

EL ASFALTO IDEAL PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES

A. GUTIERREZ

Departamento de Asfaltos, QUIMIKAO, México

AGUTIERREZ@QUIMIKAO.COM.MX

RESUMEN

El concreto asfáltico es un material de pavimentación compuesto de un ligante asfáltico y un agregado mineral. El asfalto actúa como un agente ligante que aglutina las partículas en una masa cohesiva y también impermeabiliza la mezcla, por esta razón es un material de construcción muy atractivo con el cual trabajar. El asfalto tiene limitaciones como todos los materiales, estas han sido estudiadas por investigadores con el objetivo de obtener un asfalto ideal.

Un asfalto ideal debe de tener un comportamiento especial de viscosidad en los tres siguientes intervalos de temperatura: 1) Baja viscosidad respecto al asfalto original a las temperaturas entre 100 y 160°C para promover beneficios a la cuales las mezclas asfálticas son producidas, y colocadas. 2) Más alta viscosidad que el asfalto original a las temperaturas entre 52 y 82°C para reducir los problemas de deformación permanente. 3) Baja viscosidad respecto al asfalto original a temperaturas menores a 25°C para reducir problemas de fisuración por fatiga.

En este estudio, un nuevo aditivo fue desarrollado para obtener el asfalto ideal. Adicionando este aditivo dentro del asfalto es posible obtener el comportamiento del asfalto ideal. También usando este aditivo los problemas de oxidación del asfalto son reducidos así como la sensibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas.

1. INTRODUCCIÓN

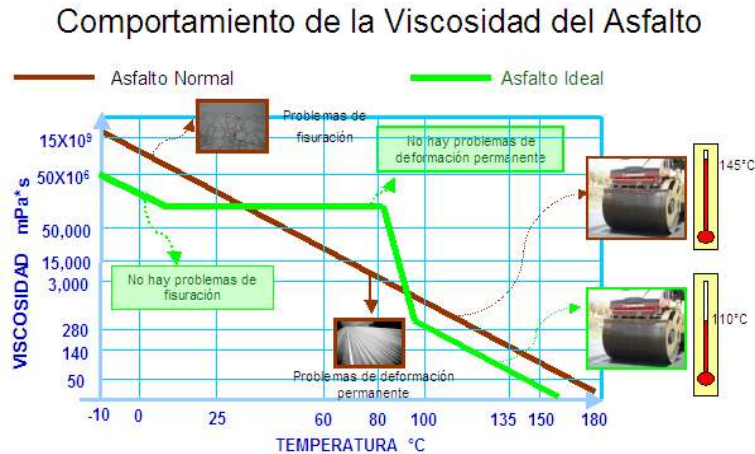
El concreto asfáltico (mezcla asfáltica en caliente) es un material de pavimentación compuesto de un ligante asfáltico y un agregado mineral. El asfalto actúa como un agente ligante que aglutina las partículas en una masa cohesiva y al ser impermeable al agua también impermeabiliza la mezcla. El agregado mineral, ligado por el material asfáltico, actúa como un esqueleto pétreo que aporta resistencia y rigidez al sistema. Como la mezcla contiene asfalto y agregado mineral, su comportamiento es afectado por las propiedades individuales de cada componente y por la interrelación de los mismos dentro del sistema, más sin embargo, en este estudio solo analizamos las propiedades que debe de tener el asfalto ideal para obtener una mezcla de alta calidad.

El asfalto es un material de construcción atractivo y estimulante con el cual trabajar, pero como todos los materiales presenta fortalezas y debilidades. Las cinco principales debilidades del asfalto son las siguientes:

- El asfalto presenta altas viscosidades a las temperaturas entre 100 y 160°C.
- El asfalto a temperaturas entre 58 y 82°C tiene la consistencia de un fluido viscoso.
- El asfalto a bajas temperaturas puede volverse demasiado frágil.
- El asfalto reacciona con el oxígeno del medio ambiente.
- El asfalto no tiene afinidad con el agregado.

En este estudio un aditivo químico base poliaminas grasas y derivados ha sido desarrollado para resolver estas cinco debilidades del asfalto, obteniendo así el asfalto

ideal. En la figura uno, podemos observar el comportamiento lineal de la viscosidad del asfalto normal en función de la temperatura (desde la temperatura de mezclado hasta las temperaturas de servicio del pavimento), también podemos observar el comportamiento especial de la viscosidad del asfalto ideal en los tres intervalos de temperatura: 1) Baja viscosidad respecto al asfalto original a las temperaturas entre 100 y 160°C para promover beneficios a la cuales las mezclas asfálticas son producidas, y colocadas, 2) más alta viscosidad que el asfalto original a las temperaturas entre 52 y 82°C para reducir los problemas de deformación permanente, 3) baja viscosidad respecto al asfalto original a temperaturas menores a 25°C para reducir problemas de fisuración por fatiga.



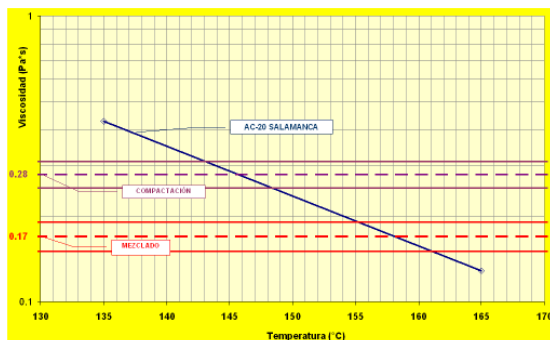
"Figura 1- Comportamiento lineal de la viscosidad del asfalto y comportamiento especial de la viscosidad del asfalto ideal en función de la temperatura".

Se utilizan muchos aditivos para mejorar el comportamiento del asfalto, pero solo resuelven dos o tres de las cinco principales debilidades del mismo, probablemente el modificador más usado en el mundo es el polímero SBS porque es un elastómero, pero al utilizar este polímero la viscosidad del asfalto a las temperaturas entre 100 y 160°C se incrementa dificultando el proceso de mezclado y compactación de las mezclas asfálticas [1]. El aditivo desarrollado en este estudio, reduce las cinco debilidades del asfalto haciéndolo más blando y elástico en todo el rango de temperaturas mejorando el grado PG a altas y bajas temperaturas y además disminuye la viscosidad del asfalto a las temperaturas entre 100 y 160°C. Este aditivo es una poliamida obtenida de la reacción de un ácido graso con una mezcla de diferentes aminas y es completamente soluble en el asfalto por lo que es muy estable en el mismo. La incorporación de este aditivo en el asfalto es fácil y rápida, solo es necesario calentar el mismo a una temperatura entre 150 y 155°C para después adicionar el aditivo mezclándolo por 30 minutos.

1.1. El asfalto presenta altas viscosidades a las temperaturas entre 100 y 160°C.

Los procedimientos de diseño de mezclas asfálticas han utilizado los rangos de equiviscosidad-temperatura para la determinación de las temperaturas de mezclado y compactación por muchos años. Los métodos de diseño para mezclas asfálticas comenzaron en 1962 en el Instituto del Asfalto recomendando los rangos de temperatura de mezclado y compactación para el laboratorio basados en la viscosidad del asfalto. En aquel tiempo, los rangos de viscosidad fueron especificados basados en la viscosidad Saybol-Furol. En 1974, el manual MS-2 recomendaba un rango de viscosidad entre 170 ± 20 centistokes para la temperatura de mezclado y de 280 ± 30 centistokes para la temperatura de compactación en la elaboración de un diseño Marshall. Muchos años después, estos mismos rangos han sido recomendados por los diseños de mezclas de Superpave, excepto que las unidades han sido convertidas a unidades del sistema internacional: 0.17 ± 0.2 Pascal-segundo para temperaturas de mezclado y 0.28 ± 0.3 Pascal-segundo para temperaturas de compactación y la gráfica resultante de la relación

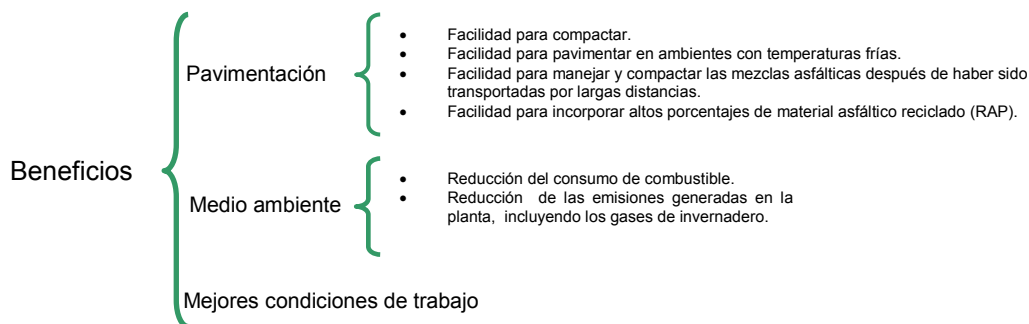
viscosidad-temperatura suele ser lineal cuando se utiliza una escala logarítmica, un ejemplo de esta gráfica es mostrada utilizando el asfalto mexicano AC-20 de la refinera de Salamanca en la figura 2.



“Figura 2 – Gráfica de viscosidad-temperatura del asfalto AC-20 de Salamanca para determinar las temperaturas de mezclado y compactación”.

Las temperaturas determinadas para el mezclado utilizando el rango de viscosidad de 0.17 ± 0.2 Pascal-segundo no son recomendadas para la aplicación en campo, solo se recomienda para el laboratorio ya que hay que considerar la granulometría del agregado (contenido de finos), el tipo de planta y el tiempo de mezclado. La temperatura de mezclado apropiada en campo para un cubrimiento adecuado puede ser entre 5 y 20°C más baja que la determinada en el laboratorio por este método. La temperatura de compactación en campo generalmente es la misma que la del laboratorio (0.28 ± 0.3 Pascal-segundo) controlando todas las operaciones de planta para el proyecto que son afectadas por diversos factores como: temperatura del aire, temperatura de la base, velocidad del viento, distancia de acarreo, tipo de compactador y espesor de la carpeta. Para asfaltos modificados, la temperatura de mezclado para un adecuado cubrimiento es generalmente más alta que para asfaltos sin modificar. Mezclas con asfaltos modificados deben de ser compactadas a temperaturas más altas [2].

Con el objetivo de reducir la alta viscosidad de el asfalto a las temperaturas entre 100 y 160°C se han desarrollaron un grupo de tecnologías denominadas Mezclas Asfálticas Tibias (Warm Mix Asphalt). Estas mezclas tibias representan un grupo de tecnologías las cuales permiten una reducción en las temperaturas a las cuales las mezclas asfálticas son producidas y colocadas. Estas tecnologías tienden a reducir la viscosidad del asfalto y proporcionan un completo cubrimiento del agregado a temperaturas más bajas. La reducción de viscosidad y de temperatura en la producción y colocación proporciona beneficios potenciales [3]. Estos beneficios potenciales son mostrados en la figura 3.



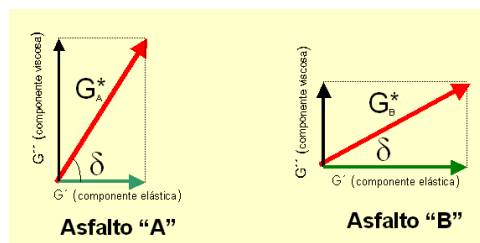
“Figura 3 – Gama de beneficios potenciales de las Mezclas Asfálticas Tibias”.

Las tecnologías de las Mezclas Asfálticas Tibias solo cambian la conducta de la viscosidad del asfalto respecto al asfalto normal en el rango de temperaturas entre 100 y 160°C , pero el asfalto ideal propuesto en este estudio cambia la viscosidad del asfalto como las Mezclas Asfálticas Tibias y también cambia la viscosidad del asfalto a bajas temperaturas respecto al asfalto normal tal como lo muestra la figura 1.

1.2. El asfalto a las temperaturas entre 58 y 82°C muestra la consistencia de un líquido viscoso.

A las temperaturas entre 58 y 82°C o bajo cargas sostenidas (camiones a baja velocidad o estacionados), el asfalto actúa como un líquido viscoso y comienza a fluir no regresando a su posición original. Por esto, en climas cálidos algunos pavimentos asfálticos fluyen bajo cargas repetidas y forman ahuellamientos. Sin embargo, el ahuellamiento de los pavimentos asfálticos en climas cálidos es también influido por las propiedades de los agregados y es probablemente más correcto decir que es la mezcla asfáltica la que tiene un comportamiento plástico [4].

A las temperaturas en que la mayoría de los pavimentos soportan el tráfico, los asfaltos se comportan simultáneamente como líquidos viscosos y sólidos elásticos. Midiendo G^* (Módulo de Corte Complejo) y δ (ángulo de fase) utilizando el Reómetro de Corte Dinámico (DSR), se obtiene una información más completa del comportamiento del asfalto a las temperaturas de servicio del pavimento. Los vectores G_A^* y G_B^* de la figura 4, representan el Módulo de Corte Complejo de los asfaltos "A" y "B". Cuando estos asfaltos soportan una carga, parte de la deformación es elástica G' (recuperable) y parte es viscosa G'' (no recuperable); por ello, el asfalto es un material visco-elástico. Por ejemplo, en la figura 4, aún cuando ambos asfaltos son visco-elásticos y tienen el mismo G^* , el asfalto "B" es más elástico que el asfalto "A" porque su ángulo de fase δ es más pequeño. Debido a que el asfalto "B" tiene una componente elástica relativamente mayor, se recuperará mucho más del efecto de la carga aplicada. Este ejemplo claramente muestra que G^* por sí solo no es suficiente para describir el comportamiento del asfalto, ya que se necesita además el valor del ángulo de fase δ [5]. El propósito en este estudio es hacer un asfalto con un comportamiento ideal y además hacer un asfalto blando pero elástico con un valor pequeño de δ a las temperaturas entre 58 y 82°C para resolver esta debilidad del asfalto.



"Figura 4 – Conducta visco-elástica del asfalto".

1.3. El asfalto a bajas temperaturas puede volverse demasiado frágil.

A bajas temperaturas (días fríos de invierno) o bajo cargas muy repetidas (camiones a alta viscosidad), el asfalto se comporta como un sólido elástico. Los sólidos elásticos son como bandas de goma; esto es, se deforman al ser cargados y retornan a su forma original al ser descargados. Si se aplica una carga excesiva, el sólido elástico puede romperse. Aunque el asfalto es un sólido elástico a baja temperatura, puede volverse demasiado frágil y agrietarse bajo carga excesiva [5]. Es por esto que el agrietamiento a baja temperatura a veces ocurre en pavimentos asfálticos en climas fríos. En este caso, las cargas se deben a esfuerzos internos que se desarrollan dentro del pavimento cuando el proceso de contracción es restringido (durante y después de una rápida caída de la temperatura). El propósito en este estudio es hacer un asfalto con un comportamiento ideal disminuyendo la viscosidad del asfalto a bajas temperaturas obteniendo un asfalto blando para resolver esta debilidad del asfalto.

1.4. El asfalto reacciona con el oxígeno del medio ambiente.

Debido a que los asfaltos están compuestos 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. El resultado es una estructura más frágil y es la razón del término endurecimiento por oxidación o por envejecimiento. Este fenómeno ocurre en el pavimento a una velocidad relativamente baja, si bien 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 verano que en invierno. Debido a este tipo de endurecimiento, los pavimentos viejos son más susceptibles al agrietamiento que los nuevos. Incluso, los pavimentos asfálticos nuevos pueden ser propensos a este fenómeno si no se compactan adecuadamente. 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. De hecho, una considerable parte del envejecimiento por oxidación ocurre antes de la colocación de la mezcla asfáltica, durante el mezclado el asfalto es adicionado al agregado caliente y la mezcla es mantenida a elevadas temperaturas por un periodo de tiempo y el asfalto se encuentra en películas muy delgadas, la reacción de oxidación ocurre a una velocidad mucho mayor. Otro tipo de endurecimiento ocurre durante el mezclado en caliente y construcción; se denomina "volatilización". A altas temperaturas los componentes volátiles del asfalto se evaporan. Un fenómeno llamado "endurecimiento físico" ha sido observado en los pavimentos asfálticos. Este ocurre luego de una larga exposición a bajas temperaturas. Al bajar la temperatura, el asfalto se contrae, lo que es acompañado por un incremento en su dureza. Aún cuando la temperatura se estabilice en un bajo valor, el asfalto continúa su contracción y endurecimiento. El endurecimiento físico es más pronunciado a temperaturas por debajo de 5°C, y debe considerarse al ensayar asfaltos a muy bajas temperaturas [5]. El propósito en este estudio es hacer un asfalto con un comportamiento ideal y además obtener un asfalto resistente a la oxidación, especialmente después de la prueba de RTFO el asfalto debe de cambiar muy poco sus propiedades originales para resolver esta debilidad del asfalto.

1.5. El asfalto no tiene afinidad con el agregado.

El proceso mediante el cual se rompe el enlace entre el asfalto y el agregado por la acción del agua es llamado Desprendimiento (stripping). Esto es basado en un fenómeno químico donde las moléculas de agua alteran las interacciones en la superficie donde el asfalto y el agregado están en contacto. Los agregados tienen más afinidad por el agua que por el asfalto, por lo que son más rápidamente humectados por el agua que por el mismo. La adhesión en la interacción asfalto-agregado, es generalmente definida como la formación de un enlace químico entre el asfalto y el agregado. Está bien establecido que el agua penetra a través del asfalto por un fenómeno de osmosis, la cantidad de agua que puede penetrar a través de la película de asfalto dependerá del espesor de la película del mismo y de la presión necesaria para poder penetrarla, así que, asfaltos blandos son más permeables al agua debido a su baja viscosidad [6]. El propósito en este estudio es hacer un asfalto con un comportamiento ideal que tenga una alta afinidad con el agregado incrementando el enlace entre ambos para resolver esta debilidad del asfalto.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

México es uno de los principales países productores de petróleo en el mundo y tiene seis refinerías, aunque solo produce asfalto en: "Salina Cruz", "Madero", "Cadereyta" y "Tula". La refinería de Salamanca es la más grande (@16,528 barriles por día), por esta razón en este estudio la mayoría de los resultados fueron obtenidos usando el asfalto AC-20

producido en esta refinería. Se recolectaron y se analizaron cien muestras de este asfalto de esta obteniéndose una muestra promedio la cual representa las propiedades del asfalto de este estudio. En este estudio, en algunas ocasiones se utiliza una muestra de asfalto de Salina Cruz y muestras de asfalto de otros países, especialmente una muestra de asfalto de la refinería de Barrancabermeja en Colombia denominada “Asfalto Barranca 60-70” que es un asfalto tipo AC-20.

El programa experimental comienza mostrando que el asfalto tiene alta viscosidad a las temperaturas entre 100 y 160°C y utilizando el aditivo propuesto en este estudio la viscosidad de todas las muestras de asfalto es reducida por lo que las temperaturas de mezclado y compactación también son reducidas basándonos en las especificaciones del método Superpave mostradas en la figura 2.

Para mostrar que el asfalto a las temperaturas entre 58 y 82°C muestra la consistencia de un líquido viscoso, se utilizaron las especificaciones para clasificar un asfalto de acuerdo a su comportamiento “Performance-Graded Asphalt Binder AASHTO M320”, donde el ahuellamiento ó deformación permanente es gobernada limitando “ $G^* / \sin \delta$ ” a un valor no menor de 1.00 KPa para el asfalto original y de 2.0 KPa para después de la prueba de oxidación RTFO de acuerdo al método AASHTO T-315.

Para mostrar que el asfalto a bajas temperaturas puede hacerse frágil, el reómetro de viga a flexión BBR fue usado de acuerdo a la especificación AASHTO M320. El método de prueba se vale de la teoría de vigas para medir la rigidez de una pequeña viga de asfalto simplemente apoyada bajo carga de creep. Se aplica una carga constante a la viga de asfalto y se mide la deflexión en el centro de la viga después de haber sido cargada por 4 minutos y entonces se calcula la rigidez a la fluencia (creep stiffness “s”) y la variación de la rigidez del asfalto al aplicar las cargas “m”.

Para mostrar que el asfalto reacciona con el oxígeno se utilizó la especificación AASHTO M320 utilizando el horno de la película delgada rotatoria “RTFO” y el horno de envejecimiento a presión “PAV” y se evaluó la viscosidad de todas las muestras de asfalto a las temperaturas entre 7 y 31°C después de haber realizado estas pruebas con el objetivo de mostrar como se incrementa la viscosidad del asfalto con la oxidación del mismo.

Para mostrar que entre el asfalto y el agregado existe una alta tensión interfacial se utilizó la prueba ASTM D-3625, donde la mezcla asfáltica es colocada en un baño de agua hirviendo durante 10 minutos para después evaluar el porcentaje de cubrimiento.

El aditivo propuesto en este estudio fue adicionado al asfalto utilizando las dosis de 3.0, 5.0 y 11.0% respecto al mismo. El asfalto tenía una temperatura de 150°C y el tiempo de dispersión fue de 30 minutos.

3. RESULTADOS Y COMENTARIOS

Los resultados de este estudio muestran las cinco debilidades del asfalto AC-20 de la refinería de Salamanca y de otros países, pero al utilizar el aditivo propuesto en este estudio estas cinco debilidades son minimizadas, especialmente si utilizamos la dosis del 11.0% respecto al asfalto obteniendo el comportamiento del asfalto ideal para pavimentos flexibles.

3.1. Resultados que muestran que el asfalto tiene alta viscosidad a las temperaturas entre 100 y 160°C.

La tabla 1, muestra la viscosidad de el asfalto AC-20 de la refinería de Salamanca a las temperaturas entre 120 y 150°C utilizando la muestra promedio descrita en el programa experimental, esta muestra fue la que se utilizó en todo el estudio.

Viscosidad del asfalto mexicano AC-20 de la refinería de Salamanca

Temperatura °C	Viscosidad Pa.s	Temperatura °C	Viscosidad Pa.s
120.2	0.9958	140.6	0.3532
120.8	0.9584	141.2	0.3443
121.4	0.9264	141.8	0.3342
122	0.8964	142.4	0.326
122.6	0.8678	143	0.319
123.2	0.8399	143.6	0.3111
123.7	0.8117	144.1	0.3025
124.3	0.7874	144.7	0.2949
124.9	0.7638	145.3	0.2878
125.5	0.7396	145.9	0.2819
126.1	0.716	146.5	0.2746
126.7	0.6948	147.1	0.2676
127.2	0.6739	147.6	0.263
127.8	0.6528	148.2	0.257
128.4	0.6317	148.8	0.2502
128.9	0.613	149.4	0.2443
129.6	0.5963	150	0.2393
130.1	0.5792	155.6	0.191
130.7	0.5631	158.1	0.172
131.3	0.5452	161.3	0.150
131.9	0.5298		
132.5	0.5148		
133	0.5005		
133.6	0.4861		
134.2	0.4725		
134.8	0.4604		
135.4	0.4487		
136	0.4356		
136.5	0.4228		
137.1	0.4135		
137.8	0.4026		
138.3	0.3919		
138.9	0.3816		
139.5	0.3703		
140.1	0.3611		
140.6	0.3532		

Rango de temperatura de Compactación

Rango de temperatura de Mezclado

"Tabla 1.- Datos de viscosidad vs. temperatura del asfalto AC-20 de la refinería de Salamanca (muestra promedio) a las temperaturas entre 120 y 150°C".

La tabla 2, muestra la viscosidad de el asfalto AC-20 de la refinería de Salamanca más 11.0% de el aditivo propuesto en este estudio a las temperaturas entre 120 y 150°C, el rango de temperaturas de mezclado y compactación es reducido en forma significativa respecto al asfalto normal (sin aditivo).

Viscosidad del asfalto mexicano AC-20 de Salamanca más 11.0% de aditivo

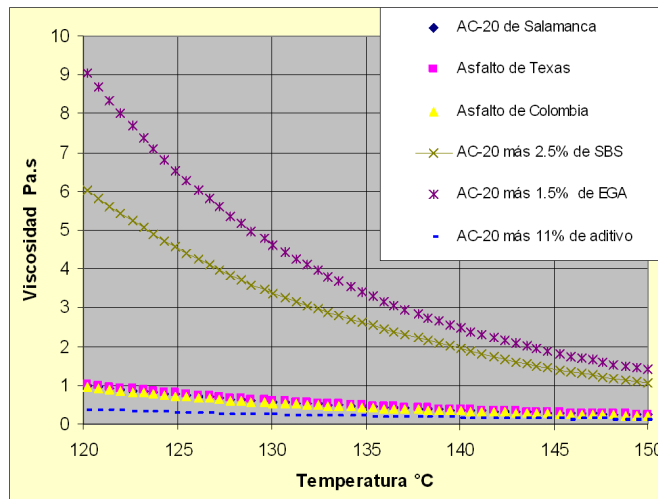
Temperatura °C	Viscosidad Pa.s	Temperatura °C	Viscosidad Pa.s
120.2	0.3664	141.3	0.1521
120.8	0.3596	141.8	0.155
121.4	0.3513	142.4	0.1481
122	0.3372	143	0.139
122.6	0.3219	143.5	0.1359
123.1	0.3178	144.1	0.1403
123.7	0.3155	144.7	0.1402
124.3	0.3038	145.3	0.1326
124.9	0.291	145.9	0.1239
125.4	0.2825	146.5	0.1256
126.1	0.282	147.1	0.1294
126.6	0.2773	147.6	0.1245
127.2	0.2657	148.2	0.1164
127.8	0.253	148.8	0.1123
128.4	0.2505	149.4	0.1171
129	0.251	150	0.1191
129.6	0.2421		
130.1	0.2317		
130.7	0.2237		
131.3	0.2256		
131.9	0.2238		
132.5	0.2139		
133.1	0.2023		
133.6	0.2006		
134.2	0.2028		
134.8	0.1975		
135.4	0.1882		
136	0.1802		
136.5	0.1827		
137.2	0.1838		
137.7	0.1753		
138.3	0.1659		
138.9	0.1694		
139.5	0.1675		
140	0.1591		
140.6	0.1505		

Rango de temperaturas de Compactación

Rango de temperaturas de mezclado

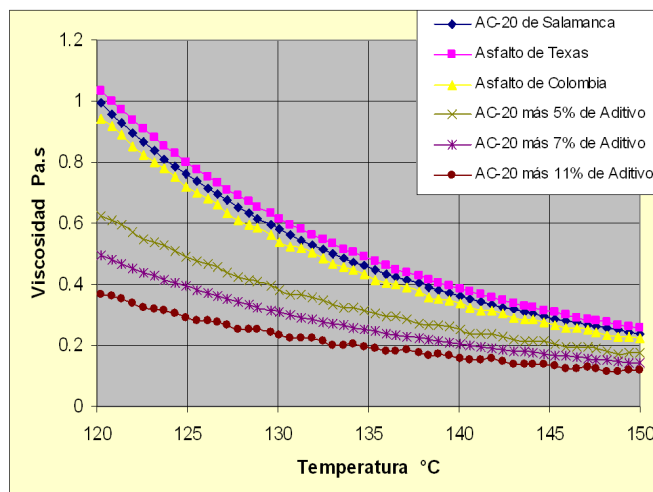
"Tabla 2 – Datos de viscosidad vs. temperatura del asfalto AC-20 de Salamanca más 11.0% de aditivo a las temperaturas entre 120 y 150°C".

La figura 5, muestra la alta viscosidad de los asfaltos modificados con los polímeros SBS y EGA a las temperaturas entre 120 y 150°C respecto a la viscosidad de los asfaltos tipo AC-20 de México y de otros países, por lo que al utilizar estos polímeros el mezclado, la trabajabilidad y la compactación de las mezclas asfálticas puede dificultarse por el incremento de la viscosidad. Utilizando el 11.0% de el aditivo propuesto en este estudio, la viscosidad del asfalto es reducida respecto a la viscosidad de los asfaltos tipo AC-20 y mucho más respecto a la viscosidad de los asfaltos modificados obteniendo beneficios como el ahorro de combustible, reducción de emisiones, disminución de le exposición de los trabajadores y sobre todo mejora la compactación por la reducción de temperaturas.



"Figura 5 – Viscosidad de asfaltos modificados con polímeros y viscosidad de asfaltos tipo AC-20 de México y otros países a las temperaturas entre 120 y 150°C".

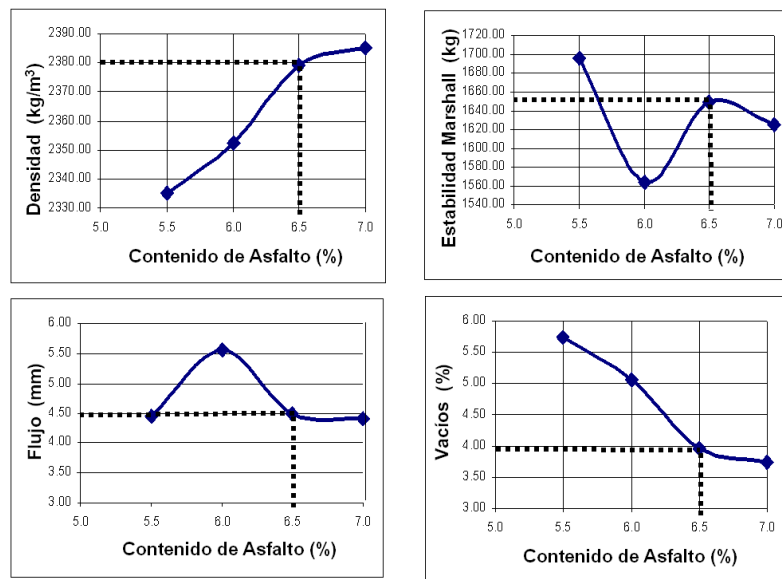
La figura 6, muestra la reducción de la viscosidad del asfalto utilizando diferentes porcentajes del aditivo propuesto en este estudio respecto a la viscosidad de los asfaltos tipo AC-20 de México y de otros países. La mejor reducción de la viscosidad del asfalto fue obtenida utilizando 11.0% de aditivo y con esta dosis el comportamiento del asfalto ideal fue obtenido.



"Figura 6 – Viscosidad de asfaltos tipo AC-20 de México y de otros países y viscosidad del asfalto AC-20 de Salamanca utilizando diferentes dosis de aditivo a las temperaturas entre 120 y 150°C".

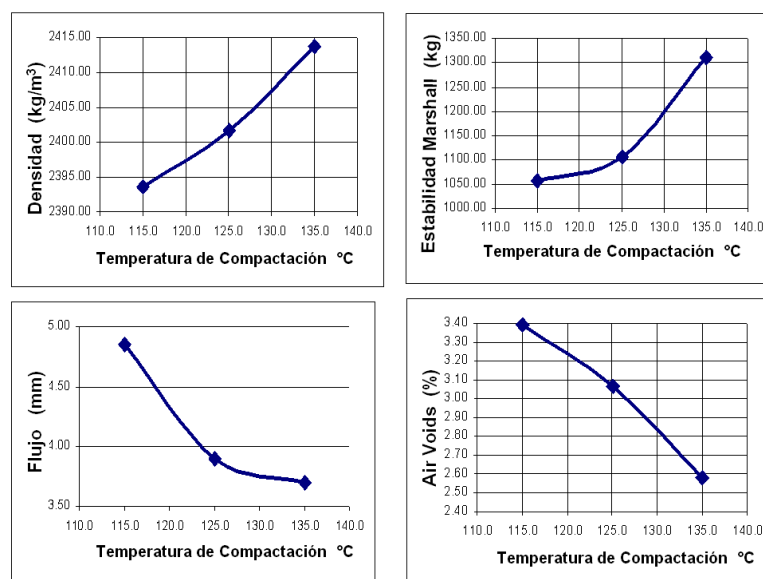
Un diseño Marshall fue elaborado utilizando el asfalto AC-20 de Salamanca, el rango de la temperatura de mezclado con el que se hicieron los especímenes fue de 155.6 a 161.3°C y el rango de temperatura de compactación fue de 143.6 a 148.8°C de acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 1 utilizando las especificaciones del método Superpave

para la determinación de las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio. La figura 7 muestra los resultados del este diseño Marshall donde el contenido óptimo de asfalto fue de 6.5% con 4.0% de vacíos y una densidad de diseño de 2,380 Kg/m³.



"Figura 7 – Resultados del diseño Marshall de la mezcla asfáltica utilizando asfalto AC-20 de la refinera de Salamanca, el contenido óptimo de asfalto fue de 6.5%, el rango de la temperatura de mezclado fue de 155.6 a 161.3 y el rango de la temperatura de compactación fue de 143.6 a 148.8°C":

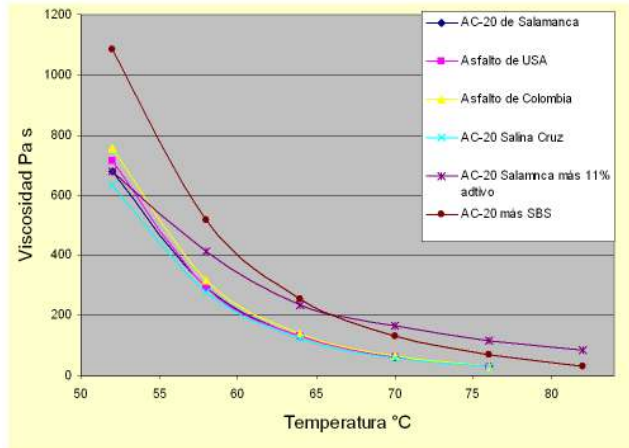
Se hizo otro diseño Marshall con el mismo asfalto AC-20 de Salamanca más la adición de 11.0% del aditivo propuesto en este estudio, la temperatura de mezclado con la que se hicieron los especímenes fue de 134.8 a 140.6°C y los especímenes se compactaron a diferentes temperaturas: 135, 125 y 115°C. La figura 8 muestra los resultados de este diseño Marshall donde todas las pruebas fueron hechas con un contenido de asfalto de 6.5% (que es el mismo que se usó en el diseño Marshall con el asfalto AC-20 normal). La temperatura de compactación fue reducida con el objetivo de encontrar la temperatura mínima para lograr la densidad del diseño Marshall original (2,380 Kg/m³); utilizando 115°C de temperatura de compactación el valor de la densidad de la mezcla fue 2,394 Kg/m³ y se logró un contenido de vacíos del 3.4% debido al efecto del aditivo propuesto en este estudio.



"Figura 8 – Reducción de la temperatura de compactación en el diseño Marshall utilizando 6.5% de asfalto AC-20 de la refinera de Salamanca más la adición de 11.0% del aditivo propuesto en este estudio".

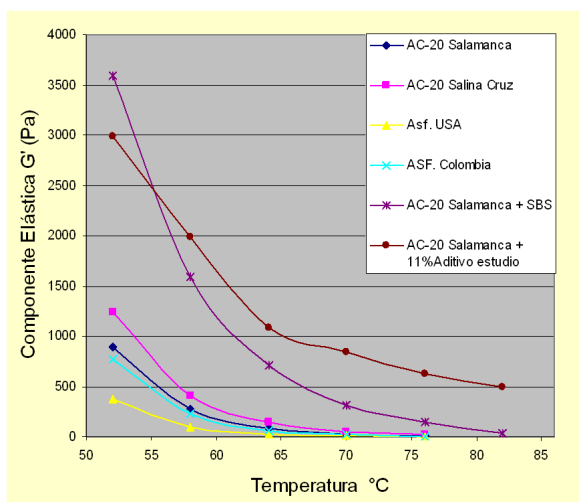
3.2. Resultados que muestran que el asfalto a las temperaturas entre 58 y 82°C tiene la consistencia de un líquido viscoso.

La figura 9 muestra que el asfalto a temperaturas entre 58 y 82°C tiene la consistencia de un líquido viscoso disminuyendo la resistencia del pavimento al ahuellamiento, pero utilizando el 11.0% del aditivo propuesto en este estudio este problema es disminuido porque el aditivo incrementa la viscosidad del asfalto como los polímeros que se usan comúnmente y el comportamiento ideal del asfalto a estas temperaturas fue obtenido.



“Figura 9 – Incremento de la viscosidad del asfalto AC-20 de Salamanca más 11.0% de aditivo a las temperaturas entre 58 y 82°C”.

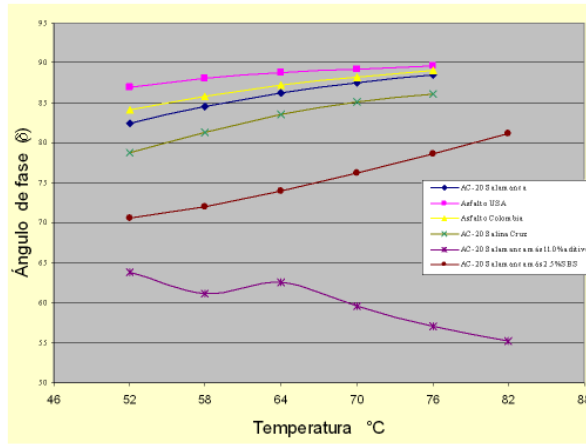
Incrementando la viscosidad del asfalto a las temperaturas entre 58 y 82°C esta debilidad del asfalto es disminuida, pero es más importante que el asfalto tenga una componente elástica grande y un menor ángulo de fase (δ) obteniendo un asfalto blando y elástico. El aditivo propuesto en este estudio proporciona a el asfalto estas propiedades. La figura 10 muestra que utilizando 11.0% de el aditivo en el asfalto de Salamanca, la componente elástica G' tiene un alto valor a las temperaturas entre 58 y 82°C reduciendo el ahuellamiento en los pavimentos y además se obtuvo un grado PG de 82.



Asfalto AC-20 de Salamanca más 11.0% de aditivo.					
Resultados antes de la prueba de RTFO					
Temperatura (°C)	$G' / \text{sen } \delta$ (KPa)	Ángulo de fase δ	G' (comp. Elástica) (Pa)	G'' (comp. Viscosa) (Pa)	G^* (Módulo de corte) (KPa)
52	7.556	63.81	2992	6084	6.7803
58	4.697	61.09	1986	3600	4.1117
64	2.638	62.55	1079	2078	2.3410
70	1.924	59.57	840.2	1430	1.6590
76	1.376	57.07	628.6	970.4	1.1566
82	1.044	55.17	489.5	703.5	0.8570
Resultados después de la prueba de RTFO					
52	23.42	66.63	8528	19740	21.500
58	12.52	66.38	4596	10510	11.470
64	7.484	65.34	2638	6180	6.801
70	5.172	62.22	2133	4048	4.576
76	3.481	60.84	1481	2654	3.040
82	2.322	59.12	1022	1710	1.9928

“Figura 10 – Alto valor de la componente elástica de el asfalto con 11.0% de aditivo a las temperaturas entre 58 y 82°C. Se obtuvo un grado PG de 82”.

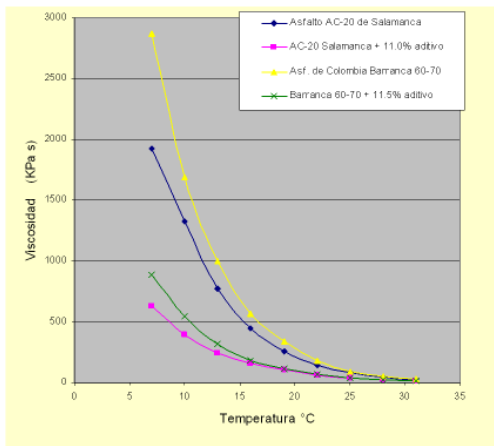
La figura 11 muestra el comportamiento especial en el asfalto del ángulo de fase (δ) utilizando el 11.0% del aditivo propuesto en este estudio, el ángulo de fase disminuye a las temperaturas entre 58 y 82°C haciendo el asfalto más elástico. Normalmente todos los asfaltos (modificados o no modificados) incrementan su ángulo de fase con la temperatura (esta es la razón porque el asfalto tiene la consistencia de líquido viscoso) y el pavimento tiene una baja resistencia a el ahuellamiento.



"Figura 11 – Comportamiento especial en el asfalto del ángulo de fase (δ) utilizando el 11.0% del aditivo propuesto en este estudio a las temperaturas entre 52 y 82°C".

3.3. Resultados que muestran que el asfalto a bajas temperaturas puede volverse frágil.

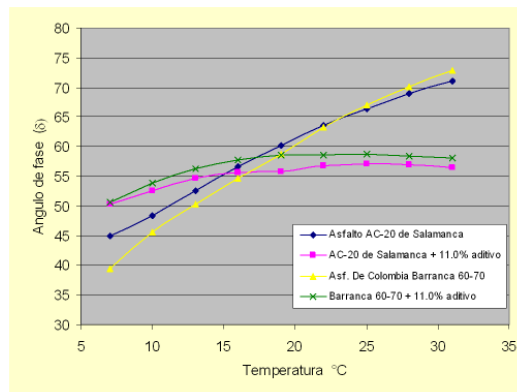
El resultado de cuando la componente elástica presenta un mayor valor que la componente viscosa, el ángulo de fase (δ) disminuye y la viscosidad se incrementa, es un asfalto que comienza a hacerse frágil. La figura 12 muestra la viscosidad de los asfaltos de México y Colombia a las temperaturas entre 7 y 31°C y utilizando el 11.0% de aditivo la viscosidad de ambos asfaltos es reducida obteniendo el comportamiento ideal del asfalto a bajas temperaturas.



Temperatura °C	Viscosidad KPa s			
	AC-20 Salamanca	AC-20 Salamanca + 11.0% aditivo	AC-20 Colombia	AC-20 Colombia + 11.0% aditivo
31	26.47	17.66	28.75	16.15
28	46.29	26.14	51.69	25.09
25	81.25	39.21	94.46	39.92
22	142.6	64.3	178.1	65.12
19	259.1	105.2	342.1	112.8
16	446.4	156.3	569.3	185.1
13	775.3	240.5	1000	316.1
10	1325	391.8	1693	542.7
7	1925	630.4	2868	887

"Figura 12 – Reducción de la viscosidad de asfaltos AC-20 de Colombia y México por la adición del 11.0% de aditivo a las temperaturas entre 7 y 31°C".

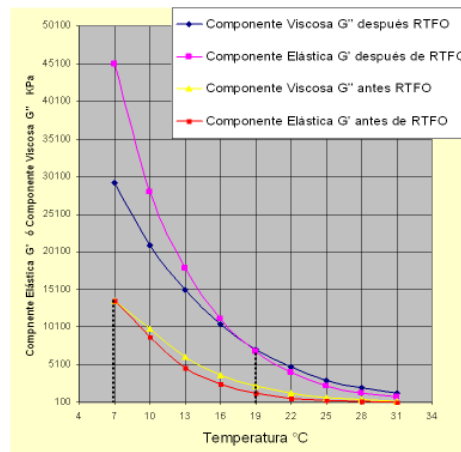
Utilizando el 11.0% del aditivo, el ángulo de fase (δ) presenta mayor valor que con el asfalto normal a bajas temperaturas haciendo un asfalto blando y elástico resistente a la fisuración por fatiga a bajas temperaturas, la figura 13 muestra este efecto.



"Figura 13 – Mayor valor del ángulo de fase (δ) a bajas temperaturas utilizando el 11.0% de aditivo en los asfaltos de Colombia y México".

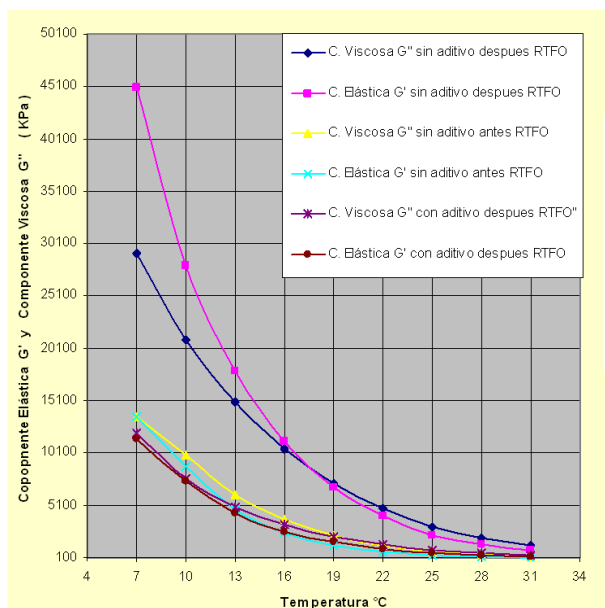
3.4. Resultados que muestran que el asfalto reacciona con el oxígeno.

La oxidación causa que el asfalto se haga más frágil ocasionando problemas de fisuración por fatiga en el pavimento. El asfalto llega a hacerse frágil cuando la componente elástica es más grande que la componente viscosa, cuando el ángulo de fase disminuye y cuando la viscosidad aumenta. La figura 14 muestra la temperatura cuando la componente viscosa y la componente elástica tienen el mismo valor a los 7°C en el asfalto original y cuando el asfalto es oxidado utilizando la prueba de RTFO, la componente viscosa y la componente elástica tienen el mismo valor a los 19°C, este gradiente de temperatura de 7 a 19°C es un indicador de que el asfalto es más frágil después de oxidarse.



“Figura 14 – Temperatura del asfalto AC-20 de Salamanca cuando las componentes viscosa y elástica tienen el mismo valor antes y después de RTFO”.

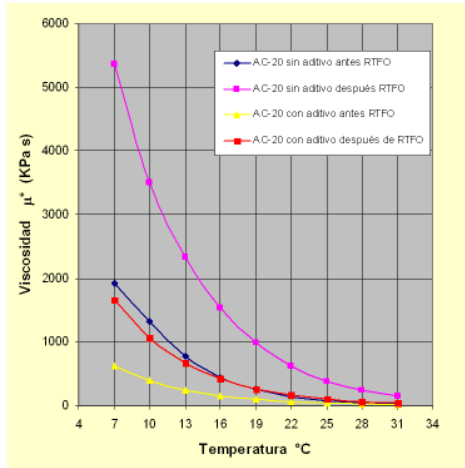
La adición del 11.0% del aditivo propuesto en este estudio a el asfalto AC-20 de Salamanca reduce la oxidación de el asfalto, la figura 15 muestra este efecto donde la componente viscosa y la componente elástica del asfalto AC-20 de Salamanca más 11.0% de aditivo después de la prueba de RTFO tienen el mismo valor a la temperatura de 7°C y la temperatura cuando la componente viscosa y la componente elástica de este asfalto sin aditivo después de la prueba de RTFO tienen el mismo valor es 19°C y antes de RTFO es 7°C, esto significa que el asfalto con el 11.0% de el aditivo comienza su vida en el pavimento como si el asfalto normal no hubiera sido sometido al proceso de mezclado y compactación, esto es una gran ventaja porque el principal problema de oxidación del asfalto ocurre en el proceso de mezclado y compactación.



Temperatura °C	AC-20 de Salamanca antes de la prueba de RTFO		AC-20 de Salamanca después de la prueba de RTFO		AC-20 de Salamanca + 11.0% aditivo después de la prueba de RTFO	
	Componente Viscoso G'' KPa	Componente Elástica G' KPa	Componente Viscoso G'' KPa	Componente Elástica G' KPa	Componente Viscoso G'' KPa	Componente Elástica G' KPa
31	250.4	85.8	1266	781.2	366.6	233.9
28	431.8	166.8	1983	1359	562.4	365.9
25	744.5	325.3	3002	2280	854	573.8
22	1277	634.2	4785	4096	1349	950
19	2248	1288	7144	6830	2119	1685
16	3727	2456	10500	11230	3263	2629
13	6160	4707	14990	17920	4991	4405
10	9897	8806	20940	28020	7640	7483
7	13590	13628	29220	45000	12000	11426

“Figura 15 – Temperatura del AC-20 de Salamanca con y sin aditivo cuando la componente viscosa y elástica tienen el mismo valor antes y después de la prueba de RTFO”.

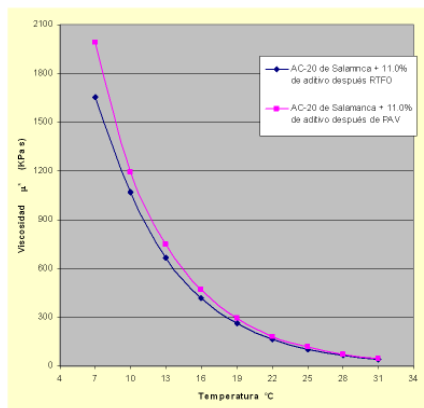
Con la oxidación del asfalto durante el proceso de mezclado y compactación, el asfalto comienza hacerse frágil incrementando su viscosidad a bajas temperaturas, la figura 16 muestra la viscosidad a bajas temperaturas del asfalto AC-20 de Salamanca antes y después de la prueba de RTFO y la viscosidad del asfalto a bajas temperaturas utilizando el 11.0% de aditivo propuesto en este estudio. La viscosidad del asfalto con el 11.0% de aditivo después de RTFO es menor que la del asfalto normal, esto significa que el aditivo resuelve la oxidación del asfalto durante el proceso de mezclado y compactación.



Temperatura °C	Viscosidad KPa s			
	AC-20 Salamanca antes de RTFO	AC-20 Salamanca + 11.0% de aditivo antes de RTFO	AC-20 Salamanca después de RTFO	AC-20 Salamanca + 11.0% de aditivo después de RTFO
31	26.47	17.66	148.8	43.49
28	46.29	26.14	240.4	67.1
25	81.25	39.21	377	102.9
22	142.6	64.3	629.8	165
19	259.1	105.2	968.3	264.6
16	446.4	156.3	1537	419
13	775.3	240.5	2337	665.7
10	1325	391.8	3498	1069
7	1925	630.4	5365	1657

"Figura 16 – Viscosidad del asfalto AC-20 de Salamanca con y sin aditivo antes y después de la prueba de RTFO a bajas temperaturas".

Una prueba estándar para acelerar el envejecimiento del asfalto consiste en utilizar la cámara de envejecimiento a presión (Pressure Aging Vessel "PAV"), esta prueba simula el envejecimiento del asfalto debido a la oxidación durante un largo periodo de servicio. Utilizando el 11.0% del aditivo propuesto en este estudio, esta oxidación del asfalto debida al largo periodo de servicio es reducida ya que la viscosidad del asfalto después de la prueba de RTFO es muy similar que la viscosidad del asfalto después de la prueba de PAV. La variación de la rigidez del asfalto (Creep Stiffness) después de la prueba de PAV fue evaluada obteniendo un grado PG de -22; la figura 17 muestra estos resultados.



**Asfalto AC-20 de Salamanca más 11.0% de aditivo
PG 82-22**

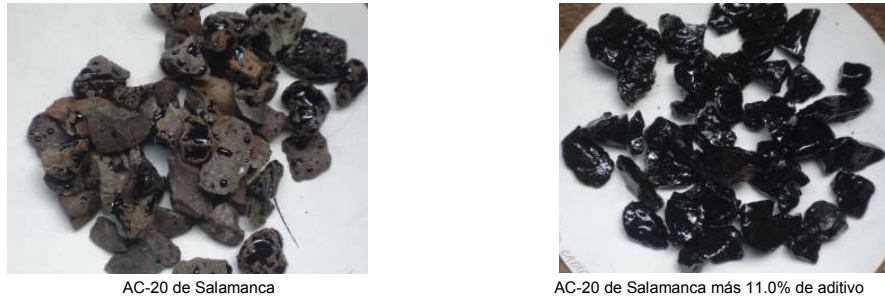
Creep Stiffness, m-value @ 60s -12°C AASHTO T313 = 0.362
 Creep Stiffness, m-value @ 60s -16°C AASHTO T313 = 0.313
 Creep Stiffness, m-value @ 60s -18°C AASHTO T313 = 0.292

"Figura 17 – Viscosidad del asfalto AC-20 Salamanca más 11.0% de aditivo después de las pruebas de RTFO y PAV a las temperaturas entre 7 y 31°C".

Es importante considerar que todas las pruebas de oxidación fueron realizadas conforme el método AASHTO T 240-06 "Prueba de la película delgada rotatoria (RTFO)" que simula el endurecimiento que ocurre durante el mezclado y compactación de la mezcla asfáltica. La temperatura para esta prueba es 163°C ± 1°C, pero utilizando el 11.0% de aditivo la temperatura de mezclado no llegará a este límite porque el aditivo reduce la temperatura de mezclado y compactación (tabla 2), por esta razón la oxidación del asfalto con este aditivo en campo será menor que los resultados mostrados en este estudio.

3.5. Resultados que muestran que el asfalto no tiene afinidad con el agregado generándose una alta tensión interfacial en la superficie.

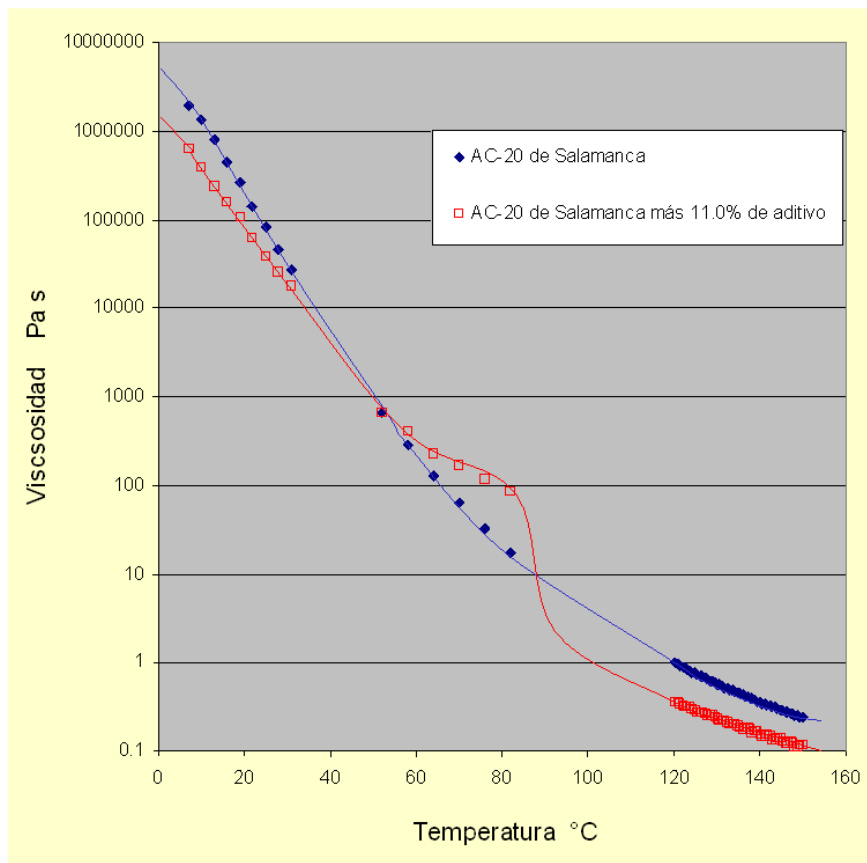
La figura 18 muestra la alta tensión interfacial en la superficie entre el asfalto AC-20 de Salamanca y un agregado Basáltico utilizando la prueba ASTM D-3625, utilizando el 11.0% del aditivo propuesto en este estudio, esta alta tensión interfacial fue reducida.



“Figura 18 – Efecto del aditivo en la reducción de la alta tensión interfacial entre el asfalto y el agregado Basáltico utilizando la prueba ASTM D-3625”.

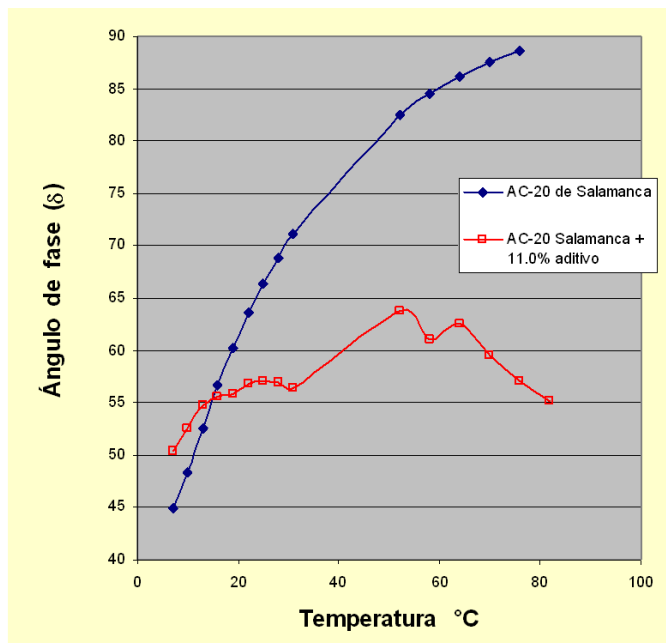
3.6. Resultados que muestran el comportamiento ideal del asfalto AC-20 de Salamanca.

Para mostrar el comportamiento ideal del asfalto AC-20 de la refinería de Salamanca utilizando el 11.0% de aditivo propuesto en este estudio, se recopilaron los datos de la tablas 1 y 2 (reducción de la viscosidad del asfalto a las temperaturas entre 120 y 150°C), los datos de la figura 9 (incremento de la viscosidad del asfalto a las temperaturas entre 58 y 82°C) y los datos de la figura 12 (reducción de la viscosidad del asfalto a las temperaturas entre 7 y 31°C) y estos datos fueron colocados en la gráfica de la figura 19.



“Figura 19 – Comportamiento ideal del asfalto AC-20 de la refinería de Salamanca utilizando el 11.0% de aditivo”.

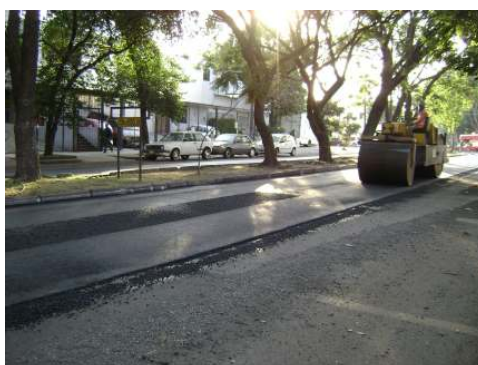
Utilizando el 11.0% del aditivo propuesto en este estudio se obtiene un asfalto especial caracterizado además del comportamiento ideal por un comportamiento blando y elástico en el rango de temperaturas entre 0 y 82°C (los polímeros más usados hacen al asfalto más elástico pero también más duro) debido a que el ángulo de fase (δ) cambia muy poco en este intervalo de temperatura y el ángulo de fase del asfalto normal cambia mucho disminuyendo la elasticidad a altas temperaturas y aumentando la dureza a bajas temperaturas. Este efecto es la principal innovación de este estudio y es mostrada en la figura 20.



"Figura 20 – Comportamiento del ángulo de fase (δ) del asfalto AC-20 de Salamanca con y sin aditivo en el rango de temperaturas entre 7 y 82°C".

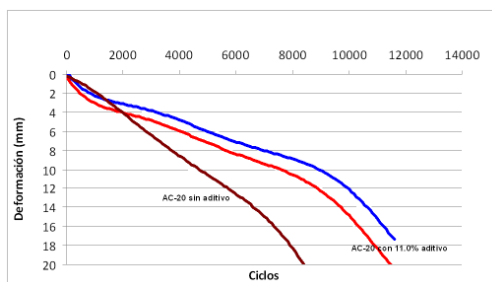
3.7. Aplicaciones en campo.

En algunas calles de la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México, se hicieron aplicaciones en campo siguiendo el diseño Marshall mostrado en la figura 7 que especifica 6.5% de asfalto respecto al agregado, 4% de vacíos y una densidad de diseño de 2,380 kg/m³. La figura 21 muestra una de las aplicaciones en la calle Morelos, donde la temperatura de mezclado fue de 130°C y la temperatura de compactación estuvo entre 95 y 115°C.



"Figura 21 – Aplicación en campo en la calle Morelos en la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México".

Algunos especímenes fueron extraídos de esta aplicación y la densidad de la mezcla estuvo entre 2,270 y 2,345 kg/m³ (más del 95% de la densidad de diseño) y estos especímenes fueron sometidos en la prueba de Hamburgo mostrando mejor comportamiento que los especímenes sin aditivo, la figura 22 muestra estos resultados.



"Figura 22 – Resultados de deformación utilizando la prueba de Hamburgo de los especímenes extraídos de la aplicación de la calle de Morelos".

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones utilizando el asfalto AC-20 de la refinería de Salamanca más el 11.0% de el aditivo propuesto en este estudio son las siguientes:

- El comportamiento ideal del asfalto fue obtenido reduciendo la viscosidad del asfalto a las temperaturas entre 100 y 150°C (tablas 1 y 2 y figuras 5, 6 y 19), incrementando la viscosidad del asfalto a las temperaturas entre 58 y 82°C (figuras 9 y 19) y reduciendo la viscosidad del asfalto a las temperaturas entre 4 y 31°C (figuras 12 y 19).
- Debido a las mínimas variaciones del ángulo de fase (δ) en el rango de temperaturas entre 7 y 82°C, se obtuvo un comportamiento blando y elástico de este asfalto ideal (figuras 11, 13 y 20). Este asfalto será más elástico a las temperaturas entre 58 y 82°C y será más blando a temperaturas menores a 20°C.
- Las cinco debilidades del asfalto fueron reducidas, especialmente la oxidación del mismo durante el proceso de mezclado y compactación, ya que después de la prueba RTFO la viscosidad de este asfalto ideal es menor que la viscosidad del asfalto sin aditivo antes de RTFO (figura 16) y también que después de la prueba RTFO las componentes elástica y viscosa de este asfalto ideal son iguales a la temperatura de 7°C, mientras que con el asfalto sin aditivo estas componentes son iguales a 19°C después de RTFO (figura 15), esto significa que este asfalto ideal comenzará su vida de servicio en el pavimento como si se hubiera utilizado una mezcla fría con asfalto normal pero con los beneficios de compactación de una mezcla en caliente.
- Conforme a las especificaciones para clasificar un asfalto de acuerdo a la norma "Performance-Graded Asphalt Binder AASHTO M320", se obtuvo un asfalto grado PG de 82 –22 (figura 10 y 17) amigable con el medio ambiente, ya que la mezcla asfáltica pudo ser compactada a temperaturas entre 95 y 115°C.
- Importantes contribuciones al medio ambiente son obtenidas utilizando este asfalto ideal ya que se utiliza menos energía para fabricar y colocar la mezcla asfáltica comparándola contra las tecnologías que emplean un asfalto PG 82 –22 con polímeros, así como se incrementa la durabilidad del asfalto en el pavimento.

REFERENCIAS

1. Corun,R. Asphalt Modifier Trends. Mid-Year Meeting, NAPA Colorado Springs, CO. July 2008.
2. Asphalt Institute Technical Bulletin. Laboratory Mixing and Compaction Temperatures.
3. National Asphalt Pavement Association. Warm Mix Asphalt: Best Practices.
4. Publication No.FHWA-SA-95-003. Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis.
5. Asphalt Institute. Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing. Superpave Series No.1
6. Asphalt Institute. Moisture Sensitivity. Best Practices to Minimize Moisture Sensitivity in Asphalt Mixtures.