

# Como reducir la rigidez y fragilidad del asfalto debida a la oxidación del mismo

Álvaro Gutiérrez Muñiz,  
agutierrez@kao.com

El asfalto es un material muy atractivo para fabricar pavimentos flexibles, pero como todo material presenta limitaciones, siendo una de las principales la oxidación. El asfalto, al ser un compuesto orgánico, reacciona con el oxígeno del medio ambiente cambiando su estructura y composición molecular, originando una estructura más rígida y frágil, siendo esta la razón del término endurecimiento por oxidación o por envejecimiento. Esta reacción de oxidación del asfalto comienza en la etapa de mezclado, compactación y colocación de la mezcla asfáltica y continúa por toda la etapa de servicio de la misma. Una mezcla asfáltica conteniendo un asfalto rígido y frágil es propensa a la formación de fisuras por fatiga y es ahí por donde penetra el agua a la base causando daños en el pavimento disminuyendo su durabilidad, de ahí la necesidad de reducir esta rigidez y fragilidad del asfalto debida a la oxidación y en este estudio se propone un aditivo químico que adicionado al asfalto en la etapa de fabricación de la mezcla reduzca la rigidez y fragilidad del mismo. La selección del mejor aditivo químico es llevada a cabo mediante el estudio de diversas propiedades reológicas tanto del asfalto original como del envejecido por los procesos de oxidación utilizando el método de prueba de la Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO), AASHTO T240 y el método de envejecimiento a presión PAV (AASHTO R28-06) y claramente se puede observar como el aditivo propuesto en este estudio evita la rigidez del asfalto debida a la oxidación.

**Palabras Clave:** Oxidación, Rigidez, Fragilidad, Ductilidad, Módulo de Corte Complejo.

Asphalt is a very attractive material for manufacturing flexible pavements, but like all materials it has limitations, oxidation being one of the main ones. Asphalt, being an organic compound, reacts with oxygen from the environment, changing its structure and molecular composition, creating a more rigid and brittle structure, which is the reason for the term hardening by oxidation or aging. This oxidation reaction of the asphalt begins in the mixing, compacting and laying stage of the asphalt mixture and continues throughout the service stage of the asphalt mixture. An asphalt mix containing a rigid and brittle asphalt is prone to the formation of fatigue cracks and that is where the water penetrates to the base causing damage to the pavement, reducing its durability, hence the need to reduce this stiffness and brittleness of the asphalt due to oxidation and in this study a chemical additive is proposed that added to the asphalt in the manufacturing stage of the mixture reduces its rigidity and brittleness. The selection of the best chemical additive is carried out by studying various rheological properties of both the original and aged asphalt by oxidation processes using the Rolling Thin Film Oven Test (RTFO) AASHTO T240 and the of aging under pressure PAV (AASHTO R28-06) and it can be clearly seen how the additive proposed in this study avoids the stiffness of the asphalt due to oxidation.

**Keywords:** Oxidation, Stiffness, Fragility, Ductility, Complex Shear Modulus.

## INTRODUCCIÓN

La mezcla asfáltica es un material compuesto por un asfalto y un agregado mineral, el asfalto actúa como un agente li-

gante que aglutina las partículas de agregado en una masa cohesiva en forma muy efectiva por lo que resulta un material muy atractivo para fabricar pavimentos flexibles, pero como

## Como reducir la rigidez y fragilidad del asfalto debida a la oxidación del mismo

todos los materiales presenta limitaciones, siendo una de las principales la oxidación del mismo.

Debido a que el asfalto está constituido por moléculas orgánicas, estas reaccionan con el oxígeno del medio ambiente, esta reacción se llama oxidación y cambia la estructura y composición de las moléculas del asfalto y el resultado es una estructura más rígida y frágil y es la razón del término endurecimiento por oxidación o por envejecimiento [1]. Una considerable parte del endurecimiento por oxidación del asfalto ocurre durante el proceso de mezclado en caliente y durante la etapa de colocación y compactación de la mezcla asfáltica; en estos procesos se emplea una alta temperatura y el asfalto se encuentra adherido al agregado en forma de una película muy delgada que esta en contacto con grandes cantidades de oxígeno por lo que la reacción de oxidación ocurre a una velocidad mayor comparándola con la velocidad de oxidación a la temperatura de servicio del pavimento. Para la evaluación en el laboratorio del envejecimiento del asfalto durante el proceso de mezclado, colocación y compactación de las mezclas asfálticas se utiliza la prueba de la Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO "Rolling Thin Film Oven Test"), AASHTO T240, ASTM D2872.

Existe otro tipo de endurecimiento del asfalto debido a la oxidación del mismo que ocurre en la vida de servicio del pavimento flexible que ocurre a una velocidad relativamente baja y es mucho más rápido en un clima cálido que en un clima frío. Así el endurecimiento por oxidación es estacional y es más marcado en el verano que en el invierno. Debido a este tipo de endurecimiento, los pavimentos viejos son más susceptibles al agrietamiento que los nuevos, pero incluso, los pavimentos asfálticos nuevos pueden ser propensos a este fenómeno si no se compactan adecuadamente y en este caso, la falta de compactación origina un alto contenido de vacíos en la mezcla, lo que permite a una mayor cantidad de aire ingresar en la mezcla asfáltica y agravar el endurecimiento por oxidación (problema muy grave y constante en México), para simular este envejecimiento con el transcurso del tiempo se creó una prueba de laboratorio utilizando una cámara de envejecimiento a presión "PAV" (Pressurized Aging Vessel AASHTO R28-06), este ensayo expone las muestras del asfalto a la acción de calor y presión con el objeto de recrear en cuestión de horas, años de envejecimiento en servicio del pavimento. Es importante destacar que, por propósitos de especificación, las muestras de asfaltos envejecidas en el PAV previamente son envejecidas en el RTFO,

consecuentemente, el residuo del ensayo PAV ha sufrido todas las condiciones a las que son expuestos los asfaltos durante la producción colocación y servicio. Sin duda un asfalto muy duro después de la prueba del PAV será un asfalto muy rígido y frágil que ofrecerá baja resistencia a la fatiga [1].

Las pruebas de RTFO y PAV oxidan el asfalto bajo una condición constante de laboratorio y solamente son un indicativo de lo que se puede oxidar el asfalto en condiciones reales dado que cada mezcla asfáltica está sometida a diferentes condiciones de fabricación y ambientales tales como temperatura, tiempo de exposición a los rayos UV, latitud y otras más [2]. En este estudio se evalúa como aumenta la rigidez, fragilidad y otras propiedades reológicas del asfalto con y sin aditivos en función de la oxidación del mismo, pero solamente oxidándolo en las pruebas de RTFO y PAV, no se consideran otras pruebas y formas de oxidación. El asfalto utilizado en este estudio fue un asfalto procedente de la refinería de Salamanca, Guanajuato, México y es un asfalto AC-20 conforme a la norma AASHTO M 226-80 (2017) y también es un asfalto grado PG 64-22 conforme a la norma AASHTO M320-17 y también es un asfalto 50/70 conforme a la norma UNE EN 12591.

### *1.1 Incremento del módulo del asfalto después de las pruebas de RTFO y PAV en función de la temperatura.*

El asfalto a temperaturas entre 4° y 90°C muestra la consistencia de un material viscoelástico y una manera de medir su resistencia a ser deformado (rigidez) es por medio de la medición del Módulo Complejo de Corte Dinámico ( $G^*$ ) utilizando un barrido de temperatura a frecuencia constante de 10 rad/seg y una deformación de 12% para el asfalto original, de 10% para el asfalto después de RTFO y de 1% para el asfalto después de PAV, en la gráfica de la figura 1 se muestra el incremento del Módulo Complejo de Corte Dinámico después de las pruebas de RTFO y PAV en el rango de temperaturas entre 4° y 90°C, en esta gráfica podemos observar que a altas temperaturas ocurre una mayor diferencia entre módulos con respecto a las bajas temperaturas. El método estándar para la determinación del Módulo Complejo de Corte Dinámico empleado fue el AASHTO T 315-19.

El asfalto es un material viscoelástico debido a que exhibe un comportamiento viscoso (fluye ante una carga y pierde su

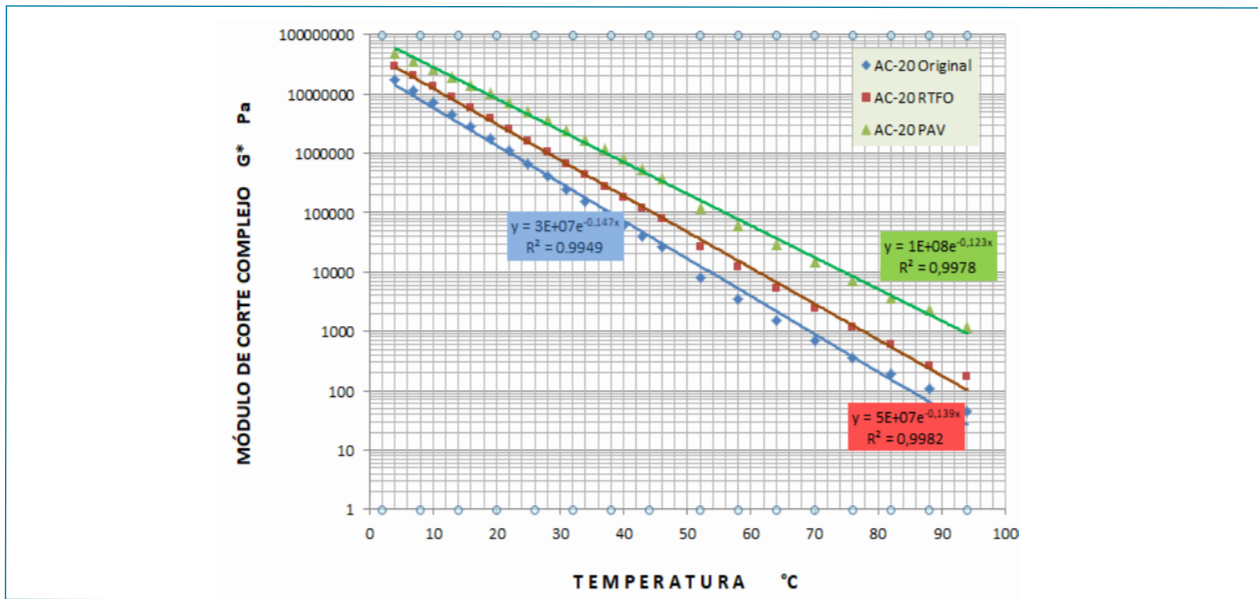


Figura 1. Incremento del Módulo Complejo de Corte Dinámico del asfalto ( $G^*$ ) después de las pruebas de RTFO y PAV en el rango de temperaturas entre 4°C y 90°C.

forma original) y un comportamiento elástico (se deforma ante una carga y recupera su forma original) al mismo tiempo; cuando la componente elástica y la viscosa son iguales en magnitud, el ángulo de fase es 45° representando un punto de transición "SOL-GEL" (algunos autores lo denominan punto de fusión)[3]. Como ya la mencionamos anteriormente, el asfalto es un compuesto orgánico que reacciona con el oxígeno aumentando su rigidez y su temperatura de transición "SOL-GEL". La velocidad de oxidación se ve enormemente favorecida con el aumento de temperatura, es decir, cuando el asfalto es calentado a altas temperaturas para poder mezclarse con

el agregado formando la mezcla asfáltica que después es colocada y compactada, este aumenta aproximadamente el doble o el triple su temperatura del punto de transición (esto lo observamos al graficar las componentes elástica y viscosa después de la prueba de RTFO) y aumenta hasta cuatro veces después de la prueba de envejecimiento a largo plazo (PAV) [4]. La gráfica de la figura 2 muestra el aumento del punto de transición del asfalto AC-20, partiendo de 9°C (original) y conforme sufre la oxidación en las pruebas de RTFO y PAV aumenta a 19° y 36°C respectivamente.

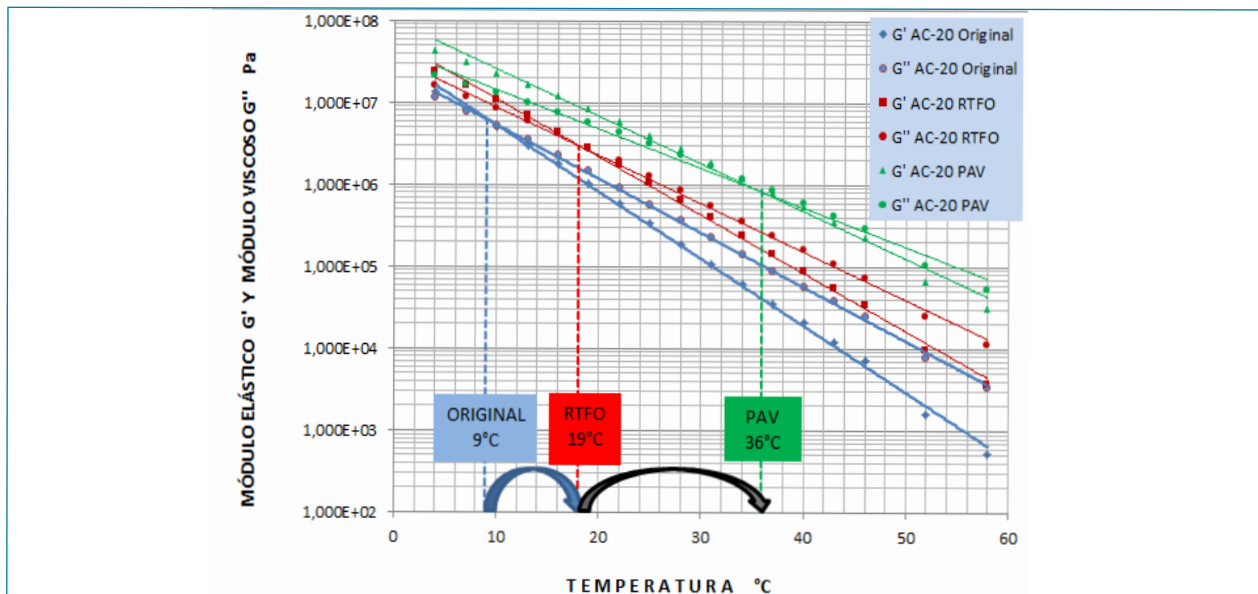


Figura 2. Incremento del Punto de Transición SOL-GEL del asfalto (temperatura donde  $\delta=45^\circ$  o  $G'=G''$  o  $\tan \delta=1$ ) original, después de RTFO y después de PAV.

## Como reducir la rigidez y fragilidad del asfalto debido a la oxidación del mismo

Hemos demostrado como el módulo del asfalto (rigidez) aumenta conforme la temperatura disminuye y conforme el asfalto es oxidado, ahora demostraremos como aumenta la fragilidad del mismo por medio de la medición de la región visco-elástico lineal (LVR) propia del asfalto a una determinada temperatura y condición de envejecimiento utilizando el Reómetro de Corte Dinámico sometiendo una muestra de asfalto a una temperatura y a una frecuencia (10 rad/s) constantes y haciendo un barrido de deformación hasta que su módulo elástico (componente elástica  $G'$ ) comienza a fracturarse o romperse (la norma ASTM D 7175 considera el límite de la Región Visco-Elástica Lineal (LVE) hasta donde el Módulo Elástico varía un 10%) tal cual como un resorte elástico que conforme lo deformamos aplicamos más fuerza llegando hasta una elongación donde se rompe siendo esta deformación el límite elástico del mismo. En la gráfica de la figura 3 podemos observar cómo la región viscoelástica lineal (LVR)[5] se ve reducida conforme disminuye la temperatura en una proporción logarítmica lineal y además podemos observar que a temperaturas menores a 30°C el comportamiento del asfalto presenta una ruptura frágil por la forma en como cae  $G'$ .

decir que el asfalto prácticamente por debajo de los 20°C no se hace menos resistente debido a la oxidación pero entre 30°C y 50°C si se observa una pérdida grande de la deformación máxima y es por ello que la fisuración por fatiga ocurre a estas temperaturas después de que el asfalto es oxidado.

Utilizando los datos obtenidos en la prueba de la medición del rango visco-elástico lineal, podemos construir una nueva gráfica utilizando el stress aplicado en relación a la deformación obtenida y podemos apreciar que el stress aumenta conforme disminuye la temperatura y la deformación disminuye conforme disminuye la temperatura hasta alcanzar la condición de romperse, es decir, hablando en sentido figurado el asfalto se comporta como la mantequilla a baja temperatura la cual es difícil de untar en un pan dado que se rompe (asfalto a 4°C línea naranja figura 5), pero al calentarla un poco es muy fácil untarla en el pan (asfalto a 30°C) [6]. En la gráfica de la figura 5 podemos apreciar lo dicho anteriormente.

Finalmente en esta etapa del aumento del módulo en función de la temperatura, clasificamos el asfalto conforme a la norma AASHTO M 320-17, que se caracteriza por clasificar el asfalto en grados de comportamiento "PG" y para ello esta-

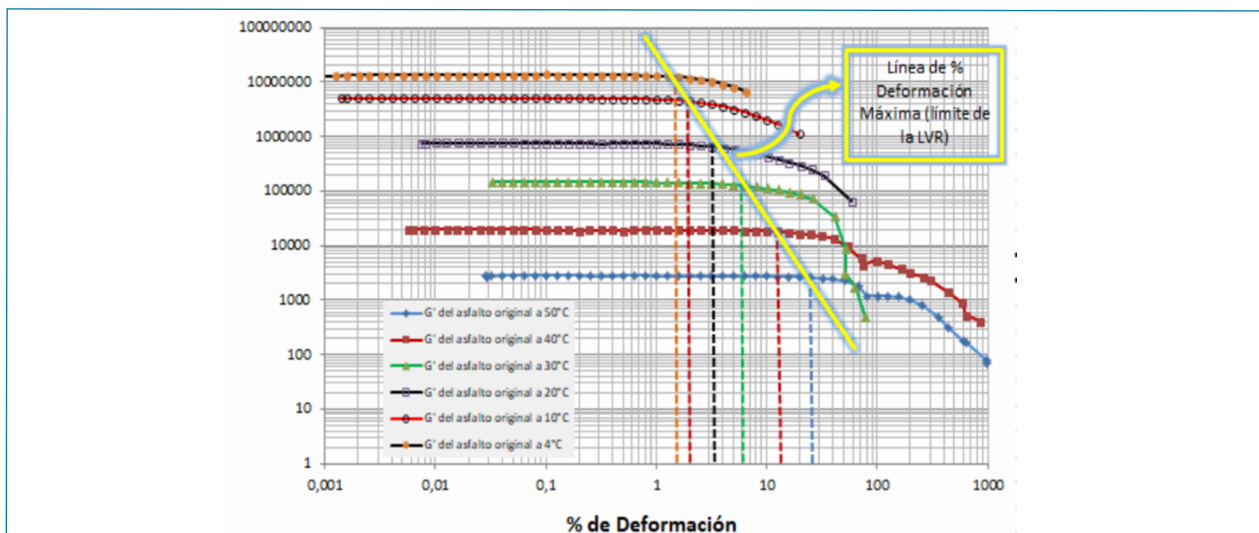


Figura 3. Disminución del rango visco-elástico lineal del asfalto AC-20 original conforme disminuye la temperatura.

En la gráfica de la figura 4 podemos apreciar que el módulo elástico del asfalto  $G'$  y la deformación máxima (límite de la región visco-elástica lineal) cambian más conforme a la oxidación a altas temperaturas (entre 40° y 50°C) que a bajas temperaturas (entre 4° y 20°C) indicándonos que el asfalto conforme se oxida se hace más resistente a la deformación permanente pero en cuanto a la fisuración por fatiga podemos

blece ciertos parámetros de control realizados con diferente pruebas que se caracterizan porque en todas ellas se estresa el asfalto dentro del rango visco-elástico lineal y utilizando una frecuencia constante de 10 radianes por segundo. En la tabla 1 se muestran los resultados de los parámetros de control de calidad de esta norma y la clasificación PG del asfalto AC-20.

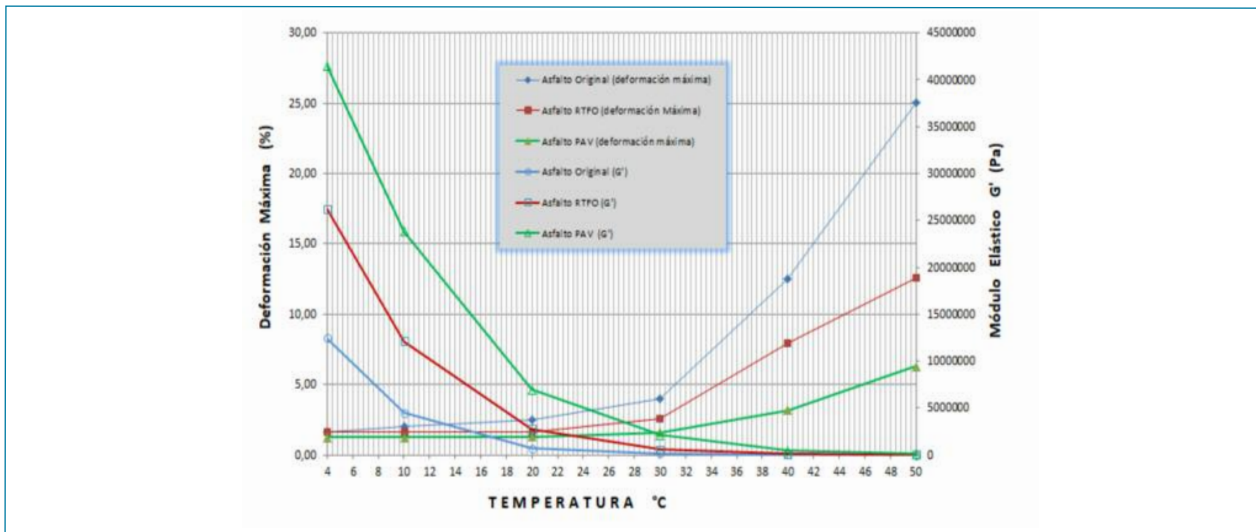


Figura 4. Disminución de la deformación máxima (límite de la región visco-elástica lineal) y aumento del módulo elástico G' del asfalto AC-20 original, después de RTFO y PAV conforme se disminuye la temperatura.

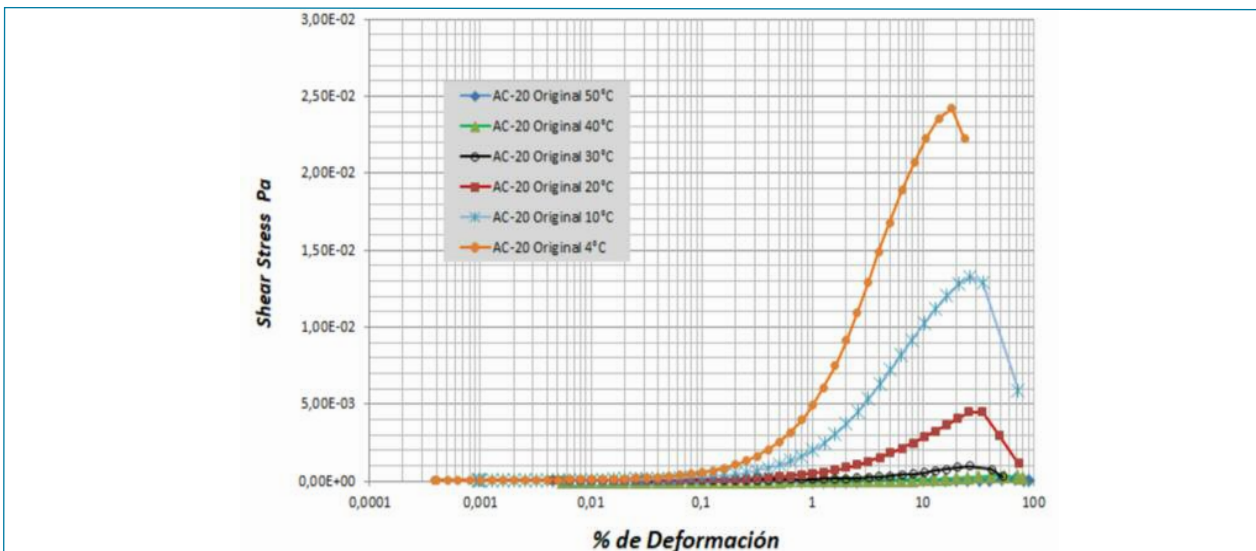


Figura 5. Aumento del stress y disminución de la deformación del asfalto AC-20 conforme disminuye la temperatura.

Tabla 1. Clasificación grado PG del asfalto AC-20 conforme la norma AASHTO M 320-17

Propiedades reológicas del Asfalto AC-20 de la refinería de Salamanca	Condición de envejecimiento	Resultado	Requisito AASHTO M-320
Viscosidad a 135°C	Sin	0.3926 Pa s	3 Pa s, máx.
"G* / sen d" a la temperatura de 64°C	Sin	1.545 KPa	1.00 KPa, mín.
Pérdida de masa	RTFO	-0.58%	1.00%, máx.
"G* / sen d" a la temperatura de 64°C	RTFO	5.509 KPa	2.20 KPa, mín.
"G* sen d" a la temperatura de 25°C	PAV	4828 KPa	5000 KPa, máx.
Rigidez en creep "S" a la temp de prueba de -12°C	PAV	119 MPa	300 MPa, máx
Valor "m" a la temperatura de prueba de -12°C	PAV	0.306	0.300, mín.
Clasificación PG AASHTO M 320-17		64 -22	
Stiffness (rigidez) "S" a la temperatura de prueba de -24°C	Sin envejecimiento	312 MPa	Nota: Grado PG-34 que es 10 grados más que la temperatura de prueba.
Valor m a la temperatura de prueba de -24°C	Sin envejecimiento	0.311	

## Como reducir la rigidez y fragilidad del asfalto debido a la oxidación del mismo

En la anterior tabla 1 podemos observar que el asfalto AC-20 utilizado en este estudio es un asfalto grado PG 64 -22, pero si chequeamos el Stiffness (rigidez) y la pendiente "m" de este asfalto sin ninguna condición de envejecimiento vemos que el grado PG inferior es de -34 y si chequeamos el grado superior de este asfalto después de PAV vemos que es de 92, esto es, el asfalto a temperaturas altas cambia por la condición de oxidación en las pruebas de RTFO y PAV de PG 64 a PG 92 (5 grados PG más) y en cambio a bajas temperaturas solo cambia de PG -22 a PG -34 (2 grados PG menos).

### 1.2 Incremento del Módulo Complejo de Corte Dinámico del asfalto después de las pruebas de RTFO y PAV en función tiempo de carga, es decir en función de la "FRECUENCIA" aplicada.

Los resultados reológicos del asfalto AC-20 en el punto 1.1 se han obtenido utilizando una frecuencia constante de 1.59 Hertz (10 rad/seg) y lo que se ha variado es la temperatura debido a que así lo estipulan los métodos de AAHSTO y ASTM, pero sabemos que el asfalto también es susceptible a la frecuencia (tiempo de carga) comportándose como un líquido a

bajas frecuencias (mucho tiempo de carga) y como un sólido a altas frecuencias (poco tiempo de carga) por lo que en la gráfica de la figura 6 se muestran los resultados de la variación del módulo complejo "G\*" en función de la frecuencia reducida obteniendo así la curva maestra del Asfalto AC-20 Original, después de RTFO y después de PAV. Esta curva maestra se elabora mediante el desplazamiento horizontal de las isoterms (barrido de frecuencia a diferentes temperaturas) formando una curva única teniendo como base una isoterma de referencia, entonces la frecuencia de cada isoterma es multiplicada por un factor de desplazamiento que mueve esta hasta alcanzar a tocar los puntos de la isoterma de referencia, por lo que para poder entender como varía el módulo complejo del asfalto "G\*" en función de la temperatura y frecuencia " $G^* = f(\omega, T)$ " a la curva maestra se le debe de adicionar la gráfica del factor de desplazamiento en función de la temperatura.

Continuando con la susceptibilidad del asfalto al tiempo de carga, se realizó la prueba de LAS ("Linear Amplitude Sweep Test AASHTO TP 101) y los resultados son mostrados en la figura 7 [7].

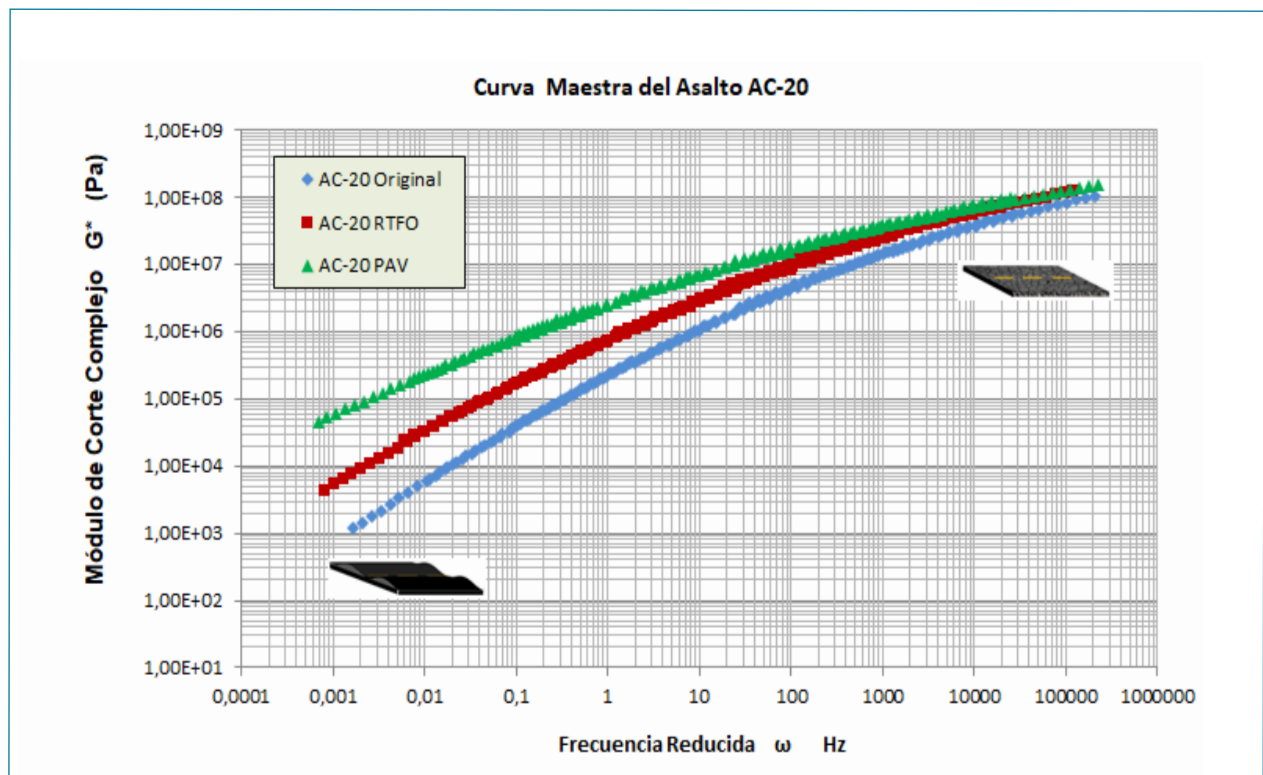


Figura 6. Variación del Módulo Complejo del Asfalto "G\*" AC -20, Original, después de RTFO y después de PAV en función de la frecuencia figurada.

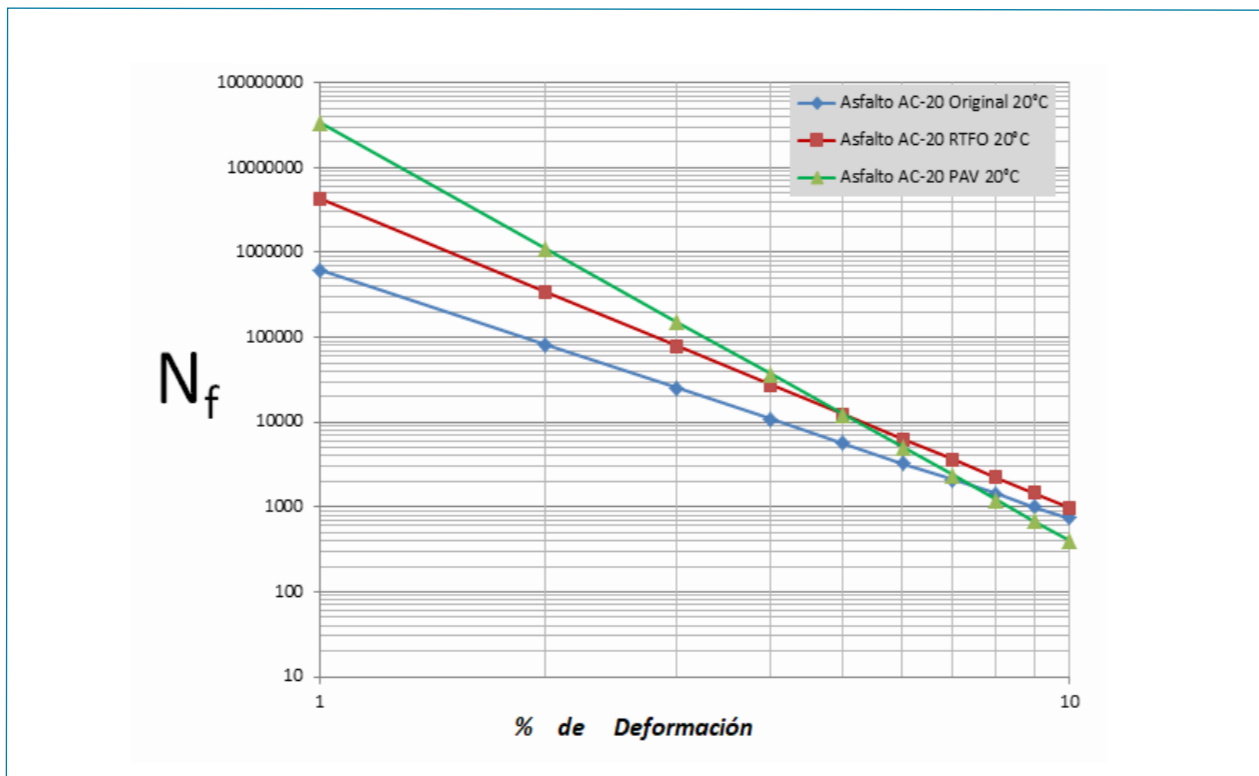


Figura 7. Número de ciclos a la falla del asfalto original, después de RTFO y después de PAV.

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El objetivo de este trabajo es demostrar el aumento de la rigidez (módulo) y fragilidad del asfalto AC-20 causado por la oxidación del mismo empleando las pruebas de RTFO y PAV, así como la evaluación de diferentes aditivos que al reducir la oxidación reducen esta rigidez (aditivos anti-envejecimiento). Esta evaluación de estos aditivos se llevó a cabo utilizando diversas pruebas que nos indican claramente la rigidez y fragilidad del asfalto.

### 2.1 Aditivos empleados para evitar la rigidez y fragilidad del asfalto debida a la oxidación.

En este estudio se utilizaron varios tipos de aditivos “Anti-Envejecimiento” utilizados a nivel industrial y de laboratorio, cada uno de ellos fue mezclado con asfalto AC-20 para después ser evaluados con las pruebas indicadas en el punto 2.2. La dosis (respecto al peso del asfalto) y tipos de aditivos se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Aditivos “Anti-Envejecimiento” utilizados en este estudio

Aditivos (Nomenclatura Comercial)	Letra de Identificación	Dosis (% respecto peso asfalto)
Mezcla Poliaminas	A	6
Furfural	B	6
Aceite Orgánico	C	6
Trimetilol Propano TMP	D	6
Bentonita	E	6
Aceite Aromático	F	6

# Como reducir la rigidez y fragilidad del asfalto debido a la oxidación del mismo

## 2.2 Pruebas empleadas en la evaluación de la rigidez (módulo) y fragilidad del asfalto.

El asfalto modificado con cada uno de los aditivos mostrados en la tabla 2 fue evaluado en forma original, después de RTFO y después de PAV utilizando las siguientes pruebas:

- 1) Aumento del Módulo Complejo en función de la temperatura (ver figura 1).
- 2) Determinación del punto de transición "Sol-Gel" (ver figura 2).
- 3) Comparación entre el stress aplicado y la deformación (ver figura 5).
- 4) Clasificación del asfalto PG según norma AASHTO M-320-17 (ver tabla 1)
- 5) Determinación de la rigidez empleando la curva maestra (ver figura 6).
- 6) Determinación del número de ciclos a la falla "Prueba LAS" (ver figura 7).

## 3. RESULTADOS

El asfalto AC-20 modificado con cada uno de los aditivos mostrados en la tabla 2 fue evaluado en cuanto a su resistencia a disminuir su rigidez y fragilidad utilizando las pruebas mencionados en el punto 2.2.

## 3.1 Resultados comparativos entre los asfaltos modificados con los diferentes aditivos.

En la Figura 8 se muestran los resultados comparativos entre los diferentes asfaltos modificados con diferentes aditivos utilizando las pruebas mencionadas en el punto 2.2, en cada prueba se le dio la calificación de 6 al aditivo que más redujo la rigidez y de 1 al aditivo que menor redujo la rigidez, se puede apreciar claramente que el aditivo "A" que es una mezcla de poliaminas fue el que redujo la rigidez y fragilidad del asfalto en todas las pruebas.

## 3.2 Reducción de la rigidez a diferentes temperaturas utilizando el aditivo "Mezcla de Poliaminas aditivo A".

En la gráfica de la Figura 9 se muestran la reducción del módulo de corte complejo "G\*" del asfalto modificado con el aditivo "A" respecto al asfalto AC-20 sin ningún aditivo original y después de la prueba de PAV.

## 3.3 Punto de transición Sol-Gel y Clasificación del grado PG del asfalto AC-20 y de este modificado con el aditivo "A"

En la tabla 3 se muestra el grado PG del asfalto modificado con el aditivo "A" y del asfalto AC-20 sin ningún aditivo, podemos observar que el asfalto con el aditivo "A" tiene un grado PG inferior de menos 34°C que es el mismo del asfalto AC-20 pero este sin ser so-

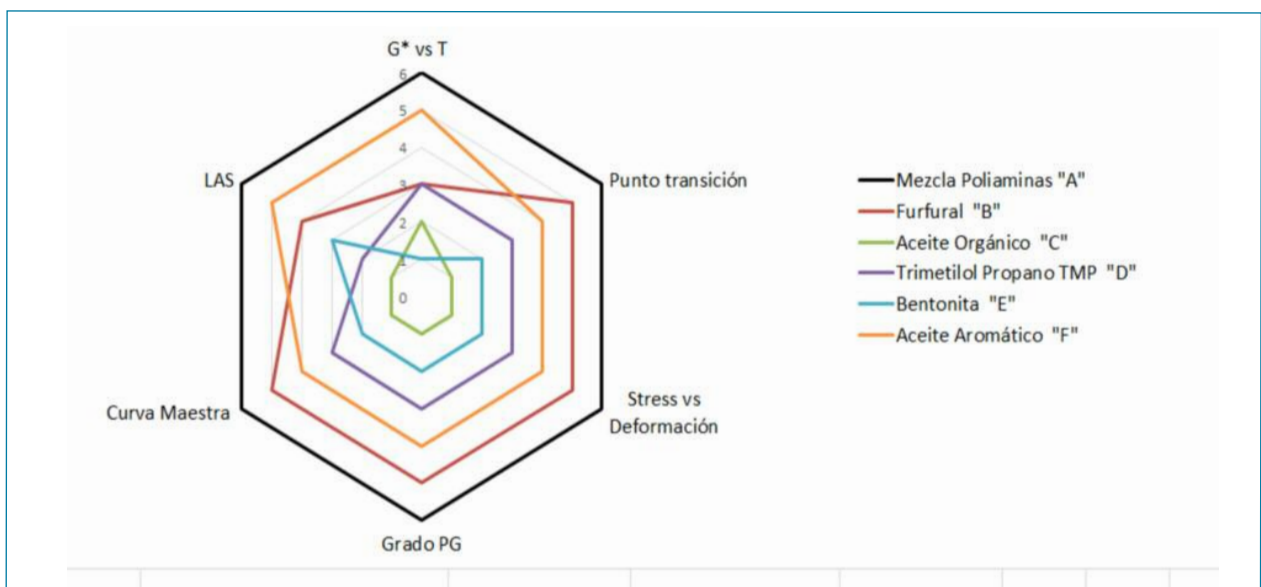


Figura 8. Gráfica comparativa entre asfaltos modificados con los aditivos utilizando las pruebas 2.2



metido a ninguna prueba de oxidación (ver tabla 1 renglón sombreado), también en esta tabla 3 podemos ver como el punto de transi-

ción "Sol-Gel" del asfalto con el aditivo "A" es 19°C y del asfalto AC-20 es de 36°C ambos después de RTFO y PAV.

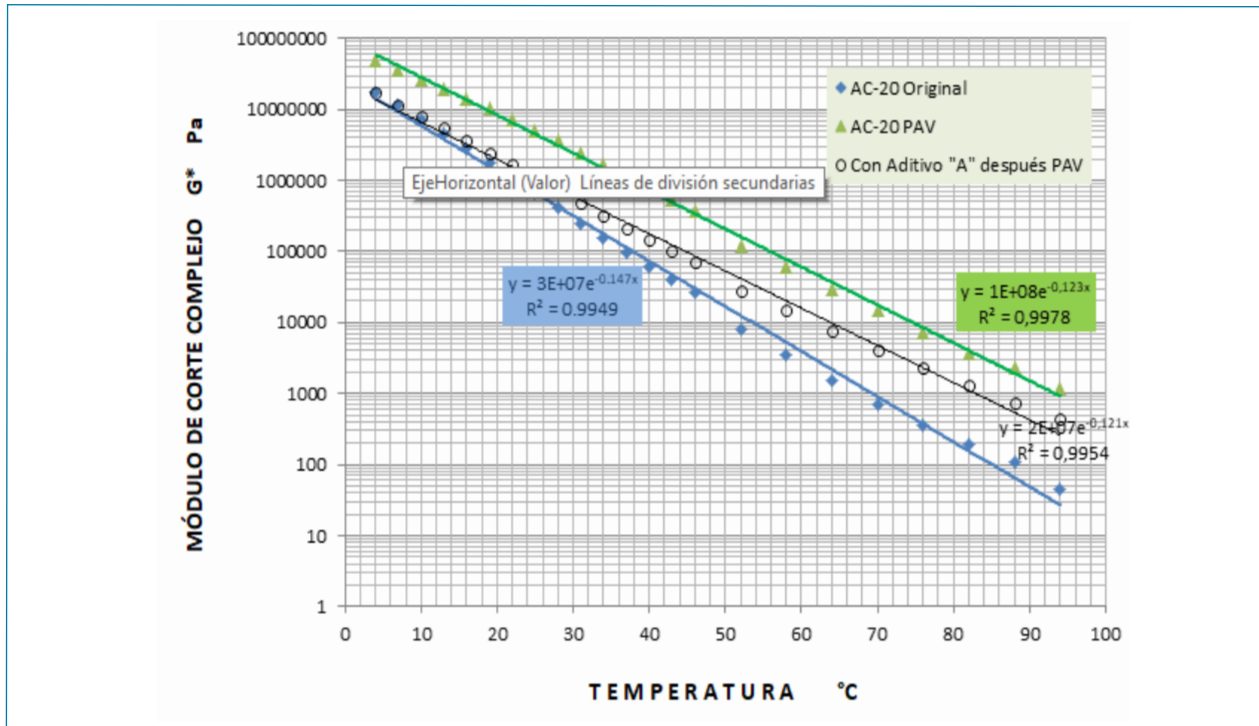


Figura 8. Gráfica comparativa entre asfaltos modificados con los aditivos utilizando las pruebas 2.2

Tabla 3. Clasificación grado PG del asfalto AC-20 con y sin el aditivo "A" conforme la norma AASHTO M 320

Propiedades reológicas del Asfalto AC-20 con y sin el aditivo "A"	Condición de envejecimiento	AC-20	AC-20 más aditivo "A"
Punto de inflamación	Sin	275°C	270°C
Viscosidad a 135°C	Sin	0.3926 Pa s	0.6251 Pa s
"G* / sen δ" a la temperatura de:	Sin	1.545 KPa (64°C)	1.295 KPa (70°C)
Pérdida de masa	RTFO	-0.58%	-0.60%
"G* / sen δ" a la temperatura de:	RTFO	5.509 KPa (64°C)	2.249 KPa (70°C)
"G* sen δ" a la temperatura de:	RTFO	4828 KPa (25°C)	1200KPa (22°C)
Rigidez en creep "S" a la temperatura de prueba de:	PAV	119 MPa (-12°C)	209MPa (-24°C)
Valor "m" a la temperatura de prueba de:	PAV	0.306 (-12°C)	0.303 (-24°C)
Clasificación PG AASHTO M 320-10		64 -22	70 -34
Punto transición Sol-Gel (ver figura 2)	PAV	36°C	19°C

## Como reducir la rigidez y fragilidad del asfalto debido a la oxidación del mismo

### 3.4 Disminución del stress aplicado para obtener la deformación máxima utilizando el aditivo "A".

En la gráfica de la figura 10 podemos apreciar que se requiere de menor cantidad de stress para deformar al asfalto con el aditivo "A" que con el asfalto AC-20 ambos después de PAV, incluso el asfalto con el aditivo "A" después de PAV es ligeramente más dúctil que el asfalto AC-20 original, esta gráfica muestra los valores a 4°C pero en todas las temperaturas se presentó el mismo patrón de conducta, es decir, el asfalto con el aditivo "A" siempre fue más dúctil.

pués de PAV así como el de este más la adición del aditivo "A" después de PAV y podemos observar que este último después de PAV es similar al del AC-20 original, es decir, el aditivo "A" logro reducir la rigidez del asfalto debido a la oxidación.

### 3.6 Determinación del número de ciclos a la falla, prueba LAS.

En la gráfica de la figura 12 podemos ver que el asfalto con el aditivo "A" después de PAV presenta más número de ciclos a la falla utilizando cualquier deformación, es decir, a bajas deformaciones (1%) tiene prácticamente el mismo Nf (número de ciclos a la falla) que el asfalto AC-20 después de PAV pro-

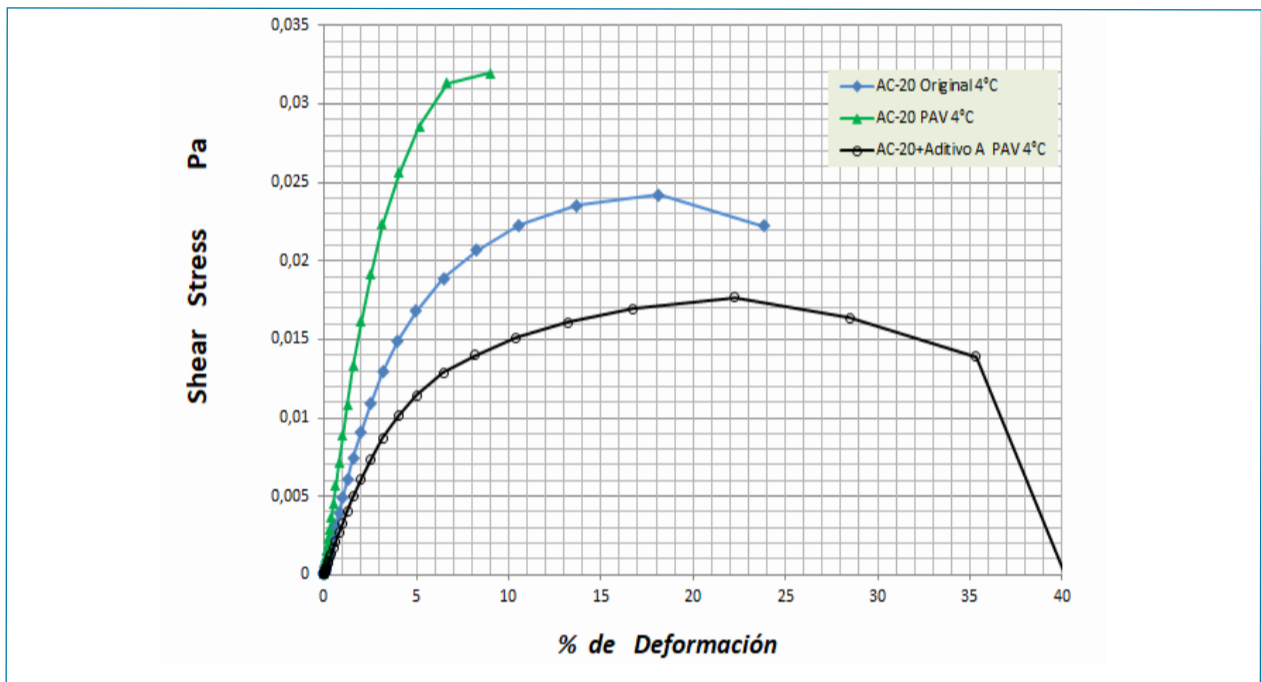


Figura 10. Esfuerzo de corte (Shear Stress) en función de la deformación del asfalto AC-20 original y después de PAV, así como la de este más la adición del aditivo "A" después de PAV.

### 3.5 Curva Maestra comparativa entre el asfalto AC-20 y de este modificado con el aditivo "A".

En la gráfica de la Figura 11 se muestra la variación del módulo de corte complejo "G\*" del asfalto AC-20 original y des-

pio de un comportamiento rígido pero a altas deformaciones (10%) presenta el mayor Nf propio de un comportamiento dúctil, entonces deducimos que el asfalto con el aditivo "A" después de PAV presenta un comportamiento tenaz (muy diferente a la línea verde).

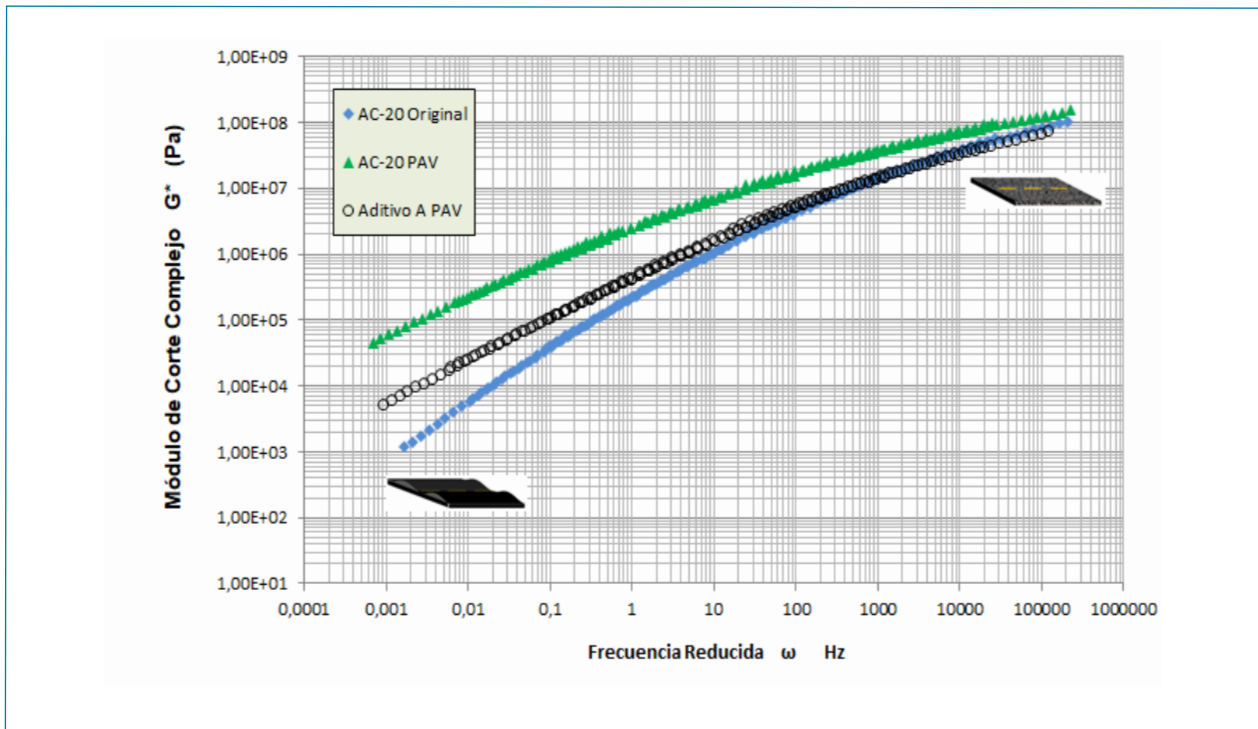


Figura 11. Variación del módulo de corte complejo "G\*" del asfalto AC-20 original y después de PAV así como el de este más la adición del aditivo "A" después de PAV en función de la frecuencia reducida.

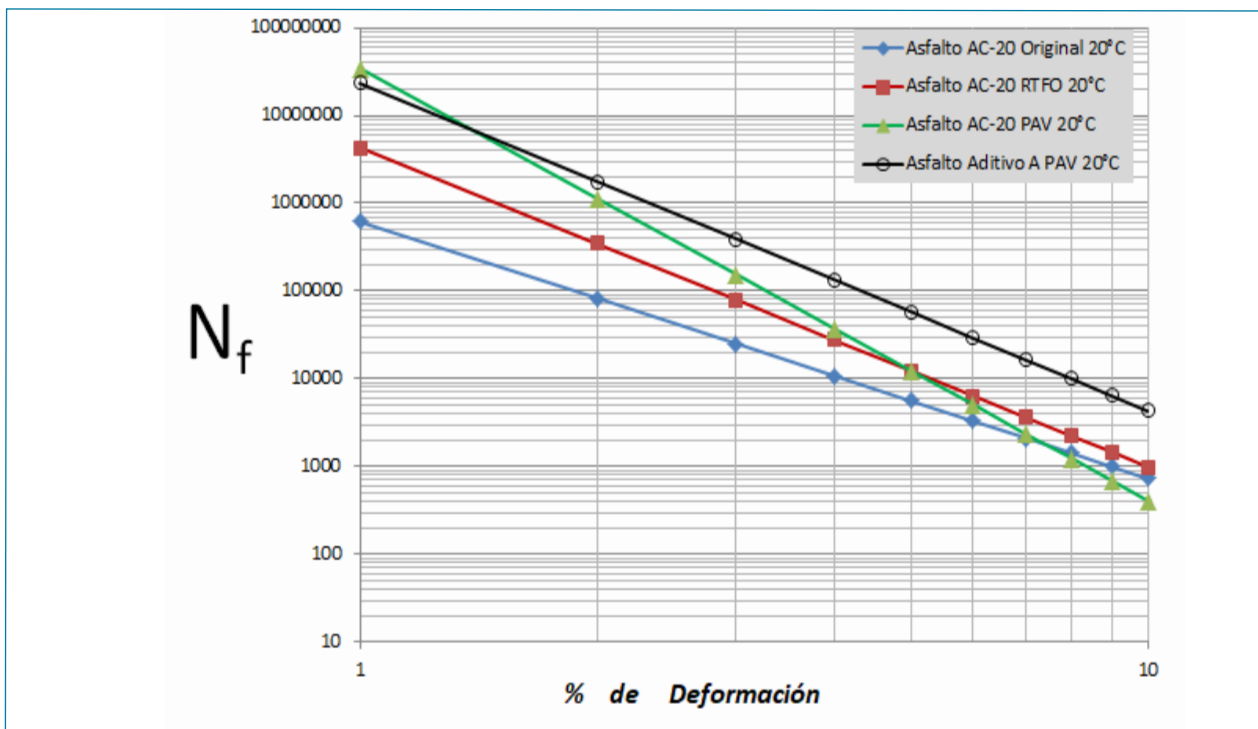


Figura 12. Número de ciclos a la falla en función de la deformación aplicada utilizando la prueba "LAS"

## 4. CONCLUSIONES

- El asfalto AC-20 aumenta su rigidez y fragilidad debido a la oxidación del mismo llevada a cabo con las pruebas de RTFO (AASHTO T240) y PAV (AASHTO R28-06), este aumento de rigidez y fragilidad es más significativo a las temperaturas entre 30°C y 82°C.
- El asfalto AC-20 disminuye su rango de la región viscoelástica lineal (ductilidad) conforme disminuye la temperatura y con el aumento de la oxidación del mismo utilizando las pruebas de RTFO y PAV.
- El punto de transición "SOL-GEL" del asfalto AC-20 original es de 9°C y aumenta a 19°C después de RTFO y aumenta 36°C después de la prueba de PAV, aumentando la probabilidad de fisuración a estas temperaturas.
- El asfalto AC-20 después de PAV aumenta su módulo de corte complejo a bajas frecuencias haciendo un asfalto más resistente a la deformación permanente pero también aumenta su módulo a altas frecuencias haciendo en asfalto susceptible a la fisuración.
- El asfalto AC-20 modificado con el aditivo "A" disminuye la rigidez y fragilidad del mismo debida a la oxidación utilizando las pruebas de RTFO y PAV, ya que respecto a este sin aditivo:
  - a) Se observó una disminución del módulo de corte complejo en el rango de temperaturas entre 4° y 94°C.
  - b) El grado PG según la norma AASHTO M320-17 fue de 70-34, mientras que sin aditivo fue 64-22.
  - c) El punto de transición "SOL-GEL" fue de 19°C, mientras que sin aditivo fue de 36°C.
  - d) Se observa una mayor deformación antes de romperse, es decir mayor ductilidad a 4°C.
  - e) Utilizando la curva maestra a bajas frecuencias presentó un menor módulo complejo, es decir menor rigidez haciéndolo más resistente a la fisuración por fatiga y térmica y a altas frecuencias presentó mayor módulo haciéndolo más resistente a la deformación permanente.
  - f) Se observa mayor número de ciclos a la falla a cualquier porcentaje de deformación.

## 5. REFERENCIAS

- [1] Antecedentes del diseño y Análisis de Mezclas Asfálticas Superpave. Asphalt Institute, USA.
- [2] Estudio físico-químico de la oxidación del betún asfáltico y su relación con la fatiga a temperaturas intermedias de servicio. Rafael Ernesto Villegas, Alejandra Baldi, José Pablo Aguiar, Luis Guillermo Loría-Salazar.
- [3] Thomas G. Mezger. Applied Rheology. ISBN 978-3-9504016-0-8.
- [4] Yam Nath Gotame. RELATIONSHIP BETWEEN PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF STRAIGHT AND RECOVERED ASPHALT BINDERS FROM ONTARIO. September 2016.
- [5] HIGH-TEMPERATURE CHARACTERIZATION OF 1 HIGHLY MODIFIED ASPHALT BINDERS AND MIXTURES. Alaeddin Mohseni, Haleh Azari. TRB 2014, USA.
- [6] MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS. David Roylance. 2008.
- [7] Bitumen fatigue performance evaluation. Ronald van Rooijen, Luc Planque, Marcel Wegmann. 2016.