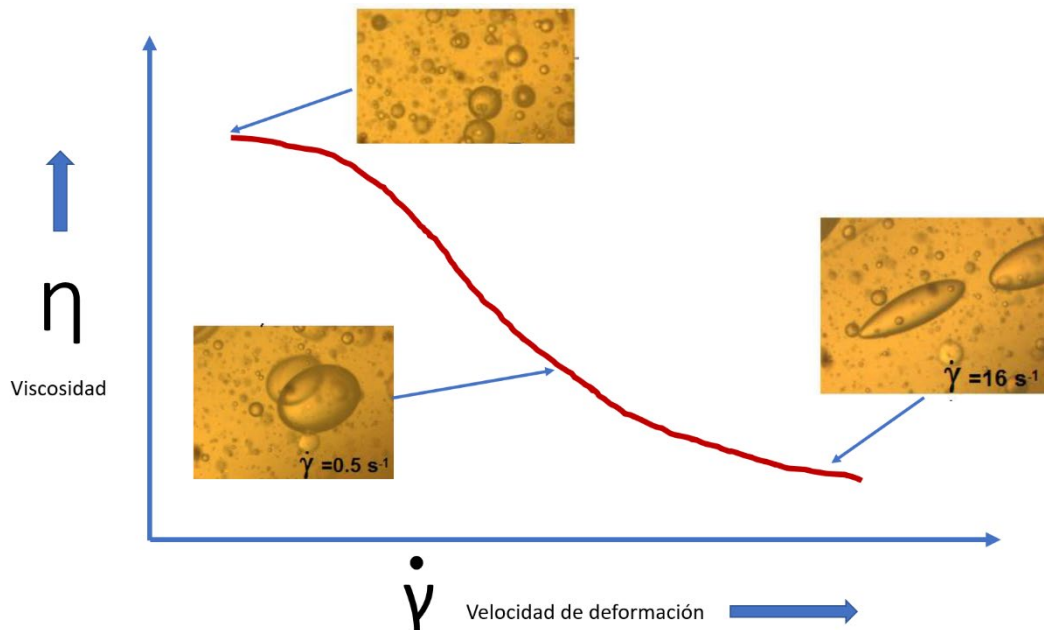


Figura 2.- Variación de la viscosidad de la emulsión debido al cambio de forma de la partícula generado por la aplicación de una alta velocidad de deformación.

Por lo que respecta a los nuevos métodos de prueba sobre el residuo de las emulsiones asfálticas estos están basados en controlar las propiedades reológicas del mismo para tratar de resolver los principales problemas que se presentan en las aplicaciones del riego de sello con gravilla y el microaglomerado en frío (Microsurfacing según NCHRP).

Los principales problemas que se presentan en la aplicación del riego de sello con gravilla son el sangrado (bleeding) y la pérdida del agregado (raveling). Para controlar estos problemas se desarrollaron los nuevos métodos de prueba mostrados en la tabla 2.

Problema a resolver	Método de prueba	Parámetro de control
Sangrado (alta temperatura del pavimento)	Multiple Stress Creep and recovery (AAHSTO 350)	Non-recoverable Creep Compliance, J_{nr}
Pérdida de la grava (baja temperatura del pavimento)	Dynamic Shear Rheometer Frequency Sweep Test	Dynamic Shear Modulus (G^*) at $\delta_{critical}$

Tabla 2.- Nuevos métodos de prueba del residuo de las emulsiones asfálticas para riegos de sello con gravilla

Los principales problemas que se presentan en la aplicación de microaglomerados (Microsurfacing según NCHRP) son el sangrado (bleeding) y la aparición de roderas (deformación permanente, rutting) y estos ocurren a la temperatura más alta del pavimento que según el lugar de la aplicación será el valor de la gravedad del mismo. El otro problema observado es la formación de grietas transversales en el pavimento debido a la contracción del asfalto a bajas temperaturas en el pavimento. Para controlar estos problemas se desarrollaron los nuevos métodos de prueba mostrados en la tabla 3.

Problema a resolver	Método de prueba	Parámetro de control
Sangrado y Rodera (alta temperatura del pavimento)	Multiple Stress Creep and recovery (AAHSTO 350)	Non-recoverable Creep Compliance, J_{nr}
Grietas transversales (baja temperatura del pavimento)	Dynamic Shear Rheometer Frequency Sweep Test	Dynamic Shear Modulus (G^*) at $\delta_{critical}$

Tabla 3.- Nuevos métodos de prueba del residuo de las emulsiones asfálticas para microaglomerados

Los parámetros de control del residuo de la emulsión de estos nuevos métodos de prueba tanto para el riego de gravilla como para el microaglomerado son los mismos, a altas temperaturas el parámetro para controlar el sangrado (bleeding) es el J_{nr} (Compliance) y a bajas temperaturas para el controlar que la grava no se desprenda y para que en el microaglomerado no se formen grietas transversales el parámetro es el Dynamic Shear Modulus (G^*) “Módulo Complejo de Corte Dinámico” en función del “Delta crítico” ($\delta_{critical}$).

Para explicar estos parámetros reológicos 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 1×10^3 Pascales a 64°C, un módulo aproximado de 1×10^6 Pascales a 25°C y un módulo aproximado de 1×10^8 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.

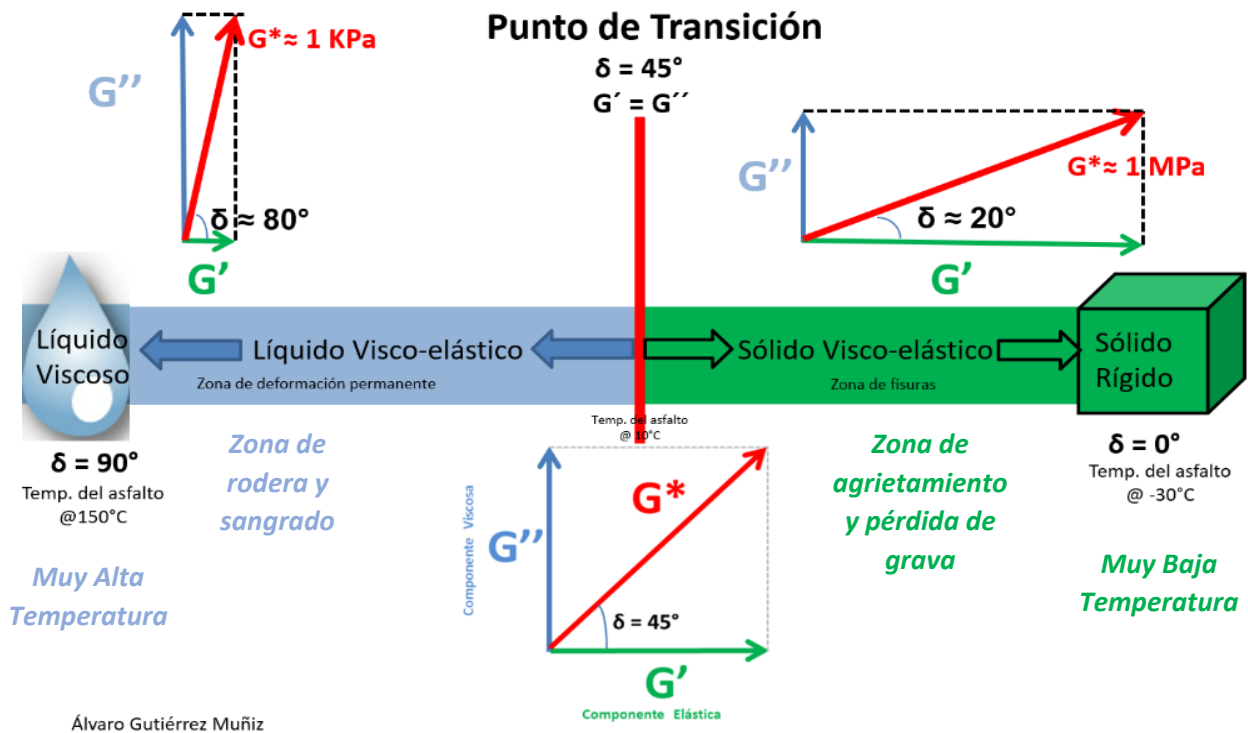


Figura 3.- Propiedades reológicas del asfalto en función de la temperatura y a frecuencia constante

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 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 estresemos el asfalto se debe de definir a que temperatura y frecuencia fue realizado. Dijimos que un ensayo a bajas

frecuencias equivale a altas temperaturas y un ensayo a altas frecuencias equivale a bajas temperaturas y por lo tanto podemos hacer un ensayo a temperatura constante pero variando la frecuencia (barrido de frecuencia) creando una curva que comenzará con un módulo de corte "G*" bajo por estar a una baja frecuencia y terminará con un módulo más alto a alta frecuencia y a este ensayo se le conoce como Frequency Sweep Test (barrido de frecuencia) a temperatura constante y ahora podemos entender el nuevo método de prueba para evaluar a bajas temperaturas ya sea para la pérdida del agregado en el riego de sello como para el agrietamiento transversal en el microaglomerado y lo que se hace en este método utilizando una deformación del 1%, es hacer un barrido de frecuencia de 0.1 a 100 rad/seg a 15°C y otro barrido de frecuencia a 5°C y una vez obtenidas las dos curvas (isotermas) entonces se desplaza la curva de 5°C hasta tocar la curva de 15°C creando una sola curva (curva maestra) en función de una frecuencia reducida, esta curva se hace tanto para el módulo de corte complejo "G*" como para el ángulo de fase "δ" y se ajusta al modelo matemático de Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM), entre más alto sea el módulo de corte el asfalto será más rígido y la probabilidad de perder el agregado es mayor así como a menor ángulo de fase por lo que mediante numerosas pruebas se determinó un ángulo de fase crítico en función de la temperatura mínima del pavimento tanto para la aplicación de riego de sello con gravilla como para el microaglomerado:

Ángulo de fase crítico para riego de Sello

<i>Temperatura mínima del pavimento (°C)</i>	<i>Ángulo de fase crítica $\delta_{critical}$</i>
-7	54
-13	51
-19	48
-25	45
-31	42
-37	39

Ángulo de fase crítico para microaglomerado

<i>Temperatura mínima del pavimento (°C)</i>	<i>Ángulo de fase crítica $\delta_{critical}$</i>
-7	50
-13	48
-19	46
-25	44
-31	42
-37	40

Una vez que tenemos el dato del ángulo de fase crítico en función de la mínima temperatura del pavimento obtenido de las anteriores tablas, lo colocamos en la curva maestra donde está graficado el G* y δ vs la frecuencia reducida y con el modelo Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM) obtenemos el valor del módulo complejo cuyos parámetros para el riego de sello con gravilla y microaglomerado serían:

Especificaciones para control de pérdida de agregado en el riego de sello con gravilla a bajas temperaturas

Prueba	Parámetro	Nivel de tránsito	Temperatura	Especificación
DSR Frequency Sweep (barrido de frecuencia)	Módulo de corte G*	Bajo	5°C y 15°C	< 30 MPa
		Medio		< 20 MPa
		Alto		< 12 MPa

Especificaciones para control de la fisuración térmica a baja temperatura de los microaglomerados

Prueba	Parámetro	Nivel de tránsito	Temperatura	Especificación
DSR Frequency Sweep (barrido de frecuencia)	Módulo de corte G*	Bajo	5°C y 15°C	16 MPa
		Medio		
		Alto		

Por lo que respecta a lo que le sucede al asfalto a altas temperaturas en el pavimento donde al aplicarle un esfuerzo este fluye y no regresa a su forma original surgiendo el problema en los riegos de sello con gravilla del sangrado (migración del asfalto a la superficie a los pocos días de ser aplicado y en inglés este fenómeno se le conoce como “bleeding”) y en los microaglomerados también puede surgir este sangrado así como el problema de la formación de roderas. Para resolver estos problemas de sangrado y rodera es necesario que al residuo de la emulsión le evaluamos un parámetro que nos permita controlar los mismos que claro está que estarán en función de la temperatura más alta del pavimento y esto dependerá del lugar dónde sea aplicado. El parámetro de este nuevo método de prueba para controlar que el residuo de la emulsión no fluya a altas temperaturas tanto para el riego de gravilla como para el microaglomerado es el mismo y es el “Jnr” (Non-recoverable Creep Compliance) cuya traducción de la palabra Compliance del inglés al español es “Cumplimiento” y esta traducción no nos da una idea clara de este parámetro por lo que es necesario explicar esta propiedad reológica para poder dar una traducción enfocada al comportamiento del asfalto al someterse a un esfuerzo a altas temperaturas.

Compliance (J) es la recíproca del módulo de corte complejo (G*), por lo que primeramente explicaremos como determinamos el módulo de corte complejo G* del asfalto que resulta de la división del esfuerzo cortante aplicado cuyas unidades en el sistema internacional son Newton sobre metro cuadrado (Pascal) entre la deformación unitaria (sin unidades). Como ya se había mencionado anteriormente el asfalto bajo estrés exhibe un comportamiento visco-elástico, es decir, 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'') y para poder obtener estas propiedades debemos de utilizar un reómetro de corte dinámico “DSR” (Dynamic Shear Rheometer) que al hacer un movimiento oscilatorio aplica un esfuerzo cortante al asfalto deslizando una capa molecular sobre otra tal como lo muestra la figura 4.

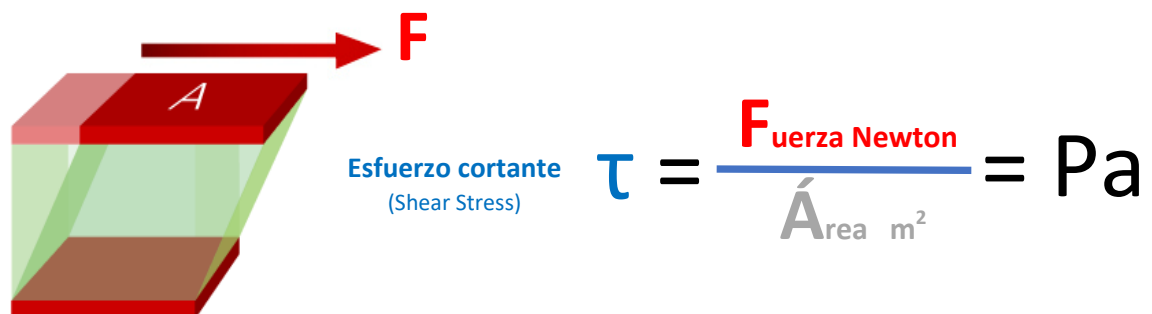


Figura 4.- Estrés aplicado al asfalto utilizando un esfuerzo cortante “τ”

Al aplicar el esfuerzo cortante al asfalto ocurre una deformación cortante unitaria sin unidades ya que es el resultado de la división del desplazamiento entre la distancia entre platos tal como lo muestra la figura 5.



Figura 5.- Deformación del asfalto “γ” al aplicarle un esfuerzo cortante “τ”

El módulo de corte complejo G^* resulta de la división del esfuerzo cortante aplicado al asfalto entre su deformación cortante obtenida, por lo que su unidad es el Pascal. La prueba se lleva a cabo utilizando el DSR y colocando una capa delgada de ligante asfáltico entre dos platos metálicos de 25 mm de diámetro (pueden ser otros diámetros cuya selección está en función de la capacidad del torque máximo del equipo ya que a mayor diámetro mayor torque) 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 el 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 6, la rapidez con la que se realiza este ciclo es la frecuencia de tal forma que si este ciclo se realiza en un segundo la frecuencia será de un Hertz o 6.28 radianes por segundo que son la unidades del sistema internacional para la frecuencia.

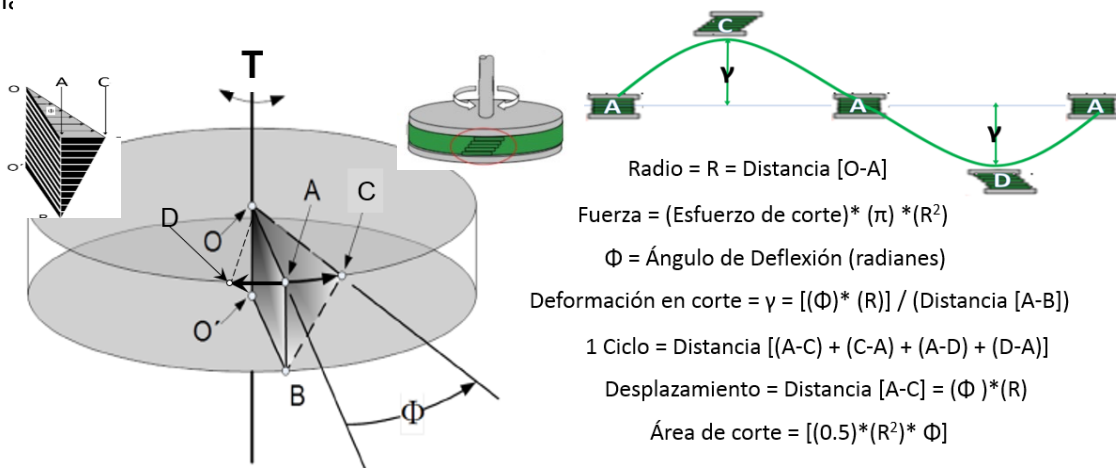


Figura 6.- Movimiento del plato superior del DSR provocando un esfuerzo y deformación cortante.

El movimiento del plato superior genera un patrón de carga sinusoidal que se utiliza para determinar el módulo de corte complejo "G*" del asfalto, ya que el esfuerzo y la deformación cortante máxima ocurren en el punto "C" y el punto "O" ilustrados en la figura 6 y en estos puntos es calculado G* al dividir el esfuerzo cortante máximo en Pascales, entre la deformación unitaria máxima, también se calcula el ángulo de fase que resulta del tiempo de respuesta de la deformación después de haber sido aplicado el esfuerzo de tal forma que un sólido puramente elástico tendrá un ángulo de fase de cero ya que inmediatamente que se aplica el esfuerzo inmediatamente se deforma y cuando se deja de aplicar el esfuerzo inmediatamente regresa a su forma original, en cambio para un líquido puramente viscoso con un ángulo de fase de 90 grados el tiempo de respuesta es infinito ya que nunca se recuperará la forma original del asfalto. La siguiente figura 7 muestra el patrón de carga sinusoidal del esfuerzo cortante aplicado en conjunto con el desfase de la deformación.

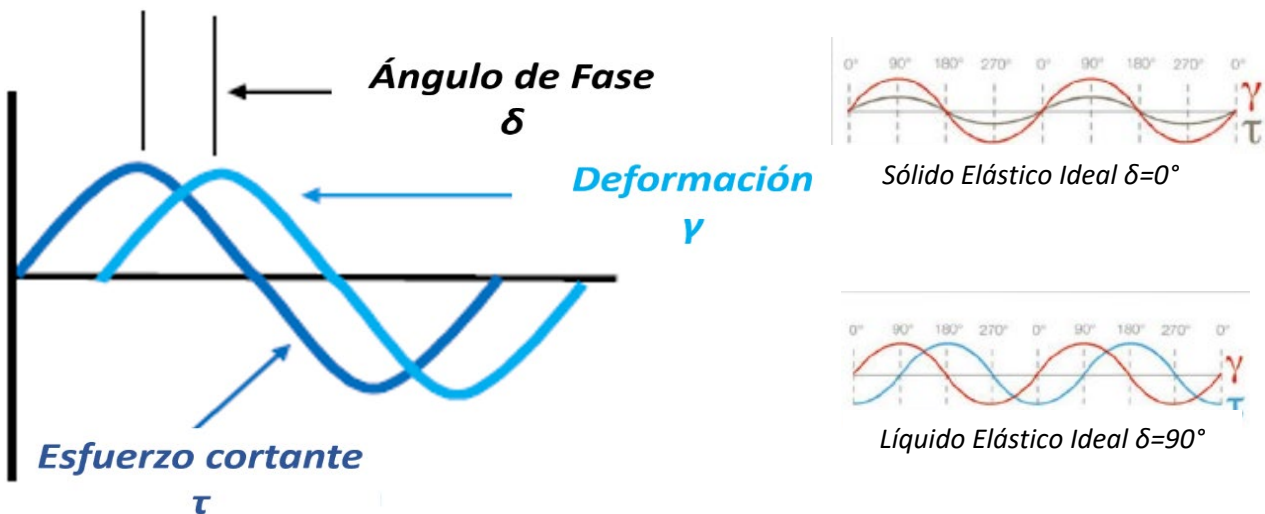


Figura 7.- Patrón de carga sinusoidal del esfuerzo cortante aplicado en conjunto con el desfase de la deformación.

Empleando la combinación de números reales, imaginarios y complejos es posible encontrar el comportamiento matemático de este patrón sinusoidal y su desfase y de una forma sencilla podemos explicar el módulo de corte complejo y sus componentes elástica y viscosa como un sistema de vectores mostrados en la figura 8, donde la componente elástica o módulo elástico o módulo de

almacenamiento de la energía que se utiliza para que el asfalto recupere su forma original después de haber sido deformado por un esfuerzo está localizado en el eje de los números reales y la componente viscosa o módulo viscoso o módulo de pérdida de energía en forma de viscosidad debido a la fricción entre sus moléculas está localizado en el eje de los números imaginarios de tal forma que la suma del módulo elástico al cuadrado más el módulo viscoso al cuadrado es igual al módulo de corte complejo al cuadrado localizado como vector complejo de la combinación de un número imaginario y un número real y el ángulo de fase o desfaseamiento del tiempo de respuesta sería en ángulo formado entre ellos.

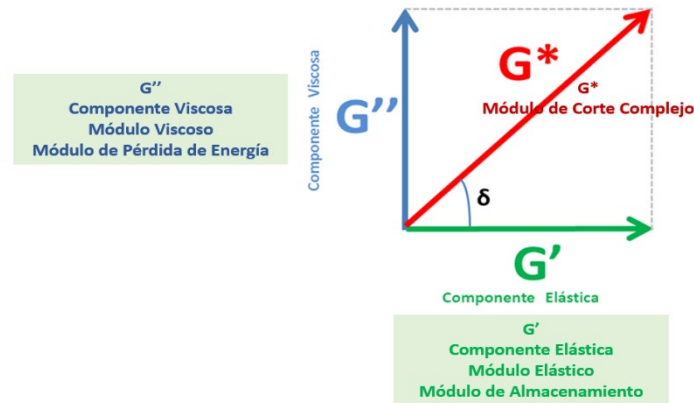


Figura 8.- Representación vectorial del Módulo de Corte Complejo, Módulo Elástico, Módulo Viscoso y ángulo de fase.

A las temperaturas altas en el pavimento el asfalto presenta un módulo de corte complejo menor a un kilo Pascal y un ángulo de fase cercano a los 90 grados indicándonos que el asfalto se comporta muy parecido a un líquido viscoso que ante un esfuerzo se deformará y no recuperará su forma original y relacionando esto con la aplicación del riego de sello con gravilla donde uno de los problemas principales es el sangrado (bleeding) (ver tabla 2) que es la migración del asfalto a la superficie a los pocos días de ser aplicado decimos que esto es debido a que el asfalto tiene un bajo valor de módulo de corte complejo y un ángulo de fase cercano a 90 grados y en la aplicación de microaglomerado también se observa este sangrado así como la formación de roderas (rutting) (ver tabla 3) debido a lo mismo. El parámetro de control de este nuevo método de prueba del residuo de la emulsión a altas temperaturas tanto para el riego de gravilla como para el microaglomerado es el mismo y es el “Jnr” (Non-recoverable Creep Compliance) y no es el módulo de corte complejo o el ángulo de fase.

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 por lo que indica la plasticidad del ligante y no la flexibilidad, es por ello que para este ensayo el Compliance se especifica con la letra jota mayúscula y con el subíndice nr (deformación no

recuperada) “ J_{nr} ”. En la figura 9 podemos apreciar la gráfica donde se aplica un esfuerzo durante un determinado tiempo obteniendo una deformación y después de un tiempo de relajación se obtiene una deformación recuperada y otra no recuperada.

Entre más bajo sea este valor de “ J_{nr} ” 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 “ J_{nr} ” para que sea resistente a la deformación permanente (plástica).

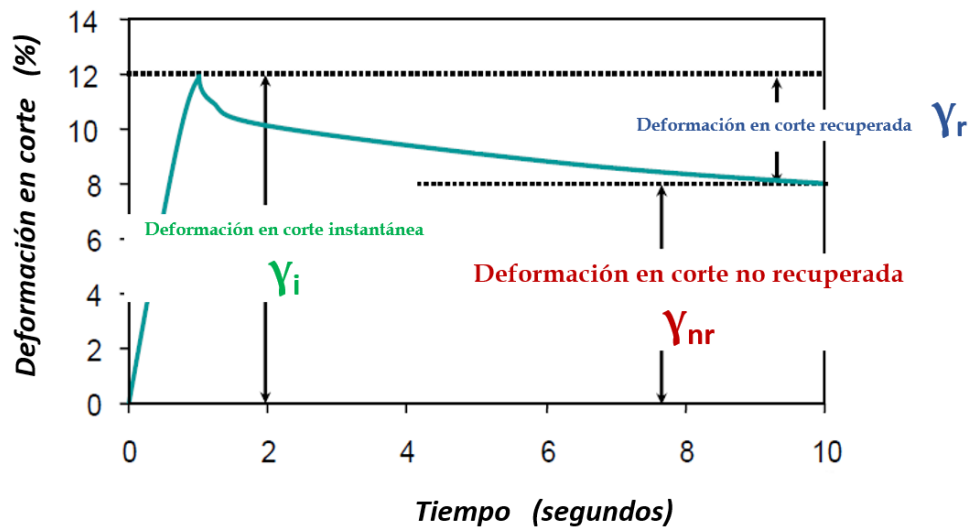


Figura 9.- Aplicación del esfuerzo cortante en forma de Creep durante un segundo obteniendo una deformación instantánea y después de 9 segundos se mide una deformación recuperada y una deformación no recuperada utilizada para el cálculo del J_{nr} .

La traducción del inglés al español de la palabra “Compliance” es “Cumplimiento” pero esta traducción enfocada a las propiedades reológicas de los materiales estaría mal empleada, por lo que en base a lo anteriormente explicado sugiero traducirla como “Plasticidad” ya que está basada en la deformación no recuperada.

El método de prueba AASHTO T350 “Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer”, calcula el valor de Compliance (Plasticidad) “ J_{nr} ” del ligante asfáltico aplicando un esfuerzo en forma de “Creep” con una magnitud de 100Pa y otro con 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 “ J_{nr} ” 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 J_{nr} para cada esfuerzo a la temperatura de prueba que será la temperatura máxima del pavimento del lugar específico donde se colocará el tratamiento.

La especificación sugerida de Jnr “Compliance” (Plasticidad) para que en el riego de selo con gravilla no exista la posibilidad de sangrado bleeding) estará en función del tráfico y de la temperatura alta máxima del pavimento cumpliendo el valor Jnr mostrado en la siguiente tabla:

<i>Tipo de Tráfico</i>	<i>Máximo valor de Jnr utilizando 3200 Pa de esfuerzo cortante a la temperatura más alta del pavimento</i>
Bajo	8 Pa ⁻¹
Medio	5.5 Pa ⁻¹
Alto	3.5 Pa ⁻¹

La especificación sugerida de Jnr “Compliance” (Plasticidad) para que en el microaglomerado en frío no exista la posibilidad de sangrado (bleeding) o formación de rodera (rutting) estará en función del tráfico y de la temperatura alta máxima del pavimento cumpliendo el valor Jnr mostrado en la siguiente tabla:

<i>Tipo de Tráfico</i>	<i>Máximo valor de Jnr utilizando 3200 Pa de esfuerzo cortante a la temperatura más alta del pavimento</i>
Bajo	5 Pa ⁻¹
Medio	1.5 Pa ⁻¹
Alto	1.5 Pa ⁻¹

Como podemos observar, todos estos nuevos métodos de prueba, así como sus especificaciones continúan siendo estudiadas para poder usarse en forma definitiva y son un indicativo del grado de innovación que debemos aplicar en las emulsiones asfálticas dado que sin duda alguna son una excelente alternativa ecológica que podemos utilizar en la construcción de pavimentos flexibles. Espero y deseo que esta información sea de utilidad y motivación para seguir estudiando para perfeccionar nuestras queridas emulsiones.