



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CS. FISICAS Y MATEMATICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**

**Influencia de la contaminación salina en el envejecimiento  
prematureo de mezclas y tratamientos asfálticos.**

**GONZALO JOSE SALAMANCA ARCE**

Profesor Guía: Sr. FEDERICO EDUARDO RAMON DELFIN ARIZTIA  
Profesores de Comisión: Sr. DAVID ALBERTO CAMPUSANO BROWN  
: Sr. RICARDO ALEJANDRO SALSILLI MURUA

Memoria para optar al título de  
Ingeniero Civil

Santiago, Chile  
Julio 2007

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL  
POR: GONZALO SALAMANCA A.  
FECHA: 09/07/2007  
PROF. GUIA: Sr. FEDERICO DELFIN A.

## **“Influencia de la contaminación salina en el envejecimiento prematuro de mezclas y tratamientos asfálticos.”**

La pavimentación asfáltica es considerada actualmente como una alternativa adecuada para el País con una creciente importancia desde 1980 que marca el inicio de una etapa de intenso desarrollo de la construcción de diversas obras viales a lo largo del territorio Nacional mediante pavimentos flexibles, en especial en la zona Norte, particularmente en las rutas 5 y 25 de la región de Antofagasta que son de especial interés para el presente estudio. Por otra parte Chile es un territorio que se caracteriza por una amplia variedad de climas y geomorfologías variadas, estas condiciones climáticas afectan de distinta manera el comportamiento de los pavimentos asfálticos, como también las características de los materiales pétreos disponibles para la confección de mezclas y tratamientos asfálticos.

Problemas de envejecimiento observado en pavimentos de la II Región Resultan, entonces, relevante para poder determinar como afecta al desempeño de la carpeta y específicamente de la mezcla asfáltica la naturaleza y contenido de sustancias en los áridos componentes, situación que se ha visto como responsable de un envejecimiento prematuro de la misma. El envejecimiento del ligante asfáltico altera de forma significativa sus propiedades reológicas, y como consecuencia de ello, la respuesta del pavimento frente a sollicitaciones. El envejecimiento del ligante asfáltico se produce en dos fases o etapas claramente distinguibles en cuanto a magnitud y velocidad de los cambios que se generan en sus propiedades físicas y químicas. La primera de ellas corresponde a cambios que se generan en el proceso de construcción, y la segunda a cambios físico-químicos que se producen en la vida de servicio.

El presente estudio se aboca al fenómeno del envejecimiento que ocurre en las mezclas asfálticas. Los procedimientos para inducir en laboratorio envejecimiento acelerado de mezclas asfálticas, simulan los efectos de envejecimiento que ocurren en cada una de las fases antes descritas. Debido a la estrecha relación entre los cambios físicos y químicos que se producen durante el envejecimiento es interesante implementar ensayos que evalúen cuantitativamente y cualitativamente dicho efecto.

El trabajo experimental desarrollado comprende las siguientes etapas: la primera aborda una recopilación de antecedentes sobre métodos y modelos matemáticos para inducir y evaluar el envejecimiento en laboratorio de mezclas y tratamientos asfálticos, para relacionar la incidencia de la posible contaminación de los agregados pétreos en dicha evolución. Se plantea luego la etapa experimental que incluye la evaluación del envejecimiento en mezclas asfálticas en horno de calcinación y la cuantificación de esta mediante ensayos al ligante extraído. Los parámetros considerados como indicadores del envejecimiento son tanto de tipo químico, Energía de Activación del ligante, como físico mecánicos.

Agradezco a todas las personas  
que de una u otra forma colaboraron e  
hicieron posible la realización de esta  
memoria

A MIS PADRES Y HERMANA

## **INDICE**

<i>Contenido</i>	<i>Paginas</i>
<b>CAPITULO 1</b>	
<b><u>INTRODUCCION</u></b>	<b>1</b>
<i>1.1 Antecedentes</i>	1
<i>1.2 Objetivos de la investigación</i>	1
<i>1.4 Línea de Investigación</i>	3
<b>CAPITULO 2</b>	
<b><u>PAVIMENTOS ASFALTICOS</u></b>	<b>4</b>
<b>2.1 Composición y características del asfalto</b>	4
2.1.1 <i>Composición Físico-química del asfalto</i>	4
2.1.1.1 <i>Origen y naturaleza del asfalto.</i>	4
2.1.1.2 <i>Refinación del petróleo.</i>	4
2.1.1.3 <i>Refinación de asfalto.</i>	5
2.1.1.4 <i>Clasificación y grados del asfalto</i>	5
2.1.1.5 <i>Propiedades químicas del asfalto</i>	6
2.1.1.6 <i>Composición química del asfalto, elemental y molecular.</i>	7
2.1.2 <i>Propiedades Físicas del asfalto</i>	10
2.1.2.1 <i>Durabilidad.</i>	10
2.1.2.2 <i>Adhesión y cohesión.</i>	10
2.1.2.3 <i>Susceptibilidad a la temperatura.</i>	10
2.1.2.4 <i>Endurecimiento y envejecimiento.</i>	11
<b>2.2 Aplicaciones asfálticas</b>	11
2.2.1 <i>Mezclas asfálticas en caliente</i>	11
2.2.1.1 <i>Tipos de Mezclas</i>	11
2.2.4 <i>Tratamientos superficiales</i>	13
2.2.2.1 <i>Tratamiento superficial simple</i>	13
2.2.2.2 <i>Tratamiento superficial doble o múltiple</i>	13
<b>CAPITULO 3</b>	
<b><u>ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO EN SU PROCESO DE ENVEJECIMIENTO</u></b>	<b>15</b>
<b>3.1 Oxidación del asfalto</b>	15
3.1.1 <i>Introducción</i>	15
3.1.2 <i>Oxidación en el sistema de manejo de líquido</i>	16
3.1.3 <i>Oxidación durante el mezclado</i>	16
3.1.4 <i>Oxidación de la mezcla en caliente en la carretera</i>	17
3.1.5 <i>Oxidación en las tolvas de mezcla en caliente</i>	17

<b>3.2 Proceso de Envejecimiento</b>	19
3.2.1 <i>Envejecimiento Físico</i>	19
3.2.2 <i>Envejecimiento Químico</i>	20
<b>3.3 Métodos de Envejecimiento</b>	20
3.3.1 <i>Introducción</i>	20
3.3.2 <i>Modelos que predicen el envejecimiento de un pavimento flexible</i>	21
3.3.2.1 <i>Modelo de Domke (1997)</i>	22
3.3.2.2 <i>Determinación de Energía de Activación en cementos asfálticos</i>	24
3.3.2.3 <i>Método universal de caracterización de ligantes (UCL)</i>	26
3.3.2.4 <i>Efecto de la radiación solar y de la temperatura ambiente en el comportamiento térmico de los pavimentos en el proceso de envejecimiento</i>	27

## **CAPITULO 4**

### **METODOLOGIA Y DESARROLLO DE LA INVESTIGACION** **30**

<b>4.1 Metodología empleada en la investigación.</b>	30
<b>4.2 Experimentación.</b>	32
<b>4.3 Caracterización de los materiales pétreos utilizados</b>	32
4.3.1 <i>Datos de origen y obtención del material pétreo para la elaboración de las Probetas</i>	33
4.3.2 <i>Pruebas índice de calidad realizadas al material pétreo</i>	37
4.3.1.1 <i>Granulometría</i>	37
4.3.1.2 <i>Ensayo de desgaste de Los Ángeles</i>	43
4.3.1.3 <i>Prueba para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en pétreos gruesos</i>	44
4.3.1.4 <i>Prueba de forma de la partícula</i>	46
4.3.1.5 <i>Prueba para determinar la cubicidad de las partículas</i>	47
4.3.1.6 <i>Resumen de las características de los áridos</i>	50
<b>4.4 Características de los ligantes</b>	50
4.4.1 <i>Cemento Asfáltico CA 60/80</i>	50
4.4.2 <i>Cemento Modificado Cariphalte MD 60/80</i>	51
<b>4.5 Ensayo de envejecimiento acelerado de mezclas asfálticas</b>	51
4.5.1 <i>Introducción</i>	51
4.5.2 <i>Metodología</i>	52
<b>4.6 Ensayo de Mezclas Asfálticas envejecidas</b>	54
4.6.1 <i>Ensayo de Resistencia a la Compresión Diametral</i>	54
4.6.1.1 <i>Velocidad de aplicación de la carga en el ensaye a tracción indirecta.</i>	54
4.6.1.2 <i>Elaboración de las probetas</i>	55
4.6.1.3 <i>Método de ensaye a tracción indirecta (Ensaye Brasileño)</i>	56
4.6.1.4 <i>Aparatos y material necesarios.</i>	57
4.6.1.5 <i>Procedimiento.</i>	58
4.6.1.6 <i>Ejecución del ensayo</i>	58
4.6.1.7 <i>Resultados</i>	59
4.6.2 <i>Ensayo de viscosidad mediante viscosímetro Brookfield</i>	68
4.6.3 <i>Ensayo de impacto por medio de la placa Vialit</i>	71

**CAPITULO 5**  
**DISCUSIÓN Y CONCLUCINES** **72**

---

<b>5.1 Discusión</b>	72
<b>5.1.1 Envejecimiento de Mezclas Asfálticas</b>	72
<b>5.1.2 Energía de Activación</b>	73
<b>5.1.3 Verificación experimental del método de ensayo</b>	73
<b>5.2 Conclusiones</b>	75
<b>5.3 Recomendaciones</b>	75

**BIBLIOGRAFIA** **76**

---

**ANEXO A: ESTUDIO DEL ENVEJECIMIENTO POR OXIDACION DE PAVIMENTOS FLEXIBLES UTILIZANDO EL MODELO DOMKE (1997).**

**ANEXO B: RELACION ENTRE LA CANTIDAD DE ASFALTENOS Y LA ENERGIA DE ACTIVACION DE LIGANTES ENVEJECIDOS.**

**ANEXO C: OXIDACION EN LAS TOLVAS.**

**CAPITULO 1**  
**INTRODUCCION**



# **1 INTRODUCCION**

## **1.1 Antecedentes**

El deterioro de un pavimento es un proceso que comienza durante la elaboración de la mezcla en planta y progresivamente durante todo el proceso de construcción. Durante la etapa de servicio el deterioro continua a tasas significativamente menores siendo el tráfico y los factores climáticos las causas del deterioro. Sin embargo, la tasa y tipo de deterioro que experimente un pavimento dependen de la intensidad en que se manifiestan esas solicitaciones y de algunos otros factores de proyecto, entre cuales los más importantes son: calidad del diseño de la mezcla original, calidad de los materiales y especificaciones técnicas, calidad del proceso constructivo y calidad del control del proceso.

En algunos proyectos se ha observado un deterioro prematuro o acelerado de las carpetas construidas con mezclas asfálticas en caliente. Entre las causas posibles de tal situación, se asocia al manejo térmico inapropiado del cemento asfáltico, al someterlo a excesivo de calentamiento durante la etapa de producción en las plantas asfálticas, en otros casos los problemas se originan por la baja calidad de los materiales utilizados, también es usual que el origen de las fallas está relacionado directamente con la capa de rodadura, debido a que los materiales utilizados para producir la mezcla asfáltica en caliente han sido manejados de manera inapropiada, en otros casos el proceso de producción de la mezcla se ha llevado a cabo a temperaturas o períodos de mezclado mayores a los especificados o también debido a deficiencias en el proceso constructivo.

La ocurrencia de alguna de estas situaciones o la combinación de las mismas, afecta negativamente al comportamiento de la mezcla asfáltica, que originan un envejecimiento prematuro de la carpeta y por consiguiente se reduce la vida útil de la vía.

En este informe se exponen los resultados de un estudio en el que se han reciclado ensayos bajo condiciones de laboratorio para reproducir y evaluar el nivel de incidencia de las prácticas anteriores en el deterioro del cemento asfáltico.

El deterioro del pavimento es un proceso progresivo, por lo cual es necesario contar con algún indicador y modelos que pronostiquen de forma eficaz el comportamiento esperado de la carpeta confeccionada con determinada mezcla asfáltica. La finalidad de lo anterior es asegurar que el pavimento alcance su vida de diseño.

## **1.2 Objetivos de la investigación**

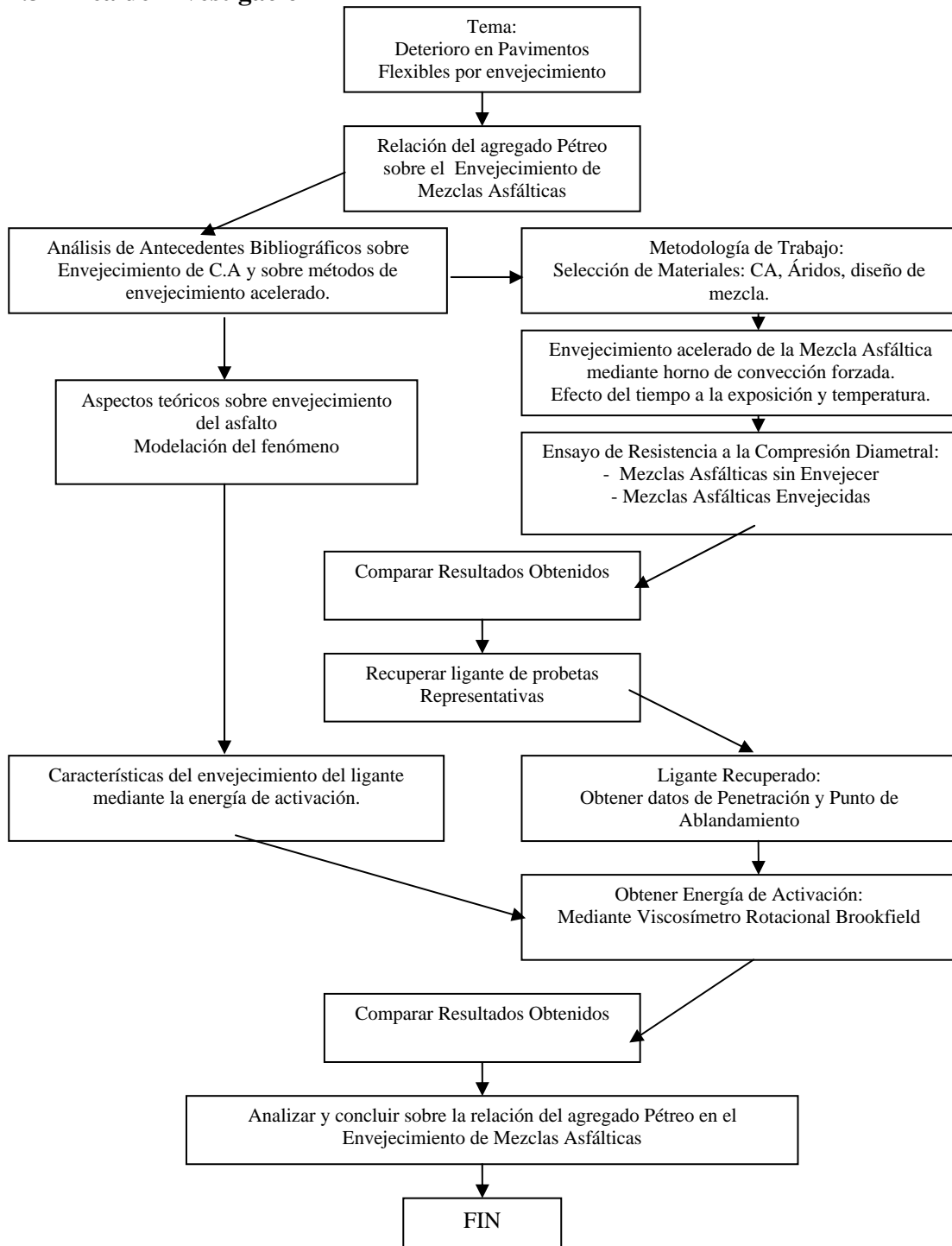
En relación con la selección y el manejo de los materiales utilizados para producir mezcla asfáltica en caliente, se ha observado que en algunas plantas asfálticas, el asfalto es sometido a ciclos de calentamiento-enfriamiento durante la etapa de almacenamiento, sin atender a sus características y procedencia. Por otra parte la provisión de áridos pétreos no incluye controles sistemáticos en cuanto a posibles contaminantes que alteren las propiedades del ligante en la etapa de elaboración de la mezcla.

En vista de lo anterior, el presente Trabajo de Investigación, se ha enfocado hacia la determinación de la incidencia de las propiedades del asfalto y de los áridos en el comportamiento frente al envejecimiento acelerado de la mezcla asfáltica. Los materiales considerados son cementos asfálticos CA y áridos procedentes de la región metropolitana y de la II región.

Para desarrollar estas investigaciones se utilizaron dos tipos de asfalto, el asfalto CA-60/80 y el asfalto modificado Cariphalte MD 60-80, ambos proporcionados por SHELL BITUMEN. Estos CA fueron seleccionados debido a que son los más utilizados en el país.

Todos los ensayos de laboratorio realizados en esta investigación, fueron llevados a cabo de acuerdo a lo establecido en las Especificaciones de la American Society for Testing and Materials (ASTM), el Manual de Carreteras Volumen 5 y 8, NLT y la AASHTO y se llevaron a cabo en el Laboratorio de Asfalto de DIEM.

### 1.3 Línea de Investigación



**CAPITULO 2**  
**PAVIMENTOS ASFALTICOS**

## **2 PAVIMENTOS ASFALTICOS**

### **2.1 Composición y características del asfalto**

#### *2.1.1 Composición Físico-química del asfalto*

El asfalto es un material hidrocarburo de color negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia con la temperatura, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla en caliente.

Casi todo el asfalto usado en Chile es producido por refinerías modernas de petróleo que procesan distintos tipos de crudos que dejan como residuo el llamado asfalto de destilación. El grado de control permitido por los equipos modernos de refinería permite la producción de asfaltos con características distintas, que se prestan para usos específicos. Como resultado, se producen asfaltos para pavimentación, techado y otros usos especiales.

El Cemento Asfáltico aparte de ser el material base para la elaboración de mezclas es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales. Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de agentes químicos agresivos.

El asfalto sufre alteraciones físicas y químicas cuando es calentado y /o envejecido por periodos prolongados. Tiende a volverse duro y frágil y también a perder parte de su capacidad de adherirse a las partículas de agregado. Estos cambios pueden ser minimizados si se comprenden las propiedades del asfalto, y si se toman medidas, durante la construcción, para garantizar que el pavimento terminado sea construido de tal manera que pueda retardarse el proceso de envejecimiento. [Asphalt Institute; 1992]

#### *2.1.1.1 Origen y naturaleza del asfalto.*

A veces hay confusión acerca del origen del asfalto, de cómo es refinado, y como se clasifica en sus diferentes grados. Esto se debe a que el asfalto es usado para muchos propósitos. Existe una confusión similar respecto a ciertos términos relacionados con las propiedades del asfalto. A continuación se resumen los principales aspectos que caracterizan a este material.

#### *2.1.1.2 Refinación del petróleo.*

El crudo de petróleo es refinado por destilación fraccional. Este es un proceso en el cual las diferentes fracciones (productos) son separadas fuera del crudo por medio de un aumento, en etapas, de la temperatura.

Las fracciones livianas se separan por destilación simple. Los destilados más pesados, usualmente llamados gasóleos, pueden ser separados solamente mediante una combinación de calor y vacío, el asfalto puede ser producido usando destilación por vacío a una temperatura aproximada de 480° C (900° F). Esta temperatura puede variar un poco, dependiendo del crudo de petróleo que se este refinando, o del grado de asfalto que se este produciendo. [Asphalt Institute; 1992]

### *2.1.1.3 Refinación de asfalto.*

Diferentes usos requieren diferentes tipos de asfalto. Los refinadores de crudo deben tener maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que producen, para que estos cumplan ciertos requisitos. Esto se logra, usualmente, mezclando varios tipos de crudo de petróleo antes de procesarlos. El hecho de poder mezclar permite al refinador combinar crudos que contienen asfaltos de características variables, para que el producto final posea exactamente las características solicitadas por el usuario.

Existen dos procesos por los cuales puede ser producido un asfalto, después de que se han combinado los crudos de petróleo: destilación por vacío y extracción con solventes. En el proceso de extracción con solvente, se remueven más gasóleos del crudo, dejando así un asfalto residual.

Una vez que los asfaltos han sido procesados, estos pueden ser mezclados entre sí, en ciertas proporciones, para producir grados intermedios de asfalto. Es así como un asfalto muy viscoso y uno menos viscoso pueden ser combinados para producir un asfalto de viscosidad intermedia.

En resumen, para producir asfaltos con características específicas, se usa el crudo de petróleo o mezclas de crudos de petróleo. El asfalto es separado de las otras fracciones del crudo por medio de destilación por vacío o extracción con solventes.  
[Asphalt Institute; 1992]

### *2.1.1.4 Clasificación y grados del asfalto*

Los asfaltos de pavimentación pueden clasificarse bajo tres tipos generales:

- Cemento asfáltico;
- Asfalto diluido ( o cortado); y
- Asfalto emulsificado.

Los cementos asfálticos se clasifican bajo tres sistemas diferentes. Ellos son: viscosidad, viscosidad después de envejecimiento, y penetración. Cada sistema abarca diferentes grados cada uno con diferentes rangos de consistencia.

En el sistema de viscosidad, el poise es la unidad normal de medida para viscosidad absoluta. El AC – 2.5 (cemento asfáltico con una viscosidad de 250 poises a 60° C o 140° F) es conocido como un asfalto “blando”. El AC – 40 (cemento asfáltico con una viscosidad de 4000 poises a 60° C o 140° F) es conocido como un asfalto “duro”. Por lo que el AC – 20 (cemento asfáltico con una viscosidad de 2000 poises a 60° C o 140° F) es conocido como un asfalto “medio”.

Otro sistema para clasificar el asfalto es por viscosidad después de envejecimiento. La idea es identificar cuales serán las características de viscosidad después de que se ha colocado el asfalto en el pavimento. Para poder simular el envejecimiento que ocurre en la planta asfáltica durante el mezclado, el asfalto debe ser ensayado en el laboratorio utilizando un ensayo patrón de envejecimiento. El residuo asfáltico que queda después del envejecimiento es clasificado, posteriormente, de acuerdo a su viscosidad. Una vez más, la unidad normal de medida es el poise.

Se le ha asignado la nomenclatura “AR” que corresponde a “Residuo Envejecido”, por lo tanto el AR – 10 (con una viscosidad de 1000 poises a 60°C) es conocido como un asfalto “blando”. El AR – 160 (con una viscosidad de 16000 poises a 60°C) es conocido como un asfalto “duro”. Por lo que el AR – 20 (con una viscosidad de 2000 poises a 60°C) es conocido como un asfalto “medio”.

El tercer método usado para clasificar asfaltos es el de penetración. Una aguja normal se deja penetrar dentro de la muestra de asfalto bajo una carga dada (100 gramos). La distancia que la aguja penetra en la muestra a 25°C en un tiempo determinado (5 segundos) es medida en décimas de milímetro (0.1 mm). Un grado 200 – 300 indica que la aguja penetró en la muestra, bajo condiciones específicas, de 200 a 300 décimas de milímetro. Esto es indicador de un asfalto blando. Un grado 40 – 50, por otro lado, es indicador de un asfalto “duro” en el cual la aguja fue capaz de penetrar solamente de 40 a 50 décimas de milímetro. [Asphalt Institute; 1992]

Mediante este ensayo los cementos asfálticos se dividen en grados según su dureza o consistencia, de acuerdo a esto los cementos asfálticos más comúnmente usados en Chile son los siguientes:

CA 40- 50 (En mastic para sellado de juntas de pavimento de hormigón).

CA 60 - 70 (En concreto asfáltico).

CA 85:- 100 (En concreto asfáltico).

CA 120- 150(Tratamientos superficiales).

Las dos cifras indican los límites máximos y mínimos de la penetración.

#### *2.1.1.5 Propiedades químicas del asfalto*

El asfalto tiene propiedades químicas únicas que lo hacen muy versátil como material de construcción de carreteras. Los técnicos de asfalto y los diseñadores de pavimentos han aprendido a identificar y caracterizar estas propiedades y a usarlas, dentro de la estructura del pavimento, en la forma más ventajosa posible.

Sin embargo, existen varias razones por las cuales la química no ha llegado a ser parte de los sistemas de clasificación:

- En la actualidad no hay una prueba normal para determinar la composición química de asfaltos que sea aceptada por vendedores, comparadores y usuarios del material.
- Los ensayos existentes para analizar composición química requieren de equipos sofisticados y pericia técnica que no esta disponible en la mayoría de los laboratorios donde se hacen pruebas de asfaltos.
- La relación entre la composición química del cemento asfáltico y su comportamiento en la estructura del pavimento es todavía incierta.

Básicamente, el asfalto esta compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono) y algunas trazas de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. El asfalto, cuando es disuelto en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfaltenos y maltenos.

Los asfaltenos no se disuelven en el heptano. Los asfaltenos una vez separados de los maltenos, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de

grafito. Los asfaltenos le dan al asfalto las propiedades de elasticidad y rigidez a distintas temperaturas, su color y dureza.

Los maltenos se disuelven en el heptano. Son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. Las resinas son, por lo general, líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, mientras que los aceites son de color más claro.

Las resinas proporcionan las cualidades adhesivas (pegajosidad) en el asfalto, mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfaltenos y las resinas. La proporción de asfaltenos y maltenos en el asfalto puede variar debido a un sinnúmero de factores partiendo por el origen del crudo incluyendo las altas temperaturas, exposición a la luz y al oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla asfáltica, y espesor de la película de asfalto que recubre las partículas de agregado. Las reacciones y cambios que pueden ocurrir en el proceso de mezclado incluyen: evaporación de los compuestos más volátiles, oxidación (combinación de moléculas de hidrocarburo con moléculas de oxígeno), polimerización (combinación de dos o más moléculas para formar una sola molécula más pesada), y otros cambios químicos que pueden afectar considerablemente las propiedades del asfalto. Las resinas se convierten gradualmente en asfaltenos, ocasionando así un aumento en la viscosidad del asfalto. [Asphalt Institute; 1992]

#### 2.1.1.6 Composición química del asfalto, elemental y molecular.

Antes de intentar discutir las relaciones entre la composición química y las propiedades del asfalto que afectan la durabilidad, daremos atención a la composición química del asfalto. El asfalto no está compuesto de elementos químicos simples, es una mezcla bastante compleja de moléculas orgánicas, sistemas de alta condensación llamados aromáticos.

Un análisis elemental de varios asfaltos se muestran en la Tabla 2.1.1-I. Aunque las moléculas de asfalto están compuestas predominantemente de carbono e hidrógeno, la mayoría de las moléculas contienen una o más de los llamados *heteroatomos* de nitrógeno, azufre y oxígeno junto con algo de metales, principalmente vanadio y níquel.

<b>Código<sup>2</sup></b>	<b>B-2959</b>	<b>B-3036</b>	<b>B-3051</b>	<b>B-3602</b>
Origen	Mezcla Mexicana.	Arkansas Lousiana	Boscan.	California.
Porcentaje de Carbono.	83.77	85.78	82.90	86.77
Porcentaje de Hidrogeno.	9.91	10.19	10.45	10.94
Porcentaje de Nitrógeno.	0.28	0.26	0.78	1.10
Porcentaje de Azufre.	5.25	3.41	5.43	0.99
Porcentaje de Oxígeno <sup>3</sup> .	0.77	0.36	0.29	0.20
Vanadio, ppm.	180.00	7.00	1380.00	4.00
Níquel, ppm.	22.00	0.40	109.00	6.00

*Tabla 2.1.1-I; Análisis elemental de la representación de un asfalto*

Como se observa en la tabla, los heteroatomos, aunque en menor proporción comparado, con las moléculas de hidrocarburo, pueden variar en concentraciones por arriba de los rangos que dependen del origen del asfalto, porque los heteroatomos a menudo se



encadenan de manera funcional con la polaridad de sus moléculas, su presencia puede generar una gran alteración en algunas de las propiedades físicas entre asfaltos de diferente origen.

Un análisis elemental con valores promedio entrega poca información acerca de los átomos que se incorporan a las moléculas o sobre que tipo de estructura molecular esta presente. El tipo de estructura molecular es una información necesaria para entender fundamentalmente los efectos de la composición en las propiedades físicas y en la actividad química de este material.

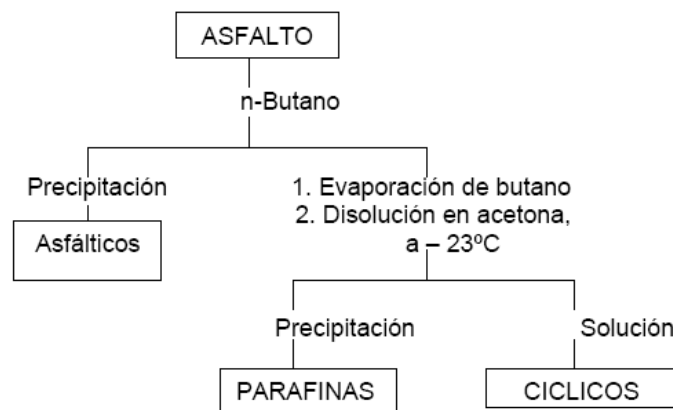
El asfalto es indudablemente producto de materia orgánica de organismos vivos depositada y transformada, por ello la estructura molecular del compuesto presenta una gran diversidad. Carbonos en sistemas llamados aromáticos son estimados por correlación basados en análisis *Carbono – Hidrogeno*, [H.E. Schweyer and E.L. Chipley; 1967], [L.W. Corbett; 1967] sus densidades determinadas directamente por resonancia magnética molecular (*NMR*). [J.W Ramsey, F.R. Mc Donald, and J.C. Petersen; 1967]

Las concentraciones de Carbono aromático determinadas por NMR presentan un contenido típico de 25 a 35 por ciento de asfalto.

La estructura molecular del hidrocarburo es muy compleja por los heteroatomos de azufre, nitrógeno, y oxígeno que están presentes en una combinación suficiente, uno o más heteroatomos por molécula pueden estar presentes. Estos pueden estar incorporados dentro de los componentes, o en un grupo químico funcional más discreto junto a estos componentes.

Los heteroatomos, particularmente nitrógeno y oxígeno, y el denominado sistema aromático contribuye considerablemente a la polarización de las moléculas que provocan las principales fuerzas de cohesión y las propiedades físicas. [J.W Ramsey, F.R. Mc Donald, and J.C. Petersen; 1967]

A continuación se presentan tres de los métodos que se utilizan



*Figura 2.2.1-a; Separación parcial empleando solventes  
(Schaweyer y Traxler, 1953)*

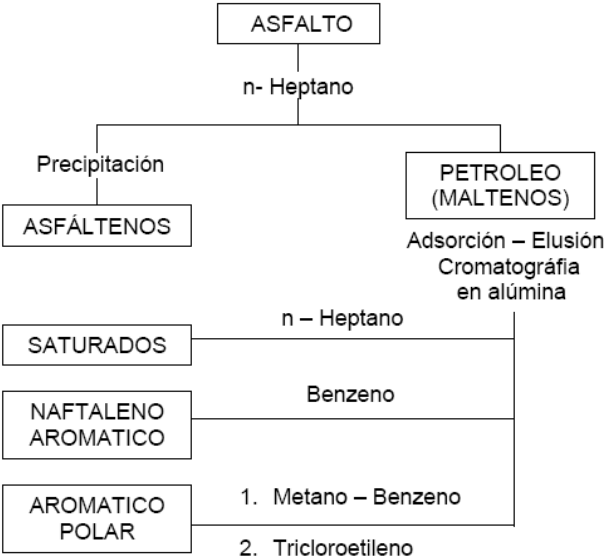


Figura 2.2.1-b; Selección absorción (Corbett, 1969)

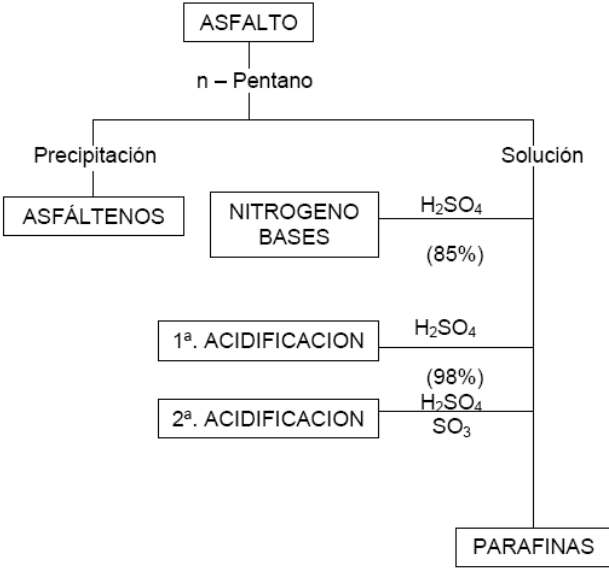


Figura 2.2.1-c; Precipitación Química (Rostler y Stenberg, 1962)

### *2.1.2 Propiedades Físicas del asfalto*

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción, y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

#### *2.1.2.1 Durabilidad.*

Es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto.

Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la misma durabilidad del asfalto.

Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar el comportamiento del asfalto frente al envejecimiento en horno. Estas son la Prueba de Película delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO). [Asphalt Institute; 1992]

#### *2.1.2.2 Adhesión y cohesión.*

Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión; más bien, examina una propiedad del asfalto considerada por algunos como relacionada con la adhesión y la cohesión. En consecuencia, el ensayo es del tipo “califica – no califica”, y solo puede indicar si la muestra es, o no, lo suficiente dúctil para cumplir con los requisitos mínimos. [Asphalt Institute; 1992]

#### *2.1.2.3 Susceptibilidad a la temperatura.*

Los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura o tasa de variación de viscosidad con la temperatura, y es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizado pues indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado, y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la carretera.

Debe entenderse que es de vital importancia conocer las características de viscosidad de un asfalto en todo el rango de temperatura. Debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficiente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado. [Asphalt Institute; 1992]

#### *2.1.2.4 Endurecimiento y envejecimiento.*

Los asfaltos tienden a endurecerse aumentando sus características de consistencia en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas de agregado).

En el proceso de elaboración de la mezcla el asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas mientras se encuentra en el tambor mezclador. Esto hace que la oxidación y el endurecimiento más severo ocurran en esta etapa de mezclado. El margen de viscosidad del material original (antes de la Prueba de Película Delgada en Horno rotatorio – RTFO) es mucho menor que el margen obtenido después del calentamiento.

No todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento, y así poder minimizar el endurecimiento. Estos ajustes incluyen mezclar el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible, y durante el tiempo más corto que pueda obtenerse en la práctica.

El endurecimiento del asfalto continúa en el pavimento después de la construcción. Una vez más, las causas principales son la oxidación y la polimerización. Estos procesos pueden ser retardados si se mantiene, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos (de aire) interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas de agregado. [Asphalt Institute; 1992]

## **2.2 Aplicaciones asfálticas**

### *2.2.1 Mezclas asfálticas en caliente*

Es el producto resultante de la mezcla en caliente y en una planta adecuada, de uno o más agregados pétreos y cemento asfáltico tradicional o modificado, el cual se esparce y compacta en caliente.

#### *2.2.1.1 Tipos de Mezclas*

Las mezclas en caliente pueden ser utilizadas como capas nivelantes, bases o rodado. Dependiendo de la granulometría del agregado empleado, pueden ser mezclas de graduación densa o graduación abierta. Los distintos tipos de mezcla que conforman un pavimento, las que pueden ir por separado o en combinación, son las siguientes.

- *Capa de Rodados;* Es la capa expuesta al tránsito vehicular, compuesta de agregados seleccionados y cementos asfálticos tradicionales o modificados, diseñada para resistir el desgaste y conservar las propiedades antideslizantes con estándares mínimos de seguridad y confort para el usuario. Dentro de esta categoría podemos distinguir:
  - *Mezclas densas.* Se utilizan áridos de granulometría continua, partiendo desde un tamaño máximo hasta el filler, de manera de tener un buen control del contenido de huecos, logrando de esta forma una alta estabilidad.

- *Mezclas drenantes.* Se utilizan áridos de granulometría discontinua con bajo contenido de finos, obteniéndose una mezcla con un alto porcentaje de huecos, lo que facilita el drenaje del agua, mejora la resistencia al deslizamiento y reduce el ruido.
- *Mezclas SMA.* Se utilizan áridos de granulometría discontinua con un bajo contenido de las fracciones intermedias y alto contenido de fracciones gruesas, obteniéndose una mezcla con un adecuado porcentaje de huecos y buena trabazón mecánica entre las piedras, lo que permite un mayor contenido de asfalto de alta viscosidad o modificado, que las mezclas densas.

Normalmente se incorporan fibras para estabilizar la mezcla. Este tipo de carpeta posee una alta estabilidad, resistencia a la fatiga y envejecimiento, buen drenaje lateral del agua, resistencia a los deslizamientos y reducción del ruido.

- *Capa intermedia;* Comúnmente se conoce con el nombre de 'Binder' y se ubica entre la base asfáltica y la capa de rodado. Esta mezcla actúa como capa estructural y se fabrica con áridos de mayor tamaño que los usados en la capa de rodado, pudiendo ser éstos de granulometría abierta o cerrada, dependiendo del diseño del pavimento.

- *Base asfáltica;* Se ubica inmediatamente sobre la base granular imprimada, pudiendo ir sobre ella la capa intermedia o la capa de rodado, dependiendo del diseño del pavimento, actuando como capa de soporte. Se fabrica generalmente con áridos de granulometría abierta y de graduación gruesa.

Dependiendo del proyecto, según la zona de aplicación de la mezcla, los cementos asfálticos que normalmente se emplean son del tipo C.A. 60/80, C.A. 80/100, C.A. elastomérico del tipo Bitucet 60/80 y Mobil Multigrado AG. Los cementos asfálticos C.A. 60/80 y C.A. 80/100 se ocupan preferentemente en las capas inferiores; en la capa de rodado además de éstos, se usan también asfaltos modificados con y sin elastómeros, del tipo Bitucet 60/80 o Mobil Multigrado AG.[12]

La penetración más adecuada que debe poseer el cemento asfáltico, depende de varios factores:

- Tipo de aplicación.
- Características y graduación del agregado pétreo.
- Condiciones climáticas.

Las viscosidades más altas, que se obtienen a menores temperaturas, para los distintos tipos de cemento asfáltico, deben relacionarse de modo de asegurar un cubrimiento adecuado del agregado pétreo y la trabajabilidad apropiada para mezclar, esparcir y compactar la mezcla. La banda de viscosidades para la determinación de temperaturas de calentamiento de los cementos asfálticos, para un correcto cubrimiento del agregado durante el proceso de mezclado, varía entre 1.6-2.0 ps. Para el C. A. 60/80 esta temperatura varía entre 145 y 155°C; en los asfaltos modificados Bitucet 60/80 y Mobil Multigrado AG esta temperatura es superior a la mencionada en alrededor de 10°C a 15°C.

La temperatura de compactación recomendable, obtenida de la relación viscosidad-temperatura, es aquella en que el cemento asfáltico tiene una viscosidad entre 2.8-3.2 ps. Para

el C. A. 60/80 y el Mobil Multigrado AG esta temperatura es del orden de 140°C y 150°C respectivamente para iniciar la compactación.

### *2.2.2 Tratamientos superficiales*

#### *2.2.2.1 Tratamiento superficial simple*

Es una aplicación de asfaltos recubierta con agregado generalmente de tamaño nominal 10 a 25 mm. También puede ser arena de grano uniforme. Este tipo de tratamiento no aporta estructura al pavimento y sólo lo protege, otorgándole gran resistencia a la acción abrasiva del tránsito, a la vez que lo impermeabiliza.

#### *2.2.2.2 Tratamiento superficial doble o múltiple*

Consiste en dos o más aplicaciones de emulsión asfáltica alternadas con aplicaciones de agregados pétreos de diferentes tamaños, alcanzando hasta 25 mm. de espesor total. Son económicos, fáciles de construir y de larga duración. Pueden efectuarse sobre pavimentos asfálticos existentes o sobre una base granular estabilizada en caso de pavimentos nuevos. El agregado pétreo para cada aplicación debe ser granulométricamente lo más uniforme posible y el tamaño máximo de cada aplicación sucesiva debe estar en proporción 2:1 respectivamente

Actualmente en Chile sólo se utilizan emulsiones asfálticas de quiebre rápido, tales como:

- Catiónicas del tipo CRS-1 o CRS-2.
- Aniónicas del tipo RS-1 o RS-2.
- Elastoméricas Catiónicas del tipo Bituflex R.

En algunos países aún se utilizan cementos asfálticos, pero esto ocurre cada vez menos debido a inconvenientes que se presentan durante la ejecución de la faena, tales como: Rápido enfriamiento del ligante aplicado lo que dificulta un buen cubrimiento del agregado y el posterior desprendimiento de éste; dificultad en lograr tasas de riego bajas, con el consecuente riesgo de exudación posterior; empleo sólo de agregados secos, además de un mayor costo económico por el calentamiento del producto, tanto para su aplicación como en el almacenamiento.[12]

Se concluye entonces que las emulsiones asfálticas son el ligante más adecuado para la confección de tratamientos superficiales, presentando además las siguientes ventajas:

- Almacenamiento del producto en frío.
- Permiten trabajar con agregados húmedos.
- Buen cubrimiento de los agregados empleados.
- No existe riesgo de inflamación del producto.

Las cantidades de material (agregado pétreo y emulsión asfáltica) por metro cuadrado para la ejecución de la capa, deben ser determinadas por proyecto y verificadas en forma práctica en terreno.

Las temperaturas de aplicación de las emulsiones asfálticas, deberán ser las que permitan la ejecución dentro del rango de viscosidad de 25 a 100 SSF. [12]

**CAPITULO 3**  
**ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO EN SU**  
**PROCESO DE ENVEJECIMIENTO**



### **3 ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO EN SU PROCESO DE ENVEJECIMIENTO**

#### **3.1 Oxidación del asfalto**

##### *3.1.1 Introducción*

La oxidación, en cuanto a la industria de mezcla caliente se refiere, es un fenómeno presente e inevitable en todo el proceso de mezclado en caliente al que no se da la importancia que corresponde. Sin embargo, la oxidación del asfalto, junto con los factores que gobiernan su tasa de evolución y su efecto en la mezcla y en la durabilidad de la obras.

Para poder describir la oxidación del asfalto de modo apropiado, es necesario recurrir a lo ya visto sobre la naturaleza del asfalto. Como se describió en el capítulo 2 el asfalto básicamente es un material hidrocarburoado compuesto por micro moléculas de hidrógeno y carbono. Desafortunadamente, no es posible dar la fórmula exacta del asfalto puesto que el mismo es un residuo complejo que se produce al refinar petróleo crudo. Si se determina la fórmula química de un tipo específico de asfalto que se tiene disponible, la misma indudablemente variará cuando se utilice un petróleo crudo diferente, por lo cual la misma no será válida para todas las situaciones.

Por lo tanto, no es posible escribir ecuaciones químicas que describan la reacción del asfalto con el oxígeno de modo preciso. La oxidación es el proceso de combinar o de causar la combinación de una sustancia dada con oxígeno. Un ejemplo interesante es el fenómeno de corrosión que afecta al hierro producida por la combinación del hierro con el oxígeno, así de forma similar el envejecimiento del asfalto con la reducción simultánea en los niveles de penetración es resultado de la combinación del asfalto con oxígeno liberando agua.

La combinación de asfalto y oxígeno produce resultados que generalmente pueden predecirse usando las reacciones conocidas del oxígeno con moléculas pequeñas de hidrocarburos. Las conclusiones siguientes se basan en tal tipo de conocimiento químico, al igual que el conocimiento práctico y la experiencia en la industria de mezcla caliente.

1. Cuando el asfalto se expone al oxígeno, reacciona químicamente (se oxida) a prácticamente todas las temperaturas.
2. La tasa de reacción es extremadamente sensible a la temperatura, doblándose por cada 14° que la temperatura suba por encima de los 93°C. Por ejemplo, la reacción entre el asfalto y el oxígeno se produce dos veces más rápidamente a 149°C que a 135°C. La reacción se produce cuatro veces más rápidamente a 163°C que a 135°C
3. Puesto que el oxígeno es un gas y el asfalto un líquido, cuanto mayor sea la superficie de asfalto expuesta al aire, tanto mayor será la cantidad de reacción química. Básicamente, la reacción se produce en la frontera de la superficie
4. La reacción química se ve afectada por el tiempo de exposición al oxígeno.
5. La radiación solar junto con la presencia de partículas metálicas también causa el deterioro acelerado del asfalto.

La industria de mezcla caliente se preocupa por la oxidación del asfalto en cuatro puntos: en el sistema de manejo de líquido de la planta; en el proceso de mezclado; en la superficie de la carretera y del pavimento; y en las tolvas de mezcla caliente. [27]

### *3.1.2 Oxidación en el sistema de manejo de líquido*

Cuando se produce oxidación en el sistema de manejo de asfalto líquido, la misma recibe el nombre de coquización. La coquización en algunos casos representa un problema grave y en otros una molestia menor.

La oxidación (o coquización) se produce cuando se permite que el nivel de asfalto líquido descienda por debajo de la superficie calentadora de los serpentines o elementos térmicos

Cuando el serpentín sobresale del nivel de líquido, el mismo está cubierto por una capa delgada de asfalto. El asfalto queda en contacto con el aire. El oxígeno presente en el aire se combina con el asfalto y se produce oxidación. Además, la oxidación se produce rápidamente. Los serpentines de aceite caliente trabajan a una temperatura más elevada que la del asfalto líquido. La película de asfalto que cubre la parte expuesta del serpentín se calienta a una temperatura más alta que lo normal. Esto acelera la oxidación. A medida que el asfalto que cubre el serpentín reacciona químicamente con el oxígeno, el mismo se endurece.

La masa endurecida de asfalto oxidado recibe el nombre de coque. Cada vez que el nivel de líquido en el tanque cubre el serpentín y luego vuelve a dejarlo descubierto, una película adicional de asfalto se pega al serpentín, aumentando el espesor del coque acumulado. [27]

### *3.1.3 Oxidación durante el mezclado*

Durante el proceso de mezclado en una planta dosificadora, el asfalto se bombea o se rocía en el interior del mezclador, en donde se mezcla con el agregado caliente

Las superficies de todas las rocas y partículas del agregado se recubren con una película delgada de asfalto. Si fuera posible distribuir cada superficie recubierta para formar una superficie plana continua, la misma formaría una zona enorme recubierta por una película de asfalto de aproximadamente 10 micrones de espesor. Por ejemplo, en una tonelada de mezcla caliente con 6% de asfalto líquido, la superficie del líquido que forma una película de 10 micrones de espesor cubriría 5330 m<sup>2</sup> ó 0,53 hectáreas. Obviamente, sobre esta gran superficie expuesta, el asfalto líquido se oxida rápidamente. En un mezclador se producen condiciones similares, lo cual resulta en una oxidación rápida, de hecho, es mucho más rápida que cuando el asfalto se guarda en un tanque. En un mezclador, se crea una superficie de tamaño enorme.

La exposición al oxígeno por volumen del asfalto se multiplica por un factor de mil o más. Durante el proceso de mezclado, el grado de penetración del asfalto normalmente cae de 86 a aproximadamente 65 (normalmente se usa asfalto con penetración de grado 85 a 100 en la parte central de los EE.UU.). La reacción no necesariamente continúa hasta que se agote el oxígeno en los espacios vacíos. Si las muestras (tomadas de la caja del camión directamente después del mezclado) se enfrían rápidamente, el proceso de oxidación se detiene y se observan caídas en el grado de penetración de aproximadamente 10 puntos.

Sin embargo, si las muestras se toman después que la mezcla ha sido transportada y vaciada en el pavimento (aproximadamente 1/2 a 1 hora después), se observa una reducción adicional de 10 puntos en el grado de penetración. La cantidad exacta de la reducción depende de muchos factores, tales como las temperaturas de mezclado, el tipo de mezcla, el tipo de asfalto, el tipo de agregado y el tiempo de mezclado.

El mezclado a temperaturas altas (177°C y superiores) y los tiempos de mezclado prolongados pueden perjudicar el producto final.[27]

#### *3.1.4 Oxidación de la mezcla en caliente en la carretera*

El asfalto vaciado en el pavimento generalmente se compacta a una densidad superior al 97%. La reducción de la tasa de oxidación es uno de los motivos por los cuales el diseño de la mezcla especifica una densidad alta y una cantidad baja de espacios vacíos. Aun en este caso, con el paso del tiempo y la exposición a los elementos del clima, el asfalto del pavimento lentamente empieza a reaccionar químicamente con el oxígeno presente en el aire. Cuando se vacía con un grado de penetración inicial de 60-65, el asfalto se oxida en un lapso de diez a quince años, hasta que su nivel de penetración llegue a 10-15. Al llegar a este punto, el pavimento se torna muy quebradizo, se agrieta gradualmente y se deteriora. La oxidación del asfalto de un pavimento ciertamente es muy lenta.

Esta lentitud se explica por que el asfalto queda protegido contra la exposición al oxígeno y usualmente se encuentra a temperaturas bajas. Las mezclas densas ayudan a prolongar la vida útil del asfalto porque impiden que el oxígeno penetre la mezcla y la deteriore por debajo de su superficie [27]

#### *3.1.5 Oxidación en las tolvas de almacenamiento de mezcla en caliente*

Hay dos tipos de tolvas de mezcla caliente que se han aceptado en la industria de mezcla de asfalto. La tolva de compensación, el tipo más antiguo, se utilizó por muchos años antes del desarrollo de la tolva de almacenamiento actual, desarrollada en 1966 para permitir almacenar la mezcla por más tiempo. El almacenamiento de la mezcla por tiempo prolongado se intentó en los primeros días de las tolvas de compensación (y desafortunadamente muchos operadores lo intentarían hoy día). La mezcla almacenada en estas tolvas se deteriora rápidamente debido a la oxidación. Los factores que causan oxidación durante el manejo del asfalto, el mezclado y en el pavimento están presentes continuamente en las tolvas de mezcla caliente. Estos factores son temperaturas altas, superficies grandes expuestas del material y el tiempo.

El “tiempo” es el lapso durante el cual la mezcla queda expuesta a un entorno que contiene oxígeno. Cuanto más largo sea el tiempo, tanto mayor será la oxidación. La tasa de oxidación se ve afectada principalmente por la temperatura y la exposición al oxígeno. Muchos operadores suponen que es necesario colocar la mezcla en la tolva a temperaturas elevadas para compensar el enfriamiento de la misma. Esta suposición es incorrecta debido al bajo grado de conductividad térmica de la roca y el asfalto. Las temperaturas altas no sólo brindan poca ayuda para mantener caliente la mezcla, sino que también propician la oxidación. 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

Obviamente, se debe almacenar la mezcla a la temperatura más baja posible para reducir la tasa de oxidación.

Un agente de oxidación posiblemente más sutil que el tiempo o la temperatura es la “exposición al oxígeno”. Decimos sutil por las muchas maneras en que puede producirse la exposición. El oxígeno penetra en la tolva por agrietaciones en sus paredes, por la abertura superior de la misma y por la compuerta de descarga y penetra la mezcla por sus espacios vacíos.

El oxígeno del proceso de mezclado también es transportado en los espacios vacíos de la mezcla hacia la tolva después del proceso de mezclado.

El oxígeno que penetra en la tolva por su abertura superior y por la abertura de descarga inferior debe eliminarse si la mezcla va a almacenarse por un lapso algo prolongado. El grado de exposición de la mezcla al oxígeno depende del sistema de sellado en uso y de la densidad de la mezcla. Una mezcla de arena y asfalto muy densa es prácticamente impenetrable por el aire y se oxida únicamente en la parte inferior de la abertura de descarga y en la parte superior de la tolva. Un material base con más espacios vacíos permite que el oxígeno penetre en la mezcla y propicia un alto grado de oxidación. El grado de oxidación depende de los vacíos en la mezcla o del grado de exposición de la mezcla al oxígeno. Aun una mezcla de arena y asfalto, con su alto grado de densidad, se oxida significativamente si pasa un tiempo suficientemente largo.

La oxidación avanza como un cáncer a través de la mezcla con el paso del tiempo. Los operadores frecuentemente hallan que la mezcla oxidada puede romperse abriendo la compuerta de descarga y abriendo un agujero con un tubo. Esta mezcla oxidada o coquizada representa una mezcla de 15 años de edad con un grado de penetración de aproximadamente 10. El riesgo que se corre al abrir un agujero es que la mezcla que está sobre la parte endurecida que se rompe puede tener las propiedades de un asfalto de 8 a 10 años de edad con un grado de penetración de 30 a 40. Esta mezcla con grado de penetración de 30 a 40 fluye fácilmente de la tolva una vez que se quita la mezcla oxidada. Si se usa el material de grado 30-40 de penetración, la misma produce un pavimento que se torna quebradizo rápidamente y se deteriora después de una corta vida útil.

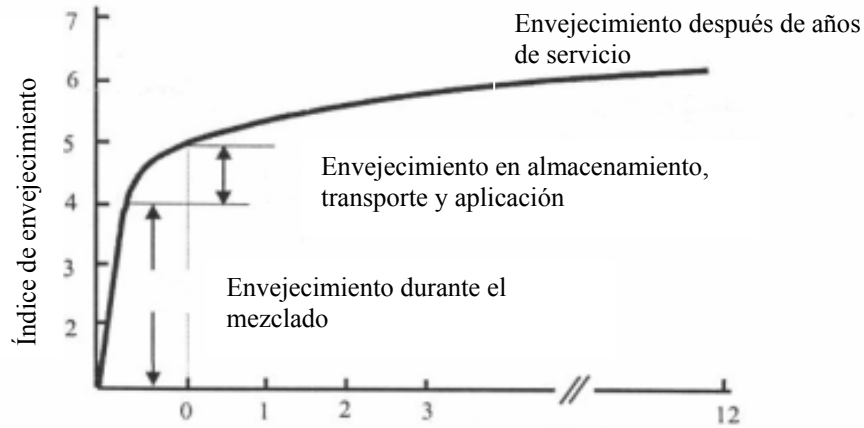
Como se puede ver de este ejemplo ideado en EE.UU. toda la oxidación es resultado del oxígeno introducido en la mezcla durante el proceso de mezclado en el mezclador.

La oxidación del asfalto puede representar ya sea una molestia o un problema crítico para el productor de mezcla caliente. La oxidación puede causar tiempo improductivo y puede afectar la calidad de la mezcla. El comprender las causas, los efectos y las soluciones debe ser parte del conocimiento básico de los profesionales relacionados con el tema.

Varios factores influyen en la oxidación: el manejo de asfalto líquido, la superficie del pavimento y en los sistemas de tolvas de compensación y de almacenamiento. La oxidación se produce cuando el asfalto queda expuesto al oxígeno presente en la atmósfera. Su efecto aumenta con el paso del tiempo, y su tasa de actividad se acelera con el calor.

La oxidación puede controlarse limitando la exposición del asfalto al oxígeno, reduciendo el tiempo de manejo y limitando las temperaturas en donde sea posible. [27]

Un Resumen de lo anterior se muestra en el grafico 3.1-a.



$$\text{Índice de envejecimiento} = \frac{\text{Viscosidad Absoluta (Asfalto después de ensayo TFO)}}{\text{Viscosidad Absoluta (Asfalto original)}}$$

*Grafico 3.1-a; Curva de Envejecimiento del Asfalto, Cortesía EXXON MOBIL, Lubricants & Petroleum Specialties.*

De lo anterior necesitamos mostrar como ocurre el proceso de envejecimiento a nivel físico y químico, y deducir soluciones útiles, para disminuir esta tasa de oxidación. Esto se analizará en el próximo capítulo.

### **3.2 Proceso de Envejecimiento**

El ligante asfáltico se ajusta en cuanto a composición y propiedades para cumplir con especificaciones técnicas que rigen en algunos pavimentos asfálticos, la elección del ligante esta estrechamente relacionado con las solicitudes que se esperan para las distintas capas, de ahí, y como se analizó en el capítulo anterior los cambios químicos o físicos de su estructura interna en el proceso constructivo son considerados perjudiciales. De este hecho se desprende el concepto de durabilidad del asfalto atendiendo al grado de resistencia de este a los cambios antes mencionados.

En la medida que el asfalto envejece, este se vuelve más rígido, por lo cual pierde parte de sus capacidades para absorber energía por deformación, y a su vez, pierde su capacidad para deformarse y absorber estados tensionales. El envejecimiento tiene como origen cambios particularmente químicos en su estructura interna que ocurren a nivel molecular, como así mismo, cambios físicos: fisuración, estructura de poros.

#### *3.2.1 Envejecimiento Físico*

Se define el término envejecimiento físico, a los cambios a nivel intermolecular que producen una rigidización del asfalto, aumentando el carácter elástico en desmedro del viscoso.[3]

El origen de estos cambios físicos respecto a la estructura intermolecular del asfalto se pueden ordenar como:

- *Envejecimiento Térmico.* Los asfaltenos y resinas que conforman el asfalto adoptan una estructuración semejante a un cuerpo sólido a temperatura ambiente.

El fenómeno de rigidización térmica del asfalto ha sido asociado con la temperatura de transición de este material (Theneoux, 1983), el que a diferencia de materiales cristalinos, presenta un rango de temperaturas de transición. La temperatura de transición está asociada a un reordenamiento de la configuración de las estructuras de cadenas moleculares, lo cual produce una pérdida de movilidad molecular, y por lo tanto, una progresiva rigidización del material.

- *Envejecimiento Mecánico.* Los esfuerzos mecánicos pueden producir empaquetamiento de moléculas reduciendo la movilidad relativa entre ellas a nivel macro.
- *Estructuración molecular en la vecindad del agregado.* Moléculas de asfalto pueden reestructurarse en la vecindad de la superficie del agregado, alterando las propiedades del asfalto en esta zona.
- *Endurecimiento por volatilización.* Según Blokker y Van Horn, una de las causas del endurecimiento físico, es la evaporación del material volátil. Este depende de la naturaleza y cantidad de los componentes volátiles y de la condición de exposición, principalmente de la temperatura y espesor de la película.

### 3.2.2 Envejecimiento Químico

Dada las características complejas de la composición química del asfalto, existen distintas teorías respecto a los factores que alteran el proceso de envejecimiento químico de los cementos asfálticos, pese a que no hay consenso unánime en cuanto al origen de tal envejecimiento de los ligantes, este fenómeno se explicaría como resultado de:

- Reacciones de oxidación y polimerización (Thurston y Knowles 1941, Blokker y Van Horn 1959, Wright y Campell 1964, Rostler 1964, Tompkins 1972.)
- Reticulación que se acelera por temperaturas altas.
- Efecto de la radiación solar (UV)
- Difusión de oxígeno.
- Volatilización de compuestos de pesos moleculares pequeños (Efecto Físico.)

## 3.3 Estudio del envejecimiento a escala de laboratorio

### 3.3.1 Introducción

El fenómeno de envejecimiento como se ha descrito anteriormente ha sido objeto de numerosos estudios. Sin embargo, la mayoría de estos se orientan directamente hacia los ligantes de forma aislada, evaluándose el “factor envejecimiento” mediante la caracterización

de los mismos a partir de ensayos de película delgada (TFOT, RTFOT, Rotavapor) que tratan de simular en forma acelerada algunos mecanismos que influyen en este proceso de deterioro, como la volatilización de las fracciones livianas y la oxidación. Estos métodos no permiten predecir cabalmente el comportamiento del material durante su etapa en servicio, pues la interacción árido-ligante y la influencia del relleno mineral y de otros eventuales aditivos alteran significativamente las cualidades de la fase bituminosa en el conjunto.

La utilización de ligantes modificados con polímeros en la industria vial ha abierto otras interrogantes acerca de la validez de estos estudios y del envejecimiento de los ligantes. Este panorama ha ido cambiando recién en los últimos años ante la aparición de nuevas técnicas que tratan de reproducir cómo actúa y qué procesos de transformación sufre el asfalto cuando se degrada por envejecimiento en las mezclas bituminosas; tales metodologías contemplan no sólo las características intrínsecas de los ligantes, sino también sus propiedades como parte integrante de un conjunto con los áridos y el filler. Existen estudios que se abocaron al desarrollo de ensayos y modelos que permiten una mejor evaluación del envejecimiento de los ligantes *en función de las propiedades que proporcionan a las mezclas*; por esta razón, estos procedimientos reciben el nombre de “*funcionales*”.

La propiedad fundamental de las mezclas bituminosas para carreteras es su capacidad de deformarse sin romperse al absorber esfuerzos relativamente elevados y repetidos; éste es el principio de funcionamiento de los pavimentos flexibles. La medida esencial para tal comportamiento es la resistencia al corte, con sus dos componentes: la fricción y la cohesión. El factor friccional se analiza generalizando los postulados de la mecánica de suelos al estudio de las mezclas asfálticas, puesto que los áridos conforman una estructura granular; en cambio, la cohesión debe evaluarse a partir de las propiedades reológicas del medio continuo presente en la mezcla, el sistema filler-betún (“mástico”), que define su comportamiento ante las sollicitaciones mecánicas. Por tales razones, es más apropiado pensar en las cualidades que el *mástico* proporciona a la mezcla, en lugar de considerar aisladamente al ligante. La incorporación de filleres a las mezclas permite mejorar las propiedades del medio continuo bituminoso: espesar el asfalto con el fin de modificar su fluir viscoso, mejorar la adherencia y proveer de un mayor espesor a la película envolvente que recubre a los áridos, permitiendo retardar el envejecimiento de la mezcla.

Pero más allá de los criterios que rigen el diseño de las mezclas asfálticas, su formulación debería llevar a obtener pavimentos con mejores prestaciones durante el mayor tiempo posible, para lo cual reviste capital importancia la optimización de su resistencia al envejecimiento. La realidad indica, sin embargo, que esta temática aún no ha sido considerada convenientemente por las prácticas de diseño de las mezclas bituminosas.

### *3.3.2 Modelos que predicen el envejecimiento de un pavimento flexible*

El estudio de modelos que interpreten el endurecimiento por envejecimiento de ligantes y de las mezclas asfálticas, ha sido tema de investigación desde hace más de cinco décadas (Vallerga et al.(1957); Hveem et al.(1963)). El entendimiento y la simulación en laboratorio de este fenómeno, sería el inicio de la fabricación de mezclas asfálticas de alta durabilidad.

Por lo anterior muchas de las investigaciones en el área de pavimentos giran entorno a cómo modelar o simular las condiciones ambientales, y condiciones de carga a las que se ve afectado un pavimento durante su vida útil. Es así como se ha logrado realizar grandes avances en el área del envejecimiento de mezclas asfálticas. Cabe destacar el estudio realizado por el SHRP (Programa Estratégico de Investigación de carreteras) desarrollado en

los Estados Unidos entre 1987 y 1993, este programa dio como resultado el sistema SUPERPAVE. (Superior Performance Pavements), programa que incluye nuevas especificaciones para asfalto y agregado, un nuevo método de diseño de mezclas asfálticas en caliente y un modelo de predicción del comportamiento de pavimentos asfálticos.

A pesar del gran avance que existe hoy en día en el área de simulación de envejecimiento en laboratorio de ligantes y mezclas asfálticas, estas técnicas no consideran todos los factores que influyen el envejecimiento en campo de las mezclas (humedad, temperatura ambiente, régimen de precipitaciones, régimen de radiación solar).

Además de lo visto en los capítulos anteriores se sabe que el envejecimiento por oxidación cambia la estructura molecular de los asfalto creando moléculas más grandes y polares (Husain & Anderson, 1994). Tales cambios moleculares alteran las propiedades reológicas de las mezclas asfálticas, tales como el módulo ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ). Para evaluar el efecto del envejecimiento es necesario medir las propiedades viscoelásticas de muestras envejecidas y muestras originales. El efecto general del envejecimiento es un incremento del módulo y una disminución del ángulo de fase.

Un elemento fundamental para comprender y predecir el desempeño a largo plazo de mezclas asfálticas es conocer la evolución de su envejecimiento por oxidación y el consecuente impacto en las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla. Analizar como los asfaltos sufren durante el tiempo de mezclado y servicio este proceso de oxidación debido a factores como temperatura, presión y tiempo. Adicionalmente, ver como afecta el envejecimiento por oxidación en particular para cada asfalto mediante ensayos de caracterización. 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 tener en cuenta esta resistencia a la hora de seleccionar asfaltos para pavimentos y predecir su comportamiento en el largo plazo.

### 3.3.2.1 Modelo de Domke (1997)

Domke, Liu, Davison, Bullin & Glover (1997) proponen un modelo numérico para explicar 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:

- Tasa de formación de carbonilos.

Esta definida por la ecuación:

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

(Ec. 3.3.5.1-a)

Por medio de esta expresión se puede determinar la velocidad de formación del grupo carbonilo ( $r_{ca}$ ), que básicamente es lo que evidencia el proceso de oxidación, donde  $A$  = 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,  $\alpha$  = Orden de reacción y  $P$  = Presión.

- *Cantidad de carbonilos.*

$$CA = CA_0 + r_{CA}t \quad (\text{Ec. 3.3.5.1-b})$$

Esta expresión representa la cantidad de grupos carbonilo presentes en una mezcla asfáltica, donde,

$CA$  = Cantidad de grupos carbonilo.

$CA_0$ = Cantidad de grupos Carbonilo para  $t=0$ .

$r_{CA}$  = Velocidad de formación de grupos carbonilo.

$t$  = Tiempo.

- *Viscosidad.*

$$\eta = m e^{\left[ \left( CA + AP^\alpha e^{(-E/RT)} \right) t \right] HS} \quad (\text{Ec. 3.3.5.1-c})$$

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 está 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  $\ln G^*$  Vs.

El coeficiente de susceptibilidad es un valor característico 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.

- *Parámetros  $A$ ,  $E$ ,  $\alpha$  y  $HS$ .*

Como se ha analizado en los numerales anteriores los parámetros  $A$ ,  $E$ ,  $\alpha$ , y  $HS$  son propios de cada tipo de asfalto y/o las condiciones en que se encuentre la mezcla. Para poder implementar la ecuación (Ec. 3.3.5.1-c) y de esta forma determinar el cambio en las propiedades reológicas de una mezcla asfáltica por efecto de la

oxidación, es necesario previamente calibrar el modelo antes mencionados para las mezclas estudiadas.

La determinación de los parámetros  $A$ ,  $E$ ,  $\alpha$  y  $HS$  debe partir de una comparación de las propiedades físicas y químicas de mezclas 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.

En el ANEXO A se muestra un desarrollo de este modelo con datos referentes a un estudio realizado en la red vial de Bogotá.

### 3.3.2.2 Determinación de Energía de Activación en cementos asfálticos

El flujo viscoso en cualquier líquido puede considerarse como un proceso que requiere de un cierto nivel de energía térmica en el cual las moléculas tienen que superar una barrera de energía para desplazarse a un sitio adyacente. Al incrementarse la temperatura, también se incrementa la energía térmica de las moléculas, así como los sitios vacantes o “huecos” en el líquido. En 1936, Henry Eyring, describió este modelo de la barrera de energía de activación de flujo (Eyring, 1936). Cuando fluye un líquido, son las capas de moléculas líquidas que resbalan una sobre otra para superponerse a las fuerzas intermoleculares que causan resistencia al flujo. Fue mediante este modelo que Eyring afirmó que es posible modelar la relación entre viscosidad y temperatura utilizando la ecuación de Arrhenius:

$$\eta = Ae^{\frac{E_f}{RT}} \quad (\text{Ec.3.3.5.2-a})$$

Donde  $\eta$  es la viscosidad del fluido,  $T$  es la temperatura en grados Kelvin,  $A$  es el factor constante,  $E_f$  es la energía de activación de flujo, y  $R$  es la constante universal de gas [8.314 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] (Ward y Hadley, 1993; Painter y Coleman, 1997). Es de mayor utilidad expresar la ecuación (1) de la siguiente manera:

$$\ln \eta = E_f / RT + \ln A \quad (\text{Ec. 3.3.5.2-b})$$

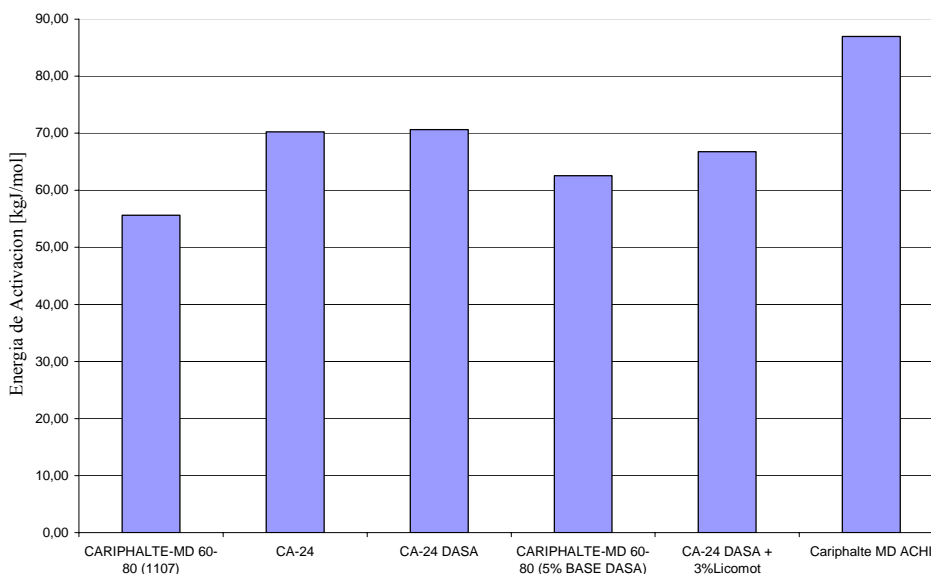
Graficando  $\ln \eta$  en relación con  $1/T$ , rinde los valores de la pendiente de  $E_f/R$ . El concepto de energía de activación fue aplicado recientemente al estudio de ligantes asfálticos y mezclas asfálticas (Maze, 1996; Partl y Francken, 1998; Pellinen, Witczak y Bonaquist, 2002). Maze midió la energía de activación en ligantes modificados con EVA y sin modificación con viscosimetría rotacional. La energía de activación promedio obtenido para el ligante modificado con EVA fue de 67 kJ/mol (Maze 1996). La energía de activación medida por Pellinen et al. de mezclas sin modificación fue de 205 kJ/mol y la de mezclas modificadas fue de 202 kJ/mol (Pellinen, Witczak y Bonaquist, 2002).

En este estudio, se utilizó la viscosimetría rotacional para determinar la energía de activación de flujo de ligantes asfálticos modificados y sin modificación, provenientes de diferentes crudos, utilizando un viscosímetro rotacional Brookfield. La dependencia de la viscosidad en función de la temperatura se permite obtener la energía de activación de flujo (ecuación de Arrhenius.) La energía de activación de flujo determinada de esta manera se uso

para catalogar la susceptibilidad de los ligantes a la temperatura y mostrar el grado de envejecimiento de estos.

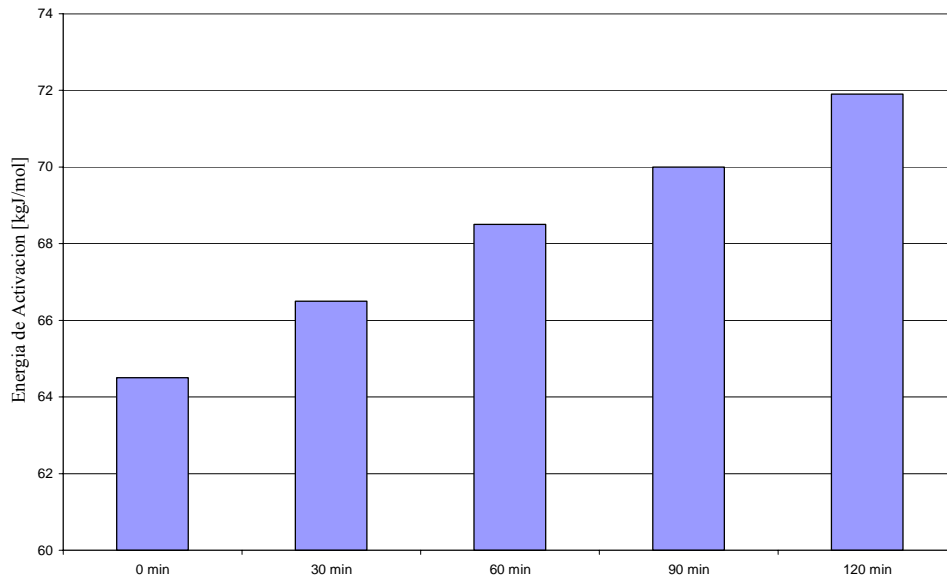
Entre los factores que afectan la energía de activación, tenemos:

- *Tipo de asfalto.* El Grafico 3.3.5.2-a, muestra los efectos obtenidos de los diferentes crudos en referencia a la energía de activación de flujo. Se observa que el ligante tiene su energía de activación de flujo que muestran diferencias significativas. El asfalto Cariphalte MD ACHI es el de mayor energía de activación. Los que indicaría una cierta relación entre la estructura molecular y la energía de activación.



*Grafico 3.3.5.2-a; Energía de Activación de flujo para los distintos tipos de asfaltos estudiados ( Estado Original)*

- *Envejecimiento.* Los ligantes asfálticos envejecidos muestran una energía de activación más alta. Si se someten a un ensayo PAV o de RTFOT, la energía de activación es por lo menos de 10 kJ/mol, mayor que la del ligante original. La oxidación incrementa la cantidad de moléculas polares en el ligante asfáltico. La concentración elevada de moléculas polares incrementa las fuerzas intermoleculares que conducen a interacciones más fuertes. Estas interacciones dentro del ligante asfáltico resultan en una mayor resistencia al flujo lo que tiene relación con una mayor barrera de energía de activación de flujo. Según el grafico 3.3.5.2-b la energía de activación de flujo de este ligante puede atribuirse directamente a una mayor concentración de fracciones polares de asfaltos.



*Grafico 3.3.5.2-b; Energía de Activación de flujo para asfaltos envejecidos según método RTFOT*

- *Tipo de polímero.* Los diferentes modificadores poliméricos introducen en los ligantes distintos comportamientos que se reflejan en las diferentes Energías de Activación de flujo. Esto indica que el tipo de polímero tiene influencia sobre la energía de activación de flujo. Los asfaltos modificados químicamente y los modificados por oxidación con aire registran energías de activación de flujo más elevadas.

- *Influencia del contenido de polímero.* Cuando el contenido de polímero es menor al 4%, la energía de activación de flujo permanece fija a 10 kJ/mol. Cuando el contenido del polímero es mayor al 4%, la energía de activación de flujo disminuye significativamente; del 4% al 14% la energía de activación cambia de 68 kJ/mol a solamente 44 kJ/mol. Cuando el contenido de polímero está por encima del valor crítico, la energía de activación de flujo del asfalto tiene mayor dependencia al contenido de polímero. Puede haber una concentración crítica de polímero que cambia la naturaleza de la interacción entre los componentes de los asfaltos y polímeros. En comparación con el polímero EVA, el polímero SBS muestra una disminución mucho mayor en la energía de activación a la que se reportó anteriormente (Maze 1996). Esto es indicativo de que tanto el contenido como el tipo de polímero influyen la interacción entre el ligante asfáltico y los aditivos poliméricos. Se requiere de mayores estudios para comprender el impacto del contenido de polímero sobre la energía de activación de flujo. [20]

### *3.3.2.3 Método universal de caracterización de ligantes (UCL)*

El Método universal de caracterización de ligantes (UCL) fue desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña por los doctores Pérez Jiménez y Miró Recasens. Basado en la aplicación del ensayo Cántabro, es un procedimiento directo y sencillo que evalúa las propiedades funcionales del ligante a partir de la determinación del grado de cohesión que proporciona a una mezcla patrón y de la observación de cómo estas propiedades varía con la temperatura, la acción del agua y del envejecimiento. Es una metodología de fácil ejecución y que ofrece una novedosa herramienta para clasificar y cotejar los distintos betunes que podrían utilizarse en una determinada obra de pavimentación, pues permite diferenciar el comportamiento de ligantes, incluso aquellos que poseen propiedades similares según la

caracterización tradicional y, además, manifestar las diferencias entre diversos betunes-polímero entre sí, y entre éstos y los convencionales.

Se dió a este procedimiento el nombre de universal por ser aplicable a cualquier betún. El principio del mismo es comparar directamente las respuestas de estos materiales como parte integrante de una mezcla asfáltica, exaltando sus diferencias relativas y las características del proceso en cada caso. Se evalúan cuatro propiedades funcionales que se les reconoce a los ligantes y que afectan al comportamiento de las mezclas bituminosas: cohesión, susceptibilidad térmica, adhesividad y resistencia al envejecimiento.

Se fabrica una mezcla patrón abierta, sin filler ni finos, con unos áridos patrón. La granulometría está constituida por áridos con tamaños comprendidos entre los tamices N°4 y N°30. Se elaboran probetas Marshall siguiendo el criterio de equiviscosidad de los ligantes para la selección de la temperatura de moldeo. Las probetas se someten a diferentes condiciones (en seco, tras inmersión, a distintas temperaturas y períodos de envejecimiento) y son ensayadas al Cántabro (NLT-352y NLT-362). El ensayo Cántabro de pérdidas por desgaste consiste en someter una probeta Marshall a un efecto abrasivo mediante el uso del tambor de la máquina de Los Ángeles, sin la carga abrasiva que se emplea para el ensayo de desgaste de áridos, haciéndolo girar 300 vueltas y determinándose la pérdida porcentual de masa de la probeta.

La cohesión se valora determinando las pérdidas en el ensayo Cántabro, en seco y a 25 °C. La susceptibilidad térmica se analiza variando la temperatura de las probetas que son sometidas al ensayo Cántabro y determinando las Curvas de Estado o variación de las pérdidas con la temperatura; para ello, previo al ensayo, se les mantiene 6 horas a la temperatura con la cual ingresarán al tambor de Los Angeles (el cual se mantiene siempre a 25 °C). La disminución de la resistencia a la disgregación en el ensayo Cántabro a 25 °C, tras mantener las probetas sumergidas en agua (un día a 60 °C) es una medida de la pérdida de adhesividad. Para evaluar el envejecimiento, el método asume que el ligante forma una película fina sobre el árido al utilizar probetas con altos contenidos de vacíos, las cuales se someten a distintos períodos en estufa a elevada temperatura y con ventilación forzada y que posteriormente se ensayan siguiendo el procedimiento estipulado por el ensayo Cántabro.

El método también propone un criterio de clasificación de ligantes por grado según el cual, para probetas sometidas al método UCL con un 28 % de vacíos, se define la temperatura de fragilidad como aquella en la que se alcanza una pérdida del 60 % a bajas temperaturas, y la temperatura de inconsistencia como la correspondiente al 70 % de pérdidas a elevadas temperaturas.

Una variante interesante es considerar conjuntamente la resistencia al envejecimiento y la susceptibilidad térmica, lo cual permite graficar un Haz de Curvas de Estado.

#### *3.3.2.4 Efecto de la radiación solar y de la temperatura ambiente en el comportamiento de los pavimentos frente al envejecimiento*

La radiación también conocida como energía radiante, es definida como la energía transferida desde el sol hasta la superficie de un sólido cualquiera. Esta energía viaja en forma de ondas; que liberan energía cuando chocan con un objeto. Esta reacción se debe a que las ondas emitidas por el sol poseen propiedades magnéticas y eléctricas, también conocidas como ondas electromagnéticas (Ahrens (2003)).

La radiación solar está definida como la energía radiante emitida por el sol en forma de fotones que viajan a través del espacio en forma de ondas como lo describe la ecuación 3.3.2.4-a.

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad \text{Ec. 3.3.2.4-a}$$

Donde  $E$  = Energía;  $h$  = Constante de Planck;  $\nu$  = Frecuencia;  $c$  = Velocidad de la luz;  $\lambda$  = Longitud de Onda (Atlas (2005)).

Se define la constante solar  $I_{sc}$  como la cantidad de energía solar que incide perpendicularmente por unidad de tiempo sobre una superficie de área unitaria, colocada fuera de la atmósfera terrestre a una distancia del sol igual al promedio de la distancia sol-tierra. De acuerdo con la referencia radiométrica mundial WRR (World Radiometric Reference) del WRC (World Radiometric Center), como se cita en Gonzáles & Rodríguez (2004)

$$I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2 = 1.96 \text{ cal/ (cm}^2 * \text{min)}$$

Con una desviación estándar de  $1.6 \text{ W/m}^2$  (Gonzáles & Rodríguez (2004))

La radiación solar por fuera de la atmósfera está compuesta por ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de ondas. Estas longitudes de ondas se encuentran acotadas en un rango entre 295 y 3000 nm. La radiación solar se encuentra categorizada en tres grandes clases de acuerdo a los rangos de longitud de onda: ultravioleta (UV), visible (VIS), e infrarroja (IR). La ultravioleta cuenta con longitudes de ondas entre 295 y 400 nm, representando un 7% (González & Rodríguez (2004)) de la magnitud de la constante solar ( $95.7 \text{ Watt/m}^2$ ). Las ondas electromagnéticas emitidas por el sol que se encuentran dentro del rango de 400 a 800 nm con el 42% se conocen como el rango visible (VIS), y mayores de 800 nm hasta 3000 nm con el 51% reciben el nombre de rango infrarrojo (IR) (Bocci & Cerni (2000)).

La cantidad de radiación solar que alcanza la superficie terrestre se ve afectada por los siguientes factores:

- Capa de ozono.
- Hora del día y época del año.
- Altitud.
- Latitud.
- Condiciones climáticas de la región.

Por lo tanto la radiación solar, al interactuar con la atmósfera, ve disminuida su intensidad. Los rayos solares pueden alcanzar la superficie terrestre de dos maneras:

- Directamente
- Difusamente

Se conoce como radiación ultravioleta a toda aquella radiación cuyos componentes se encuentren dentro de una longitud de onda más corta que la radiación visible (VIS)(ASTM (1994)). Como se comentó mas arriba, la radiación ultravioleta no es ajena a la atenuación debida a la atmósfera, y al interactuar con la capa de ozono la radiación ultravioleta de tipo C (UVC) es absorbida totalmente por esta capa. De acuerdo con esto, es claro que a la superficie terrestre solo alcanzan a llegar las otras dos clases de radiación ultravioleta (UVB y UVA).

Cuando se trata de pruebas de envejecimiento acelerado utilizando radiación ultravioleta artificial es importante conocer algunos términos útiles para realizar comparaciones entre radiación artificial y radiación natural. De acuerdo con Atlas Guide-book (2005), La irradiancia es el flujo radiante incidente por unidad de área se expresa en W/m<sup>2</sup>. La irradiancia espectral es la irradiancia medida en función de la longitud de onda expresada en W/m<sup>2</sup>/nm, y por último la exposición radiante definida como la integral de la irradiancia con respecto al tiempo.

El estudio de envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas por efectos de radiación solar y factores climáticos y medio ambientales data desde principios del siglo pasado (Dow, (1903) como se cita en Bell (1989)). Las primeras investigaciones iban enfocadas al desarrollo de métodos y pruebas que relacionaran las propiedades del ligante en servicio con pruebas que simularan los efectos de la intemperie en condiciones aceleradas.

De la literatura reportada se pueden hacer las siguientes observaciones: De acuerdo con Vallergera et al, 1957, es claro que la radiación ultravioleta es más dañina que la radiación infrarroja, su trabajo giró entorno a la utilización de películas de 3.125 mm. Traxler, 1963; y Edler et al, 1985, utilizaron películas de asfalto de 3 y 100 micras respectivamente, reconociendo cierto efecto de endurecimiento en la mezclas envejecidas relacionado con el espesor de la lámina. Montepara et al, 1997, reportó procesos de polimerización acompañados de volatilización y oxidación utilizando películas de 1.5 mm de espesor. Bocci et al, 2000, estableció que la radiación ultravioleta afecta de manera diferente de acuerdo a origen de los asfaltos. Finalmente Afanasieva et al, 2002, indicó que para los asfaltos colombianos la radiación tipo UVB es la que causa mayor afectación.

Los trabajos reportados presentan en algunos casos grandes diferencias en el espesor de la película de asfalto, sin embargo en toda esa gama de espesores se manifestaron efectos hacia la radiación ultravioleta.

Es de destacar que ninguno de los trabajos ha presentado alguna relación de dependencia o modelo matemático entre las propiedades físicas o mecánicas con respecto al tiempo de exposición. Mucho menos en relación con la temperatura de servicio de los ligantes estudiados.

De los trabajos reportados con mezclas asfálticas se ha demostrado que la radiación ultravioleta si alcanza a afectar a las mezclas asfálticas. Lo que no se ha establecido aún es la profundidad de afectación de la radiación ultravioleta dentro de la mezcla, esto se puede evidenciar en los trabajos de Tia et al, 1988, el cual limita el efecto dentro de los primeros milímetros.

Hugo et al, 1985, encuentra efectos de endurecimiento dentro de los primeros 5 mm y los compara con viscosidades 2 mm mas profundas. Kempt et al, 1981, afirma que la radiación con luz “actínica” afecta hasta 5 micras de la película de asfalto. Además queda evidenciado que no existe consenso en cuanto a la profundidad de afectación. Sin embargo también es claro que los trabajos reportados han sometido distintas clases de mezclas en estados semicompactos, y periodos de exposición diferentes. [24]

**CAPITULO 4**  
**METODOLOGIA Y DESARROLLO DE LA INVESTIGACION**



## 4 METODOLOGIA Y DESARROLLO DE LA INVESTIGACION

### 4.1 Metodología empleada en la investigación

En la presente investigación se modeló el proceso de envejecimiento sobre una mezcla asfáltica en caliente compuesta de dos grupos, un grupo se desarrolló con un agregado procedente de la Región de Antofagasta y el otro de la planta Ferrovia.

Cada grupo esta dividido a su vez en dos subgrupos, el primer subgrupo corresponde a una mezcla desarrollada con un cemento asfáltico tradicional CA-60/80, y el segundo con un cemento asfáltico modificado Cariphalte MD 60-80.

Se construyeron probetas Marshall, con un 6% de ligante, y 1100 gramos de Agregados Pétreos, las especificaciones se muestran en el capítulo 4.2

El Envejecimiento se llevo a cabo a la mitad de las probetas de cada grupo, generando probetas envejecidas y sin envejecer. (Figura 4.1-a, Figura 4.1-b)

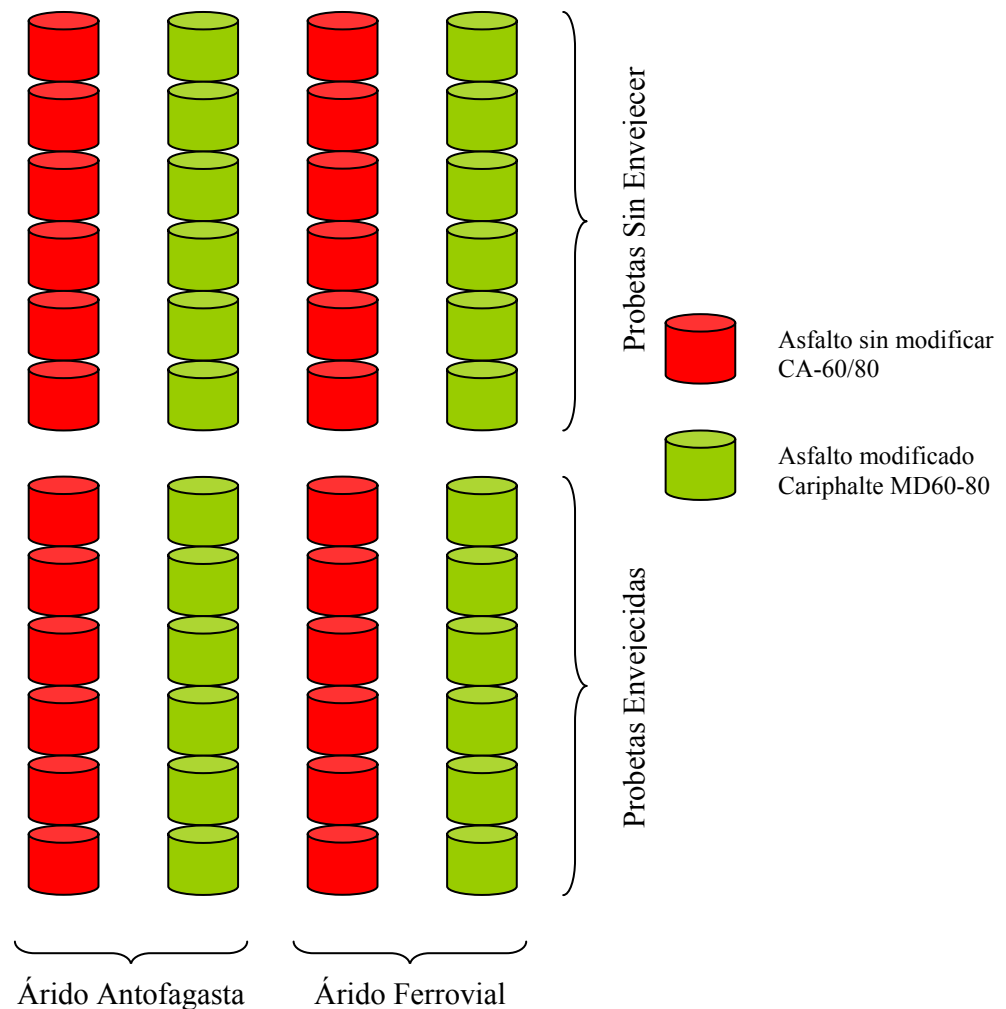


Figura 4.1-a, Distribución de las probetas para el desarrollo de la investigación



*Figura 4.1-b; Probetas Marshall separadas por grupo y subgrupo*

Para envejecer las probetas se utilizó un calcinador de asfalto, al cual se modificó la temperatura para que se mantuviera constante a 135°C en el caso de los asfaltos sin modificar y 165°C en el caso de los modificados, se usó esta temperatura de acuerdo a lo especificado en el método SUPERPAVE sobre envejecimiento de muestras. Además es interesante y se mostrará más adelante, que el calcinador de asfalto produce corrientes de aire oxigenado, las cuales bañan la probeta, favoreciendo el envejecimiento por oxidación.



*Figura 4.1-c; Calcinador de Asfalto*

Las Probetas son envejecidas a tiempos de 4 a 6 horas aproximadamente, estos tiempos modelan eficientemente el proceso de Mezclado-Almacenamiento-y puesta en obra, dado que se generan ciclos de calentamiento-enfriamiento en la mezcla favoreciendo así, el proceso de envejecimiento.



*Figura 4.1-d; Disposición de las probetas disgregadas para envejecer aceleradamente en el calcinador*

Cada Probeta es sometida a ensayo de Resistencia Diametral, y luego se recupera el ligante de dos probetas representativas de cada grupo, este ligante es ensayado en el Viscosímetro Rotacional Brookfield para finalmente obtener su Energía de Activación de Flujo y compararlo con los ensayos mecánicos de resistencia y verificar si existen diferencias en las mezclas desarrolladas con dos Agregados Pétreos de distinta procedencia.

#### **4.2 Experimentación**

En este capítulo se hace una semblanza de los aspectos más importantes que fueron tomados en cuenta para la formulación de este trabajo tales como: la elección de los áridos, la duración de los procesos de exposición de probetas a envejecimiento acelerado, el proceso que se siguió para la elaboración de las probetas de concreto asfáltico, para tal efecto se exponen las características de los materiales que se emplearon determinadas a partir de pruebas índice de calidad realizadas a los mismos, como el ensayo para verificar la adherencia en un tratamiento superficial.

Además se mencionan aspectos importantes que influyen en la determinación de resultados obtenidos a partir del ensayo a tensión indirecta que es discutido en relación a las bondades que representa su utilización en esta investigación y la implementación de la Energía de Activación para describir cuantitativamente y cualitativamente al asfalto envejecido y sin envejecer.

#### **4.3 Caracterización de los materiales pétreos utilizados**

Los Agregados Pétreos son materiales hidrofílicos que componen la corteza terrestre, electronegativamente cargados, alta afinidad por el agua, susceptible a química superficial, producto de trituración y/o natural, con una curva granulométrica bien definida. Se han desarrollado investigaciones para determinar causas de incompatibilidad en mezclas asfálticas encontrándose que a mayor contenido de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) debido a su estructura cristalina en su composición, mayor es su inestabilidad adhesiva.

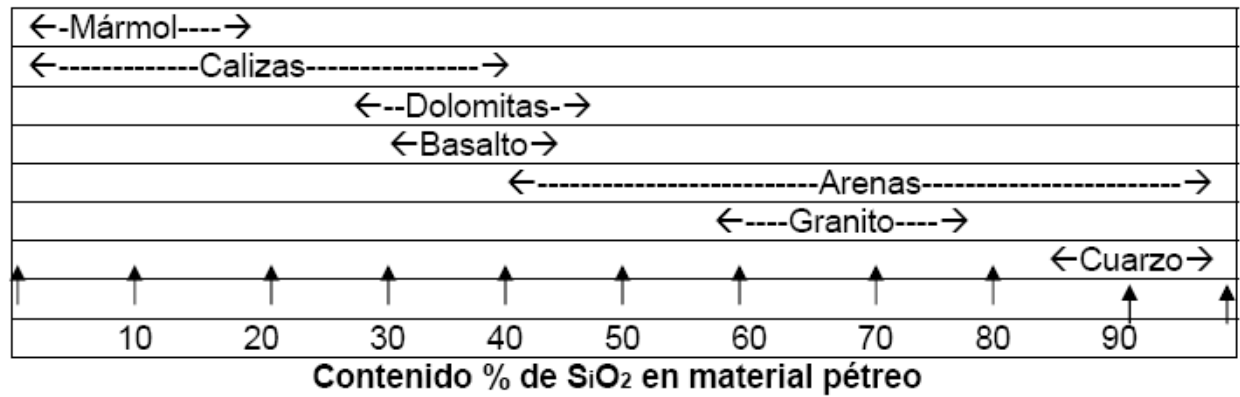


Grafico 4.3-a; Clasificación de agregados

#### 4.3.1 Datos de origen y obtención del material pétreo para la elaboración de las probetas

Para la obtención del material pétreo con que se elaboraron las probetas de Concreto Asfáltico, se realizó un muestreo, para lo cual fue necesario visitar un pozo de extracción de cada material del cual se presentan los siguientes datos:

Lugar de Obtención de Áridos “A”: Pozo de extracción de la Empresa Pavimentos Norte, Antofagasta.

La ciudad está ubicada en el hemisferio sur de América, a 23°38'39 S de latitud y 70°24'39 O de longitud, con una elevación media de 40 msnm, la región cuenta con una superficie de 126.443,9 Km<sup>2</sup>, una densidad de 9,7 Hab/Km. y representa el 16,5% de la superficie continental e insular del país.

Antofagasta se encuentra sobre suelos rocosos, duros y resistentes, la ciudad posee una geomorfología (parte de la geografía física que trata de la descripción del relieve terrestre) irregular por la presencia de colinas escarpadas que son parte de Cordillera de la Costa en su borde del este, y por el Océano Pacífico al oeste.

La comuna de Antofagasta presenta una variedad climática de cuatro tipos, la cual varía según la altitud. En las planicies litorales (donde esta ubica la ciudad) se encuentra un clima desértico con nublados abundantes. Tras la Cordillera de la Costa, se encuentra un clima árido cálido, en el sector de la Cordillera de Domeyko se encuentra un clima desértico frío y en el sector más interno, previo a la Cordillera de los Andes, encontramos un clima frío.

La temperatura media anual es de 16,4 °C, tras la cordillera de la costa se presenta una temperatura media anual que sobrepasa los 18°C

Los áridos que se extraen en la Región de Antofagasta corresponden principalmente a depositaciones aluviales y coluviales, ubicados en las faldas de los cerros de la Cordillera de la Costa. Así están compuestos por fragmentos de las rocas volcánicas e intrusivas que conforman la geología de la zona.

Estos depósitos son producto de la remoción gravitatoria de la roca meteorizada y erosionada de las zonas más altas o bien de la roca meteorizada que se encuentra in-situ.

Corresponden a rocas de tamaño grava, arena y bloques, con poco porcentaje de fracción fina.

Su composición volcánica los hace materiales duros y resistentes. Son materiales compuestos por partículas resistentes, características dadas por su composición litológica. Presentan porcentajes de sal que se encuentran dentro de las bandas admisibles.

Pavimentos Norte posee 3 chancadoras y 2 cintas distribuidoras que utiliza para preparar base estabilizada. De los volúmenes de producción, un 70% es utilizado en el mercado de la pavimentación.

Tamaño del material: Para carpeta asfáltica en caliente de  $\frac{3}{4}$  a finos.

Peso aproximado de la muestra: 240 Kg.

Lugar de Obtención de Áridos "B": Pozo de extracción Los Morros, Cuenca del Río Maipo, Región Metropolitana

La geología de la cuenca del río Maipo, presenta rellenos por sedimentos fluviales y fluvioglaciales y cenizas volcánicas, rocas graníticas paleozoicas y mesozoicas, además de rocas volcánicas y sedimentarias cretácicas.

Entre las formaciones presentes en la cuenca las que inciden en la calidad del agua son:

- Rocas volcánicas del mioceno inferior- medio; complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basáltica a dacíticas ubicadas principalmente en el sector de río Olivares.
- Rocas volcanosedimentarias del neocomiano; secuencias volcánicas y sedimentarias marinas, lavas andesíticas y basálticos, tobas y brechas volcánicas y sedimentos areniscas y calizas fosilíferas ubicadas principalmente en el sector de la junta entre el río Maipo y río Mapocho.
- Rocas volcánicas del cretácico inferior-alto; secuencias y complejos volcánicos continentales, lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas andesíticas a riolíticas ubicadas principalmente en el sector de río Clarillo.
- Rocas sedimentarias del jurásico superior- cretácico inferior; secuencias sedimentarias marinas litorales o plataformales, calizas, lutitas, areniscas calcáreas, areniscas y coquinas ubicadas principalmente en el nacimiento del río Maipo.

El área comprendida entre el nacimiento del río Maipo hasta la confluencia con el río Colorado, se encuentra influenciado por lavas y formaciones carbonatadas. El río Olivares presenta una leve influencia de andesitas en la parte alta del cauce. Desde el sector de río Colorado hasta el Estero Colina, nuevamente se encuentran lavas y formaciones carbonatadas.

En el territorio donde se emplaza el estero Yerba Loca, estero Arrayán y Colina, no se encuentran rocas que influyan en la calidad de las aguas por solubilización de iones. El río Mapocho y Maipo, presentan influencia de rocas andesíticas, desde la junta con río Colorado hasta la intersección con el Mapocho. El estero Puangue no presenta de manera significativa influencia por rocas andesíticas. En el territorio restante de la cuenca, no se presentan formaciones rocosas que influyan en la calidad de las aguas.

La influencia volcánica en la cuenca, es variada desde el punto de vista de actividad. Los volcanes Tupungato y Marmolejo están extinguidos, los volcanes activos son el Tupungatito, San José y Maipo. Esto revela una gran influencia volcánica en la zona.

Los volcanes Tupungatito (5.682 m s.n.m.) y San José (5.856 m s.n.m.), presentan estructura de estrato volcánico, el primero, presenta fumarolas permanentes. El volcán Maipo (5.264 m s.n.m.) perteneciente a la categoría de caldera, es un volcán activo que no ha presentado erupciones en los últimos dos siglos.

Los climas que se distinguen en la cuenca del río Maipo, corresponden a los climas: Templado de tipo Mediterráneo con estación seca prolongada y Frío de altura en la Cordillera de los Andes.

El Clima Templado de tipo Mediterráneo se desarrolla prácticamente en toda la cuenca del río Maipo. Su característica principal es la presencia de una estación seca prolongada y un invierno bien marcado con temperaturas extremas que llegan a cero grados. Santiago registra una temperatura media anual de 14,5° C, pero los contrastes térmicos son fuertes. En verano las máximas alcanzan valores superiores a 30° C durante el día. El Clima Frío de Altura, se localiza en la Cordillera de los Andes por sobre los 3.000 metros de altura.

Tamaño del material: Para carpeta asfáltica en caliente de ¾ a finos.

Peso aproximado de la muestra: 240 Kg.

Las probetas tipo Marshall de concreto Asfáltico, se elaboran de acuerdo a la granulometría que recomienda, El Manual de Carreteras Volumen 5 y Volumen 8 para mezclas semidensas como se muestra a continuación

DENOMINACION		IV - A - 12	IV - A - 20
TAMICES (mm)	(ASTM)	PORCENTAJE QUE PASA EN PESO, %	
25	(1")		100
20	(3/4")	100	80 - 95
12,5	(1/2")	80 - 95	65 - 80
10	(3/8")	70 - 85	57 - 73
5	(N° 4)	43 - 58	40 - 55
2,5	(N° 8)	28 - 42	28 - 42
0,63	(N° 30)	13 - 24	13 - 24
0,315	(N° 50)	8 - 17	8 - 17
0,16	(N° 100)	6 - 12	6 - 12
0,08	(N° 200)	4 - 8	4 - 8

*Tabla 4.3-a; Granulometría de Áridos, Granulometría semidensa, Manual de Carreteras Volumen 5*

## GRANULOMETRÍA IV-A-12

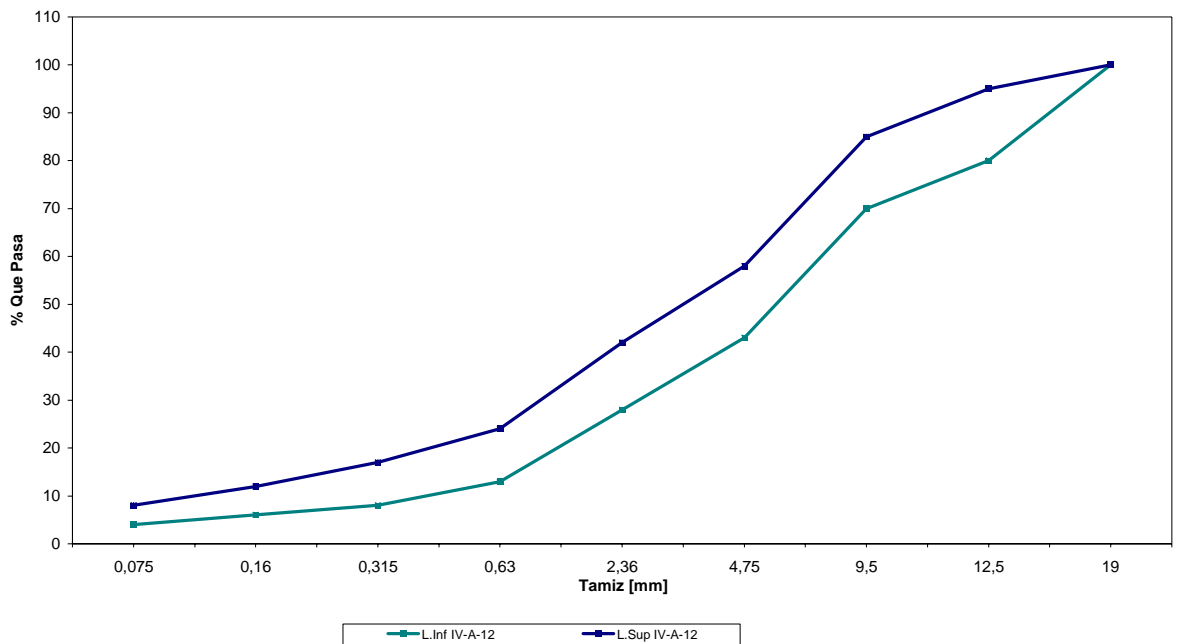


Gráfico 4.3-a; Curva granulométrica para la banda IV-A-12, Manual de Carreteras Volumen5

Antes de fabricar las probetas se realizan al material pétreo las siguientes pruebas para conocer los parámetros de calidad de las partículas que componen cada muestra:

- Granulometría.
- Desgaste de los Ángeles.
- Absorción y Densidad.
- Forma de la partícula.

Para realizar las pruebas antes mencionadas, previamente se realiza un proceso de homogenización y secado del material pétreo, posteriormente se reduce por proceso de cuarteo para la obtención de muestras representativas.

Una vez concluida la etapa de homogenización del material se procede a extenderlo, más o menos a una altura de 15 a 20 cm., esta operación se ejecuta para facilitar el cuarteo.

El proceso de reducción por cuarteo consiste esencialmente en lo siguiente:

Del primer cuarteo del total de la muestra se toman dos cuartos opuestos y se unen mediante un proceso de mezclado y homogenización del material formando un cono el cual posteriormente se trunca para realizar un nuevo cuarteo, esta operación se realiza las veces que sea necesaria para obtener un tamaño que se considera suficiente, para una muestra representativa, y que se toma para realizar las pruebas correspondientes de calidad del agregado.

4.3.2 *Pruebas índice de calidad realizadas al material pétreo.*

4.3.2.1 *Granulometría*

El proceso consiste en cribar el material de cada corte (3/4", arena y polvo de roca) por las mallas de: 1", 3/4", 1/2", 3/8", y la malla No.4 para el material grueso (3/4"), y bajo la malla No 4 para el material fino (arena y polvo de roca), para determinar la cantidad de material que corresponde a cada tamaño, después de cribar el material por las mallas mencionadas anteriormente se obtuvieron las siguientes cantidades:

MASA SECA TOTAL PETREOS:	M1= 5000 g			
MASA SECA LAVADA PETREOS:	M2 = 4951,6 g			
TAMIZ [mm]	RETENIDOS		INFORME GRANULOMETRIA	
	PESO [g]	%	Tamiz	% PASA
25 (1")	0	0	25 (1")	100
20 (3/4")	0	0	20 (3/4")	100
12.5 (1/2")	666,7	13	12.5 (1/2")	87
10 (3/8")	1069,7	21	10 (3/8")	65
6.3 (1/4")	1428,6	29	6.3 (1/4")	37
5 (N°4)	683,3	14	5 (N°4)	23
Bajo (N°4)	1151,7	23	Bajo (N°4)	-

*Tabla 4.3-b; Granulometría material Gravilla ¾", sobre malla N° 4, Árido de pavimentos Norte.*

Donde:

Residuo Total = 48,25 gramos

% Total que pasa malla N°200 = 1 %

Para determinar la granulometría del material que pasa la Malla No. 4, se toman 1145.8 gramos, para que por proceso de lavado se determine la granulometría correspondiente.

MASA SECA TOTAL PETREOS:	M1= 1145.8 g			
MASA SECA LAVADA PETREOS:	M2 = 1097.51 g			
TAMIZ [mm]	RETENIDOS		INFORME GRANULOMETRIA	
	PESO [g]	%	Tamiz	% PASA
25 (1")	0	0	25 (1")	100
20 (3/4")	0	0	20 (3/4")	100
12.5 (1/2")	0	0	12.5 (1/2")	100
10 (3/8")	0	0	10 (3/8")	100
6.3 (1/4")	0	0	6.3 (1/4")	100
5 (N°4)	0	0	5 (N°4)	100
2.5 (N°8)	974,4	85	2.5 (N°8)	15
2.0 (N°10)	45,6	4	2.0 (N°10)	11
1.3 (N°16)	48,0	4	1.3 (N°16)	7
0.63 (N°30)	11,4	1	0.63 (N°30)	6
0.315 (N°50)	4,7	0	0.315 (N°50)	6
0.16 (N°100)	4,5	0	0.16 (N°100)	5
0.08 (N°200)	6,9	0	0.08 (N°200)	4
RESIDUO PARCIAL	0	23	-	-

*Tabla 4.3-b; Granulometría material Gravilla ¾", bajo malla N° 4, Árido de pavimentos Norte.*



MASA SECA TOTAL PETREOS:	M1= 1044.6 g				
MASA SECA LAVADA PETREOS:	M2 = 908.7 g				
TAMIZ [mm]	RETENIDOS		INFORME GRANULOMETRIA		
	PESO [g]	%	Tamiz	% PASA	
25 (1")	0	0	25 (1")	100	
20 (3/4")	0	0	20 (3/4")	100	
12.5 (1/2")	0	0	12.5 (1/2")	100	
10 (3/8")	0	0	10 (3/8")	100	
6.3 (1/4")	0	0	6.3 (1/4")	100	
5 (N°4)	0	0	5 (N°4)	100	
2.5 (N°8)	50,3	5	2.5 (N°8)	95	
2.0 (N°10)	52,9	5	2.0 (N°10)	90	
1.3 (N°16)	190,0	18	1.3 (N°16)	72	
0.63 (N°30)	253,3	24	0.63 (N°30)	48	
0.315 (N°50)	187,7	18	0.315 (N°50)	30	
0.16 (N°100)	102,4	10	0.16 (N°100)	20	
0.08 (N°200)	69,6	7	0.08 (N°200)	13	
RESIDUO PARCIAL	2,2	0	-	-	

*Tabla 4.3-c; Granulometría material correspondiente a arena, Árido de pavimentos Norte*

Donde:

Residuo Total = 138,1 gramos

% Total que pasa malla N°200 = 13 %

MASA SECA TOTAL PETREOS:	M1= 1044.7 g				
MASA SECA LAVADA PETREOS:	M2 = 819.4 g				
TAMIZ [mm]	RETENIDOS		INFORME GRANULOMETRIA		
	PESO [g]	%	Tamiz	% PASA	
25 (1")	0	0	25 (1")	100	
20 (3/4")	0	0	20 (3/4")	100	
12.5 (1/2")	0	0	12.5 (1/2")	100	
10 (3/8")	0	0	10 (3/8")	100	
6.3 (1/4")	0	0	6.3 (1/4")	100	
5 (N°4)	0	0	5 (N°4)	100	
2.5 (N°8)	31,7	3	2.5 (N°8)	97	
2.0 (N°10)	26,0	3	2.0 (N°10)	94	
1.3 (N°16)	78,0	8	1.3 (N°16)	86	
0.63 (N°30)	104,7	10	0.63 (N°30)	76	
0.315 (N°50)	161,9	16	0.315 (N°50)	60	
0.16 (N°100)	216,8	21	0.16 (N°100)	40	
0.08 (N°200)	194,6	19	0.08 (N°200)	20	
RESIDUO PARCIAL	4,9	1	-	-	

*Tabla 4.3-d; Granulometría material correspondiente a polvo de roca, Árido de pavimentos Norte*

Donde:

Residuo Total = 230,3 gramos

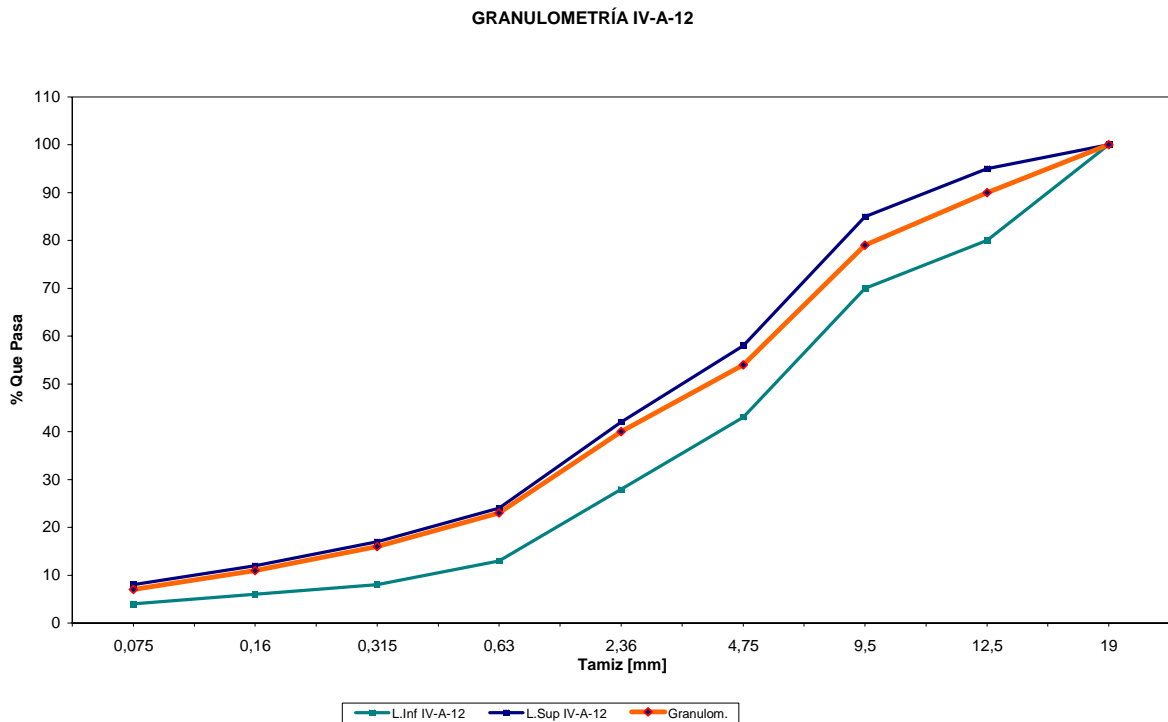
% Total que pasa malla N°200 = 20 %

Para usar la banda de trabajo IV-A-12 debemos mezclar las tres secciones de material (3/4", arena y polvo de roca) de tal forma que el producto de tal mezcla se ajuste a la curva granulométrica propuesta en el manual de carreteras volumen 5

Por tanto, usaremos un 60% del material  $\frac{3}{4}$ ", un 30% de Arena y un 10% de polvo de roca, el resultado se muestra en la siguiente tabla

		Gravilla 3/4"	P. Roca 3/8"	Arena 3/8"	100%		
Tamiz		60%	10%	30%	Granulometría	BANDA IV-A-12	
mm	ASTM					L. Inferior	L. Superior
38	1 1/2"	100	100	100	100	100	100
25	1"	100	100	100	100	100	100
19	3/4"	100	100	100	100	100	100
12,5	1/2"	87	100	100	90	80	95
9,5	3/8"	65	100	100	79	70	85
4,75	Nº 4	23	100	100	54	43	58
2,36	Nº 8	3	97	95	40	28	42
0,63	Nº 30	1	76	48	23	13	24
0,315	Nº 50	1	60	30	16	8	17
0,16	Nº 100	1	40	20	11	6	12
0,075	Nº 200	1	20	13	7	4	8

*Tabla 4.3-e; Granulometría material mezclado, Árido de Pavimentos Norte*



*Grafico 4.3-b; Curva granulométrica para la banda IV-A-12, material mezclado, Áridos Pavimentos Norte*

MASA SECA TOTAL PETREOS:	M1= 1232,3g				
MASA SECA LAVADA PETREOS:	M2 =1232,3g				
TAMIZ [mm]	RETENIDOS		INFORME GRANULOMETRIA		
	PESO [g]	%	Tamiz	% PASA	
25 (1")	0,0	0	25 (1")	100	
20 (3/4")	0,0	0	20 (3/4")	100	
12.5 (1/2")	0,0	0	12.5 (1/2")	100	
10 (3/8")	748,4	61	10 (3/8")	39	
6.3 (1/4")	344,8	28	6.3 (1/4")	11	
5 (N°4)	102,1	8	5 (N°4)	3	
2.5 (N°8)	7,6	1	2.5 (N°8)	2	
2.0 (N°10)	5,4	0	2.0 (N°10)	2	
1.3 (N°16)	3,7	0	1.3 (N°16)	2	
0.63 (N°30)	2,7	0	0.63 (N°30)	1	
0.315 (N°50)	1,8	0	0.315 (N°50)	1	
0.16 (N°100)	1,9	0	0.16 (N°100)	1	
0.08 (N°200)	1,8	0	0.08 (N°200)	1	
RESIDUO PARCIAL	-	-	-	-	

*Tabla 4.3-f; Granulometría material correspondiente a Gravilla ¾", Árido Ferrovial Los Morros.*

MASA SECA TOTAL PETREOS:	M1= 928,3g				
MASA SECA LAVADA PETREOS:	M2 = 928,3 g				
TAMIZ [mm]	RETENIDOS		INFORME GRANULOMETRIA		
	PESO [g]	%	Tamiz	% PASA	
25 (1")	0,0	0	25 (1")	100	
20 (3/4")	0,0	0	20 (3/4")	100	
12.5 (1/2")	0,0	0	12.5 (1/2")	100	
10 (3/8")	0,0	0	10 (3/8")	100	
6.3 (1/4")	78,2	8	6.3 (1/4")	92	
5 (N°4)	501,3	53	5 (N°4)	38	
2.5 (N°8)	245,5	26	2.5 (N°8)	12	
2.0 (N°10)	80,4	9	2.0 (N°10)	4	
1.3 (N°16)	12,3	1	1.3 (N°16)	2	
0.63 (N°30)	4,3	0	0.63 (N°30)	2	
0.315 (N°50)	2,2	0	0.315 (N°50)	2	
0.16 (N°100)	2,0	0	0.16 (N°100)	1	
0.08 (N°200)	2,1	0	0.08 (N°200)	1	
RESIDUO PARCIAL	-	-	-	-	

*Tabla 4.3-g; Granulometría material correspondiente a Gravilla ½", Árido Ferrovial Los Morros.*

MASA SECA TOTAL PETREOS:		M1= 861,4g			
MASA SECA LAVADA PETREOS:		M2 = 861,4 g			
TAMIZ [mm]		RETENIDOS		INFORME GRANULOMETRIA	
		PESO [g]	%	Tamiz	% PASA
25	(1")	0	0	25 (1")	100
20	(3/4")	0,0	0	20 (3/4")	100
12.5	(1/2")	0,0	0	12.5 (1/2")	100
10	(3/8")	0,0	0	10 (3/8")	100
6.3	(1/4")	0,0	0	6.3 (1/4")	100
5	(N°4)	0,0	0	5 (N°4)	100
2.5	(N°8)	30,4	4	2.5 (N°8)	96
2.0	(N°10)	228,0	26	2.0 (N°10)	70
1.3	(N°16)	192,3	22	1.3 (N°16)	48
0.63	(N°30)	126,1	15	0.63 (N°30)	33
0.315	(N°50)	78,9	9	0.315 (N°50)	24
0.16	(N°100)	62,0	7	0.16 (N°100)	17
0.08	(N°200)	37,7	4	0.08 (N°200)	12
RESIDUO PARCIAL		-	--	-	-

*Tabla 4.3-h; Granulometría material correspondiente a Polvo de Roca, Árido Ferrovial Los Morros.*

Para usar la banda de trabajo IV-A-12 debemos mezclar las tres secciones de material (3/4", arena y polvo de roca) de tal forma que el producto de tal mezcla se ajuste a la curva granulométrica propuesta en el manual de carreteras volumen 5

Por tanto, usaremos un 30% del material Gravilla 3/4", un 35% de Gravilla 1/2", y un 35% de polvo de roca, el resultado se muestra en la siguiente tabla

		Gravilla 3/4"	Gravilla 1/2"	P. Roca 3/8"	100%	BANDA IV-A-12	
Tamiz		30%	35%	35%	Granulometría	L. Inferior	L. Superior
mm	ASTM						
38	1 1/2"	100	100	100	100	100	100
25	1"	100	100	100	100	100	100
19	3/4"	100	100	100	100	100	100
12,5	1/2"	100	100	100	91	80	95
9,5	3/8"	39	100	100	82	70	85
4,75	N° 4	3	38	100	49	43	58
2,36	N° 8	2	12	96	38	28	42
0,63	N° 30	1	2	33	13	13	24
0,315	N° 50	1	2	24	9	8	17
0,16	N° 100	1	1	17	7	6	12
0,075	N° 200	1	1	12	5	4	8

*Tabla 4.3-i; Granulometría material mezclado, Árido Ferrovial Los Morros.*

GRANULOMETRÍA IV-A-12

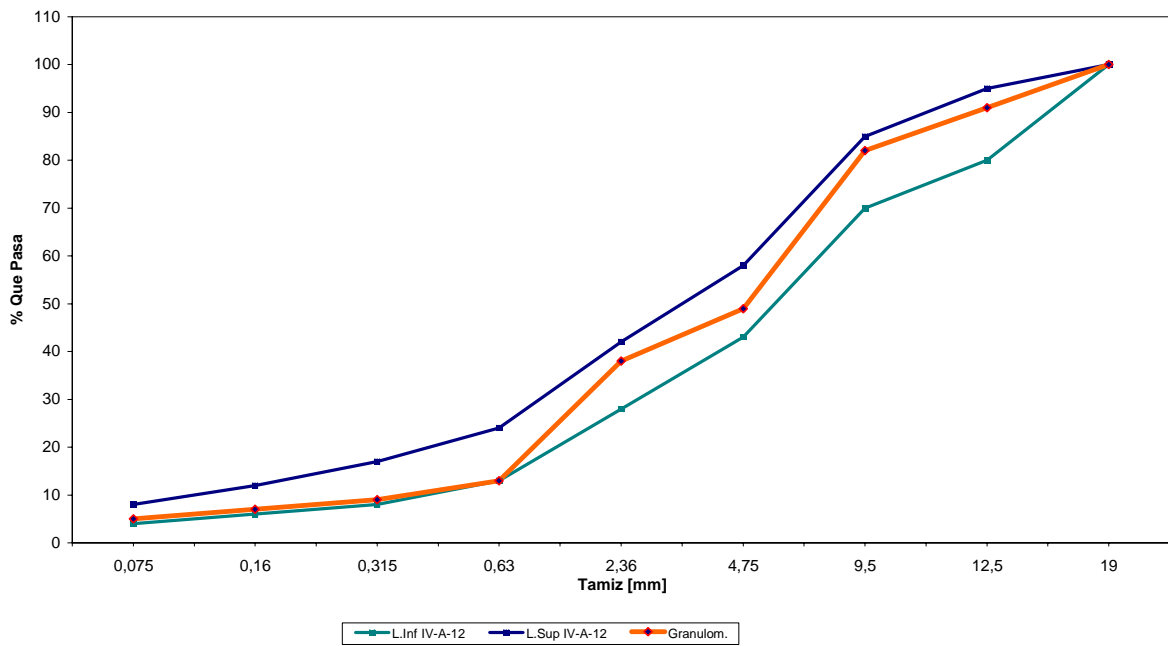


Grafico 4.3-c; Curva granulométrica para la banda IV-A-12, material mezclado, Árido Ferrovial Los Morros.



Figura 4.3-a; Tamices para determinar la granulometría del material pétreo

*4.3.1.2 Ensayo de desgaste de Los Ángeles*

Para realizar esta prueba debe verificarse en la granulometría los tamaños de material más representativos o que más abundan en la muestra, el objetivo de esta inspección es el determinar el tipo de prueba de desgaste que habrá de realizarse al material.

Se procede de la siguiente forma: del material que pasa la malla de ¾” y se retiene en la malla de ½”, se pesan 2500 gramos con una tolerancia de más menos 10 gramos, la misma operación se hace con el material que pasa la malla de ½” y se retiene en la malla 3/8” posteriormente se mezclan los dos agregados cuyo peso debe ser de 5000 gramos con una tolerancia de más menos 10 gramos.

Tamaños de partículas (mm)	1	2	3	4	5	6	7
	(80-40)	(50-25)	(40-20)	(40-10)	(20-10)	(10-5)	(5-2,5)
Tamaño de las fracciones (g)							
80 – 63	2.500 ± 50						
63 – 50	2.500 ± 50						
50 – 40	5.000 ± 50	5.000 ± 50					
40 – 25		5.000 ± 25	5.000 ± 25	1.250 ± 25			
25 – 20			5.000 ± 25	1.250 ± 25			
20 – 12,5				1.250 ± 10	2.500 ± 10		
12,5 – 10				1.250 ± 10	2.500 ± 10		
10 – 6,3						2.500 ± 10	
6,3 – 5						2.500 ± 10	
5 – 2,5							5.000 ± 10
Masa inicial de muestra (Mi)	10.000 ± 100	10.000 ± 75	10.000 ± 50	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10
Esferas							
- número	12			12	11	8	6
- masa (g)	5.000 ± 25			5.000 ± 25	4.584 ± 25	3.330 ± 25	2.500 ± 15
Número de Revoluciones	1.000			500			

*Tabla 4.3-j; Grados de Ensaye, Desgaste en maquina de los Ángeles*

Posteriormente se pesan las esferas metálicas, según el grado se escoge el numero de estas cuya suma de peso por ejemplo para 11 esfera debe ser de 4584 gramos con una tolerancia de más menos 25 gramos.

Una vez pesados el material y las esferas son depositados en el interior de la máquina de desgaste Los Ángeles, cerrando esta herméticamente y ajustándola a un número de revoluciones que establece la norma y que para este caso son un total de 500 revoluciones, para este efecto la máquina debe estar ajustada de 30 a 32 revoluciones por minuto como lo establece la norma.

Al término del ciclo de revoluciones a que se sometió el material dentro de la máquina, se retira el material de la misma depositándolo en una charola metálica, de la cual son retiradas las esferas y el material se criba por la malla No. 8, el material retenido se pesa obteniendo un peso final producto del desgaste a que se sometió.

El desgaste del pétreo se calcula como el porcentaje de pérdida de masa de la muestra, aproximando a un decimal, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P (\%) = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \times 100 \quad (\text{Ec 4.2.2.2-a})$$

Donde

P: Pérdida de masa de la muestra (%)

$m_i$ : masa inicial de la muestra [g]

$m_f$ : masa final de la muestra [g]

De acuerdo a lo anterior se tienen los siguientes resultados

	Árido Pavimentos Norte	Árido Ferrovial Los Morros
Perdida de masa de la muestra (%)	15,1	15,2

*Tabla 4.3-k; Resultados Desgaste en maquina de los Ángeles*

#### 4.3.1.3 Prueba para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en pétreos gruesos

Para realizar esta prueba se toman agregados pétreos gruesos para formar una muestra homogénea, que posteriormente se pone a saturar por un lapso de  $24 \pm 4$  hrs. Esto se hace para que las partículas absorban la mayor cantidad de agua que sean capaces de captar.

Se pone a saturar el material por lapso de  $24 \pm 4$  hrs., posteriormente se retira el agua del recipiente y se lava el material, a continuación con un paño húmedo se retira la humedad en la superficie de las partículas, eliminando el lustre que presentan, bajo estas condiciones las partículas se encuentran en estado Saturado superficialmente seco.

Una vez que el material se encuentra en la condición mencionada en el párrafo anterior, se obtiene su peso asociado a la condición de superficialmente seco como  $M_{SSS}$ .

A continuación se coloca la muestra en el canastillo porta muestra de la balanza y se sumerge en agua a  $20 \pm 3$  °C por un periodo de 3 minutos, una vez que el material se encuentra en la situación descrita, se obtiene su peso asociado a la condición sumergida como  $M_{SUM}$ .

Por ultimo se retira la muestra del recipiente, para secarla en un torna a masa constante a la temperatura de  $110 \pm 5$  °C, luego de enfriar se obtiene el peso asociado a la condición de muestra seca como  $M_s$ .

La densidad real del pétreo superficialmente seco se obtiene del siguiente cálculo.

$$\rho_{RT} (\text{kg/m}^3) = \frac{M_{SSS}}{M_{SSS} - M_{SUM}} \times 1.000 (\text{kg/m}^3)$$

La densidad real del pétreo seco se obtiene del siguiente cálculo.

$$\rho_{RS} \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{M_S}{M_{SSS} - M_{SUM}} \times 1.000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

La densidad Neta se obtiene del siguiente cálculo.

$$\rho_N \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{M_S}{M_S - M_{SUM}} \times 1.000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

La Absorción de agua se obtiene del siguiente cálculo

$$\alpha \text{ (\%)} = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} \times 100$$

La siguiente tabla muestra un resumen de los resultados obtenidos a los dos grupos de pétreos:

Árido	$\rho_{RT}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{RS}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_N$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\alpha$ (%)
Árido Pavimentos Norte	2.664	2.614	2.749	0,87
Árido Ferrovial Los Morros	2.745	2.694	2.766	0,96

Tabla 4.3-1; Resultados ensayos de densidad y absorción de pétreos gruesos

Para realizar esta prueba se toman agregados pétreos finos para formar una muestra homogénea, que posteriormente se pone a saturar por un lapso de  $24 \pm 4$  hrs. Esto se hace para que las partículas absorban la mayor cantidad de agua que sean capaces de captar.

Luego se elimina paulatinamente el exceso de agua sin perder finos, se coloca el material dentro de un molde cónico sujeto firmemente sobre una superficie lisa, plana y no absorbente, se compacta con 25 golpes de pistón, para luego remover el cono. Si hay humedad libre, la muestra conservará la forma, de lo contrario habrá alcanzado la condición de superficialmente seco, si así es se obtiene el peso como msss.

Luego se coloca el material dentro de la probeta aforada y se obtiene su masa como Mm. Por ultimo se deja secar la muestra a masa constante en horno a temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  y se registra su peso como ms.

El peso de la probeta aforada se registra como Ma

La densidad real del pétreo superficialmente seco se obtiene del siguiente cálculo.



$$\rho_{RT} \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{M_{sss}}{M_a + M_{sss} + M_m} \times 1.000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

La densidad real del pétreo seco se obtiene del siguiente cálculo.

$$\rho_{RS} \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{M_s}{M_a + M_{sss} - M_m} \times 1.000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

La densidad Neta se obtiene del siguiente cálculo.

$$\rho_N \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{M_s}{M_a + M_s - M_m} \times 1.000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

La Absorción de agua se obtiene del siguiente cálculo

$$\alpha(\%) = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s} \times 100$$

La siguiente tabla muestra un resumen de los resultados obtenidos a los dos grupos de pétreos:

Árido	$\rho_{RT}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{RS}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_N$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\alpha(\%)$
Árido Pavimentos Norte	2.712	2.669	2.790	0,62
Árido Ferrovial Los Morros	2.724	2.681	2.748	0,91

*Tabla 4.3-m; Resultados ensayos de densidad y absorción de pétreos fino*

#### *4.3.1.4 Prueba de forma de la partícula.*

Para determinar el porcentaje de las partículas planas o sea las que tienen una relación entre su largo y su ancho mayor de 0.6 se lleva a cabo en la fracción retenida en la malla No.6.3.

Primero se reduce por cuarteo hasta obtener una muestra representativa que al pasarla por la malla de ¼” se obtenga un mínimo de 200 partículas.

Posteriormente esta muestra se criba por un conjunto de mallas que comprenden las siguientes: (2 ½”, 2”, 1 ½”, 1”, ¾”, ½”, 3/8”, ¼”, N°4) o su equivalente en mm (63.0mm, 50.0mm, 37.5mm, 25.0mm, 19.0mm, 12.5mm, 9.5mm, 6.3mm, 5mm), verificando que el total de los retenidos en la mallas sean como mínimo 100 partículas.

Se separan por tamaños las partículas y se toman de una en una las partículas que forman cada porción clasificada de la muestra y se verifica si pasan por la ranura correspondiente del calibrador de espesores, buscando la posición de la partícula más adecuada para esta operación.

Se reúnen todas las partículas que hayan pasado por las ranuras del Calibrador, se les determina su peso en gramos. Se calcula y se reporta el contenido de partículas con forma de laja del material pétreo, aplicando la siguiente fórmula:

$$IL_i = \frac{M_{Pi}}{M_{Ti}} \times 100$$

Donde:

IL<sub>i</sub>: Índice de Lajas de la fracción i (%).

M<sub>Pi</sub>: Masa de material que pasa por el calibrador de espesores para la fracción i (g).

M<sub>Ti</sub>: Masa total de ensaye de la fracción i (g).

El Índice de Lajas del agregado pétreo (IL) se obtiene de la siguiente expresión, aproximando al entero:

$$IL = \frac{\sum (IL_i \times R_i)}{\sum R_i}$$

Donde:

IL: Índice de Lajas del agregado (%).

IL<sub>i</sub>: Índice de Lajas de la fracción i (%).

R<sub>i</sub>: Porcentaje parcial retenido de la fracción i (%), aproximado al entero.

Los resultados se muestran a continuación

Árido	Índice de lajas (%)
Árido Pavimentos Norte	28,2
Árido Ferrovial Los Morros	19.8

*Tabla 4.3-n; Resultados ensayos de Índice de lajas*

4.3.1.5 Prueba para determinar la cubicidad de las partículas

Mediante este ensayo se establece el procedimiento para determinar el contenido porcentual de partículas chancadas, rodada y lajeadas de la fracción retenida en el tamiz 5 mm.

Cada fracción se determina visualmente. De la fracción chancada, con un calibrador se determina la masa de la fracción laja y sin laja. Ambas masas se registran como Di y Bi respectivamente.

De la fracción rodada, se determina mediante el calibrador la masa sin laja y la masa con laja, ambas masas se anotan como Ci y Ei, respectivamente.

El porcentaje de Chancado se calcula como:

$$Ch_i(\%) = \frac{B_i + D_i}{A_i} \times 100$$

El porcentaje de Rodado se calcula como:

$$R_i(\%) = \frac{C_i + E_i}{A_i} \times 100$$

El porcentaje de lajas se calcula como:

$$L_i(\%) = \frac{D_i + E_i}{A_i} \times 100$$

Donde, para cada fracción:

Ai: Masa de la fracción (g).

Bi: Masa de chancado (g).

Ci: Masa de rodadura (g).

Di: Masa de laja chancada (g).

Ei: Masa de laja rodada (g).

El chancado total se calcula como

$$Ch_T = Ch_{20} \times P_{20} + Ch_5 \times P_5$$

Donde:

Ch20: Porcentaje de chancado de la fracción retenida en 20 mm.

Ch5: Porcentaje de chancado de la fracción que pasa por 20 mm y es retenida en 5 mm.

P20: Factor de ponderación de la fracción retenida en 20 mm, referido al total de la muestra de ensaye. Se expresa en forma decimal.

P5: Factor de ponderación de la fracción que pasa por 20 mm y es retenida en 5 mm, referido al total de la muestra de ensaye. Se expresa en forma decimal.

El Rodado total se calcula como:

$$R_T = R_{20} \times P_{20} + R_5 \times P_5$$

Donde:

R20: Porcentaje de rodadora de la fracción retenida en 20 mm.

R5: Porcentaje de rodadora de la fracción que pasa por 20 mm y es retenida en 5 mm.

P20 y P5: Factores de ponderación definidos y calculados.

El Lajeado Total se calcula como:

$$L_T = L_{20} \times P_{20} + L_5 \times P_5$$

Donde:

L20: Porcentaje de laja de la fracción retenida en 20 mm.

L5: Porcentaje de laja de la fracción que pasa por 20 mm y es retenida en 5 mm.

P20 y P5: Factores de ponderación definidos y calculados.

Los resultados se muestran a continuación

Áridos	Chancadas (%)	Lajeadas (%)	Rodadas (%)
Áridos Pavimentos Norte	100	2,82	0,0
Áridos Ferrovial Los Morros	100	1.40	0,0

*Tabla 4.3-o; Resultados ensayos de Cubicidad de partículas*

*4.3.1.6 Resumen de las características de los áridos*

		Áridos Pavimentos Norte	Áridos Ferrovial Los Morros	
PARTICULAS CHANCADAS	(%)	100	100	MIN 70
PARTICULAS LAJEADAS	(%)	2,82	1,4	MAX 10
INDICE DE LAJAS	(%)	28,2	19,8	MAX 25 (*)
INDICE DE PLASTICIDAD	(%)	NP	NP	NP
DESGASTE DE LOS ANGELES	(%)	-	15,2	MAX 35
ADHERENCIA METODO ESTATICO	(%)	+95	+ 95	MIN 95
ADHERENCIA RIEDEL WEBER	(%)	1-7	2 - 8	MIN 0 - 5
DESINTEGRACION OR SULFATOS		0.5	-	
SALES SOLUBLES	(%)	12,87	0,11	
DENSIDAD EFECTIVA	(kg/m <sup>3</sup> )	2.758	2.712	

(\*) Valor recomendado

*Tabla 4.3-p; Resumen resultados*

**4.4 Características de los ligantes**

*4.4.1 Cemento Asfáltico CA 60/80*

Ensayos	Valores Típicos	Especificaciones Nch2440		Norma
		60/80		
	60/80	MIN	MAX	
Penetración a 25°C, 100g, 5s, (0,1mm)	67	60	80	Nch2340
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, (cm)	+150	100	-	Nch2342
Punto de inflamación, copa abierta Cleveland (°C)	+232	232		Nch2338
Solubilidad en Tricloroetileno, %.	+99,0	Min. 99%		Nch2341
Mancha: Heptano-Xilol, (% Xilol)	-20	Negativo para 20% max. Xilol		Nch2343
Índice de penetración, IP	-0.8	±1 para todos los grados		Nch2340
Película delgada rotatoria: Pérdida por calentamiento, (%)	0,1		,08	NCh2346
Penetración de residuo (% del original)	64	54		NCh2340
Ductilidad de residuo a 25°C, (cm) +150 +150 Min. 100 NCh2342	+150	Min.150		Nch2342
Índice de durabilidad, ID	2,6	Max.3,5		

4.4.2 *Cemento Modificado Cariphalte MD 60/80*

Ensayos	Valores Típicos	Especificaciones LNV		Norma
		60/80		
	60/80	MIN	MAX	
Penetración a 25°C, 100g, 5s, (0,1mm)	69	60	80	Nch2340
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, (cm)	+150	80	-	Nch2342
Punto de ablandamiento (°C)	70	60	-	Nch2337
Ductilidad a 5°C, 5 cm/min, (cm)	75	50		Nch2342
Recuperación elástica, 13°C, (%) 80 50 DIN 52013	80	50		DIN52013
Índice de penetración, IP	3,7	0,2		Nch2340
Punto de fragilidad Fraass, (°C)	-17	-17		NCh2344
Punto de inflamación, (°C) +235 235 NCh2338	+235	235		NCh2338

4.5 **Ensayo que induce envejecimiento acelerado en pavimentos flexible**

4.5.1 *Introducción*

Como hemos visto en los capítulos precedentes, el proceso de envejecer el asfalto por oxidación y estudiar sus propiedades de resistencia y adherencia, es un proceso químico que altera la composición química del asfalto. El asfalto está constituido por una fina dispersión coloidal de asfaltenos y maltenos. Los maltenos actúan como la fase continua que dispersa a los asfaltenos.

Las propiedades físicas de los asfaltos obtenidos por destilación permiten a los mismos ser dúctiles, maleables y reológicamente aptos para su utilización como materias primas para elaborar productos para el mercado vial. Al "soplar" oxígeno sobre una masa de asfalto en caliente se produce una mayor cantidad de asfaltenos en detrimento de los maltenos, ocasionando así de esta manera una mayor fragilidad, mayor resistencia a las altas temperatura y una variación de las condiciones reológicas iniciales.

Existen métodos para envejecer el asfalto, como el horno de película delgada rotatoria, o soplar el asfalto para producir un material con aplicaciones de uso industrial y especial, entre ellos distintas aplicaciones en techados, revestimientos de cañerías, sub. Sellados asfálticos para rellenar cavidades debajo de pavimentos rígidos (hormigón) y como protección anticorrosivo para fundaciones de tanques, columnas y otras construcciones.

Otros métodos tratan de reproducir el efecto de la mezcla almacenada en tolvas a temperatura constante, o a ciclos de calentamiento-enfriamiento, mientras que otros buscan mediante diseños de mezclas abiertas simular un grado de envejecimiento en estufas u hornos por periodos prolongados, pero siempre la tónica del proceso es envejecer el ligante. Ahora la interrogante sería, si se pudiera implementar un ensayo que simulara el efecto de "soplar" no el ligante sino la mezcla asfáltica, a la vez de mantenerla almacenada a temperatura regulable, sometiéndola a ciclos de calentamiento-enfriamiento sobre probetas disgregadas para luego

compactarlas en probetas marshall, nos daría una relación de su resistencia y adherencia luego del envejecimiento y comparar si la forma, la composición química, la banda de trabajo, la temperatura, el tiempo de exposición son variables decisivas en el comportamiento de la mezcla en su proceso de mezclado-almacenado-puesta en obra-vida útil.

#### 4.5.2 Metodología

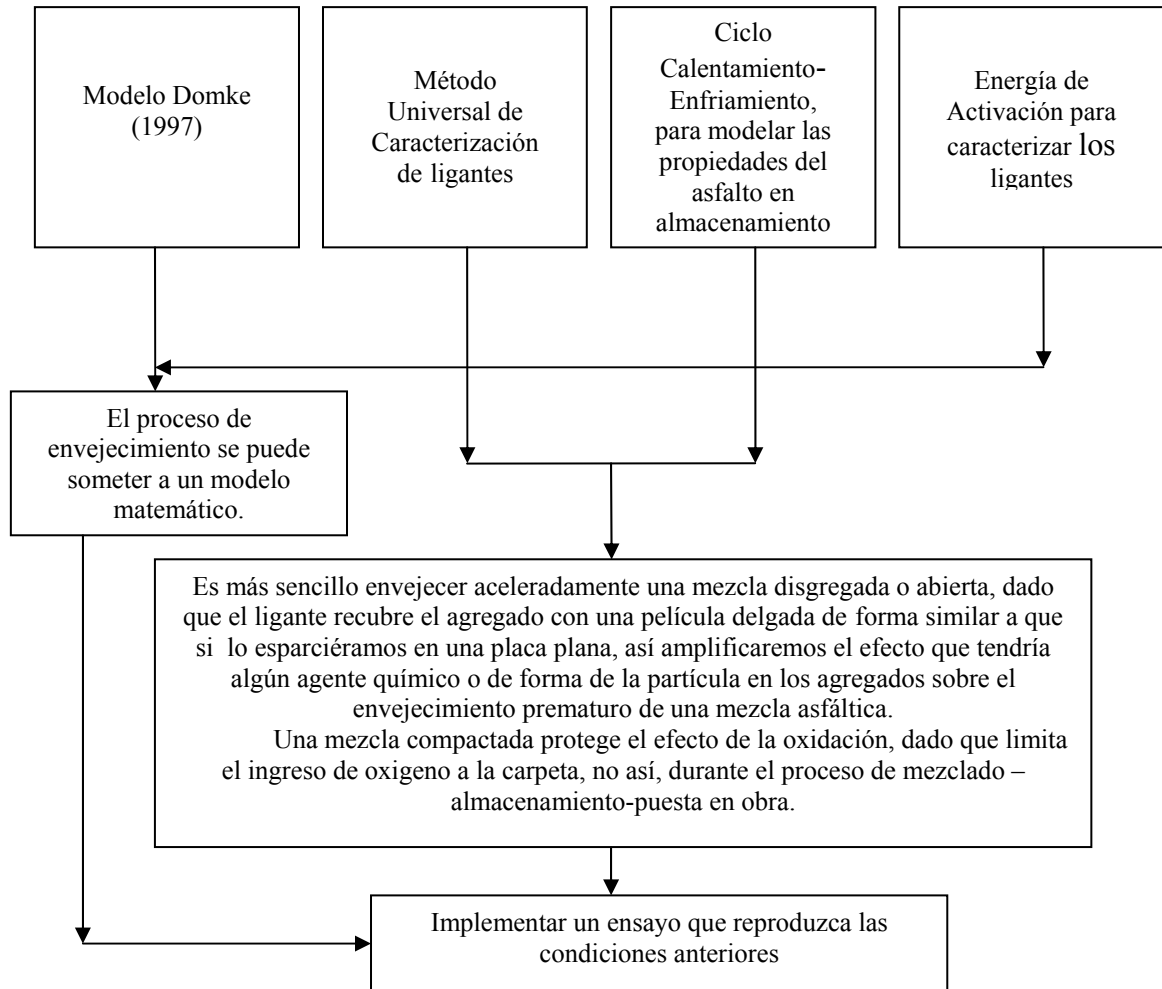


Figura 4.5-a; esquema explicativo, que ofrece herramientas para diseñar una nueva metodología para caracterizar un asfalto envejecido

De lo anterior, un equipo que cumple con las condiciones necesarias para implementar un ensayo de estas características es el NCAT Asphalt Content Tester, un equipo diseñado para obtener el contenido de asfalto de una mezcla por ignición.

Las condiciones de operación pueden modificarse para que el horno no calcine el asfalto, y solo lo envejezca. Para ellos se sometieron probetas disgregadas con 6% de asfalto y 1100 gramos de agregados pétreos, con mezclas diseñadas para asfalto normal CA 60-80 y asfalto modificado Cariphalte MD 60-80. a temperaturas constantes de 135 °C y 165 °C respectivamente, a lapsos de tiempo que varían entre 4 a 6 horas.

Para incinerar el ligante asfáltico en un horno de ignición, el calor debe ser transferido desde su fuente hacia el cemento asfáltico. En la Naturaleza, la transferencia de calor puede realizarse a través de conducción, convección, o mediante ondas de energía electromagnética.

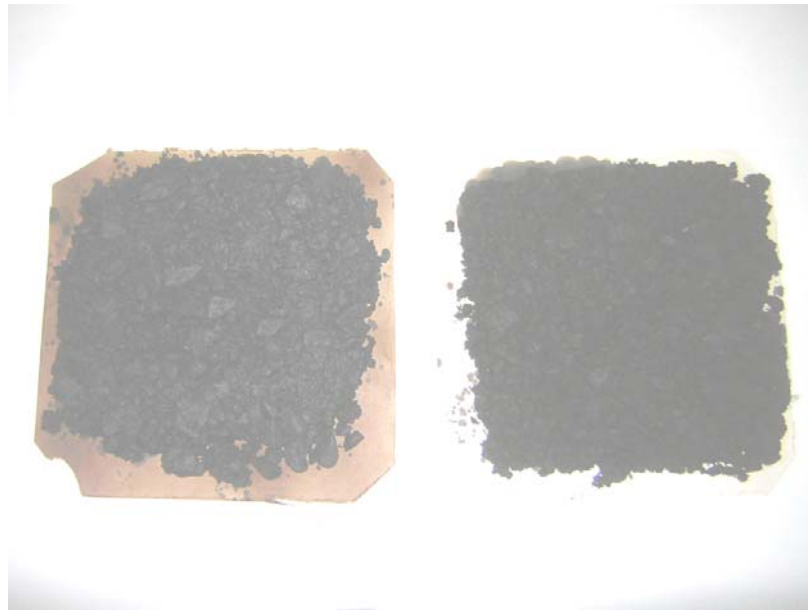
La conducción requiere que la fuente de calor y el objeto estén en contacto directo. Un ejemplo de esto es un calentador de agua, donde el elemento de calentamiento es sumergido en el agua. El calor generado por la corriente en el elemento es directamente transferido al agua que lo rodea. En la transferencia por convección, el calor es transferido primero a la interfase de aire cercana y en contacto con el elemento de calentamiento. El objeto es, entonces, calentado por corrientes de aire.

Todos los hornos de ignición de uso actual utilizan transferencia de calor por convección. Esto requiere que la cámara de aire que rodea la muestra de mezcla asfáltica sea calentada lo suficiente para transferir calor al ligante asfáltico. El tercer método de transferencia es mediante ondas de energía electromagnética. Un ejemplo de calentamiento electromagnético es el de la superficie terrestre por el sol. El espacio entre el sol y la Tierra es transparente a las ondas de energía del sol. la energía térmica del sol es absorbida por la superficie de la Tierra y el aire que rodea la tierra es calentado por convección, a pesar de que la atmósfera a 3000 metros de altura tenga una temperatura bajo cero.

El NCAT Asphalt Content Tester es un horno que calcina por convección forzada, es decir, la mezcla es bañada por corrientes de aire, lo que provoca pirolisis de la muestra y esta se quema, ahora si la temperatura se disminuye, estas características serian favorables para oxidar la mezcla y verificar sus propiedades mediante ensayos de resistencia, comprobando con esto, si el árido cumple una función importante en el envejecimiento acelerado de una mezcla asfáltica.







*Figura 4.5-b y 4.5-c; Envejecimiento acelerado de una mezcla asfáltica, la muestra de la derecha fue envejecida durante un periodo de 4 horas a 165 °C, la de la izquierda es la muestra original*

#### **4.6 Ensayo de Mezclas Asfálticas envejecidas**

##### *4.6.1 Ensayo de Resistencia a la Compresión Diametral*

##### *4.6.1.1 Velocidad de aplicación de la carga en el ensaye a tracción indirecta.*

Para llevar a cabo tanto la elaboración como el ensaye de las probetas de concreto asfáltico elaboradas en caliente en el laboratorio es fundamental definir tanto la velocidad de aplicación de la carga, como el equipo capaz de suministrar esa carga.

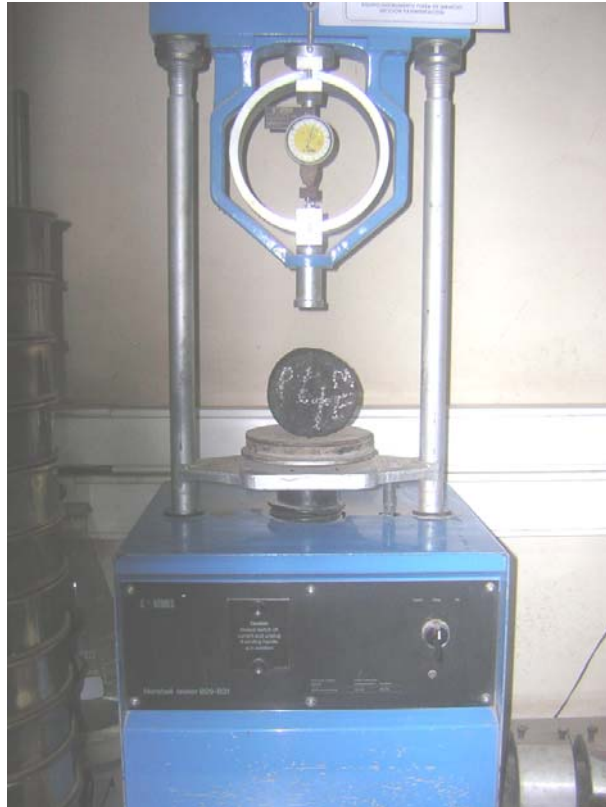
La elaboración de las probetas se define, después de realizar una serie de interacciones variando tanto la intensidad de la carga como el tiempo de aplicación de la misma. el método para compactarlas corresponde al método dinámico el cual consiste en compactar la mezcla asfáltica para la obtención de las probetas, dando una serie de golpes en ambas caras de las probetas que varía de acuerdo a la intensidad del tránsito para el cual se desea analizar y varía en 35, 50 y 75 golpes por cara, es decir, que una probeta que se hace dando 75 golpes por cara en total recibe 150 golpes del martillo Marshall para su elaboración.

Por la forma en que se realiza el Ensayo de Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas descrito en la norma española NLT – 161/84, que indica que la máquina que se adopte para este fin, llevará dos platos de carga planos, de acero y con superficies endurecidas, donde la inferior provista de asiento plano, sirve de base a la probeta. El tamaño de ambos platos deberá ser ligeramente superior al diámetro máximo de las probetas a ensayar y con sus superficies de apoyo rectificadas, no permitiéndose variaciones en altura, respecto al plano verdadero, superiores a 0.013 mm. en platos nuevos y a 0.025mm en platos de uso. [Normas NLT; 1992.]

La máquina para ensayar las probetas puede ser cualquier tipo de prensa que cumpla las condiciones de capacidad de carga y velocidad exigidas por la norma.

La velocidad especificada es de 0.05mm / min. Por cada milímetro de altura de la probeta: como pueden ensayarse probetas con alturas entre 50.8 mm para las más pequeñas y 203mm para las mayores, para cumplir el requisito de velocidad anterior se precisa que la máquina pueda suministrar velocidades entre 2.54 mm / min. y 10.16 mm / min. según los tamaños de las probetas que se ensayen. [Normas NLT; 1992.]

La máquina Marshall Tester, es una herramienta perfecta para poder realizar el proceso de elaboración de las probetas ya que cumple con las características que exige la norma tanto para el tamaño de las probetas como para el control de la velocidad, tiene una velocidad de 50,8 mm/min, y una capacidad de carga máxima de 30 kN.



*Figura 4.6-a; Maquina de compresión Marshall Tester*

#### *4.6.1.2 Elaboración de las probetas*

- Método dinámico:

Este método consiste en compactar la mezcla empleando la energía de compactación para el aparato Marshall, esto es dando 75 golpes en ambas caras de la probeta, para definir sus características geométricas las cuales son:

Diámetro: 101.6 mm.

Espesor: 63.5 mm.

Las características de este método son:

Contenido de Material Pétreo: 1,100 grs.

Contenido de Cemento Asfáltico en (%) del Peso del Material Pétreo: 6 %.

Contenido de Cemento Asfáltico en (grs.): 66 grs.

Temperatura para mezclar el Cemento Asfáltico (CA-60/80): 135°C.

Temperatura para mezclar el Cemento Asfáltico (Cariphalte MD 60-80): 165°C

Temperatura para mezclar el Material Pétreo: 145°C.

Número de golpes en ambas caras de la Probeta: 75.



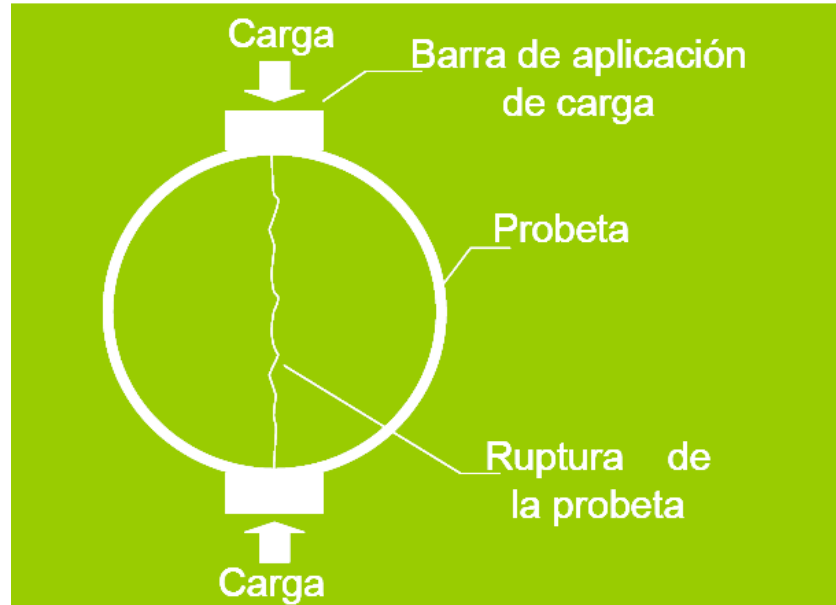
*Figura 4.6-b; Martillo Compactador Marshall*

#### *4.6.1.3 Método de ensaye a tracción indirecta (Ensaye Brasileño).*

El método de la Resistencia a la Compresión Diametral de Mezclas Asfálticas, fue desarrollado, durante el programa de investigación conocido como Programa de Desarrollo Estratégico de Carreteras ( Strategic Highway Research Program siglas en ingles SHRP), como un método de caracterización del concreto asfáltico a temperaturas de aproximadamente 30° a 0° C (A.A. Tayebali et al; 1995). En este ensayo una carga es aplicada verticalmente a lo largo de un espécimen de concreto asfáltico. Esta carga produce un complejo estado de esfuerzos, estos esfuerzos de tensión son largos y uniformes los cuales se generan de tal forma que se presentan perpendiculares a la dirección de la carga.

Si la carga es continua en una forma constante, el espécimen eventualmente sufre una falla por tensión. El ensayo de tensión indirecta fue utilizado para medir el módulo de tensión de concreto asfáltico durante muchos años. El ensayo de tensión indirecta fue recientemente implementado por Roque, Hiltunen, Stoffels, Buttlar y otros durante el Programa de

Desarrollo Estratégico de Carreteras, para utilizarse como un método para evaluar y caracterizar las distintas mezclas de concreto asfáltico a bajas temperaturas con el fin de prever el agrietamiento por temperatura. El ensayo de tensión Indirecta es ahora el proceso final de refinamiento de las mezclas y se encuentra implementado como una parte de los modelos de Super pavimento (Superpave). (D.W. Christensen et al; 1998).



*Figura 4.6-c; Esquema del principio de Resistencia a la Compresión Diametral*

El principio del método consiste en imponer una deformación por compresión diametral a una probeta cilíndrica situada horizontalmente entre los platos de una prensa. El parámetro a medir es la carga de ruptura de la probeta, optativamente, se puede determinar el desplazamiento vertical de la probeta durante la realización del ensayo si se dispone de sistemas pertinentes para medirlo.

El método de ensayo permite, por una parte, definir un parámetro capaz de caracterizar la mezcla bituminosa y por otra, optimizar, en función del contenido de ligante, la cohesión de la mezcla y su resistencia al esfuerzo cortante.

El procedimiento se puede utilizar en el control de calidad de las mezclas bituminosas durante la fabricación o la puesta en obra de la misma. [Normas NLT; 1992.]

#### *4.6.1.4 Aparatos y material necesarios.*

Para ensayar las probetas se emplea cualquier tipo de prensa de compresión mecánica o hidráulica, que pueda proporcionar durante la aplicación de la carga una velocidad del sistema de carga de (50.8 mm / min), y una carga de (100 kN) como mínimo.

La maquina Marshall Tester, cumple perfectamente con las características requeridas en el párrafo anterior, por lo que se adopta también para realizar el proceso de ensaye de las probetas a Tensión Indirecta.

El dispositivo permitirá la sujeción mediante contacto de la probeta por sus caras planas, utilizando dos tornillos de ajuste, así como la colocación de la probeta en forma que dos de sus generatrices diametralmente opuestas, estén contenidas en el plano diametral

perpendicular a los platos de la prensa. El contacto de estas dos generatrices con los elementos transmisores de la carga se puede hacer por medio de dos bandas de apoyo de madera contra chapada o cartón sin defectos, de 3 mm de espesor, 25 mm de ancho y de longitud igual o ligeramente superior a la generatriz de la probeta. Las bandas de apoyo no se utilizarán en más de un ensayo. También se puede situar la probeta directamente entre los dos platos de la prensa, siempre que se asegure el paralelismo entre ellos durante la carga.

En el caso del ensayo de las probetas que son objeto de estudio en este trabajo, la transmisión de la carga se hizo a través de dos placas de acero de aproximadamente 1 cm. de espesor, contra chapada y de longitud ligeramente superior a la generatriz de la probeta.

#### *4.6.1.5 Procedimiento.*

Aunque las dimensiones de las probetas no son característica privativa del ensayo, se deben utilizar preferentemente las de diámetro 101.5 mm y altura de unos 63 mm. El proceso de compactación de la probeta (energía y temperatura) se efectuará de acuerdo con las características de la mezcla y del ligante asfáltico en estudio, como ya se definió en la parte que corresponde a la elaboración de las probetas.



*Figura 4.6-d; Probetas para ser ensayadas*

#### *4.6.1.6 Ejecución del ensayo.*

Una vez que las probetas han sido elaboradas, se determinan sus características geométricas. Con el calibrador se determina el diámetro  $\pm 0.1\text{mm}$ , de la probeta en cuatro planos, dos a dos perpendiculares: dos en el plano superior de la probeta, dos en el plano inferior. El diámetro medio,  $d$ , es la media aritmética de las cuatro medidas. La diferencia entre dos medidas individuales no será superior a 1mm.

La altura de la probeta se mide también con precisión de  $\pm 0.1\text{mm}$  en cuatro puntos definidos por los extremos de los planos diametrales perpendiculares, con un radio de 10mm inferior al radio de la probeta. La altura media,  $h$ , es la media aritmética de las cuatro medidas la diferencia entre dos medidas individuales no será superior al 5% de la altura media, con un máximo de 5 mm.

Se puede realizar el ensayo a temperaturas diferentes a la temperatura ambiente con el fin de estudiar la susceptibilidad térmica de la mezcla en estudio. No obstante hay que tener presente que temperaturas por encima del punto de reblandecimiento del ligante exaltan el carácter viscoso de las mezclas, y que la fórmula empleada en la determinación de la resistencia a tracción indirecta, sólo es estrictamente aplicable a materiales con carácter fundamentalmente elástico.

Cabe mencionar que las probetas que se ensayaron motivo de estudio en este trabajo se ensayaron a temperatura ambiente. [Normas NLT; 1992].

Se aplica la carga a la probeta manteniendo la velocidad de deformación de 0.12 pulgadas / minuto constante, hasta que se rompa la probeta

El tiempo transcurrido entre el momento en que se coloca la probeta en la máquina y la ruptura de la misma en la prensa no debe exceder de 30 segundos.

Se registran o anotan los valores de la carga máxima de ruptura y el desplazamiento vertical, como es el caso de los registros que se encuentran en las tablas correspondientes a las características de las probetas con árido "A", árido "B", cemento asfáltico sin modificar y cemento asfáltico modificado con polímeros, envejecidos y sin envejecer.

#### *4.6.1.7 Resultados*

La resistencia a compresión diametral, tracción indirecta, de una probeta, se calcula con la fórmula siguiente:

$$R\tau = \frac{2.P}{\pi.h.d}$$

Donde:

Rt = Resistencia a compresión diametral (Kg / cm<sup>2</sup>).

P = Carga Máxima de ruptura, (Toneladas)

$\pi$  = Constante 3.14159

h = Altura de la probeta, (mm) ( $\pm$  0.1mm).

d = Diámetro de la probeta, (mm) ( $\pm$  0.1mm).

Mezcla Asfáltica: Asfalto CA 60/80 Árido Pavimentos Norte Mezcla sin Envejecer							
	Resistencia a la Compresión Diametral				Datos Probeta		
Nº Probeta	Lectura Dial	Kgf	kN	Rτ	Altura Prom. [cm.]	Diámetro Prom. [cm.]	Peso [g]
1	223	272,08	2,67	2,7	6,35	10,20	1140,5
2	215	262,40	2,57	2,5	6,64	10,15	1143,2
3	234	285,39	2,80	2,7	6,60	10,15	1152,9
4	360	437,85	4,29	4,2	6,50	10,15	1142,3
5	290	353,15	3,46	3,3	6,60	10,18	1158,1
6	283	344,68	3,38	3,3	6,54	10,20	1142,5

*Tabla 4.6-a; Resistencia a la compresión diametral, Mezcla asfáltica grupo 1, subgrupo 1*

Calibración dial:

$$\text{Kgf} = (\text{Lectura Dial}) * 1,21 + 2,25,$$

$$\text{kN} = \text{Kgf} / 101,972$$

Mezcla Asfáltica: Asfalto CA 60/80 Árido Pavimentos Norte Mezcla Envejecida							
	Resistencia a la Compresión Diametral				Datos Probeta		
Nº Probeta	Lectura Dial	Kgf	kN	Rτ	Altura Prom. [cm.]	Diámetro Prom. [cm.]	Peso [g]
1	420	510,45	5,01	4,8	6,64	10,15	1139,3
2	430	522,55	5,12	4,7	7,00	10,15	1142,5
3	450	546,75	5,36	5,1	6,70	10,15	1140,0
4	540	655,65	6,43	5,6	7,30	10,15	1130,2
5	510	619,35	6,07	5,4	7,20	10,15	1135,6
6	440	534,65	5,24	4,4	7,70	10,15	1150,8

*Tabla 4.6-b; Resistencia a la compresión diametral, Mezcla asfáltica grupo 1, subgrupo 2*

Calibración dial:

$$\text{Kgf} = (\text{Lectura Dial}) * 1,21 + 2,25,$$

$$\text{kN} = \text{Kgf} / 101,972$$

Mezcla Asfáltica: Asfalto Cariphalte MD 60-80 Árido Pavimentos Norte Mezcla sin Envejecer							
Resistencia a la Compresión Diametral					Datos Probeta		
Nº Probeta	Lectura Dial	Kgf	kN	Rτ	Altura Prom. [cm.]	Diámetro Prom. [cm.]	Peso [g]
1	206	251,51	2,47	2,4	6,50	10,15	1144,3
2	230	280,55	2,75	2,6	6,70	10,18	1153,2
3	195	238,20	2,34	2,3	6,63	10,15	1139,9
4	280	341,05	3,34	3,2	6,70	10,16	1147,7
5	310	377,35	3,70	3,7	6,44	10,15	1136,7
6	210	256,35	2,51	2,4	6,64	10,15	1161,1

*Tabla 4.6-c; Resistencia a la compresión diametral, Mezcla asfáltica grupo 2, Subgrupo 1*

Calibración dial:

$$\text{Kgf} = (\text{Lectura Dial}) * 1,21 + 2,25,$$

$$\text{kN} = \text{Kgf} / 101,972$$

Mezcla Asfáltica: Asfalto Cariphalte MD 60-80 Árido Pavimentos Norte Mezcla Envejecido							
Resistencia a la Compresión Diametral					Datos Probeta		
Nº Probeta	Lectura Dial	Kgf	kN	Rτ	Altura Prom. [cm.]	Diámetro Prom. [cm.]	Peso [g]
1	310	377,35	3,70	3,5	6,75	10,15	1119,8
2	350	425,75	4,18	3,9	6,90	10,15	1136,2
3	70	86,95	0,85	0,7	8,00	10,15	1160,9
4	375	456,00	4,47	4,2	6,83	10,15	1135,4
5	390	474,15	4,65	3,9	7,53	10,15	1135,5
6	510	619,35	6,07	6,1	6,40	10,15	1150,9

*Tabla 4.6-d; Resistencia a la compresión diametral, Mezcla asfáltica grupo 2, Subgrupo 2*

Calibración dial:

$$\text{Kgf} = (\text{Lectura Dial}) * 1,21 + 2,25,$$

$$\text{kN} = \text{Kgf} / 101,972$$



Mezcla Asfáltica: Asfalto CA 60/80 Áridos Ferrovial Los Morros Mezcla sin Envejecer							
	Resistencia a la Compresión Diametral				Datos Probeta		
Nº Probeta	Lectura Dial	Kgf	kN	R $\tau$	Altura Prom. [cm.]	Diámetro Prom.[cm.]	Peso [g]
1	205	250,30	2,45	2,4	6,40	10,18	1156,9
2	200	244,25	2,40	2,4	6,49	10,16	1153,6
3	410	498,35	4,89	4,8	6,50	10,15	1161,9
4	270	328,95	3,23	3,1	6,58	10,15	1136,0
5	273	332,58	3,26	3,2	6,53	10,15	1164,8
6	235	286,60	2,81	2,8	6,40	10,14	1148,0

Tabla 4.6-e; Resistencia a la compresión diametral, Mezcla asfáltica grupo 1, Subgrupo 1

Calibración dial:

$$\text{Kgf} = (\text{Lectura Dial}) * 1,21 + 2,25,$$

$$\text{kN} = \text{Kgf} / 101,972$$

Mezcla Asfáltica: Asfalto CA 60/80 Áridos Ferrovial Los Morros Mezcla Envejecido							
	Resistencia a la Compresión Diametral				Datos Probeta		
Nº Probeta	Lectura Dial	Kgf	kN	R $\tau$	Altura Prom. [cm.]	Diámetro Prom.[cm.]	Peso [g]
1	490	595,15	5,84	5,8	6,40	10,15	1149,9
2	620	752,45	7,38	7,4	6,40	10,15	1145,5
3	590	716,15	7,02	7,1	6,30	10,15	1163,6
4	470	570,95	5,60	5,5	6,60	10,10	1146,4
5	500	607,25	5,96	6,0	6,30	10,15	1153,2
6	530	643,55	6,31	6,2	6,50	10,15	1143,7

Tabla 4.6-f; Resistencia a la compresión diametral, Mezcla asfáltica grupo 1, Subgrupo 2

Calibración dial:

$$\text{Kgf} = (\text{Lectura Dial}) * 1,21 + 2,25,$$

$$\text{kN} = \text{Kgf} / 101,972$$

Mezcla Asfáltica: Cariphalte MD 60-80 Áridos Ferroviales Los Morros Mezcla sin Envejecer							
Resistencia a la Compresión Diametral					Datos Probeta		
Nº Probeta	Lectura Dial	Kgf	kN	Rτ	Altura Prom. [cm.]	Diámetro Prom. [cm.]	Peso [g]
1	310	377,35	3,70	3,7	6,34	10,13	1135,9
2	315	383,40	3,76	3,7	6,43	10,15	1158,6
3	380	462,05	4,53	4,5	6,40	10,14	1173,6
4	420	510,45	5,01	4,9	6,49	10,13	1160,8
5	360	437,85	4,29	4,3	6,35	10,15	1131,7
6	335	407,60	4,00	4,0	6,39	10,13	1135,8

*Tabla 4.6-g; Resistencia a la compresión diametral, Mezcla asfáltica grupo 2, Subgrupo 1*

Calibración dial:

$$\text{Kgf} = (\text{Lectura Dial}) * 1,21 + 2,25,$$

$$\text{kN} = \text{Kgf} / 101,972$$

Mezcla Asfáltica: Cariphalte MD 60-80 Áridos Ferroviales Los Morros Mezcla sin Envejecer							
Resistencia a la Compresión Diametral					Datos Probeta		
Nº Probeta	Lectura Dial	Kgf	kN	Rτ	Altura Prom. [cm.]	Diámetro Prom. [cm.]	Peso [g]
1	190	232,15	2,28	2,3	6,35	10,15	1171,7
2	320	389,45	3,82	3,8	6,40	10,15	1151,7
3	520	631,45	6,19	6,1	6,45	10,15	1160,8
4	420	510,45	5,01	4,5	7,10	10,15	1130,9
5	490	595,15	5,84	5,6	6,70	10,15	1152,9
6	470	570,95	5,60	5,3	6,70	10,15	1150,8

*Tabla 4.6-h; Resistencia a la compresión diametral, Mezcla asfáltica grupo 2, Subgrupo 2*

Calibración dial:

$$\text{Kgf} = (\text{Lectura Dial}) * 1,21 + 2,25,$$

$$\text{kN} = \text{Kgf} / 101,972$$

Asfalto CA 60/80, Arido Pavimentos Norte

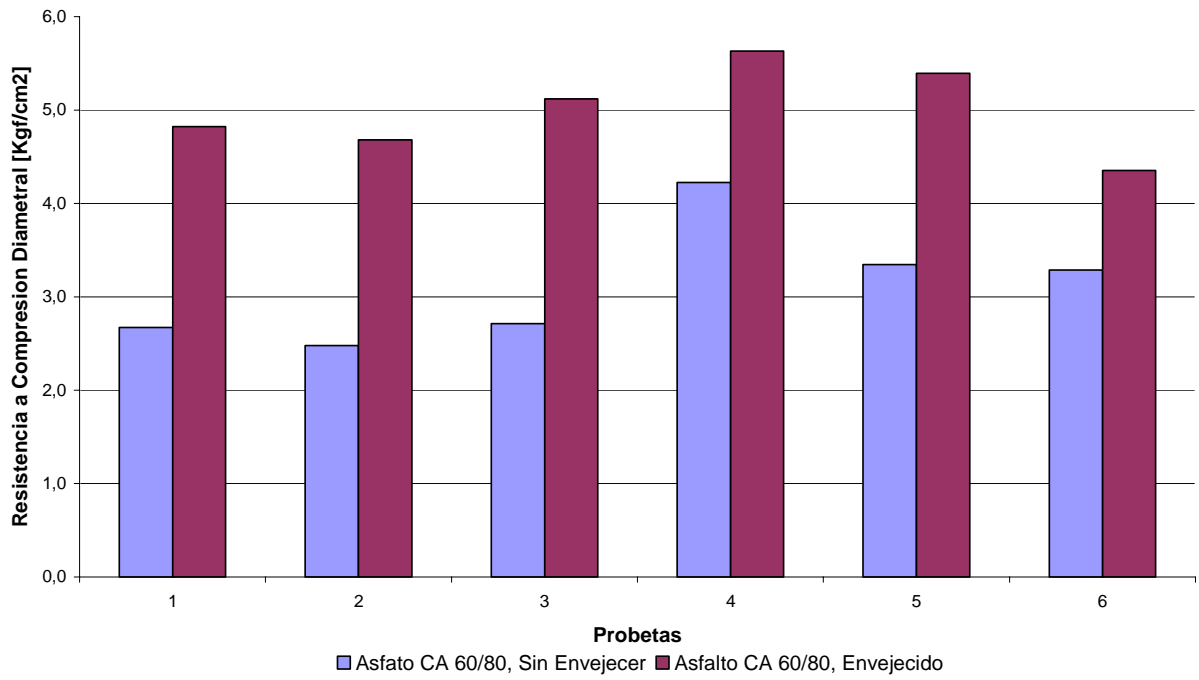


Grafico 4.6-a; Mezcla Asfáltica, grupo 1

Asfalto Cariphalte MD 60-80, Arido Pavimentos Norte

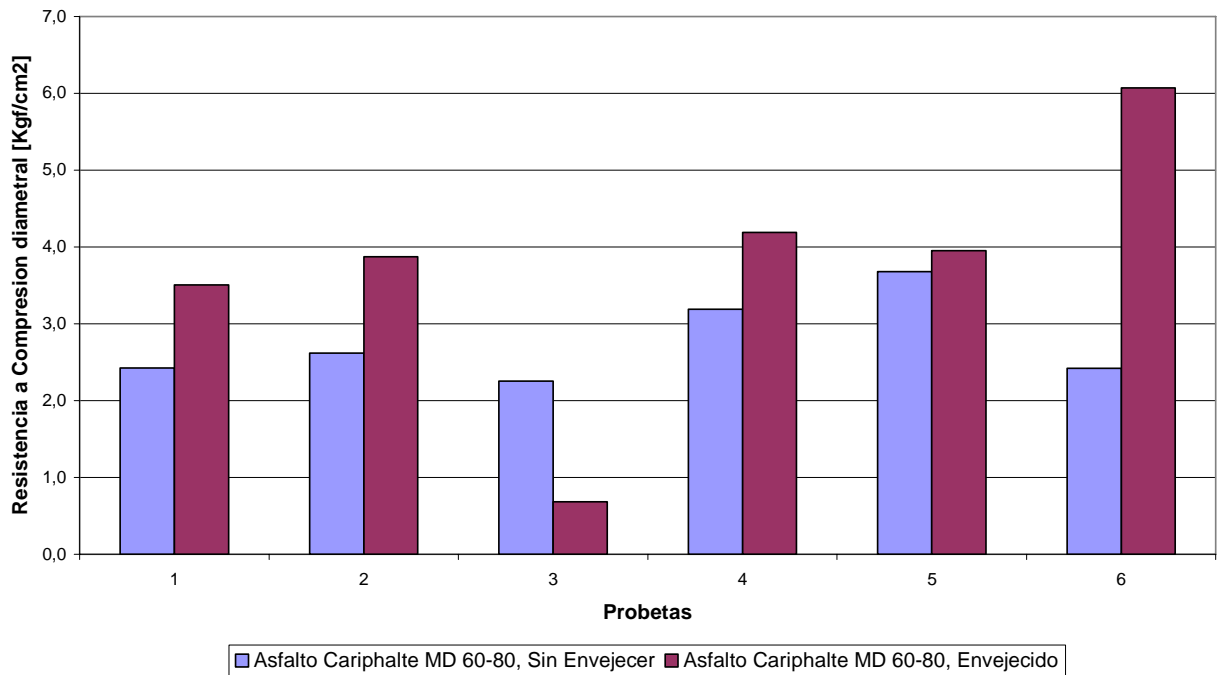


Grafico 4.6-b; Mezcla Asfáltica, grupo 2

Asfalto CA 60/80, Arido Ferrovial Los Morros

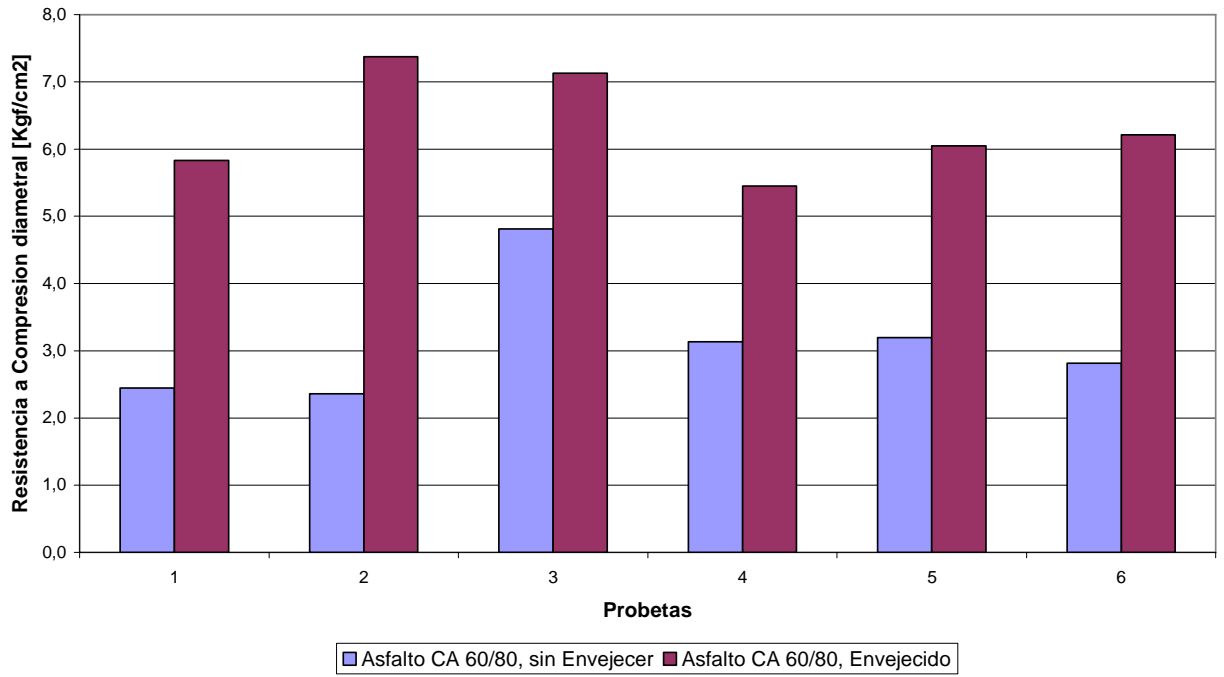


Grafico 4.6-c; Mezcla Asfáltica, grupo 1

Asfalto Cariphalte MD 60-80, Arido Ferrovial Los Morros

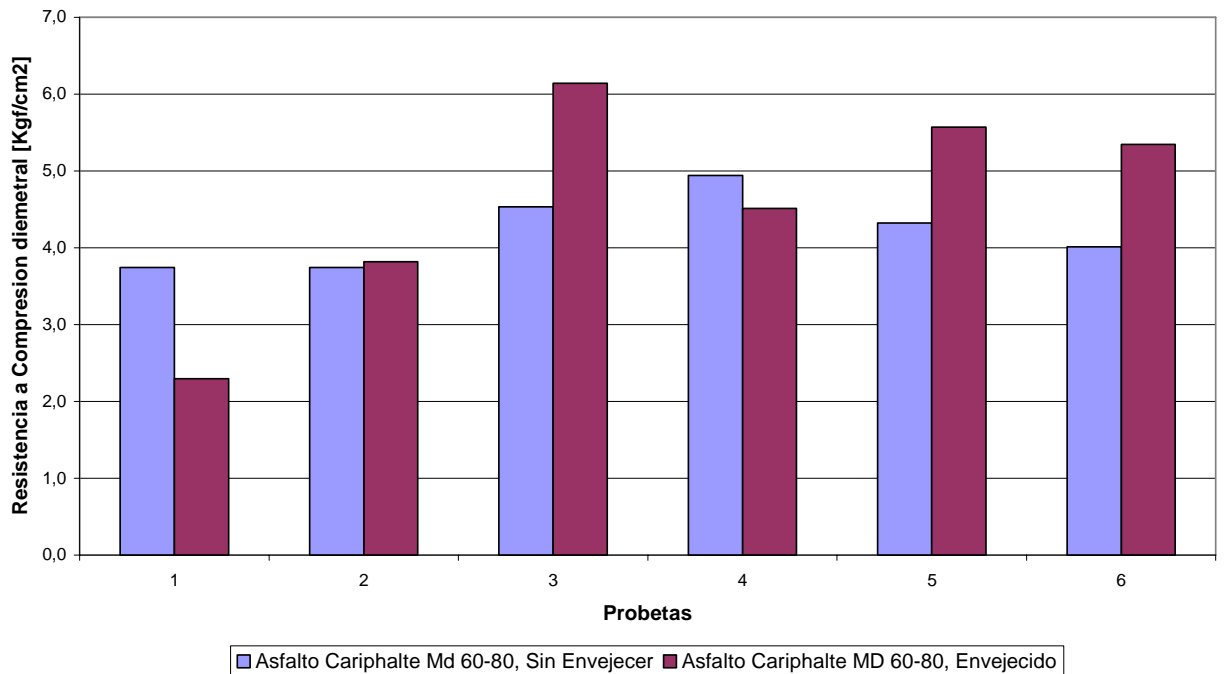


Grafico 4.6-d; Mezcla Asfáltica, grupo 2

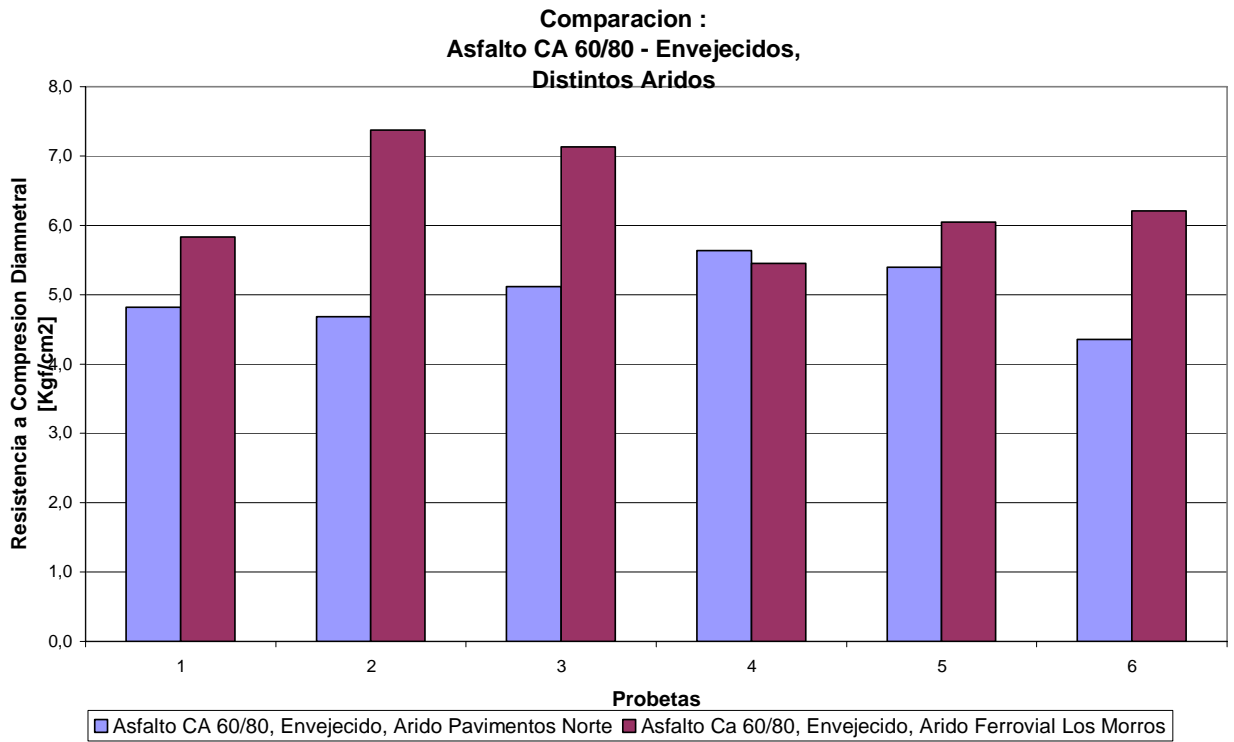


Grafico 4.6-e; Comparación Mezcla Asfáltica, grupo 1, grupo 1

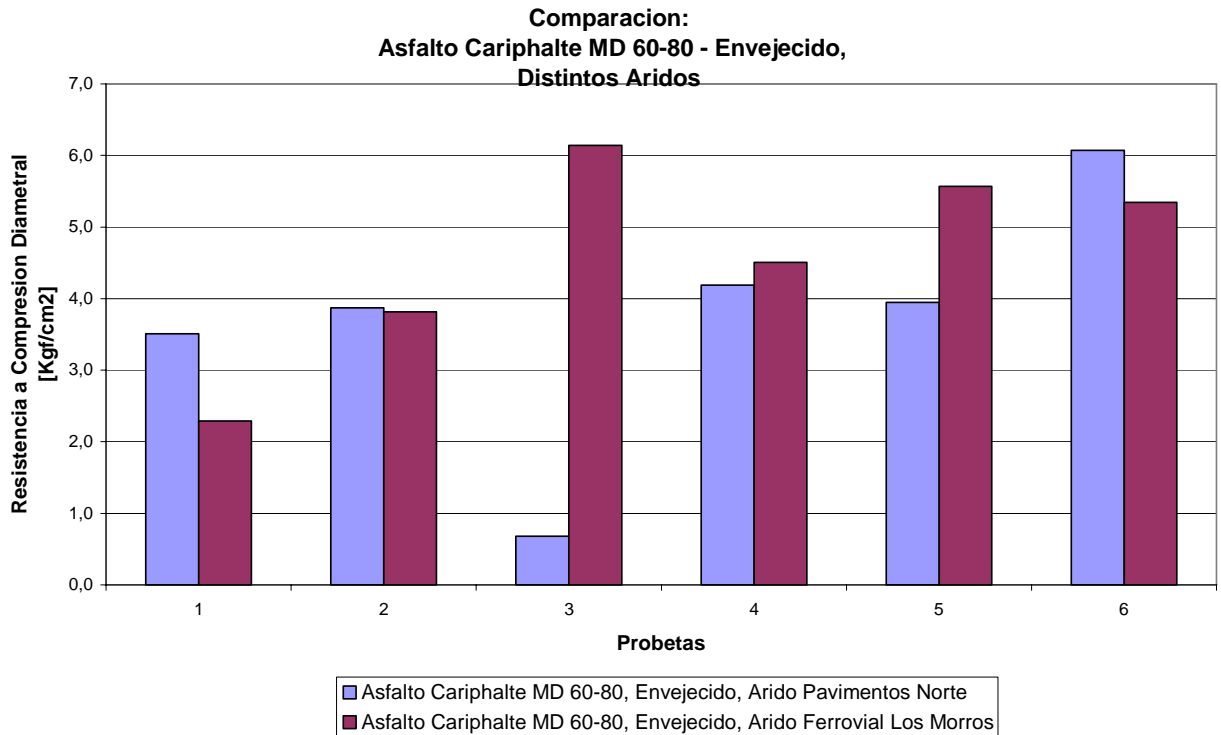


Grafico 4.6-f; Comparación Mezcla Asfáltica, grupo 2, grupo 2

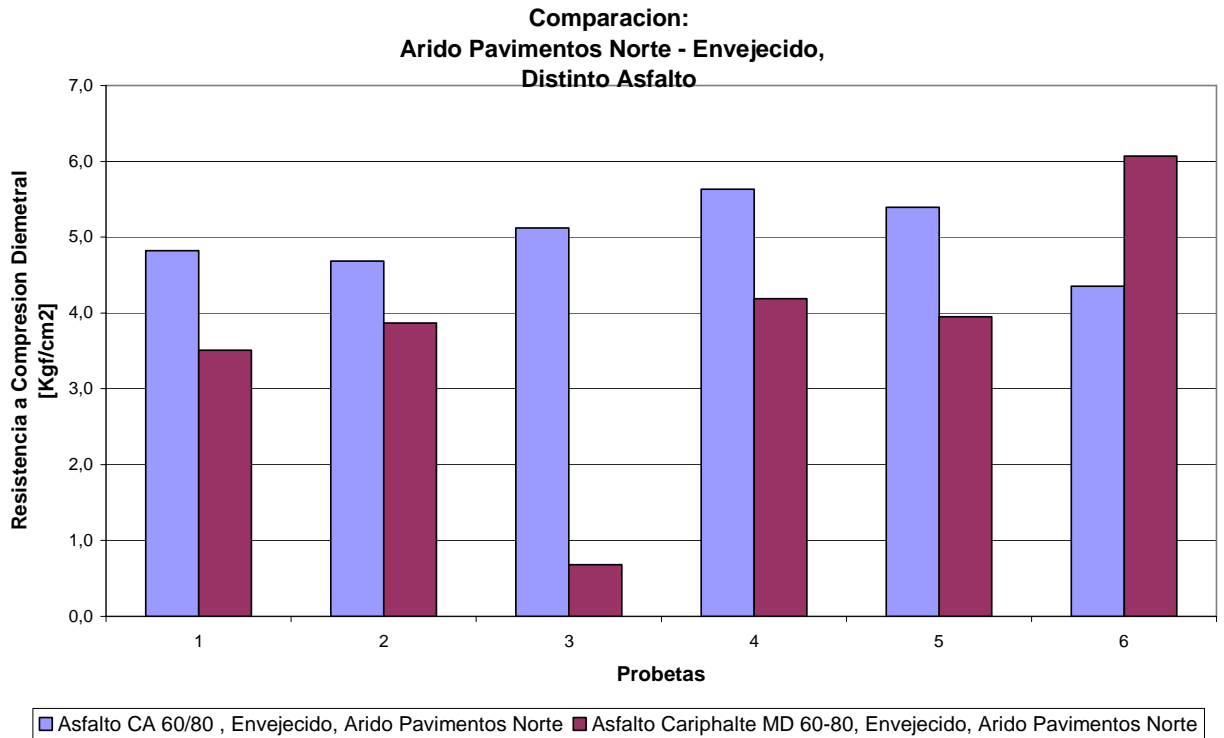


Grafico 4.6-g; Comparación Mezcla Asfáltica, grupo 1, grupo 2

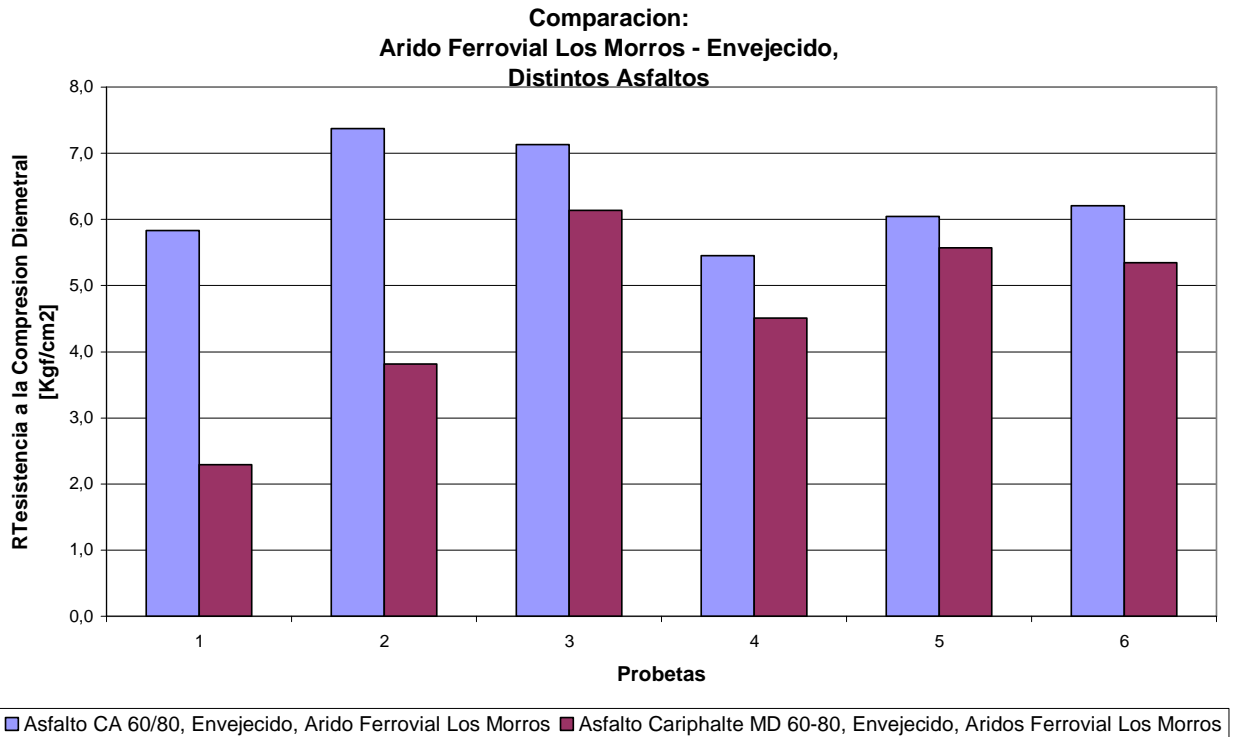


Grafico 4.6-h; Comparación Mezcla Asfáltica, grupo 2, grupo 1

4.6.2 *Ensayo de viscosidad rotacional Brookfield*

De las probetas ensayadas a compresión diametral, se escogieron probetas representativas de cada grupo para recuperar el ligante y analizarlo.

Solo se escogieron las probetas con asfalto CA 60/80, debido a que la recuperación de un ligante modificado produce efectos adversos en sus propiedades y afectaría el análisis posterior de sus características.

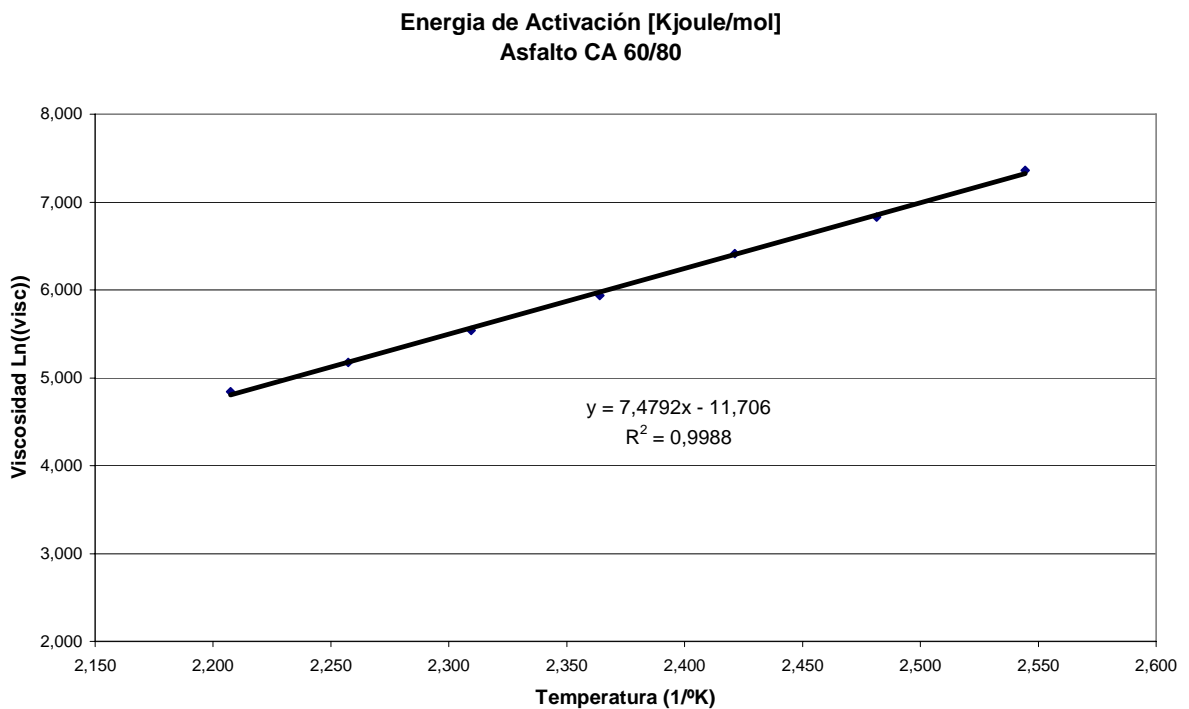
La recuperación se realizó mediante extracción y rota vapor.

Mezcla Asfáltica	Probetas
Áridos Pavimentos Norte	2 y 3
Áridos Ferrovial Los Morros	4 y 5

*Tabla 4.6-i; Elección de Probetas para recuperación de ligantes*

La viscosimetría de los ligantes asfálticos seleccionados se determinó utilizando un viscosímetro rotacional programable Brookfield DV-III+. Se uso el usillo denominado SC4-21. Las mediciones se hicieron a 120°C, 130°C, 140°C, 150°C, 160°C, 170°C y 180°C en todos los materiales. La susceptibilidad al cizallamiento de los ligantes se midió en velocidades de cizallado de 0.5, 1, 2, 5, 10, 20 y 50 RMP. Se generaron diez mediciones en intervalos de 1-minuto para cada taza de corte. Se tomó el promedio de los últimos tres minutos de lecturas y se utilizaron en el análisis.

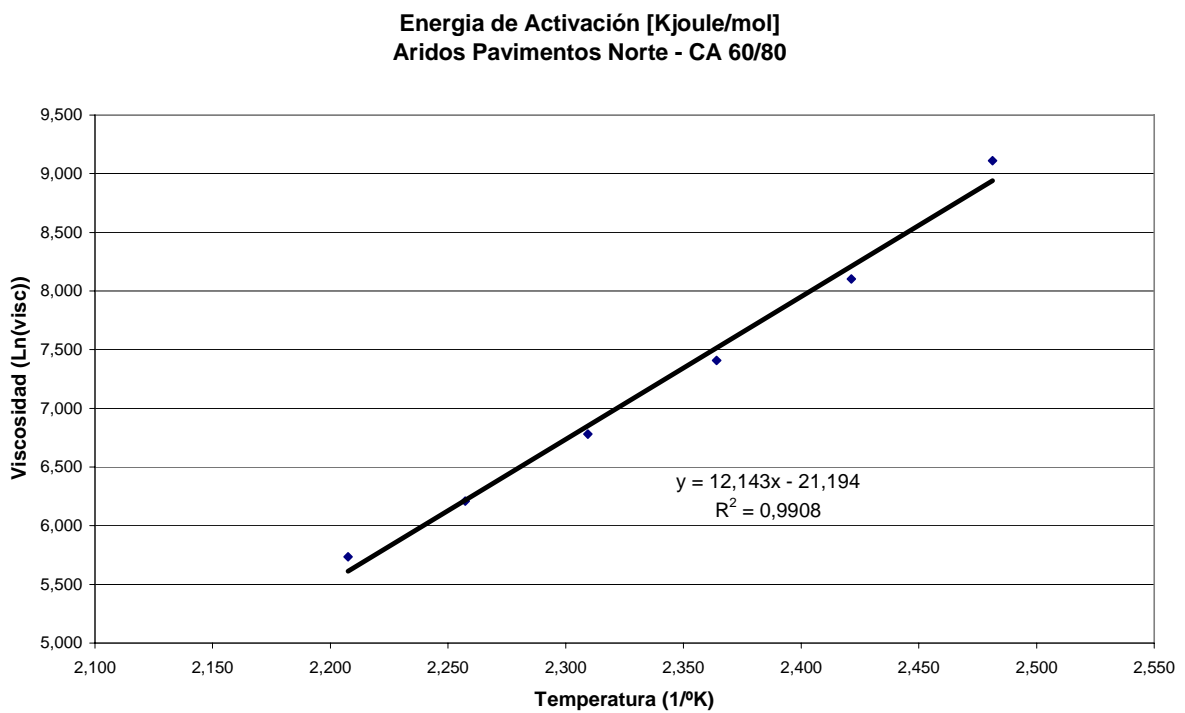
Los resultados referentes a la Energía de Activación obtenidos mediante el uso del Viscosímetro Rotacional Brookfield se muestran a continuación:



1000* 1/T°(K°)	Ln(viscosidad)
2,545	7,362
2,481	6,830
2,421	6,417
2,364	5,935
2,309	5,541
2,257	5,176
2,208	4,844

<b>Ea (Kjoule/mol)</b>	<b>62,2</b>
----------------------------	-------------

Grafico 4.6-i y Tabla 4.6-j; Energía de Activación, CA 60/80, Sin Envejecer



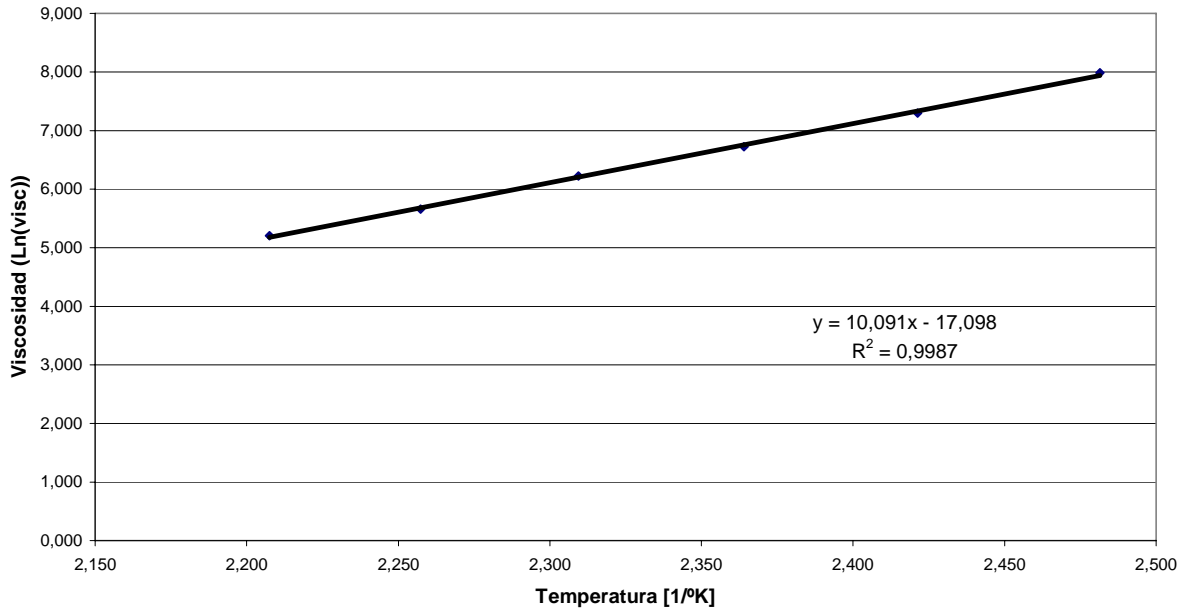
1000* 1/T°(K°)	Ln(viscosidad)
2,481	9,111
2,421	8,102
2,364	7,409
2,309	6,780
2,257	6,209
2,208	5,733

<b>Ea (Kjoule/mol)</b>	<b>101,0</b>
----------------------------	--------------

Grafico 4.6-j y Tabla 4.6-k; Energía de Activación, CA 60/80, Áridos Pavimentos Norte, Envejecido



Energía de Activación [KJoule/mol]  
Arido Ferrovial Los Morros - CA 60/80



1000* 1/T°(K°)	Ln(viscosidad)
2,481	7,988
2,421	7,298
2,364	6,721
2,309	6,223
2,257	5,656
2,208	5,209

<b>Ea (Kjoule/mol)</b>	<b>84,0</b>
----------------------------	-------------

Grafico 4.6-k y Tabla 4.6-l; Energía de Activación, CA 60/80, Áridos Ferrovial Los Morros, Envejecido

Mezcla Asfáltica	Penetración 25° C	Punto de Ablandamiento
Áridos Pavimentos Norte	18 dmm	82 °C
Áridos Ferrovial Los Morros	20 dmm	72 °C

Tabla 4.6-m; Penetración y Punto de Ablandamiento de los ligantes envejecidos

*4.6.3 Ensayo de impacto por medio de la placa Vialit*

Se desarrolla un tratamiento superficial simple, sobre placas de Vialit de 20 X 20 cm. de área, se colocan 100 piedras del corte entre la malla ½” y 3/8” sobre esta placa que contiene el ligante esparcido sobre ella. A continuación se coloca la placa sobre el pedestal y se deja caer una bola de acero de 500 gramos, sobre la placa, el tratamiento superficial queda invertido al golpe, por lo tanto el grado de adherencia se mide de acuerdo a los áridos desprendidos luego del impacto de la bola de acero. El resultado se expresa en porcentaje del total.

Los resultados se muestran a continuación

Tratamiento Simple	Adherencia
Áridos pavimentos Norte	> 95%
Áridos Ferrovial Los Morros	> 95%

*Tabla 4.6-n; Ensayo sobre placa Vialit*

**CAPITULO 5**  
**DISCUSION Y CONCLUSIONES**

## 5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 5.1 Discusión

El desarrollo de esta investigación ha llevado a resultados interesantes en el área del envejecimiento de mezclas asfálticas, por un lado se logra caracterizar mediante ensayos mecánicos, el endurecimiento que experimentan los ligantes que son sometidos a oxidación usando un horno de convección forzada, y la diferencia notable que este efecto tiene al emplear diferentes áridos en la confección de la mezcla.

Por otra parte, se introduce un índice para caracterizar este envejecimiento a nivel molecular, como es la Energía de Activación, esta Energía muestra al igual que los ensayos mecánicos la evolución que tiene la mezcla al ser envejecida, y la diferencia que muestran las mezclas desarrolladas con áridos de distinta procedencia.

Es así que podemos afirmar que el empleo de áridos marginales que no cumplen con las especificaciones afecta de manera significativa en la adherencia y resistencia al deterioro de mezclas asfálticas.

Las propiedades químicas, afinidad árido-ligante, la banda que se usa, la textura, etc., pueden ser factores a considerar si un árido es potencialmente vulnerable a generar mezclas susceptibles al envejecimiento dentro de una mezcla asfáltica. Por tanto esta investigación presenta la idea de prestar atención a la procedencia del árido, es más, desarrollar ensayos que estudien el envejecimiento no solo del ligante como un elemento aparte. Sino el conjunto árido-ligante, como mezcla.

#### 5.1.1 Envejecimiento de Mezclas Asfálticas

Como parte de esta Investigación se implementó un ensayo que permite estudiar el envejecimiento del ligante dentro de la mezcla asfáltica. La finalidad de tal ensayo, es analizar de que manera puede afectar al grado de envejecimiento del ligante asfáltico, y vida útil del pavimento las características físicas y químicas de cierto árido y si este acelera o no el proceso de envejecimiento. Con este objetivo se analizó la idea de usar un equipo que cumpliera con las características de los mecanismos básicos para acelerar el proceso de envejecimiento en mezclas asfálticas, por lo que se llegó a la puesta a punto de un horno de ignición diseñado para calcinar asfalto. Dado que la función principal de este horno es quemar el asfalto dentro de una mezcla y obtener el porcentaje de ligante, se debió modificar su programación, para que elevara la temperatura a una condición de ensayo bajo los 200 °C. Es interesante destacar que por tratarse de un horno de convección forzada, se logra por efecto de la corriente de aire circundante a altas temperaturas, que las probetas alcancen el envejecimiento por oxidación del ligante en forma controlada.

Los Ensayos de Resistencia a la compresión diametral de probetas con distintos niveles de envejecimiento así lo demuestran.

### **5.1.2 Energía de Activación**

Para caracterizar el ligante recuperado se usaron propiedades índices conocidas como son la Penetración y el Punto de Ablandamiento, introduciendo, además una forma de evaluación con base científica como lo es la determinación de las características de flujo de viscosidad. Este flujo es característico de cualquier líquido que es sometido a un proceso térmico, donde las moléculas alcanzan niveles de energía que sobrepasan una barrera característica del proceso viscoso. Al incrementarse la temperatura, también se incrementa la energía térmica de las moléculas, así como los sitios vacantes o “huecos” en el líquido. En base a este principio se incorpora a esta investigación el uso de la Energía de Activación para describir el grado de envejecimiento en ligantes sometidos a envejecimiento acelerado, fenómeno directamente relacionado a cambios en la viscosidad del ligante.

Según esta teoría los ligantes asfálticos envejecidos muestran una energía de activación más alta. La oxidación incrementa la cantidad de moléculas polares en el ligante asfáltico. La concentración elevada de moléculas polares incrementa las fuerzas intermoleculares que conducen a interacciones más fuertes. Estas interacciones dentro del ligante asfáltico resultan en una mayor resistencia al flujo y por consecuencia a una mayor barrera de energía de activación de flujo.

Los ensayos realizados con el Viscosímetro Rotacional Brookfield revelan que la Energía de Activación aumenta en los ligantes sometidos a envejecimiento, y es mas, este índice resultó también potencialmente significativo para evaluar la interacción árido-ligante en el proceso de envejecimiento.

### **5.1.3 Verificación experimental del método de ensayo**

Los ensayos desarrollados para verificar la influencia de los áridos en el envejecimiento del ligante dentro de una mezcla asfáltica sometida a envejecimiento acelerado son bastante acertados, ya que ha quedado demostrado que se puede diferenciar claramente los efectos físico y físico-químico. La idea de someter las probetas envejecidas a ensayo a compresión diametral busca precisamente caracterizar el envejecimiento desde el punto de vista físico, por otra parte el hecho de extraer o recuperar el ligante de las probetas ensayadas, y aplicar el ensayo de Energía de Activación de flujo viscoso que representa el envejecimiento desde el punto de vista físico-químico.

En ambos casos queda de manifiesto que las características del árido utilizado dentro de la mezcla, provoca diferencias apreciables, por ejemplo, las resistencias a compresión diametral para probetas confeccionadas con ligante CA 60-80 bajo las mismas condiciones de envejecimiento muestran una clara diferencia en resistencias, por un lado tenemos una mezcla (la con áridos marginales) que ha perdido adherencia conforme se va produciendo el envejecimiento, frente a la otra (la con áridos normales) que experimenta resistencias mayores. También cabe señalar que este aumento de resistencia se debe a que el cemento asfáltico se endurece al ser envejecido, pero que este envejecimiento puede o no afectar a la adherencia árido-ligante, dependiendo de la calidad de estos.

Por otra parte la Energía de Activación de flujo viscoso muestra claramente que un ligante (el de la mezcla con áridos marginales) se ha envejecido significativamente más que el otro (mezclas con árido normal). Las mezclas diseñadas con árido de Pavimentos Norte ( arido marginal) presentan claras diferencias con su par de Ferrovial Los Morros, lo que reafirma lo planteado en esta investigación sobre el efecto adverso que puede tener un árido en el comportamiento futuro de un pavimento flexible.

Los resultados obtenidos en los ensayos de envejecimiento para verificar la efectividad como predictores del comportamiento del pavimento asfáltico se ajustan a lo esperado, así, por ejemplo, el ensayo de compresión diametral presenta mezclas envejecidas con resistencia mayor, incluso el doble que la mezcla original para el caso de mezclas con áridos normales, lo que se debe al endurecimiento del ligante producto de su oxidación con la consiguiente rigidización de la mezcla.

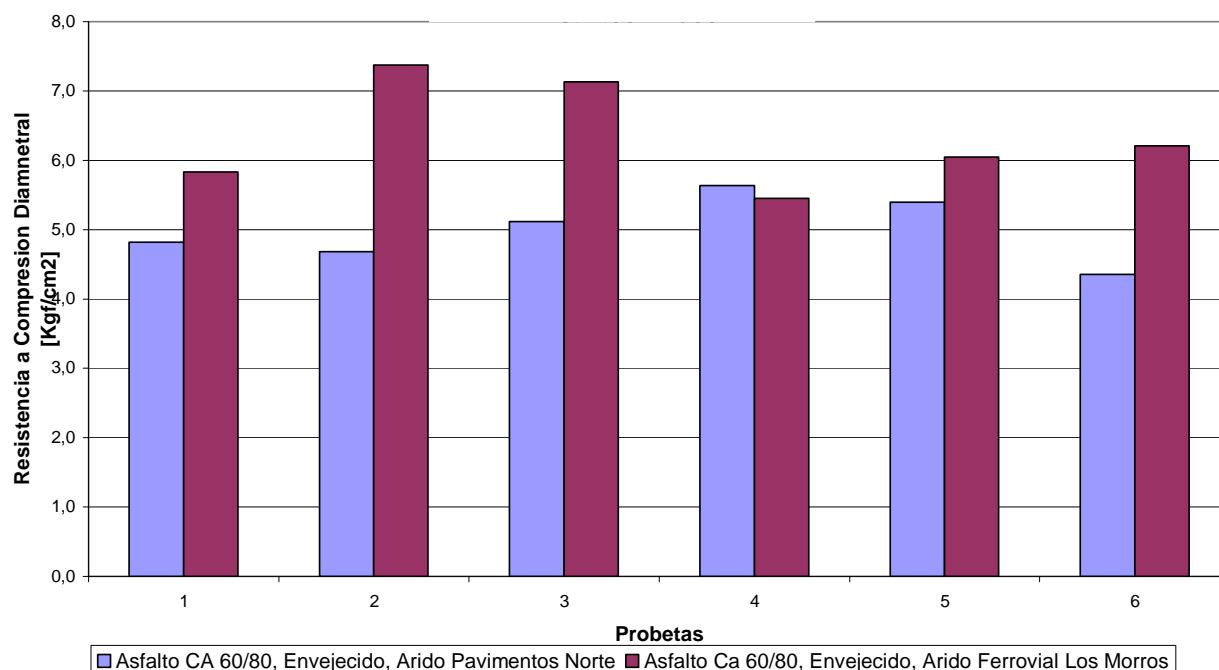


Figura 5.4-a; Comparación de dos mezclas asfálticas con distintos áridos, después de envejecidos, mediante el ensayo de compresión diametral.

De la figura 5.4-a podemos apreciar la diferencia de comportamiento mecánico de ambas mezclas. La mezcla confeccionada con Áridos de Pavimentos Norte muestra menor resistencia que la de Ferrovial Los Morros, esto tendría una explicación en su pérdida de adherencia producto del envejecimiento que en esta mezcla sería atribuido al árido. Esto se demuestra a la vez por el ensayo del ligante recuperado al someterlo a ensayo de viscosimetría rotacional, donde se obtiene una Energía de Activación mas alta para el ligante de la mezcla con áridos de Pavimentos Norte que la obtenida con la mezcla de referencia.

Según lo anterior la adherencia árido-ligante se vería afectada por las características del árido desde el punto de vista físico y químico. Además en el proceso

de envejecimiento se produce pérdida de volátiles, aumento en tensiones, aumento en el porcentaje de asfaltenos, etc. El ligante pierde tanto en cuanto a capacidad adherente como en deformabilidad bajo carga, es más rígido, con propiedades reológicas distintas al asfalto original.

## 5.2 Conclusiones

- 1.- El método de ensayo propuesto en la investigación permite apreciar diferencias significativas en el grado de envejecimiento del ligante entre una mezcla confeccionada con Áridos Marginales (Pavimentos Norte) con respecto a esa misma mezcla confeccionada con Áridos Normales (Ferrovial los Morros). Esto se comprende a través de ensayos mecánicos y ensayos químicos.
- 2.- El horno de ignición utilizado para el envejecimiento de las mezclas (horno de calcinación) es una herramienta útil para estos efectos.
- 3.- El valor de la Energía de Activación como índice para caracterizar el grado de envejecimiento ligantes ha demostrado una alta correlación con otras propiedades. El envejecimiento incrementa la energía de activación de flujo. La oxidación incrementa el número de moléculas polares en los ligantes asfálticos, resultando en un incremento de las fuerzas intermoleculares.
- 4.- La adherencia arido-ligante se ve afectada por el tipo de arido utilizado en la mezcla sometida a envejecimiento.
- 5.- El mayor envejecimiento por oxidación se produce en la etapa de mezclado y transporte, como también en el almacenamiento de la mezcla.

## 5.3 Recomendaciones

Se recomienda para posteriores estudios catalogar los ligantes asfálticos que se utilizan en el país según los valores de Energía de Activación, en estado original y después de envejecer, y relacionándolos con la pérdida de volátiles y el porcentaje de asfaltenos.

Por otra parte con las herramientas anteriores se puede investigar la eficiencia de algunos aditivos para aumentar la adherencia arido-ligante cuando se utilizan áridos marginales.

**BIBLIOGRAFIA**

- 1.- **Valverde Pozo, Sergio Patricio** “Envejecimiento de mezclas asfálticas en la región de Antofagasta. Evolución de las propiedades del cemento asfáltico”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile (1996).
- 2.- **Muñoz Tapia, Jaime Alejandro** “Uso de los tratamientos superficiales asfálticos en Chile”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile (1987).
- 3.- **Pascual Domínguez, José Miguel** “Evaluación del envejecimiento del asfalto en base a propiedades físicas de consistencia y propiedades químicas”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile (1990).
- 4.- **Instituto Chileno del Asfalto** “Tecnología del asfalto y prácticas de construcción”. 1ra edición. Santiago de Chile (1991).
- 5.- **Salgado, Jorge, Fuentes, Claudio** “Curso de Laboratorista Vial. Volumen II” Laboratorio Nacional de Vialidad, Santiago (1983).
- 6.- **Thenoux, Guillermo** “Aplicaciones del ensayo de punto de fragilidad Fraas en el estudio de susceptibilidad al envejecimiento” Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- 7.- **Ortiz Moscoso, Javier Augusto** “SHRP, Superpave Mix Design”. Laboratorio de Pavimentos, Tecnología de Mezclas asfálticas. Pontificia Universidad Católica (2004).
- 8.- **Águila Rodríguez, Pablo del** “Experiencia sobre el diseño y criterios para la construcción de pavimentos en zonas de altura”. 10º Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Sevilla, Noviembre 1999.
- 9.- **Martínez, Caicedo, G, B** “Efecto de la radiación ultravioleta en el envejecimiento de ligantes y mezclas asfálticas”. Universidad de los Andes, Bogota D.C. Colombia (2005)
- 10.- **Rodríguez Deras, Jorge A.** “Incidencia de los agregados en el comportamiento de las carpetas asfálticas”. Ministerio de Obras Públicas de El Salvador. Unidad de investigación y desarrollo vial, (2003)
- 11.- **Sánchez-Leal, Freddy J.** “Una carta de gradación para mezclas asfálticas”. Fundación Solestudios, Venezuela (2004).
- 12.- **ASFALCHILE.** “Pavimentación- aplicaciones”, Chile (2006)
- 13.- **CADE-IDEPE.** “Cuenca del Río Maipo”, Chile, julio 2004
- 14.- **Thenoux Z, Guillermo** “Filosofía y Conceptos para la Gestión de mantenimiento de Pavimentos Asfálticos”, Escuela de Ingeniería, Universidad Católica de Chile, Agosto 2003.



- 15.- **Rodríguez, Pablo del Águila.** “Caracterización del Asfalto Recuperado de una Carpeta en Servicio para la Evaluación del Pavimento”, Consultor en Suelos y Pavimentos, Peru.
- 16.- **Morales Maciá, P.C.; Carreño Díaz, L.A.; Maldonado vega, J.** “Caracterización por Análisis SARA y HPLC de la Fracción de Maltenos de Crudos con Altos Porcentajes de Asfaltos”. Memorias del XI Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Cartagena de Indias, Junio 1997.
17. - **Horvathné, E.; Lvey, J.** “Structure Analysis of Road-building Bitumens. The Effect of Aging for the Structure Road Building Case Study with Modified Bitumen”. Proceedings of the 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress. Barcelona, 2000.
- 18.- **Nikolaevna Afanasieva, N.; Álvarez Cifuentes, M.; Puello, J.** “Envejecimiento de los Asfaltos Colombiano baja la Influencia de los Diferentes Factores Climáticos”. Memorias del 10° Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Sevilla, 1999.
- 19.- **Alvarenga, Edwin Ricardo.** “Incidencia de los Ciclos de Calentamiento-Enfriamiento en las Propiedades Físicas del Cemento Asfáltico AC-30, utilizado en la Producción de Mezclas Asfálticas en Caliente”, SAN SALVADOR, REPUBLICA DE EL SALVADOR, SEPTIEMBRE DE 2003.
- 20.- **Delmar Salomón Coe, PhD.** “Determinación de la energía de activación de flujo en ligantes asfálticos”, IAS Technical, Quality, and Purchasing Manager, USA, Febrero 2003.
- 21.- **Melchor A, José.** “Diseño y Evaluación de Pavimentos Flexibles”, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Topografía y Vías de Transporte.
22. - **Delmar Salomon, Huanhun Zhai,** “Asphalt Binder Flow Activation Energy And Its Significance For Compactation Fort”, Idaho Asphalt Supply, Inc. 2627 Brandt Ave., Nampa, ID 83687, USA.
- 23.- **Bacchetta, Gustavo C.** “Obtención de Asfaltos Oxidados para la Fabricación de Membranas Asfálticas a partir de Crudos Mexicanos”. Experiencias de Laboratorio”, Asociación Mexicana de Asfaltos, Octubre 2003.
- 24.- **M.L. Parada, A.J. Lepesqueur & B. Caicedo,** “Estudio del envejecimiento de mezclas asfálticas por oxidación”, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2005.
- 25.- **G. Martínez. & B. Caicedo.,** “Efecto de la radiación ultravioleta en el envejecimiento de ligantes y mezclas asfálticas”, Universidad de los Andes, Bogotá D.C, Colombia, 2005.
- 26.- **Anguas, Paul Garnica, Manilla Aceves, Alfonso Alvarez, Báez Andrade, Francisco Javier.** “Evaluación de la perdida de resistencia en concretos asfálticos por contacto con sustancias agresivas” Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro, 2001.
- 27.- **J. Don Brock, PhD., P.E.,** “Oxidación del asfalto”, Boletín Técnico, ASTEC, 2002.

- 28.- Ray Saucedo**, “Mejoradores de adherencia para asfalto, tecnología y rendimiento”, Boletín Técnico, 1999.
- 30. - Gary Hicks**, “Moisture Damage in Asphalt Concrete” National Cooperative Highway Research Program. FHWA - TRB Studio No. 175 - Oct 1991.
- 31. - David Tunnicliff & Richard Root**, “Use of Anti-stripping Additive in Asphaltic Concrete Mixtures”. National Cooperative Highway Research Program - FHWA - TRB Report 373. Nov 1995.
- 32. - Akzo Nobel** “Aditivos Promotores de Adhesion. Asphalt Applications” – Technical Bulletin. 1999.

## ANEXO A

### ESTUDIO DEL ENVEJECIMIENTO POR OXIDACION DE PAVIMENTOS FLEXIBLES UTILIZANDO EL MODELO DOMKE (1997) (DESARROLLADO EN BOGOTÁ D.C.)

#### 1 Metodología

##### 1.1 Envejecimiento de pavimentos en servicio

##### 1.1.1 Caracterización física

Inicialmente, se realizó una caracterización física a las mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a diferentes edades de servicio y en cada una de sus capas.

Para esto se extrajeron núcleos de 0.3 m X 0.3m en diferentes puntos de la red vial de Bogotá D.C. con edades de servicio de 1, 3, 5, y 7 años. Se realizaron dos cortes en cada una de las mezclas extraídas con el fin de obtener capa inferior, superior y central. Posteriormente, se hicieron ensayos de laboratorio en las tres capas de cada una de las mezclas.

Inicialmente, se extrajo el asfalto de las mezclas utilizando equipos de extracción tales como la centrífuga y el rotovapor. Posteriormente se sometió el asfalto extraído a tensiones de corte oscilante por medio del reómetro de corte dinámico, el cual se emplea para caracterizar las propiedades visco-elásticas del asfalto, midiendo el modulo complejo en corte ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ).

El comportamiento de las propiedades reológicas de las mezclas asfálticas para las diferentes edades de servicio se aprecia en las siguientes figuras.

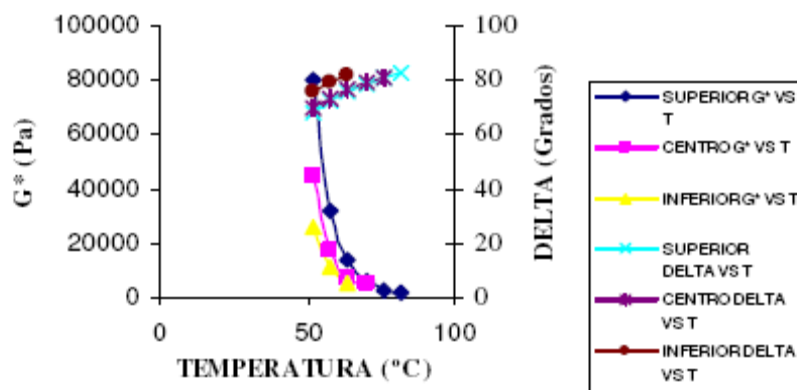


Figura 1.1-a; Propiedades reológicas mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a los 3 años

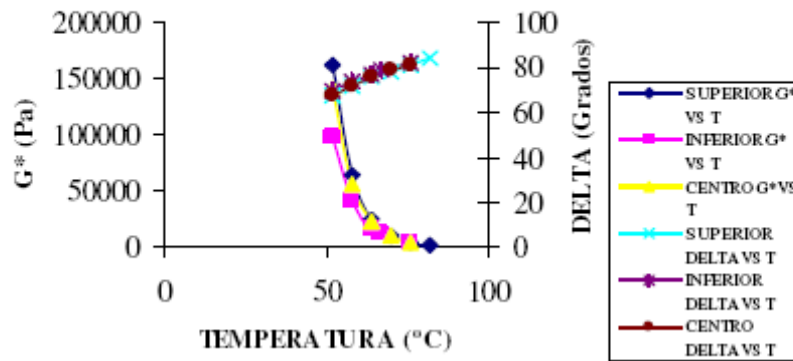


Figura 1.1-b; Propiedades reológicas mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a los 5 años.

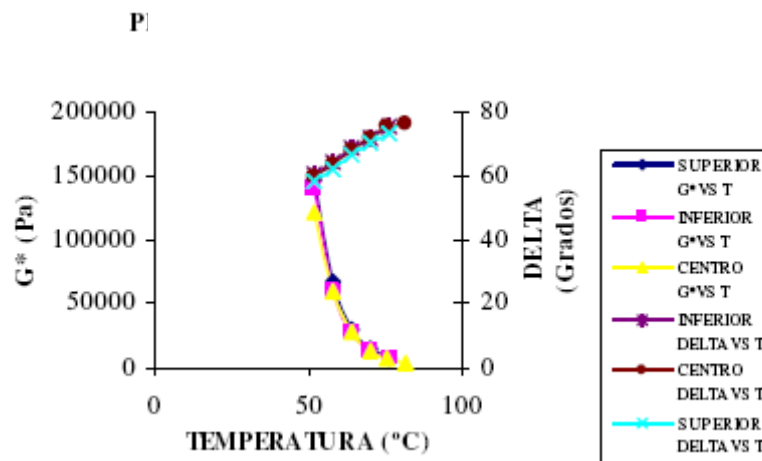


Figura 1.1-c; Propiedades reológicas mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a los 7 años.

El análisis de las Figuras 1.1-a, 1.1-b y 1.1-c da indicios de la difusión del oxígeno en el espesor; comparando las Figuras 1.1-a y 1.1-b se evidenciada una oxidación rápida en los primeros años de servicio (se aprecia una mayor separación de las curvas a diferentes edades y en las diferentes capas de las muestras), y un decrecimiento en la oxidación en los años subsiguientes.

Consecuencia de lo anterior, es apreciable en la Figura 1.1-a un mayor valor de módulo en las capas superiores de la mezcla asfáltica que va disminuyendo a medida que nos adentramos en la muestra. Asimismo, se aprecia un menor valor del ángulo de fase en la capa superior que va aumentando con la profundidad de la mezcla. Este comportamiento se explica por la mayor exposición de la parte superior de la mezcla al medio ambiente. Aunque este comportamiento se mantiene en la muestra con 5 años de servicio, nótese que cada vez se reducen más las diferencias en los valores de los parámetros medidos en las capas de la muestra (separación entre curvas), lo que es indicativo de una mayor penetración y una presencia uniforme de oxígeno en toda la profundidad de la muestra. La comparación de las Figuras No. 1.1-b y 1.1-c nos permite visualizar hasta que edad de servicio la oxidación se vuelve un factor significativo en el envejecimiento de una mezcla y en que momento deja de

volverse predominante en el deterioro total de un pavimento, dando cabida a otros factores de desgaste, tales como la radiación solar, cargas de servicio, condiciones de drenaje, etc.

De las figuras 1.1-a, 1.1-b y 1.1-c se puede establecer una proporcionalidad y uniformidad del cambio en las propiedades reológicas. Esta proporcionalidad es un factor determinante en la simplificación de la aplicación y análisis del modelo de difusión y oxidación que se implementará posteriormente, puesto que la estabilidad del comportamiento de las mezclas en el tiempo permite aplicar el modelo a cualquier edad deseada, con solo ajustar levemente los parámetros de las fórmulas y de esta manera no tener que implementar un modelo para cada edad en estudio.

Otra conclusión que puede desprenderse de la estabilidad del comportamiento y la uniformidad del cambio en las figuras 1.1-a, 1.1-b y 1.1-c es que, bajo condiciones controladas, es posible modificar sistemáticamente parámetros como la temperatura, la presión y el tiempo de envejecimiento acelerado para ver el impacto de cada una de estas variables en la difusión del oxígeno y su consecuente cambio en las propiedades reológicas producto de la oxidación.

### 1.1.2 Caracterización Química

La espectroscopia infrarroja se usa para identificar y cuantificar diversos grupos químicos funcionales característicos en los asfaltos. La medida del grupo funcional carbonilo en un asfalto es de particular importancia, a causa de la relación de este grupo con la viscosidad, el avance del envejecimiento químico del asfalto y la facilidad de monitoreo del grupo funcional carbonilo. 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, por lo que en este caso no es esencial la medida de la concentración de los ácidos carboxílicos y anhídridos ya que con sólo la medida de la concentración de las cetonas se provee una buena estimación de la extensión del envejecimiento del asfalto. La oxidación del asfalto puede representarse por el aumento en la cantidad de formación de moléculas del grupo carbonilo monitoreado mediante la espectrografía infrarroja. Con el objeto de demostrar lo anterior, se realizaron pruebas de espectroscopia a la mezcla de asfalto con 3 años de servicio en cada una de sus capas (superior, central e inferior). A continuación se presenta la gráfica de espectro en función del tiempo. 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. El Área de Carbonilos de las Figuras No. 1.1-d, 1.1-e y 1.1-f esta expresada en unidades de absorbancia.

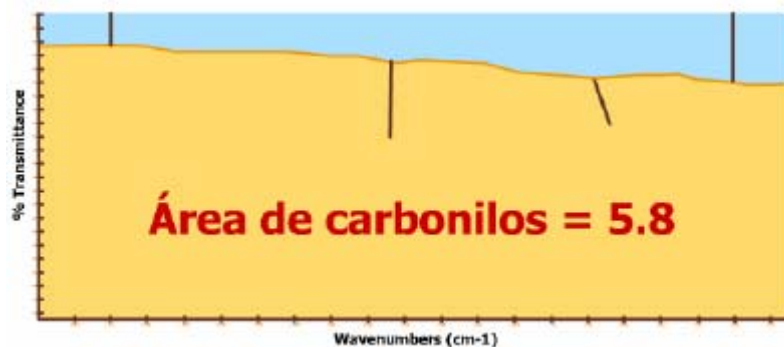


Figura 1.1-d; Espectroscopia infrarroja de muestra asfáltica de 3 años de servicio sección superior

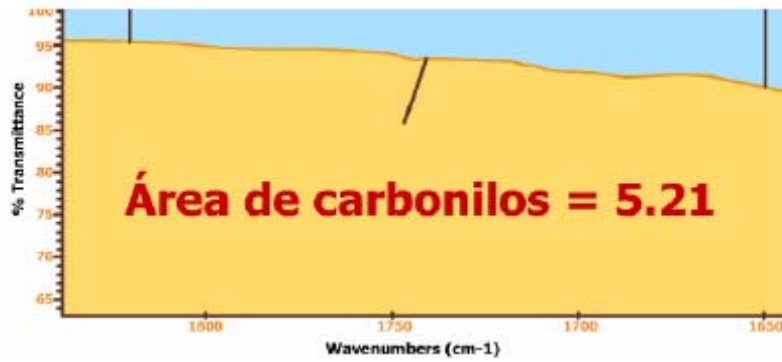


Figura 1.1-e; Espectroscopia infrarroja de muestra asfáltica de 3 años de servicio sección superior

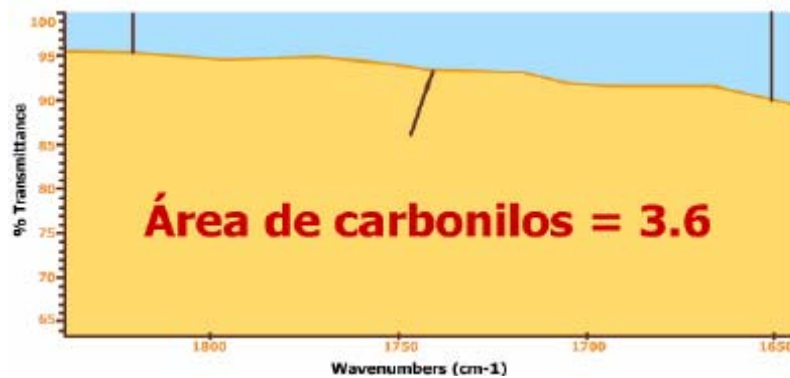


Figura 1.1-f; Espectroscopia infrarroja de muestra asfáltica de 3 años de servicio sección superior

Con las gráficas anteriores se puede observar la variación del área de carbonilos en las diferentes capas de la mezcla asfáltica a 3 años de servicio. La capa superior presenta mayor área de carbonilos debido a que ha sufrido una mayor oxidación al estar expuesta directamente al ambiente. Lo anterior solo representa una porción del cambio del espectro durante la oxidación. Además, se observa que el Logaritmo natural del módulo cortante ( $G^*$ ),  $\ln G^*$ , varía linealmente con el área de carbonilos.

### 1.2 Caracterización física de mezclas 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 como la centrífuga y el rotovapor. Posteriormente, se realizaron ensayos de envejecimiento acelerado en el asfalto extraído utilizando la estufa de envejecimiento a presión-PAV.

Condición	Temperatura (°C)	Presión (Psi)	Tiempo (Hrs.)
1	110	210	20
2	90	210	20
3	110	100	20
4	90	100	10
5	110	210	15

Tabla 1.1-a; Condiciones de presión tiempo y temperatura de ensayos de envejecimiento acelerado.

Luego de realizar estos 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 módulo complejo y el ángulo de fase de cada una de las muestras.

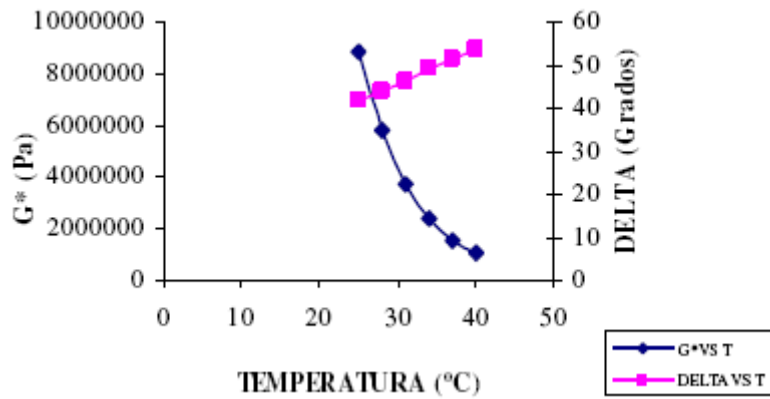


Figura 1.1-g; Propiedades reológicas mezclas asfálticas envejecidas aceleradamente condición # 1.

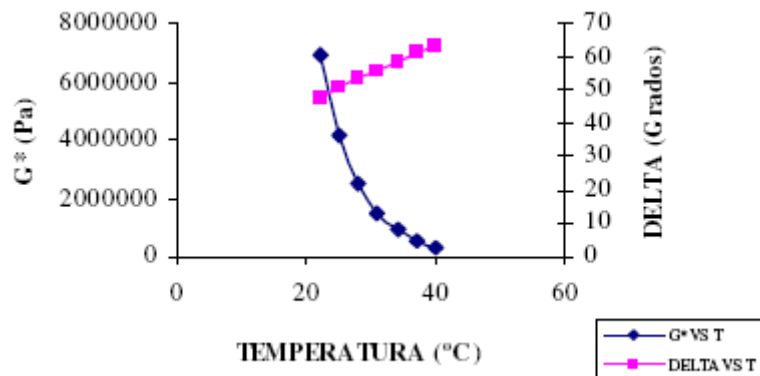


Figura 1.1-h; Propiedades reológicas mezclas asfálticas envejecidas aceleradamente condición # 2

El análisis de las modificaciones sistemáticas hechas a la presión, temperatura, y tiempo del ensayo de envejecimiento acelerado de una muestra asfáltica muestra que los factores más determinantes en la difusión del oxígeno, y el consecuente cambio en las propiedades de resistencia de la mezcla, son la presión y la temperatura a la que se vean sometidas.

Para las condiciones 1 y 2 de la tabla 1.1-a (que poseen iguales condiciones de tiempo y presión, pero diferente temperatura), correspondientes a las Figuras 1.1-g y 1.1-h es apreciable que para un aumento considerable en la temperatura de envejecimiento (30°) el incremento del módulo es del 52% y la disminución del ángulo de fase es solo del 21%.

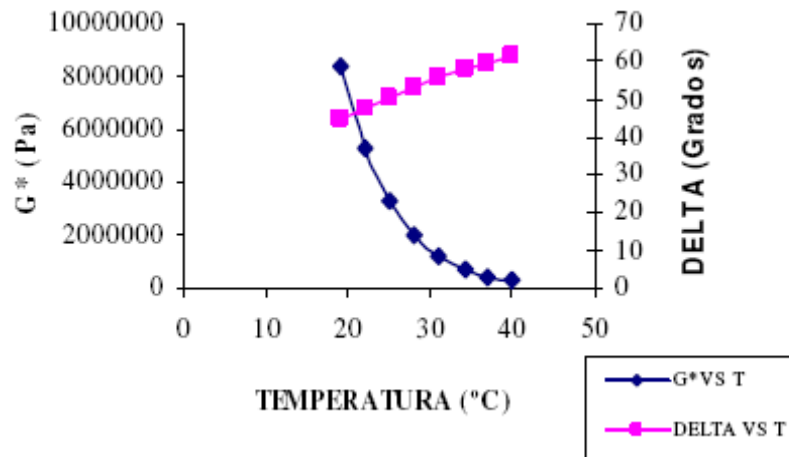


Figura 1.1-i; Propiedades reológicas mezclas asfálticas envejecidas aceleradamente condición # 3.

Sin embargo al comparar los ensayos de las muestras 1 y 3 (Figuras 1.1-g y 11.1-i), que poseen iguales condiciones de temperatura y tiempo, pero diferente presión, una diferencia en los ensayos de 100 a 210 psi, genera un aumento del 62% en el módulo y una disminución del 21% en el ángulo de fase.

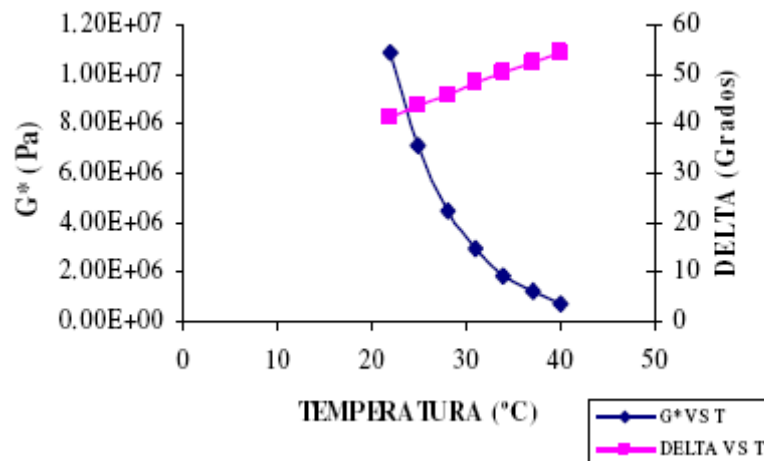


Figura 1.1-j; Propiedades reológicas mezclas asfálticas envejecidas aceleradamente condición # 5.

En la comparación de las figuras 1.1-g y 1.1-j se nota que al fijar las variables presión y temperatura pero mantener una diferencia de 5 horas en ensayos de las muestras 1 y 5, se observa un aumento de solo el 19% en el módulo y una leve disminución del 4.5% en el ángulo de fase. Las comparaciones muestran que el parámetro de resistencia más susceptible al cambio por la variación de presión, temperatura o tiempo es el módulo ( $G^*$ ).

Claramente se identifica a la presión y la temperatura como los factores más determinantes en la aceleración del proceso de oxidación en las muestras asfálticas.

La presión acelera el proceso de penetración del oxígeno, mientras que la temperatura favorece la oxidación en una doble condición, por un lado acelera a las moléculas de manera que estas chocan más rápido y forman más grupos carbonilos y por el otro afecta la consistencia de la mezcla ablandándola para favorecer la entrada de aire. Es de anotar que



estas comparaciones de módulos y ángulos de fase se hicieron en el rango de temperatura de 25°C dadas por el ensayo de DSR.

Adicionalmente, se determinaron las propiedades reológicas por medio del ensayo de DSR al asfalto de la mezcla original, es decir, al asfalto al cual no se le aplicó ningún tipo de envejecimiento acelerado, tal como se muestra en la figura 1.1-k

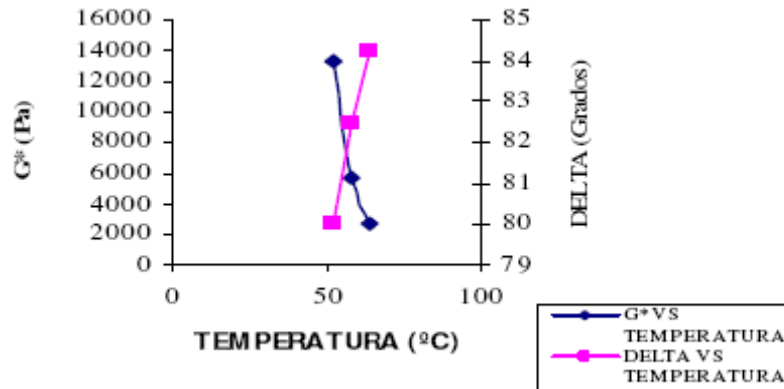


Figura 1.1-k; Propiedades reológicas mezclas sin envejecer

En la Figura No 1.1-k se observan valores menores del módulo cortante y valores mayores del ángulo de fase respecto a las demás mezclas envejecidas tanto en laboratorio como naturalmente.

### 1.2.1 Caracterización química de mezcla original y mezclas envejecidas aceleradamente

Al igual que las muestras de asfalto tomadas en campo, es decir envejecidas en servicio, las muestras envejecidas aceleradamente se sometieron a un análisis por espectroscopia infrarroja para monitorear la formación del grupo carbonilo de acuerdo a las condiciones presentadas. Los resultados de las muestras caracterizadas químicamente se relacionan en la tabla 1.1-b.

Condición	Temp. (°C)	Presión (Psi)	Tiempo (Hrs.)	Área Carbonilo (Un. Abs.)
1	110	210	20	1.78
2	90	210	20	1.73
3	110	100	20	1.56
4	90	100	10	1.54
5	110	210	15	1.66
Original				0.93

Tabla 1.1-b. Resultados de la caracterización química de muestras envejecidas aceleradamente bajo diferentes condiciones.

Una vez realizadas las caracterizaciones físicas y químicas de las muestras asfálticas anteriormente descritas procedemos a la estimación de los parámetros A, E,  $\alpha$  y HS, propiamente dichos, usando las ecuaciones enunciadas en el capítulo 3 de esta investigación.

### 1.3 Calibración de las variables A, E, HS y $\alpha$

### 1.3.1 Determinación del orden de reacción ( $\alpha$ )

Tomamos los datos de las muestras 1 y 3, tal como se describe en la tabla 1.1-a, 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 (Ec. 3.3.5.1-b) tenemos que:

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

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

*Ecs. 1.1-a y 1.1-b*

Reemplazando la ecuación del (Ec. 3.3.5.1-a) en las ecuaciones (1.1-a) y (1.1-b) y simplificando tenemos:

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

Finalmente el valor de  $\alpha$  está dado por:

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

$$\alpha = 0.4013$$

### 1.3.2 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:

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

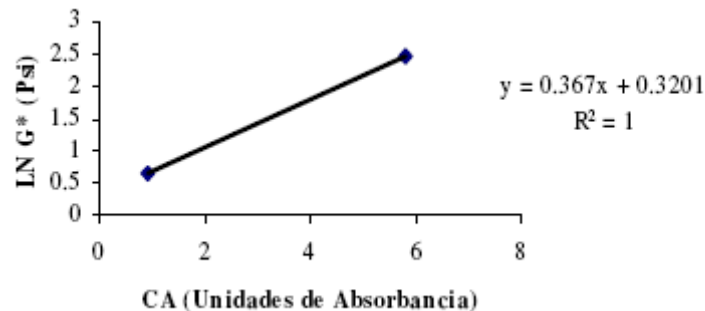
$$R = 8.314 \text{ J/mol}^\circ\text{K}$$

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

Una vez determinado el valor de  $\alpha$  y  $E_a$  se reemplazan estos valores en la ecuación (Ec. 3.3.5.1-a) y (Ec. 3.3.5.1-b) 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 espectroscopia 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.

$$A = 0.1908 \text{ unidades de absorbancia/ (atm*mes)}$$

Por otra parte, se calculó el coeficiente de susceptibilidad  $HS$ , el cual puede ser hallado con la pendiente de la gráfica de los datos de módulo Vs. Cantidad de carbonilos obtenidos de las caracterizaciones físicas y químicas hechas a la muestra original con la mezcla envejecida a 3 años de servicio tal como se observa en la siguiente figura.



*Figura 1.1-1. Ln G\* Vs CA. Se tuvieron en cuenta las viscosidades y el área de carbonilos de la mezcla asfáltica original y la mezcla asfáltica envejecida naturalmente a 3 años de servicio.*

De la Figura 1.1-1 se obtiene,

$$HS = 0.367 \text{ PSI/Und Absorbancia}$$

$$M = 1.938 \text{ Psi}$$

#### **1.4 Aplicación y análisis de resultados del modelo numérico.**

### 1.4.1 Cálculos

Básicamente el modelo consta de dos expresiones matemáticas. La primera esta dada por la ecuación

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

*Ec. 1.1-c*

La ecuación (1.1-c) describe el perfil de presiones en toda la profundidad de la muestra de mezcla asfáltica y su variación en el tiempo.

La segunda expresión es la ecuación (Ec. 3.3.5.1-c) que arroja el valor del módulo con los parámetros  $A$ ,  $E$ ,  $\alpha$  y  $HS$  previamente calibrados, haciendo uso de la presión a esa profundidad de la mezcla y en ese momento de la vida de servicio calculado con la ecuación (1.1-c). Los datos de entrada del modelo se aprecian en la tabla 1.1-c

Parámetro	Valor	Unidades
Espesor de Capa	10	cm.
$\Delta t$	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 ( $\alpha$ )	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 1.1-c Datos de entrada del modelo numérico propuesto por Domke*

Los resultados del modelo una vez ejecutado aparecen en las figuras 1.1-m y 1.1-n:

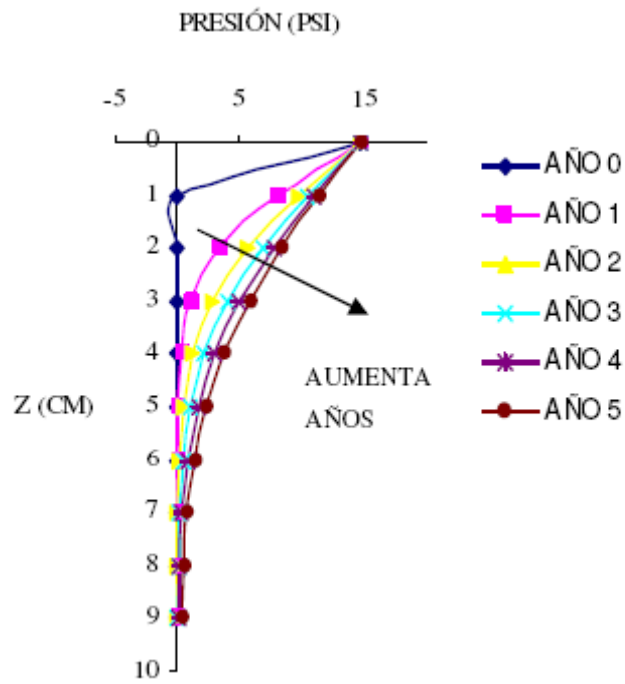


Figura 1.1-m; Estimación del perfil de presiones y su variación en el tiempo. El  $G^*$  se tomo a una  $T: 52^{\circ}\text{C}$ .

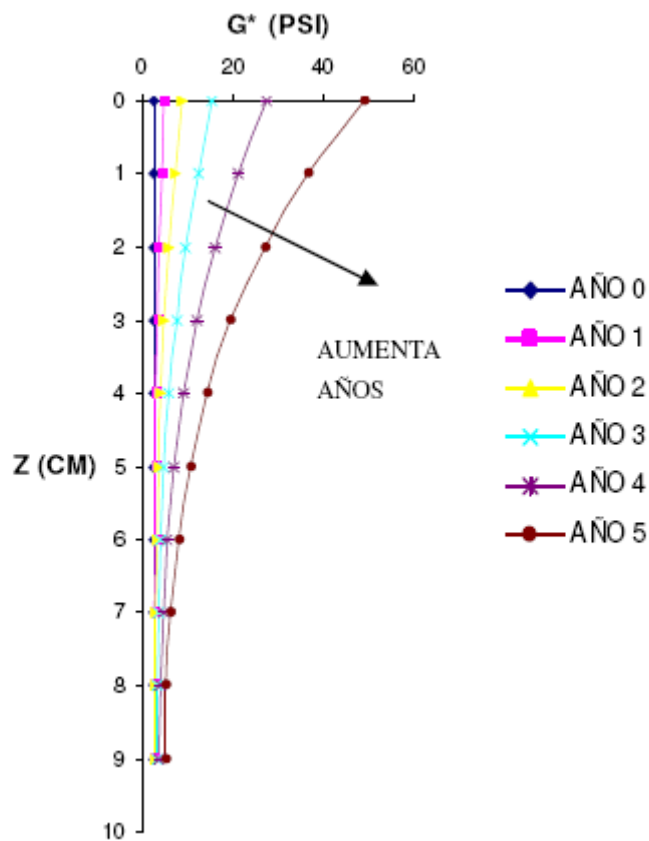


Figura 1.1-n; Estimación de la viscosidad y su variación según la profundidad y el tiempo de servicio. El  $G^*$  se tomo a una  $T: 52^{\circ}\text{C}$ .

Posteriormente, se verificaron los resultados de los modelos aplicados, comparando 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. 1.1-o.

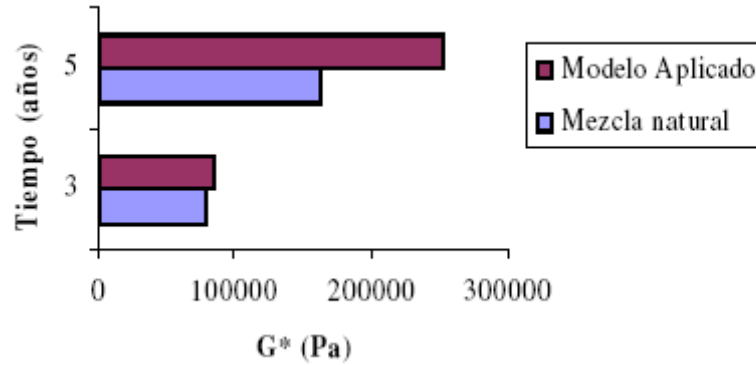


Figura 1.1-o;  $G^*$  (Pa) Vs Tiempo (años). Verificación de resultados del modelo aplicado.

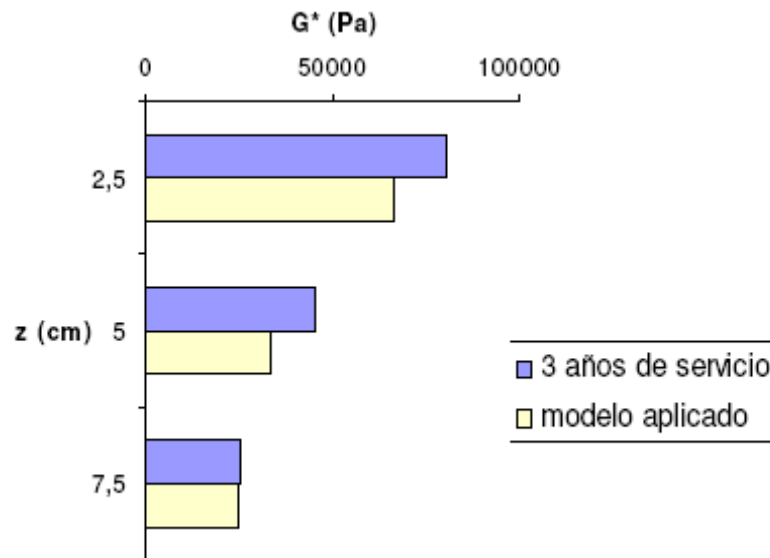


Figura 1.1-p;  $G^*$  (Pa) Vs  $Z$  (cm), Verificación de resultados del modelo aplicado vs mezclas asfálticas a 3 años de servicio. El  $G^*$  se tomo a una  $T:52^{\circ}C$ .

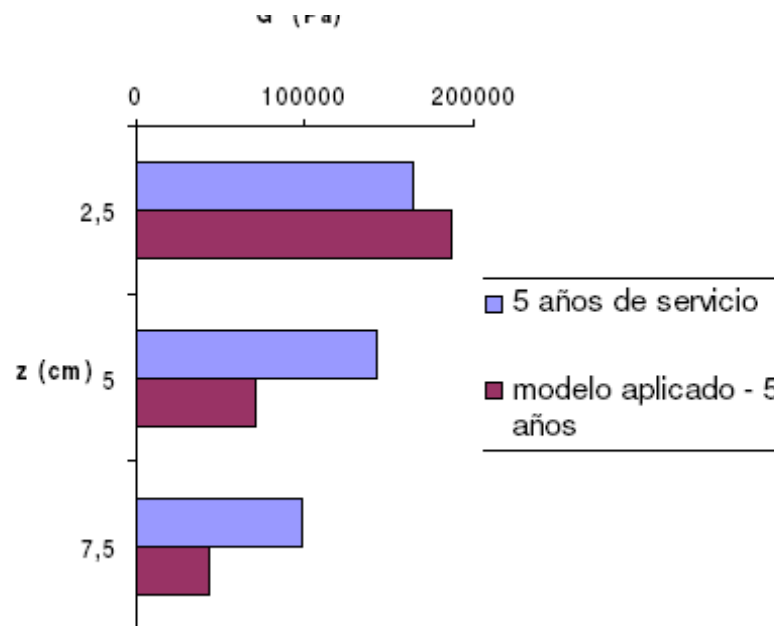


Figura 1.1-q;  $G^*$  (Pa) Vs Z (cm), Verificación de resultados del modelo aplicado vs mezclas asfálticas a 5 años de servicio. El  $G^*$  se tomo a una  $T:52^{\circ}\text{C}.$ .

Como se observa en la Figura No. 1.1-o, 1.1-p y 1.1-q, los resultados del modelo aplicado efectivamente simulan un envejecimiento por oxidación aproximado a escala real de las mezclas asfálticas.

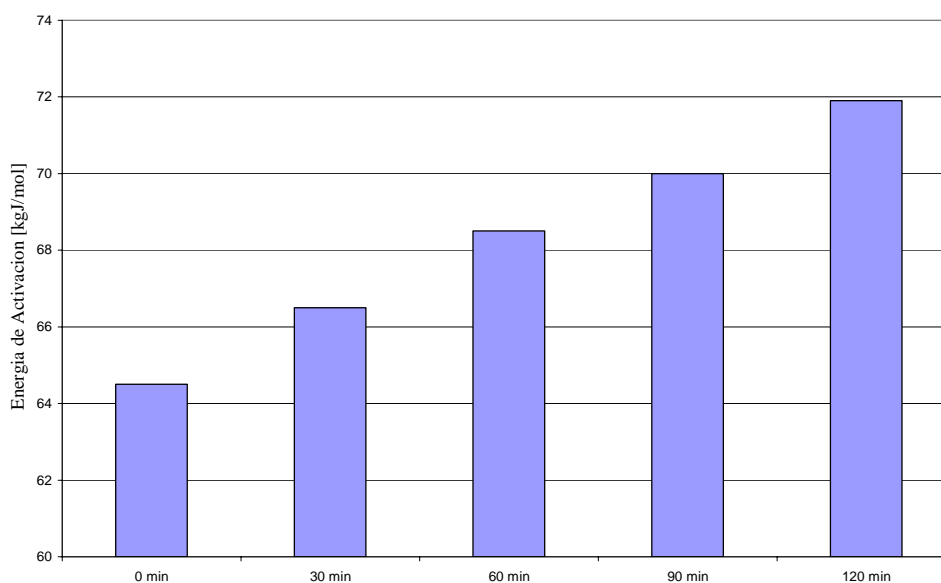
Finalmente, se compararon las viscosidades de cada una de las mezclas envejecidas aceleradamente con los resultados arrojados por el modelo, estimando así el tiempo de envejecimiento que simula aproximadamente el PAV con sus diferentes condiciones de presión, temperatura y tiempo. Como resultado de lo anterior, 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.

## ANEXO B

### RELACION ENTRE LA CANTIDAD DE ASFALTENOS Y LA ENERGIA DE ACTIVACION DE LIGANTES ENVEJECIDOS.

Juan Carlos Verdugo, Químico de la sección de polímetros de IDIEM ideó una forma de comparar el porcentaje de asfaltenos con los incrementos en la Energía de Activación.

Se uso un ligante tipo y mediante el ensayo de película delgada en horno rotatorio, envejeció el ligante a distintos tiempos, y luego mediante viscosímetro rotacional Brookfield obtuvo las Energías de Activación asociadas a dichas temperaturas como se muestra en la figura 1.1-a



*Figura 1.1-a; Energía de Activación versus temperatura*

Además a cada muestra se obtuvo las fracciones de asfalto a través de métodos normalizados para obtener las fracciones que componen el ligante.

Los resultados se muestran a continuación:

Tiempo min.	% Asfaltenos
0	15,16
30	15,94
60	16,8
90	19,7
120	29,8

*Tabla 1.1-a; porcentaje de asfaltenos asociados al tiempo de exposición en el horno rotatorio*

Así se puede asociar, la Energía de Activación con la concentración en porcentaje de asfaltenos, es mas, se puede idear un catalogo que muestre mediante la Energía de Activación

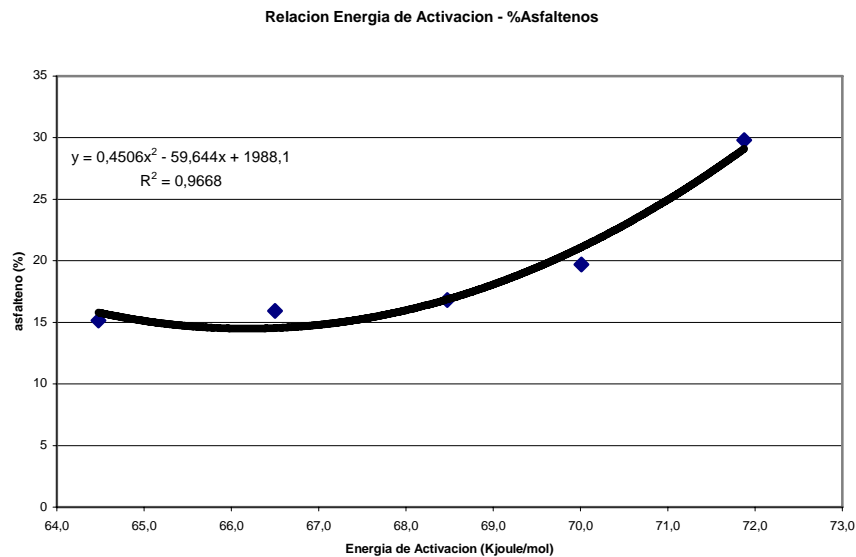


el porcentaje de asfaltenos y cuanto de ese porcentaje es admisible dentro de un ligante para que el pavimento responda a las exigencia establecidas en los pavimentos flexibles.

La obtención de la Energía de Activación es un proceso relativamente sencillo, que caracteriza fielmente el ligante, y permitiría desligarse del hecho de separar el asfalto es sus partes.

Ea Kj/mol	% Asfaltenos
64,5	15,16
66,5	15,94
68,5	16,80
70,0	19,70
71,9	29,80

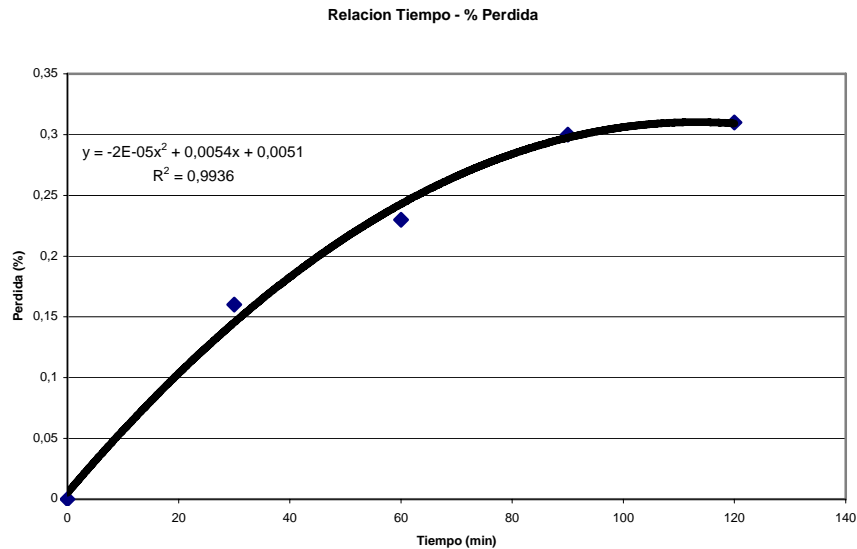
*Tabla 1.1-b; Relación de la Energía de Activación con la concentración de asfaltenos*



Tiempo min	% Perdida
0	0
30	0,16
60	0,23
90	0,3
120	0,31

Tiempo min	180
% Perdida	0,3291

*Tabla 1.1-c; Relación tiempo – porcentaje de perdida del ligante*



Es interesante notar que con cada ecuación registrada de la interpretación de la curva, se puede saber el porcentaje de asfalto en cualquier tiempo o para cualquier valor de Energía de Activación, además notamos que el porcentaje de pérdida se hace asintótico a medida que transcurre el tiempo.

Las principales conclusiones de la presente investigación son; primero, que el envejecimiento del asfalto, tanto la variación de sus propiedades físicas como químicas (aumento de asfaltenos), esta directamente relacionado con el tiempo de permanencia de la mezcla en un horno; segundo, el grado de envejecimiento se relaciona con el tipo de ligante utilizado en la mezcla, como también las características del agregado pétreo utilizado, y por ultimo, el grado de envejecimiento se relaciona tanto con la influencia del clima, la radiación solar, el método de mezclar en planta, la procedencia de los agregados pétreos usados, la puesta en obra, el transito y el trabajo de mantención, todo esto trae consigo una repercusión en la vida útil de un pavimento flexible.

## ANEXO C

### OXIDACION EN LAS TOLVAS



Figura 1.1-a; oxidación durante la etapa de mezclado. Fuente ASTEC

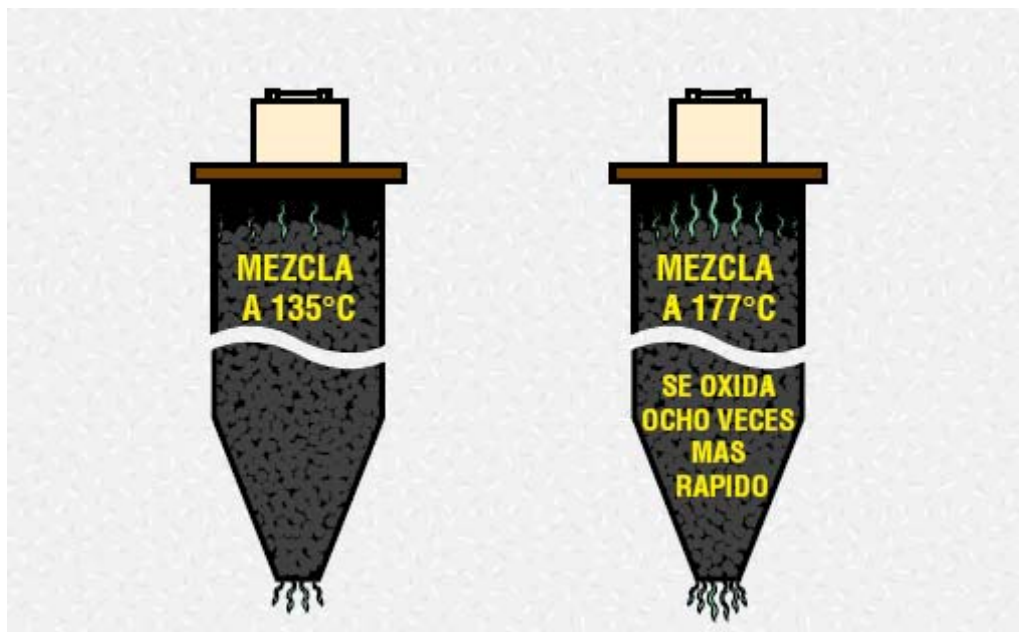


Figura 1.1-b; diferencias en la oxidación a distintas temperaturas. Fuente ASTEC

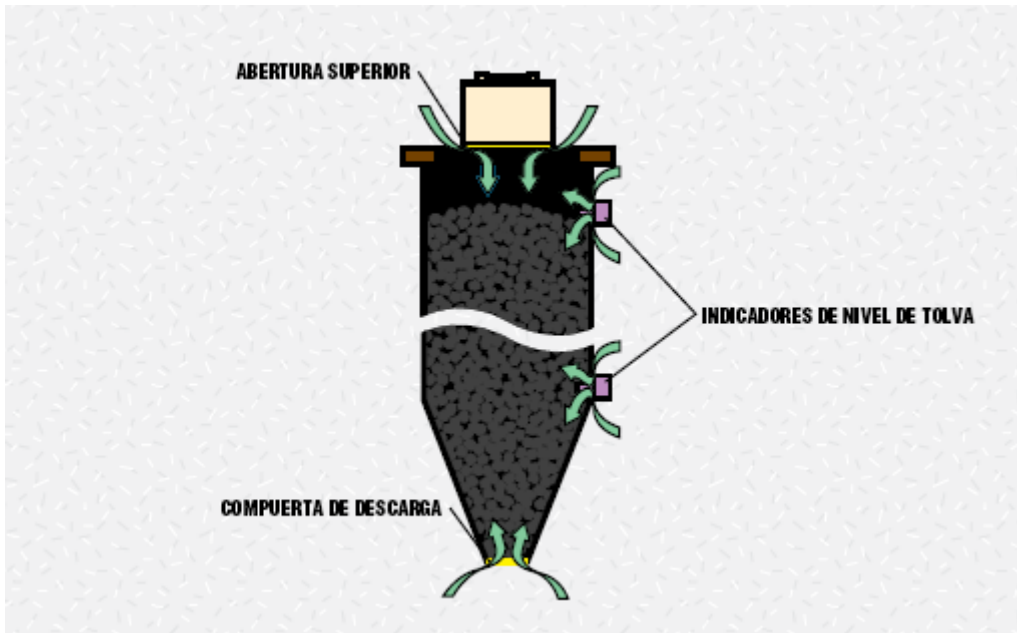


Figura 1.1-c; fuentes de ingreso de oxígeno a las tolvas. Fuente ASTEC

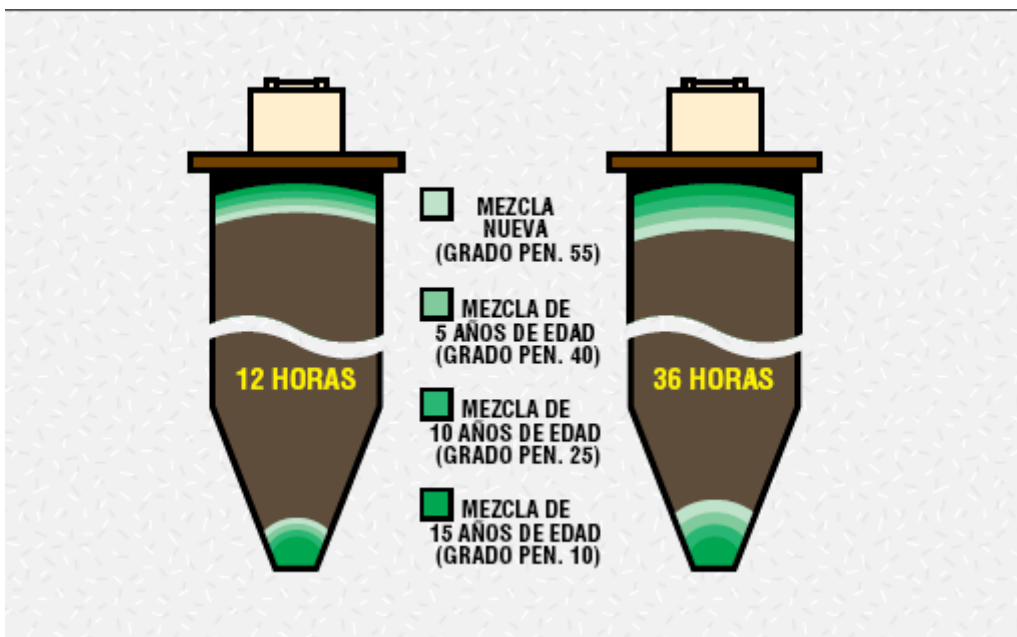


Figura 1.1-d; relación de la oxidación frente a el tiempo de almacenamiento. Fuente ASTEC



Figura 1.1-e; pérdida de penetración de la mezcla desde el mezclado hasta la puesta en obra. Fuente ASTEC