



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

TESIS DE GRADO
ENVEJECIMIENTO ACCELERADO DE MEZCLAS ASFALTICAS POR OXIDACION
MONICA LORENA PARADA CABRERA
ALFREDO JOSE LEPESQUEUR MARTINEZ

DIRECTOR
DR. BERNARDO CAICEDO HORMAZA

BOGOTÁ, JULIO DE 2005.

TABLA DE CONTENIDO

1.	ESTUDIO DE ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFALTICAS POR OXIDACION..	4
1.1	FUNDAMENTOS TEORICOS.....	4
1.2	ANTECEDENTES DEL TEMA	10
2.	METODOLOGIA.....	18
2.1	REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRAFICO.....	18
2.2	EXTRACION DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	19
2.3	ENSAYOS DE LABORATORIO MEZCLAS ASFALTICAS ENVEJECIDAS NATURALMENTE	20
2.4	APLICACIÓN DEL MODELO DE DIFUSION Y OXIDACION.....	23
3.	RESULTADOS OBTENIDOS.....	35
3.1	MEZCLAS ASFALTICAS ENVEJECIDAS NATURALMENTE A DIFERENTES EDADDES DE SERVICIO.	35
3.2	MEZCLAS ASFÁLTICAS ENVEJECIDAD ACELERADAMENTE.	45
3.3	MEZCLA ASFALTICA ORIGINAL.....	52
3.4	CALCULO DE LOS PARAMETROS A, E, α y HS	53
3.5	APLICACIÓN DEL MODELO.....	57
3.6	VERIFICACION DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS APLICADOS.....	60
	CONCLUSIONES	63
	BIBLIOGRAFIA	67
	LISTA DE TABLAS.....	68
	LISTA DE FIGURAS.....	69
	ANEXOS.....	70

INTRODUCCION.

Colombia cuenta con una red de carreteras de 167 mil Kilómetros, de los cuales 16.575 Kilómetros como red primaria están a cargo de la Nación. De éstos, 11.741 kms. se encuentran pavimentados y 4.790 kms se encuentran en afirmado¹. A la Nación le cuesta cerca de 570 millones de pesos mejorar un kilómetro de carretera de pavimento asfáltico. El costo que debe asumir nuestra Nación por el hecho de construir, mejorar y/o rehabilitar las carreteras es elevado. Es por esto que se deben tomar medidas que solucionen y eviten el deterioro prematuro de los pavimentos asfálticos.

Varios factores intervienen en el envejecimiento y el deterioro de los asfaltos, uno de ellos es el proceso de oxidación. El envejecimiento se manifiesta por la pérdida de las propiedades fisicoquímicas de un material. Los asfaltos sufren durante el tiempo de mezclado y servicio un proceso de oxidación debido a factores como temperatura, presión y tiempo. La oxidación es el fenómeno en el cual el oxígeno actúa sobre los constituyentes más reactivos del asfalto manifestándose principalmente como endurecimiento, pérdida de la consistencia viscoelástica, fisuración y agrietamiento del asfalto. Adicionalmente, se debe decir que el envejecimiento por oxidación es particular en cada asfalto. Algunos asfaltos envejecen más rápido y se endurecen más que otros. Este hecho resulta en la necesidad de caracterizar la resistencia de los asfaltos a la oxidación, para luego tomar en cuenta esta resistencia a la hora de seleccionar asfaltos para pavimentos y predecir su comportamiento en el largo plazo.

En la presente investigación realizamos un análisis de las propiedades reológicas y químicas de las mezclas asfálticas a diferentes edades de servicio y de mezclas

¹ <http://www.mintransporte.gov.co/prensa/newinter/pavimen.htm>

asfálticas envejecidas aceleradamente en el laboratorio. Adicionalmente, realizamos una calibración de las variables de un modelo que representa el envejecimiento de los asfaltos, propuesto por Liu (1997), teniendo en cuenta los resultados de laboratorios de las propiedades mencionadas anteriormente y de los procesos de difusión observados en el transcurso de la investigación. Los resultados esperados contribuirán a las investigaciones encaminadas al estudio del envejecimiento por oxidación de las mezclas asfálticas, con el objeto de darle solución a los problemas presentados actualmente por el deterioro prematuro de los asfaltos, y aplicar las herramientas que permitan simular el envejecimiento real de las mezclas a partir de un tiempo determinado en el laboratorio.

1. ESTUDIO DE ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFALTICAS POR OXIDACION

1.1 FUNDAMENTOS TEORICOS

El asfalto se define como un material cementicio, de estado sólido o líquido con consistencia viscoelástica y color marrón oscuro a negro, en el cual los componentes que predominan son betunes. Químicamente está constituido por una mezcla compleja de hidrocarburos de alto peso molecular no volátil y soluble en tricloroetileno, n-pentano, n-heptano, que causan su ablandamiento al aumentar la temperatura. La composición del asfalto la podemos observar en la Figura No. 1.

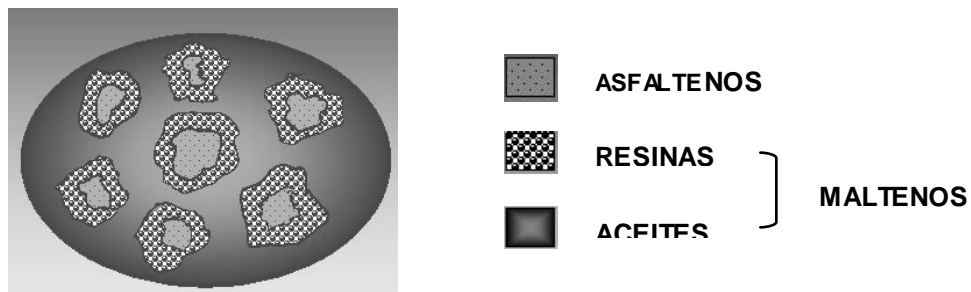


Figura No. 1. Tomada de: Tesis de grado, Msc, Cruz Marina Torres Caicedo, Universidad del Cauca.

Los materiales asfálticos son obtenidos en el proceso de refinación de hidrocarburos (compuestos orgánicos que contienen hidrógeno y carbono). El asfalto tiene tres características primordiales en el desempeño de la mezcla asfáltica: propiedades viscoelásticas, susceptibilidad a la temperatura y envejecimiento. Las propiedades viscoelásticas del asfalto dependen de la temperatura y de la frecuencia de la carga. Para temperaturas altas y baja

frecuencia el asfalto se comporta como un fluido viscoso. Para temperaturas bajas, el asfalto se comporta como un sólido elástico. La viscosidad es la característica que describe la resistencia de los líquidos a fluir.

El asfalto está compuesto por moléculas orgánicas las cuales reaccionan con el oxígeno del ambiente. Las oxidaciones del asfalto se caracterizan por una rápida oxidación inicial, seguida por una desaceleración. Esta reacción ocasiona el proceso de envejecimiento por oxidación, el cual se traduce en un aumento de la consistencia, disminución de la penetración, aumento de la viscosidad del punto de ablandamiento y del porcentaje de asfáltenos. El envejecimiento por oxidación cambia la estructura molecular de los asfaltos, creando estructuras moleculares más polares y de mayor tamaño. Durante la oxidación de asfaltos, la concentración de asfáltenos aumenta a expensas de las resinas y aceites. Al incrementarse los contenidos de asfáltenos, la penetración decrece y el punto de ablandamiento aumenta. A altas temperaturas el envejecimiento ocurre más rápidamente. Debido a esto, los asfaltos sufren envejecimiento en el proceso de mezclado y construcción al calentarse el mismo para la producción de la mezcla asfáltica. A temperaturas intermedias el asfalto se comporta como un material viscoelástico. Este comportamiento se caracteriza por una respuesta combinada ante cargas, con una componente viscosa y una componente elástica.

Por otra parte, las mezclas asfálticas están compuestas por agregado mineral y asfalto. Este último vuelve a la mezcla impermeable, al aglutinar las partículas del agregado convirtiéndolos en una masa densa. Es de vital importancia controlar en las mezclas asfálticas la deformación permanente, el agrietamiento por bajas temperaturas y el agrietamiento por fatiga. Adicionalmente, en las mezclas asfálticas se debe analizar el endurecimiento que sufren debido al envejecimiento por oxidación. Este envejecimiento en mezclas asfálticas, es función de la composición química del asfalto, las condiciones climáticas, tipo de la mezcla, gradación de los agregados, y porcentaje de vacíos.

En 1987 el programa estratégico de investigación de carreteras (SHRP)², desarrolló un nuevo sistema para especificar los materiales asfálticos. El programa estratégico mencionado anteriormente, surge como un mecanismo para la solución de los problemas asociados al comportamiento de las mezclas asfálticas. Los mecanismos responsables del envejecimiento de los ligantes asfálticos son volatilización pérdida de aceites livianos presentes en el asfalto y oxidación (reacción con el oxígeno del ambiente). El envejecimiento produce cambios en el comportamiento reológico del asfalto, transformándolo en un material más rígido y de menor susceptibilidad térmica. Durante la vida del asfalto se pueden distinguir dos importantes procesos de envejecimiento:

Envejecimiento primario: Se produce durante el mezclado, almacenamiento y colocación de la mezcla asfáltica.

Envejecimiento secundario: Es el que sufre el asfalto durante la vida de servicio como pavimento.

Para simular estos mecanismos se utilizan métodos de envejecimiento acelerado en el laboratorio, los cuales se realiza bajo condiciones específicas controladas que conllevan a que la vida útil del material se reduzca. Los ensayos estándares de envejecimiento acelerado más utilizados en asfaltos son:

RTFO: Los asfaltos son envejecidos en laboratorio empleando el horno de película delgada (RTFO) que simula el endurecimiento por oxidación que ocurre durante el proceso de mezclado en caliente y la colocación. El RTFO expone continuamente el ligante al calor y al flujo de aire durante 85 minutos y su acción rotatoria mantiene los modificadores dispersos en el asfalto (AASHTO T240; ASTM D2872).

PAV: Pressure aging vessel-PAV. Este equipo de envejecimiento a presión se utiliza en el laboratorio para simular el severo envejecimiento que sufre el asfalto

² <http://www.tfrc.gov/pubrds/marapr98/shrp.htm>, Julio 2005

después de varios años de servicio en un pavimento. Este ensayo utiliza presión y temperatura para reducir el tiempo de ensayo, el periodo de envejecimiento puede ser simulado en solo 20 horas y se realiza en un recipiente presurizado (Paving Aging Vessel) a una presión de 2.1Mpa. El método estima las propiedades fisicoquímicas de la mezcla asfáltica después de 5 a 10 años de envejecimiento en servicio. Ver Figura No. 2.



Figura No2. Ensayo PAV (Preassure Aging Vassel).

El comportamiento reológico del asfalto depende de la temperatura del asfalto y la duración de la carga:

A altas temperaturas y/o cargas lentas, el asfalto se comporta como un líquido viscoso, cuya viscosidad varía con las condiciones específicas de carga y temperatura.

A bajas temperaturas y/o cargas rápidas, el asfalto se comporta como un sólido elástico, cuya rigidez depende de las condiciones específicas de temperatura y carga.

A temperaturas intermedias el asfalto se comporta como un material viscoelástico. Este comportamiento se caracteriza por una respuesta combinada ante cargas, con una componente viscosa y una componente elástica.

La medición de las propiedades físicas del asfalto son realizadas antes y después de someter las muestras al envejecimiento acelerado utilizando el Reómetro de Corte Dinámico (DSR), ver Figura No. 3. El DSR se usa para medir las propiedades viscoelásticas (no-Newtonianas) del asfalto. El reómetro aplica un

patrón sinusoidal de tensiones de corte sobre una muestra asfáltica, midiendo su respuesta (deformación). La respuesta del asfalto presenta un patrón de la misma frecuencia, pero de distinta amplitud y desfasada en el tiempo. Comparando ambos patrones se obtienen dos importantes parámetros reológicos del asfalto:

Módulo Complejo (G^*): Razón entre la máxima tensión de corte aplicada y la máxima deformación obtenida. La magnitud de este parámetro indica la resistencia del asfalto a deformarse por esfuerzos de corte.

Angulo de Fase (δ): La respuesta del asfalto a temperaturas intermedias presenta ambos comportamientos, elástico y viscoso. Si la respuesta fuera puramente elástica sería inmediata, sin embargo la componente viscosa hace que se retarde. El ángulo de fase indica qué tan retrasada es la respuesta, variando desde 0° (respuesta puramente elástica) hasta 90° (respuesta puramente viscosa).

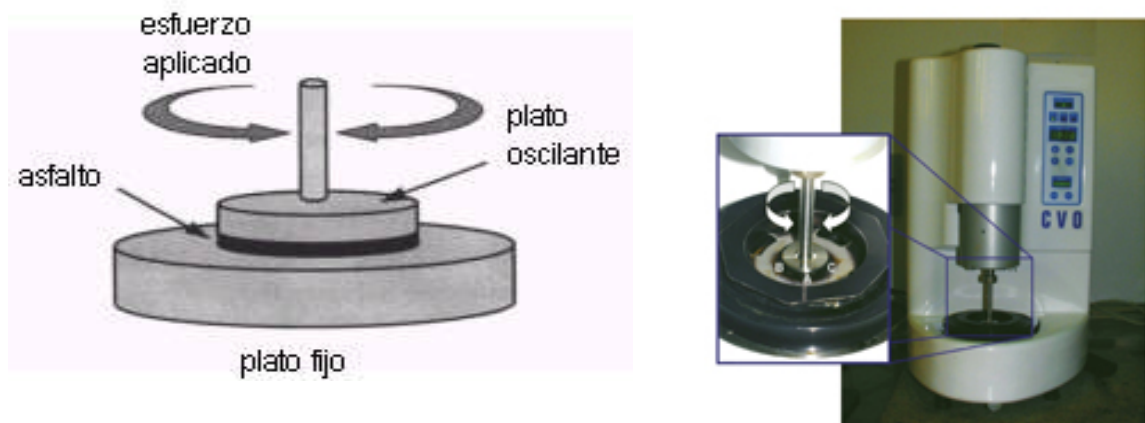


Figura No.3 Reómetro de Corte Dinámico (DSR). Tomada de <http://www.chasfalto.com>

Otros equipos que el SHRP utiliza para evaluar el comportamiento reológico de los asfaltos son:

Reómetro de Flexión (BBR): Se usa para estudiar el comportamiento reológico del asfalto a bajas temperaturas. Durante el ensayo se aplica una carga constante a una viga de asfalto y se registra su deflexión. A los 60 seg de carga se mide la rigidez del asfalto (S_{60}) y la tasa a la cual la rigidez disminuye (valor-m).

Ensayo de Tracción Directa (DTT) Se usa para estudiar el grado de fragilidad del asfalto a bajas temperaturas. El ensayo consiste en traccionar una muestra asfáltica hasta la rotura, registrando la deformación de falla (correspondiente a la máxima tracción).

Por otra parte, es importante evaluar las propiedades químicas de los asfaltos y el proceso de difusión del oxígeno al interior de las mezclas asfálticas. La espectroscopia infrarroja se usa para identificar y cuantificar diversos grupos químicos funcionales característicos en los asfaltos³. Los contenidos individuales de los componentes aromáticos de los asfaltos como son los hidrocarburos mono aromáticos, di y poli aromáticos se pueden determinar mediante la aplicación de esta técnica instrumental ya que estos sistemas aromáticos absorben fuertemente la radiación en la región comprendida entre 200 nm y 270 nm. La absorbancia a 210 nm, 230 nm y 260 nm corresponde a la región de absorción de hidrocarburos mono aromáticos, di y poli aromáticos respectivamente. La determinación de la concentración del contenido de estos hidrocarburos está fundamentado en la ley de la absorbancia conocida como la ley de Beer, así⁴:

$$A = \varepsilon * b * c \quad (26)$$

donde, A es la absorbancia, (adimensional),

ε es la absortividad molar, (1/concentración x longitud),

b es la longitud de la celda (cm),

c es la concentración de hidrocarburos aromáticos mono, di y poli aromáticos (% peso, mol/L).

³ <http://www.arqhys.com/arquitectura/asfalto-composicion.html>

⁴ Xiomara Andrea Vargas Arenas (2001, Pág, 26)

La medida del grupo funcional carbonilo en un asfalto es de particular importancia, a causa de la relación de este grupo con la viscosidad y con el avance del envejecimiento químico del asfalto. La absorbancia del grupo carbonilo en el infrarrojo contiene la contribución de la sumatoria de cetonas, ácidos carboxílicos y ácidos carboxílicos anhídridos. En el envejecimiento de un asfalto por oxidación, las cetonas dominan en el grupo funcional carbonilo, y en muchos casos no es esencial la medida de la concentración de los ácidos carboxílicos y anhídridos ya que sólo la medida de la concentración de las cetonas provee una buena estimación de la extensión del envejecimiento del asfalto⁵.

La oxidación del asfalto puede representarse por el crecimiento de la cresta de carbonilos infrarrojo mostrado en la grafica de espectro como una función del tiempo⁶. Lo anterior solo representa una porción del cambio del espectro durante la oxidación. Existe una correlación lineal entre la cresta de carbonilos en el espectro con el total de oxígeno en el asfalto. Por otra parte, el Log de la Viscosidad, $\ln \eta$, varia linealmente con el área de carbonilos. La pendiente, designada como el endurecimiento susceptible HS, tiene un valor único para cada asfalto, es independiente a la temperatura debajo de 373 °K y varia con la presión.

1.2 ANTECEDENTES DEL TEMA

1.2.1 MODELO DE DIFUSION

Tomando como base la Ley de Fick la cual afirma que la densidad de corriente de partículas es proporcional al gradiente de concentración tenemos:

⁵ Xiomara Andrea Vargas Arenas (2001, Pág, 26)

⁶ Christopher H. Domke; Richard R. Davison, Jerry A Bullin, Charles J. Glover (1997, pág 1)

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}$$

Ecuación diferencial en derivadas parciales que describe el fenómeno de la difusión.

Al resolver la ecuación por el método de diferencias finitas se tiene,

$$\frac{P_i^{t+1} - P_i^t}{\Delta t} = D \frac{P_{i+1}^t - 2P_i^t + P_{i-1}^t}{\Delta z^2}$$

$$P_i^{t+1} = D \left(\frac{\Delta t}{\Delta z^2} \right) [P_{i+1}^t - 2P_i^t + P_{i-1}^t] + P_i^t$$

Donde,

D= Difusión

P_i^{t+1} = Presión en un punto de la mezcla en un tiempo t+1.

P_{i+1}^t = Presión en un punto inferior del punto original de la mezcla en un tiempo anterior al tiempo original de la misma.

P_{i-1}^t = Presión en un punto superior del punto original de la mezcla en un tiempo anterior al tiempo original de la misma.

P_i^t = Presión en un punto de la mezcla en un tiempo anterior al tiempo original de la misma.

Δt = Delta de tiempo.

Δz = Delta de profundidad.

Esta ecuación describe el perfil de presiones en toda la profundidad de la muestra de mezcla asfáltica y su variación en el tiempo.

1.2.2 MODELO DE OXIDACION

Actualmente, existe en la literatura investigaciones reportadas sobre los mecanismos de oxidación de los asfaltos.

Una de las primeras investigaciones fue realizada por Brown (1957) el cual propuso un modelo empírico de tipo hiperbólico. El modelo representa el envejecimiento de la mezcla asfáltica en carretera y utiliza un periodo experimental máximo de nueve (9) días⁷.

$$\Delta y = t / (ah + bht)$$

En este modelo,

Δy : Cambio en las propiedades (Punto de ablandamiento (°C), penetración (1/10 mm), ductilidad (cm), otras) como un resultado del envejecimiento.

t : Tiempo de envejecimiento (horas)

ah y bh : Parámetros estimados en el laboratorio a partir de datos experimentales.

Way (1959), estudió el cambio, con el tiempo, de la penetración y el contenido de asfáltenos de muestras de asfalto envejecidos en carretera, aplicando un modelo hiperbólico. Posteriormente, Ruede (1979) complemento esta investigación midiendo el contenido de grupos funcionales tipo carbonilos en unidades de absorbancia, en función del tiempo de envejecimiento, ajustando estos valores al modelo dado por Brown. Ruede observo que este grupo funcional se incrementa con el tiempo.

⁷ Xiomara Andrea Vargas Arenas (2001, Pág, 10)

Los investigadores mencionados anteriormente llegaron a la conclusión que en los asfaltos estudiados, el contenido de grupos carbonilos y la concentración de asfaltenos, la viscosidad y el punto de ablandamiento, aumentan con el tiempo de envejecimiento, al contrario de la penetración y la ductilidad.

El modelo hiperbólico propuesto inicialmente por Brown, describe el envejecimiento de las especies asfálticas a una temperatura específica, y es determinado por un período de tiempo generalmente corto. Por lo tanto no predice satisfactoriamente el envejecimiento del asfalto en carretera, ya que además, no incluye el tiempo de servicio de la carpeta asfáltica (8 a 12 años) ni la influencia de los diferentes factores climáticos⁸.

LAU (1992), envejeció películas de asfalto de 1 mm de espesor utilizando técnicas analíticas estándar (envejecimiento acelerado). Este investigador midió tanto el contenido del grupo carbonilo (en unidades de absorbancia) utilizando espectroscopía infrarroja, como la viscosidad absoluta a 60°C, para monitorear el envejecimiento al cual fue sometido el asfalto. Se emplearon películas delgadas de asfalto y altas presiones (20 atm), para disminuir la difusión del oxígeno del aire. Este modelo relaciona el incremento del logaritmo de la viscosidad absoluta a 60°C con el tiempo y de igual manera, el aumento de la formación del grupo carbonilo con el tiempo de envejecimiento, el cual es representado por la siguiente ecuación:

$$\Delta y = a - b * t$$

En este modelo,

Δy : Cambio en las propiedades como un resultado del envejecimiento (viscosidad absoluta a 60°C), área de grupo carbonilo (unidades de absorbancia por espectroscopía infrarroja)).

⁸ Xiomara Andrea Vargas Arenas (2001, Pág, 11)

a y b: Parámetros del modelo medidos experimentalmente.

t: Tiempo de envejecimiento (horas, días),

En este modelo lineal la difusión del oxígeno del aire en el asfalto es disminuida por la alta presión y el uso de películas delgadas, sin embargo, no tiene un intercepto en cero a causa de una no-linealidad inicial, resultado de una pequeña población de componentes reactivos. Después de este paso inicial, la velocidad de envejecimiento es constante. Este modelo describe el envejecimiento de los ligantes asfálticos a una única temperatura, lo cual restringe su uso.

Por otra parte los investigadores han demostrado que la velocidad de envejecimiento se puede describir por la ecuación de Arrhenius, mediante la velocidad de formación del grupo carbonilo. Durante la oxidación de los asfaltos, este compuesto es el que se forma en mayor cantidad. La velocidad de formación del grupo carbonilo y el incremento del logaritmo de la viscosidad a 60°C, son función de la temperatura, y son modelados satisfactoriamente⁹.

$$r_{CA} = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$$

En el modelo,

r_{CA}: Velocidad de formación del grupo carbonilo.

A: Constante de Arrhenius o factor de frecuencia. Representa la velocidad de colisión entre las moléculas del asfalto y las moléculas de oxígeno en los sitios activos del mismo. La constante A depende de la composición química del asfalto, E_a: Energía de activación, [kJ/kmol]. Depende de la composición química del asfalto.

R: Constante universal de los gases, [kJ / kmol*K],

T: Temperatura absoluta de envejecimiento [K].

⁹ LUNSFORD, K. (1994, Pág.1- 220)

Con esta relación cinética no se desarrolla un modelo de difusión del oxígeno del aire en la carpeta asfáltica. La relación describe la velocidad de formación de compuestos carbonilos en términos de la temperatura a lo largo del tiempo, como un resultado del envejecimiento químico del asfalto¹⁰.

Posteriormente la velocidad de envejecimiento, r_{CA} , fue nuevamente expresada por Liu y Lunsford en función de la temperatura y presión así:

$$r_{CA} = A * P^{\alpha} e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)}$$

En este modelo,

P: Presión absoluta, [kPa].

α : Orden de reacción en función de la presión,

Con este modelo se describió la velocidad de oxidación a una presión de 20 atm, notando que el efecto de la composición u origen del crudo en la energía de activación es más notable a elevadas presiones de oxígeno. Adicionalmente concluyeron que la influencia de la temperatura es más significativa que la presión en la velocidad de formación de los grupos carbonilos, y el orden de reacción α , es independiente de la composición del asfalto¹¹.

Adicionalmente, Lin investigó el proceso de formación de los asfaltenos y su impacto en las propiedades químicas del asfalto. Esta relación representa el cambio de la viscosidad con el tiempo en función del cambio de la viscosidad con el contenido de asfaltenos; el cambio del contenido de asfaltenos con el contenido de grupos carbonilos y el cambio del contenido de grupos carbonilos con el tiempo, como un resultado del endurecimiento del asfalto, causado por el

¹⁰ LUNSFORD, K. (1994, Pág.1- 220)

¹¹ LIU M, LIN (1998, Pág 827-850)

envejecimiento químico. Cada término es una importante característica de cada asfalto, y depende de la composición química de este¹².

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{d\eta}{dAs} \cdot \frac{dAs}{dC_A} \cdot \frac{dC_A}{dt}$$

En el modelo;

η : Viscosidad absoluta del asfalto a 60°C, (cP),

As: % masa de asfaltenos.

C_A : Contenido de grupos carbonilos (Unidades de Absorbancia-espectroscopía infrarroja).

t: Tiempo de envejecimiento del asfalto, (horas).

De esta ecuación se concluye que el contenido de asfaltenos contribuye al aumento de la viscosidad a 60°C del asfalto y la velocidad de formación de grupos carbonilos es incrementada por la presencia de asfaltenos para todos los materiales asfálticos a todas las temperaturas y presiones de envejecimiento estudiadas. Adicionalmente, el rol de los asfaltenos en el envejecimiento por oxidación de los asfaltos es importante, debido al efecto que ejercen en la energía de activación de la reacción de oxidación que ocurre durante el envejecimiento químico del asfalto¹³.

Adicionalmente, un modelo cinético de oxidación de los asfaltos durante el envejecimiento químico fue propuesto por Dickinson y Nicholas¹⁴. Estos investigadores midieron la absorción de oxígeno en películas de asfalto en un rango de temperaturas de 65.05°C a 119.05°C y presiones de oxígeno de 1 atm a 2 atm. Las condiciones experimentales se diseñaron para minimizar la resistencia

¹² LIN (1995; Pág, 2-16; 18-26 y 169-175)

¹³ LIN (1995; Pág, 2-16; 18-26 y 169-175)

¹⁴ LUNSFORD, K (1994; Pág 1-220)

a la difusión de oxígeno del aire en las películas de asfalto. Ellos propusieron un modelo con dos reacciones simultáneas. La primera reacción es esencialmente constante, la segunda es más rápida y completa después de 100 horas. La constante de velocidad de la primera reacción es más sensible a la temperatura y es modelada por la relación de Arrhenius. Este modelo cinético se efectuó teniendo en cuenta la difusión y reacción de oxígeno puro en una película de asfalto, sin embargo, un modelo que relacione la difusión del oxígeno con la medida de los cambios de las propiedades en una película de asfalto no ha sido elaborado¹⁵. Comparaciones entre los resultados obtenidos de envejecimiento acelerado y los resultados de envejecimiento de asfalto en carretera, muestran definitivamente que el envejecimiento acelerado no simula el envejecimiento real.

Por lo anterior, un modelo más aproximado de envejecimiento de la carpeta asfáltica, debe incluir las condiciones climáticas como son, la radiación solar global y ultravioleta, la temperatura, presión atmosférica, humedad relativa del aire, entre otras, y la medida interna de los cambios de las propiedades del asfalto por medio de espectroscopía infrarroja y difracción de rayos X. El envejecimiento de campo no debe ser solamente simulado, sino también requiere la predicción de ecuaciones cinéticas, incluyendo el efecto de la temperatura y la presión y demás factores climáticos, además, estimaciones de difusión de oxígeno en el asfalto como una función de las propiedades del material asfáltico. Se debe tener en cuenta el envejecimiento en laboratorio y en campo.

¹⁵ LUNSFORD, K (1994, Pág 1-220)

2. METODOLOGIA

El objeto de la presente tesis de investigación es correlacionar la difusión del oxígeno al interior de la capa asfáltica de una estructura de pavimento, con el cambio en las propiedades reológicas de la misma. Las actividades ejecutadas para el desarrollo en el marco de esta investigación se describen a continuación:

2.1 REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

Realizamos una búsqueda de información relacionada con el proceso de envejecimiento en asfaltos y los cambios que éste sufre sobre su composición física y química. Entre los documentos consultados se encuentran:

State of the Art Report on Ageing Test methods for Bituminous Pavement Materials, por G.D AIREY, Nottingham Centre for Pavement Engineering, University of Nottingham, UK. Publicado en The International Journal of Pavement Engineering Vol. (4) Septiembre de 2003 pp. 165-176

The Pressure Aging Vessel (PAV): A Test to Simulate Rheological Changes due to Field Aging, por Hussain U. Bahia y David A. Anderson.

Study of the SHRP PAV Procedure Using Long-Term Low-Temperature Aging Experiments and Asphalt Kinetics, por Christopher H. Domke, Meng Liu, Richard R. Davison, Jerry A. Bullin, Charles A. Glover. Department of Chemical Engineering and The Texas Transportation Institute Texas A&M University.

Análisis de los Modelos Cinéticos de Oxidación en el proceso de Envejecimiento de los Asfaltos, por Natalia Nikolaevna Afanasieva, Mario Álvarez y Robinson Hernández Roa, Grupo de Investigación en Asfalto – GIAS, Universidad Industrial de Santander.

2.2 EXTRACION DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Realizamos la solicitud en el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) sobre la información de los contratos de pavimentación ejecutados en la ciudad de Bogotá. Obtenida esta información, seleccionamos tres (3) diferentes tramos de pavimentos asfálticos con diferentes años de servicio (7 años; 5 años; 3 años;).

Los tramos seleccionados con sus respectivos números de contratos y año son:

Calle 71, entre carreras 38 y 39 (IDU 130/01)

Carrera 39, entre calles 133 y 134 (IDU 130/99)

Av Ciudad de Cali, entre calle 13 y la avenida ciudad de Villavicencio (IDU 176/97).

Se realizó la respectiva gestión sobre las autorizaciones para las extracciones de las muestras de la carpeta de rodadura en los tramos seleccionados y mencionados anteriormente en las entidades correspondientes (Instituto de Desarrollo Urbano-IDU, Secretaria de Transito y Transporte de Bogotá) cumpliendo con los requisitos respectivos.

Posteriormente, se extrajeron los núcleos de 0.3 m* 0.3 m de las capas de rodaduras en los 3 tramos seleccionados. Se realizaron dos cortes en cada una de las muestras con el fin de obtener capa inferior, superior y central.

Adicionalmente, se extrajo mezcla asfáltica en el tramo de prueba de los Álamos ejecutado actualmente por la Universidad de los Andes en convenio con el Instituto de Desarrollo Urbano. Lo anterior con el objeto de analizar la mezcla sin envejecimiento de servicio.

2.3 ENSAYOS DE LABORATORIO MEZCLAS ASFÁLTICAS ENVEJECIDAS NATURALMENTE.

Una vez extraídas las mezclas asfálticas, se procedió a realizar ensayos de caracterización física y química de los asfaltos.

2.3.1 CARACTERIZACION FISICA

Inicialmente, se realizó una caracterización física a las mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a diferentes edades de servicio y en cada una de sus capas. Se hicieron ensayos de laboratorio a la capa central, inferior y superior de estas muestras de pavimento con el fin de evaluar las propiedades reológicas de los asfaltos correspondientes. Inicialmente se realizaron ensayos de extracción de asfalto utilizando equipos tales como la centrifuga y el rotovapor los cuales se describen a continuación:

2.3.1.1 Extracción del asfalto (centrifuga) I.N.V. E- 732

Equipo utilizado: Centrifuga (ver figura No. 4) , Horno, recipientes, cápsulas de porcelana de 125 ml de capacidad, espátula.

Reactivo utilizado: Tricloroetileno.

Preparación de la muestra: La mezcla se colocó en un recipiente plano y se llevo al homo a una temperatura de 110 ± 5 °C. Con la espátula se separa la mezcla. La mezcla asfáltica la llevamos a la centrifuga y la cubrimos con el tricloroetileno lentamente, dejando un tiempo para que el disolvente desintegre la porción de la mezcla a ensayar. Luego se da inicio a la centrifugación girando lentamente y aumentando gradualmente las revoluciones a un máximo de 3600 rpm hasta que el solvente deje de fluir por el desagüe de la centrifuga. En el desagüe colocamos un recipiente de porcelana con el objeto de recoger el solvente.

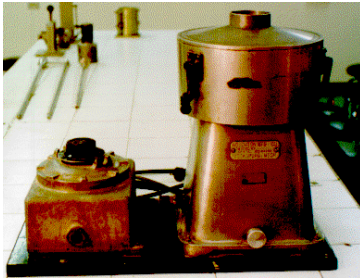


Figura No. 4 Centrifuga. Tomada de <http://www.figmay.com.ar/rotovapor.php>

2.3.1.2 Recuperación del asfalto para una solución utilizando el Rotovapor (Utilizamos Tricloroetileno). I.N.V. E - 759

Equipo utilizado: Matraz de destilación, Matraz de recuperación del solvente, rotovapor, Sistema de vacío.

Procedimiento: se calienta el baño del aceite a una temperatura de 137.8 ± 28 °C. se hace circular agua fría a través del condensador. Se da inicio a la rotación del Matraz de destilación a unas 40 rpm y luego se introduce el matraz dentro del baño de aceite. Cuando se observa que todo el solvente fue destilado del asfalto y

no estaba ocurriendo condensación obvia aplicamos un vacío de 600 ± 0.5 mm de mercurio bajo la presión atmosférica durante 15 minutos.

Por último se lleva el matraz al horno y se invierte con el objeto que el asfalto fluyera y lo vertimos en un recipiente de aluminio.



Figura No. 5 Rotovapot. Tomada de <http://www.figmay.com.ar/rotovapor.php>

Posteriormente se somete el asfalto extraído a tensiones de corte oscilante por medio del reómetro de corte dinámico (DSR), el cual se emplea para caracterizar las propiedades visco-elásticas del asfalto, midiendo el módulo complejo en corte (G^*) y el ángulo de fase (δ).

2.3.1.3 Reómetro de corte Dinámico (DSR).

En el ensayo se utiliza un disco de asfalto de diámetro igual al del plato oscilatorio. Se ajusta la separación entre los dos platos de tal forma que se forme un abultamiento en el borde de la muestra. Se limpian los platos con acetona para que no exista humedad y no altere los resultados del ensayo. En este ensayo se debe tener en cuenta que las propiedades del asfalto son altamente dependiente de la temperatura y por esta razón se debe controlar la temperatura de la muestra, esto normalmente se logra mediante un baño líquido circulante que generalmente

cubre la muestra y circula a través de un controlador que ajusta la temperatura y la mantiene constante

2.3.2 CARACTERIZACIÓN QUIMICA

Se realizaron pruebas de espectrografía infrarroja a la mezcla de asfalto con 3 años de servicio en cada una de sus capas (superior, central e inferior). Cabe resaltar que los resultados iniciales de los ensayos químicos presentan el área de carbonilos en unidades de transmitancia, las cuales se convierten en unidades de absorbancia para efectos de la posterior aplicación del modelo.

2.4 APLICACIÓN DEL MODELO DE DIFUSION Y OXIDACION

El cambio en los parámetros reológicos se debe a dos procesos de naturaleza diferente, pero que se relacionan al momento de alterar las propiedades de una muestra asfáltica: La difusión y la oxidación. La difusión hace referencia al efecto de penetración del aire en la muestra. Por otra parte, la oxidación se relaciona con la reacción química del oxígeno que logra penetrar en la mezcla asfáltica para formar moléculas del grupo carbonilo. Este último proceso de oxidación propiamente dicho, es el que finalmente altera las propiedades reológicas de la muestra. Como ya se mencionó los procesos de difusión y de oxidación, aunque relacionados, obedecen a leyes diferentes. Predecir el cambio en las propiedades reológicas por el efecto del envejecimiento por oxidación, requiere la comprensión y aplicación conjunta de los modelos de difusión y oxidación descritos en el capítulo anterior.

2.4.1 MODELO DE DIFUSION

Básicamente el modelo consta de la siguiente expresión matemática.

$$P_i^{t+1} = D \left(\frac{\Delta t}{\Delta z^2} \right) [P_{i+t}^t - 2P_i^t + P_{i-1}^t] + P_i^t \quad (1)$$

Donde,

D = Difusión (Para la aplicación del modelo se calibro- Area/tiempo)

P_i^{t+1} = Presión en un punto de la mezcla en un tiempo $t+1$.

P_{i+1}^t = Presión en un punto inferior del punto original de la mezcla en un tiempo anterior al tiempo original de la misma.

P_{i-1}^t = Presión en un punto superior del punto original de la mezcla en un tiempo anterior al tiempo original de la misma.

P_i^t = Presión en un punto de la mezcla en un tiempo anterior al tiempo original de la misma.

Δt = Delta de tiempo.

Δz = Delta de profundidad.

Esta ecuación describe el perfil de presiones en toda la profundidad de la muestra de mezcla asfáltica y su variación en el tiempo.

2.4.2 MODELO DE OXIDACION

Investigaciones como la de Domke, Liu, Davison, Bullin & Glover (1997) proponen un modelo numérico que explique la oxidación de una mezcla asfáltica tomando como referencia parámetros tales como la presión, temperatura, tiempo, y composición química. El modelo numérico en cuestión consta básicamente de 3 ecuaciones que se explicaran a continuación:

Tasa de formación de carbonilos.

Esta definida por la ecuación:

$$r_{CA} = AP^{\alpha} e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)} \quad (2)$$

Donde,

r_{CA} = Velocidad de formación del grupo carbonilo

A = Constante de Arrhenius o factor de frecuencia, que representa la velocidad de colisión entre las moléculas de asfalto y el oxígeno. Esta constante depende de la composición química específica del asfalto. Un alto valor de colisión entre partículas provoca una mayor formación del grupo carbonilo, ocasionando un envejecimiento prematuro por oxidación. E= Energía de activación de la reacción. Varía, al igual que la constante de Arrhenius, de acuerdo a la composición química específica del asfalto

R= Constante universal de los gases

T = Temperatura Absoluta de envejecimiento

α = Orden de reacción P = Presión.

Cantidad de carbonilos

$$CA = CA_0 + r_{CA}t \quad (3)$$

Esta expresión representa la cantidad del grupo carbonilo presente en una mezcla asfáltica,

donde,

CA = Cantidad del grupo carbonilo

CA₀ = Cantidad del grupo Carbonilo en t=0

r_{CA} = Velocidad de formación del grupo carbonilo

t = Tiempo.

Viscosidad

$$\eta = me \left[\left(CA + AP \alpha e^{(-E/RT)} \right) \right]_{HS} \quad (4)$$

Esta expresión relaciona el cambio en las propiedades físicas de una mezcla asfáltica, tales como la viscosidad con la formación del grupo carbonilo. El cambio en la viscosidad esta influenciado por condiciones tales como la temperatura, el tiempo y la presión a la que se encuentra la mezcla. Algunos términos de esta expresión son:

m = Viscosidad inicial de la mezcla

HS = Coeficiente de susceptibilidad de la mezcla. Es la pendiente de la grafica $\ln \eta$ Vs. Cantidad de Carbonilos. Esta grafica presenta una variación lineal. El coeficiente de susceptibilidad es un valor único para cada tipo de asfalto, sin embargo, puede presentar variaciones bajo diferentes condiciones de presión. Entre más alto es HS el asfalto es más propenso a endurecerse prematuramente.

2.4.3 PARAMETROS A, E, α y HS

Como se ha analizado en los numerales anteriores los parámetros A, E, α , y HS son propios de cada tipo de asfalto y/o las condiciones en que se encuentre la

mezcla. Para poder implementar la ecuación No. 4 y de esta forma determinar el cambio en las propiedades reológicas de una mezcla asfáltica por efecto de la oxidación, es necesario previamente calibrar los parámetros antes mencionados para las mezclas estudiadas. La determinación de los parámetros A, E, α y HS debe partir de una comparación de las propiedades físicas y químicas de mezclas asfálticas envejecidas a diferentes edades de servicio, las mezclas envejecidas aceleradamente en el laboratorio bajo diversas condiciones de tiempo, presión, temperatura y finalmente mezclas originales, sin envejecer.

2.4.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS ENVEJECIDAS ACELERADAMENTE.

El análisis de muestras envejecidas aceleradamente se realizó extrayendo un núcleo de mezcla de una vía recién construida. Seguidamente se extrajo el asfalto a la mezcla realizando los respectivos ensayos los cuales emplean equipos ya descritos como la centrifuga y el rotovapor. Posteriormente, se realizaron ensayos de envejecimiento acelerado en el asfalto extraído utilizando la estufa de envejecimiento a presión (PAV), ver figura No. 2. El PAV es un equipo específicamente desarrollado para realizar un envejecimiento artificial y acelerado de los ligantes bituminosos sometiéndolos a temperatura y presiones elevadas. Este ensayo simula el envejecimiento que sufren las mezclas asfálticas a lo largo de su vida de servicio. Los ensayos de envejecimiento acelerado se realizaron con diferentes condiciones de presión, temperatura y tiempo de acuerdo a la tabla No. 1.

CONDICIÓN	PRESIÓN (PSI)	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (HORAS)
1	210	110	20
2	210	90	20
3	100	110	20
4	100	90	10
5	210	110	15

Tabla 1. Condiciones de presión tiempo y temperatura de ensayos de envejecimiento acelerado.

2.4.4.1 Caracterización Física.

Luego de realizar los ensayos de envejecimiento acelerado se procedió a medir las propiedades reológicas de cada uno de asfaltos envejecidos. Se utilizó el Reómetro de corte dinámico- DSR determinándose el modulo complejo y el Angulo de fase de cada una de las muestras.

2.4.4.2 Caracterización Química

Realizamos una caracterización química a todas las mezclas de asfalto envejecido aceleradamente a diferentes condiciones de presión, temperatura y tiempo, sometiendo a un análisis por espectroscopia infrarroja para monitorear la formación del grupo carbonilo de acuerdo a las condiciones presentadas.

Mezcla de asfalto envejecida aceleradamente-condición N°1.

Mezcla de asfalto envejecida aceleradamente-condición N°2

Mezcla de asfalto envejecida aceleradamente-condición N°3

Mezcla de asfalto envejecida aceleradamente-condición N°4.

Mezcla de asfalto envejecida aceleradamente-condición N°5.

Finalmente, realizamos los mismos ensayos de extracción de asfalto utilizando la centrifuga y el Rotovapor en la mezcla asfáltica original, es decir la mezcla sin tiempo de servicio y posteriormente la caracterización física y química de la mezcla realizando ensayos de corte dinámico (DSR) y de espectrografía infrarroja respectivamente.

2.4.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez realizados los ensayos de laboratorio, procedimos a analizar los resultados de cada una de las caracterizaciones, los cuales se presentan en el capítulo cuatro (4) de la presente investigación.

Respecto a las muestras envejecidas naturalmente a diferentes edades de servicio se realizaron tres tipos de análisis. Inicialmente determinamos el comportamiento de las propiedades reológicas de la capa inferior, central y superior en cada uno de las muestras a 3, 5 y 7 años de servicio. Posteriormente, analizamos y comparamos el comportamiento de las propiedades reológicas de las mezclas a diferentes edades de servicio. Lo anterior con el objeto de observar el efecto de la difusión del oxígeno en cada una de las capas y mezclas asfálticas y el cambio de las propiedades reológicas al transcurrir el tiempo de servicio. Adicionalmente, se realizó un análisis de los resultados de los ensayos de espectroscopia infrarroja en cada una de las capas de la mezcla asfáltica envejecida naturalmente a 3 años de servicio.

Por otra parte, se analizaron los cambios en las propiedades reológicas y químicas de las mezclas asfálticas envejecidas aceleradamente con diferentes condiciones de presión, temperatura y tiempo. Las comparaciones de cada una de las propiedades se realizaron teniendo en cuenta muestras con iguales condiciones de temperatura y con iguales condiciones de presión. Las relaciones que se analizaron se presentan en la tabla No. 2.

RELACIÓN	DESCRIPCIÓN
Condición No 1, 2	Igual Presión y tiempo.
Condición No 1, 3	Igual Temperatura y tiempo.
Condición No 1 y 5	Igual Temperatura y Presión.

Tabla 2 Relaciones entre los diferentes ensayos de envejecimiento acelerado.

2.4.6 CALIBRACION DE LAS VARIABLES A, E, HS Y A

- Determinación del orden de reacción (α)

Tomamos los datos de la muestras 1 y 3, tal como se describe en la tabla 1, las cuales fueron envejecidas aceleradamente bajo las mismas condiciones de tiempo y temperatura, pero a diferente presión. La muestra No. 1 se envejeció aceleradamente a 210 psi mientras que la muestra No. 3 se envejeció a 100 psi.

Al aplicar la ecuación la siguiente ecuación

$$CA = CA_0 + r_{CA}t$$

Tenemos que:

$$\Delta CA_{100} = CA_{100} - CA_0 = r_{CA}t$$

$$\Delta CA_{210} = CA_{210} - CA_0 = r_{CA}t$$

Reemplazando la siguiente ecuación en las descritas anteriormente

$$r_{CA} = AP^\alpha e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)}$$

Tenemos que,

$$\frac{\Delta CA_{100}}{\Delta CA_{210}} = \frac{(100)^\alpha}{(210)^\alpha}$$

Finalmente el valor de α , esta dado por:

$$\alpha = \frac{\log \left(\frac{\Delta CA_{100}}{\Delta CA_{210}} \right)}{\log \left(\frac{100}{210} \right)}$$

- Determinación de la energía de activación (E_a)

Para la determinación de la energía de activación de la reacción (E_a) se sigue el mismo procedimiento con la diferencia que se toman las muestras 1 y 2, que fueron envejecidas aceleradamente bajo las mismas condiciones de tiempo y presión. Sin embargo la muestra No. 1 fue envejecida a 90°C, mientras que la No. 2 fue envejecida a 110°C. De esta forma se llega a la expresión:

$$\frac{E}{R} = \frac{\ln \left(\frac{\Delta CA_{110^\circ}}{\Delta CA_{90^\circ}} \right)}{\left(\frac{1}{90^\circ} - \frac{1}{110^\circ} \right)}$$

$$R = 8.314 \text{ J/mol}^\circ\text{K}$$

Una vez determinado el valor de α y E_a se reemplazan estos valores en las ecuaciones correspondientes a la tasa de formación de carbonilos y cantidad de

carbonilos con los datos correspondientes a la mezcla asfáltica envejecida a 3 años de servicio. Los datos corresponden a la temperatura de servicio, 293.15 °K; el tiempo de servicio respectivo, 3 años; la cantidad de carbonilos producto de la espectroscopía infrarroja tomadas a las muestras envejecidas naturalmente, 5.82 unidades de absorbancia, y la cantidad de carbonilos producto de la muestra sin envejecer, 0.93 unidades de absorbancia. Lo anterior con el objeto de calcular el factor de frecuencia o constante de Arrhenius para la mezcla asfáltica bajo estudio.

Por otra parte, se calculo el coeficiente de susceptibilidad HS, el cual puede ser hallado con la pendiente de la grafica de los datos del modulo cortante (G^*) Vs. Cantidad de Carbonilos (CA) obtenidos de las caracterizaciones físicas y químicas hechas a las muestra original con la mezcla envejecida a 3 años de servicio. Los resultados de dicha relación se muestran en el siguiente capitulo.

2.4.7 APLICACION Y ANALISIS DE RESULTADOS DEL MODELO NUMERICO.

Luego de calcular las presiones para cada una de las capas a través del tiempo y de haberse calibrado los parámetros A, E, HS, y α , se aplicaron y relacionaron los dos modelos, el de difusión y oxidación. Se alimentaron los modelos con los valores de los parámetros de entrada descritos en la tabla No. 3 que se muestra a continuación.

Parámetro	Unidades
Espesor de Capa	cm.
Δt	Mes
Presión atmosférica	psi
Temperatura	$^{\circ}\text{K}$
Energía de activación (Ea)	J/mol
Constante universal de los gases (R)	KJ/Kmol $^{\circ}\text{K}$
Orden de reacción (α)	
Factor de frecuencia de Arrhenius	Un.Abs./Mes*Psi
Difusión	cm ² /mes
Modulo cuando $\Delta t = 0$	psi
Susceptibilidad al endurecimiento (HS)	Psi/Un. Abs

Tabla 3. Parámetros de entrada del modelo numérico propuesto por Domke

Los resultados del modelo una vez aplicado aparecen en el siguiente capítulo.

Posteriormente, con el objeto de corroborar los resultados de los modelos aplicados, se compararon éstos, con los resultados obtenidos del módulo cortante (G^*) de las mezclas envejecidas naturalmente a diferentes edades de servicio.

Finalmente, con el objeto de calcular una escala aproximada de envejecimiento acelerado en el laboratorio respecto al envejecimiento real, comparamos los G^* de cada una de las mezclas envejecidas aceleradamente con los resultados arrojados por el modelo, estimando así el tiempo de envejecimiento que simula aproximadamente el PAV con sus diferentes condiciones de presión, temperatura y tiempo. Cabe resaltar que para el cálculo de HS se tomaron los valores de G^* a temperaturas del laboratorio de DSR a 52 $^{\circ}\text{C}$. Teniendo en cuenta lo anterior se calcularon los G^* a esta misma temperatura arrojada por el laboratorio de DSR de

las mezclas asfálticas envejecidas aceleradamente para cada una de sus condiciones.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

El presente capítulo presenta los resultados obtenidos en cada una de las metodologías descritas anteriormente.

3.1 MEZCLAS ASFALTICAS ENVEJECIDAS NATURALMENTE A DIFERENTES EDADES DE SERVICIO.

3.1.1 CARACTERIZACION FISICA

A continuación se presentan las propiedades reológicas de las mezclas envejecidas naturalmente a diferentes años de servicio (3, 5 y 7 años).

3.1.1.1 Mezcla Asfáltica envejecida - 3 años de servicio:

CAPA SUPERIOR

TEMPERATURA C°	G* (PASCAL)	DELTA (GRADOS)
52	80330	68.33
58	32220	72.14
64	13500	75.63
70	6068	78.62
76	2868	80.95
82	1388	82.73

TABLA No. 4 Capa superior- 3 años de servicio

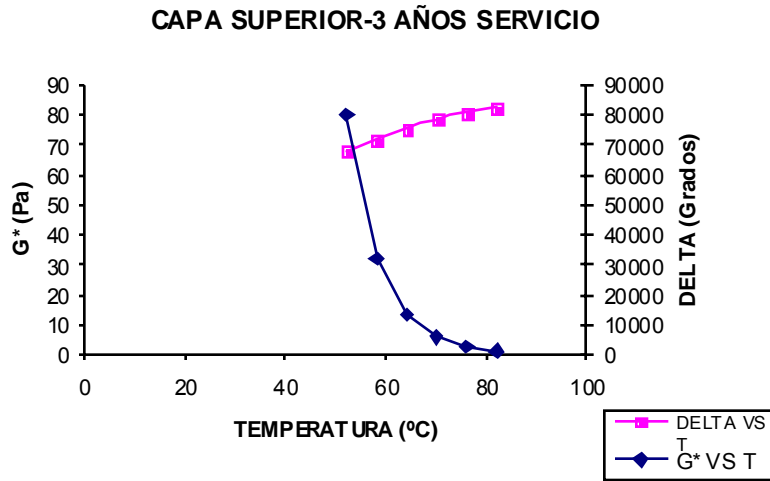


FIGURA No. 6 Capa superior- 3 años de servicio

CAPA CENTRAL

<u>TEMPERATURA Cº</u>	<u>G* (PASCAL)</u>	<u>DELTA (GRADOS)</u>
52	45060	69.55
58	17470	73.1
64	7227	76.34
70	5400	79.23
75.9	3090	81.35

TABLA No 5. Capa central- 3 años de servicio.

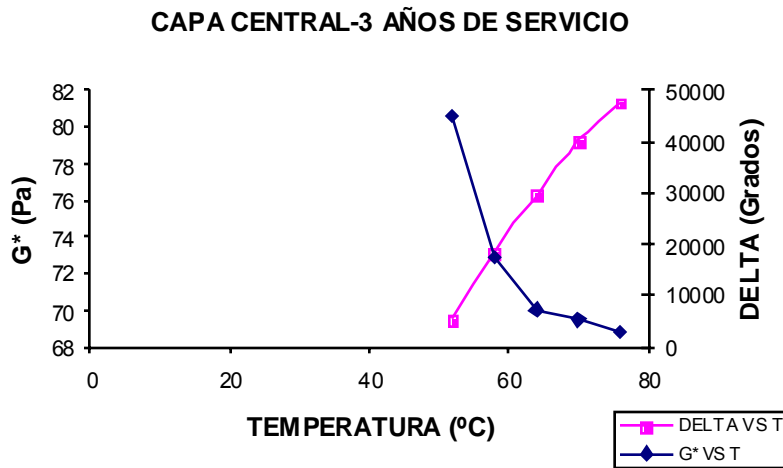


FIGURA No. 7. Capa central- 3 años de servicio.

CAPA INFERIOR

TEMPERATURA C°	G* (PASCAL)	DELTA (GRADOS)
51.9	25540	75.57
58	11060	79.07
64	5071	82.04

TABLA No. 6. Capa Inferior- 3 años de servicio.

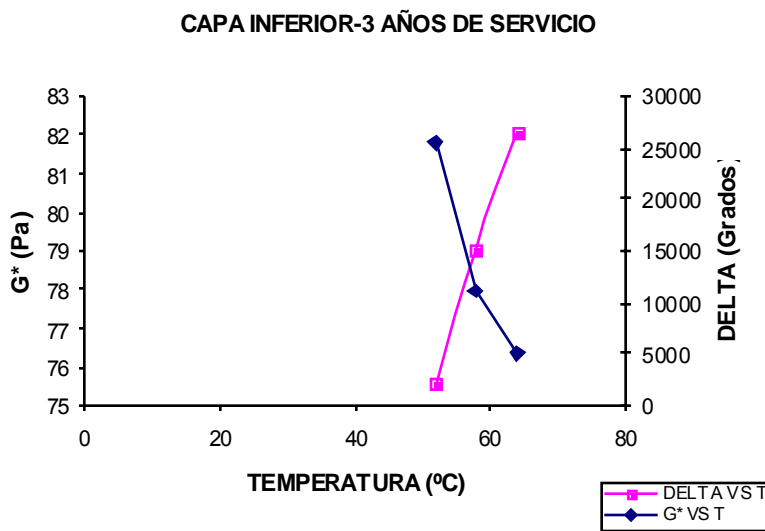


FIGURA No. 8. Capa Inferior- 3 años de servicio.

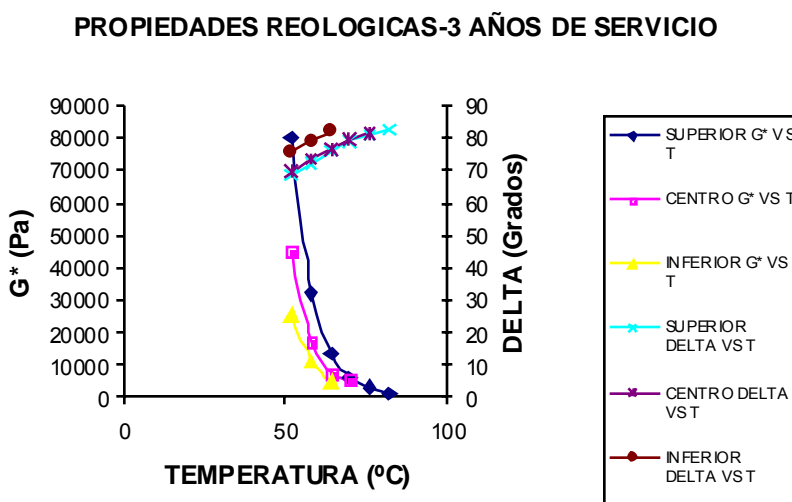


FIGURA No. 9. Propiedades reológicas- 3 años de servicio.

En esta figura se evidencia el proceso de envejecimiento por oxidación que sufren las mezclas asfálticas. Se aprecia un mayor valor de modulo cortante en las capas superiores de la mezcla asfáltica que va disminuyendo a medida que nos adentramos en la muestra. Adicionalmente, se aprecia un menor valor del ángulo de fase en la capa superior que va aumentando con la profundidad de la mezcla. Este comportamiento es explicable por la mayor exposición de la parte superior de la mezcla al medio ambiente.

3.1.1.2 Mezcla Asfáltica envejecida - 5 años de servicio:

CAPA SUPERIOR

<u>TEMPERATURA Cº</u>	<u>G* (PASCAL)</u>	<u>DELTA (GRADOS)</u>
52	163300	67.41
58	65350	71.64
64.1	25750	75.57
70	10710	78.08
76	4787	81.72
82	2302	84.09

TABLA No. 7 Capa Superior – 5 años de Servicio.

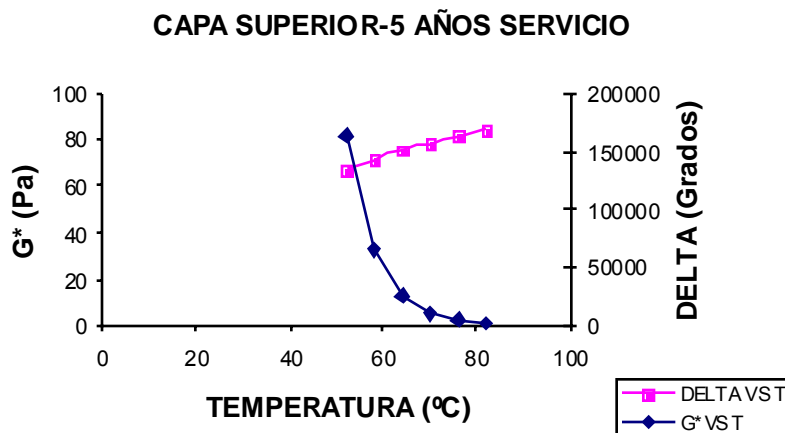


FIGURA No.10. Capa Superior – 5 años de Servicio.

CAPA CENTRAL

<u>TEMPERATURA Cº</u>	<u>G* (PASCAL)</u>	<u>DELTA (GRADOS)</u>
52	98100	69.47
58	41210	73.61
64	17300	77.42
66.6	12180	79.05
76	3456	82.81

TABLA No. 8. Capa central-5 años de servicio.

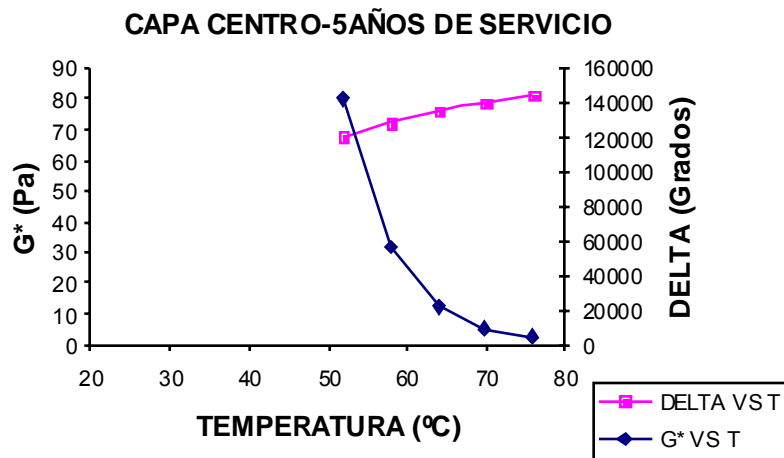


FIGURA No11. Capa central-5 años de servicio.

CAPA INFERIOR

<u>TEMPERATURA Cº</u>	<u>G* (PASCAL)</u>	<u>DELTA (GRADOS)</u>
52	142700	67.89
58	56600	72.07
64	22220	75.98
69.9	9475	79.16
76	4217	81.71

TABLA No. 9. Capa Inferior- 5 años de servicio.

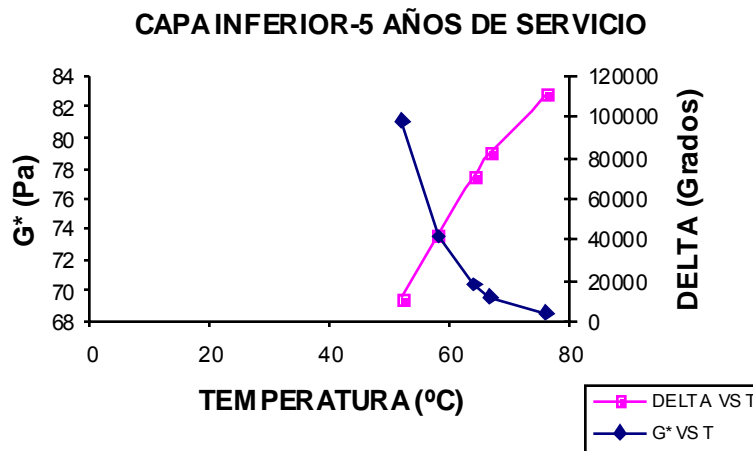


FIGURA No. 12. Capa Inferior- 5 años de servicio.

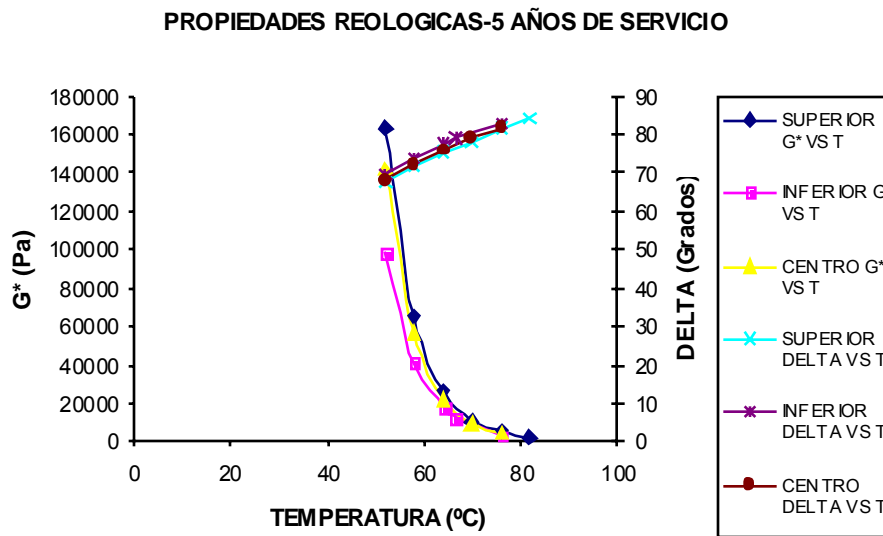


FIGURA No. 13. Propiedades reológicas- 5 años de servicio.

El proceso de difusión del oxígeno dentro de cada una de las capas de la mezcla asfáltica envejecida naturalmente a 5 años de servicio es similar proporcionalmente a la mezcla envejecida naturalmente a 3 años de servicio. El módulo cortante presenta un mayor valor y el ángulo de fase un valor menor en la capa superior respecto a las demás capas de la muestra.

3.1.1.3 Mezcla Asfáltica envejecida - 7 años de servicio:

CAPA SUPERIOR

<u>TEMPERATURA Cº</u>	<u>G*</u> <u>(PASCAL)</u>	<u>DELTA</u> <u>(GRADOS)</u>
52	148200	58.26
58.1	66970	62.08
64.1	29570	66.39
70	14340	69.99
76	7063	73.61

TABLA No. 10. Capa superior- 7 años de servicio.

CAPA SUPERIOR-7 AÑOS SERVICIO

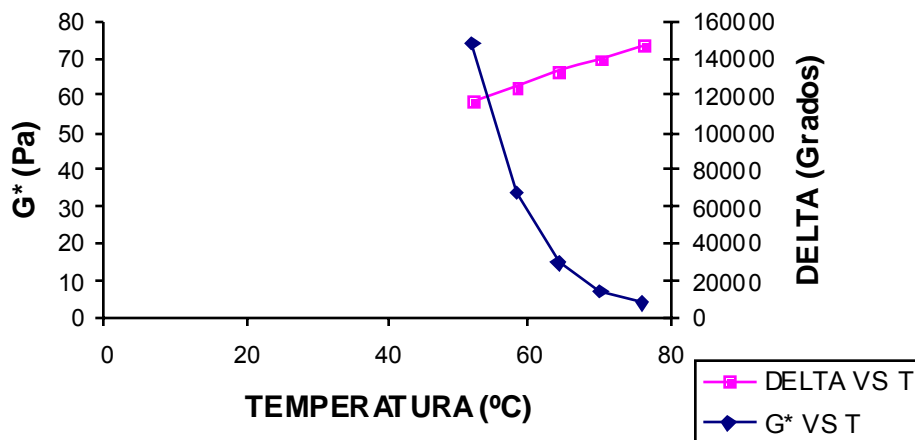


FIGURA No.14. Capa superior- 7 años de servicio.

CAPA CENTRAL

<u>TEMPERATURA Cº</u>	<u>G* (PASCAL)</u>	<u>DELTA (GRADOS)</u>
52	141000	60.62
58.1	60280	64.39
64	27500	68.51
70	13480	72.02
76	6587	75.51

TABLA No. 11. Capa central- 7 años de servicio.

CAPA CENTRO-7AÑOS DE SERVICIO

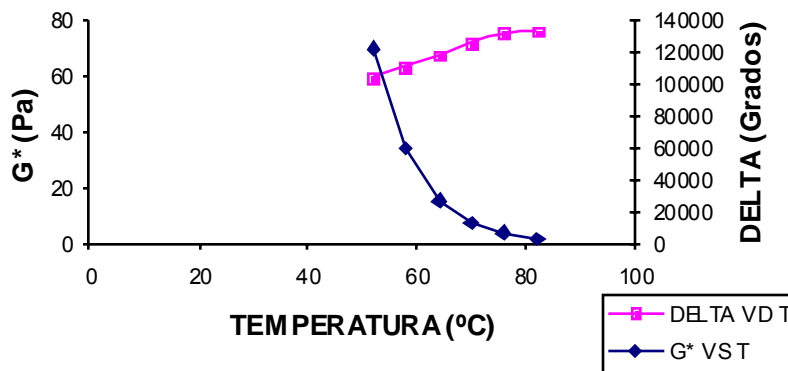


FIGURA No. 15. Capa central- 7 años de servicio.

CAPA INFERIOR

<u>TEMPERATURA Cº</u>	<u>G* (PASCAL)</u>	<u>DELTA (GRADOS)</u>
52	122000	59.76
58	59420	63.4
64	27960	68.18
70	13910	71.92
75.9	7068	75.45
82	4108	76.13

TABLA No. 12. Capa Inferior- 7 años de servicio.

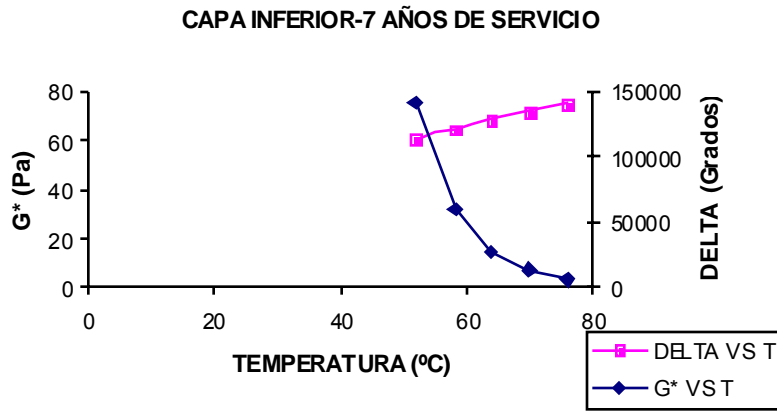


FIGURA No. 16. Capa Inferior- 7 años de servicio.

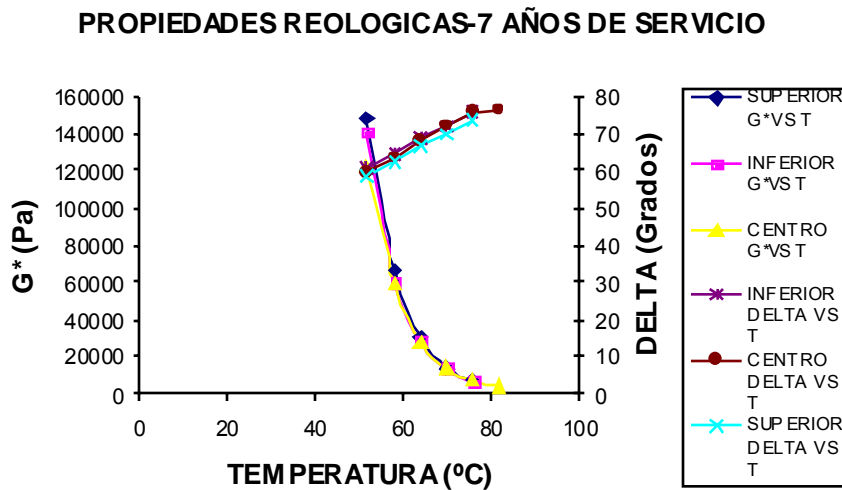


FIGURA 17. Propiedades reológicas- 7 años de servicio.

Al analizar las mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a 7 años de servicio se observa que las diferencias relativas entre los valores del modulo y del ángulo de fase de cada una de sus capas se reducen respecto a las mezclas envejecidas a 3 y 5 años de servicio. Este comportamiento se presenta debido a que el oxígeno ha logrado penetrar en todas las capas de la mezcla, homogeneizando el modulo cortante y el delta del pavimento.

3.1.2 CARACTERIZACION QUIMICA

Los resultados iniciales de los ensayos químicos presentan el área de carbonilos en unidades de transmitancia, las cuales se convierten en unidades de absorbancia para efectos de la posterior aplicación del modelo.

Este tipo de ensayo se realizo únicamente a la mezcla asfáltica envejecida a los 3 años de servicio. La espectrografía infrarroja se aplico a la capa superior, central e inferior de la mezcla asfáltica, tal como se presenta en las figuras No. 18, 19 y 20 y la Tabla No. 13. Adicionalmente, estas figuras presentan el área de carbonilos en unidades de absorbancia.

CAPA SUPERIOR:

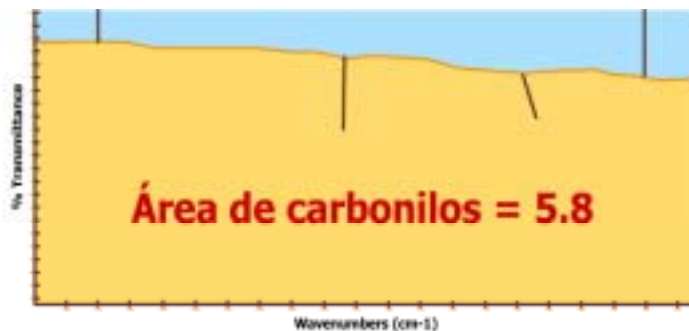


Figura No.18. Área de carbonilos (Unidades de Absorbancia), mezcla asfáltica envejecida naturalmente a 3 años de servicio- capa superior.

CAPA CENTRAL

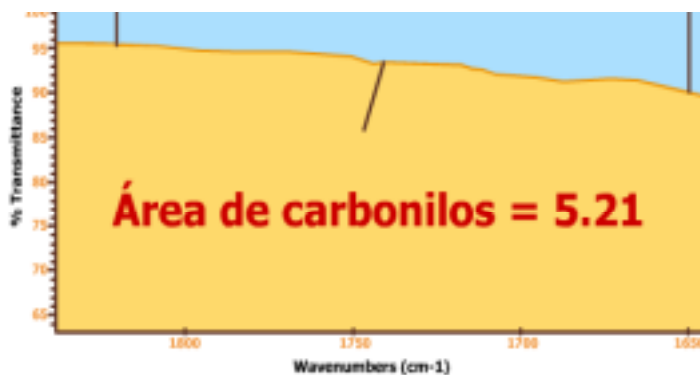


Figura No.19. Área de carbonilos (Unidades de Absorbancia), mezcla asfáltica envejecida naturalmente a 3 años de servicio- capa central.

CAPA INFERIOR

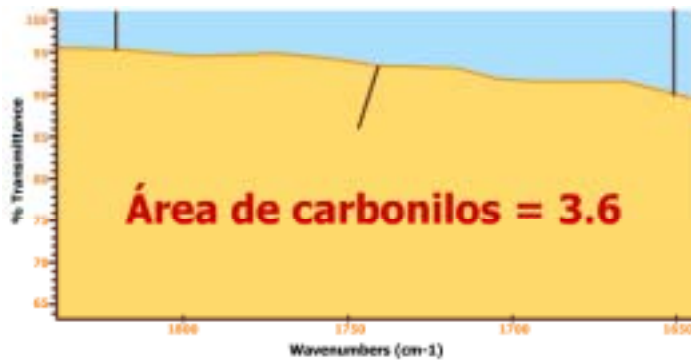


Figura No.20. Área de carbonilos (Unidades de Absorbancia), mezcla asfáltica envejecida naturalmente a 3 años de servicio- capa inferior.

Capa	Área de Carbonilos (Unidades de Absorbancia)
Superior	5.80
Central	5.21
Inferior	3.60

Tabla No.13. Área de carbonilos de la mezcla asfáltica envejecida naturalmente a 3 años de servicio.

3.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS ENVEJECIDAD ACELERADAMENTE.

A continuación se presentan las propiedades reológicas y químicas de mezclas asfálticas envejecidas aceleradamente en el PAV con diferentes condiciones de Presión, temperatura y tiempo según lo descrito en la Tabla No. 1.

3.2.1 CARACTERIZACION FISICA

CONDICION No. 1

PAV	
CONDICIONES	
Cantidad de muestra =	50 gr
Temperatura =	110 °C
Presion=	210 PSI
Tiempo=	20 H

<u>TEMPERATURA Cº</u>	<u>G* (PASCAL)</u>	<u>DELTA (GRADOS)</u>
25	8862000	41.74
28	5836000	44.11
31	3745000	46.55
34	2412000	48.92
37	1517000	51.28
40	1013000	53.57

TABLA No.14. Condición No. 1

ENVEJECIMIENTO ACELERADO- CONDICION No. 1

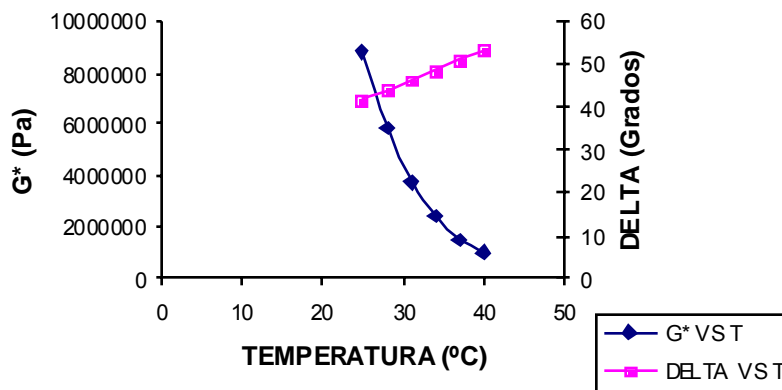


FIGURA No. 21 Propiedades Reológicas. Condición No. 1

CONDICION No 2.

PAV	
CONDICIONES	
Cantidad de muestra =	50
Temperatura =	90 °C
Presion=	210 PSI
Tiempo=	20 H

<u>TEMPERATURA Cº</u>	<u>G* (PASCAL)</u>	<u>DELTA (GRADOS)</u>
22	6864000	47.46
25.1	4167000	50.48
28	2544000	53.32
31	1523000	55.91
34	904800	58.47
37	545400	60.77
40	345400	63.01

TABLA No. 15. Condición No.2.

ENVEJECIMIENTO ACELERADO- CONDICION No. 2

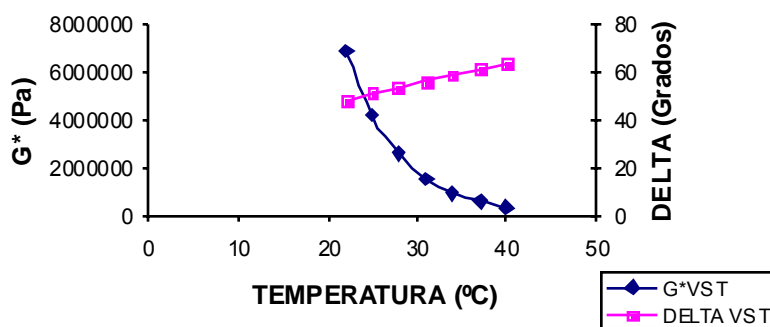


FIGURA No.22. Propiedades Reológicas. Condición No. 2

CONDICION No. 3

PAV	
CONDICIONES	
Cantidad de muestra =	50 gr
Temperatura =	110 °C
Presion=	100 PSI
Tiempo=	20 H

<u>TEMPERATURA C°</u>	<u>G* (PASCAL)</u>	<u>DELTA (GRADOS)</u>
19	8435000	44.74
22	5282000	47.67
25	3280000	50.41
28	1992000	53.14
31	1193000	55.69
34.1	711400	57.97
37	443100	59.78
40	287300	61.62

TABLA No. 16. Condición No. 3

ENVEJECIMIENTO ACELERADO- CONDICION No. 3

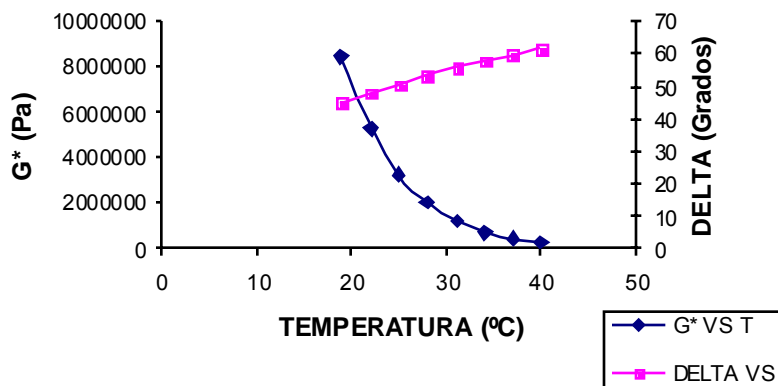


FIGURA 23. Propiedades Reológicas. Condición No. 3.

CONDICION No. 4.

PAV CONDICIONES	
Cantidad de muestra =	50 gr
Temperatura =	90 °C
Presion=	100 PSI
Tiempo=	10 H

<u>TEMPERATURA</u> <u>Cº</u>	<u>G* (PASCAL)</u>	<u>DELTA</u> <u>(GRADOS)</u>
19	9074000	45.67
22	5556000	48.9
25	3339000	52.03
28	1999000	54.9
31	1170000	57.58
34	694000	59.99
37	413400	62.16
40	254300	64.17

TABLA No. 17. Condición No. 4.

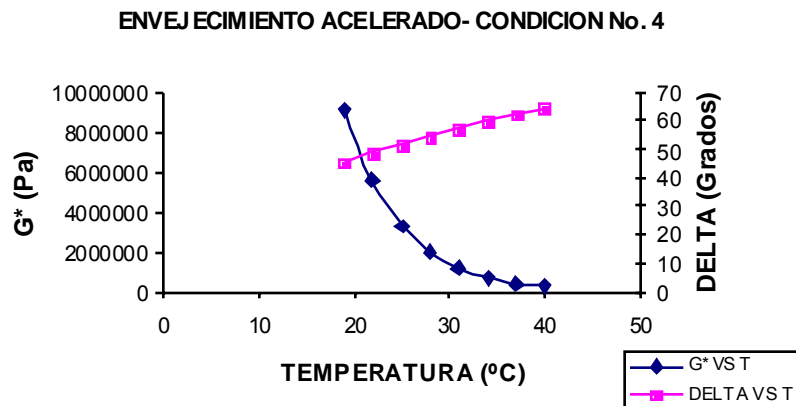


FIGURA 24. Propiedades Reológicas. Condición No. 4.

CONDICION No. 5

PAV CONDICIONES	
Cantidad de muestra =	50 gr
Temperatura =	110 °C
Presion=	210 PSI
Tiempo=	15 H

<u>TEMPERATURA</u> Cº	<u>G* (PASCAL)</u>	<u>DELTA</u> (GRADOS)
22	1.09E+07	41.23
25	7115000	43.65
28	4524000	45.99
31	2902000	48.19
34	1822000	50.27
37	1183000	52.34
40	751300	54.43

TABLA 18. Condición No. 5.

**ENVEJECIMIENTO ACELERADO- CONDICION
No. 5**

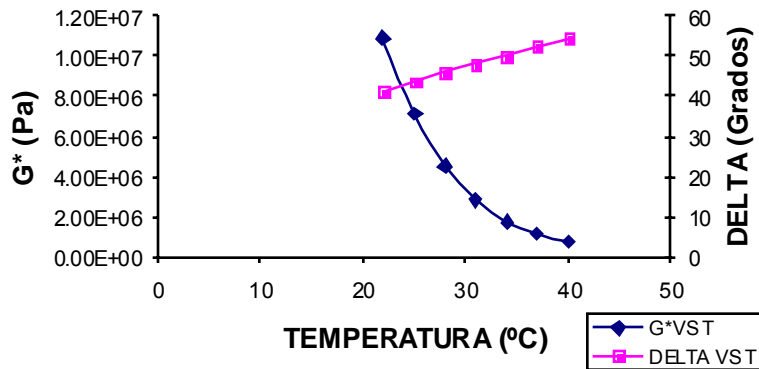


FIGURA No. 25. Propiedades Reológicas. Condición No. 5.

**PROPIEDADES REOLOGICAS MUESTRAS ENVEJECIDAS
ACELERADAMENTE; IGUAL CONDICIONES DE PRESIÓN P:210
PSI**

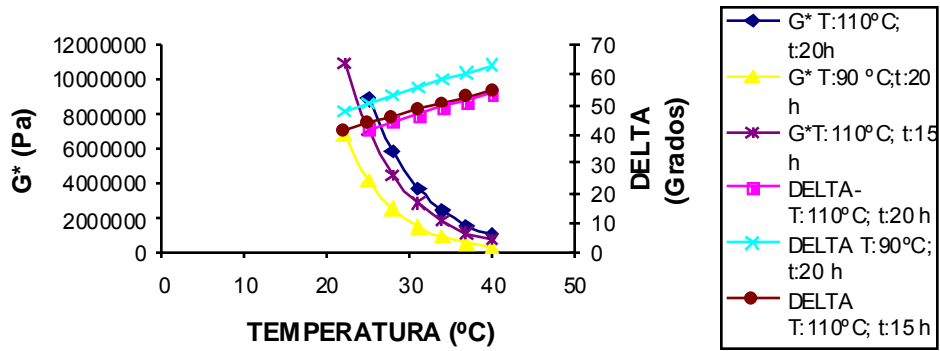


FIGURA No.26. Propiedades Reológicas. Condiciones iguales de Presión.

**PROPIEDADES REOLOGICAS MUESTRAS
ENVEJECIDAS ACELERADAMENTE, IGUALES
CONDICIONES DE TEMPERATURA T:110 °C**

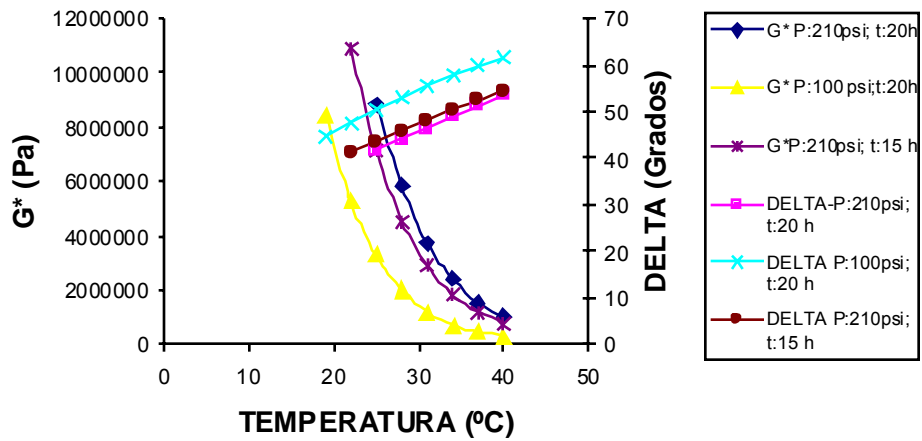


FIGURA No. 27. Propiedades reológicas. Condiciones iguales de Temperatura

3.2.2 CARACTERIZACION QUIMICA

En la ejecución de la presente investigación se elaboraron ensayos químicos de espectrografía infrarrojo sobre las mezclas envejecidas aceleradamente bajo diferentes condiciones de presión, temperatura y tiempo. Los resultados se presentan en la tabla No. 19.

CONDICION	CANTIDAD DE CARBONILOS UNIDADES DE ABSORBANCIA
No.1	1.78
No. 2	1.73
No. 3	1.56
No. 4	1.54
No. 5	1.66

TABLA 19. Cantidad de carbonilos en las mezda asfáltica envejecidas aceleradamente.

3.3 MEZCLA ASFALTICA ORIGINAL

Se realizaron ensayos físicos y químicos a la mezcla asfáltica original (sin envejecimiento) (ver tablas No. 20 y 21 y Figura No. 28).

3.3.1 Caracterización física.

TEMPERATURA C°	G* (pascal)	DELTA (grados)
52	13350	80,01
58,1	5667	82,44
63,9	2671	84,26

Tabla No. 20. Propiedades reológicas mezda asfáltica original.

PROPIEDADES REOLOGICAS- MEZCLA ASFÁLTICA ORIGINAL

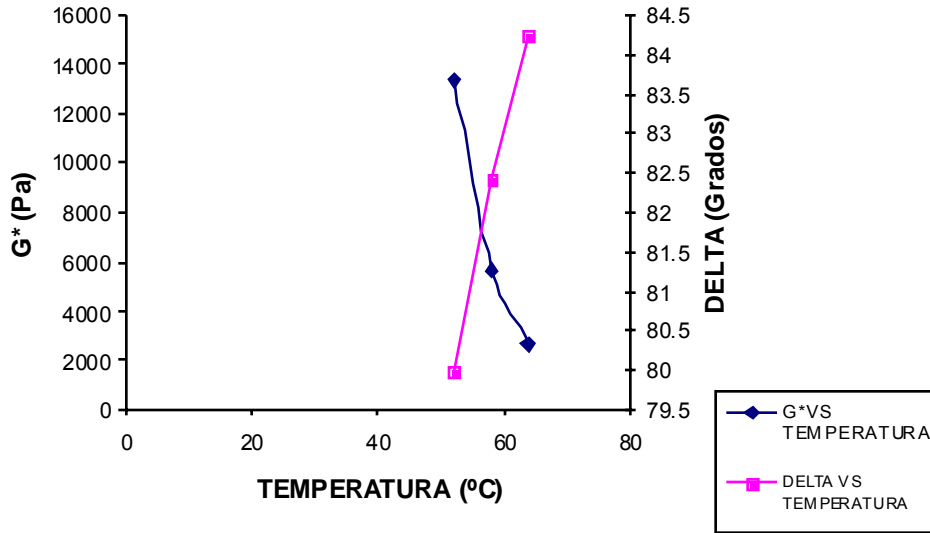


Figura No. 28. Grafica G* (Pa) Vs Temperatura (°C). Propiedades reológicas mezda asfáltica original.

3.3.2 Caracterización química.

ASFALTO	CANTIDAD DE CARBONILOS UNIDADES DE ABSORBANCIA
ORIGINAL	0.93

TABLA 21. Cantidad de carbonilos en la mezda asfáltica original.

3.4 CALCULO DE LOS PARAMETROS A, E, α y HS

Teniendo en cuenta la metodología descrita en el capítulo anterior los resultados obtenidos de los parámetros A, E, α y HS son los siguientes.

3.4.1 Calculo de α .

$$\frac{\Delta CA_{100}}{\Delta CA_{210}} = \frac{(100)^\alpha}{(210)^\alpha}$$

$$\alpha = 04052$$

3.4.2 Calculo de E.

$$\frac{E}{R} = \frac{\ln\left(\frac{\Delta CA_{110^\circ}}{\Delta CA_{90^\circ}}\right)}{\left(\frac{1}{363.15^\circ K} - \frac{1}{383.15^\circ K}\right)}$$

$$R: 8.314 \text{ J}/(\text{mol}^\circ\text{K})$$

$$E = 3506.51 \text{ J/MOL}$$

3.4.3 Calculo de A.

$$r_{CA} = AP^\alpha e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)}$$

$$CA = CA_0 + r_{CA} t$$

Despejando las anteriores ecuaciones se obtiene,

$$\Delta CA = AP^\alpha e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)} * t$$

Tomando las condiciones de la mezcla asfáltica – 3 años de servicio.

P: 14.7 psi

T: 293.15 °K

T= 3 años.

$\Delta CA = 4.89$ Unidades de Absorbancia.

$A = 0.000265$ Unidades de Absorbancia/(PSI*hora)

3.4.4 Calculo de HS.

Para el cálculo de HS se tiene en cuenta las viscosidades y área de carbonilos de la mezcla asfáltica envejecida a 3 años de servicio y al asfalto original. (ver tabla No. 22 y Figura No. 29).

AREA CARBONILOS	MODULO PASCAL	MODULO PSI	LN MODULO
0,93	13350	13350	9,499271664
5,82	80330	11,659	2,456072065

TABLA 22. Calculo de HS

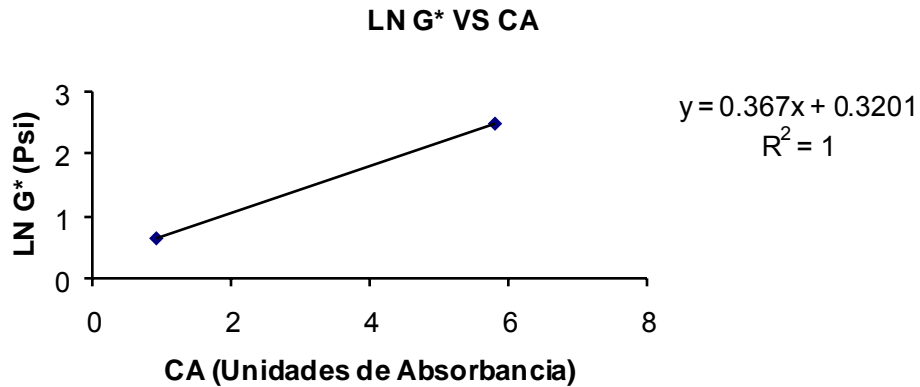


FIGURA 29. Grafica de LN G* VS CA.

HS= 0.367 PSI/Und Absorbancia

M= 1.938 Psi

Teniendo en cuenta los módulos cortantes (G^*) a diferentes temperaturas del ensayo DSR de las mezclas asfálticas envejecidas aceleradamente con la mezcla asfáltica original se puede observar que las muestras tienen pendientes aproximadamente iguales y por lo tanto son paralelas. (Ver figura No. 30)

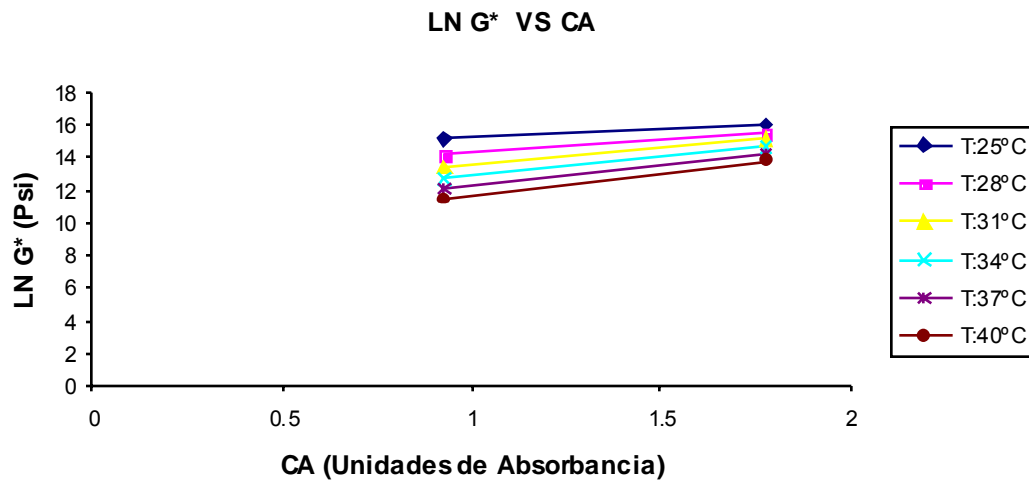


FIGURA 30. LN G* VS CA. Con base en las Temperaturas de las mezclas asfálticas envejecidas aceleradamente-CONDICION No. 1.

3.5 APLICACIÓN DEL MODELO

Luego de haberse realizado la calibración de los parámetros del modelo de oxidación, se procedió a aplicar el modelo. La Tabla No. 23 muestra los datos de entrada del modelo numérico.

DATOS DE ENTRADA MODELO

Parámetro	Valor	Unidades
Espesor de Capa	10	cm.
Δt	1	mes
Presión atmosférica	14.7	psi
Temperatura	293.15	°K
Energía de activación (Ea)	3506.51	J/mol

Constante universal de los gases (R)	8.314	KJ/Kmol*°K
Orden de reacción (α)	0.4036	
Factor de frecuencia de Arrhenius	0.1908	Un.Abs./Mes*Psi
Difusión	0.1	cm2/mes
Modulo cuando $\Delta t = 0$	1.938	psi
Susceptibilidad al endurecimiento (HS)	0.36	Psi/Un. Abs

TABLA 23. Datos de entrada al Modelo.

Los resultados de la aplicación del modelo de difusión se presentan en el anexo No.1. La grafica producto del desarrollo del modelo de difusión es la siguiente:

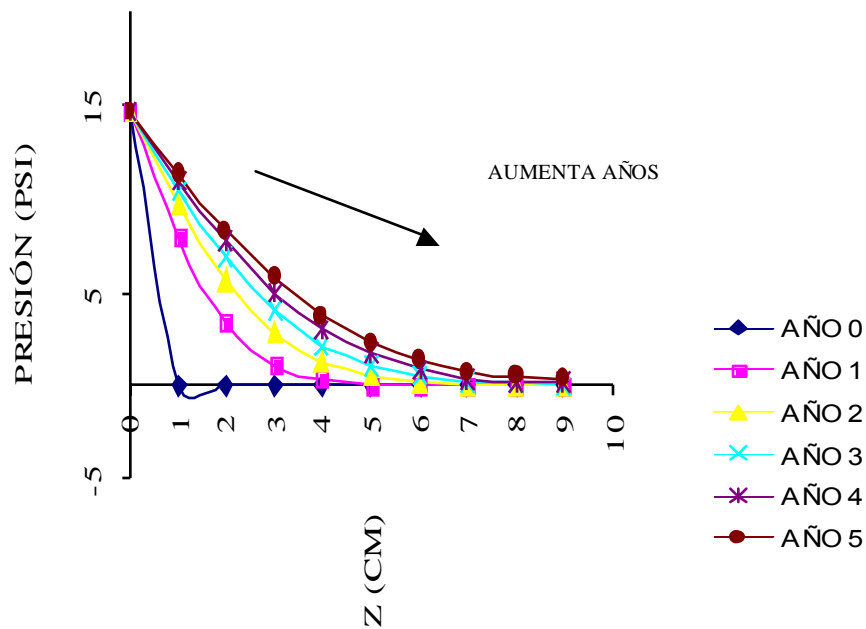


Figura No. 31. Grafica en Años de Presión (Psi) Vs Z (cm).El valor de la presión se tomó a una temperatura de 52°C

Los resultados del modelo de oxidación se presentan en el anexo No. 2. La Grafica que se muestra a continuación es el resultado del desarrollo del modelo.

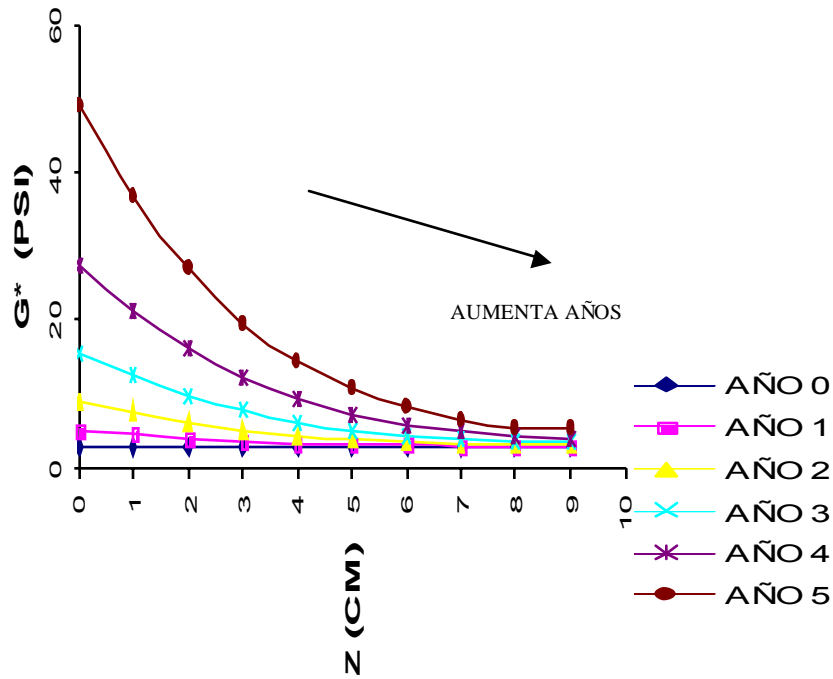


Figura No. 32. Grafica por años de G^* (Psi) Vs Z (cm).El valor del modulo se tomo a una temperatura de 52°C

3.6 VERIFICACION DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS APLICADOS.

Con el objeto de verificar los resultados del modelo aplicado, comparamos los valores de G^* de las mezclas envejecidas naturalmente a 3 años de servicio y los valores de G^* presentados por el modelo. La anterior comparación se puede observar en la figura No. 33.

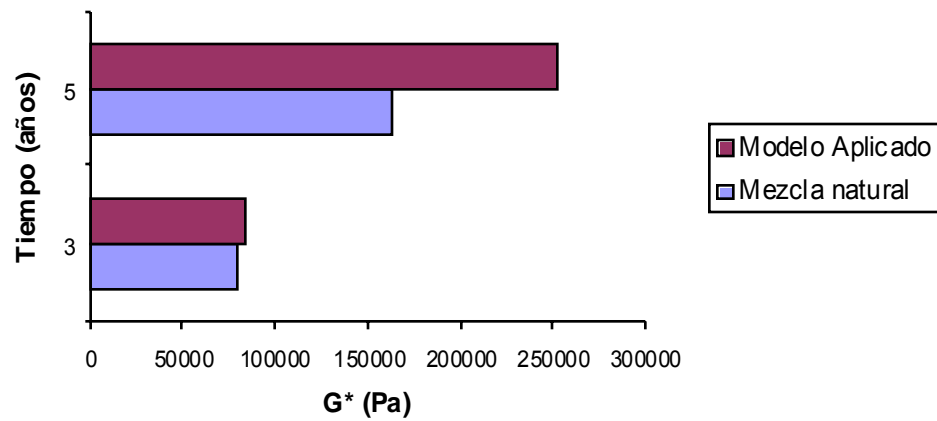


Figura No. 33. Grafica G^* vsTiempo.

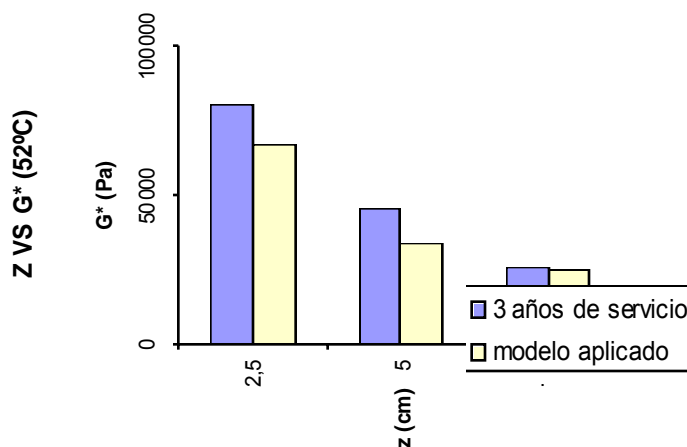


Figura 34. G^* (Pa) Vs. Z (cm.) Verificación de resultados del modelo aplicado comparado con mezclas asfálticas a 3 años de servicio.. El G^* se midió a una temperatura de 52°C

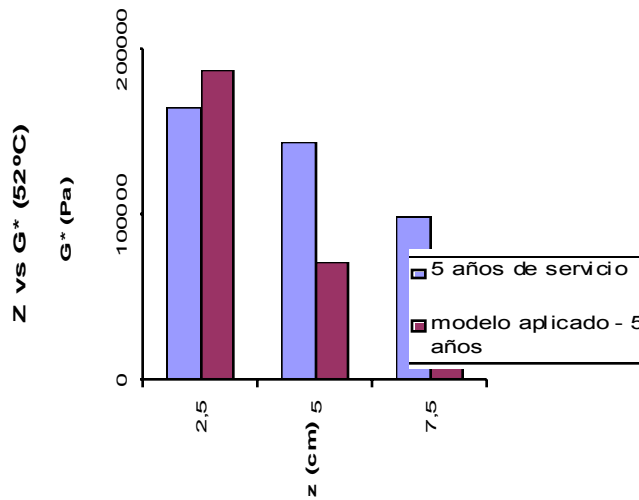


Figura 35. G*(Pa) Vs. Z (cm.) Verificación de resultados del modelo aplicado comparado con mezclas asfálticas a 5 años de servicio.. El G* se midió a una temperatura de 52°C

Posteriormente, calculamos la escala aproximada de envejecimiento acelerado en el laboratorio respecto al envejecimiento real. Comparamos los G* de cada una de las mezclas envejecidas aceleradamente con los resultados arrojados por el modelo, estimando así el tiempo de envejecimiento que simula aproximadamente el PAV con sus diferentes condiciones de presión, temperatura y tiempo. Nuevamente cabe resaltar que para el cálculo de HS se tomaron los valores de G* a temperaturas del laboratorio de DSR a 52°C. La comparación se puede observar en la tabla No. 26 y la figura No. 34.

CONDICION	TEMPERATURA C°	G* (Pa)	G* (Pa)-Modelo	T simulado aprox(Años)
1	52	151341	155677	3.7
2	52	106324	105854	3
3	52	41466	44442	1.5
4	52	26514	30218	0.8
5	52	128142	128371	3.3

Tabla No. 24. Cuadro comparativo de G* (Pa) de las mezclas envejecidas aceleradamente respecto a los resultados del modelo.

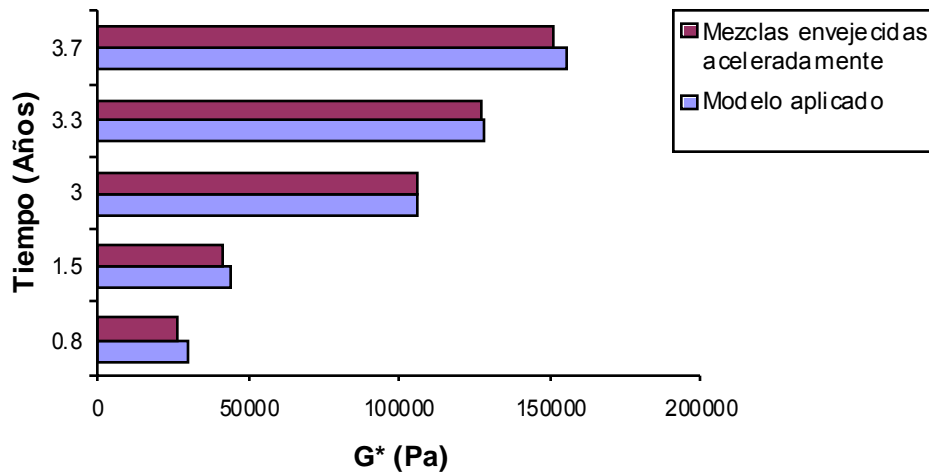


Figura No.36. Grafica comparativa de G* (Pa) Vs Tiempo (años) de las mezclas envejecidas aceleradamente respecto a los resultados del modelo.

Como resultado, la condición No. 1 estima un envejecimiento por oxidación equivalente entre 3.5 a 4 años de servicio; la condición No. 2 estima un envejecimiento por oxidación equivalente a 3 años de servicio; la condición No. 3 estima un envejecimiento por oxidación equivalente a 1.5 años de servicio; la condición No. 4 estima un envejecimiento por oxidación equivalente entre 0.5 a 1 año de servicio y la condición No. 5 estima un envejecimiento por oxidación equivalente a 3.5 años de servicio.

CONCLUSIONES

El modelo Propuesto por Domke, y aplicado en esta investigación, simula adecuadamente el envejecimiento por oxidación de mezclas asfálticas.

La diferencia entre los valores del módulo cortante (G^*) encontrados al comparar la muestra envejecida naturalmente con los valores arrojados por el modelo aplicado es de 5% para la mezcla de 3 años de servicio y de 35% para la mezcla con 5 años de servicio.

El modelo desarrollado en esta investigación, también puede ser utilizado para hallar una equivalencia entre el envejecimiento acelerado en laboratorio (bajo diversas condiciones de tiempo, presión y temperatura), y el envejecimiento naturalmente presentado por muestras en servicio.

Parámetros como la presión y la temperatura son los más influyentes en el proceso de envejecimiento por oxidación, por encima incluso del tiempo.

Una limitante a la precisión del modelo, es que todas las mezclas asfálticas analizadas deberían estar hechas con el mismo tipo de asfalto. Tanto las envejecidas naturalmente como las que se envejecieron de manera acelerada en el laboratorio. Esto no se pudo lograr en la presente investigación, debido a la dificultad de establecer la procedencia del asfalto de las muestras envejecidas naturalmente.

Dado que el tema del envejecimiento por oxidación no ha sido analizado de manera mas amplia y suficiente en nuestro medio, es recomendable para futuras

investigaciones, profundizar en expresiones numéricas y coeficientes de ajuste que permitan relacionar las condiciones de envejecimiento de laboratorio con el modulo obtenido por el envejecimiento natural.

Las mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a distintas edades de servicio presentan el siguiente comportamiento en sus propiedades reológicas.

El modulo G^* correspondiente a las mezclas asfálticas aumentan de la capa inferior a la superior de la misma. Lo anterior verificando la teoría que las mezclas asfálticas al envejecerse aumentan su G^* . La capa superior presenta mayor G^* por lo que ha sufrido mayor envejecimiento al estar mas expuesta al ambiente y por lo tanto a ser afectada por proceso de oxidación.

El Angulo de fase (δ) correspondiente a las mezclas asfálticas aumenta respecto a la profundidad, por los que las mezclas asfálticas al envejecerse disminuyen su delta. La capa superior presenta un delta menor respecto a la capa inferior por la exposición directa con el ambiente y por lo tanto al proceso de difusión.

Las mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a distintas edades de servicio (3, 5 y 7 años de servicio) presentan diferencias entre los valores de los G^* y los deltas. El ángulo de fase de cada una de las distintas mezclas asfálticas se reducen a medida que aumenta la edad de servicio, mostrando de este forma un comportamiento similar respecto a la profundidad a medida que las mezclas están más envejecidas.

Las mezclas asfálticas al envejecerse por oxidación, aumentan la cantidad de carbonilos en unidades de absorbancia. Adicionalmente estos carbonilos aumentan de la capa inferior a la superior, siendo esta ultima la capa que sufre mayor oxidación y por lo tanto envejecimiento.

Las mezclas asfálticas envejecidas aceleradamente en el laboratorio a diferentes condiciones de presión, temperatura y tiempo presentan el siguiente comportamiento en sus propiedades reológicas.

Las mezclas asfálticas envejecidas aceleradamente con valores superiores de presión, temperatura y tiempo presentan un modulo (G^*) mayor y un ángulo de fase (δ) menor respecto a valores menores. Adicionalmente los valores de cantidad de carbonilos en unidades de absorbancia son superiores a medida que las condiciones ya mencionadas aumenten. Lo anterior demuestra que las mezclas asfálticas afectadas con valores superiores de presión, temperatura y tiempo sufren mayor envejecimiento por oxidación.

El modelo elaborado presenta el proceso de difusión que sufre el oxígeno en las mezclas asfálticas. Se asumió una capa de mezcla de 10 cm. de donde se observa el cambio en la presión a través de la profundidad.

El cálculo de Arrhenius se determinó con base en el cambio de carbonilos de la muestra original respecto a la mezcla asfáltica envejecida naturalmente a 3 años de servicio y sus respectivas condiciones de presión, tiempo y temperatura.

El modelo numérico elaborado da como resultado viscosidades en pascales a través del tiempo. Para este modelo se toma un límite de tiempo de 5 años. Las propiedades reológicas calculadas en el modelo son aproximadas y se encuentran dentro de un rango lógico respecto a las propiedades reológicas de las mezclas envejecidas naturalmente a diferentes edades de servicio.

Las diferentes condiciones de presión, temperatura y tiempo aplicadas al envejecimiento acelerado de mezclas asfálticas presentan unas propiedades reológicas, las cuales al compararlas con las resultantes del modelo, determinan el tiempo de envejecimiento simulado a escala real. Para la condición de presión: 210 PSI; T: 110°C y tiempo en el laboratorio. 20h simula un envejecimiento aproximado a escala real de 3.5 años a 4 años. La anterior condición simula el tiempo mayor de envejecimiento a escala real respecto a las demás condiciones empleadas en el envejecimiento acelerado de mezclas asfálticas.

El modelo simula un comportamiento aproximado de envejecimiento por oxidación. No se puede pretender simular exactamente el envejecimiento por oxidación en mezclas asfálticas en su etapa de servicio mediante pruebas de laboratorio de envejecimiento acelerado. Lo anterior debido a que los ensayos acelerados no tienen en cuenta parámetros que ocurren en la realidad tales como condiciones climáticas, cambios atmosféricos, entre otros.

BIBLIOGRAFIA

Husain, U & Anderson, David. 1994, The pressure Aging Vessel (PAV): A test to simulate rheological changes due to field aging. American Society of testing Materials.

Domke, C & Liu M.1997, A study of the SHRP PAV procedure using long term, low temperature aging experiments and asphalt kinetics. 76th Annual meeting of Transportation Research Board.

Airey, G.D. 2003 State of the art report on aging test methods for bituminous pavement materials, The international journal of pavement engineering, Vol. (4) , September 2003, pp 165 – 176

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. CONDICIONES DE PRESIÓN TIEMPO Y TEMPERATURA DE ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO.	28
TABLA 2 RELACIONES ENTRE LOS DIFERENTES ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO.	30
TABLA 3. PARÁMETROS DE ENTRADA DEL MODELO NUMÉRICO PROPUESTO POR DOMKE	33
TABLA No. 4 CAPA SUPERIOR- 3 AÑOS DE SERVICIO.....	35
TABLA No 5. CAPA CENTRAL- 3 AÑOS DE SERVICIO.	36
TABLA No. 6. CAPA INFERIOR- 3 AÑOS DE SERVICIO.....	37
TABLA No. 7 CAPA SUPERIOR – 5 AÑOS DE SERVICIO.	38
TABLA No. 8. CAPA CENTRAL- 5 AÑOS DE SERVICIO.	39
TABLA No. 9. CAPA INFERIOR- 5 AÑOS DE SERVICIO.....	39
TABLA No. 10. CAPA SUPERIOR- 7 AÑOS DE SERVICIO.	41
TABLA No. 11. CAPA CENTRAL- 7 AÑOS DE SERVICIO.....	42
TABLA No. 12. CAPA INFERIOR- 7 AÑOS DE SERVICIO.....	42
TABLA No.13. ÁREA DE CARBONILOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA ENVEJECIDA NATURALMENTE A 3 AÑOS DE SERVICIO.	45
TABLA No.14. CONDICIÓN No. 1.....	46
TABLA No. 15. CONDICIÓN No.2.....	47
TABLA No. 16. CONDICIÓN No. 3.....	48
TABLA No. 17. CONDICIÓN No. 4.....	49
TABLA 18. CONDICIÓN No. 5.....	50
TABLA 19. CANTIDAD DE CARBONILOS EN LAS MEZCLA ASFÁLTICA ENVEJECIDAS ACELERADAMENTE.	52
TABLA No. 20. PROPIEDADES REOLÓGICAS MEZCLA ASFÁLTICA ORIGINAL.	52
TABLA 21. CANTIDAD DE CARBONILOS EN LA MEZCLA ASFÁLTICA ORIGINAL.	53
TABLA 22. CALCULO DE HS	56
TABLA 23. DATOS DE ENTRADA AL MODELO.....	58
TABLA No. 24. CUADRO COMPARATIVO DE G^* (PA) DE LAS MEZCLAS EN VEJECIDAS ACELERADAMENTE RESPECTO A LOS RESULTADOS DEL MODELO.....	61

LISTA DE FIGURAS

FIGURA NO. 1. TOMADA DE: TESIS DE GRADO, MSc, CRUZ MARINA TORRES CAICEDO, UNIVERSIDAD DEL CAUCA.....	4
FIGURA NO.2. ENSAYO PAV (PREASSURE AGING VASSEL).	7
FIGURA NO.3 REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO (DSR). TOMADA DE HTTP://WWW.CHASFALTO.COM	8
FIGURA NO. 4 CENTRIFUGA. TOMADA DE HTTP://WWW.FIGMAY.COM.AR/ROTOVAPOR.PHP	21
FIGURA NO. 5 ROTOVAPOT. TOMADA DE HTTP://WWW.FIGMAY.COM.AR/ROTOVAPOR.PHP	22
FIGURA NO. 6 CAPA SUPERIOR- 3 AÑOS DE SERVICIO.....	36
FIGURA NO. 7. CAPA CENTRAL- 3 AÑOS DE SERVICIO.	36
FIGURA NO. 8. CAPA INFERIOR- 3 AÑOS DE SERVICIO.....	37
FIGURA NO. 9. PROPIEDADES REOLÓGICAS- 3 AÑOS DE SERVICIO.	37
FIGURA NO.10. CAPA SUPERIOR – 5 AÑOS DE SERVICIO.	38
FIGURA NO11. CAPA CENTRAL- 5 AÑOS DE SERVICIO.	39
FIGURA NO. 12. CAPA INFERIOR- 5 AÑOS DE SERVICIO.	40
FIGURA NO. 13. PROPIEDADES REOLÓGICAS- 5 AÑOS DE SERVICIO.	40
FIGURA NO.14. CAPA SUPERIOR- 7 AÑOS DE SERVICIO.	41
FIGURA NO. 15. CAPA CENTRAL- 7 AÑOS DE SERVICIO.	42
FIGURA NO. 16. CAPA INFERIOR- 7 AÑOS DE SERVICIO.	43
FIGURA 17. PROPIEDADES REOLÓGICAS- 7 AÑOS DE SERVICIO.....	43
FIGURA NO.18. ÁREA DE CARBONILOS (UNIDADES DE ABSORBANCIA), MEZCLA ASFÁLTICA ENVEJECIDA NATURALMENTE A 3 AÑOS DE SERVICIO- CAPA SUPERIOR.....	44
FIGURA NO.19. ÁREA DE CARBONILOS (UNIDADES DE ABSORBANCIA), MEZCLA ASFÁLTICA ENVEJECIDA NATURALMENTE A 3 AÑOS DE SERVICIO- CAPA CENTRAL.	44
FIGURA NO.20. ÁREA DE CARBONILOS (UNIDADES DE ABSORBANCIA), MEZCLA ASFÁLTICA ENVEJECIDA NATURALMENTE A 3 AÑOS DE SERVICIO- CAPA INFERIOR.	45
FIGURA NO. 21 PROPIEDADES REOLÓGICAS. CONDICIÓN NO. 1	46
FIGURA NO.22. PROPIEDADES REOLÓGICAS. CONDICIÓN NO. 2	47
FIGURA 23. PROPIEDADES REOLÓGICAS. CONDICIÓN NO. 3.....	48
FIGURA 24. PROPIEDADES REOLÓGICAS. CONDICIÓN NO. 4	49
FIGURA NO. 25. PROPIEDADES REOLÓGICAS. CONDICIÓN NO. 5.....	50
FIGURA NO.26. PROPIEDADES REOLÓGICAS. CONDICIONES IGUALES DE PRESIÓN.....	51
FIGURA NO. 27. PROPIEDADES REOLÓGICAS. CONDICIONES IGUALES DE TEMPERATURA	51
FIGURA NO. 28. GRAFICA G^* (PA) VS TEMPERATURA ($^{\circ}$ C). PROPIEDADES REOLÓGICAS MEZCLA ASFÁLTICA ORIGINAL	53
FIGURA 29. GRAFICA DE LN G^* VS CA.....	56
FIGURA 30. LN G^* VS CA. CON BASE EN LAS TEMPERATURAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ENVEJECIDAS ACELERADAMENTE-CONDICION NO. 1.....	57
FIGURA NO. 31. GRAFICA EN AÑOS DE PRESIÓN (PSI) VS Z (CM).EL VALOR DE LA PRESIÓN SE TOMÓ A UNA TEMPERATURA DE 52° C.....	58
FIGURA NO. 32. GRAFICA POR AÑOS DE G^* (PSI) VS Z (CM).EL VALOR DEL MODULO SE TOMO A UNA TEMPERATURA DE 52° C	59
FIGURA NO. 33. GRAFICA G^* VS TIEMPO.....	60
FIGURA 34. $G^*(PA)$ VS. Z (CM.) VERIFICACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO APLICADO COMPARADO CON MEZCLAS ASFÁLTICAS A 3 AÑOS DE SERVICIO.. EL G^* SE MIDIÓ A UNA TEMPERATURA DE 52° C.....	60
FIGURA 35. $G^*(PA)$ VS. Z (CM.) VERIFICACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO APLICADO COMPARADO CON MEZCLAS ASFÁLTICAS A 5 AÑOS DE SERVICIO.. EL G^* SE MIDIÓ A UNA TEMPERATURA DE 52° C.....	61
FIGURA NO.36. GRAFICA COMPARATIVA DE G^* (PA) VS TIEMPO (AÑOS) DE LAS MEZCLAS ENVEJECIDAS ACELERADAMENTE RESPECTO A LOS RESULTADOS DEL MODELO.....	62

ANEXOS

ANEXO 1. RESULTADOS DEL MODELO DE DIFUSION

tiempo: mes		0	1	2	3
Δi : (cm)	i (cm)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)
0	0	14,7	14,7	14,7	14,7
1	1	0	1,47	2,646	3,6015
1	2	0	0	0,147	0,3822
1	3	0	0	0	0,0147
1	4	0	0	0	0
1	5	0	0	0	0
1	6	0	0	0	0
1	7	0	0	0	0
1	8	0	0	0	0
1	9	0	0	0	0

4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---

presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)
14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
4,38942	5,048274	5,6064036	6,08490183	6,49964763	6,862732661
0,66738	0,977844	1,2977895	1,61726166	1,930145574	2,232840448
0,04998	0,106869	0,183897	0,27846063	0,387592254	0,50837257
0,00147	0,006174	0,0156408	0,03097584	0,05284209	0,081515792
0	0,000147	0,000735	0,00215355	0,00482895	0,00917574
0	0	0,0000147	0,00008526	0,00028371	0,000710833
0	0	0	0,00000147	0,000009702	3,61473E-05
0	0	0	0	0,000000147	1,0878E-06
0	0	0	0	0	2,94E-08

10	11	12	13	14	15
----	----	----	----	----	----

presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)
14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
7,183470174	7,469114427	7,725378211	7,956808468	8,167061422	8,359105955
2,523382881	2,80086669	3,065058993	3,316146477	3,554568176	3,780905797
0,63813368	0,774541978	0,915614618	1,05970147	1,205451144	1,351771559
0,116967465	0,158943665	0,207038764	0,260753198	0,319538266	0,382829048
0,015563255	0,024296336	0,035607257	0,049655598	0,066533212	0,086272063
0,001489855	0,002758221	0,004659162	0,007334136	0,010916664	0,015527766
0,00010011	0,000229522	0,000460802	0,000837954	0,001411138	0,002234942
4,48791E-06	1,36254E-05	3,39616E-05	7,36093E-05	0,00014365	0,00025828
2,4108E-07	1,09045E-06	3,59744E-06	9,67028E-06	2,24581E-05	4,66964E-05

16	17	18	19	20	21
----	----	----	----	----	----

presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)
14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
8,535375344	8,697881514	8,848301863	8,988045833	9,118306409	9,240100301
3,995812389	4,199966519	4,394043425	4,578697423	4,754551739	4,922193202
1,497790732	1,642820584	1,786324968	1,927892169	2,067211701	2,204054968
0,450067601	0,520718487	0,59427852	0,670282238	0,748304336	0,827959981
0,108853332	0,134216717	0,162269254	0,192893288	0,225953419	0,261302387
0,021272913	0,02824032	0,036500329	0,046105647	0,057092186	0,069480324
0,003366558	0,004864016	0,006784584	0,009183393	0,012112331	0,015619195
0,000434787	0,000693387	0,001056928	0,001550522	0,002201112	0,003037018
8,90131E-05	0,000158168	0,000265212	0,000423555	0,000648948	0,000959381

22	23	24	25	26	27
----	----	----	----	----	----

presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)
14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
9,354299561	9,461656657	9,562824522	9,658372689	9,748800391	9,834547251
5,082170088	5,234991956	5,381130712	5,521022402	5,655069383	5,78364267
2,338259293	2,469714815	2,598353798	2,724141925	2,847071247	2,967154465
0,90890372	0,990827499	1,073458158	1,156554667	1,239905292	1,3233248
0,29878594	0,338246766	0,379527606	0,422473664	0,466934414	0,512764921
0,083276417	0,098474437	0,115057632	0,133000157	0,15226861	0,172823456
0,01974709	0,024534061	0,03001291	0,03621118	0,043151264	0,050850612
0,004087472	0,005382177	0,00695089	0,00882304	0,011027398	0,013591784
0,001374909	0,001917421	0,002610372	0,003478476	0,004547389	0,005843391

28	29	30	31	32	33
----	----	----	----	----	----

presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)
14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
9,916002068	9,993510085	10,06737904	10,1378842	10,20527267	10,2697669
5,907084308	6,025709685	6,139809743	6,249653045	6,355487699	6,457543125
3,084420319	3,198909864	3,310673473	3,419768428	3,526256988	3,630204842
1,406651778	1,489746131	1,572486753	1,654769412	1,736504821	1,817616908
0,559826762	0,60798862	0,657126622	0,707124489	0,75787352	0,809272469
0,194620318	0,217611132	0,24174516	0,266969873	0,293231709	0,320476711
0,059322014	0,068573925	0,07861083	0,089433611	0,101039925	0,113424572
0,016542827	0,01990577	0,023704311	0,027960489	0,032694604	0,037925167
0,007393069	0,009223021	0,011359571	0,013828519	0,016654913	0,019862851

34	35	36	37	38	39
----	----	----	----	----	----

presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)
14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
10,33156784	10,39085744	10,44780096	10,50254886	10,55523846	10,60599536
6,556031674	6,651150111	6,743080952	6,831993691	6,918045908	7,00138427
3,731679877	3,830751195	3,92748834	4,021960688	4,114236974	4,204384923
1,898041257	1,977723727	2,056619212	2,134690544	2,211907529	2,288246078
0,861227337	0,913651103	0,966463412	1,019590247	1,072963572	1,126520986
0,348651073	0,377701577	0,407575959	0,4382232	0,469593752	0,501639713
0,126579845	0,140495871	0,155160916	0,170561677	0,186683543	0,203510833
0,043668876	0,049940617	0,056753483	0,064118812	0,072046235	0,080543732
0,023475314	0,027514026	0,031999344	0,036950172	0,0423839	0,048316367

40	41	42	43	44	45
----	----	----	----	----	----

presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)
14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
10,65493471	10,70216232	10,74777554	10,79186421	10,8345113	10,87579362
7,082145444	7,160456924	7,236437778	7,310199327	7,381845767	7,451474723
4,292470973	4,378560068	4,462715507	4,544998837	4,625469789	4,704186238
2,363687453	2,438217597	2,511826538	2,584507871	2,6562583	2,727077225
1,180205368	1,233964535	1,287750907	1,34152119	1,395236063	1,448859897
0,534314953	0,5675752	0,601378101	0,635683244	0,670452165	0,705648336
0,221027011	0,239214875	0,258056725	0,277534513	0,29762997	0,318324721
0,089617706	0,09927305	0,109513229	0,120340357	0,131755283	0,143757668
0,05476184	0,061733013	0,069241021	0,077295462	0,085904441	0,09507461

46	47	48	49	50	51
----	----	----	----	----	----

presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)
14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
10,91578237	10,95454367	10,99213902	11,0286257	11,06405713	11,09848321
7,519177764	7,585040866	7,649144837	7,711565697	7,77237504	7,831640348
4,781204185	4,856577764	4,930359256	5,00259912	5,073346028	5,142646912
2,796966394	2,865929581	2,933972314	3,001101629	3,067325854	3,13265442
1,502360474	1,555708731	1,608878522	1,661846386	1,714591339	1,767094678
0,74123713	0,777185789	0,813463367	0,850040673	0,886890214	0,923986122
0,339600377	0,361438622	0,383821278	0,406730368	0,430148163	0,454057223
0,156346067	0,169518014	0,183270092	0,197598017	0,212496705	0,227960344
0,104811221	0,11511819	0,125998155	0,137452543	0,149481637	0,162084651

52	53	54	55	56	57
----	----	----	----	----	----

presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)
14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
11,1319506	11,16450301	11,19618141	11,22702425	11,2570677	11,28634574
7,889425291	7,945789993	8,000791286	8,05448293	8,106915828	8,158138213
5,210547007	5,277089904	5,342317606	5,406270579	5,46898781	5,530506856
3,197097695	3,260666836	3,323373661	3,385230532	3,446250257	3,506446003
1,819339797	1,871312015	1,922998425	1,97438774	2,025470161	2,076237255
0,961304087	0,998821292	1,036516335	1,074369163	1,112361003	1,150474292
0,478440425	0,503280995	0,528562524	0,554268985	0,580384742	0,606894558
0,243982462	0,260555991	0,277673325	0,295326378	0,31350664	0,332205225
0,175259789	0,189004324	0,203314658	0,218186391	0,233614388	0,249592839

58	59	60	61
----	----	----	----

presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)	presión (psi)
14,7	14,7	14,7	14,7
11,31489041	11,34273191	11,36989874	11,39641782
8,20819583	8,257132096	8,304988251	8,351803498
5,590863907	5,65009383	5,708230228	5,765305488
3,565831214	3,624419545	3,682224804	3,739260896
2,126681833	2,17679785	2,226580298	2,276025122
1,188692615	1,227000635	1,265384036	1,303829462
0,633783598	0,661037432	0,688642032	0,71658377
0,35141292	0,371120227	0,391317409	0,411994522
0,266115316	0,283174837	0,300763915	0,318874614

ANEXO 2. RESULTADOS DEL MODELO DE OXIDACION

Tiempo: mes	0	1	2	3	4
i (cm)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)
0	18658.77202	19580.44851	20547.65252	21562.63294	22627.74977
1	18658.77202	19017.36922	19581.44462	20253.11354	21004.29165
2	18658.77202	18658.77202	18941.36728	19287.83077	19720.9373
3	18658.77202	18658.77202	18658.77202	18825.62058	19025.26206
4	18658.77202	18658.77202	18658.77202	18658.77202	18746.42056
5	18658.77202	18658.77202	18658.77202	18658.77202	18658.77202
6	18658.77202	18658.77202	18658.77202	18658.77202	18658.77202
7	18658.77202	18658.77202	18658.77202	18658.77202	18658.77202
8	18658.77202	18658.77202	18658.77202	18658.77202	18658.77202
9	18658.77202	18658.77202	18658.77202	18658.77202	18658.77202

5	6	7	8	9	10
G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)
23745.47954	24918.42116	26149.3019	27440.98374	28796.47003	30218.91249
21822.11654	22700.1124	23635.09103	24625.76271	25672.02489	26774.56673
20227.80096	20799.57672	21430.29645	22115.98272	22854.07385	23643.0444
19285.59762	19602.90626	19973.4237	20393.96564	20861.98602	21375.52997
18854.86054	19002.53716	19189.80357	19416.11103	19680.62017	19982.43088
18701.97751	18758.19268	18838.15285	18943.56137	19075.3588	19234.05253
18658.77202	18679.22967	18707.32867	18749.0238	18806.09218	18879.86694
18658.77202	18658.77202	18668.19252	18681.83911	18702.92221	18732.83317
18658.77202	18658.77202	18658.77202	18663.02218	18669.49846	18679.89465
18658.77202	18658.77202	18658.77202	18658.77202	18661.2691	18665.25915

11	12	13	14	15	16
G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)
31711.61851	33278.05886	34921.87575	36646.89131	38457.11645	40356.76024
27934.63674	29153.90117	30434.35556	31778.26869	33188.14703	34666.71253
24482.14796	25371.23847	26310.64414	27301.07703	28343.56774	29439.41801
21933.16401	22533.90649	23177.16543	23862.68523	24590.50235	25360.90873
20320.69666	20694.68402	21103.80196	21547.61417	22025.84137	22538.35821
19419.8777	19632.90257	19873.10207	20140.40973	20434.75419	20756.08471
18971.36606	19081.36269	19210.44036	19359.03867	19527.49116	19716.05635
18772.76608	18823.75005	18886.66515	18962.25886	19051.16347	19153.9135
18695.16159	18716.19595	18743.83935	18778.87334	18822.01746	18873.93025
18671.89582	18681.95597	18696.22094	18715.46618	18740.44913	18771.90002

17	18	19	20	21	22
G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)
42350.23962	44442.18974	46637.4747	48941.19887	51358.71877	53895.65549
36216.88918	37841.79577	39544.74276	41329.23235	43198.96069	45157.82197
30590.16613	31797.56196	33063.54892	34390.2514	35779.9662	37235.15711
26174.42204	27031.76166	27933.82939	28881.6942	29876.58019	30919.85732
23085.18721	23666.49151	24282.56737	24933.83683	25620.84106	26344.23443
21104.38863	21479.70312	21882.12288	22311.80491	22768.97129	23253.9106
19924.94281	20154.3294	20404.38135	20675.2629	20967.14731	21280.22465
19270.96244	19402.6982	19549.4572	19711.53672	19889.20592	20082.71522
18935.21246	19006.41168	19088.02788	19180.51929	19284.30844	19399.78808
18810.51566	18856.95584	18911.8419	18975.75691	19049.24723	19132.82489

23	24	25	26	27	28
G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)
56557.90779	59351.66582	62283.42549	65360.00359	68588.55362	71976.58245
47209.91384	49359.54391	51611.23735	53969.74525	56440.05381	59027.39428
38758.45201	40352.64192	42020.68164	43765.69169	45590.96144	47499.95312
32013.03441	33157.75404	34355.789	35609.04017	36919.53544	38289.42975
27104.77936	27903.34205	28740.88892	29618.48389	30537.2863	31498.54945
23766.97848	24308.59754	24879.25707	25479.51252	26109.98496	26771.36065
21614.70785	21970.8374	22348.88495	22749.15621	23171.99309	23617.77546
20292.30446	20518.20986	20760.6699	21019.93034	21296.24843	21589.89655
19527.32675	19667.27418	19819.96606	19985.72862	20164.88265	20357.74723
19226.97066	19332.13757	19448.75452	19577.23019	19717.95671	19871.31342

29	30	31	32	33	34
G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)
75531.96777	79262.9764	83178.28348	87286.9927	91598.65744	96123.30297
61737.25355	64575.38552	67547.82306	70660.89077	73921.21833	77335.75469
49496.30664	51583.84528	53766.58191	56048.72595	58434.6909	60929.10247
39721.00581	41216.67577	42778.98342	44410.60703	46114.36276	47893.2086
32503.61983	33553.93673	34651.03256	35796.5334	36992.16014	38239.72996
27464.39066	28189.89073	28948.74121	29741.88726	30570.33927	31435.17342
24086.92259	24579.89426	25097.19182	25639.35907	26206.98312	26800.69522
21901.16521	22230.36565	22577.83207	22943.92358	23329.02583	23733.55259
20564.64303	20785.89533	21021.83674	21272.80964	21539.16839	21821.28139
20037.67041	20217.39187	20410.83931	20618.37456	20840.36254	21077.17389

35	36	37	38	39	40
G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)
100871.4498	105854.138	111082.9532	116570.0532	122328.1962	128370.7709
80911.78293	84656.93586	88579.21252	92686.99541	96989.06859	101494.6368
63536.80722	66262.88185	69112.64301	72091.65765	75205.75401	78461.03314
49750.24873	51688.73837	53712.08906	55823.87441	58027.83621	60327.89096
39541.15818	40898.46043	42313.75522	43789.26679	45327.32825	46930.38507
32337.53249	33278.62692	34259.73596	35282.20916	36347.46795	37457.0075
27421.17164	28069.13453	28745.35288	29450.64355	30185.87235	30951.95521
24157.94703	24602.68302	25068.26631	25555.23564	26064.16382	26595.65889
22119.53289	22434.32477	22766.07809	23115.23462	23482.25828	23867.63652
21329.18739	21596.79225	21880.39022	22180.39758	22497.24699	22831.38931

41	42	43	44	45	46
G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)
134711.8271	141366.1087	148349.0881	155677.0016	163366.8878	171436.6268
106213.3452	111155.3005	116331.093	121751.8193	127429.1066	133375.1381
81863.88111	85420.98175	89139.3301	93026.24651	97089.39145	101336.781
62728.13689	65232.86131	67846.54846	70573.88772	73419.78236	76389.35867
48600.99884	50341.8513	52155.74875	54045.62664	56014.55451	58065.7413
38612.3987	39815.29042	41067.41191	42370.5754	43726.67892	45137.7093
31749.8595	32580.6054	33445.26739	34344.97585	35280.9188	36254.34373
27150.36516	27728.9644	28332.17692	28960.76286	29615.5234	30297.3021
24271.88164	24695.5321	25139.15384	25603.34155	26088.71999	26595.94528
23183.29524	23553.45696	23942.38969	24350.63323	24778.75339	25227.34353

47	48	49	50	51	52
G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)
179904.982	188791.6436	198117.2744	207903.5581	218173.249	228950.226
139602.6795	146125.1066	152956.4348	160111.3495	167605.238	175454.2234
105776.8033	110418.2353	115270.2608	120342.4896	125644.9763	131188.2416
79487.9756	82721.23487	86094.99161	89615.36548	93288.75241	97121.8368
60202.5408	62428.45758	64747.15316	67162.45248	69678.3508	72299.02086
46605.74537	48132.96137	49721.63056	51374.1291	53092.94	54880.65747
37266.55955	38318.93874	39412.91951	40550.00818	41731.78173	42959.89037
31006.98628	31745.50847	32513.84798	33313.03254	34144.13996	35008.29999
27125.70627	27678.7259	28255.7626	28857.61179	29485.10735	30139.1232
25697.02597	26188.45349	26702.31079	27239.31597	27800.22208	28385.81867

53	54	55	56	57	58
G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)
240259.5469	252127.5078	264581.7035	277651.0918	291366.0611	305758.5007
183675.1998	192285.8688	201304.7787	210751.3649	220645.9921	231009.9994
136983.2938	143041.6508	149375.3646	155997.0454	162919.8879	170157.6985
101121.6044	105295.3559	109650.7208	114195.6722	118938.5428	123888.0402
75028.82045	77872.30037	80834.21272	83919.51967	87133.40258	90481.27165
56739.99138	58673.77202	60684.95503	62776.62669	64952.00938	67214.46735
44236.06036	45562.09701	46939.88769	48371.40517	49858.71105	51403.95937
35906.69622	36840.56811	37811.21309	38819.98884	39868.31561	40957.67874
30820.57496	31530.42162	32269.66731	33039.36319	33840.60936	34674.55689
28996.93338	29634.43359	30299.22814	30992.26909	31714.55353	32467.12554

59	60	61
G* (Pa)	G* (Pa)	G* (Pa)
320861.8753	336711.3024	353343.6345
241865.7467	253236.6636	265147.3012
177724.9235	185636.6793	193908.7835
129053.2647	134443.7267	140069.3653
93968.77588	97601.81371	101386.544
69567.51277	72014.81211	74560.19272
53009.40039	54677.38465	56410.36708
42089.63123	43265.79656	44487.8715
35542.40997	36445.42809	37384.92839
33251.07813	34067.55534	34917.75439