

IAG272-01-2013
EVOLUCIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE EMULSIONES
ASFÁLTICAS
AVALIAÇÃO DO USO DE EMULSÕES FUNCIONALIZADA NA
RECUPERAÇÃO DE PAVIMENTOS DE PROFUNDIDADE

Sergio Serment Moreno
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León
San Nicolás de los Garza, México
sergio.sermentmr@uanl.edu.mx

Moisés Hinojosa Rivera
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León
San Nicolás de los Garza, México
hinojosamoises@yahoo.fr

Rosita Martínez Arroyo
SEM Materials
Cholula, México
rmartinez@semgroupcorp.com

Edgar Reyes Melo
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León
San Nicolás de los Garza, México
reyesmeloedgar@yahoo.fr

Resumen

Las emulsiones asfálticas presentan una alternativa segura y sustentable para los trabajos de construcción y conservación de vías terrestres. Ha pasado ya más de un siglo desde que aparecieron las emulsiones en el mercado, sin embargo en México su uso se ha visto mermado debido a la falta de normativa y conocimiento. Una de las desventajas del uso de emulsiones asfálticas es que requieren un tiempo finito de curado, lo que genera retrasos en el proceso constructivo. Actualmente las emulsiones asfálticas se clasifican de acuerdo a su índice de ruptura, sin embargo no se ha encontrado una correlación directa entre el índice de ruptura y el rompimiento en campo. Es por esto que en este trabajo se presentan los avances de un estudio acerca de cómo cambia el comportamiento reológico de una emulsión, producto del proceso de rompimiento de la misma, al ser sometidas a condiciones controladas de curado. Se analizaron seis emulsiones de rompimiento lento de diferente composición.

Resumo

As Emulsões asfálticas são uma alternativa segura e sustentável para as obras de construção e manutenção de estradas. Já faz mais de um século desde que as emulsões apareceram no mercado, apesar de que em México, seu uso tem sido prejudicado devido à falta de regras e de

conhecimento. Uma desvantagem do uso de emulsões de betume é que eles requerem um tempo de cura limitado, o que causa atrasos no processo de construção. Emulsões asfálticas são atualmente classificados de acordo com seu índice de ruptura, no entanto, não se há encontrado uma correlação direta entre a taxa de ruptura e a quebra no local utilizado. É por isso que neste artigo apresentamos o progresso de um estudo de como mudar o comportamento reológico de uma emulsão, produto do processo de ruptura do mesmo, quando submetidas a condições controladas de cura. Se analisou seis emulsões de quebra lenta de composições diferentes

INTRODUCCIÓN

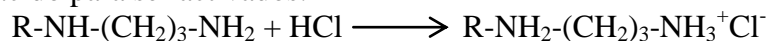
Emulsiones Asfálticas

Emulsificar el asfalto permite que se almacene por un largo tiempo y que sea fácil de bombear, transportar y aplicar a temperatura ambiente. Esto hace que las emulsiones sean ideales para ser usadas en lugares lejanos y ahorrar energía y proveer condiciones de trabajo más seguras, además de que tienen un menor impacto ambiental. Una emulsión se define como un sistema heterogéneo con dos o más fases líquidas consistiendo de una fase líquida continua y al menos una segunda fase líquida dispersa en la primera en forma de gotas finas (Ossols, 2010). Dos líquidos no miscibles, como el asfalto y el agua, por definición no tienen afinidad el uno con el otro de manera que se repelen. El estado más natural de una mezcla de dos líquidos inmiscibles es estar completamente disociados. Esto implica que necesitan una acción externa para mantener los dos líquidos en forma de emulsión (Atkins & De Paula, 2010). Para formar una emulsión primero se debe fragmentar en gotas finas el líquido que será dispersado, esto se puede lograr por medio de la aplicación de energía mecánica, después hay que estabilizar las gotas formadas, para lo cual se utilizan uno o varios agentes tensoactivos también conocidos como emulsionantes o surfactantes. Estos agentes son moléculas anfipáticas; esto es, presentan dos afinidades, una parte de la molécula es lipofílica y la otra hidrofílica. Las emulsiones son entonces sistemas termodinámicamente inestables.

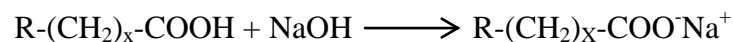
Las emulsiones asfálticas normalmente presentan la siguiente composición (Ossols, 2010):

- Asfalto 40-70%
- Agua 30-50%
- Solvente 0-15%
- Emulsionante 0.2-0.35
- Polímero 0-3%

Los emulsionantes utilizados pueden ser carácter aniónico o catiónico. Para que estos presenten actividad superficial en la emulsión, y cumplan su función de estabilizarla, requieren ser activados. Los emulsionantes catiónicos usados más comúnmente son aminas de diferentes tipos y requieren de un ácido para ser activados:



Sus homólogos aniónicos son normalmente ácidos carboxílicos y requieren de una base para su activación:



De esta manera, la parte de la molécula que está cargada quedará en contacto con la fase continua (agua) y la otra parte quedará orientada hacia el interior de los glóbulos de asfalto. Esto conferirá a los glóbulos, también conocidos como micelas, una carga superficial que es la responsable de la

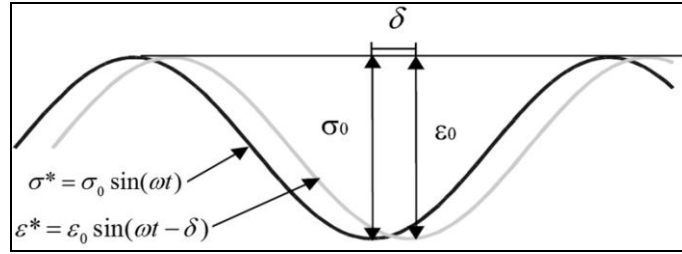
estabilidad de las emulsiones. A pesar de su ya mencionada inestabilidad termodinámica, muchas emulsiones son cinéticamente estables o no lábiles, esto es, no presentan cambios significativos por un periodo prolongado de tiempo debido a que la barrera energética que previene la formación de agregados de las partículas dispersas es suficientemente alta. Dicha barrera energética es gobernada por las fuerzas de repulsión electrostática que existen entre las micelas debido a que poseen la misma carga superficial (positiva o negativa). Entonces el tiempo de vida de las emulsiones está en función de la cinética de los mecanismos por los que una emulsión rompe o se separa en sus fases iniciales (Leal-Calderon, Schmitt, & Bibette, 2007; Tadros, 2009, 2010). En el caso de las emulsiones asfálticas, se necesita que tengan un tiempo de vida determinado que asegure su almacenamiento, transporte y aplicación, pero que a su vez, no sea tan prolongado ya que son fabricadas con el objetivo de que rompan después de ser aplicadas.

Las emulsiones asfálticas son clasificadas como aniónicas o catiónicas en base al tipo de emulsionante utilizado. También se clasifican en base a su estabilidad como emulsiones rápidas, medias, lentas o superestables, cada una de ellas utilizadas para diferentes aplicaciones. Las emulsiones de rompimiento lento, como su nombre lo dice tienen una alta estabilidad cinética lo que permite tiempos de mezclado y almacenamiento prolongados. Gracias a esto las emulsiones de rompimiento lento pueden ser utilizadas en la fabricación de mezclas para base asfáltica, entre otras variadas aplicaciones. Sin embargo, esta alta estabilidad resulta en desventaja ya que genera retrasos debido a que la emulsión requiere un tiempo finito de curado para que esta rompa. Para poder determinar si una emulsión catiónica es rápida, media, lenta o superestable, en México se sigue el método de prueba M-MMP-4-05-019/02. Dicho método se basa en determinar la cantidad de material fino sílico, necesario para hacer romper 100g de emulsión asfáltica catiónica. Sin embargo, no se ha encontrado una correlación directa entre el índice de ruptura y la ruptura real en campo. Es por esto que este trabajo tiene como objetivo el estudio del cambio en las propiedades reológicas de emulsiones catiónicas de rompimiento lento. Dicho cambio en el comportamiento mecánico es producto del proceso de rompimiento de las emulsiones al ser sometidas a condiciones controladas de curado.

Reología

La reología es la ciencia que estudia el flujo y la deformación. Para poder estudiar estas dos propiedades es necesario medir la viscosidad y la elasticidad. La viscosidad es la medida relativa de las fuerzas que se oponen al flujo y la elasticidad es la capacidad de un material para regresar a su estado de equilibrio cuando se deja de aplicar una carga perturbadora. Cuando un cuerpo es sometido a una carga mecánica, en él se genera una respuesta que consta de un esfuerzo y una deformación. Ambos son tensores de segundo orden y consideran un volumen infinitesimalmente pequeño en el cuerpo. Como se mencionó anteriormente el asfalto es un material viscoelástico. La viscoelasticidad es la combinación o superposición de propiedades elásticas y viscosas. Una manera de estudiar el comportamiento viscoelástico de un material es sometiéndolo a un estímulo sinusoidal (Figura 1).

Figura 1 Estímulo sinusoidal



De la respuesta del material a dicho estímulo oscilatorio se puede obtener el módulo dinámico o módulo complejo; esto es, un número complejo que relaciona el esfuerzo y la deformación para materiales viscoelásticos lineales sometidos a la aplicación continua de una fuerza sinusoidal en el espacio frecuencial. Se define como la relación entre la amplitud de un esfuerzo sinusoidal σ^* y la amplitud de una deformación sinusoidal ϵ^* (ambos a un tiempo t y frecuencia angular ω). Por lo tanto las propiedades mecánicas del material serán dependientes de la frecuencia de aplicación de carga y de la temperatura (Goodwin & Hughes, 2008; Tadros, 2010; Zhu, Sun, Yang, Chen, & Gu, 2011).

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\epsilon^*} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\epsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}} = \frac{\sigma_0 \sin \omega t}{\epsilon_0 \sin(\omega t - \phi)} \quad (1)$$

El módulo dinámico se puede deconvolucionar en sus dos componentes:

$$E^* = E' + iE'' \quad (2)$$

La parte real E' representa la parte elástica del material y es proporcional a la energía almacenada en el mismo durante un ciclo de carga.

$$E' = |E^*| \cos \delta \quad (3)$$

La parte imaginaria E'' es una medida relativa de la energía disipada durante un ciclo carga. Representa, por ejemplo, la energía perdida en forma de calor y es una medida de la energía vibracional de las moléculas que ya no puede ser recuperada.

$$E'' = |E^*| \sin \delta \quad (4)$$

Entonces, E' y E'' son usados para evaluar las propiedades elásticas y viscosas respectivamente del material.

El ángulo de fase δ que se indica en la Figura 1 es la diferencia entre la aparición del esfuerzo y la deformación en un material viscoelástico sometido a oscilaciones sinusoidales. Un fluido 100% newtoniano presentará un ángulo de fase de 90° , mientras que un sólido 100% elástico no presentará ángulo de fase ya que su respuesta ante un estímulo mecánico es inmediata. La tangente del ángulo de fase es la razón entre el módulo de pérdida (E'') y el módulo de

almacenamiento (E'). Es una medida de la energía perdida, expresada en términos de energía recuperable y representa la fricción interna de un sistema viscoelástico (Menard P, 2008a, 2008c, 2008d).

Principio de Superposición Tiempo-Temperatura

Como se mencionó ya, el comportamiento mecánico de un material viscoelástico es dependiente del tiempo (frecuencia) y la temperatura. Por ejemplo, cuando el asfalto es sometido a una carga constante, la deformación aumentará después de un cierto periodo de tiempo. Esto ocurre debido a que el material experimenta un reajuste molecular que tiene como objetivo minimizar los esfuerzos localizados. El principio de superposición de tiempo-temperatura (TTSP por sus siglas en inglés) se basa en que los procesos involucrados en la relajación o el reajuste molecular en los materiales viscoelásticos ocurren a velocidades mayores a altas temperaturas y que existe una equivalencia directa entre el tiempo de carga y la temperatura. Este principio establece que el efecto sobre las propiedades mecánicas de un material al aumentar el tiempo de carga (disminuir la frecuencia) es equivalente al efecto de aumentar la temperatura. De acuerdo a este principio podemos decir que el asfalto se comporta más como un material viscoso a temperaturas altas o frecuencias bajas y más como un material elástico a temperaturas bajas o frecuencias altas. En base a este principio, es posible calcular un factor de desplazamiento $a_{(T)}$ que puede ser usado para predecir las propiedades de un material viscoelástico a temperaturas o frecuencias a las cuales sería difícil o imposible ensayarlo. Si se grafican las curvas de un parámetro medido del material contra el tiempo de aplicación de carga en escala logarítmica a diferentes temperaturas, dichas curvas pueden superponerse usando el factor de desplazamiento. De esta manera tenemos que el factor de desplazamiento está dado por:

$$a_{(T)} = \frac{t}{t_r} \quad (5)$$

Donde t es el tiempo de carga y t_r es el tiempo de carga a la temperatura de referencia. También se ha encontrado que el parámetro de desplazamiento se puede definir por medio de una ecuación de tipo Arrhenius:

$$\log a_{(T)} = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (6)$$

Donde E_a es la energía de activación que está relacionada con los movimientos moleculares del material y es independiente de la temperatura, R es la constante de los gases ideales 8.314J/molK, T es la temperatura de interés y T_0 es la temperatura de referencia. Entonces si se realizan barridos de frecuencia a diferentes temperaturas es posible calcular el factor de desplazamiento $a_{(T)}$ y utilizando la ecuación de Arrhenius es posible calcular la energía de activación (Alwis & Burgoyne, 2006; Gunasekaran & Mehmet Ak, 2002; Menard P, 2008b, 2008e, 2008f; Wiczak & Bari, 2004). Basándonos en estos principios es que se planea observar el cambio de la energía potencial con respecto a los tiempos de curado a los que son sometidas las emulsiones asfálticas.

SECCIÓN EXPERIMENTAL

Materiales y Métodos

Se fabricaron seis emulsiones catiónicas de rompimiento diferentes usando 1.8% de un mismo emulsionante de tipo amino y alrededor de 65% asfalto AC-20 de un mismo lote de la refinería de Salina Cruz en Oaxaca, México. Al asfalto de tres emulsiones se le agregó un aditivo de tipo orgánico para aumentar su grado de penetración. Además de esto a cuatro emulsiones se les añadió estireno-butadieno (SB) lineal de bajo peso molecular, de las cuales en dos se añadió directamente en el asfalto y en dos se adicionó en forma de latex. En la Tabla 1 se muestra la adición de polímero y de aditivo orgánico y el nombre de las emulsiones utilizadas.

Tabla 1 Adición de polímero y aditivo orgánico a las emulsiones

Nombre	Aditivo orgánico (Aumentar penetración)	Polímero SB
ECL60-90P	No	No
ECL65-110P	Si	No
ECL60-90PL	No	Latex
ECL65-110PL	Si	Latex
ECL60-90PS	No	Asfalto
ECL65110PS	Si	Asfalto

Se le realizaron a cada una de las emulsiones las pruebas de calidad pertinentes de acuerdo a la norma N-CMT-4-05-001/06 de la SCT.

Para el estudio de la evolución de las propiedades reológicas de las emulsiones se eligieron tres temperaturas de curado: 30, 40 y 50°C. Se eligieron así ya que son temperaturas que las emulsiones pueden alcanzar en condiciones de campo. Se fabricaron moldes de caucho silicón con 5 cavidades de 30mm de diámetro y 5mm de profundidad. Se vaciaron 2.5g de emulsión en cada cavidad de diez moldes los cuales después fueron colocados dentro de una incubadora Digitherm DT2-MP para someter las emulsiones al curado controlado. Cada 24 horas se sacó un molde del horno y se realizaron tres barridos de frecuencia de 0.01 a 40Hz bajo deformación controlada a tres temperaturas diferentes (30, 40 y 50°C) utilizando un reómetro TA Instruments AR 550. Una vez obtenidos los resultados de barrido de frecuencia se calcularon energías de activación para tiempo de curado en base al principio de superposición tiempo-temperatura usando la ecuación de Arrhenius (Ecuación 6). Estos mismos barridos de frecuencia se realizaron para los residuos de cemento asfáltico obtenidos por destilación.

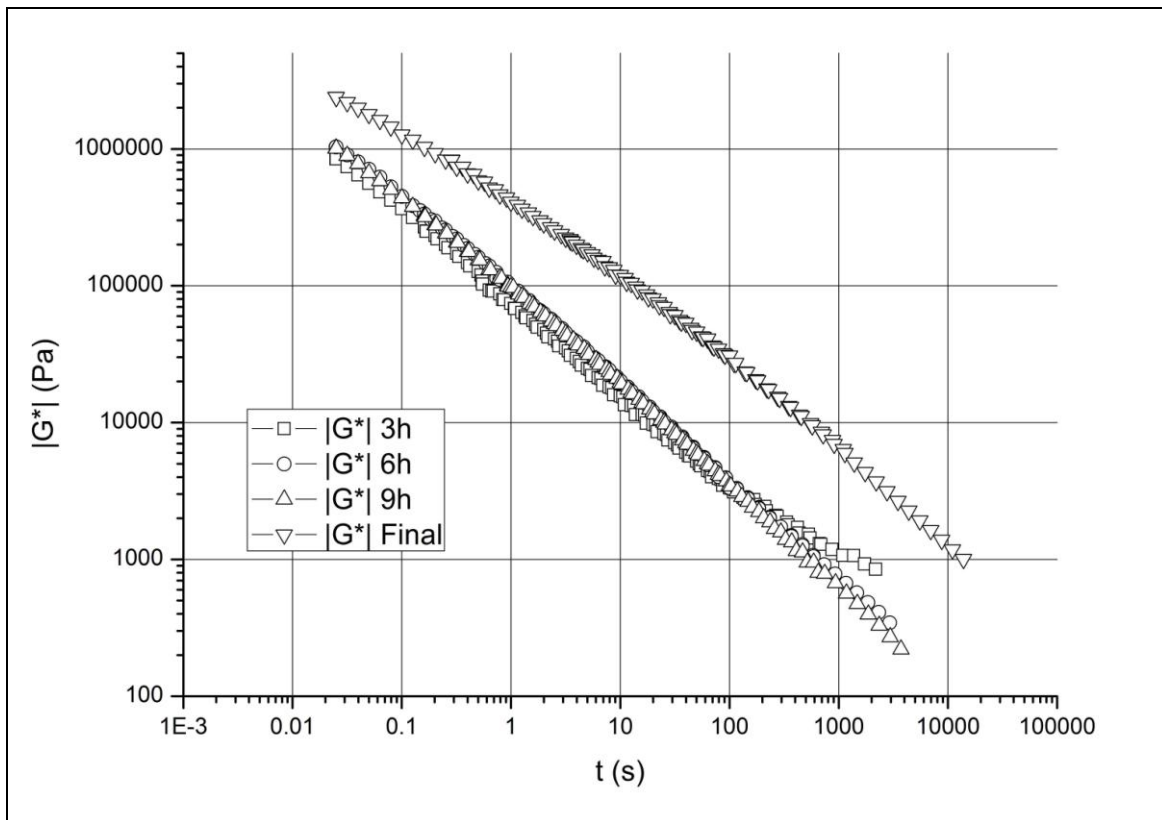
Previo al análisis cinético se realizaron pruebas de curado acelerado para observar si existía repetitividad en los resultados y asegurar que los datos obtenidos fueran confiables y para observar si el principio TTSP es aplicable para el estudio. Se seleccionó una emulsión al azar y fue la ECL65-110PL. Esta emulsión fue sometida a un tratamiento térmico a 60°C durante 3, 6 y 9h a las y para cada temperatura realizaron los tres barridos de frecuencia. Este procedimiento para las pruebas previas se realizó por triplicado. Además de esto se dejó una muestra de la misma emulsión a 60°C durante 10 días y se comparó con las muestras anteriores. Se

construyeron curvas maestras para los 4 tiempos de curado y se calcularon las energías de activación usando la Ecuación 6.

Resultados Preliminares y Discusión

En la Figura 2 se muestran las cuatro curvas maestras obtenidas. Todas las curvas maestras fueron obtenidas calculando el valor del factor de desplazamiento (Ecuación 5) utilizando 30°C como temperatura de referencia y desplazando las curvas de 40 y 50°C utilizando los factores calculados. Se observa que al aumentar el tiempo de curado, como es de esperarse, los valores de módulo dinámico se incrementan. Sin embargo para los primeros tres tiempos de curado no se aprecia una diferencia tan marcada. Esto se debe a que para estos tiempos y temperatura de curado, la emulsión aún no comienza a romper, por lo tanto, los glóbulos de asfalto mantienen todavía su identidad y las emulsiones aún tienen la misma estructura interna, solo que con una mayor concentración de glóbulos de asfalto. También es posible apreciar que se cumple el principio de superposición tiempo temperatura ya que los datos presentan correlación entre ellos y, como se mostrará más adelante, las energías de activación calculadas son independientes de la temperatura.

Figura 2 Curvas maestras obtenidas para tiempos de curado de 3, 6, 9 horas y 10 días (Final)



En la Tabla 2 se muestran los valores del factor de desplazamiento y de energía de activación calculados para las temperaturas de 40 y 50°C para los diferentes tiempos de curado.

Entre las energías de activación calculadas para los primeros 3 tiempos de curado no se observa una diferencia significativa. Esto se debe, a que como se mencionó anteriormente, la emulsión para esos tiempos y temperatura de curado aún no rompe. Es posible que se encuentre en fase de floculación, esto es, la formación de agregados de glóbulos de la fase dispersa sin que estos pierdan su identidad (Leal-Calderon et al., 2007; Tadros, 2009). La energía de activación está relacionada con los procesos internos del material que ocurren al ser deformado. Dado a que la estructura interna de la emulsión para los primeros 3 tiempos de curado es prácticamente la misma, debido a que los glóbulos de asfalto aún no rompen. Entonces, los procesos internos que ocurren en el material al ser deformado son de la misma naturaleza y la energía para que se lleven a cabo dichos procesos es la misma. Para la muestra de emulsión que fue sometida a un curado de 10 días se observa un incremento en la energía de activación. Esto se debe a que la emulsión ya rompió y el agua ya se ha perdido, dejando solamente al asfalto. Los procesos internos en el asfalto son distintos y conllevan una mayor energía a aquellos presentes en una emulsión.

Tabla 2 Valores obtenidos de los factores de desplazamiento para los diferentes tiempos de curado

Tiempo de curado	$a_{(40^{\circ}\text{C})}$	$a_{(50^{\circ}\text{C})}$	E_a [kJ/mol]
3h	0.1499	0.0459	60.29±4.21
6h	0.1536	0.0268	64.10±0.34
9h	0.1704	0.0341	60.25±0.88
10d	0.0875	0.0072	85.43±1.78

En las siguientes figuras se presentan curvas maestras para los módulos de almacenamiento (G') y disipación (G'') de energía obtenidas para los diferentes tiempos de curado. Para el módulo de almacenamiento, que representa la parte elástica, la correlación de la curva maestra presenta mejoras al aumentar el tiempo de curado. Conforme pasa el tiempo de curado, la concentración de asfalto en emulsión también aumenta. La elasticidad de la emulsión está dada por los glóbulos de asfalto y la viscosidad por el medio acuoso (Lesueur & Potti, 2004; Tadros, 2009, 2010). Al aumentar la concentración de glóbulos de asfalto, aumenta la elasticidad del material. Cuando la emulsión comienza a romper, entra en la fase de coalescencia y los glóbulos de asfalto comienzan a unirse para formar una película. Durante el proceso de formación de dicha película, la elasticidad del material va a ser responsabilidad de los glóbulos de asfalto y de las micelas de asfaltenos estabilizadas por resinas dispersas en la matriz de aromáticos y saturados presentes en el asfalto (Lesueur, 2009). Una vez que la emulsión ha roto por completo y se ha perdido toda el agua, entonces solo se observa el comportamiento reológico del asfalto.

Figura 3 G' y G'' vs t para 3h de curado

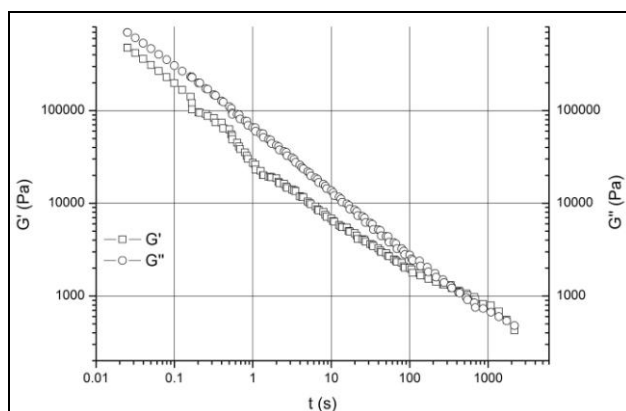


Figura 4 G' y G'' vs t para 6h de curado

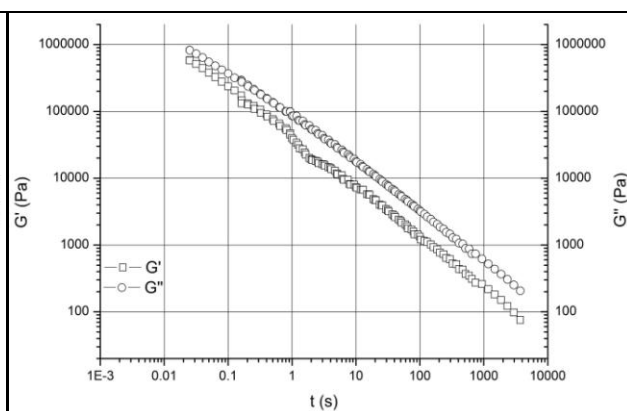


Figura 5 G' y G'' vs t para 9h de curado

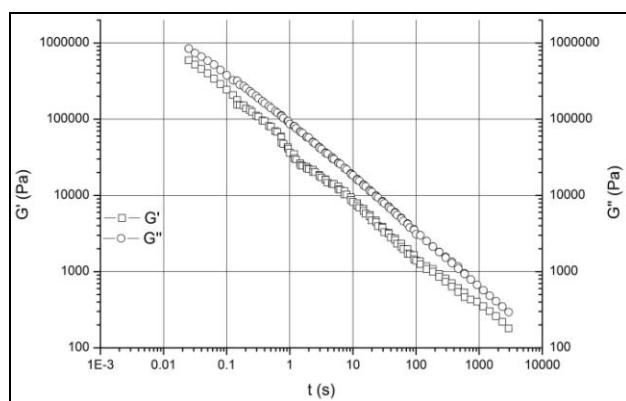
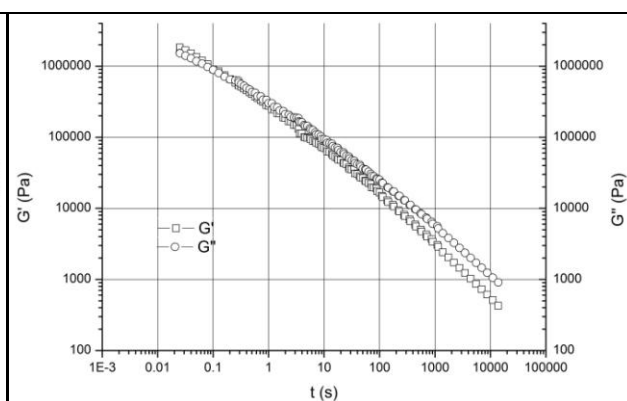


Figura 6 G' y G'' vs t para 10d de curado



CONCLUSIONES PRELIMINARES

Es posible observar la evolución de las propiedades reológicas de las emulsiones para diferentes tiempos de curado. También se observa un cambio en la energía de activación generado por los diferentes procesos involucrados al deformar el material que ocurren durante las diferentes etapas del proceso de ruptura de una emulsión. Hasta el momento estos son los resultados que se han obtenido del presente proyecto. Los resultados son alentadores, pero aún insuficientes para caracterizar los materiales utilizados. En base a estos resultados se espera encontrar cambios significativos en la energía de activación para la transición entre la fase de floculación y el inicio de la de coalescencia y para el rompimiento final de la emulsión en los resultados que actualmente se están generando.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y de la empresa Proyectos, Asesoría y Control de Calidad de Obras Civiles, S.A. de C.V. por permitirnos el uso de las instalaciones y equipo de sus laboratorios.

REFERENCIAS

- Alwis, K. G. N. C., & Burgoyne, C. J. (2006). Time-Temperature Superposition to Determine the Stress-Rupture of Aramid Fibres. *Applied Composite Materials*, 13(4), 249-264. doi: 10.1007/s10443-006-9017-8
- Atkins, P. W., & De Paula, Julio. (2010). *Physical chemistry* (9th ed.). New York: W.H. Freeman.
- Goodwin, J. W., & Hughes, R. W. (2008). *Rheology for Chemists-An Introduction* (2nd ed.). Cambridge, UK: The Royal Society of Chemistry.
- Gunasekaran, Sundaram, & Mehmet Ak, M. (2002). Linear Viscoelasticity of Cheese *Cheese Rheology and Texture*: CRC Press.
- Leal-Calderon, Fernando, Schmitt, Véronique, & Bibette, Jérôme. (2007). *Emulsion Science Basic Principles* (2nd ed.). New York, USA: Springer Science+Business Media, LLC.
- Lesueur, Didier. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1-2), 42-82.
- Lesueur, Didier, & Potti, Juan Josè. (2004). Cold mix design: A rational approach based on the current understanding of the breaking of bituminous emulsions. *Road Materials and Pavement Design*, 5(sup1), 65-87. doi: 10.1080/14680629.2004.9689988
- Menard P, Kevin. (2008a). Basic Rheological Concepts *Dynamic Mechanical Analysis* (pp. 15-36): CRC Press.
- Menard P, Kevin. (2008b). Frequency Scans *Dynamic Mechanical Analysis: A Prctical Introduction* (pp. 145-171): CRC Press.
- Menard P, Kevin. (2008c). An Introduction to Dynamic Mechanical Analysis *Dynamic Mechanical Analysis* (pp. 1-13): CRC Press.
- Menard P, Kevin. (2008d). Rheology Basic *Dynamic Mechanical Analysis* (pp. 37-56): CRC Press.
- Menard P, Kevin. (2008e). Time and Temperature Scans Part I *Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Indtroduction* (pp. 95-119): CRC Press.
- Menard P, Kevin. (2008f). Time and Temperature Scans Part II *Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction* (pp. 123-142): CRC Press.
- Ossols, Marie-Francoise (Ed.). (2010). *Emulsiones Asfálticas*. México: Asociación Mexicana de Asfaltos, A.C.
- Tadros, Tharwat F. (2009). Emulsion Science and Technology: A General Introduction *Emulsion Science and Technology* (pp. 1-56): Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Tadros, Tharwat F. (2010). *Rheology of Dispersions* (1st ed.). Weinheim, Germany: Wiley-VCH.
- Witczak, M W, & Bari, J. (2004). Development of a Master Curve (E*) Database for Lime Modified Asphaltic Mixtures (D. o. C. a. E. Engineering, Trans.) (pp. 29). Tempe, AZ: Arizona State University.
- Zhu, H., Sun, L., Yang, J., Chen, Z., & Gu, W. (2011). Developing Master Curves and Predicting Dynamic Modulus of Polymer-Modified Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(2), 131-137. doi: doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000145