

**CONSIDERACIONES PARA LA PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA OXIDACIÓN DE  
CARPETAS ASFÁLTICAS EN PAVIMENTOS**

DEISY ALEXANDRA BALLÉN RINCÓN



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
INFRAESTRUCTURA VIAL  
BOGOTÁ, D.C.  
2013

**PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA OXIDACIÓN DE  
CARPETAS ASFÁLTICAS EN PAVIMENTOS**

DEISY ALEXANDRA BALLÉN RINCÓN

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL  
ÉNFASIS EN INFRAESTRUCTURA VIAL

ASESOR:

SILVIA CARO SPINEL



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
INFRAESTRUCTURA VIAL  
BOGOTÁ, D.C.  
2013

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	5
2. OBJETIVOS .....	6
1.1 General .....	6
1.2 Específicos.....	6
3. DEFINICIÓN DEL ASFALTO .....	7
4. PROCESO QUÍMICO DE OXIDACIÓN .....	8
5. MODELOS TÍPICOS DE OXIDACIÓN .....	10
5.1 Modelo químico de la oxidación del asfalto .....	10
5.2 Modelo Global Aging System .....	12
5.3 Modelo Fonseca y Witczak (Apéndice Guide for Mechanistic-Empirical Design, 2004) 15	
6. NORMATIVA DE OXIDACIÓN DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS .....	16
6.1 Normas En Colombia .....	16
6.2 Normas a nivel internacional .....	17
7. OXIDACIÓN DEL ASFALTO POR ETAPAS.....	19
7.1 Etapa De Producción .....	19
7.2 Etapa de Construcción.....	20
7.3 Etapa de Servicio.....	21
8. PRÁCTICAS PARA LA PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA OXIDACIÓN DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO POR ETAPAS .....	23
8.1 Etapa de Diseño.....	23
8.2 Etapa de Producción .....	23
8.3 Etapa de Construcción .....	26
8.4 Etapa de Servicio .....	27
9. CONCLUSIONES .....	29
10. RECOMENDACIONES .....	31
11. BIBLIOGRAFÍA .....	33

12. ANEXOS .....	35
ANEXO 1.1 Encuesta a Constructores.....	36
ANEXO 1.2 Encuesta a Diseñadores .....	38
ANEXO 1.3 Encuesta a Productores .....	40

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Valores recomendados de código. Fuente: Guide for Mechanistic-Empirical Design (2004) .....	13
---	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tanque de asfalto para..... completar .....	24
---	----

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los profesores de la Universidad de los Andes por los conocimientos que me transmitieron durante el transcurso de la Maestría, gracias a ellos desarrolle habilidades técnicas que me permitieron madurar satisfactoriamente el presente proyecto. En especial agradezco a mi asesora, la profesora Silvia Caro Spinel, quien depositó en mí su confianza y credibilidad.

Por otro lado, correspondo al apoyo de mi familia, mis padres y hermanos, quienes siempre creyeron en mis capacidades como ser humano y como profesional.

## RESUMEN

Las mezclas asfálticas son utilizadas en grandes proporciones para la construcción de infraestructura vial en Colombia y a nivel mundial. Esta situación hace necesario el estudio y mejoramiento de las mismas para garantizar un desempeño favorable durante su etapa de servicio. El presente proyecto se enfoca en el estudio del envejecimiento producido por la oxidación del asfalto, el cual es en uno de los fenómenos que afecta el desempeño óptimo de las carpetas asfálticas.

Se presume que dicho envejecimiento se intensifica en función de las prácticas que se ejecutan en las diferentes etapas del proceso de elaboración de las vías en asfalto como son el diseño, la producción, construcción y período de servicio. En cada una de dichas etapas se ven involucrados factores como el diseño de la mezcla y factores externos como la temperatura, la radiación ultravioleta, la presión atmosférica, la humedad, entre otros, que colaboran en la evolución del envejecimiento.

Se detecta que las etapas en las que se presenta mayor deterioro de las mezclas asfálticas corresponden a la etapa de producción durante el proceso de mezclado y en la etapa de construcción en las labores de extensión y compactación.

Una conclusión principal de este trabajo es que no existe una normativa clara en Colombia ni en otros lugares que permita controlar o prevenir la oxidación de pavimentos asfálticos. En el caso colombiano la mayor causa para la inexistencia de especificaciones sobre el tema es el desconocimiento de éste fenómeno en la industria (diseñadores, productores y constructores).

## ABSTRACT

Asphalt mixes are used in large quantities for the construction of road infrastructure in Colombia and worldwide. This condition makes it necessary their study and improvement in order to guarantee a favorable performance during their service life. This project focusses on aging phenomena produced by asphalt oxidation, which is one of main factors impacting the optimal performance of asphalt road courses.

It is assumed that such aging is intensified by various practices in the different stages of building asphalt roads such as design, production, construction and service life. In each one of these stages there are factors such as the mix design and other external factors such as temperature, ultra violet radiation, atmospheric pressure, humidity among others, that promote aging.

It is observed that the stages in which the greatest deterioration occurs in asphalt mixes include the production of, the mixture, and the extension and compaction of the material during the construction of the pavement. A main conclusion of this work is that there are no clear guidelines or specifications in Colombia or in other countries to control or prevent the oxidation of asphalt pavements. In Colombia, the most significant reason for this to happened is the lack of knowledge about this phenomena in the industry (designers, producers and contractors).

## 1. INTRODUCCIÓN

Las carpetas asfálticas o capas superficiales de pavimentos construidas empleando mezcla asfáltica se emplean en grandes proporciones para la construcción de infraestructura vial en el país y a nivel mundial. Por esta razón es de vital importancia estudiar los fenómenos relacionados con su desempeño en el corto y largo plazo.

Dentro de este contexto, uno de los aspectos que afecta el desempeño óptimo de las carpetas asfálticas es el envejecimiento producido por la oxidación del asfalto. Dicho envejecimiento se intensifica en función de las prácticas que se ejecutan en las diferentes etapas del proceso de elaboración de las vías en asfalto como son el diseño, la producción, construcción y período de servicio.

Existen diversos factores ambientales como la temperatura, la humedad, el oxígeno disponible en la atmósfera y la humedad que se genera después de la construcción del pavimento asfáltico que se relacionan y favorecen la condición de envejecimiento oxidativo. Debido a estos factores, la porción superficial de la estructura es la que se ve mayormente afectada por éste fenómeno debido a que se encuentra en contacto directo y permanente con el oxígeno presente en la atmósfera. Adicionalmente, los vacíos presentes en la carpeta sirven como conectores para el paso del oxígeno hacia la parte inferior de la estructura, pero a medida que aumenta la profundidad la oxidación se presenta en menor magnitud.

Para obtener resultados favorables durante la etapa de servicio de las carpetas asfálticas y la disminución de costos de mantenimiento y rehabilitación, se busca identificar y analizar las etapas en las cuales es posible mitigar el proceso de oxidación y tener presente la normativa aplicable para tal fin.

Es conocido a grandes rasgos, que en la etapa de producción durante el proceso de mezclado y en la etapa de construcción en las labores de extensión y compactación, son los momentos en los cuales se presenta la mayor proporción de oxidación de la mezcla asfáltica. Por lo tanto, es importante determinar las alternativas que disminuyan las posibilidades de deterioro de las mezclas asfálticas provocadas en dichos procesos.

El presente proyecto pretende indagar acerca de la posición actual en Colombia de los gremios involucrados con la construcción de carpetas asfálticas con respecto al conocimiento del fenómeno de oxidación, las normas y especificaciones que se utilizan para evitar su propagación y el planteamiento de soluciones para mitigar este tipo de deterioro.

## 2. OBJETIVOS

### 1.1 General

- Identificar y proponer alternativas que permitan prevenir y controlar la oxidación de las carpetas asfálticas en Colombia, en las diferentes etapas del proceso que se requiere para su elaboración.

### 1.2 Específicos

- Describir el fenómeno de oxidación, su cinética y proceso químico, para determinar las variables que lo producen.
- Identificar las etapas en las cuales se presentan y desarrollan en mayor magnitud el envejecimiento por oxidación, para poder presentar alternativas que permitan mejorar el desempeño de los pavimentos asfálticos en Colombia a lo largo de su vida útil.
- Indagar a diseñadores, productores y constructores acerca de las prácticas empleadas para mitigar el fenómeno de oxidación.



### 3. DEFINICIÓN DEL ASFALTO

El Asfalto es un material de color café oscuro a negro el cual puede ser obtenido de fuentes naturales o como resultado de la destilación del petróleo . Las fuentes naturales de asfalto más importantes del mundo son: El lago Guanoco en el estado de Sucre en Venezuela (Martínez 1976), La Brea en Trinidad y Tobago, Rancho La Brea (Los Ángeles), McKittrick Tar Pits (McKittrick) y Carpintería Tar Pits (Carpintería), localizados en el estado de California, en Estados Unidos (Electric Universe Geology 2010).

El asfalto que resulta del proceso de la destilación del petróleo compuesto por hidrocarburos pesados tiene un comportamiento viscoelástico en función de la temperatura y de la velocidad de aplicación de carga al material. En general, el material será más viscoso a menor temperatura o a mayor velocidad de aplicación de carga, y viceversa.

Es importante mencionar que las propiedades del material varían su composición química dependiendo de su fuente de origen. Típicamente el asfalto se compone de los siguientes elementos químicos listados en orden de magnitud del contenido presente en el material (referencia acá): Carbono (C) (88-80%), Hidrógeno (H) (8-12%), Nitrógeno (N) (0-2%), Sulfuro (S) (0,2%), Oxígeno (O) (0-2%), Vanadio (V), Hierro (Fe), Níquel (Ni) entre otros.

A nivel mundial entre las refinerías privadas más importantes se encuentran Exxon Mobil (EE.UU.), British Petroleum o BP (Reino Unido) y Royal Dutch Shell (Holanda), Total (Francia), ChevronTexaco (EE.UU.) y ConocoPhillips (EE.UU.) Por su parte, las petroleras administradas por gobiernos más destacadas son PDVSA (Venezuela), Saudi Aramco (Arabia Saudita), YPF (Argentina), Petróleos Mexicanos (México), Gazprom (Rusia), NIOC (Irán), Petrobras (Brasil), ECOPEPETROL (Colombia), Petronas (Malaysia), PetroChina (China) y Ente Nazionale Idrocarburi (Italia).

En Colombia, ECOPEPETROL es el encargado de la producción del asfalto y tiene tres refinerías localizadas en Apiay, Cartagena y Barrancabermeja. ECOPEPETROL indica que los principales compradores de asfalto a nivel nacional quienes adquieren el 98% del producto son Manufacturas y Servicios Industriales (MPI), Transportes HQ, Shell Colombia e Incoasfaltos. (ECOPEPETROL 2010)

El asfalto es un material empleado en grandes proporciones lo cual se visualiza en que el 96% de la infraestructura vial de Estados Unidos y el 70% de la red vial nacional de Colombiana son de asfalto (ECOPEPETROL 2003; NCAT 1999).

## 4. PROCESO QUÍMICO DE OXIDACIÓN

Al presentarse un contacto directo entre el oxígeno y las mezclas asfálticas de los pavimentos se inicia un proceso químico de naturaleza orgánica denominado *oxidación*, puesto que el oxígeno reacciona con las cadenas de carbohidratos que componen y caracterizan la composición molecular del asfalto.

Existen diversos factores responsables de la oxidación del asfalto. Algunos de ellos son propios de la mezcla como el asfalto, los agregados y los vacíos. Entre los externos se encuentran la temperatura, la radiación ultravioleta, la presión atmosférica, la humedad, entre otros (Traxler 1963), (Chakraborty 1996).

Uno de los más importantes es el agua retenida en la superficie de las vías, debido a las deficiencias del drenaje, el cual es un ejemplo práctico que permite imaginar la forma en que el oxígeno entra en contacto directo con el asfalto. El oxígeno contenido en el agua hace que se pierda la adherencia entre los agregados y el ligante asfáltico además de generar una reacción química en la cual oxígeno penetra con mayor facilidad por los vacíos intercomunicados de las mezclas. En esta instancia, los carbohidratos contenidos en el asfalto reaccionan (aire-agua) generando nuevos y diversos grupos moleculares, principalmente el grupo carbonilo, los cuales contribuyen al aumento de la viscosidad del asfalto (Huh y Robertson, 1996)

Desde el punto de vista de la Industria de mezcla en caliente, como resultado de las investigaciones realizadas por los ingenieros de ASTEC (Empresa Estadounidense que produce y comercializa plantas de asfalto para mezclas en caliente) se han obtenido las siguientes conclusiones (referencia al estudio acá en el formato requerido):

- a) La reacción química que se produce cuando el asfalto entra en contacto con el oxígeno ocurre a cualquier temperatura.
- b) La oxidación es muy sensible a la temperatura, de tal forma que la reacción se duplica a 149°C y es cuatro veces más rápida a 163°C comparada con la que se produce a 135°C. Es decir que el proceso de oxidación se acelera en gran magnitud a medida en que aumenta la temperatura (i.e., cinética de la oxidación).
- c) Teniendo en cuenta el estado de la materia del oxígeno el cual se comporta como un gas y el estado líquido del asfalto cuando se va a mezclar, se ha determinado que entre mayor sea la superficie del asfalto expuesta al aire y el tiempo de duración del contacto entre el oxígeno y el asfalto, será mayor la magnitud de la reacción de oxidación, esto conduce a entender que estas dos circunstancias se relacionan de forma directamente proporcional.
- d) Con la radiación solar y cuando en la matriz del asfalto se encuentran partículas metálicas que no son elementos típicos del mismo, se ve afectada la tasa de la reacción química, contribuyendo a la aceleración del proceso de deterioro del material.

El proceso químico de oxidación cambia la composición química del asfalto, con lo cual se produce un cambio en las propiedades físicas y mecánicas del ligante provocando que la mezcla se endurezca y sea más frágil, disminuyendo así los niveles de penetración y por consecuencia reduciendo la vida útil de los pavimentos.

Para conocer más a fondo el comportamiento de los elementos químicos que conforman el asfalto durante el proceso de oxidación, se plantean modelos típicos que involucran los componentes más representativos y el efecto que se producen finalmente en las mezclas asfálticas, como lo es la variación de la viscosidad.

## 5. MODELOS TÍPICOS DE OXIDACIÓN

Los asfaltos se encuentran compuestos por cuatro componentes químicos principales: 1) asfaltenos, 2) saturados, 3) aromáticos, y 4) resinas. Desde el punto de vista químico de oxidación del asfalto, el oxígeno afecta directamente al grupo de asfaltenos. A través de varias investigaciones se ha determinado que los factores con mayor influencia en cuanto a oxidación son la presión de oxígeno y la temperatura. A continuación se describen algunos modelos teóricos de oxidación de acuerdo a las investigaciones realizadas por Domke et al. (2001) en su artículo “Effect of richardOxygen Pressure on Asphalt Oxidation Kinetics” y se enuncian las ecuaciones planteadas en la investigación de Parada et al. (2005) de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia en el trabajo titulado “Estudio del envejecimiento de mezclas asfálticas por oxidación”.

### 5.1 Modelo químico de la oxidación del asfalto

Teniendo como base la ecuación de Arrhenius se crea un modelo cinético teniendo como parámetros la presión, el tiempo, la temperatura y la composición química. Puesto que la mejor manera de explicar la formación de oxidación es en función de la creación del grupo carbonilo en el asfalto, se presenta la siguiente ecuación (Parada et al. 2005):

$$\gamma_{CA} = AP^{\alpha} e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)} \quad (1)$$

En donde:

$\gamma_{CA}$ : Velocidad de reacción del Grupo Carbonilo

A: Constante de Arrhenius o factor de frecuencia. Depende de la composición química del asfalto, se relaciona en forma directamente proporcional con la velocidad de colisión entre las moléculas de oxígeno y asfalto.

P = Presión Atmosférica

$\alpha$  = Orden de reacción

R= Constante universal de los gases

T =Temperatura Absoluta de envejecimiento

E= Energía de activación de la reacción, la cual depende de la composición química del asfalto (Parada et al. 2005).

Para determinar la cantidad de carbonilos que resultan de esta reacción química en las mezclas asfálticas se presenta la siguiente ecuación (Parada et al. 2005):

$$CA = CA_0 + \gamma_{CA}t \quad (2)$$

En donde:

CA: Cantidad del grupo carbonilo

$CA_0$ : Cantidad del grupo Carbonilo en  $t=0$

$\gamma_{CA}$  : Velocidad de formación del grupo carbonilo

t : Tiempo transcurrido

Finalmente, el cálculo de la viscosidad del material a medida que ocurre la oxidación se realiza de la siguiente forma (Parada et al. 2005):

$$n = me^{[(CA+AP^\alpha e^{(-E/RT)t})]HS} \quad (3)$$

En esta ecuación se relacionan propiedades físicas como la viscosidad y la formación del grupo carbonilo.

En donde:

m: Viscosidad inicial del ligante

HS = Coeficiente de susceptibilidad de la mezcla. Es un valor único para cada asfalto. Es la pendiente de la gráfica  $\ln G * Vs.$  Cantidad de Carbonilos, se interpreta de tal forma que entre mayor sea el valor del coeficiente tenderá a rigidizarse con mayor facilidad.

La variación de la viscosidad se ve afectada por factores de la mezcla como la temperatura, el tiempo y la presión.

Coe y Cui (2013) presentan un modelo en el cual se relaciona el cálculo de la energía de activación de flujo, teniendo en cuenta el efecto sobre esta energía por causa de la oxidación del asfalto (Coe y Cui 2003):

$$n = Ae^{\frac{E_f}{RT}} \quad (4)$$

En donde:

n: Viscosidad del material

T: Temperatura en grados Kelvin

A: Factor preexponencial

E: Energía de activación del flujo

R: Constante universal de los gases

Reorganizando, para obtener la energía de activación en función de la viscosidad rotacional:

$$\ln(n) = \frac{E_f}{RT} + \ln(A) \quad (5)$$

Las ecuaciones planteadas anteriormente permiten tener una idea acerca de la velocidad en que se producen los cambios en la composición física y química de las mezclas asfálticas por causa de la oxidación (Coe y Cui, 2003).

## 5.2 Modelo Global Aging System

De acuerdo con la metodología mecánico-empírica desarrollada en Estados Unidos, denominada comúnmente MEDPG 2002-2008 (GMED 2004), la etapa de diseño envejecimiento en general se involucra en el cálculo del módulo dinámico mediante el Global Aging System, el cual permite predecir la viscosidad del asfalto en cualquier instante de tiempo y para cualquier profundidad de la capa que conforma la estructura de pavimento. Este sistema, que hace parte integral del software de esta guía de Diseño, presenta cuatro modelos en los que se analiza el cambio de la viscosidad en los procesos de mezcla y compactación, además de los cambios generados en el largo plazo (GMED 2004). Estos modelos se describen a continuación:

- **Original para mezclar:** Es un modelo desarrollado para el corto plazo aplicable a las etapas de mezcla y compactación.
- **Superficie de envejecimiento:** Pronostica la viscosidad del asfalto en la parte superficial luego de un rango de tiempo determinado.
- **Ajuste de vacío de aire:** Permite ajustar el modelo de superficie de envejecimiento para diferentes contenidos de vacíos en las mezclas.

- **Viscosidad a profundidad:** Permite ajustar el modelo de la superficie del pavimento para considerar el impacto del envejecimiento en diferentes profundidades en las mezclas.

A continuación se describen los modelos:

$$\log \log(n_{t=0}) = a_0 + a_1 \log \log(n_{orig}) \quad (6)$$

$$a_0 = 0.054405 + 0.004082 * \text{código} \quad (7)$$

$$a_1 = 0.972035 + 0.010886 * \text{código} \quad (8)$$

$n_{t=0}$  = Mezcla / baja viscosidad

$n_{orig}$  = Viscosidad original

Código = razón de endurecimiento (HR) de la división del  $\log \log [\eta_{t=0} \text{ (RTFOT)}]$  entre  $\log \log (\eta_{orig})$ ; igual a 0 como promedio. Los posibles valores que se deben emplear se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 Valores recomendados de código. Fuente: Guide for Mechanistic-Empirical Design (2004)

Resistencia al endurecimiento mezclado / colocación	Valores esperados de la relación de endurecimiento	Valor del código
Excelente a bueno	$HR \leq 1.030$	-1
Promedio	$1.030 \leq HR \leq 1.075$	0
Regular	$1.075 \leq HR \leq 1.100$	1
Pobre	$HR > 1.100$	2

A continuación se enuncia el modelo de superficie de envejecimiento:

$$\log \log(n_{aged}) = \frac{\log \log(n_{t=0}) + At}{1 + Bt} \quad (9)$$

$$A = -0.004166 + 1.41213(C) + (C) \log(\text{Maat}) + (D) \log \log \eta_{t=0}$$

$$B = 0.197725 + 0.068384 \log(C)$$

$$C = 10^{274.4946 - 193.831 \log(T_R) + 33.9366 \log(T_R)^2}$$

$$D = -14.5521 + 10.47662 \log (T_R) - 1.88161 \log (T_R)^2$$

$\eta$  envejecimiento = viscosidad envejecimiento

$\eta_{t=0}$  = viscosidad luego del mezclado/colocación

Maat = temperatura media anual del aire, °F.

$T_R$  = temperatura en Rankine.

t = tiempo en meses

El factor de ajuste de los vacíos se aplica a partir del modelo de superficie de envejecimiento así:

$$\log \log (n_{envejecido})' = F_v \log \log (n_{envejecido}) \quad (10)$$

$$F_v = \frac{1 + 1.0367 * 10^{-4}(VA)(t)}{1 + 6.1798 * 10^{-4}(t)}$$

$$VA = \frac{VA_{orig} + 0.011(t) - 2}{1 + 4.24 * 10^{-4}(t)(Maat) + 1.169 * 10^{-3} \left( \frac{t}{n_{orig,77}} \right)} + 2 \quad (11)$$

En donde:

$VA_{orig}$  = Volumen de aire inicial

t = tiempo en meses

Maat = temperatura media anual del aire, °F.

$n_{orig,77}$  = viscosidad del asfalto inicial a 77°F, MPoise

Por último, se presenta el modelo mediante el cual se calcula la viscosidad en función de la profundidad a partir de modelo de mezcla y el de superficie:

$$n_{t,z} = \frac{n_t(4+E) - E(n_{t=0})(1-4z)}{4(1+Ez)} \quad (12)$$

En donde:

$\eta_{t,z}$  = Viscosidad endurecida en el tiempo t y profundidad

$\eta_t$  = Viscosidad superficie endurecida, MPoise

z = Profundidad en pulgadas

$$E = 23.83e^{(-0.0308 \text{ Maat})}$$

Maat = temperatura media anual del aire, °F.



### 5.3 Modelo Fonseca y Witczak (Apéndice Guide for Mechanistic-Empirical Desing, 2004)

El modelo recientemente desarrollado por Fonseca y Witczak para el cálculo del Módulo resiliente, se relaciona con el descrito anteriormente e involucra el envejecimiento de las mezclas asfálticas en el corto y largo plazo. A continuación se describe el modelo y las variables involucradas:

$$\log E = -0.261 + 0.008225 \cdot \rho_{200} - 0.00000101 \cdot (\rho_{200})^2 + 0.00196 \cdot \rho_4 - 0.03157 \cdot Va - 0.415 \cdot \frac{V_{beff}}{V_{beff} + Va} + \frac{1.87 + 0.002808 \cdot \rho_4 + 0.0000404 \cdot \rho_{38} - 0.0001786 \cdot (\rho_{38})^2 + 0.0164 \cdot \rho_{34}}{1 + e^{(-0.716 \cdot \log(f) - 0.7425 \cdot \log(n))}} \quad (13)$$

En donde:

E = Módulo dinámico de la mezcla asfáltica,  $10^5 psi$

n = Viscosidad del asfalto  $10^6 psi$ , a cualquier temperatura y grado de envejecimiento

f = Frecuencia en Hz

Va = % de aire en la mezcla por volumen

Vbeff = % Contenido de asfalto efectivo, por volumen

$\rho_{34}$  = % Retenido en el tamiz de 3/4 de pulgada, en peso total (acumulado)

$\rho_{38}$  = % Retenido en el tamiz de 3/8 de pulgada, en peso total (acumulado)

$\rho_4$  = % Retenido en el tamiz N° 4, en peso total (acumulado)

$\rho_{200}$  = % que pasa en tamiz No. 200, en peso agregado total

La característica interesante de este modelo para el interés de este trabajo radica en que en éste la determinación de la viscosidad es una propiedad que permite evaluar la oxidación, indicando que a medida que transcurre el tiempo la mezcla se rigidiza y, en consecuencia, disminuye su viscosidad.

## 6. NORMATIVA DE OXIDACIÓN DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Para conocer acerca de la normativa que regula el control o prevención de la oxidación, se realizó una investigación basada en entrevistas a diseñadores, productores y constructores de mezclas asfálticas, además de acudir a artículos y normas nacionales e internacionales y diversas investigaciones documentadas en las cuales se menciona el fenómeno de la oxidación y sus consecuencias.

### 6.1 Normas En Colombia

De acuerdo a la investigación realizada se deduce que el tema de la oxidación del asfalto en Colombia no es considerado como un factor importante en ninguna de las etapas de vida útil del material. Por esta razón, no se encuentran normas, manuales o algún tipo de reglamentación que determine el manejo específico hacia este fenómeno.

La entidad que regula la construcción y operación de pavimentos asfálticos en Colombia es el INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Dentro de los documentos técnicos del INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS en Colombia no se encuentra ninguna referencia relacionada directamente con el fenómeno de oxidación del pavimento asfáltico ni como normas para los contratistas, ni como control desde la figura de la interventoría.

La única norma que se encuentra en la documentación del INVIAS con relación a la oxidación es la I.N.V E-717-07, Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro Rotacional, (Instituto Nacional de Vías 2007). A pesar de que la viscosidad es una de las propiedades que tiene mayor representación del fenómeno de la oxidación, en dicha norma no se hace referencia explícita respecto a dicho fenómeno.

Por otro lado, la normativa colombiana tiene especificado el “método de envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos utilizando cámara de envejecimiento a presión (PAV)”, mediante el ensayo I.N.V E-751-07. (Instituto Nacional de Vías, 2007). Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para producir el envejecimiento por oxidación acelerado de asfaltos utilizando aire presurizado y altas temperaturas. El uso del método radica básicamente en simular el envejecimiento durante una vida útil aproximada de 5 a 10 años para posteriormente estimar las propiedades físicas o químicas del asfalto. Este ensayo, que fue desarrollado en Norteamérica, es usado para modificar las condiciones del asfalto a un estado envejecido como el mencionado, con el objetivo de caracterizar los cambios en las

Otra entidad en Colombia que se encarga de regular las normas aplicables a las mezclas asfálticas en el entorno local de la ciudad de Bogotá es el IDU (Instituto de Desarrollo Urbano). Una de las más normativas de esta agencia más relacionadas con el tema en estudio es la especificación IDU - ET - 2005. Sección 510 - 05. Mezclas Asfálticas en Caliente Densas, Semidensas y Gruesas. (IDU, 2005). La mayoría de las especificaciones del IDU se basan o tienen como base las especificaciones del Instituto Nacional de Vías.

Al revisar la documentación existente acerca de la oxidación del asfalto, se encuentra que no hay una normativa clara que regule este fenómeno, además al realizar encuestas a tres diseñadores de pavimentos en Colombia se observa que el denominador común es hacer caso omiso a dicho fenómeno durante la etapa de diseño, puesto que no se emplea ningún parámetro que conduzca a una prevención o control del mismo, en Colombia, muy pocos diseños se evalúan con estas metodologías de diseño, de acuerdo a lo indicado por los diseñadores que se entrevistaron para indagar acerca del fenómeno de oxidación.

## 6.2 Normas a nivel internacional

Es importante reconocer que a nivel mundial se tiene en cuenta la presencia del fenómeno de la oxidación de los pavimentos en el proceso de diseño como lo plantea la Guide for Mechanistic-Empirical Design. A continuación se describen las consideraciones relevantes que se evalúan en la etapa de diseño de acuerdo a esta guía.

### - Guía de Diseño Empírico Mecanicista (Estados Unidos)

La Guía de Diseño Empírico Mecanicista del 2004 en el capítulo de “Caracterización de los Materiales” indica que la oxidación afecta propiedades físicas y químicas de las capas asfálticas. En la gran mayoría de los casos, en el largo plazo, produce un aumento general en la rigidez provocando que se presenten fracturas debidas a las cargas bajo las cuales son sometidas las capas asfálticas, además de los elementos ambientales a los que se encuentren expuestas.

La metodología MPDEG incluye variables que permiten determinar el deterioro que sufrirá el pavimento asfáltico ante condiciones climáticas y por oxidación.

Un parámetro de entrada relevante para el diseño de capas nuevas o de reconstrucción es el módulo dinámico ( $E^*$ ). Esta propiedad mecánica se determina que la elaboración de las curvas maestras para la mezcla asfáltica las cuales definen con precisión la dependencia del factor tiempo y el factor temperatura están incluyendo directamente el fenómeno de la oxidación debido a que expresa el comportamiento visco elástico del material e identifica el aumento del módulo a través del tiempo, lo cual indica el avance de la oxidación del asfalto en el tiempo.

Por su parte, en la metodología de clasificación de asfaltos desarrollada en la década de 1990 en Norteamérica y denominada SUPERPAVE, el envejecimiento es tenido en cuenta en la medición de las propiedades físicas del asfalto cuando el material ha sido oxidado en las diferentes etapas de su vida útil (SUPERPAVE 2005). En este contexto, esta metodología de clasificación de asfaltos simula los tres estados críticos del asfalto a lo largo de su etapa de servicio mediante ensayos de laboratorio, describiendo los estados de la siguiente manera:

- 1- El primer estado se genera durante el transporte, almacenamiento y manejo del asfalto.
- 2- Este segundo estado es en el cual se genera envejecimiento oxidativo, luego de la fabricación, extensión y compactación de la mezcla asfáltica. Para simular este segundo estado, se utiliza el horno rotatorio de película delgada RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test).
- 3- El último estado es cuando se produce envejecimiento de la mezcla asfáltica luego de permanecer en servicio por un largo período. El ensayo PAV (Pressure Aging Vessel), permite oxidar de forma acelerada la mezcla, generando el tercer estado, de tal forma que se obtienen condiciones aproximadas a las que ocurren durante la etapa de servicio del pavimento.

Con las condiciones descritas anteriormente, la metodología evalúa el desempeño esperado del asfalto en campo involucrando condiciones reales de operación de los pavimentos, teniendo en cuenta el fenómeno de envejecimiento por oxidación.

La metodología empleada en USA hasta comienzos de los años 2000 (AASHTO 1993), no incluía consideraciones directas de la oxidación del asfalto. En la última metodología desarrollada, sin embargo, se reconoció el rol de la oxidación en el desempeño del pavimento.

## 7. OXIDACIÓN DEL ASFALTO POR ETAPAS

La oxidación en mezclas asfálticas ocurre en diferentes magnitudes y velocidades dependiendo de las diferentes etapas a las que son sometidas las mezclas: producción, construcción y mantenimiento durante su vida útil. A continuación se describen cada una de estas etapas resaltando los aspectos que se relacionan directamente con el fenómeno de oxidación.

### 7.1 Etapa De Producción

Los ingenieros de ASCTEC (Empresa Estadounidense que produce y comercializa plantas de asfalto para mezclas en caliente) determinan que durante la etapa de producción el momento en el que se realiza la manipulación del asfalto en estado líquido y se produce oxidación se denomina “coquización”, lo cual puede ser un aspecto grave o de fácil solución (referencia de donde obtuviste esto y de donde vas a obtener todo lo demás).

El fenómeno de coquización se genera cuando dentro de los tanques en los cuales se calienta el asfalto se permite que el nivel descienda y quede por debajo de la superficie calentadora de los elementos térmicos del tanque denominados serpentines. Estos serpentines se encuentran recubiertos por asfalto, el cual, al quedar en contacto directo con el aire se oxida y lo hace de forma rápida debido a la temperatura a la que se encuentra el asfalto. Los serpentines mantienen una temperatura más elevada compada con la del asfalto líquido que se encuentra dentro del tanque y así se forma una masa endurecida llamada coque.

A medida que varía el nivel del asfalto líquido dentro del tanque se va adhiriendo una capa adicional de asfalto provocando que el grosor de la película de coque aumente. Infortunadamente el coque posee propiedades aislantes, comparativamente puede decirse que una capa de coque de 3mm de espesor se asemeja a 5cm de aislante de lana de vidrio.

La formación de coque ocurre en todos los elementos calentadores que se ven involucrados en el proceso de producción y que en condiciones normales deberían permanecer sumergidos en el asfalto para evitar en contacto con el oxígeno. Las partículas de coque que se forman en el proceso descrito anteriormente se mezclan con al asfalto líquido desencadenando una serie de inconvenientes provocando que el material pierda sus propiedades químicas.

Por otro lado, en la etapa de mezclado específicamente en una planta dosificadora, el asfalto es rociado en el mezclador recubriendo con una película delgada de aproximadamente 10 micrones de espesor las partículas calientes de agregado que se encuentran en el interior del mismo.

Para tener un orden de magnitud de la superficie que recubre con asfalto los agregados, analizando una mezcla caliente con contenido de 6% de asfalto puede pensarse que el área recubierta corresponde a 5.330 m<sup>2</sup>, debido al gran tamaño de la superficie que queda expuesta, la oxidación se genera con gran rapidez. En el mezclador la aceleración de la oxidación es mucho mayor que la que se presenta en un tanque, puesto que en el tanque la superficie en contacto con el aire es menor que la generada en el mezclador en donde el volumen de asfalto expuesto al oxígeno se representa con un factor de más de mil.

En términos generales, se puede estimar que la penetración disminuye de grado de desempeño 86 a 65 (1/10 mm) relativamente en el proceso de mezclado, tomando como referencia el caso de Estados Unidos en la parte central la penetración del asfalto típicamente a lo largo de la etapa de mezclado corresponde a un rango entre 85 a 100. El proceso de oxidación no depende ni se detiene solo con el agotamiento del oxígeno presente en la mezcla. Al evaluar una mezcla luego del proceso en la planta, ésta se enfría deteniendo la oxidación y disminuyendo su grado de penetración aproximadamente en 10 puntos. A medida que continúan los pasos para la colocación de la mezcla la penetración continúa disminuyendo. En este sentido, se deben tener en cuenta diversos factores que se ven involucrados en la reducción de la penetración de las mezclas como son la temperatura en cada una de las etapas de fabricación, el tipo de asfalto, el contenido del asfalto en la mezcla y los tiempos para cada fase.

Durante este proceso de mezclado se introduce la mayor cantidad de oxígeno en los vacíos de la mezcla. La única forma en que se elimina este oxígeno es hasta el momento en que este elemento se agota completamente debido a la reacción química que se desencadena al entrar en contacto con el asfalto.

## 7.2 Etapa de Construcción

Típicamente al realizar la colocación del pavimento asfáltico se compacta con una densidad superior que garantice una densidad relacionada con un porcentajes de vacíos entre el 3y 7%. El objeto de la compactación es reducir los vacíos presentes en la mezcla para obtener la densidad requerida por el diseño, así como disminuir la oxidación del asfalto y evitar que la mezcla se deteriore en grandes proporciones. A pesar de que se realice la compactación adecuada cuando se coloca la mezcla, a través del tiempo éste se va deteriorando reaccionando con el oxígeno y acumulando daños de diversa naturaleza. Puesto que la oxidación existe desde que se produce la mezcla, la misma estará asociada a los niveles de fatiga que se van generando.

Debido a que la actividad que se relaciona directamente con la oxidación es la compactación, es necesario que se cumplan con los requerimientos impuestos con la

normativa que regula éstos procesos constructivos según sea el caso de la región o país en que se realice este proceso, con el objetivo de cumplir con la densidad de diseño y controlar el acceso de aire y agua e el material.

También ocurre el fenómeno de oxidación cuando los operadores encargados del control de las mezclas permiten que transcurra demasiado tiempo en el cual la mezcla permanece al interior de una tolva y ésta alcanza niveles de oxidación considerables. La dificultad en este caso es que en estos casos es usual suponer al descargar la mezcla ésta puede fluir si se le ayuda abriendo agujeros con algún elemento como un tubo. La dificultad se enfoca en el hecho de que esta mezcla superficial que se descarga se encuentra coquizada y posee 15 años de edad y un grado de penetración cercano a 10. Es decir, en estas condiciones se genera otra mezcla en la misma tolva con grado de penetración de 30 a 40, la cual fluye con mayor facilidad, pero al ser empleada para la construcción de una vía definitiva, ésta última tendrá una vida útil demasiado corta debido a que tendrá un comportamiento frágil.

Dentro del proceso constructivo de las carpetas asfálticas, la compactación es la labor que genera mayores efectos en la oxidación, debido a los vacíos presentes en las mezclas mediante los cuales se incorpora el oxígeno. El Instituto Nacional de Vías a través de la norma I.N.V E- 450 -07, regula los equipos que se deben emplear y los valores exigidos para la compactación de las mezclas asfálticas. De acuerdo a esta norma, se debe calcular la Dmm: Densidad máxima teórica de la mezcla asfáltica representativa del lote que se controla, determinada mediante la norma de ensayo INV E-735, Gravedad Específica Máxima Teórica (Gmm) y Densidad de Mezclas Asfálticas para Pavimentos. (Instituto Nacional de Vías, 2007). Es importante determinar las temperaturas a las cuales se deben colocar y compactar las mezclas asfálticas de acuerdo a las especificaciones del INVIAS.

### 7.3 Etapa de Servicio

El envejecimiento oxidativo durante la etapa de servicio es provocado por variables de la mezcla asfáltica tales como las proporciones volumétricas, la permeabilidad y las características de los agregados.

El fenómeno de oxidación altera las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, tales como el aumento de la rigidez y disminución de la tenacidad conduciendo a un aumento de la fragilidad y mayor potencial para la formación de grietas durante su período de servicio.

De acuerdo con algunos estudios, las carpetas asfálticas, en un rango de tiempo entre diez y quince años, reducen su grado de penetración en un 20 a 25% del inicial (referencia que soporta esa afirmación). Cuando el pavimento llega a ese estado se torna muy frágil y requiere obras de rehabilitación. A lo largo de su etapa de servicio, el proceso de oxidación debe ser más lento puesto que el ideal es encontrar la opción que permita que sea protegido al contacto directo con el aire.

propiedades del ligante.

Por otro lado, según lo estipulado en el Manual para la inspección visual de Pavimentos Flexibles del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), se indica que uno de los daños generados se visualiza en la superficie mediante fisuras que se relacionan directamente con una falla por fatiga. Una de las fallas más comunes se define como piel de cocodrilo, la cual consiste en la propagación de dichas fisuras hacia la superficie del pavimento, partiendo de la parte inferior de las capas asfálticas por causa de los esfuerzos de tensionamiento bajo los cuales es sometida la estructura debido a las cargas cíclicas que soporta. Comúnmente este tipo de falla se presenta en las zonas de aplicación de carga, pero se ha encontrado que también se producen por efecto de inconvenientes con el drenaje, bajos niveles de compactación o por efecto del tipo de subrasante. La oxidación, al ser un proceso que induce a la rigidización del pavimento asfáltico, colabora en la aceleración del daño del pavimento por fatiga. Las fallas descritas en el Manual para la inspección visual de Pavimentos Flexibles del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) logran visualizarse finalmente durante la etapa de servicio.

En las etapas en que se presenta mayor deterioro por oxidación es durante la producción y la construcción, por esta razón, para el desarrollo del presente proyecto se buscó la forma de entrar en contacto mediante la elaboración de encuestas, con tres empresas productoras de mezclas asfálticas y con cuatro empresas constructoras dedicadas a la ejecución de obras de infraestructura vial en las cuales se utilizan las mezclas asfálticas, con el fin de conocer los procesos que se emplean en la actualidad en Colombia.

Desde el punto de vista de los diseñadores encuestados acerca del tema de la oxidación, se concluye que no existe una normativa clara que regule este fenómeno. Bajo sus conocimientos técnicos la mayoría de ellos señala que la metodología MPDEG incluye variables que permiten determinar el deterioro que sufrirá el pavimento asfáltico ante condiciones climáticas y por oxidación. No obstante en Colombia, muy pocos diseños se realizan siguiendo esta metodología. Por otro lado, la metodología AASHTO 1993 incluye el nivel de servicio dentro de parámetro del índice de serviciabilidad, pero el mismo no está explícitamente asociado a la oxidación.



## 8. PRÁCTICAS PARA LA PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA OXIDACIÓN DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO POR ETAPAS

En el capítulo anterior se describen las etapas de oxidación que afectan el asfalto y la mezcla asfáltica a lo largo de su vida útil, en el presente capítulo se exponen algunas prácticas recomendadas para controlar, retardar y/o prevenir los efectos indeseados que causa la erosión por etapas.

### 8.1 Etapa de Diseño

Desde el punto de vista de diseño, las mezclas densas en caliente son una opción bastante favorable para prevenir la oxidación de los pavimentos, debido a que por su condición de “densas”, se presenta un grado de dificultad mayor para impedir el paso del oxígeno a través de los vacíos, evitando así su deterioro temprano (referencia que soporte esta afirmación? Si esta afirmación es tuya, no necesitas referencia). A pesar de que en este tipo de mezclas los vacíos son menores, al exponer la mezcla al contacto con el oxígeno por ejemplo almacenándola un largo tiempo en una tolva, esta mezcla presenta altos niveles de oxidación.

Algunos estudios han mostrado que el uso de asfaltos modificados es una alternativa que puede mejorar las condiciones de la oxidación de las carpetas asfálticas. En efecto, esto se observó en una investigación que dio como resultado un modelo del envejecimiento oxidativo de asfaltos modificados con caucho (Chipps et al. 2001). En este estudio se realizaron análisis reológicos y pruebas de susceptibilidad al endurecimiento mediante la evaluación de los cambios de viscosidad relacionados con el aumento del grupo carbonilo en el espectro infrarrojo, el cual típicamente se considera un buen indicador para cuantificar el fenómeno de oxidación; ya que se detectaron bajas velocidades de oxidación. Este tipo de modelos permite considerar el uso de los modificadores de asfalto para mejorar la resistencia a la oxidación en los mismos, debido a que químicamente son favorables afectando directamente la disminución de formación del grupo carbonilo, de tal forma que el contacto del aire con el agua proveniente de infiltraciones o la que por defecto contiene el asfalto, no sea mayormente negativa para las carpetas asfálticas.

Así mismo, se ha iniciado también la búsqueda de nuevos modificadores que ayuden a mejorar la durabilidad mediante asfaltos nanocompuestos. Este tipo de asfalto es conocido a nivel mundial pero en Colombia es un tema inexplorado que podría tenerse en cuenta para optimizar la vida útil de los asfaltos en el país (Vargas y Reyes, 2010)

### 8.2 Etapa de Producción

En la etapa de producción, en el proceso de mezclado, para evitar la coquización se recomienda controlar el nivel del asfalto en los tanques para impedir que llegue a niveles

inferiores a los elementos calentadores para que de esta forma no entren en contacto directo con el oxígeno (referencia del trabajo que soporta esta afirmación).

La alternativa óptima que permite este control es que dentro del tanque de asfalto se coloque la línea de aspiración en un nivel superior a los elementos calentadores, como se muestra en la Figura 1.

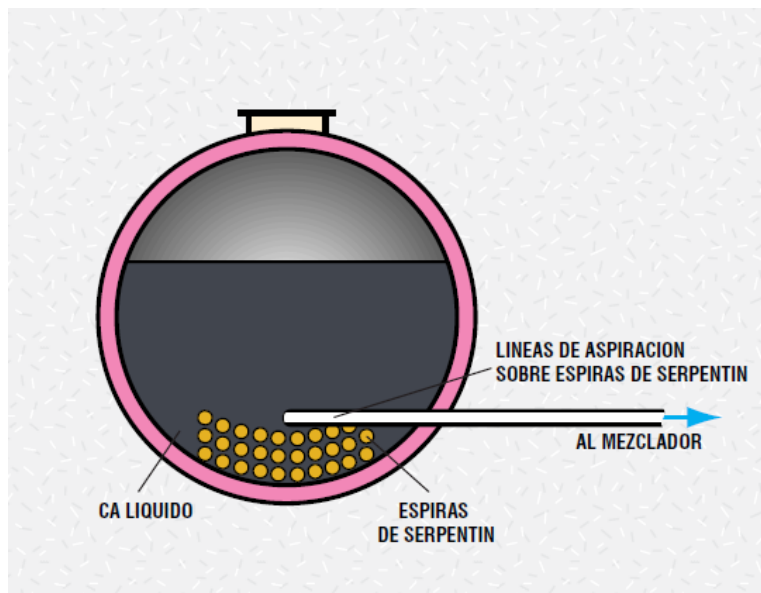


Figura 1. Tanque de asfalto para..... completar

Fuente: Boletín Técnico T-103S. OXIDACIÓN DEL ASFALTO - J. Don Brock, PhD., P.E.. ASTEC

Puesto que en el proceso de mezclado es en el que se generan mayores reacciones químicas de oxidación, también es recomendable disminuir la temperatura lo máximo permitido y conseguir que el tiempo de mezclado sea lo menor permisible, sin perjudicar el proceso como tal.

En las últimas dos décadas, empresas como ABL Internacional S.A. producen plantas de asfalto las cuales mediante el alargamiento de los mezcladores para que no se sobrecalienten y controles electrónicos que regulan y vigilan la temperatura del asfalto se puede controlar la temperatura de la mezcla impidiendo su oxidación.

En este contexto, es importante mencionar que un error en cual incurren los operadores en la actualidad es utilizar las tolvas de compensación para almacenar las mezclas. Esto perjudica enormemente el posterior desempeño de la mezcla debido a que se genera oxidación con mayor rapidez debido al tiempo que transcurre almacenada, la temperatura y el contacto con el oxígeno del aire. Los operadores generalmente suponen que colocar

la mezcla a mayor temperatura dentro de la tolva ayuda a mantenerla adecuadamente lo cual es una práctica inapropiada debido a que los agregados y el asfalto no poseen buena conductividad térmica, colaborando así con el proceso de oxidación (incluir referencia de esta afirmación... Brock 2012?).

De acuerdo a las investigaciones efectuadas por los ingenieros de ASCTEC (Empresa Estadounidense que produce y comercializa plantas de asfalto para mezclas en caliente) la mezcla que se coloca en una tolva a 177°C se oxida ocho veces más rápido que si la misma se coloca a 135°C (Brock 2012). La forma de mitigar el fenómeno de oxidación bajo estas circunstancias es colocar la mezcla en la tolva con la temperatura más baja que sea posible para evitar en gran medida la oxidación, además de controlar el acceso del oxígeno a la tolva a través de fisuras de las paredes mediante sellos especiales.

Dentro del proceso de producción de las mezclas asfálticas, el tiempo en que la mezcla permanece en las tolvas de almacenamiento sufre cambios considerables por efectos de la oxidación. Por esta razón, los ingenieros de ASCTEC han determinado dos alternativas para disminuir tales efectos. Una de las alternativas es utilizar un sistema de gas inerte. Debido a que los puntos críticos de la tolva de almacenamiento son la compuerta de descarga y la abertura superior, con este sistema se busca sellar estas entradas para no el paso de oxígeno al interior del tanque. El sistema consiste en incorporar presión en el tanque por medio de un quemador, el cual trabaja sin oxígeno, de tal forma que se impida el acceso del oxígeno que se encuentra en la atmósfera.

Otra alternativa planteada es el uso de un sello líquido en la compuerta de descarga, este sello (puede ser un aceite o un líquido que no presente evaporación) se incorpora hasta que alcance un nivel mayor al de la abertura superior. El líquido incorporado crea una especie de barrera que impide el paso del oxígeno presente en la atmósfera exterior. Adicionalmente, se puede accionar (? Revisar si esto está bien escrito) un sello mecánico ubicado en la abertura superior que ayuda con el proceso pero no es de vital importancia debido a que en el interior del tanque se genera dióxido de carbono por la reacción entre el oxígeno y la mezcla, el dióxido de carbono es más denso que el aire, por tanto, queda por debajo creando una capa protectora para la mezcla.

Cualquiera de las alternativas descritas permite que la mezcla permanezca en el interior de las tolvas de almacenamiento alrededor de 10 días sin sufrir cambios considerables por efectos de la oxidación.

Según pruebas realizadas por los ingenieros de ASTEC se logró demostrar que la etapa con mayores niveles de oxidación de las mezclas asfálticas es el mezclado y que es posible mantenerlas en una tolva de almacenamiento alrededor de 10 días sin que sufran deterioro por efectos de la oxidación. Por tanto, la secuencia de pasar la mezcla por el mezclador le genera una pérdida de aproximadamente 10 puntos en su grado de penetración, transportarla en un camión presenta otra pérdida de 10 puntos, por lo cual al tomar medidas de penetración en el pavimento se tendrá una pérdida total de 20 puntos. Comparando esta secuencia con el procedimiento de pasar la mezcla por el mezclador,

manteniéndola 10 días en una tolva de almacenamiento utilizando la incorporación de aire y sellos líquidos y finalmente transportarla en un camión, se obtiene que la pérdida en el grado de penetración total medido sobre el pavimento son los mismos 20 puntos.

Tener las precauciones necesarias en las tolvas de almacenamiento garantiza pérdidas insignificantes durante el transporte de la mezcla, debido a que solo se presentará la reacción química en mayores proporciones durante la etapa de mezclado.

El uso de mezclas asfálticas tibias (i.e., mezclas asfálticas con aditivos que permiten el empleo de menores temperaturas de mezclado y compactación) trae grandes beneficios de acuerdo a lo estipulado en el documento *Diseño y Producción de Mezclas Asfálticas Tibias, a Partir de la Mezcla de Asfalto y Aceite Crudo De Palma* (Palacio 2011). Dentro de dichos beneficios el autor destaca la obtención de una menor oxidación en el asfalto debido a los gradientes de temperatura. Otros beneficios que trae el uso de este tipo de mezclas son:

- Facilidad en el proceso de compactación gracias a que se utilizan menos esfuerzos y menor temperatura, lo cual favorece la disminución de la oxidación gracias a que se alcanza la densidad de diseño en menor tiempo haciendo que el proceso sea más práctico obteniendo mezclas de alto desempeño.
- Al mejorar las condiciones de densidad decrece el porcentaje de vacíos contenido en la mezcla, evitando el paso del oxígeno al interior y así disminuyendo los efectos de la oxidación.
- Permite que se transporte la mezcla en trayectos más largos sin que pierdan las características iniciales desde su producción hasta el proceso de colocación, haciendo que se oxide en menor proporción que una mezcla caliente.

Otros beneficios del uso de las mezclas tibias de acuerdo al Departamento de Transporte de Texas es que este tipo de mezclas tienen una mejor resistencia a la fatiga lo cual se relaciona en gran proporción con la disminución de la oxidación de las carpetas asfálticas construidas con mezclas tibias.

### 8.3 Etapa de Construcción

Para obtener resultados favorables en cuanto a oxidación de las carpetas asfálticas, dentro de la etapa de construcción se deben concentrar los esfuerzos en la extensión y compactación. La optimización en los procesos de compactación requiere el uso de equipos apropiados mediante los cuales se cumplan las especificaciones necesarias para mitigar el fenómeno de oxidación. Dentro de estos equipos se presentan los rodillos de alta vibración, compactación oscilatoria, compactación inteligente y la tecnología Smart Drum Technology SDT. (Bolzan 2006)

Los rodillos de alta vibración son adecuados para compactar sin generar irregularidades en la superficie. La compactación oscilatoria destaca la ausencia de olas de impacto, es empleada en Estados Unidos y tiene como valor agregado el hecho de que hace posible

mantener un contacto permanente con la superficie de la carpeta asfáltica generando resultados efectivos, presentando como ventaja que no provoca sobrecompactación ni rotura de partículas de tal forma que la superficie final tendrá excelentes condiciones de servicio. Otra alternativa importante de uso reciente es la compactación inteligente, mediante la cual se involucran sistemas de monitoreo constante de la temperatura y densidad, midiendo la temperatura bajo el rodillo y a su vez verificando las reacciones sobre la superficie que se encuentra en el proceso de densificación. Finalmente, la tecnología Smart Drum Technology SDT para compactación, consiste en una máquina con alta frecuencia y baja amplitud que es muy apropiada para capas delgadas y con baja frecuencia y alta amplitud para capas gruesas o difíciles de colocar.

Un aspecto relevante en todo el proceso constructivo es el entrenamiento de los operarios que se encargan de manejar los equipos y de realizar las labores de extensión y compactación del asfalto. El conocimiento técnico por parte del personal operativo se reflejará en el desempeño de la mezcla asfáltica a lo largo de su vida útil.

Así mismo, es de vital importancia asegurar el cumplimiento de las especificaciones establecidas por las agencias estatales (e.g. INVIAs, IDU), en cuanto a los equipos y prácticas adecuadas para la ejecución de los trabajos.

#### 8.4 Etapa de Servicio

Cuando se habla del desempeño de pavimento en la etapa de servicio se hace referencia al comportamiento de la estructura en el período en el que está siendo utilizada para cumplir el objetivo de soportar cargas. A medida que transcurre el tiempo se presenta la oxidación a largo plazo presentando deterioros que deben ser tratados adecuadamente con labores de mantenimiento y rehabilitación. Desde la perspectiva de los daños generados por el fenómeno de oxidación el pavimento alcanza un aumento en su módulo y se rigidiza, la forma de detectarlo es visualizando el deterioro que se expone en la superficie de las carpetas asfálticas.

En el Capítulo 5 de la Guide for Mechanistic-Empirical Design 2004 Parte 3 - Análisis de Diseño, denominado “Identificación de las Estrategias Factibles de Rehabilitación”, se indica que para la rehabilitación de la superficie de los pavimentos asfálticos es apropiado colocar carpetas no estructurales de menos de 3 cm de espesor, siempre que el pavimento existente sea adecuado estructuralmente. De acuerdo con la guía, este tipo de rehabilitación ayuda a mejorar las condiciones de fricción, las irregularidades en el perfil vertical y reduce al mínimo las condiciones de envejecimiento. Ésta condición de envejecimiento disminuye debido a que con la nueva carpeta que se coloca se impide en gran proporción el contacto del oxígeno que se encuentra presente en la atmósfera con la capa que está trabajando estructuralmente. Además, la sobrecarpeta que se coloca obstaculiza en gran medida la infiltración del agua hacia la capa estructural, de tal forma

que el pavimento se puede desempeñar favorablemente durante el transcurso de la vida útil remanente.

Por otro lado, en el aparte correspondiente a Tratamientos Superficiales del Capítulo 7 del Manual de Diseño de Pavimentos del Departamento de Transporte de Texas (Rehabilitación de Pavimentos Flexibles), se indica que los tratamientos superficiales se aplican con la intención de mejorar la textura y resistencia a la intemperie de las carpetas asfálticas, condiciones dentro de las cuales se estaría realizando reparación por efectos de la oxidación. En el estado de Texas, los tratamientos superficiales se han implantado como una práctica esencial dentro del programa de mantenimiento preventivo en vías de volumen de tráfico bajo. El tratamiento que favorece la disminución de la oxidación de las carpetas asfálticas es la aplicación de una emulsión asfáltica de fraguado lento la cual tiene efectos antioxidantes sobre el pavimento (Departamento de Transporte de Texas 2011). Éste tipo de prácticas permiten que el pavimento llegue al final de su vida útil en condiciones superficiales óptimas, pero no involucran mejoras a la capacidad estructural de pavimento.

La forma adecuada para preservar las carpetas asfálticas en condiciones apropiadas para la transitabilidad de los vehículos, es tomar conciencia desde el inicio de la construcción de las obras en destinar recursos suficientes para realizar las labores de mantenimiento necesarias en el momento indicado. Esta metodología permite evitar que los deterioros generados por el fenómeno de la oxidación se conviertan en daños graves que conlleven al punto de disminución de las condiciones de servicio favorables para el usuario a niveles muy bajos.

Incluye acá una nueva sección que diga “8.5 Resumen de Recomendaciones para el Control de Oxidación” y que sea un cuadro donde se resume muy bien todo lo que dices acá de forma muy breve y clara que condense todo...

## 9. CONCLUSIONES

El proceso de oxidación de los asfaltos presentes en mezclas ocurre cuando el ligante queda expuesto al oxígeno presente en la atmósfera o cuando la superficie de las carpetas asfálticas se encuentra en contacto directo con el agua. Su efecto aumenta con el paso del tiempo, y la temperatura favorece al aumento de su tasa de actividad. Existen diversos factores que ayudan a provocar la oxidación como son el manejo de asfalto en estado líquido, las condiciones de superficie de las carpetas asfálticas, los equipos empleados para la producción de las mezclas, el manejo durante el almacenamiento y transporte y los procesos de colocación y compactación.

Los modelos de oxidación típicos que se encuentran en la literatura se refieren al proceso químico en el cual se acelera la producción de asfaltenos por causa de la presión del aire y de la temperatura ambiente. Adicionalmente, apartándose del proceso químico, existen en la literatura modelos que involucran dos propiedades de gran importancia como son la viscosidad y el módulo resiliente de las mezclas asfálticas. La viscosidad es un indicativo que a medida que aumenta señala la condición de incremento en la rigidez de la mezcla, lo cual está relacionado con el valor del módulo.

En términos generales, el envejecimiento por oxidación altera las propiedades mecánicas de las carpetas asfálticas, tales como el aumento de la rigidez y la disminución de la tenacidad que conducen a un aumento de la fragilidad y mayor potencial para la formación de grietas, lo cual hace que se afecte la vida útil del pavimento en caso de no controlar adecuadamente el fenómeno de oxidación.

Para controlar este fenómeno es necesario limitar la exposición del asfalto al oxígeno, monitoreando el tiempo de manejo (producción y colocación) y limitando las temperaturas en donde sea posible.

De acuerdo a la investigación realizada, en las etapas en que se presenta mayor deterioro por oxidación es durante la producción y la construcción, lo cual va directamente relacionado con el manejo que se dé a la mezcla asfáltica durante dichas etapas.

En el gremio de los productores, no se sintieron con capacidad de responder la encuesta realizada, se cree que esto ocurrió por dos razones principales, la primera se fundamenta en la falta de conocimiento del fenómeno y la segunda en el temor de que les sean exigidas normas que incrementen sus costos de producción, disminuyendo así sus utilidades. En general se observó que la producción de mezclas asfálticas en Colombia es un negocio en el cual la mayoría de los involucrados no parecen muy motivados en ahondar en los conceptos técnicos que se desarrollan en base a los productos que ofrecen. El desinterés o la desinformación para aplicar prácticas favorables afecta el desempeño de las vías que se construyen en el país a largo plazo, provocando que se deterioren las vías por causas que pueden ser controladas en diversas etapas.

Por otro lado, en cuanto a los constructores de vías en asfalto en Colombia, tampoco se generó una respuesta de ninguna índole debido al desconocimiento del tema. Por lo tanto, se deduce que no existen prácticas claras y concisas encaminadas a mitigar la oxidación de las carpetas asfálticas. Los constructores en su mayoría cumplen las especificaciones tipo INVIAS—las cuales no realizan ningún tipo de referencia al fenómeno de oxidación—pero no son conscientes de qué tipo de daños se pueden prevenir a largo plazo cuando las obras se ejecutan de forma adecuadamente.

El hecho de comprender técnicamente las causas, los efectos y las posibles soluciones al problema de la oxidación debe ser parte del conocimiento básico de los profesionales y técnicos que planean, diseñan, producen, construyen y mantienen en correcto estado las obras de infraestructura vial que involucran carpetas asfálticas en el país, lo cual favorece en gran medida la calidad y el confort del servicio que se presta a los usuarios de este tipo de infraestructura.



## 10. RECOMENDACIONES

A continuación se enumeran algunas de las principales recomendaciones que surgen del análisis de la información recolectada y presentada en este documento:

- Es de vital importancia el cumplimiento de la normativa existente relacionada con las temperaturas de producción y colocación de las mezclas asfálticas determinadas por el INVIAS. En este tema no es posible adecuar la normativa internacional debido a que Colombia se encuentra localizado en zona de trópico, por lo cual las condiciones climáticas no se asemejan a las estipuladas de forma general a nivel mundial.
- En el proceso de producción de las mezclas asfálticas, el uso de los tanques con los sellos apropiados que impidan el paso del oxígeno al interior de las mezclas es una alternativa sencilla que puede contribuir en gran medida a la disminución de la oxidación en la etapa de mezclado.
- La reducción de la temperatura hasta el nivel mínimo permitido durante el proceso de mezcla durante la etapa de producción, consigue disminuir las reacciones químicas que provocan la aceleración en la producción de asfaltenos.
- Tener las precauciones necesarias durante los procesos de transporte y almacenamiento garantiza una menor propagación de la oxidación. Por tanto, es necesario utilizar tolvas de almacenamiento selladas para impedir el paso del oxígeno. En el caso de transportar las mezclas en volquetas o vehículos similares, se debe cumplir con las especificaciones I.N.V E-450-07. (2007) que indican la protección de los materiales y regula la forma de dichos vehículos.
- El uso de equipos con tecnologías avanzadas que garanticen los valores de compactación requeridos para realizar obras con altos estándares de calidad que se comporten favorablemente a través del tiempo, da un valor agregado al desempeño de las carpetas asfálticas en el transcurso de su vida útil.
- El diseño y construcción apropiada de las obras hidráulicas que impidan el contacto del agua con las carpetas asfálticas será un gran aporte a la mitigación de la oxidación a largo plazo.
- La capacitación técnica de los operadores de los equipos que se utilizan para ejecutar las labores de extensión y compactación de las mezclas asfálticas favorecen el proceso hasta el punto en que se mejoraran las condiciones de las carpetas asfálticas en el largo plazo.
- En la etapa de servicio, es indispensable realizar labores de mantenimiento periódico y rutinario que aportan a controlar el contacto del agua con las carpetas asfálticas. Los sellos y los tratamientos superficiales son de gran aporte para el control de la oxidación.

- En el caso de llenar a la instancia de realizar rehabilitaciones, es importante tener conciencia desde la etapa de diseño que las nuevas carpetas que se van a colocar colaboran en el proceso de control de la oxidación.
- La inversión económica que se realice en las etapas de producción y construcción, contribuye a que los costos, tiempos de mantenimiento y rehabilitación disminuyan considerablemente, entregándole al país obras de infraestructura con niveles de servicio favorables para los usuarios.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- ARA, Inc., ERES Division 505 West University Avenue Champaign, Illinois 61820 (2001). “Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures” Appendix CC-1: Correlation of CBR Values with Soil Index Properties.
- ARA, Inc., ERES Division 505 West University Avenue Champaign, Illinois 61820 (2001). “Guide for Mechanistic-Empirical Design Of New and Rehabilitated Pavement Structures”. Part 2. Design Inputs. Chapter 2. Material Characterization.
- Bolzan, Pablo (2006). “Compactación de Mezclas Asfálticas Densas y Discontinuas”
- Caro, Silvia (2011). “Materiales Asfálticos - Módulo Asfaltos Presentación de clase”
- Coe, D. S. y Cui, Z. H. (2003) «Determinación de la energía de activación de flujo en ligantes asfálticos». 12° Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Quito
- Conrado Lopera (2011). “Diseño y Producción de Mezclas Asfálticas Tibias, a partir de la Mezcla de Asfalto y Aceite Crudo de Palma (Elaeis Guineensis)” Universidad Nacional de Colombia, Facultad De Minas. Medellín
- ECOPETROL. 2003. «Carta Petrolera. Edición 108 abril - mayo». Bogotá D.C.
- ECOPETROL. 2010. «Carta Petrolera. Edición 112 abril - junio». Bogotá D.C.
- Fernández, Wilmar; Rondón, Hugo; Reyes, Fredy (2011). “Envejecimiento de Asfaltos y Mezclas Asfálticas: Estado del conocimiento”. Universidad Distrital Francisco José de Caldas grupo de Topografía e Infraestructura Vial TOPOVIAL, Pontificia Universidad Javeriana, Centro de estudios en carreteras, transportes y afines CECATA.
- Huh y Robertson, R. (1996). “Modeling of Oxidative Aging Behavior of Asphalts from Short-Term, High-Temperature Data as a Step Toward Prediction of Pavement Aging”. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1535, 91-97.
- IDU - ET - 2005. (2005). “Mezclas Asfálticas en Caliente Densas, Semidensas y Gruesas”. Instituto de Desarrollo Urbano, Bogotá, Colombia.

- I.N.V E-450-07. (2007). “Mezclas Asfálticas en Caliente (Concreto Asfáltico y Mezcla de Alto Módulo)”. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- I.N.V E-717-07. (2007). “Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro Rotacional”. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- I.N.V E-735-07. (2007) “Gravedad Específica máxima teórica (Gmm) y Densidad de Mezclas Asfálticas para Pavimentos”. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- J. Don Brock, PhD., P.E. (2012). “Oxidación Del Asfalto”. Boletín Técnico T-103S. ASTEC. Empresa Estadounidense que produce y comercializa plantas de asfalto para mezclas en caliente.
- Jason F. Chipps, Richard R. Davison , and Charles J. Glover (2001) “A Model for Oxidative Aging of Rubber-Modified Asphalts and Implications to Performance Analysis”. Energy y Fuels, Vol. 15, No. 3, 637-647. College Station, Texas 77843-3122.
- Martínez, Aníbal R. (1976). “Cronología del petróleo venezolano. Ediciones Petroleras Foninves. Caracas 351p.
- Metodología SUPERPAVE para el Diseño de Mezclas Asfálticas (2005) BITUMIX CVV. Especialidades asfálticas. Dpto. Gestión de Calidad y Desarrollo.
- National Library and Information System Authority, National Library of Trinidad and Tobago. (2010). Electric Universe Geology.com. Electric Universe Theory Forum. <<http://www.ablinternacional.com/>>.
- Parada M., Lepasqueur A. J. y Caicedo, B. (2005). “Estudio del envejecimiento de mezclas asfálticas por oxidación”. Universidad de los Andes, Bogotá D.C, Colombia.
- Russel W. Lenz, P.E. (2011). “Manual: Pavement Design Guide Effective”. Texas Department of Transportation.
- Traxler (1963). “Durability of asphalt cements”. Association of Asphalt Paving Technologist.
- Vargas, Xiomara y Reyes Freddy (2010). “El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos”. Ingeniería e Investigación Vol. 30 No. 3, (27-44).

## 12. ANEXOS

Los anexos corresponden a los formatos de encuestas empleados para recopilación de la información que sirviera de ayuda al presente proyecto. A pesar de que no fue posible encontrar profesionales que se comprometieran por escrito con el suministro de la información solicita por causa del desconocimiento del tema, se adjuntan los formatos diseñados para tal fin.

## ANEXO 1.1 Encuesta a Constructores

Datos del encuestado

Nombre: \_\_\_\_\_

Empresa: \_\_\_\_\_

Cargo: \_\_\_\_\_

1. ¿Conoce acerca del fenómeno de oxidación de pavimentos asfálticos? Explicar

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

2. En su práctica laboral ¿Cumple alguna normativa (Nacional o internacional) que regule la oxidación de pavimentos asfáltico? Indicar cuáles.

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

3. En los casos en se preparan las mezclas asfálticas en obra, se tiene en cuenta la oxidación de las mismas? Señalar de qué forma

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

4. Al realizar el proceso de colocación y compactación de la mezcla ¿Tiene presente el efecto que se produce en términos de oxidación del pavimento? Indicar de qué forma.

---

---

---

5. Identifica algún procedimiento para la prevención de la oxidación del pavimento asfáltico. En caso afirmativo por favor describirlo.

---

---

---

6. ¿En la etapa de mantenimiento se realizan actividades que permitan mitigar la oxidación de la carpeta asfáltica? Describir cuáles actividades

---

---

---

---

FIRMA: \_\_\_\_\_

Gracias por su colaboración

**Nota:** Esta encuesta se realiza con fines académicos, como soporte al proyecto de grado Prevención y Control de la Oxidación de Carpetas Asfálticas en Pavimentos

## ANEXO 1.2 Encuesta a Diseñadores

Datos del encuestado

Nombre: \_\_\_\_\_

Empresa: \_\_\_\_\_

Cargo: \_\_\_\_\_

1. ¿Conoce acerca del fenómeno de oxidación de pavimentos asfálticos? Explicar

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

2. En su práctica laboral ¿Cumple alguna normativa (Nacional o internacional) que regule la oxidación de pavimentos asfáltico? Indicar cuáles.

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

3. Dentro del proceso de diseño ¿Involucra parámetros o variables que se relacionen con el fenómeno de oxidación de las mezclas asfálticas? Identificar cuáles.

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_



4. Al hacer entrega de los diseños al constructor ¿Da recomendaciones al constructor para prevenir la oxidación de la carpeta asfáltica? Enunciarlas.

---

---

---

5. ¿Cuando se realizan diseños para rehabilitaciones o mantenimientos se tiene en cuenta la condición de oxidación del pavimento existente? De qué forma.

---

---

---

---

FIRMA: \_\_\_\_\_

Gracias por su colaboración

**Nota:** Esta encuesta se realiza con fines académicos, como soporte al proyecto de grado Prevención y Control de la Oxidación de Carpetas Asfálticas en Pavimentos

## ANEXO 1.3 Encuesta a Productores

Datos del encuestado

Nombre: \_\_\_\_\_

Empresa: \_\_\_\_\_

Cargo: \_\_\_\_\_

1. ¿Conoce acerca del fenómeno de oxidación de pavimentos asfálticos? Explicar

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

2. En su práctica laboral ¿Cumple alguna normativa (Nacional o internacional) que regule la oxidación de pavimentos asfáltico? Indicar cuáles.

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

3. En proceso de preparación de las mezclas asfálticas, ¿Se tiene en cuenta la oxidación de las mismas en la etapa de mezclado? De qué forma.

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

4. Indicar qué medidas se implementan para evitar la oxidación del asfalto durante la etapa de producción

---

---

---

5. Identifica algún procedimiento para la prevención de la oxidación del pavimento asfáltico. En caso afirmativo por favor describirlo.

---

---

---

FIRMA: \_\_\_\_\_

Gracias por su colaboración

**Nota:** Esta encuesta se realiza con fines académicos, como soporte al proyecto de grado Prevención y Control de la Oxidación de Carpetas Asfálticas en Pavimentos