

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**  
**MAGISTER SCIENTIARUM EN CIENCIAS DEL TRANSPORTE**  
**MENCION INGENIERIA VIAL**



**TESIS DE MAESTRIA**

**TÍTULO: “ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFALTICAS TIBIAS  
MEDIANTE EL USO DE CERA POLIETILENICA”**

**TUTOR DE TESIS: Ing. MSc. Carlos Alex Arteaga Vargas**

**POSTULANTE: Ing. Luis Alvaro Salazar Cuba**

**La Paz – Bolivia**  
**2019**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**



*Dedico este trabajo a mis tres hijos Silvana, Alvaro y Mauricio por ser la  
fuente de perseverancia.*



## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer sinceramente a todos los que me ayudaron a terminar mi tesis. En primer lugar, a mi Tutor, Ing. MSc. Carlos Alex Arteaga Vargas quien guio mi trabajo de investigación, asimismo a los dos ingenieros tribunales de revisión por sus valiosos comentarios y aportes que ayudaron a mejorar mi trabajo.

Un agradecimiento especial al Ing. Juan Carlos Verdugo, quien me colaboró en la provisión del aditivo utilizado en la investigación, así como en su amplio conocimiento en asfaltos.

Finalmente, agradezco a mi familia por su apoyo incondicional.



## **RESUMEN**

Una Mezcla Asfáltica Tibia (WMA siglas en inglés) es una tecnología que permite reducir significativamente la temperatura de producción y de pavimentación de una Mezcla Asfáltica Caliente convencional (HMA siglas en inglés). Al reducir la viscosidad del asfalto y/o aumentar la trabajabilidad de la mezcla, algunas tecnologías WMA pueden reducir la temperatura hasta 100°C e incluso a una temperatura menor sin comprometer el rendimiento de la mezcla. Esto promete varios beneficios sobre HMA, por ejemplo: reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, reducir el consumo de energía, mejorar las condiciones de trabajo, mejorar la trabajabilidad y la compactación, etc. Esta tesis proporciona una revisión detallada de estos beneficios y las posibles especializaciones para la implementación de WMA.

A pesar del rendimiento prometedor en comparación con HMA, esta tecnología aún no ha ganado aceptación en la industria del asfalto. Para alcanzar una implementación generalizada, es necesario demostrar que WMA tiene las mismas o mejores características que HMA. Se exponen una gran cantidad de productos utilizados para fabricar WMA que incluyen una descripción del principio de reducción de la temperatura y las características básicas donde se incluye la cera polietilénica usada en la presente tesis.

Se realizó un estudio de laboratorio para evaluar la fabricación de una mezcla asfáltica tibia mediante el uso de una cera polietilénica. Se examinó las características del asfalto antes y después de la modificación con la cera. El resultado indica que la adición de la cera polietilénica Honeywell Titan 7250 con un contenido al 3% redujo la viscosidad del asfalto a altas temperaturas y la disminuyó a temperaturas intermedias.

Las características de la mezcla se evaluaron mediante el método Marshall, determinando que la temperatura de compactación se redujo de 145°C, para una mezcla convencional, a 135°C utilizando la cera polietilénica. A esta temperatura, los resultados de las propiedades son similares en comparación con la mezcla convencional de referencia.

Se realizó un cálculo teórico del ciclo de vida para el consumo de energía por parte de la industria del asfalto con el fin de evaluar las diferencias entre los diferentes procesos WMA y HMA convencional. Los resultados mostraron una ganancia de energía para el WMA e indicaron que la cantidad de reducción se atribuye principalmente a la reducción de la temperatura de calentamiento de la planta de producción.



## **ABSTRACT**

A Warm Asphalt Mix (WMA) is a technology that significantly reduces the production and paving temperature of a Hot Asphalt Mix (HMA). By reducing the viscosity of the asphalt and/or increasing the workability of the mixture, some WMA technologies may reduce the temperature to 100°C and even at a lower temperature without compromising the mixing performance. This promises several benefits about HMA, for example: reducing greenhouse gas emissions, reducing energy consumption, improving working conditions, improving workability and compaction, etc. This thesis provides a detailed review of these benefits and possible specializations for the implementation of WMA.

Despite the promising performance compared to HMA, this technology has not yet gained acceptance in the asphalt industry. To achieve a widespread implementation, it is necessary to demonstrate that WMA has the same or better features as HMA. A large number of products used to manufacture WMA are exposed that include a description of the principle of temperature reduction and the characteristics including the polyethylene wax used in this thesis.

A laboratory study was conducted to evaluate the manufacture of a warm asphalt mixture using a polyethylene wax. The characteristics of the asphalt were examined before and after the modification with the wax. The result indicates that the addition of Honeywell Titan 7250 polyethylene wax with a 3% content reduced the viscosity of the asphalt at high temperatures and to decreased to intermediate temperatures.

The characteristics of the mixture were evaluated using the Marshall method, determining that the compaction temperature was reduced from 145°C, for a conventional mixture, to 135°C using polyethylene wax. At this temperature, the results of the properties are similar compared to the conventional reference mixture.

A theoretical life cycle calculation was performed for energy consumption by the asphalt industry in order to assess the differences between the different WMA and conventional HMA processes. The results showed an energy gain for the WMA and indicated that the amount of reduction is mainly attributed to the reduction in the heating temperature of the production plant.

---

**ÍNDICE GENERAL**

	<b>Pág</b>
CAPITULO I.....	1
1. INTRODUCCION .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.2.1 Tecnología Verde en Malasia [2] .....	2
1.3 Tecnología de Mezclas Asfálticas Tibias (WMA) .....	4
1.4 Objetivo General .....	5
1.5 Objetivos Específicos .....	5
1.6 Alcance .....	6
CAPITULO II.....	7
2. MARCO TEORICO .....	7
2.1 Definición [3].....	7
2.2 Historia .....	7
2.3 Potenciales beneficios e inconvenientes de una WMA .....	8
2.3.1 Beneficios de WMA .....	8
2.3.2 Inconvenientes de WMA .....	13
2.3.3 Posibles aplicaciones específicas de WMA .....	16
2.4 Introducción al funcionamiento de WMA .....	17
2.4.1 Clasificación de las tecnologías WMA.....	17
2.4.2 Tecnología de espumación .....	20
2.4.3 Aditivos orgánicos .....	22
2.4.4 Aditivos químicos.....	24
2.5 Descripción de los productos comerciales para WMA [21] .....	24
2.5.1 Aditivos para tecnología de espumación [21].....	26
2.5.2 Aditivos orgánicos [21] .....	37
2.5.3 Aditivos químicos [21] .....	44
2.6 Modificaciones a plantas de producción para WMA .....	49
2.6.1 Tecnología de adición de aditivos.....	49
2.6.2 Equipos especiales para tecnologías de espumación .....	50
2.6.3 Equipos para la dosificación de aditivos .....	51
2.6.4 Tiempo de mezclado.....	52
2.7 Diseño de WMA [23] .....	53
2.7.1 Diferencias entre el diseño de WMA y HMA .....	53

---

2.7.2	Métodos de diseño de mezclas tradicionales .....	55
2.7.3	Método SUPERPAVE .....	56
2.8	Consideraciones para el diseño de WMA .....	57
2.8.1	Aditivos.....	57
2.8.2	Ensayos de laboratorio .....	59
2.8.3	Temperatura de producción y compactación .....	60
2.8.4	Selección del asfalto .....	64
2.8.5	Contenido de asfalto .....	64
CAPITULO III.....		66
3.	ASFALTO .....	66
3.1	Propiedades del asfalto .....	66
3.2	Metodología para evaluar las propiedades del asfalto.....	69
3.2.1	Pruebas mecánicas .....	70
3.2.2	Consistencia a temperaturas intermedias y altas .....	71
3.2.3	Consistencia a bajas temperaturas .....	75
3.2.4	Resistencia al endurecimiento.....	76
3.2.5	Relación entre ensayos y propiedades relativas al rendimiento.....	81
CAPITULO IV: .....		91
4.	PROPIEDADES DE WMA .....	91
4.1	Métodos de evaluación de la mezcla.....	91
4.1.1	Ensayo de Compactación .....	92
4.1.2	Ensayos de sensibilidad a la humedad.....	94
4.1.3	Módulo de Rigidez de la Mezcla .....	97
4.1.4	Deformaciones permanentes .....	99
CAPITULO V: .....		103
5.	ENSAYOS DEL ASFALTO .....	103
5.1	Procedimiento experimental .....	103
5.2	Descripción de ensayos realizados .....	105
5.3	Análisis de los resultados ensayos del asfalto .....	106
5.4	Bitumen Test Data Chart (BTDC) .....	108
5.5	Cálculo del Módulo de Rigidez del Asfalto.....	110
5.6	Ensayo de Película Delgada .....	112
5.7	Punto de Fragilidad de Fraass (PFF).....	114
6.	ENSAYOS DE MEZCLA ASFALTICA TIBIA .....	116
6.1	Procedimiento experimental .....	116

---

6.2	Composición de la mezcla .....	118
6.2.1	Agregados.....	118
6.3	Preparación de las probetas de ensayo .....	124
6.4	Compactación.....	124
6.5	Diseño Marshall de la Mezcla de Control .....	125
6.6	Temperatura de compactación de Mezcla Tibia.....	128
6.7	Evaluación del Porcentaje de Vacíos .....	129
6.8	Módulo de Rigidez de las Mezclas .....	130
6.9	Estabilidad y fluencia de la mezcla .....	132
6.10	Resistencia a la Tracción Indirecta.....	133
7.	COSTOS .....	135
8.	BENEFICIOS AMBIENTALES.....	139
8.1	Emisiones y exposición laboral a temperaturas inferiores de producción y colocado de mezclas asfálticas .....	139
8.2	Resultados del consumo de combustible en la planta de asfalto .....	144
8.3	Resultados de las emisiones medidas en la planta de asfalto .....	146
8.4	Resultados de las mediciones de exposición en el lugar de pavimentación .....	147
8.5	PHA medido en BSF .....	148
CAPITULO IX .....		151
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	151
9.1	CONCLUSIONES .....	151
9.2	RECOMENDACIONES .....	154
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		155

## **CAPITULO I**

### **1. INTRODUCCION**

El presente trabajo de investigación: “Elaboración de Mezclas Asfálticas Tibias mediante el uso de ceras Polietilénicas”, se ha desarrollado como requisito final de la quinta versión de la Maestría en Ingeniería Vial, impartida por el Instituto del Transporte y Vías de Comunicación, dependiente de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés, para obtener el título de Magister.

#### **1.1 Antecedentes**

El efecto del calentamiento térmico de la tierra puede considerarse como un resultado donde las longitudes de onda cortas de la luz visible del sol pasan a través de un medio transparente que posteriormente se absorbe y se convierte en energía térmica. Sin embargo, parte del calor que ha sido re-emitido de los objetos calentados no es capaz de pasar a través de ese medio. El calor atrapado por los gases del calentamiento en la atmósfera conduce a más calentamiento y consecuentemente, una temperatura más alta de la tierra. No obstante, sin este efecto natural, la temperatura de la superficie terrestre disminuiría dramáticamente por debajo de la temperatura de congelación.

Estudios muestran que este efecto se vincula directamente con aumento de los gases como el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso producto de las actividades humanas. Consecuentemente, esto agravará el calentamiento térmico que origina el cambio climático y el aumento del nivel del mar. El calentamiento global es principalmente una cuestión importante que preocuparse por el bien de nosotros y nuestros hijos en el futuro. Esta importante cuestión se ha identificado internacionalmente a través de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Muchos países son signatarios de la cuestión y han acordado los objetivos nacionales para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el Protocolo de Kyoto [1].

El Protocolo de Kyoto se completó el 11 de diciembre de 1997, que consta de 28 artículos con el objetivo de disminuir el crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero con el fin de mejorar el clima global. El protocolo había fijado metas de emisión de gases de efecto invernadero para las naciones participantes

como porcentaje del nivel de emisiones en 1990. El Canadá estaba encargado de alcanzar un nivel del 94% mientras que los Estados Unidos debían alcanzar un nivel del 93%. Un objetivo creíble a largo plazo para la reducción de las emisiones es asegurar que un determinado país pueda hacer una transición suave a un futuro de bajo carbono. Por lo tanto, las políticas nacionales, especialmente en las áreas de tecnologías energéticamente eficientes, fuentes renovables de energía, promoción de prácticas de manejo forestal sostenible y también la reducción de incentivos fiscales en los sectores emisores de gases de efecto invernadero deben estar bien desarrollados en cada país. Además, la reducción de las emisiones puede ser implementada no sólo utilizando métodos alternativos de producción de energía. Es deseable que todos los países alienten y recompensen créditos fiscales basados en los factores ambientales, donde el esfuerzo proviene de la iniciativa humana y no de la ocurrencia natural [1].

## **1.2 Planteamiento del problema**

### **1.2.1 Tecnología Verde en Malasia [2]**

En palabras sencillas, la definición de tecnología verde es un producto desarrollado amigable con el medio ambiente y procesado sin perturbar el medio ambiente y que conserva los recursos naturales. El gobierno de Malasia identificó la tecnología verde como el principal medio de crecimiento bajo la Política Nacional de Tecnología Verde el 2009. De acuerdo con la política, la implementación de la tecnología verde se estableció sobre la base de los siguientes cuatro sectores clave:

**a) Sector energético:**

La tecnología verde se aplica en la generación de energía y también en la gestión del lado de la oferta de energía que incluye la cogeneración por los sectores industrial y comercial. Esta política también ha enfatizado todos los Sectores de Utilización de la Energía, incluyendo el lado exigente de los programas de gestión

**b) Sector Construcción:**

La Tecnología Verde se adopta en la construcción, gestión, mantenimiento y demolición de edificios.

**c) Sector de Agua y Saneamiento:**

Tecnología en la gestión y utilización de recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, residuos sólidos y rellenos sanitarios.

**d) Sector de Transporte:**

Incorporación de la Tecnología Verde en la infraestructura y vehículos de transporte, en particular, los biocombustibles y el transporte público por carretera.

Además de los cuatro sectores clave, el gobierno de Malasia anunció el National Green Technology Policy Strategic en 2011 para el fortalecimiento de la adopción de Tecnología Verde. La estrategia consiste en impulsar los siguientes cinco componentes:

- (i) Fortalecer los marcos institucionales
- (ii) Proporcionar un ambiente propicio para el desarrollo de tecnología verde
- (iii) Intensificar el desarrollo del capital humano en tecnología verde
- (iv) Intensificar la investigación y las innovaciones en Tecnología Verde
- (v) Promoción y conciencia pública

Actualmente, muchos investigadores están apoyando el cuarto componente para ayudar al gobierno en el logro de sus metas hacia la implementación de la Tecnología Verde en Malasia. El cuarto componente afirmó que la Investigación, Desarrollo, Innovación y Comercialización (RDIC) es crucial en la creación de nuevas tecnologías, técnicas y aplicaciones que podrían reducir el costo de la implementación de la Tecnología Verde y promover su uso. También se afirma que la investigación, el desarrollo y las innovaciones (RDI) se podrían mejorar a través de:

- (i) Provisión de subvenciones o asistencia financiera a los sectores público y privado en la RDI;
- (ii) Previsiones en la aplicación de la Tecnológica Verde;

- (iii) Establecimiento de un organismo coordinador eficaz para la RDI y el Centro de Excelencia o un nuevo instituto de investigación para el desarrollo de la Tecnología Verde;
- (iv) Fomento de alianzas inteligentes entre el gobierno, las industrias y las instituciones de investigación; y
- (v) Establecimiento de fuertes vínculos entre las instituciones de investigación locales y los centros regionales e internacionales de excelencia en Tecnología Verde RDI.

Para el gobierno de Malasia las Mezclas Asfálticas Tibias (Worm Mix Asphalt WMA) son una de las tecnologías potenciales que pueden ser implementadas por las autoridades locales en concordancia con la Tecnología Verde, reemplazando la práctica convencional de asfalto en caliente (Hot Mix Asphalt HMA). Otros países también están practicando las regulaciones ambientales para aumentar la conciencia entre los contratistas para transformar de HMA convencional a la nueva tecnología de WMA. En la actualidad, las autoridades locales y los usuarios públicos de Malasia están preocupados por las cuestiones del calentamiento global que pueden afectar al entorno en un futuro próximo. Por lo tanto, los investigadores y las industrias de pavimento han puesto su energía y esfuerzos en la aplicación de la tecnología WMA con el fin de reducir los requerimientos energéticos durante la construcción del pavimento y generar beneficios ambientales.

Es importante investigar y dar a conocer la elaboración de WMA en nuestro país, donde en la actualidad se realizan importantes inversiones en proyectos viales la mayoría con pavimento flexible y, en los cuales las empresas elaboran mezclas asfálticas tradicionales; por lo tanto, existe la necesidad de conocer y desarrollar nuevas tecnologías en la pavimentación, siendo las WMA una alternativa conocida en el ámbito internacional que tiene su justificación por el menor consumo de energía y el consecuente beneficio para el medio ambiente.

### **1.3 Tecnología de Mezclas Asfálticas Tibias (WMA)**

La industria de la construcción de carreteras ha desarrollado investigaciones para dar una respuesta a las preocupaciones ambientales, para contribuir a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y del consumo de energía.



Disminuir la temperatura en la producción de mezclas asfálticas mediante WMA es una respuesta de la industria de la construcción de carreteras, originada sobre la base de la tecnología conocida para la fabricación de las mezclas asfálticas en caliente.

La producción y aplicación de mezclas en caliente requiere que los materiales se calienten entre 135°C y 180°C. La temperatura está relacionada con la viscosidad del ligante asfáltico, siendo necesario aplicar temperaturas altas para garantizar un revestimiento homogéneo y completo de los agregados por parte del asfalto. Dichas condiciones son las que deben tomarse en cuenta a la hora de considerar las posibilidades de reducir las temperaturas de producción y aplicación; además de la necesidad de garantizar condiciones de performance similares a las mezclas en caliente, mantener el uso de equipo existente y cumplir con estándares y especificaciones de calidad.

#### **1.4 Objetivo General**

El objetivo de esta tesis es investigar la elaboración de una Mezcla Asfáltica Tibia (WMA) a partir del uso de Cera Polietilénica, para lograr reducir la temperatura de producción y compactado de la mezcla asfáltica, y de esta forma promover la tecnología de construcción de carpetas asfálticas con menor consumo de combustible y menor contaminación ambiental.

#### **1.5 Objetivos Específicos**

- Diseñar una mezcla asfáltica tibia mediante el método Marshall, a partir del porcentaje óptimo de una Cera Polietilénica.
- Estudiar las propiedades de compactación entre la mezcla asfáltica tibia y la mezcla asfáltica caliente.
- Estudiar las propiedades de rigidez entre la mezcla asfáltica tibia y la mezcla asfáltica caliente.
- Estudiar las propiedades de deformación permanente entre ambos tipos de mezclas.

- Análisis comparativo de reducción de costos de producción y compactación entre ambos tipos de mezclas.
- Análisis comparativo de reducción de emisión de gases durante la producción y compactación entre ambos tipos de mezclas.

### **1.6 Alcance**

Se efectuará el análisis documental, a través de esta técnica se procederá a efectuar una revisión bibliográfica sobre el diseño y elaboración de las mezclas tibias que permita obtener información relevante sobre este tipo de mezclas para la elaboración del Marco Teórico.

Ensayos de laboratorio, mediante esta técnica se pretende realizar la caracterización del asfalto a ser utilizado en la mezcla asfáltica que corresponde al tipo 60/70, dosificar la cantidad de aditivo Honeywell Titan 7250 (cera polietilénica) para disminuir la viscosidad del asfalto, ensayos de viscosidad del asfalto más el aditivo a diferentes proporciones, determinación de temperaturas de mezclado y compactación, caracterización de los agregados para la mezcla asfáltica, diseño de la mezcla por el método Marshall.

Posteriormente se procederá al análisis e interpretación de los resultados obtenidos en laboratorio, con la finalidad de establecer parámetros de comparación entre las mezclas asfálticas tibias y calientes.

## CAPITULO II

### 2. MARCO TEORICO

#### 2.1 Definición [3]

Las mezclas asfálticas tibias (WMA) es un grupo de tecnologías que permiten reducir las temperaturas a las que se producen y colocan mezclas de asfalto. Estas tecnologías tienden a reducir la viscosidad del asfalto y proporcionan el recubrimiento completo de agregados a temperaturas más bajas. Las WMA se producen a temperaturas entre 20 a 55°C más bajas que las típicas para las mezclas asfálticas en caliente (HMA).

#### 2.2 Historia

La idea de usar temperaturas más bajas para producir mezclas asfálticas no es nueva, en 1956 el Prof. Ladis Csanyi de la Universidad Estatal de Iowa en EE.UU. realizó el primer intento de producir mezcla con asfalto espumado por vapor. Desde entonces, la tecnología de espumación se ha utilizado en diferentes países, incluidos Estados Unidos, Australia y Europa. El proceso original consistía en inyectar vapor de agua al asfalto caliente. En 1968, Mobil Oil Australia, que había adquirido los derechos de la investigación de Csanyi, modificó el proceso original añadiendo agua fría en lugar de vapor al asfalto caliente. De este modo, el proceso de espumación del asfalto se convirtió en algo más práctico y aplicable. [4]

En los últimos treinta años las ceras se han utilizado como modificador de la viscosidad en Alemania. Inicialmente no se utilizaron para bajar la temperatura, sino para una mejor trabajabilidad de asfalto y sólo hace unos veinte años la reducción de las temperaturas en la pavimentación se declaró una prioridad. La cera Fischer-Tropsch, la Amida de ácido graso y la cera Montana se utilizaron como aditivos que cambian la viscosidad en Alemania.

Las tecnologías modernas de espumación se introdujeron al mismo tiempo que los experimentos con zeolita en Alemania y la compañía Shell Bitumen patentó una tecnología de espumación que se desarrolló más tarde como WAM-Foam. A partir de entonces, se han introducido en el mercado diferentes principios de formación de espuma que permiten reducir la temperatura de producción incluso por debajo del punto de ebullición del agua. La más reciente tecnología de producción de WMA que implica la modificación química del asfalto se desarrolló en EE.UU. y se conoce como Evotherm.

A partir del desarrollo de tecnologías modernas de WMA, se han realizado muchos experimentos para establecer los beneficios potenciales de usar WMA y evaluar el rendimiento comparado con la tradicional Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA). Los primeros informes de investigación provienen de Europa desde mediados de los años 90 y, a partir de 2002, se han llevado a cabo muchos ensayos de campo en los EE.UU. con informes disponibles al público, entre los que se pueden nombrar en las referencias: [5, 6 y 7].

### **2.3 Potenciales beneficios e inconvenientes de una WMA**

En el proceso de fabricación de WMA se utilizan avances tecnológicos que se orientan a la reducción de temperatura conseguida durante el proceso productivo y de extendido. Estos métodos innovadores prometen una serie de beneficios en distintos campos por lo que se mencionaran cada una de sus ventajas. Sin embargo, no todo son ventajas y se identifican algunas preocupaciones dada su temprana edad que, en caso de confirmarse, supondrán una serie de desventajas importantes.

#### **2.3.1 Beneficios de WMA**

Los beneficios específicos dependen de qué tecnología específica se utiliza en la elaboración de WMA. Conforme a la mayoría de los autores consultados [4, 5, 6 y

8], los beneficios que conlleva el uso de tecnologías WMA pueden agruparse del siguiente modo:

- Ambiental
- Producción
- Pavimentación
- Económico

### Ambiental

De acuerdo con lo indicado en [9]: “A temperaturas inferiores a los 80°C virtualmente no existen emisiones, incluso alrededor de los 150°C, las emisiones son solo de alrededor de 1mg/h. Sin embargo, a 180°C, las emisiones son bastante importantes.”

Según el autor Kristjansdottir [6], a partir de las mediciones realizadas durante sus investigaciones, queda claro que las emisiones de humos durante la producción de WMA son reducidas comparadas con el proceso productivo de las mezclas convencionales. En general, aquellos parámetros que se midieron variaron entre un 20 y un 70% de reducción respecto a las HMA.

En la Tabla 1 se muestran algunos datos sobre las reducciones en las emisiones señaladas por diversos autores.

Tabla 1. Valores de reducciones de emisiones.

TIPO EMISION	Vaitkus et al. [10]	Bueche, N. [11]	Larson et al.	D'Angelo et al. [5]
Dióxido de Carbono CO <sub>2</sub>	30-40%	30-40%	31%	15-40%
Dióxido de Azufre SO <sub>2</sub>	35%	-	-	20-35%
Compuestos volátiles orgánicos VOC	50%	50%	-	>50%
Monóxido de Carbono CO	10-30%	-	29%	10-30%
Óxidos de nitrógeno NO <sub>x</sub>	60-70%	-	62%	60-70%

TIPO EMISION	Vaitkus et al. [10]	Bueche, N. [11]	Larson et al.	D'Angelo et al. [5]
Polvo	20-25%	-	-	25-55%

Fuente: Elaboración propia

Para aquellos proyectos de pavimentación que no tengan lugar al aire libre, la importancia de las emisiones de gases y humos se multiplica. Así pues, en el caso concreto de los túneles, la exposición de los trabajadores a humos es mucho mayor, y por lo tanto las reducciones que se consiguen usando WMA pueden tener mayor impacto [12]. Estudios publicados por el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) de los EE.UU. en 2000 indicaron cambios significativos en las funciones pulmonares de 1 de cada 44 trabajadores relacionados con la pavimentación de mezclas al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) y otros gases debido a la reducción de la temperatura necesaria para producir y compactar la mezcla asfáltica [12].

La importancia que supone la menor emisión de gases perjudiciales para el medio ambiente irá directamente relacionada con la preocupación ambiental de la sociedad, así como con las regulaciones y normativas al respecto introducidas por cada país. En aquellos lugares donde ambos aspectos se vuelvan más estrictos e importantes, cómo es el caso de los países participantes en el protocolo de Kyoto, la reducción de emisiones será un beneficio con bastante peso. Dentro de cada país, es probable que la reducción de emisiones impulse el uso de WMA en aquellas zonas donde la densidad de población sea elevada y, también en aquellas zonas donde se pavimente en lugares cerrados. Sin embargo, mientras no se endurezca la normativa acerca de los humos y emisiones, no existirán incentivos especiales para los productores de estas mezclas. Así pues, si no hay un beneficio económico relacionado con estas mezclas, su verdadera importancia será relativa en la práctica [5, 6 y 13].



Por lo tanto, se puede concluir que dadas las menores temperaturas de producción de WMA, el consumo de combustible y energía que se produce es bastante menor. Como consecuencia de este hecho, la emisión de gases, humos y olores también disminuye, como son los gases invernadero y el CO<sub>2</sub>. Estas reducciones tienen un impacto directo tanto en la protección del medio ambiente, como en la mejora de las condiciones de trabajo de aquellas personas que se dedican al mundo de las mezclas asfálticas [4].

### **Producción**

En el caso de WMA quizás los beneficios productivos sean los menos importantes. Principalmente, la ventaja relacionada con la producción es la posibilidad de incluir mayores porcentajes de asfalto reciclado (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP), debido al aumento de la trabajabilidad que se produce en estas mezclas como consecuencia de la menor viscosidad y del menor envejecimiento del ligante. Algunos autores [5,10] coinciden en afirmar que porcentajes de RAP superiores al 50% pueden añadirse a las mezclas. Cabe destacar que en nuestro medio esta técnica de RAP aún no se ha implementado, por lo que se menciona sus beneficios a modo enunciativo.

Además de esta ventaja, el menor envejecimiento que se produce en el ligante es también un factor a tener en cuenta [4]. Debido a ello se cree que se puede producir una mejora en la vida útil de los pavimentos, pero debido a que las investigaciones en torno a este aspecto son bastante novedosas, de momento no se ha demostrado. Finalmente, otro beneficio en este campo, que está directamente relacionado con la reducción de la emisión de humos, es la posibilidad de situar plantas asfálticas cerca de áreas urbanas, con el correspondiente ahorro en transporte [6].

## **Pavimentación**

Los beneficios de pavimentación conseguidos por el uso de estas mezclas están relacionados con el efecto modificador de la viscosidad que provocan. Como resultado, se producen importantes mejoras en la trabajabilidad de las mismas y la compactación puede realizarse con menor esfuerzo. Numerosos estudios han demostrado mediante datos que las tecnologías de WMA actúan como promotores de la compactación y reducen el esfuerzo compactador requerido [7].

Otra ventaja es la posibilidad de pavimentar aún en climas de temperaturas bajas. Este beneficio aparece debido a la menor diferencia de temperatura entre las mezclas y el ambiente, lo que cause una caída menos dramática del calor de la mezcla [4]. Esto permite un mayor periodo de tiempo para pavimentar y compactar, y extiende la temporada durante la cual se puede llevar a cabo la pavimentación. Con esta ventaja, son también posibles mayores distancias de transporte de las mezclas. De este modo, las plantas pueden estar ubicadas en lugares más lejanos a las obras, haciendo posible la pavimentación en aquellas zonas donde existen restricciones en las emisiones [5].

Además, con la menor diferencia de temperatura entre mezcla y ambiente, la construcción y apertura al tráfico puede ser más rápida, lo que es perfecto en algunas situaciones complicadas, tales como rehabilitaciones de aeropuertos, autopistas altamente transitadas, etc. [14]

## **Económico**

La reducción que se produce en el consumo energético como consecuencia del uso de WMA es otros de los beneficios del que se habla ampliamente en la bibliografía consultada. Es casi unánime que estas mezclas provocan un menor consumo, y en aquellas obras donde se midió en comparación con las mezclas convencionales se



alcanzaron disminuciones del 20 a 40%, valor que depende de cuán grande es la producción [6].

La importancia de este beneficio radica principalmente en el tipo de energía que utilice en el proceso de producción y cómo de contaminante y cara es ésta [4]. En la mayoría de los países el coste de la energía es relativamente elevado y por lo tanto este beneficio puede tener una importancia grande de para el productor. En aquellos países donde las fuentes de energía son renovables o relativamente baratas, este beneficio cobra menor importancia. También es importante tener en cuenta que existen una serie de costes adicionales para las plantas a la hora de producir WMA, como por ejemplo son el coste de los aditivos, las patentes, las modificaciones de la planta.

Un beneficio secundario comentado por algunos autores es el hecho de que las menores temperaturas de producción pueden resultar en un menor desgaste de la planta asfáltica [6].

### **2.3.2 Inconvenientes de WMA**

Mientras que hay grandes promesas en torno al uso de estas mezclas y sus menores temperaturas de producción y extendido, también existen preocupaciones, principalmente relacionadas con el rendimiento e implementación de las mismas, especialmente sobre especificaciones y control de la calidad. Así pues, es necesario desarrollar investigaciones en una serie de campos que van a ser señalados a continuación.

#### **Deformaciones permanentes**

Tanto como el menor envejecimiento del asfalto durante el proceso productivo (debido principalmente a las menores temperaturas de trabajo), tanto como el aumento de la sensibilidad a la humedad de estas mezclas se traducen en un

incremento de la posibilidad de formación de deformaciones plásticas en el pavimento, generalmente conocidas como ahuellamiento. Se cree que la principal tendencia es la formación de las mismas al principio de la vida del pavimento, ya que con el paso del tiempo el asfalto va envejeciéndose y endureciéndose, siendo menos probables dichas formaciones [1].

### **Costos económicos**

Aunque desde un inicio el uso de estas mezclas prometen traer importante ahorros energéticos que se traducen en menor gasto, existen costes iniciales, que unidos a posibles regalías, pueden resultar en un importante inconveniente para los contratistas, que no van a usar esta tecnología únicamente por el resto de beneficios (a no ser que se apliquen regulaciones ambientales más estrictas acerca de emisiones) [6].

Por lo tanto, los costes iniciales pueden suponer una barrera importante, pero también otros costes, como aquellos denominados recurrentes o regalías, tienen que ser tomados en cuenta. Los costes iniciales varían dependiendo de la tecnología usada. El uso de tecnologías WMA requiere aditivos, un coste recurrente, y/o modificaciones de la planta asfáltica, lo que requiere inversión de capital. Con vistas al futuro, estas tecnologías pueden traer importantes ahorros si se consigue un mayor rendimiento a largo plazo de las mezclas como resultado del menor envejecimiento del ligante durante la producción; sin embargo, esto aún no se ha demostrado dado el corto tiempo en el que estas mezclas han sido usadas [15].

### **Sensibilidad a la humedad**

Las menores temperaturas de producción usadas en WMA pueden aumentar el daño potencial debido a la humedad. Parece haber dos causas principales para que se produzca este problema. Primero, temperaturas más bajas de producción y compactación puede resultar en un secado incompleto de los áridos [7]. Para

prevenir esta sensibilidad al agua se debe realizar un diseño de la mezcla apropiado. De los muchos modos que hay para prevenir la falta de adherencia en los pavimentos, el uso de un agente anti-striping (ASAs) es el método más común, un agente que se utiliza muy a menudo es la cal. Basados en investigaciones y experiencias anteriores, es razonable creer que añadiendo el agente apropiado de efecto anti-striping se puede aliviar el problema [14] y también utilizando agregados con la menor humedad posible.

La segunda causa que puede producir sensibilidad al agua es el uso de los mencionados ASAs. Cuando estos agentes son mezclados con el ligante y posteriormente con el árido y aditivo que introduce agua, se pueden producir algunas reacciones químicas entre los ASAs y los aditivos, debido a las altas temperaturas a las que se produce el mezclado ( $110^{\circ}\text{C}$ ), y que pueden resultar en una pérdida de adhesión en la mezcla [16]. No existen muchas investigaciones llevadas a cabo en esta área, es decir, en determinar los efectos de ASAs líquidos con aditivos WMA, que como hemos dicho puede llevar a daño por humedad y a un posterior fallo del pavimento.

### **Rendimiento a largo plazo**

Debido a la relativa novedad que suponen estos productos, los ensayos de campo o in situ son limitados en número, y también tiene un periodo de vida corto (siete años en EE.UU. y poco más de 10 años en algunos países europeos). Por este motivo, no es aceptable actualmente hablar de rendimiento a largo plazo, ya que en un ciclo de vida útil de un pavimento, si las WMA no tienen un rendimiento similar o mejor que las mezclas convencionales, no se puede hablar de beneficios ambientales a largo plazo o de ahorros energéticos [5].

Hasta la fecha, en EE.UU. no se han notado importantes efectos negativos en el rendimiento a largo plazo [8], y en Europa las secciones de ensayo de WMA han tenido un comportamiento igual o mejor que las convencionales [5]. Es importante

destacar que mientras en EE.UU. la mayoría de los ensayos han sido llevados a cabo por organismos públicos (DoTs – Departments of Transport), en Europa las compañías privadas que comercializan los productos son las responsable de estas investigaciones, lo cual, en algún modo significa una revisión menos independiente de las diferentes tecnologías WMA.

### 2.3.3 Posibles aplicaciones específicas de WMA

Inicialmente no existe ningún tipo de limitaciones para la producción y uso de WMA y estas tecnologías pueden usarse para las mismas composiciones que las convencionales. Sin embargo, las tecnologías WMA prometen una serie de beneficios que ya se han explicado anteriormente. Estas ventajas sobre las mezclas calientes tradicionales pueden ser usadas en algunas circunstancias específicas de pavimentación y producción y permiten que las WMA no sean solo un sustituto de las mezclas convencionales, sino que también sean útiles para circunstancias donde estas no puedan ser utilizadas. A continuación se presenta una lista de posibles aplicaciones específicas de estas mezclas:

- *Incremento del porcentaje de asfalto reciclado:* dada la menor viscosidad del ligante en condiciones de trabajo, las WMA pueden contener un mayor porcentaje de RAP que el que contienen usualmente, manteniendo el mismo grado de trabajabilidad. En Alemania se han llevado a cabo ensayos con porcentajes de RAP superiores al 50%; en estos casos se usaron Aspha-Min y Sasobit [5].
- *Ubicación de plantas en lugares urbanos:* la producción de WMA puede permitir que sea más fácil introducir las plantas asfálticas en las áreas urbanas, dada la menor producción de humos y emisiones.
- *Tiempos de construcción y liberación menores:* debido al menor enfriamiento necesario para estas mezclas, es posible que tanto la construcción de las carreteras, como la liberación de las mismas al tráfico sean más breves. Esto

puede ser de especial utilidad en aeropuertos (ya se ha realizado en el aeropuerto de Frankfurt [14]) y en carreteras con elevado índices de uso.

- *Pavimentación en tiempos fríos*: a través de la reducción de la viscosidad del ligante, las WMA pueden ser compactadas a menores temperaturas consiguiendo la misma densidad que las HMA.
- *Acceso a áreas de emisiones restringidas*: de manera similar a la pavimentación en tiempo frío, mayores distancias de transporte son posibles debido a que las mezclas pueden ser compactadas a menores temperaturas. Por lo tanto, produciendo las WMA a la misma temperatura que las convencionales puede servir para abastecer lugares más distantes sin perder trabajabilidad. Esto significa mayores áreas de mercado y disminución de los costes de movilización y accesibilidad a grandes áreas urbanas. Según D'Angelo et al. [5], WAM-Foam fue almacenado en un silo durante 48 horas y tenía aún las propiedades necesarias para extenderlo y compactarlo a un nivel normal. Datos similares [60] se han obtenido para el Low Energy Asphalt (LEA). Éste fue mantenido en camiones a una temperatura de 70-90°C durante 5-6 horas sin que posteriormente se experimentasen problemas para compactarlo.

## **2.4 Introducción al funcionamiento de WMA**

A partir del estudio de todas las tecnologías que actualmente se encuentran en uso, diversas clasificaciones pueden realizarse para intentar agrupar los distintos productos que se comercializan. De este modo, aunque el objetivo de todas estas tecnologías sea el mismo (reducir la temperatura de producción y extendido), en este apartado vamos a tratar principalmente con dos clasificaciones.

### **2.4.1 Clasificación de las tecnologías WMA**

La primera clasificación se basa en los diferentes rangos de reducción de temperatura que se consiguen. Directamente relacionados con estos rangos de

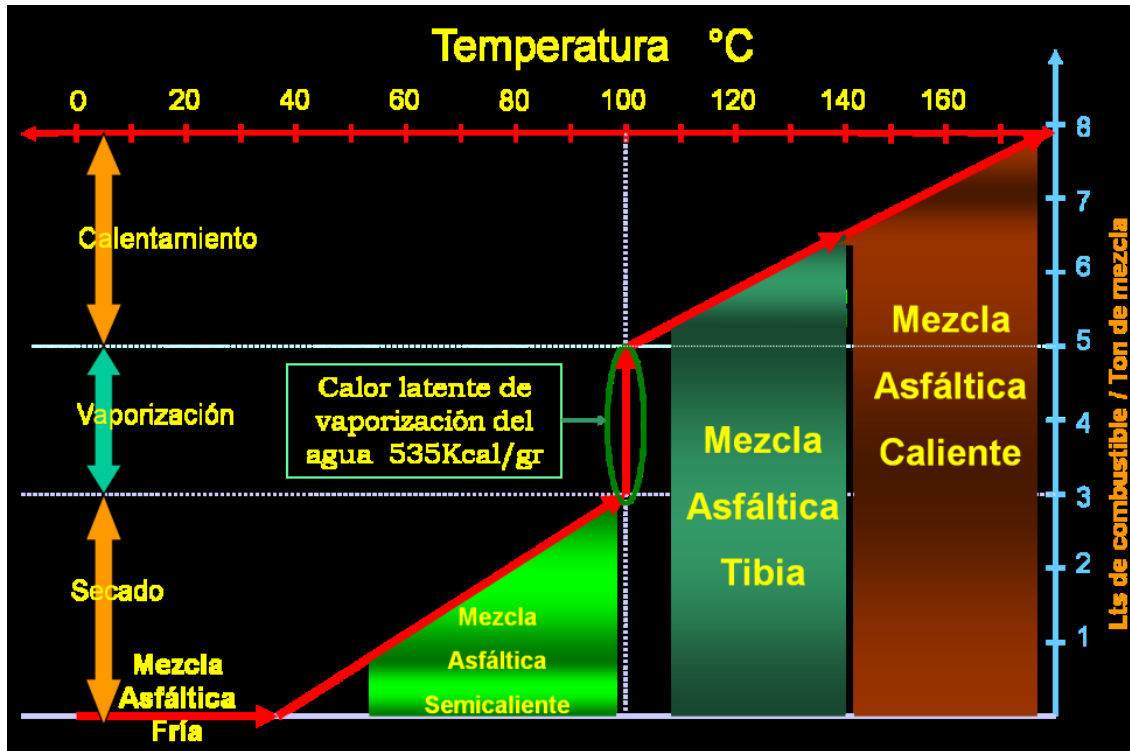


reducción se puede hallar el consumo de combustible por tonelada. Así pues, recogiendo la amplia gama de mezclas que pueden producirse, la clasificación tendría la forma siguiente [4, 10 y 14]:

- Mezclas frías: se trata de aquellas mezclas asfálticas producidas a temperatura ambiente (hasta los 40°C), y que para conseguir la trabajabilidad adecuada utilizan emulsiones o asfalto espumado.
- Mezclas templadas: este tipo de mezclas se caracteriza porque su temperatura de producción no supera en ningún momento la temperatura de ebullición del agua (100°C), usando para ello en la mayoría de los casos la humedad de los áridos.
- Mezclas tibias: se mueven en un rango de producción que varía desde temperaturas poco superiores a los 100°C, hasta cerca de los 140°C. Será este tipo de mezclas en las que nos centremos, y las diferentes tecnologías que se utilizan para conseguir esta reducción serán comentadas posteriormente.
- Mezclas calientes: las más extendidas por tradición, son todas aquellas cuya temperatura de producción supera los 150°C. Como se ha comentado anteriormente, son necesarias estas elevadas temperaturas de modo que se consiga la manejabilidad adecuada de las mezclas, así como la mejor envuelta de los áridos.

En el gráfico que se incorpora a continuación es posible visualizar los rangos anteriormente mencionados, con su correspondiente gasto de combustible (aproximado) por tonelada de producción. [3]

Gráfico N° 1. Rangos de temperatura usuales en WMA

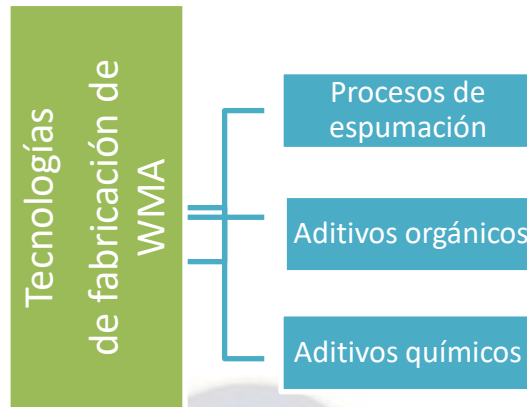


Fuente: D'Angelo, John, et al. Warm-Mix Asphalt, European Practice [3]

Si bien la anterior clasificación puede ser válida para explicar las características generales de WMA, existen distintos tipos de tecnologías de fabricación lo que nos permite establecer una clasificación más detallada en función del principio de funcionamiento en el que se basan. [4, 5 y 10]

Se encontraron tres tecnologías diferentes:

Figura N° 1. Distintas tecnologías de WMA.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación se explica con mayor detenimiento el principio de funcionamiento en el que se basan cada una de las tecnologías que se pueden ver en la clasificación anterior.

#### 2.4.2 Tecnología de espumación

Esta tecnología de WMA se basa en general en el uso de pequeñas cantidades de agua, ya sea inyectadas directamente en el asfalto caliente o añadidas con los áridos al tambor de mezclado.

Cuando el agua se mezcla o entra en contacto con el asfalto caliente, las altas temperaturas de éste provocan su evaporación, y el vapor queda atrapado dentro de la matriz del asfalto. De este modo, se genera un volumen considerable de vapor, que se encarga de incrementar de manera temporal el volumen del asfalto y disminuye la viscosidad del mismo. [9] Este efecto dota a la mezcla de una mejora notable en el recubrimiento y trabajabilidad de la misma.

Una característica común a los distintos procesos de espumación es lo limitado del efecto, de modo que el extendido y compactado de este tipo de mezclas debería ser llevado a cabo poco después de su producción [11]. Precauciones especiales tienen que tomarse para que la cantidad adicionada de agua sea la correcta, es



decir, se debe añadir suficiente agua para asegurar el efecto de espumación, pero no demasiada de modo que se evite problemas de cohesión que se pudieran crear por la incorrecta evaporación de toda el agua [17].

Con relación a la tecnología de espumación ésta fue aplicada en nuestro país en proyectos de mantenimiento en la Red Fundamental, no obstante, aún no se extendió su aplicación plena en nuestro mercado de la construcción, pudiendo ser implementada en proyectos de reconstrucción, rehabilitación y mantenimiento de carreteras.

No obstante el proceso principal es el mismo para un gran número de productos que usan esta tecnología, el modo en el que el agua es añadida a la mezcla puede variar. Así pues, es posible distinguir dos tipos diferentes: basados en agua o método directo y aquellos que contienen agua o método indirecto [1 y 4].

#### **2.4.2.1 Método indirecto**

Este método se basa en el uso de zeolitas sintéticas para conseguir el proceso de espumación. Este material está compuesto de aluminosilicatos de metales alcalinos, y ha sido hidrotérmicamente cristalizado. Contienen aproximadamente un 20% de agua de cristalización, la cual se libera de la estructura de la zeolita ante el aumento de temperatura provocado por la adición del asfalto, causando un efecto de micro-espumación en la mezcla asfáltica [7, 9, 12, 13 y 53]. La habilidad de este material de poder absorber y perder agua sin dañar su estructura cristalina es una las principales características de estos silicatos [13 y 21].

#### **2.4.2.2 Método directo**

Este método señala que el agua que se necesita para crear el efecto de espumación es inyectada directamente al flujo de asfalto caliente, realizándose en la mayoría de los casos a través de boquillas. El agua añadida rápidamente se evapora,

produciendo un largo volumen de vapor, el cual lentamente va desapareciendo [5]. Dentro de este grupo, se puede realizar una distinción aún mayor como sigue (basada en los productos comerciales):

- Los productos Double Barrel Green, LT Asphalt y Ultrafoam GX, utilizan diferentes equipos para introducir dentro del asfalto caliente el agua el principio básico es el mismo, usan numerosas boquillas para introducir agua fría, de modo que se consiga la micro-espumación del ligante [1].
- El sistema WAM Foam está basado en dos componentes de ligante (también conocido como método de las dos fases) el que introduce un ligante más blando al principio y posteriormente uno duro espumado dentro del ciclo de producción de la mezcla. Al asfalto duro se le inyecta agua fría en pequeñas cantidades para inducir el proceso de espumación y aumentar la capacidad de envolver del mismo. Esta combinación de asfalto blando y otro más duro espumado actúa para bajar la viscosidad de la masa de la mezclas para dotarla de la trabajabilidad necesaria [1,6,12,13,54].

### **2.4.3 Aditivos orgánicos**

Esta tecnología se basa en la adición a la mezcla de distintos tipos de cera. Por encima del punto de fusión de las ceras se produce generalmente un decrecimiento en la viscosidad. Durante el periodo de enfriamiento, durante el colocado de la mezcla, los aditivos fundidos se solidifican en partículas microscópicas y uniformemente distribuidas que incrementan la dureza del ligante, análogo a los materiales reforzados con fibras [11].

Es necesario seleccionar cuidadosamente el tipo de cera a utilizar, de manera que se eviten posibles problemas con las temperaturas. Es decir, si el punto de fusión de las ceras es más bajo que las temperaturas que se prevén en servicio del asfalto, pueden aparecer complicaciones, convirtiéndose entonces el asfalto en un material

frágil a bajas temperaturas [4,9]. Por lo tanto hay que intentar que se encuentren en estado sólido a temperaturas de servicio.

Las ceras usadas por estos productos son moléculas formadas por cadenas hidrocarbonadas que se funden a temperaturas entre los 80 y los 120°C, modificando por consiguiente las propiedades originales del ligante. El punto de fusión depende en gran medida de la longitud de la cadena de carbonos (C45 o más) [18]. Entre un 2 y un 4% de cera del total de la masa del ligante es la dosificación habitual. Los aditivos orgánicos suelen conseguir una reducción de temperatura de entre 20-30°C, mientras que también mejoran la resistencia a deformación de los asfaltos tratados con estos productos [4].

Existen actualmente tres tipos diferentes de tecnologías que se basan en este proceso, la única diferencia entre ellas es el tipo de cera utilizado para conseguir la reducción de la viscosidad. Las ceras son: Fischer-Tropsch, Ámidas ácidas grasas y ceras de Montana. A partir de la referencia bibliográfica [9], una tabla resumen se presenta a continuación.

**Tabla N° 2. Tipos de ceras usadas en WMA**

		SUSTANCIA			
Nombre		Ceras Fischer-Tropsch	Ámidas ácidas grasas	Ceras de Montana	
Apariencia		Polvo blanco o gránulos	Polvo blanco o gránulos	Polvo marrón o gránulos	
Estructura		Larga cadena de hidrocarburos alifáticos	Diamidas ácidas grasas	Éster ácido montánico	
Propiedades	Punto de fusión (°C)	114-120	140-145	100-140	
	Punto de congelación (°C)	100-105	135-142	100-130	
	Viscosidad dinámica (MPa s)	130°C	11-15	No medible	20-200
		140°C	9-13	13-17	No determinado
150°C		8-12	9-13	5-15	
Efecto en betún 50/70	Aditivo (% en peso)	3.0*	3.0*	2.5-3.0*	
	Incremento punto de ablandamiento (°C)	25-35	40-55	Información del productor	
	Disminución de la penetración (1/10 mm)	15-25	10-15	Información del productor	
		(*) Porcentaje en peso del ligante			

**Fuente: The German Bitumen Forum. Progress Report. June 2006. [9]**

#### **2.4.4 Aditivos químicos**

Estos productos no dependen de ningún proceso de espumación o de reducción de la viscosidad para reducir las temperaturas de mezclado y compactación [4,13]. En lugar de eso, estos productos generalmente incluyen una combinación de agentes emulsificantes, surfactantes, polímeros y aditivos para mejorar el recubrimiento, la trabajabilidad de la mezcla, y la compactación, así como promotores de adhesión (agentes cohesivos). La cantidad añadida y la reducción de temperatura conseguida por estas tecnologías dependen del producto específico utilizado. Los aditivos generalmente se mezclan con el ligante antes de que éste sea introducido en el tambor de mezclado.

La reducción de temperatura se mueve en rangos que van desde los 15-30°C conseguidos por REVIX® a los 50-75°C supuestos para Evotherm ET [19]. Estos productos son los más nuevos en el campo de WMA, de ahí que las investigaciones y los resultados que se han publicado sean bastante más escasos que para los otros tipos. Sin embargo, los resultados prometedores que hasta ahora se han obtenido permiten pensar en ellos como una fuerte alternativa.

#### **2.5 Descripción de los productos comerciales para WMA [21]**

Son numerosos los productos que se han desarrollado durante los últimos años en el campo que se refiere a las WMA, a partir de ideas originales y realizando diversas modificaciones, se han obtenido diversos productos bajo patente, la extensión referente a cada uno de ellos depende principalmente de la cantidad de investigación que se ha realizado acerca de cada uno, siendo los productos más importantes: Ashpa-Min®, Sasobit®, Evotherm y Wam-Foam®, que han sido ensayados tanto en laboratorio como in situ ampliamente. A modo resumen se adjunta la Tabla 3, con la mayoría de los productos que se comercializan hoy en día, con las principales características que les son propias a cada uno.

Tabla N° 3. Productos comerciales para la fabricación de WMA. [3,4]

Proceso WMA	Producto	Empresa	Descripción	Dosificación aditivo	Usados en	Temperatura de producción (o rango de reducción)
<b>Procesos de espumación</b>						
Método directo	<b>Aspha-Min®</b>	Eurovia and MHI	Proceso de espumación por el método directo	0.3 % del peso total de la mezcla	USA, Alemania, Francia	(20-30°C)
Método directo	<b>Advera®</b>	PQ Corporation	Proceso de espumación por el método directo	0.25 % del peso total de la mezcla	USA	(10-30°C)
Método indirecto	<b>Double Barrel Green</b>	Astec	Proceso de espumación por el método indirecto	2% de agua por masa de asfalto	USA	116-135°C
Método indirecto	<b>Ultrafoam GX</b>	Gencor industries	Proceso de espumación por el método indirecto	1-2% agua por masa de asfalto	USA	No especificado
Método indirecto	<b>LT Asphalt</b>	Nynas	Asfalto espumado hidrofílicamente additive	0.5-1 % por masa de asfalto	Holanda e Italia	90°C
Método indirecto	<b>WAM-Foam</b>	Shell and Kolo-Veidekke	Recubrimiento de asfalto blando seguido de ligante duro espumado	2-5 % de agua por masa de asfalto duro	Extendido	100-120°C
Método indirecto	<b>Low Energy Asphalt</b>	McConaughy y Technologies	Árido grueso mezclado con arena húmeda	3 % agua introducida mediante la arena fría	USA, Francia, España, Italia	<100 °C
Método indirecto	<b>Low Emission Asphalt</b>	McConaughy y Technologies	Árido grueso mezclado con arena húmeda	3 % agua introducida mediante arena fría; 0,4% de peso de asfalto	USA	90°C
Método indirecto	<b>LEAB</b>	Royal Bam Group	Espumación directa mediante aditivo al ligante. Mezcla de árido por debajo de los 100°C	0.1% de peso de asfalto de aditivos cohesivos y de envuelta	Holanda	90°C
<b>Aditivos orgánicos</b>						
Cera FT	<b>Sasobit</b>	Sasol	Cera Fischer-Tropsch	Alemania: 2.5% por peso de asfalto USA: 1-1.5%	Alemania y otros 20 países	(20-30°C)
Cera de Montana	<b>Asphaltan B</b>	Romonta GmbH	Cera refinada de Montana	2.0–4.0% por masa del asfalto	Alemania	(20-30°C)
Amidas ácidas grasas	<b>Licomont BS</b>	Clariant	Amidas ácidas grasas	3.0% por masa de asfalto	Alemania	(20-30°C)



Proceso WMA	Producto	Empresa	Descripción	Dosificación aditivo	Usados en	Temperatura de producción (o rango de reducción)
	<b>3E LT or Ecoflex</b>	Colas	Propiedad	No especificado	Francia	(30-40°C)
Cera sintética	Honeywell Titan™ 7205	Honeywell	Cera polietilénica	3.0% por masa de asfalto	USA	(30-40°C)
<b>Aditivos químicos</b>						
Químico	<b>Evotherm Technologies</b>	Mead Westvaco	Paquetes químicos, con o sin agua	0.5% de masa de emulsión bituminosa. La emulsión contiene un 70% de asfalto	USA, Francia, extendido	85-115°C
Químico	<b>Cecabase RT</b>	CECA	Paquete Químico	0.2-0.4% por peso de la mezcla	USA, Francia	(30°C)
Químico	<b>Rediset</b>	Akzo Nobel	Surfactantes catiónicos y aditivos orgánicos	1.5-2% del peso del asfalto	USA, Noruega	(30°C)
Químico	<b>Revix</b>	Mathy-Ergon	Agentes tensoactivos, ceras, agentes de mezclado, polímeros	No especificado	USA	(15-25°C)
Químico	<b>Iterlow T</b>	IterChimica	-----	0.3–0.5% por masa de asfalto	Italia	120°C

Fuente: D'Angelo, John, et al. Warm-Mix Asphalt: European Practice. [3], K M Muthen. Foamed Asphalt Mixes - Mix Design Procedure [4]

## 2.5.1 Aditivos para tecnología de espumación [21]

### 2.5.1.1 Ashpa-Min®

Asha-min® es una zeolita sintética producida por la empresa alemana Eurovia GmbH. Las zeolitas sintéticas son silicatos sódico-alumínicos que han sido hidrotérmicamente cristalizados. Contienen alrededor de un 21% de agua por peso. Se presenta comercialmente como unos gránulos muy finos, con un tamaño medio de partícula de alrededor de 380 µm o bien como un polvo fino, con 3.5 µm de tamaño medio. En el rango de temperaturas que va desde los 85 hasta los 180°C, el agua cristalina que contienen las partículas es liberada, creando el ya conocido

efecto de espumación correspondiente, e incrementando la trabajabilidad de la mezcla. Eurovia recomienda añadir Aspha-min® en un ratio del 0.3% por masa de la mezcla, lo que permite conseguir reducciones del orden de los 30°C en la producción y extendido de las mezclas [53].

Figura N° 2. Aspha-Min en forma de polvo.



Fuente: [asphamin.com](http://asphamin.com)

Cuando se añade Aspha-min® a la mezcla al mismo tiempo que el ligante, el agua que contiene es liberada lo que crea una expansión de volumen del ligante que da lugar a la espumación de la mezcla y permite un mejor recubrimiento de los áridos y mayor trabajabilidad, todo ello a menores temperaturas de las habituales. Eurovia asegura que todos los asfaltos conocidos, los modificados con polímeros así como el asfalto reciclado pueden ser usados junto con la implementación de esta tecnología. Además de esto, también todo tipo de áridos y fillers han sido probados para estas mezclas y no se producen, por lo tanto, modificaciones en el normal diseño de la mezcla. La adición de la zeolita en el proceso de mezclado no tiene por qué ser realizada a través de dispositivos especiales, pudiéndose realizar mediante un proceso similar a aquél usado para añadir ciertos tipos de fibras, y no alarga la duración del mismo. En el caso de que deba añadirse al filler, el mezclado a mano también está contemplado.

Se aconseja el almacenaje entre -15°C y 70°C, ya que en ese rango no se produce ninguna modificación. Se aconseja evitar la humedad, y no existe ningún peligro de intoxicación por humos. Atendiendo a la legislación vigente (europea), no se considera Aspha-min como un producto peligroso, y por lo tanto no se encuentra

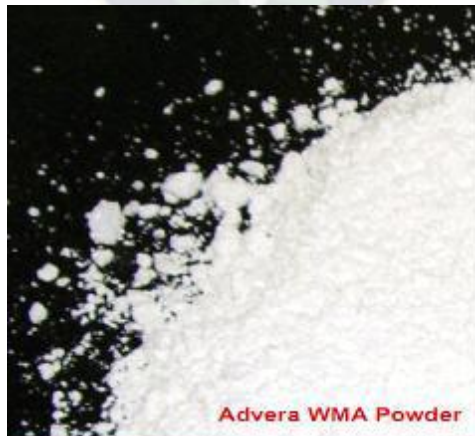
etiquetado en este sentido. A partir de estudios llevados a cabo, se ha determinado que la disminución en la temperatura conseguida por Aspha-min® lleva claramente a un marcado menor consumo de energía. Esto último influye además en las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, dando lugar de este modo a una mejora medioambiental.

Más de 100 proyectos realizados mediante el uso de esta tecnología desde 1995 avalan la fiabilidad y la consecución de los objetivos deseados.

### 2.5.1.2 Advera®

Se trata de una zeolita sintética, al igual que Aspha-Min®, que consigue la producción y extendido de WMA a temperaturas entre 20 a 35°C menores que las mezclas calientes. A través de dicha reducción, este producto permite la consecución de todas las ventajas o beneficios mencionados para las WMA: emisiones reducidas, consumo energético menor, mejor trabajabilidad, posibilidad de incrementar la cantidad de asfalto reciclado.

Figura N° 3. Imagen de Advera en polvo.



Fuente: [adverawma.com](http://adverawma.com)

Son aluminosilicatos hidratados, que contienen entre un 18 y un 21% de agua cristalizada. El tamaño y la calidad del producto cumplen con los estándares



necesarios para conseguir la consistencia adecuada. Además, se trata de un producto no dañino para trabajadores y medio ambiente (HMIS/NFPA Code 1, 0, 0 y GRAS).

Esta tecnología ha sido usada con éxito en todos los tipos de mezclas asfálticas, incluyendo aquellas modificadas con polímeros, e incluso con caucho. Añadida con una dosificación del 0.25% en peso de la mezcla, es fácil de manejar y ofrece beneficios en capas de base, rodadura y emulsiones bituminosas. Mediante los estudios realizados en laboratorio, su efectividad ha quedado patente.

### **2.5.1.3 Double Barrel Green® System**

Double Barrel Green® System es una tecnología WMA de la compañía norteamericana Astec, que usa un sistema multi-boquilla para la creación de mezclas a menor temperatura sin el uso de aditivos más caros, o cementos asfálticos especiales. En la web del producto se asegura que los humos y las emisiones son disminuidos drásticamente sin que se comprometa la calidad de la mezcla. Es un sistema opcional, que usa agua para producir WMA mediante procesos de espumación, y que son inodoras, carentes de humos y que duran más tiempo. Al contrario que otras tecnologías o productos WMA, el sistema Double Barrel Green no requiere la adición de aditivos comerciales que encarecen la tonelada de mezcla producida. Sin embargo, sí que requiere de una fuerte inversión inicial, dado que la adquisición de la maquinaria inyectora de agua tiene un elevado coste. La reducción de temperatura que se consigue con el uso de este producto va desde los 50 hasta los 100°F (10-35°C).

**Figura N° 4. Esquema de la maquina patentada de Double Barrel.**

Fuente: [doublebarrel.com](http://doublebarrel.com)

Cada una de las boquillas que conforman el dispositivo es capaz de circular cemento asfáltico y producir espumación en un ratio de 50 toneladas por hora. Las 10 boquillas con las que cuenta permiten elevar por lo tanto la producción a 500 toneladas por hora, cuando todas las válvulas se encuentran abiertas. Conforme se varían los ratios de producción de mezclas, un ordenador se encarga de abrir y cerrar las válvulas de modo que las boquillas expulsen solo la cantidad de agua necesaria, evitando problemas posteriores de humedad. Una undécima válvula se usa para la recuperación de cemento asfáltico.

Entre las ventajas conseguidas con el uso de esta tecnología y comentadas en su web se encuentran las ya mencionadas de modo más general para las WMA: mejor trabajabilidad, sin humos, mayor inclusión de asfalto reciclado (RAP), mayor vida del pavimento, mayor compactación o menor consumo energético. Además de estos beneficios, el sistema Double Barrel contribuye a un ambiente más sano y menos perjudicial para los trabajadores, elimina la necesidad de extractores de humos en las distintas instalaciones, reutiliza los recursos, consumiendo menos recursos naturales, y no incrementa los costes de producción.

#### **2.5.1.4 UltraFoam GX**

Gencor Industries desarrolló un dispositivo encargado de crear asfalto espumado de cara a la producción de WMA. Este dispositivo recibe el nombre de Green

Machine UltraFoam GX, y puede ser emplazado en cualquier planta de producción continua. Se trata de una máquina robusta, simple y efectiva, capaz de inyectar agua para generar el vapor necesario de espumación. Para ello, utiliza solo la energía de la bomba para aportar mezcla asfáltica y agua. Puede adaptarse a distintos ratios de producción sin variar el consumo energético, modificándose con ello la cantidad de agua añadida y las temperaturas de producción.

Figura N° 5. Maquinaria para la tecnología UltraFoam GX.



Fuente: Gencor.com

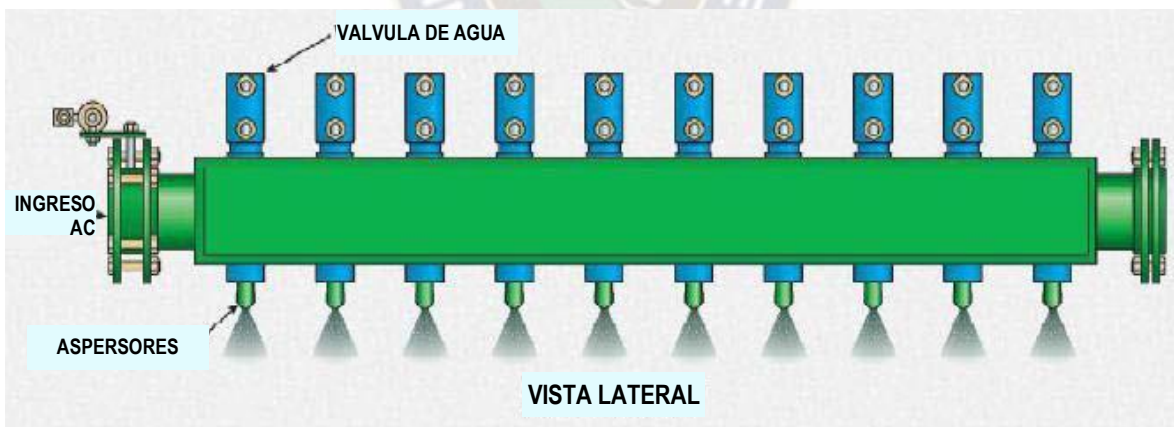
El UltraFoam GX es además un diseño patentado, que posee una serie de orificios variable para la correcta adición de mezcla asfáltica y agua, y un medio para mantener en contacto las dos corrientes de materiales, de manera que la energía de la que se dispone sea utilizada de una manera más eficiente. A la hora de producirse la espumación, el dispositivo se encarga de introducir pequeñas cantidades de agua (entre 1.25 y un 2% del peso total de la mezcla) dentro del flujo de la mezcla. Una válvula de resorte de carga de agua situada en el centro se abre cuando la presión ejercida por el líquido sea lo suficientemente grande. Externamente se encuentra una placa de diafragma que permite a la mezcla circular a diferentes ratios mientras que se mantiene una presión constante. Conforme se aumenta el flujo, los dedos del diafragma se flectan, permitiendo aumentar el área de dicho flujo.

Debido a su diseño único, la UltraFoam GX Green Machine mantiene la proporción perfecta entre mezcla y agua en todos los niveles de producción, lo que permite la creación de burbujas más pequeñas y estables, que lleva a asfaltos espumados más consistentes.

### 2.5.1.5 LT Asphalt

LT-Asphalt (también conocido como LTAsfalt) es un grupo de procesos especiales usados para la producción de mezclas asfálticas a temperaturas inferiores a las 100°C. El rango de beneficios ofrecidos por el uso de esta tecnología ha sido ya comentado en productos anteriores. Este procedimiento fue desarrollado por la empresa Nynas, en colaboración con 4 compañías danesas y el Dutch Road Authorities Innovation Test Centre. A diferencia de otras tecnologías existentes en el mercado, el producto de Nynas permite al productor generar mezclas asfálticas con un contenido de asfalto de hasta el 7%, dado su proceso único de inyección de agua.

Figura N° 6. Esquema para la introducción de agua en el mecanismo LT Asphalt.



Fuente: Nynas.com

Las características principales del proceso son la utilización de un método específico de inyección de espuma, un asfalto específico (Nyfoam) y un diseño de la mezcla a medida. A través del proceso de diseño, el material utiliza la humedad atrapada en la mezcla para dar a la misma una trabajabilidad buena a temperaturas inferiores a los 100 °C. Aditivos específicos eliminan el agua inerte una vez

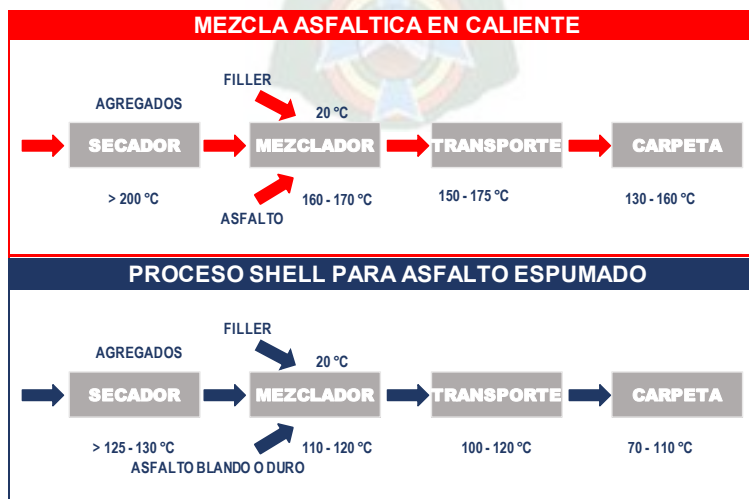
compactada la mezcla, permitiendo a la misma comportarse tal y como una mezcla caliente, y como tal debe ser tratada.

### 2.5.1.6 WAM Foam

WAM Foam (Warm Asphalt Mixes with Foam) es un proceso patentado desarrollado conjuntamente entre Shell Global Solutions y Kolo Veidekke en Noruega. En el proceso de producción de WAM Foam dos grados diferentes de asfalto, uno blando y otro duro, son combinados junto con los áridos. Esta tecnología hace posible la producción de mezclas asfálticas a temperaturas entre los 100 y los 120°C y compactadas desde 80 hasta los 110°C.

En las plantas modificadas para acoplar el sistema WAM Foam primero se mezcla el asfalto blando con los áridos para conseguir un pre-envuelta correcta y posteriormente el asfalto espumado, que es más duro, se introduce. La viscosidad del asfalto blando se elige de modo que a temperaturas menores de los 100°C pueda envolver completamente el árido. El componente duro se añade de forma espumada y debe tener una penetración a los 25°C de entre 1 y 10 mm., por lo que grados de penetración estándares tales como 10/20, 20/30, 35/50, 50/60 y 70/100 son apropiados para ser usados como asfalto duro.

Figura N° 7. Diferencia entre el mecanismo convencional de fabricación y WAM Foam.



Fuente: wamfoam.com



La proporción de cada tipo de asfalto se determina a partir de la penetración que se desea para la combinación final. En algunos casos es recomendable la adición de un agente que mejore la cohesión para reducir la sensibilidad al agua. La idea que subyace en todo el proceso anteriormente explicado es conseguir un asfalto que provea a los áridos un buen recubrimiento, y al mismo tiempo permita una buena trabajabilidad de la mezcla.

Para producir el asfalto espumado se trabaja como hemos visto para otros productos. Se inyecta agua fría en una proporción de entre 1 y 5% de peso del ligante, dentro del asfalto caliente. Cuando ambos materiales entran en contacto, el agua se evapora y produce un aumento del volumen de la mezcla, aunque dicho vapor poco a poco va desapareciendo con el tiempo y el asfalto recupera sus propiedades originales. Mediante esta expansión del volumen se consigue que la envuelta de los áridos sea mejor.

Las plantas asfálticas para la producción de este tipo de mezclas necesitan ser modificadas, de forma que se las dote con un dispositivo de espumación y un buen sistema de extracción, para de este modo poder compensar la presión que se produce en la mezcladora durante el proceso de espumación. Se trata por lo tanto de modificaciones un tanto caras, comparadas con otros métodos descritos anteriormente. En una planta discontinua, el asfalto espumado se produce inyectando agua dentro de la tubería del asfalto mediante boquillas especiales justo antes de que éste entre en la mezcladora y una máquina de aire se encarga de limpiar impurezas de las tuberías y el tambor de espumación después de cada proceso. La capacidad de producción de la planta se mantiene para todo tipo de mezclas con el uso de esta tecnología.

El problema existente para las tecnologías que se basan en procesos de espumación mediante la adición directa de agua es que en el laboratorio no se pueden reproducir las condiciones de fabricación. Por este motivo, los resultados

que se han obtenido a partir de investigaciones provienen todos de las empresas privadas que desarrollan estos productos, mientras que para el resto de tecnologías distintos organismos públicos (universidades, centros de investigación) también han participado en la fase de investigación y desarrollo.

#### **2.5.1.7 Low Energy Asphalt**

En 2005, la compañía francesa McConnaughay introduce por primera vez una tecnología por aquel entonces emergente, conocida como Low energy Asphalt. El principio de este proceso subyace en el mezclado secuencial. A los áridos gruesos se les introduce el asfalto con un aditivo químico, y seguidamente se añade a la mezcla arena húmeda encargada de crear la correspondiente espumación. La fracción de arena, que puede representar porcentajes de hasta el 40% del total de la mezcla, no se calienta cuando se usa este proceso. Dado que dicha fracción (conocida como fracción fina), contiene la mayor parte de la humedad, para secarla se requiere por tanto una gran cantidad de energía. El Low energy Asphalt debería ser extendido a una temperatura ideal de alrededor de 90°C (por lo que podría englobarse dentro de las templadas, y no semicalientes) y afirma conseguir la mayor reducción de consumo energético de entre las tecnologías de WMA disponibles.

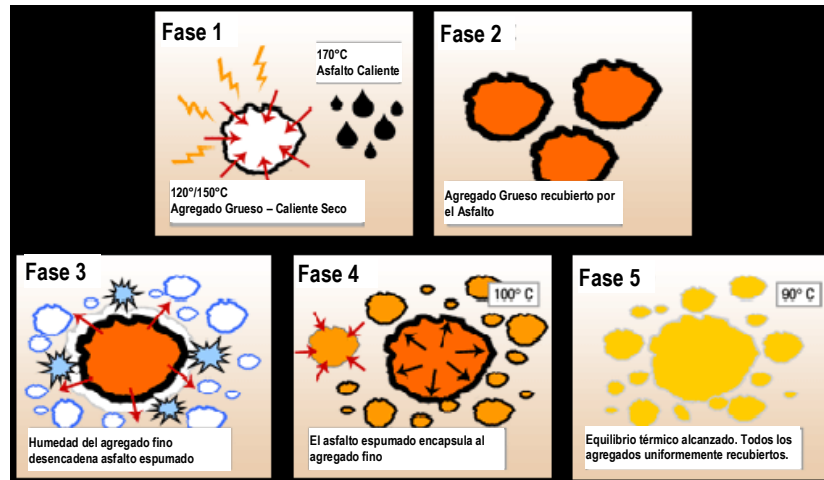
Modelos de transferencia de calor desarrollados en Europa por el profesor Yves Le Goff indican que una reducción de entre 40 y 55% se puede conseguir en el consumo energético. A partir de trabajos preliminares de laboratorio, se determinó que con el uso de algunos productos químicos europeos, las mezclas realizadas mediante el proceso LEA presentaban un rendimiento igual que el de las HMA equivalentes.

#### **2.5.1.8 Low Emission Asphalt**

El principio en el que se basa este producto o tecnología es exactamente en el mismo que el anterior, el mezclado secuencial de los áridos sin haber procedido al

secado de los finos. Sin embargo, el desarrollo más exhaustivo que se ha llevado a cabo del agente químico que se adiciona al ligante ha llevado a la aparición de este nuevo procedimiento, que se caracteriza por una menor emisión de gases, mejorando de ese modo al anterior Low Energy Asphalt.

**Figura N° 8. Fases por las que pasa el árido en el proceso Low Energy Asphalt y Low Emission Asphalt.**



Fuente: McConnaughay.com

### 2.5.1.9 LEAB

El proceso LEAB, que se basa en el asfalto de bajo consumo energético, fue desarrollado por la compañía BAN en Holanda. Es una comercialización de la investigación acerca de mezclas templadas llevada a cabo por Kim Jenkins. En los ensayos de laboratorio, el agregado se dividió en fracción gruesa y fina, y se añadía agua al ligante para facilitar la envuelta para posteriormente realizar un proceso de mezclado en dos fases.

En el proceso LEAB, no se añade en ningún momento agua a los áridos, sino que se inyecta mediante boquillas al asfalto. BAM usa una serie de seis inyectores con este fin, los cuáles son retráctiles, pudiendo retirarse para fabricar mezclas calientes. Un aditivo basado en amidas se añade en un proporción del 0.1% de peso



de ligante, inmediatamente antes de la espumación. El aditivo ayuda a dar estabilidad al ligante espumado y aumenta la adhesión. Es similar a aquellos usados para producir emulsiones y se cree que es una amida de ácidos grasos [5].

## **2.5.2 Aditivos orgánicos [21]**

### **2.5.2.1 Sasobit**

Sasobit es una cera Fischer-Tropsch que se comercializa en forma de polvo blanco o granulado. Es un subproducto extraído del proceso de producción de gasolina sintética, llamado proceso de Fischer-Tropsch donde el contenido de cera es de aproximadamente 10%. Se trata de una cera de cadena larga alifática hidrocarbonatada, con un punto de fusión que va desde los 85°C hasta los 115°C. Una de sus principales características, que la hace realmente útil para su uso en los procesos de las WMA, es que posee alta viscosidad a temperaturas bajas, mientras que a altas temperaturas su viscosidad disminuye enormemente. Cuando se enfría la cristalización comienza a los 105°C y se completa a los 65°C, formando unas partículas microscópicas regularmente distribuidas. A temperaturas de servicio, Sasobit forma una estructura enrejada en el ligante que da estabilidad a la mezcla. De acuerdo a la información contenida en su web, con la adición de un 3% de Sasobit por peso de ligante, el punto de ablandamiento disminuye entre 20-35°C y el grado de penetración cae entre 15-25%. Esto explica la resistencia encontrada al ahuellamiento en las mezclas modificadas con Sasobit.

Sasol Wax afirma que Sasobit hace posible convertir asfaltos de grados más blandos a asfaltos más duros, mientras que al mismo tiempo también mejora la deformación a rendimientos de altas temperaturas. Sasobit se puede combinar con polímeros que contribuyan a dar elasticidad a bajas temperaturas. Esta mejora lleva al desarrollo de Sasoflex, que es una mezcla compuesta de Sasobit, polímeros y un agente de cohesión (Sasolink). El componente Sasobit (un plastómero) mejora la

rigidez a altas temperaturas, mientras que el polímero (un elastómero) mejora la flexibilidad a bajas temperaturas.

**Figura N° 9. Sasobit en forma de polvo y granular.**



**Fuente: D'Angelo et al. [3]**

Sasobit está disponible en forma de pequeños copos para su adición fundida o como pequeñas bolas que se adiciona directamente a la mezcla. En Europa, Sudáfrica y Asia, la cera se añade directamente a los áridos como pequeñas bolas usando un medidor de dosis. No se han encontrado indicaciones de que exista diferencia de estabilidad o flujo de las mezclas producidas con este procedimiento en comparación con aquellas producidas mediante la adición de ligante conteniendo Sasobit directamente. En los Estados Unidos, Sasobit se mezcla directamente con el ligante en la planta, y éste se inyecta seguidamente en el tambor de mezclado al mismo tiempo se añaden otros aditivos.

### **2.5.2.2 Asphaltan B**

Asphaltan B es un producto de Romonta GmbH. Está disponible comercialmente en sacos de 25 kg. Está creado especialmente para rolled asphalt, y compuesto por una mezcla de sustancias basadas en ceras de Montana e hidrocarburos de alto peso molecular. La cera cruda de Montana se obtiene en Alemania, Europa del Este y ciertas áreas de los Estados Unidos, en algunos tipos de lignita y carbón marrón, que se han formado durante millones de años a partir de la transformación de vegetación subtropical fosilizada. Dada su alta estabilidad e insolubilidad en el agua, la cera persiste durante periodos geológicos más largos.

Romonta recomienda añadir Asphaltan B entre un 2 y un 4% del peso del asfalto. Se puede añadir en la planta de mezclado o directamente al asfalto, y además

también puede contener polímeros modificados. El punto de fusión es aproximadamente 100°C. De manera similar a las ceras Fischer-Tropsch, esta cera actúa como un mejorador de la fluidez de la mezcla, con la asociada reducción de temperaturas de producción. Romonta no especifica cuanto se reduce la temperatura de producción, pero algunas investigaciones aseguran que estas disminuciones se encuentran en el rango de los 20-30°C. También de manera similar a Sasobit, Romonta afirma que este producto aumenta la compactabilidad y la resistencia al ahuellamiento.

### **2.5.2.3 Licomont BS 100**

Licomont BS 100 es un modificador asfáltico basado en ácidos grasos derivados que pueden incrementar la vida útil de los pavimentos, particularmente en ambientes que se encuentran a altas temperaturas. Las ceras conocidas como amidas ácidas grasas se caracterizan por ser producidas sintéticamente mediante la reacción de amidas con grasas ácidas. Generalmente, el punto de fusión se encuentra entre los 140°C y los 145°C y la solidificación entre los 135°C y los 145°C. Durante el enfriamiento, las amidas forman cristales que proporcionan al ligante una mayor rigidez y el grado de penetración disminuye de 10 a 15%. Mediante la mejora de la adhesión y de los niveles de compactación de la mezcla asfáltica e incremento de la dureza del asfalto, se asegura que la resistencia óptima al tráfico se consiga con una menor temperatura de producción. Esta menor temperatura también reduce el consumo de energía durante la producción de la mezcla, así como en el transporte y extendido. El uso de temperaturas de extendido menores también reduce la radiación de calor y la generación de gases.

### **2.5.2.4 3E LT y 3E BD**

3E es un agama de mezclas asfálticas no dañinas para el medio ambiente y eficientes energéticamente, con los mismos campos de aplicación que las mezclas calientes convencionales, sin preocupación del nivel de tráfico. Las temperaturas de

fabricación y extendido son entre 40 y 45°C menores que las usuales, lo que da lugar a una reducción de gases de efecto invernadero de entre 15 y 25%. También se produce un ahorro energético, y menos humos durante el extendido, lo que da lugar a un ambiente de trabajo y de la obra más saludable. La reducción anteriormente mencionada no altera la capacidad de carga del pavimento, ni su rendimiento mecánico.

Colas desarrolló dos procesos que se basan en los criterios expuestos: 3E LT y 3E DB. 3E LT conlleva la modificación de la reología del asfalto con agentes específicos añadidos al ligante. La mezcla se fabrica en plantas convencionales, y no requiere de equipamiento específico ni de ninguna modificación del proceso de la envuelta. La mezcla 3E DB usa el proceso de envuelta secuencial incluyendo dos ligantes con penetración diferente en una planta discontinua con dos circuitos de asfalto separados. Las mezclas se aplican con extendedoras en temperaturas que van desde 40 a 45°C inferiores a las convencionales. Las secciones pueden ser reabiertas al tráfico cuando la mezcla se ha enfriado a temperaturas cercanas a los 50°C.

#### **2.5.2.5 Modificador Rh-WMA [35]**

RH-WMA es un aditivo de aglomerante de asfalto basado en cera de polietileno producido a partir de polietileno reticulado desarrollado por el Instituto de Investigación del Ministerio de Carreteras de China. Está diseñado para reducir la viscosidad del aglutinante de asfalto a alta temperatura mientras se refuerza la estructura cristalina de asfalto a baja temperatura. RH-WMA contiene la mayoría de los beneficios indicados anteriormente al implementar la tecnología WMA, incluyendo la reducción de la temperatura de producción sin comprometer el rendimiento del pavimento.

Figura N° 10. Granos de aditivo Rh-WMA.



Fuente: Mohd Ezree Abdullah et.al. Warm Mix Asphalt Technology [35]

#### 2.5.2.6 Cera de polietileno pirolítico reciclado (RPPW)

En China, los investigadores han estudiado la aplicación de cera de polietileno pirolítico reciclado (RPPW) hecha de polietileno reticulado reciclado (XLPE) como aditivo de WMA. El XLPE tiene una excelente característica aislante y ha sido ampliamente utilizado como un material aislante para cables eléctricos y cables en condiciones de temperatura más altas. Los residuos de XLPE se quemaron como combustible o se enterraron debido a la dificultad de reciclado debido a su baja fluidez y mala moldeabilidad. Basándose en su hallazgo, la viscosidad del ligante asfáltico virgen modificado con RPPW disminuyó y se mejoró la resistencia a la rutina lo que podría prometer un rendimiento notable de la construcción a menor temperatura para el asfalto de mezcla caliente.

Figura N° 11. El polietileno de reciclado cross-lick, RPPW utilizado como aditivo de WMA [37]



Fuente: Mohd Ezree Abdullah et.al. Warm Mix Asphalt Technology [35]



### 2.5.2.7 Cera polietilénica Titan 7205

La empresa Honeywell de USA comercializa este aditivo para asfaltos, el que está compuesto en base a poliolefinas de bajo peso molecular. La empresa Honeywell ofrece sus aditivos para asfaltos en su página web [www.honeywell.com] con aplicaciones que ahorran tiempo y dinero a diseñadores y constructores. Un resumen de las aplicaciones se indican a continuación:

- **Mejor trabajabilidad a menor temperatura.** Las poliolefinas se dispersan con baja energía de mezclado, mejorando el rendimiento en la producción de mezcla asfáltica sin incremento de temperaturas de mezclado y colocación.
- **Baja viscosidad y alta estabilidad.** Los asfaltos modificados con polímeros conservan baja viscosidad y se compactan a menor temperatura comparados con otros productos. Los asfaltos muestran alta estabilidad al almacenamiento por extensos periodos incluso si son mezclados con SBS<sup>1</sup>.
- **Listo para usar.** Los polímeros son compatibles con una amplia gama de asfaltos, y pueden mezclarse con SBS para proporcionar propiedades de recuperación elástica.
- **Alta calidad esperada de Honeywell.** Los productos ofrecidos tienen baja viscosidad inclusive por encima del punto de ablandamiento, contando con un respaldo de expertos que garantizan la calidad de los productos.

En Anexo al presente trabajo se adjunta la publicación de la empresa Honeywell donde se expone en detalle los aditivos ofrecidos.

---

<sup>1</sup> Elastómero: Estireno-Butadieno-Estireno

Figura N° 12. Aditivo Honeywell Titan 7250. [ref: <https://www.honeywell-additives.com/>]

Fuente: Elaboración Propia.

Las propiedades del aditivo Honeywell Titan 7250 obtenidas del fabricante se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N° 4: Valores característicos Aditivo Honeywell.

Propiedades	Valor
Dureza @ 25°C	<0.5 dmm
Punto de goteo	116°C
Densidad	0.93 g/cc
Viscosidad @ 140°C	450 cps
Índice de Acidez	Nulo

Fuente: <https://www.honeywell-titan.com>

Las bondades de este aditivo se muestran en el tramo de estudio realizado en la Autopista estatal 347 en Beamont, Texas, donde se asfaltó 2 Km utilizando una mezcla SMA con asfalto PG 76-22.

Tabla N° 5: Resultados tramo de estudio.

	Unidad	Mezcla c/asfalto modificado SBS	Mezcla con Titan
Temperatura de mezcla	°C	168	138
Temperatura de compactación	°C	149 - 154	118 - 127
Pasadas de rodillo	Nro	3	2
Viscosidad (135°C)	cPs	1100	750

Fuente: <https://www.honeywell-titan.com/case-study/>



Las temperaturas más bajas y la menor cantidad de pasadas del rodillo durante la compactación muestran los siguientes ahorros:

- Los pasadas de rodillos disminuyeron en un 33%
- La temperatura de la mezcla disminuyó en 13° C
- El consumo de combustible disminuyó en un 13% \*

\* Calculado usando la calculadora de gases de efecto invernadero de National Asphalt Pavement Association

Los beneficios ambientales alcanzados al reducir las emisiones nocivas de gases fueron Ref.: [*Extrapolado de ISAP 2008, Julien et al: Evaluación ambiental de HMA*]:

- Reducción de dióxido de azufre SO<sub>2</sub> en un 82%.
- Reducción de óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub> en un 43%.
- Reducción de gases orgánicos volátiles VOCs en un 19%.
- Reducción del dióxido de carbono CO<sub>2</sub> en un 18%.

### 2.5.3 Aditivos químicos [21]

#### 2.5.3.1 Evotherm

Evotherm es un paquete químico diseñado para promover la adhesión, recubrimiento, compactación y trabajabilidad de las mezclas asfálticas a temperaturas menores. Diferentes paquetes químicos están disponibles comercialmente para distintos tipos de áridos. La principal diferencia entre los distintos paquetes es los agentes de adhesión. Un componente base de los compuesto químicos son los surfactantes, los cuales actúan como emulsificadores. Aproximadamente el 50% del paquete químico está derivado de recursos renovables [5]. Evotherm permite una reducción de entre 50°C hasta 75°C, tanto en la producción como el extendido, en comparación con las mezclas calientes.

Inicialmente, el paquete Evotherm se comercializó en forma de emulsión asfáltica con un residuo de ligante de alrededor del 70%. Este producto fue el pionero, denominado Evotherm Emulsion Technology, o Evotherm ET. La emulsión se almacena a una temperatura de 80°C, y puede disponerse directamente desde camión cisterna, o bien en tanques móviles o fijos instalados en la planta. A la hora de establecerse el valor óptimo de ligante en la planta es necesario tener en cuenta el 30% de agua que contiene la emulsión. La mayoría de esta agua se libera en forma de vapor durante el mezclado. La WMA resultante se encuentra totalmente recubierta y del mismo color que las mezclas convencionales, al contrario que las mezclas en frío.

Otra tecnología de la misma compañía (MeadWestVaco) es la denominada Evotherm Dispersed Asphalt Technology, o Evotherm DAT. La química es la misma que la vista para Evotherm ET, pero se diferencia en que el paquete químico se añade directamente junto con una determinada cantidad de agua dentro de la línea de producción asfáltica, justo antes de que entre en el tambor de mezclado. La principal ventaja de esta nueva tecnología es que los costes de envío son bastante menores, a la par que permite al productor cambiar de manera rápida entre HMA y WMA.

El último producto comercializado por la compañía, y que sigue la misma línea de los anteriores, es el denominado Evotherm 3G. Ha sido desarrollado en colaboración con ParagonTechnical Services y Mathy Technology & Engineering. Se trata de una forma de Evotherm con ausencia de agua, apropiado para aplicar de una manera más eficiente los aditivos contenidos en la tecnología Evotherm en la planta o en la terminal. Las temperaturas de producción se reducen entre 33 y 45°C. Este producto ha sido también comercializado como REVIX, pero actualmente recibe el nombre únicamente de MWV Evotherm 3G.

Desde carreteras de bajo volumen de tráfico a autovías con alta carga de tráfico, Evotherm ha mostrado un rendimiento adecuado a lo largo de más de 100 proyectos

en Estados Unidos, así como Francia, España, Canadá, Sudáfrica, México y China. Resultados obtenidos a partir de test de acelerado de rendimiento del centro para asfaltos de los EE.UU (NCAT) han arrojado que pavimentos realizados usando la tecnología Evotherm pueden actuar durante más de 10 años con cargas pesadas de tráfico de manera excepcional con prácticamente ninguna deformación.

### **2.5.3.2 Cecabase RT**

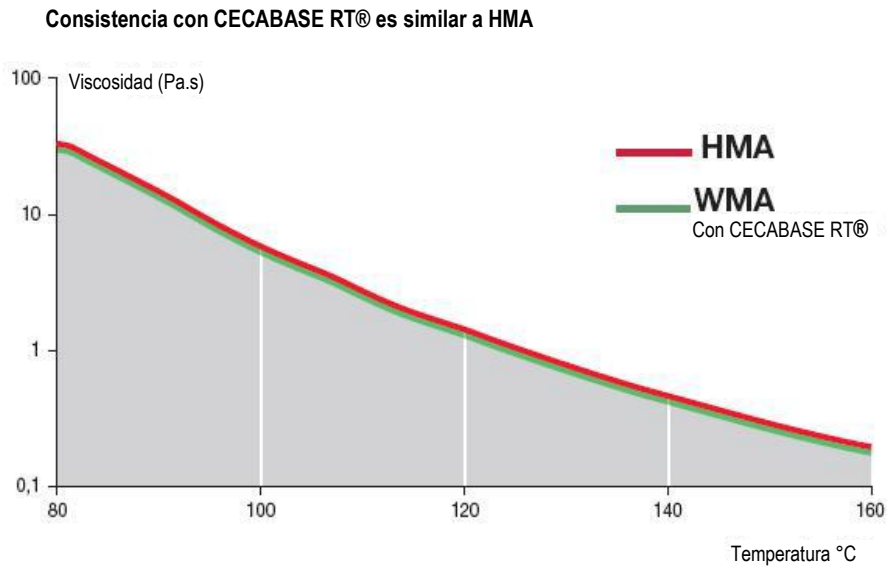
Como resultado de la investigación llevada a cabo por parte del grupo Arkema, en 2006 empieza a comercializarse el producto CECABASE RT. En un año, alrededor de 10 proyectos fueron llevados a cabo con éxito y 80.000 toneladas de WMA fueron producidas usando este aditivo en 2006.

El aditivo CECABASE se basa en agentes tensoactivos compuestos al menos por un 50% de materia prima renovable. Cuando se mezcla con el asfalto, la temperatura de extendido puede reducirse hasta en 50°C sin que haya un efecto adverso en el rendimiento del pavimento. Comparado con las mezclas calientes, el uso de este aditivo permite reducir el consumo de energía entre 20 y 50%, dependiendo del proceso, y considerablemente reduce las emisiones dañinas a la atmósfera.

Se trata pues de un proceso que usa menos energía y que a la postre es por lo tanto menos dañino con el medio ambiente. Un asfalto típico está compuesto de un 95% de áridos y alrededor de un 5% de ligante. La mezcla se calienta hasta 160-180°C para alcanzar la trabajabilidad requerida para su extensión y compactación. La incorporación del aditivo desarrollado por CECA, entre 2 y 4 kg. por cada tonelada de mezcla asfáltica, permite reducir dicha temperatura hasta los 120°C, al mismo tiempo que permite conservar las mismas propiedades que las mezclas convencionales.

CECA afirma que el desarrollo de este producto se llevó a cabo teniendo en cuenta que en ningún momento debería reducir la productividad en la construcción de asfaltos, asegurando que la introducción del aditivo a la mezcla no altera el proceso general y que es muy sencilla de realizar.

**Gráfico N° 2. Similitud de las mezclas convencionales y las WMA realizadas con Cecabase.**



Fuente: [www.Ceca.com](http://www.Ceca.com)

### 2.5.3.3 Rediset WMX

En 2007 AkzoNobel introdujo un nuevo sistema de producción de WMA denominado Rediset WMX en el intento de mitigar las deficiencias observadas en las tecnologías WMA existentes por aquel entonces. En particular, este sistema fue diseñado con objeto de solventar los problemas existentes con el agua en las WMA; la rigidez reducida comparada con las mezclas calientes; y la incerteza existente en las propiedades a bajas temperaturas.

Stripping (incorrecta adherencia entre árido y asfalto debido a la presencia de agua) es un problema bastante conocido, dando lugar a la pérdida de partículas, baches, roderas y deformaciones plásticas permanentes. Rediset WMX está formulado de

tal modo que se mejore la adherencia entre el árido y el asfalto y así prolongar la vida útil del pavimento y reducir el mantenimiento durante dicho periodo.

Rediset WMX entra en el grupo conocido como agentes químicos modificadores de asfalto, el cual no implica la adición de agua a la mezcla o al asfalto. Rediset WMX consiste en un aditivo químico sólido en forma de pastillas que se añade al ligante antes o durante el proceso de mezclado. La tecnología amina del producto le dota de propiedades promotoras de la adhesión (habilidad para desplazar el agua de la superficie de los áridos húmedos) y un efecto antioxidante, mientras que la forma física del producto provoca cierta reducción de la viscosidad a las temperaturas de la mezcla, aumentando la rigidez a temperaturas de servicio.

Figura N° 13. Rediset y su forma granular/ pastilla.



Fuente: [RedisetWMX.com](http://RedisetWMX.com)

El conocido como “warm mix effect” (efecto de mezclas semicalientes) se piensa que viene provocado de forma primaria por la actividad superficial de los surfactantes aminas, tanto por el efecto de lubricación en los áridos como por el efecto dispersante que tiene sobre el mástic asfáltico.

#### 2.5.3.4 Interlow T

La tecnología Iterlow se basa en un producto líquido, que se añade al asfalto en cantidades de entre 0.3 y 1% y que permite la producción de WMA. Actuando en la tensión superficial del asfalto, no modifica las características físico-químicas del mismo (R&B, penetración, viscosidad, densidad). Iterlow se puede usar de manera sencilla, ya que no hay necesidad de modificaciones en la planta y no conlleva la adición de agua a la mezcla. Fue usado por primera vez en 2002 en áreas de prueba alrededor de Europa, en capas de rodadura, intermedias y base, así como con la adición de RAP.

Los beneficios que trae el uso de este producto son los ya numerosos nombrados para otras tecnología WMA. Así pues, la disminución de la temperatura de producción en más de 40°C limita las emisiones de gases de efecto invernadero y reduce el consumo energético. Las características mecánicas de la mezcla resultante son las mismas que las de una mezcla realizada a temperaturas estándar.

## **2.6 Modificaciones a plantas de producción para WMA**

En este punto se expone las modificaciones a realizar en las plantas para la fabricación de WMA. Para que las WMA resulten prácticas y ventajosas, en general deben utilizar las infraestructuras existentes, por lo que se van a describir aquellas modificaciones que deben realizarse en las plantas de fabricación de mezclas convencionales para adaptarlas a la producción de las WMA [1].

### **2.6.1 Tecnología de adición de aditivos**

Muchas de las tecnologías de WMA se encuentran basadas en la adición de algún tipo de compuesto o producto, de modo que la viscosidad de la mezcla cambie para poder reducir así la temperatura de producción [15]. En la mayoría de los casos, estos paquetes provistos por los productores o fabricantes son una combinación de sustancias reductoras de la viscosidad y aditivos químicos para mejorar la adhesión y el recubrimiento de los áridos.



Existen numerosas maneras de introducir dichos aditivos en la mezcla. Por ejemplo, un caso común es la modificación del asfalto por parte del fabricante, resultando en el uso por parte de la planta de un asfalto listo para usar. Un segundo método consiste en el uso de algún tipo de tecnología de adición en la planta. El aditivo se vende a la planta de forma separada del asfalto y se mezcla conjuntamente con el resto de la mezcla en la misma. Dentro de esta última forma de adición, existen dos procesos: el método húmedo o el método seco.

La principal diferencia entre ambos es el sistema en el que se añade el aditivo en la planta. En el método húmedo, el aditivo se mezcla homogéneamente con el ligante y después se añade esta mezcla a los áridos en el tambor de mezclado. Por otro lado, en el método seco el aditivo se inyecta dentro de la línea de producción del asfalto justo antes o directamente en el tambor de mezclado, por lo que se mezcla con el resto de materiales una vez allí.

La elección de una tecnología concreta para añadir estos productos se debe realizar con vistas a conseguir la correcta calidad del producto. Dado que de modo general los aditivos suponen un porcentaje muy pequeño respecto del total de la masa de la mezcla, es importante que el mezclado se lleve a cabo de una manera homogénea. Si el tiempo de permanencia en el tambor de mezclado es relativamente corto, en algunos casos puede llevar a una insuficiencia en dicha homogeneidad, dando lugar a diferentes resultados insatisfactorios en el rendimiento de estas WMA. La modificación necesaria dependerá por tanto del tipo de planta del que se esté hablando, de la producción anual y de tecnologías de adición que ya se encuentren instaladas.

### **2.6.2 Equipos especiales para tecnologías de espumación**

La parte principal de las tecnologías de espumación es el sistema de adición de agua y/o el uso de las boquillas de espumación. La mayoría de los productores de



espuma de la tecnología WMA ofrecen su propio kit de producción que puede ser instalado en la planta de los contratistas. La boquilla espumante tiene que instalarse en línea con el sistema de adición de aglutinante. Tiene que ser apoyado por un sistema de suministro de agua (bomba de agua, tanque de depósito) y sistema de medición de agua. En algunos casos se necesita una cámara de expansión de asfalto. Los procesos de adición de agua se pueden controlar a través de una unidad de control desde el centro de operación de la planta. Se debe prestar especial atención a la posibilidad de cambiar entre los sistemas de producción de WMA y HMA. El mantenimiento de las boquillas es otra cuestión importante, ya que pueden requerir un tratamiento especial y/o limpieza entre los lotes o después de cada producción puede ser necesaria.

### 2.6.3 Equipos para la dosificación de aditivos

Aditivos líquidos: en la mayoría de los casos se necesita el uso de un vibrador, si es condición indispensable que el aditivo deba añadirse al tanque de asfalto. Los vibradores de bajo movimiento parecen ser adecuados. En otros casos puede necesitarse el uso de una bomba con medidor volumétrico preciso, de modo que se tenga una idea exacta de la cantidad de aditivo introducida en línea con el asfalto o incluso dentro del tanque de almacenamiento. Un ejemplo de la adición de Evotherm DAT se muestra en la Figura 14.

Figura N° 14. Bomba volumétrica y punto de inyección de Evotherm



Fuente: Warm-Mix Asphalt. European Practice [3]

Aditivos en forma granular o de pastilla: El equipo que originariamente se utilizara para la adición de fibras puede de manera general realizar las funciones de adición de los aditivos WMA, si es que puede accederse al mismo en la planta. Si no existe tal equipo, se pueden usar alimentadores neumáticos o tolvas como se ilustra en la Figura 15. En cualquier caso, el sistema de medición de la cantidad adicionada debe ser adecuado y preciso. Finalmente, la adición directa en la mezcladora de las plantas discontinuas es otra opción, si no se dispone de ningún mecanismo de apropiado.

**Figura N° 15. Ejemplo de tolva de peso (izquierda) y alimentador neumático (derecha) para introducir aditivos en forma granular o de pastilla**



Fuente: Warm-Mix Asphalt. European Practice [3]

#### **2.6.4 Tiempo de mezclado**

En algunos casos se ha notado [1], que el pequeño periodo de mezcla que se usa en las plantas para fabricar las mezclas convencionales puede resultar insuficiente para conseguir la anterior mencionada homogeneidad de los aditivos para WMA cuando estos se añaden directamente a la mezcladora. En estos casos puede que sea necesario cambiar el proceso de mezclado para prolongar el tiempo en la mezcladora. Esto puede reducir la productividad de la planta asfáltica y añadir costes al proceso de producción.

## 2.7 Diseño de WMA [23]

Uno de los problemas críticos que enfrenta WMA es la falta de un procedimiento formal de diseño de mezcla. Para la mayoría de los proyectos WMA construidos en los Estados Unidos, WMA ha sido sustituido por una mezcla diseñada como HMA sin cambios en la fórmula de mezcla de trabajo. Si la mezcla tibia reemplazaría la mezcla caliente en el futuro, debe establecerse un procedimiento de diseño de mezcla de laboratorio para WMA.

### 2.7.1 Diferencias entre el diseño de WMA y HMA

El diseño y análisis de HMA presenta generalmente de cinco pasos principales:

1. Selección de materiales
2. Diseño de la estructura del agregado
3. Diseño del contenido de asfalto
4. Evaluación de la sensibilidad a la humedad
5. Análisis de desempeño

Los criterios para los pasos 1 a 4 para HMA están contenidos en la Especificación estándar para el diseño de mezcla volumétrica Superpave, AASHTO M 323. La norma AASHTO R 35 - Práctica estándar para el diseño volumétrico Superpave para asfalto de mezcla en caliente (HMA), proporciona los procedimientos para los pasos 1 a 4.

Se necesitan varias modificaciones a los actuales procedimientos de diseño de mezclas HMA para abordar la amplia gama de procesos WMA actualmente disponibles y que probablemente estarán disponibles en el futuro. Éstas se resumen en la Tabla 6 y se muestran a continuación para las etapas principales en el proceso de diseño y análisis de la mezcla.

Tabla N° 6. Pasos de diseño de HMA y análisis de modificaciones para WMA.

PASOS	ITEM	CONSIDERACIONES ESPECIALES PARA WMA
1. Selección de materiales	Selección del asfalto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Potencialmente menor envejecimiento durante la mezcla y la construcción debido a temperaturas de producción más bajas.</li> <li>Efecto de cualquier aditivo y/o procesamiento de WMA sobre las propiedades del asfalto.</li> </ul>
	Propiedades de agregados	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ninguno.</li> </ul>
	Pavimentos asfálticos reciclados	<ul style="list-style-type: none"> <li>Efecto de la temperatura de producción en el grado de mezclado de asfaltos reciclados y nuevos.</li> <li>Efecto de cualquier aditivo y/o procesamiento de WMA en el grado de mezcla de asfaltos reciclados y nuevos.</li> </ul>
	Aditivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Selección de aditivos de mezcla tibia y su dosificación.</li> <li>Efecto de las temperaturas bajas de producción y de los aditivos de mezcla tibia sobre los aditivos anti-deslizantes.</li> </ul>
2. Diseño de la estructura del agregado	Tamaño máximo del agregado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ninguno.</li> </ul>
	Gradación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ninguno.</li> </ul>
	Dosificación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Proceso específico de WMA.</li> </ul>
	Mezclado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Proceso específico de WMA.</li> <li>Método para determinar apropiadamente la temperatura de mezclado.</li> <li>Método para evaluar la trabajabilidad de WMA.</li> </ul>
	Acondicionamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificar que el acondicionamiento a corto plazo según AASHTO R 30 se aplica a los procesos WMA.</li> </ul>
	Compactación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Método para determinar la temperatura de compactación de WMA.</li> <li>Verificación de niveles de compactación.</li> </ul>
	Análisis y criterios volumétricos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ninguno.</li> </ul>
	Preparación de especímenes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consultar las consideraciones anteriores para la dosificación, mezclado, acondicionamiento y compactación de laboratorio.</li> </ul>

PASOS	ITEM	CONSIDERACIONES ESPECIALES PARA WMA
3. Diseño del contenido de asfalto	Análisis y criterios volumétricos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ninguno.</li> </ul>
4. Evaluación de la sensibilidad a la humedad	Preparación de especímenes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consultar las consideraciones anteriores para la dosificación, mezclado, acondicionamiento y compactación de laboratorio.</li> </ul>
	Ensayos y análisis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ninguno.</li> </ul>
5. Análisis de desempeño	Preparación de especímenes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consultar las consideraciones anteriores para la dosificación, mezclado, acondicionamiento y compactación de laboratorio.</li> </ul>
	Ensayos y análisis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ninguno.</li> </ul>

Fuente: *Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*, (NCHRP) [36]

Con base en las diferencias mencionadas hay algunas consideraciones sobre los procedimientos de diseño de WMA que deben tenerse en cuenta para asegurar un rendimiento igual o mejor que el asfalto de mezcla en caliente (HMA), las cuales se mencionan en este apartado.

### 2.7.2 Métodos de diseño de mezclas tradicionales

Los procedimientos de diseño de mezclas tradicionales para HMA sirven también para WMA, por lo que se dará una breve descripción de los dos métodos más comúnmente utilizados, el método Marshall y Superpave.

Muchos experimentos con WMA se llevan a cabo en EE.UU. y hay un gran número de informes disponibles de la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos y de los Departamentos de Transporte en diferentes estados, donde se pueden encontrar los conceptos de diseño que se utilizan por el método de SUPERPAVE (SUPERior PERforming asphalt PAVement). Dado que este sistema de diseño de mezcla no es comúnmente utilizado en nuestro medio, se revisarán



las partes relevantes del método de diseño de mezcla Superpave para describir los principios de ensayo y diseño que se mencionan en esta tesis.

### 2.7.3 Método SUPERPAVE

Debido que existen referencias al sistema Superpave, y concretamente a la especificación del ligante y al método de compactación, en esta tesis se expondrán los principios básicos de estas partes del diseño de mezcla. Para el presente trabajo de investigación se ha aplicado el sistema Superpave solamente a los principios de elección y especificaciones de los agregados minerales utilizados según se muestra en el numeral 6.2 del presente documento. La siguiente descripción es un resumen del manual de diseño de Superpave mix de Asphalt Institute [24].

#### Asfalto

El método de diseño de mezcla Superpave integra la selección de materiales y los procedimientos de diseño de mezcla basados en el clima del proyecto y el tráfico de diseño. Una característica única de la especificación Superpave para el ligante es que en lugar de realizar una prueba a temperatura constante y variar el valor especificado, el valor especificado es constante y se varía la temperatura del ensayo. Los grados de rendimiento (PG) se definen por el grado de temperatura alta y baja. Como ejemplo, para un asfalto PG 64-22 significa que sus propiedades físicas están adecuadas de +64°C a -22°C. Esto corresponde a la temperatura del pavimento en el clima en el que se espera que el aglutinante sirva. Los ensayos se pueden realizar en tres diferentes condiciones de asfalto:

- Original
- Después de la prueba de horno de película delgada (RTFOT), que simula el envejecimiento inicial en el proceso de producción y pavimentación,
- Después de la prueba del Vaso a Presión (PAV) que simula el endurecimiento a largo plazo del asfalto en pavimento asfáltico.

El equipo utilizado para determinar las propiedades del aglutinante se muestra en la tabla a continuación.

**Tabla N° 7. Equipo para evaluación del asfalto.**

<b>EQUIPAMIENTO</b>	<b>PROPOSITO</b>
Horno de película delgada (RTFO)	Simula el endurecimiento por oxidación que ocurre durante el mezclado en caliente y la colocación.
Equipo de envejecimiento a presión (PAV)	Simula el envejecimiento que sufre el ligante después de varios años de servicio en un pavimento.
Reómetro de corte dinámico (DSR)	Se emplea para caracterizar las propiedades visco-elásticas del ligante.
Viscosímetro rotacional (VR)	Mide la consistencia del ligante a diferentes temperaturas.
Reómetro de flexión (BBR)	Se emplea para caracterizar las propiedades del ligante a bajas temperaturas.
Ensayo de tensión directa (DTT)	Mide la deformación específica de falla (rotura) en tracción.

Fuente: Superpave Mixture Design Guide [24].

## Compactación

Una de las características en el diseño de la mezcla Superpave es el uso de compactador giratorio. Aunque su propósito principal es compactar muestras de prueba, el compactador giratorio puede proporcionar información sobre la compactabilidad de la mezcla particular midiendo los datos durante la compactación.

## 2.8 Consideraciones para el diseño de WMA

### 2.8.1 Aditivos



La cantidad de aditivos utilizados para la producción de WMA debe ser considerada en cada caso específico. Las tasas de adición son generalmente recomendadas por el proveedor, pero pueden variar dependiendo de las circunstancias.

No obstante debe aplicarse un procedimiento que asegure que la dosificación recomendada es la apropiada para la mezcla. Es ese sentido, es que se expone a continuación un procedimiento que permite determinar la dosis de aditivo óptima para la preparación de una mezcla tibia.

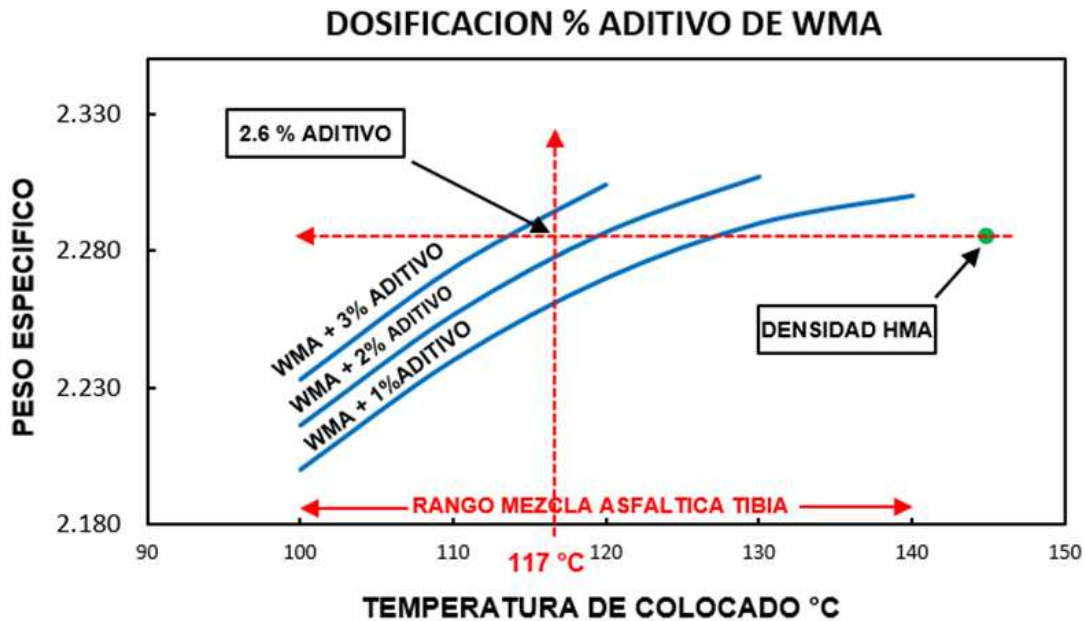
En principio es importante tener en cuenta la clasificación señalada en el acápite 2.4.1 donde se expuso los diferentes rangos de reducción de temperatura por cada tipo de mezclas que se producen, situando a las mezclas tibias en el rango de 100 a 140°C.

Para determinar la dosis óptima de aditivo se debe fijar la temperatura de colocado que debe alcanzar una mezcla tibia, para luego calcular el porcentaje de aditivo necesario para llegar a dicha temperatura, una variable a determinar es la densidad de una mezcla caliente de referencia.

A partir de la definición de la temperatura de colocado, se debe elaborar briquetas de mezcla tibia a diferentes temperaturas de compactación (100, 110, 120, 130 y 140 °C), cada serie de briquetas será preparada con un porcentaje diferente de aditivo (1, 2 y 3%) o según lo recomendado por el fabricante.

Con cada serie se puede determinar una curva para cada porcentaje de aditivo comparando la densidad de compactación obtenida con la temperatura de colocado, tal como se muestra en el siguiente gráfico.

Gráfico N° 3. Gráfico de Temperatura de Colocado de Mezcla Tibia Vs. Peso Específico



Fuente: Elaboración Propia

Por ejemplo, en el caso que se quiera preparar una mezcla tibia a una temperatura de colocado de 117°C, se elaboraron tres series de briquetas compactadas a diferentes temperaturas y variando el porcentaje de aditivo en cada una (1, 2 y 3%). A partir de la densidad de compactación alcanzada para una mezcla en caliente se determina que el porcentaje de aditivo óptimo es de 2.6%.

El procedimiento antes descrito está respaldado por las investigaciones señaladas en el acápite 2.8.3. para la determinación de la temperatura de compactación [26].

### 2.8.2 Ensayos de laboratorio

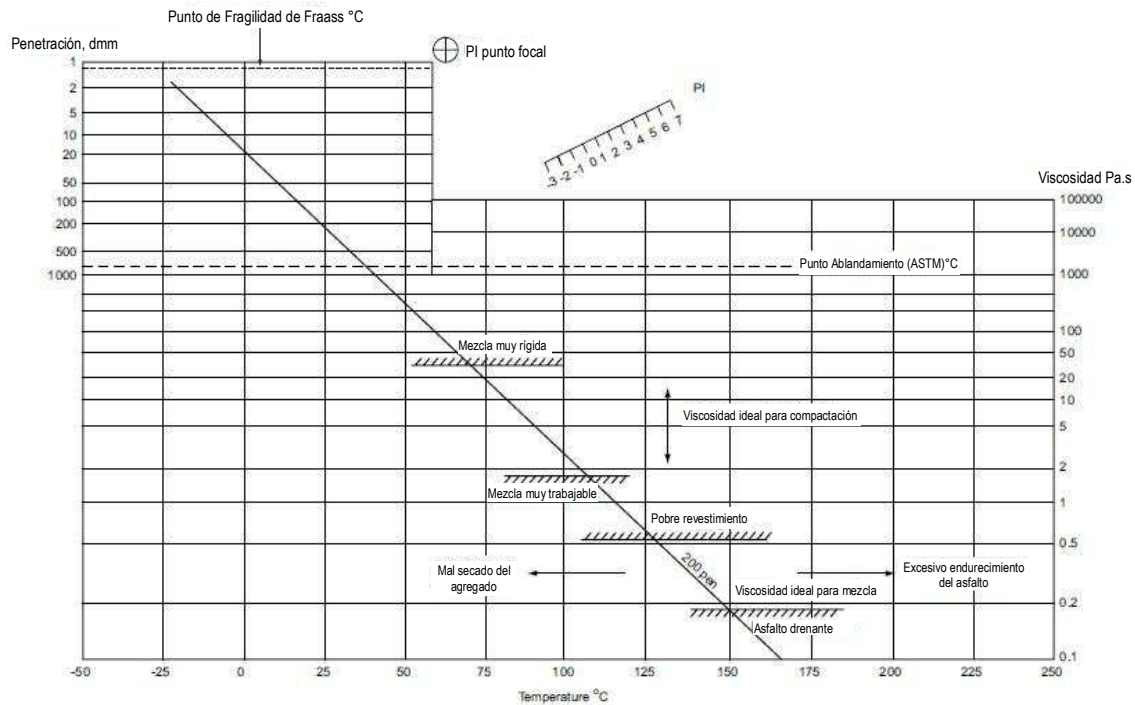
La mayoría de los laboratorios que han trabajado con mezclas calientes están familiarizados con los procesos a seguir a la hora de analizar las mezclas asfálticas tibias, y cómo interpretar los resultados que se obtienen a partir de ellos. Por este motivo, los análisis rutinarios de las WMA deberían incluir aquellos usados en el análisis rutinario de las HMA (propiedades volumétricas, módulos de rigidez, ensayo

de rodadura, sensibilidad al agua, proporción de filler) y en las mismas condiciones de análisis. De manera similar, un análisis completo de WMA debería incluir aquellos ensayos que de forma usual se realizan a los especímenes de las mezclas calientes.

La información anteriormente comentada puede usarse para el caso de las tecnologías basadas en aditivos químicos u orgánicos. Sin embargo, en los productos basados en procesos de espumación el ensayo en laboratorio no es tan simple. Para los productos del método directo no existen trabajos de laboratorio que se hayan publicado, únicamente investigaciones llevadas a cabo por las propias empresas encargadas del desarrollo de los mismos. En el caso de las tecnologías del método indirecto, se debe prestar especial atención de modo que se puedan reproducir las condiciones adecuadas de la manera más cercana posible [1].

### **2.8.3 Temperatura de producción y compactación**

La relación temperatura-viscosidad para el ligante es importante para determinar rangos de temperatura apropiados para el mezclado y compactación de mezclas bituminosas. Debe seguirse una viscosidad óptima del asfalto para mezclar y compactar para recubrir completamente los agregados y mantener una buena trabajabilidad. La gama de temperaturas apropiadas de mezcla y compactación puede determinarse a partir de la línea de viscosidad en relación con la temperatura en el Gráfico de Datos de Ensayos de Asfalto (BTDC). Para un recubrimiento satisfactorio durante la mezcla, la viscosidad debe ser de aproximadamente 0,2 Pa.s y para compactación la viscosidad óptima está entre 2-20 Pa.s [25]. Un ejemplo para determinar la temperatura de mezcla y de pavimentación se ilustra en el gráfico de BTDC.

**Gráfico N° 3. BTDC para determinar temperatura óptima de mezcla y compactación**

Fuente: The Shell Bitumen Handbook. Sixth edition [25]

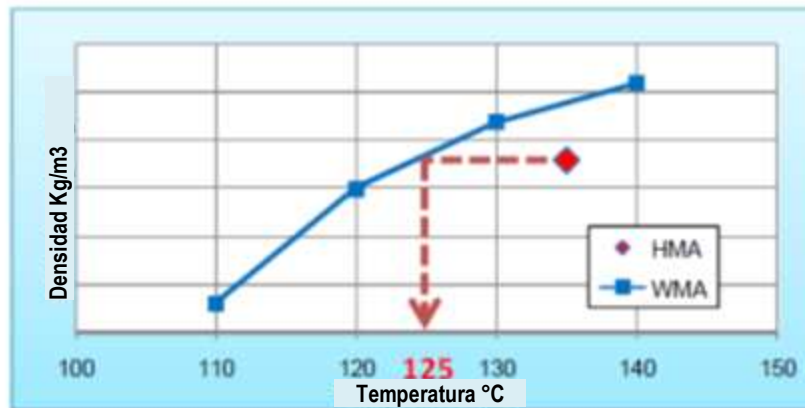
El BTDC se desarrolló para asfaltos no modificados por lo tanto este método no puede ser utilizado para aditivos de WMA. Muchas de las tecnologías WMA dependen no sólo de la reducción de la viscosidad, sino también de la interacción bitumen-agregado, de modo que la evaluación directa de la temperatura de producción y de pavimentación puede requerir diferentes métodos.

Otra forma correcta para determinar la temperatura de compactación es comparando la densidad aparente de WMA con la mezcla de HMA de referencia. De este modo la temperatura a la que ambas densidades son iguales puede establecerse de manera clara.

Este proceso se encuentra descrito por la Asociación de Pavimentos Asfálticos de Alemania (German Asphalt Pavement Association) [26], que lo describe como sigue: *“La composición óptima de la mezcla asfáltica y la densidad de referencia a las temperaturas de compactación de 135°C y 145°C se determinan llevando a cabo un*

*ensayo de referencia sin el aditivo WMA. Se deben fabricar muestras de mezclas tibias con productos WMA a diferentes temperaturas de compactación (ej: 110, 120, 130, 140 y 150 °C) de manera que podamos determinar la temperatura adecuada de compactación de la mezcla". Por lo tanto, se puede definir la temperatura de compactación correcta para obtener densidades similares. Esto se ilustra en el siguiente gráfico.*

**Gráfico N° 4. Ejemplo para determinar la temperatura de compactación por densidades**



Fuente: Warm mix asphalts. Asphalt. Deutscher Asphaltverband [26]

Las propiedades de rigidez del asfalto cambian después del proceso de producción. El cambio depende de la composición de la mezcla, el tipo de planta, tiempo de mezcla, pero sobre todo en la temperatura de producción. Dado que hay diferencias significativas en la temperatura de mezcla entre WMA y HMA, puede indicar la necesidad de elegir un grado de aglutinante (PG) diferente para la producción de WMA para reducir la posibilidad de deformaciones permanentes en el asfalto.

Directrices para la elección de la rigidez del ligante para el WMA ya se han desarrollado en el estado de Montana, EE.UU. y se informa en [27]. Dependen de la temperatura de producción de WMA para el grado de rendimiento (PG) de asfalto en el clima respectivo. Los resultados se basan en una serie de experimentos de laboratorio y se verificaron con asfaltos de dos proyectos. Los resultados de esta investigación se incluyen y son una indicación sobre el posible campo de investigación en Europa, pero como hay grandes diferencias entre los métodos de



diseño de mezcla de Europa y Estados Unidos, estas directrices deben tomarse como una referencia. El método presentado en la investigación puede requerir algún conocimiento adicional del método de diseño de la mezcla SUPERPAVE y del sistema de clasificación del asfalto PG, que se discute en la sección 7.1.1 Superpave.

Trabajos de investigación se realizaron en Montana, EE.UU. para la elección de la rigidez del ligante para el WMA, los ligantes de esta investigación se sometieron a un envejecimiento a corto plazo mediante el uso de horno de película delgada (RTFOT) a diferentes temperaturas que representan la temperatura de mezclado en la planta. Después se determinó el grado de desempeño del ligante luego del envejecimiento. El estudio mostró una disminución lineal en el grado de desempeño de la temperatura alta del ligante, con disminución de la temperatura de envejecimiento con diferentes pendientes para diferentes aglutinantes. Utilizando esta relación y las temperaturas típicas de producción de mezcla para HMA, se desarrolló una tabla que muestra la relación entre la temperatura de producción, el índice de envejecimiento del aglutinante y el grado de temperatura alta de PG. Usando este decremento, se pueden determinar temperaturas de producción por debajo de las cuales el grado de aglutinante a alta temperatura debe ser incrementado un nivel por encima del normalmente usado para HMA. Debe determinarse el índice de envejecimiento después de RTFOT en la temperatura de mezcla de WMA planificada. Si las temperaturas de mezcla propuestas son inferiores a las de la Tabla, el PG de alta temperatura debe ser incrementado un nivel por encima del normalmente utilizado para HMA.



**Tabla N° 8: Temperaturas mínimas de producción de WMA que no requieren un aumento de grado PG de alta temperatura**

Grado PG Temperatura Alta	Índice de Envejecimiento											
	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6
	Mínima Temperatura de Mezclado de WMA Sin Requerir Incremento del Grado PG (°F)											
52	170	190	200	205	210	215	220	220	225	225	230	230
58	185	205	215	220	225	230	235	235	240	240	245	245
64	190	210	220	230	235	235	240	245	245	250	250	250
67	200	220	230	235	240	245	250	255	255	255	260	260
70	200	220	230	240	245	245	250	255	255	260	260	260
76	210	225	235	245	250	255	260	260	265	265	265	270
82	215	235	245	250	255	260	265	265	270	270	275	275

Fuente: Warm Mix Asphalt Paving Strategies for use in Montana Highway Construction [27]

#### 2.8.4 Selección del asfalto

El menor envejecimiento del ligante puede considerarse como una ventaja de las mezclas semicalientes (dado que puede traducirse en una mayor vida útil del pavimento); sin embargo, también puede convertirse en un impacto negativo, ya que puede llevar a deformaciones permanentes (ahuellamiento) en las etapas iniciales de uso. A pesar de ello, no se debería de manera arbitraria usar un ligante para las WMA de distinta gradación que el usado para las mezclas convencionales. Es más, Romier et al. (2006) estableció que en las mezclas usando el método Low Energy Asphalt incorporaban el mismo ligante que las HMA, en la misma proporción y con la misma dureza, lo cual es de modo general cierto para otros productos de este tipo de mezclas [8].

#### 2.8.5 Contenido de asfalto

Según los productores, no hay instrucciones para cambiar la cantidad de bitumen para las tecnologías WMA. Sin embargo, hay indicios indirectos que pueden influir en la cantidad de asfalto en la mezcla:

- Dada la menor temperatura de mezclado de las WMA, se produce una menor absorción de ligante por parte de los áridos [8], lo cual hace indicar que se necesita menor cantidad de asfalto.
- Ya que se produce una mejora de la compactabilidad en comparación con las mezclas convencionales, existe un menor número de huecos en la WMA, lo que hace indicar que el contenido óptimo de asfalto en la mezcla debe ser menor [8].

Sin embargo, hasta ahora, la mayoría de los investigadores recomiendan utilizar el contenido óptimo de asfalto que se determinó para HMA. Esto se debe a las preocupaciones de que si la cantidad se reduce, puede conducir a problemas de durabilidad, permeabilidad y susceptibilidad al agua de la mezcla de pavimento resultante.



---

## CAPITULO III

### 3. ASFALTO

En este capítulo se tratará el asfalto, sus propiedades y su relevancia para la producción de WMA. Sólo se explicaran las propiedades que influyen en la producción o evaluación de mezclas de WMA. Se considerarán los métodos de ensayo utilizados para la evaluación del asfalto mediante la norma estadounidense ASTM (American Society for Testing and Materials), en términos teóricos, se propondrán los posibles ajustes de los métodos de ensayo para permitir una caracterización más precisa del asfalto que ha sido modificado para la producción de WMA.

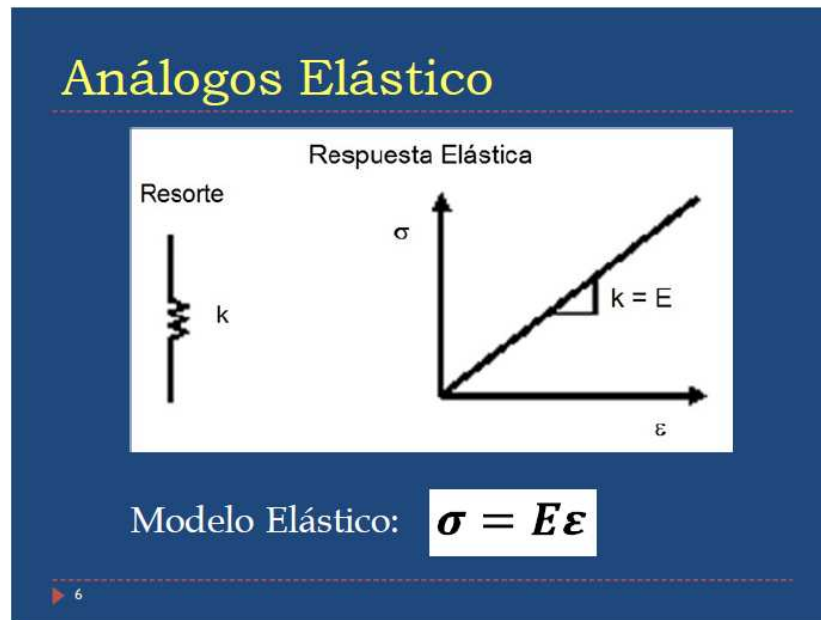
#### 3.1 Propiedades del asfalto

El asfalto es un material complejo y su respuesta a los esfuerzos depende tanto de la temperatura como del tiempo de carga. A altas temperaturas o a largos tiempos de carga, los asfaltos se comportan como líquidos viscosos mientras que a temperaturas muy bajas o tiempos de carga cortos se comportan como sólidos elásticos. Las condiciones más típicas en servicio dan lugar a un comportamiento viscoelástico [28].

Esta forma de comportamiento del material claramente permite establecer un tipo elástico y otro viscoso, en el comportamiento elástico al aplicar una carga el material se deforma y tiende a recuperar su estado original, en el comportamiento viscoso no existe recuperación de la deformación.

Realizando una analogía de un comportamiento elástico se puede considerar un resorte de constante  $K$ , cuyo modelo elástico está definido como se muestra en la siguiente figura.

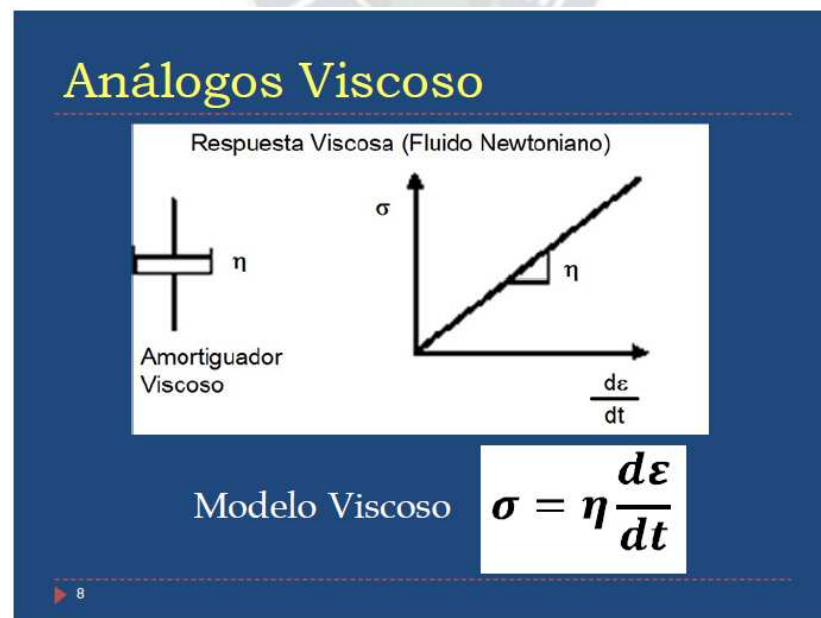
Figura N° 16. Modelo de comportamiento elástico



Fuente: Nociones de Viscoelasticidad Lineal [28]

De la misma forma se puede establecer un modelo para el comportamiento viscoso, tomando en cuenta un amortiguador y un fluido newtoniano, tal como se muestra en la siguiente figura.

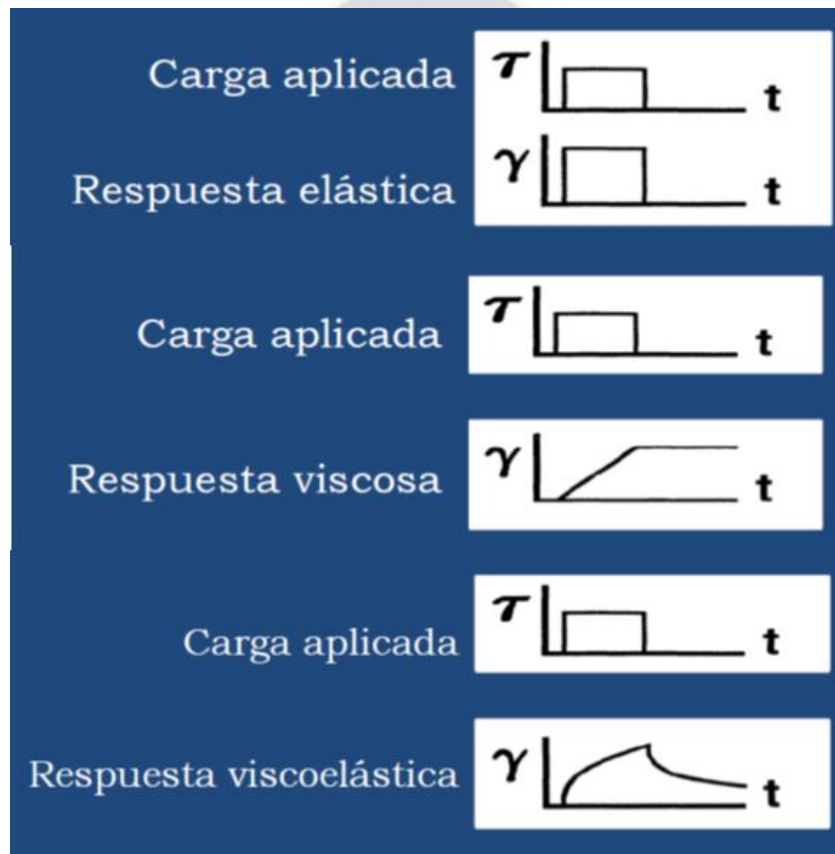
Figura N° 17. Modelo de comportamiento viscoso



Fuente: Nociones de Viscoelasticidad Lineal [28]

La respuesta que en ambos casos se presenta en la aplicación de cargas durante el tiempo es diferente para cada modelo, siendo que en el modelo elástico el material recupera su estado al finalizar la aplicación de la carga, mientras que en el modelo viscoso el material mantiene su deformación al finalizar la aplicación de la carga. Para poder comprender el comportamiento de un material viscoelástico se pueden superponer los modelos y obtener la combinación, tal como se muestra en la siguiente figura.

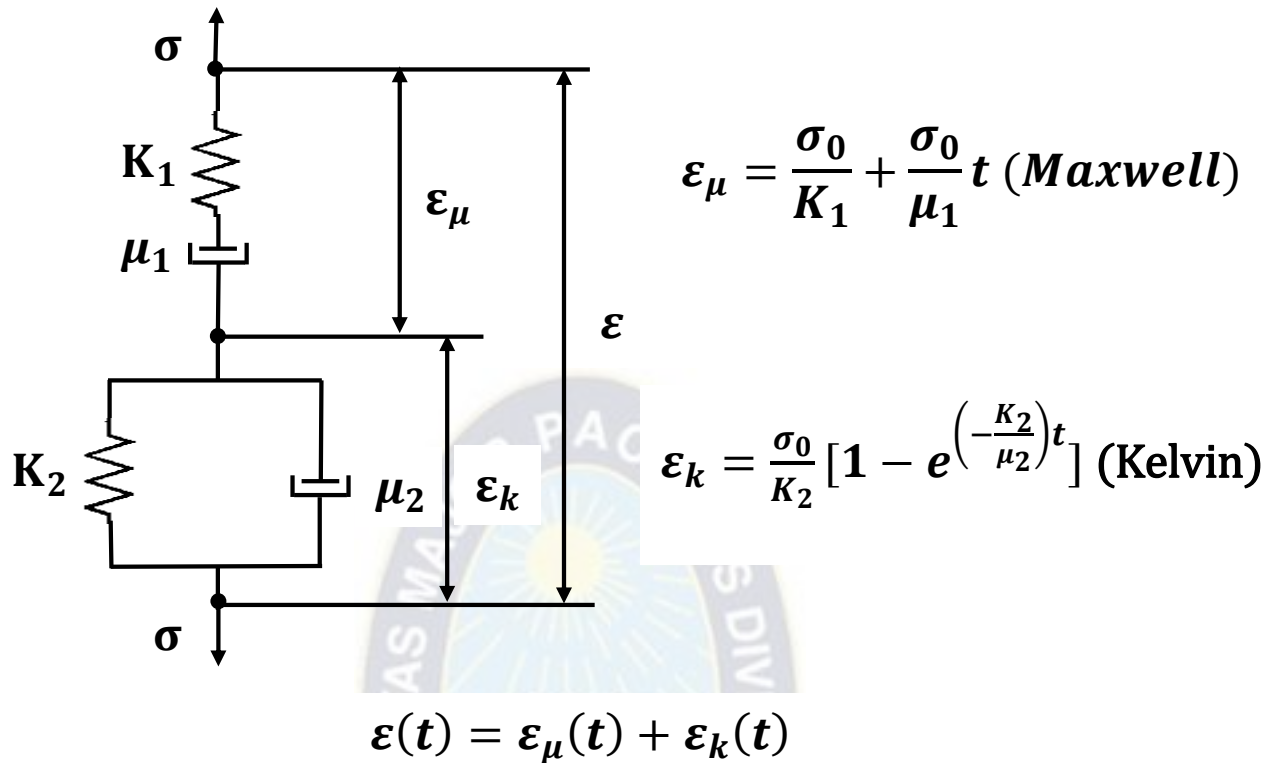
Figura N° 18. Modelo de respuesta viscoelástica



Fuente: Nociones de Viscoelasticidad Lineal [28]

A partir de dichos modelos investigadores como Maxwell y Kelvin desarrollaron modelos matemáticos para describir la respuesta de los materiales viscoelásticos a la aplicación de cargas. Fue Burguer quien finalmente logró establecer dicho modelo el cual se muestra a continuación.

Figura N° 19. Modelo de Burguer [28]



Fuente: Nociones de Viscoelasticidad Lineal [28]

Donde:

K= cte. del resorte

 $\mu$ = coeficiente viscosidad $\epsilon$ = deformación $\sigma$ = tensión

Por lo indicado es de vital importancia contar con sólidos conocimientos sobre las propiedades del asfalto y su influencia en el comportamiento viscoelástico del aglutinante para determinar la temperatura de producción y de pavimentación adecuada y predecir el comportamiento de los asfaltos para la vida útil prolongada. Por lo tanto, se expondrá a continuación una breve descripción de los métodos de ensayo de asfalto y su relación con la evaluación y/o el diseño de mezclas de WMA.

### 3.2 Metodología para evaluar las propiedades del asfalto

Las especificaciones de las características del asfalto se basan en los métodos de pruebas tradicionales que fueron inventados principalmente en la primera mitad del



siglo 20 y con sólo algunas modificaciones todavía se utilizan hoy en día. Como resultado, pueden surgir problemas en la evaluación del rendimiento de los asfaltos "modernos" que han sido modificados con diferentes aditivos, tal como lo es con la mayoría donde se utiliza las tecnologías WMA.

Aunque se están realizando trabajos de investigación para desarrollar métodos de ensayo más directamente relacionados con el rendimiento del asfalto, las especificaciones para los aglomerantes de pavimentación de hoy en día se basan en métodos de ensayo empíricos tradicionales. Los requisitos para las propiedades del ligante se especifican por su penetración y su viscosidad.

En Estados Unidos, la clasificación de la carpeta del sistema de diseño de mezcla SUPERPAVE (SUPERior PERforming Asphalt PAVement) está más directamente relacionada con el rendimiento. Los métodos de ensayo en este sistema permiten una determinación más directa de las propiedades del asfalto y la predicción de su rendimiento en determinadas condiciones climáticas. Por lo tanto, puede ser más preciso explicar el comportamiento de los asfaltos modificados con WMA para su uso con el sistema de diseño de mezcla SUPERPAVE y predecir el comportamiento potencial en condiciones in situ. Sin embargo, en nuestro medio todavía no se cuenta con laboratorios equipados para realizar un análisis de asfaltos y diseño de mezclas por este método, por lo que el alcance del presente trabajo se limita a ensayos empíricos tradicionales.

### **3.2.1 Pruebas mecánicas**

Este trabajo se concentrará en las propiedades generales y más comunes de los asfaltos y en aquellas que tienen una influencia directa en la producción y características de las WMA. Para propósitos de ingeniería y construcción, son importantes cinco propiedades o características del asfalto:

- a) Seguridad,
- b) Pureza,

- c) Consistencia a temperaturas intermedias y altas,
- d) Consistencia a bajas temperaturas,
- e) Resistencia al endurecimiento.

La seguridad y pureza no serán discutidas ya que no son relevantes para el tema de esta tesis.

### **3.2.2 Consistencia a temperaturas intermedias y altas**

El asfalto es un material termoplástico, lo que significa que se licúa cuando se calienta y se solidifica cuando se enfría. Los asfaltos se caracterizan por su capacidad para fluir a diferentes temperaturas. Por lo tanto, es necesario clasificar la temperatura equivalente al comparar las características de consistencia de temperatura de un asfalto con otro [29].

La consistencia a temperaturas intermedias se determina como penetración a 25°C (ASTM D5), y la consistencia a altas temperaturas se establece en el punto de ablandamiento (ASTM D36) y viscosidad (ASTM D4402).

#### **3.2.2.1 Viscosidad**

##### **Método de prueba**

Mediante este método se puede medir la viscosidad aparente del asfalto a temperaturas desde 60 a 200°C, usando un Viscosímetro Rotacional equipado con el sistema Thermosel.

Los valores medidos mediante este procedimiento se pueden utilizar para desarrollar diagramas temperatura-viscosidad, los que se utilizan para estimar las temperaturas de mezclado y compactación a utilizar durante el diseño de las mezclas asfálticas.

El Viscosímetro Rotacional (RW) caracteriza la rigidez del asfalto a 135°C, temperatura a la cual actúa casi enteramente como un fluido. Consiste de un cilindro rotacional coaxial, que mide la viscosidad por medio del torque requerido para rotar un eje (spindle), sumergido en una muestra de asfalto caliente (Figura 20), a una

velocidad constante. La especificación de ligantes requiere una viscosidad menor de 3 Pa\*s.

**Figura N° 20. Viscosímetro Rotacional**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Universidad Técnica de Oruro (UTO)

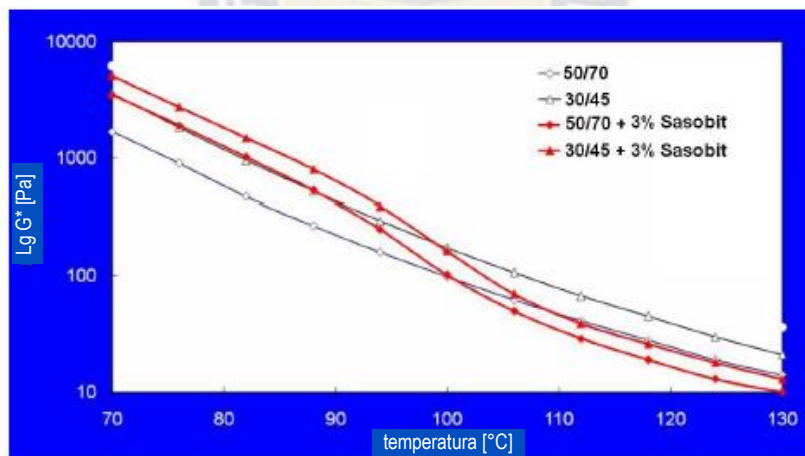
### **Pertinencia para WMA**

El cambio de viscosidad (reducción a altas temperaturas y para algunos aditivos el incremento a bajas temperaturas) del asfalto es el principio fundamental que hace posible producir asfalto a temperaturas más bajas, con suficiente recubrimiento del agregado y sin pérdida de trabajabilidad en la temperatura de pavimentación. La relación temperatura-viscosidad para el aglutinante es importante para determinar rangos de temperatura apropiados para el mezclado y compactación de mezclas bituminosas.

### **Ajuste del método de ensayo**

Debido a que la temperatura de mezclado y pavimentación es significativamente menor y el comportamiento de consistencia es diferente, algunos problemas pueden ocurrir con la interpretación correcta de las pruebas de viscosidad del asfalto. Las tecnologías WMA que implican modificaciones del asfalto con aditivos (aditivos orgánicos y algunos aditivos químicos) están diseñadas para reducir la viscosidad del asfalto después de su punto de fusión, lo que permite reducir la temperatura de mezcla y compactación. En cuanto a la temperatura en servicio, a través de la cristalización de las ceras, los aditivos orgánicos tienden a aumentar la viscosidad y la rigidez del aglutinante. Esto significa que para los asfaltos modificados orgánicamente, no existe una conexión lineal entre la viscosidad y la temperatura en la tabla de datos de prueba de asfalto como ocurre con los asfaltos normales de grado de penetración. Durante los experimentos efectuados en Alemania [6] se determinaron los cambios de viscosidad para asfaltos 50/70 y 30/45 con el aditivo Sasobit, cuyos resultados se ilustran en el Gráfico 5.

Gráfico N° 5. Relación temperatura-viscosidad para asfaltos modificados con aditivo orgánico

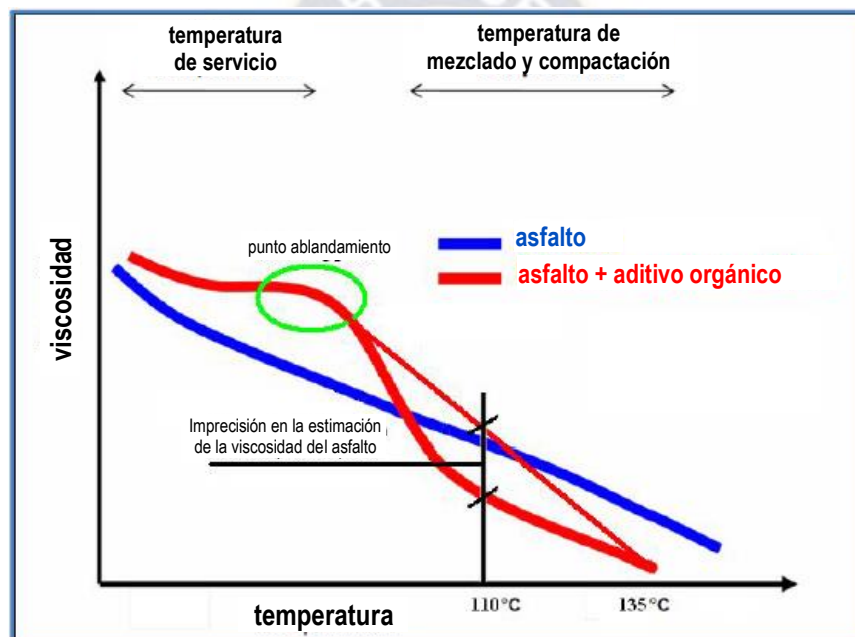


Fuente: Experience with Warm Mix Asphalt in Germany [37]

Se puede observar que la evaluación a una temperatura de 135°C e interpolar los resultados para temperaturas adecuadas para mezclas de WMA puede ser engañosa para determinar el intervalo de viscosidad correcto para compactación y pavimentación y puede requerir un enfoque diferente para evaluar la consistencia a alta temperatura del asfalto. Para obtener resultados más fiables, al menos para la

evaluación inicial, el ensayo de viscosidad podría realizarse tanto a una temperatura usual de 135°C como a una temperatura alrededor de 110°C, ya que esta temperatura sigue por encima del punto de fusión de los aditivos WMA y serviría como representación de la viscosidad del asfalto a la temperatura de trabajo. La determinación de la viscosidad a dos temperaturas permitiría establecer con mayor precisión el cambio de consistencia del asfalto y estimar la temperatura de mezcla y compactación para WMA. La ventaja de la determinación de la viscosidad a dos temperaturas se ilustra esquemáticamente en la Figura 21.

Figura N° 21. Ventaja de la determinación de la consistencia a 110°C



Fuente: Experience with Warm Mix Asphalt in Germany [37]

### 3.2.2.2 Penetración

#### Método de prueba

Se permite que una aguja de dimensiones especificadas penetre en una muestra de asfalto bajo una carga conocida (100 g), a una temperatura fija de 25°C, durante 5 segundos. La penetración se define como la distancia recorrida por la aguja en el asfalto declarado en décimas de milímetro (1/10 mm).

#### Ajuste del método de ensayo

Para una caracterización más precisa del asfalto a temperaturas intermedias y para calcular la susceptibilidad a la temperatura (índice de penetración), puede ser necesario realizar la prueba de penetración a dos temperaturas. Uno a 25°C convencional y el otro a una temperatura más baja, por ejemplo 15°C.

### **3.2.2.3 Punto de ablandamiento**

#### **Método de prueba**

Se coloca una bola de acero de 3,5 g sobre una muestra de asfalto contenida en un anillo de latón y se suspende en agua o glicerina. La temperatura del baño se eleva 5°C por minuto y la temperatura del baño se registra cuando la bola cae a través del asfalto reblandecido y alcanza 25 mm por debajo del anillo.

#### **Ajuste del método de ensayo**

No se considera ningún ajuste al método de ensayo descrito en la norma ASTM D36.

### **3.2.3 Consistencia a bajas temperaturas**

#### **3.2.3.1 Punto de fragilidad de Frass**

#### **Método de prueba**

Una placa de acero de 41x20 mm revestida con 0,5 mm de asfalto se flexiona lentamente y se libera. La temperatura de la placa se reduce a 1°C por minuto hasta que el asfalto alcanza una rigidez crítica y se agrieta. Los resultados se registran como la temperatura en la que se agrieta la muestra.

#### **Pertinencia para WMA**

La consistencia a baja temperatura es un problema de implementación de WMA en países con clima frío de invierno. Los experimentos han demostrado un comportamiento de baja temperatura más pobre (mayor fragilidad) de la tecnología orgánica WMA, debido a la cristalización de las ceras [30]. Esto se debe tener en cuenta al elegir la tecnología WMA y la cantidad de aditivos en la mezcla.



### 3.2.4 Resistencia al endurecimiento

#### 3.2.4.1 Película delgada (RTFO)

##### Método de prueba

El ensayo de película delgada es un procedimiento que somete a la muestra de asfalto a condiciones de endurecimiento que se aproximan a aquellas que ocurren normalmente en las operaciones de mezcla en planta.

El ensayo se ejecuta colocando 50 g de cemento asfáltico en un platillo de 140 mm de diámetro y 10 mm de profundidad. La capa de asfalto es de aproximadamente 3 mm de espesor. La muestra y el recipiente se colocan en un horno ventilado a 163°C sobre un eje que gira aproximadamente a 5 a 6 revoluciones por minuto, durante 5 h. Luego la muestra se coloca en recipientes normalizados para efectuar los ensayos de penetración y ductilidad.

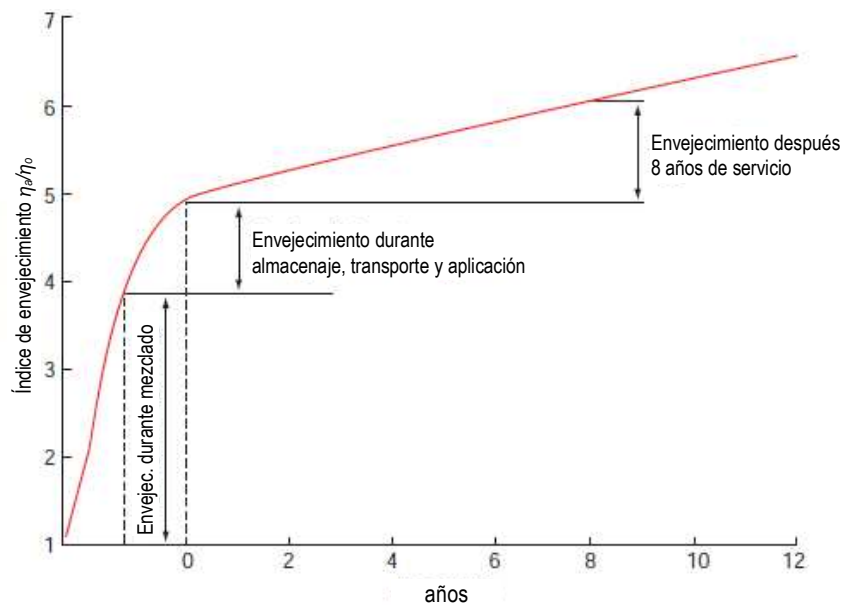
##### Pertinencia para WMA

Se reconoce que si bien las propiedades físicas de los asfaltos pueden ser las mismas inicialmente, cuando son influenciadas por diferentes factores externos (presencia de oxígeno, radiación ultravioleta y por cambios en la temperatura) pueden dar lugar a un rendimiento diferente [29]. El comportamiento del endurecimiento del asfalto puede clasificarse como envejecimiento a corto y largo plazo:

- Endurecimiento a corto plazo que se produce durante el proceso de mezclado en caliente y posterior colocación en la carretera (simulada con métodos RTFOT y TFOT en laboratorio).
- Endurecimiento a largo plazo del asfalto en la carretera debido al suministro constante de aire fresco, influencia de altas temperaturas y fotooxidación del asfalto por radiación ultravioleta. En laboratorio es simulado con el método del Vaso de Envejecimiento por Presión (PAV).

Un ejemplo de procesos de envejecimiento durante el ciclo de vida de la mezcla bituminosa se ilustra en la Gráfico 6.

Gráfico N° 6. Envejecimiento del asfalto [31]



Fuente: The Shell Bitumen Handbook [25]

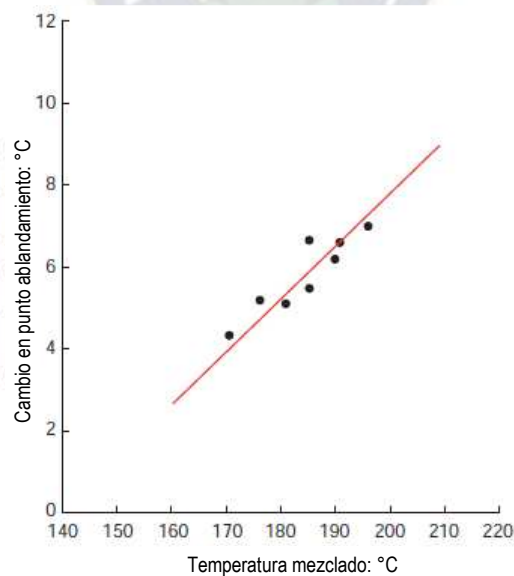
### Envejecimiento a corto plazo

Como puede verse en la Gráfico 6, la mayor parte del envejecimiento del asfalto se produce durante la mezcla con agregados, transporte y los procesos de colocado. Esto es causado por la pérdida de fracciones volátiles en la oxidación que se produce excesivamente en el mezclado del asfalto debido al ligante esparcido en películas delgadas. Sin embargo, la cantidad de endurecimiento depende de numerosos factores, siendo los más importantes la duración de la mezcla, el espesor de la capa y la temperatura. Por supuesto, la reducción de la temperatura es el objetivo principal de la producción de WMA, pero otros factores dependiendo de la tecnología utilizada pueden influir también en el proceso de producción de la WMA. Por ejemplo, puede ser necesario un tiempo de mezcla prolongado para algunos productos para asegurar una distribución homogénea del aditivo. El grosor de la capa puede verse afectado por la necesidad de reducir el contenido de asfalto.

No obstante, el principal factor que influye en el envejecimiento a corto plazo de la WMA es la temperatura de mezclado. Suponiendo que no hay diferencias considerables entre HMA y WMA en el diseño de la mezcla (por consiguiente

espesor de la capa del asfalto) y el tiempo de mezclado en el molino, la reducción de la temperatura de mezcla es el factor principal que influye en el endurecimiento del asfalto. Cuanto mayor es la temperatura de mezcla, mayor es la tendencia a oxidarse del asfalto expuesto en películas finas sobre la superficie del agregado. En el Gráfico 7 se muestra claramente que esto es un aspecto muy importante y la reducción de la temperatura de mezclado afecta en gran medida al punto de ablandamiento. Por lo tanto, la reducción de la producción y la temperatura de pavimentación para WMA pueden causar cambios considerables en las propiedades de endurecimiento del asfalto en el proceso de producción. Para un rendimiento a largo plazo en el campo, la opinión general es que un menor envejecimiento durante la producción y el proceso de pavimentación tiende a mejorar la flexibilidad de los pavimentos, lo que reduce la susceptibilidad a la fatiga y el agrietamiento por temperatura que resulta en la mejora de la longevidad de los pavimentos. Sin embargo, esto también puede dar lugar a problemas permanentes de deformación debido a un asfalto menos endurecido en el proceso de producción. Esto puede ser particularmente importante para la mezcla graduada densa donde la rigidez del asfalto afecta a la resistencia a las deformaciones.

**Gráfico N° 7. Cambio del punto de ablandamiento en función a la temperatura**

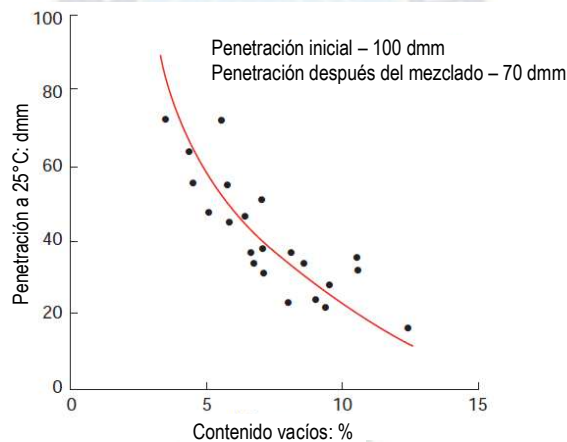


**Fuente: The Shell Bitumen Handbook [25]**

## Envejecimiento a largo plazo

El factor principal que influye en el endurecimiento a largo plazo de los asfaltos es el contenido de vacíos de la mezcla si otros factores permanecen iguales. La entrada constante de aire favorece un proceso de oxidación más rápido, especialmente para las mezclas superficiales. Esto puede ser un factor significativo con respecto a las diferencias de envejecimiento a largo plazo entre HMA y WMA. Debido a las mejores posibilidades de compactación descritas para los pavimentos WMA, lo que posiblemente reduce la cantidad de vacíos de aire, se reduce el grado de impacto de la oxidación sobre el endurecimiento del asfalto. Esto se confirma por [25] y el efecto del contenido de vacíos en el endurecimiento del asfalto se ilustra en el Gráfico 8.

**Gráfico N° 8. El efecto del contenido de aire en el endurecimiento del asfalto**



Fuente: The Shell Bitumen Handbook [25]

La evaluación en laboratorio del posible desempeño a largo plazo es extremadamente difícil, debido al número de variables que afectan al envejecimiento del asfalto: contenido de huecos, tipo de mezcla, tipo de agregado, etc. El método para simular el envejecimiento a largo plazo del asfalto in situ implica el uso de RTFOT para simular el envejecimiento inicial y es seguido por el envejecimiento de más de 20 horas a una temperatura elevada y la presión de 2070 kPa en un PAV. Sin embargo, el envejecimiento artificial para simular condiciones

in situ todavía tiene que ser completamente validado [31]. Por lo tanto, las propiedades de envejecimiento de WMA se deben observar cuidadosamente.

### **Ajuste de los métodos de prueba tradicionales**

Un problema puede ocurrir para simular los procesos de envejecimiento en la producción de WMA en el laboratorio. El TFOT y RTFOT han sido diseñados para simular el envejecimiento a corto plazo en la producción de HMA a 163°C [31], que es la temperatura convencional para HMA, pero es mayor que la temperatura de producción de WMA. Por lo tanto, puede ser necesario bajar la temperatura de prueba de modo que se acerque a la de la producción de WMA. Esto puede indicar la necesidad de comparación entre los resultados de la prueba después de RTFOT o TFOT y asfalto recuperado después de la producción de WMA a escala completa para que se pueda realizar la evaluación de procesos de envejecimiento y se puedan realizar los ajustes necesarios al método de ensayo.

#### **3.2.4.2 Penetración retenida y aumento del punto de ablandamiento**

##### **Método de prueba**

La relación de penetración y punto de ablandamiento en el estado endurecido sobre el estado original es la expresión de penetración retenida.

##### **Pertinencia para WMA**

La diferencia más importante en el proceso de producción de WMA en comparación con el HMA es la reducción de temperatura, que puede afectar los valores de penetración retenida y punto de ablandamiento. Pero dependiendo de la tecnología también puede haber cambios en el ciclo de mezclado y posiblemente en la cantidad de asfalto (grosor de la película de asfalto), que también puede influir en el endurecimiento del asfalto. Esto indica diferencias significativas entre las propiedades del asfalto en WMA en comparación con HMA convencional. La penetración retenida y el aumento en el punto de ablandamiento para el asfalto envejecido a corto plazo puede ser un buen método para comparar los cambios en

las propiedades del aglutinante en WMA y HMA después de la producción. Esto permitiría determinar la necesidad de utilizar un aglutinante más rígido para evitar problemas de deformación permanente.

### 3.2.5 Relación entre ensayos y propiedades relativas al rendimiento

#### 3.2.5.1 Índice de penetración del asfalto

El índice de penetración describe la susceptibilidad a la temperatura del asfalto. Los rangos de IP varían desde -3 para los asfaltos altamente sensibles a la temperatura hasta alrededor de +7 para los asfaltos altamente soplados o de baja temperatura (IP alto). IP se puede deducir utilizando sólo dos ensayos (penetración y punto de ablandamiento), pero es deseable obtener confirmación más precisa de los datos mediante medidas de viscosidad o rigidez [31]. El método de cálculo para IP para una temperatura de prueba de penetración de 25°C está en la siguiente ecuación [25].

$$IP = \frac{20 * \text{punto de ablandamiento} + 500 \lg \text{penetración} - 1952}{\text{punto de ablandamiento} - 50 - \lg \text{penetración} + 120}$$

Esta ecuación se basa en la hipótesis de Pfeiffer y Van Doormael de que a la temperatura del punto de ablandamiento, la penetración es de 800 mm [25]. Shell afirma que para obtener resultados más confiables para los asfaltos modificados (probablemente incluyendo WMA modificado) con el fin de evaluar el rendimiento de susceptibilidad a la temperatura del asfalto se recomienda calcular IP a partir de dos valores de penetración diferentes que se obtuvieron en diferentes temperaturas. Esto daría resultados más confiables para la determinación adicional de la rigidez del asfalto en condiciones de servicio. El IP de dos índices de penetración se calcula de acuerdo con las siguientes ecuaciones donde A es la susceptibilidad a la temperatura del logaritmo de penetración.



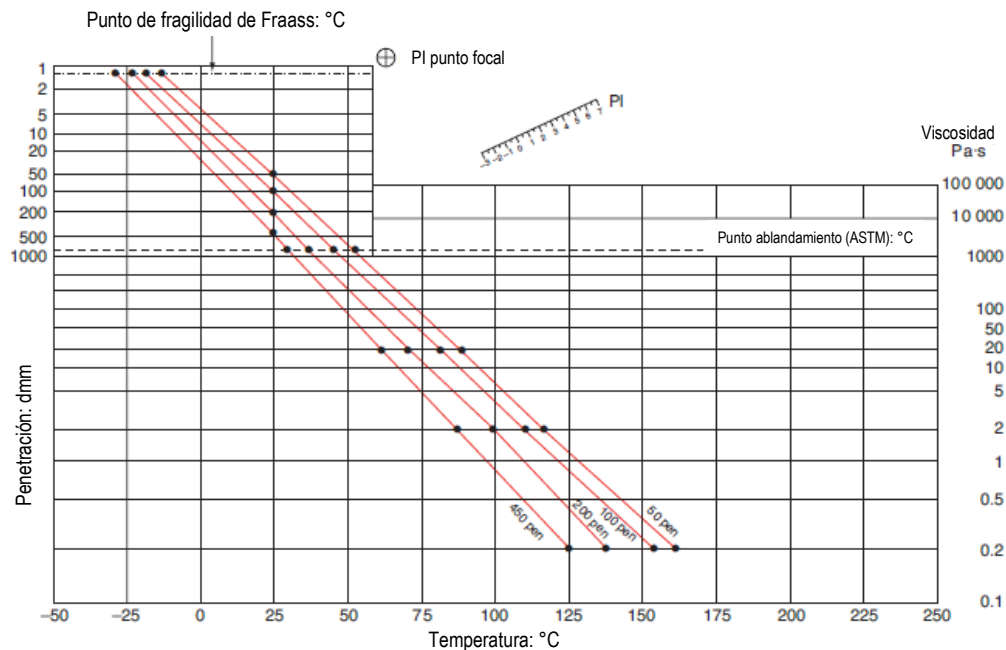
$$IP = \frac{20(1 - 35A)}{1 + 50A}$$

$$A = \frac{\lg \text{penetración a } T1 - \lg \text{penetración a } T2}{T1 - T2}$$

### 3.2.5.2 Gráfico de datos de ensayos de asfalto (BTDC)

Un sistema de W.Heuklom [25] fue desarrollado para permitir que la penetración, el punto de reblandecimiento, el punto de fragilidad de Fraass y los datos de viscosidad se describan como una función de la temperatura. El gráfico consiste en una escala horizontal para la temperatura y dos escalas verticales para la penetración y la viscosidad. La escala de temperatura es lineal y la escala de penetración es logarítmica. La escala de viscosidad ha sido diseñada para que los asfaltos de grado de penetración con un índice de penetración relativamente bajo y un contenido bajo de cera den relaciones en línea recta [25]. En el siguiente gráfico se ilustra un BTDC típico.

**Gráfico N° 9. Gráfico de datos de ensayos de asfalto (BTDC)**

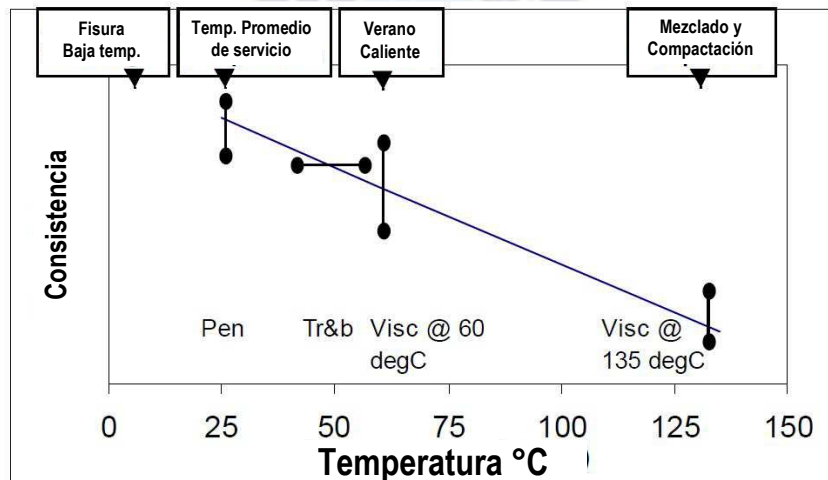


Fuente: The Shell Bitumen Handbook [25]

Este gráfico puede usarse para determinar la temperatura de mezclado y pavimentación y para ilustrar los cambios en las propiedades del asfalto después de la modificación con aditivos.

El gráfico de BTDC está de hecho indirectamente relacionado con el rendimiento del asfalto, con la prueba de penetración y punto de ablandamiento asociada a las temperaturas en servicio y el punto de fragilidad de Fraass a temperaturas bajas. Esto se muestra en el siguiente Gráfico. Por lo tanto, utilizando BTDC, es fácil determinar el asfalto necesario en determinadas condiciones.

Gráfico N° 10. Relación entre ensayos y temperaturas de servicio.



Fuente: Concepts used for development of bitumen specifications [39]

### 3.2.5.3 Módulo de rigidez del asfalto

#### Pertinencia para WMA

Para la aplicación del nomograma de Van der Poel [25] y poder estimar el módulo de rigidez del asfalto se describe previamente la base teórica con la cual se desarrolló dicho nomograma.

#### Propiedades ingenieriles del asfalto [25]

El uso de asfalto como tal se basa en sus propiedades mecánicas y en la forma en que estas propiedades dependen del tiempo de carga y la temperatura. Los asfaltos

se fabrican con diferentes propiedades mecánicas para satisfacer las demandas de aplicaciones en carreteras. Para el ingeniero civil es de gran valor definir las propiedades mecánicas del asfalto en términos análogos a los módulos elásticos de los materiales rígidos.

Para el diseño estructural de pavimentos, es esencial poder medir y predecir las características mecánicas fundamentales de los materiales de pavimentación (Bonnaure et al., 1977). El módulo de rigidez de un asfalto depende del asfalto y de fracciones volumétricas de los diferentes componentes de la mezcla (agregados, asfalto, aire).

### **El concepto de módulo de rigidez [25]**

Un material viscoso es de naturaleza semi-fluida, cuando está esforzado deformará o tenderá a deformarse, ya que cualquier deformación es permanente porque no se recupera cuando se retira la carga. Los materiales elásticos también se deforman o tienden a deformarse cuando están esforzados, pero cuando se elimina la carga, cualquier deformación se recupera por completo.

Los asfaltos son materiales viscoelásticos, el grado en que su comportamiento es viscoso y elástico es una función de la temperatura y del período de carga (generalmente denominado "tiempo de carga"). A altas temperaturas o largos tiempos de carga se comportan como líquidos viscosos, mientras que a temperaturas muy bajas o tiempos de carga cortos se comportan como sólidos elásticos (frágiles). El rango intermedio de temperatura y tiempos de carga, más típico de las condiciones en servicio, da como resultado un comportamiento viscoelástico.

Para definir las propiedades viscoelásticas, se introdujo el concepto del módulo de rigidez como un parámetro fundamental para describir las propiedades mecánicas de los asfaltos por analogía con el módulo elástico de los sólidos (Van der Poel, 1954). Si se aplica una tensión de tracción  $\sigma$  en un tiempo de carga  $t = 0$ , se alcanza instantáneamente una deformación  $\varepsilon$  que no aumenta con el tiempo de carga. El

módulo elástico  $E$  del material se expresa mediante la ley de Hooke como tensión dividida por deformación.

En el caso de materiales viscoelásticos como el asfalto, un esfuerzo de tracción aplicado en un tiempo de carga  $t = 0$  causa una deformación  $\varepsilon$  que aumenta, pero no proporcionalmente, con el tiempo de carga. El módulo de rigidez  $S_t$  en un tiempo de carga  $t$  se define como la relación entre la tensión aplicada y la deformación resultante en el tiempo de carga  $t$ . De lo anterior se deduce que el valor del módulo de rigidez depende de la temperatura y del tiempo de carga debido a la naturaleza especial del asfalto. En consecuencia, es necesario establecer tanto la temperatura  $T$  como el tiempo de carga  $t$  de cualquier medición de módulo de rigidez.

$$S_{t,T} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{t,T}}$$

Los métodos utilizados para medir el módulo de rigidez del asfalto a menudo se basan en deformaciones por corte. La resistencia al corte se expresa en términos del módulo de corte  $G$ , que se define como:

$$G = \frac{\text{Esfuerzo cortante}}{\text{Deformación cortante}}$$

El módulo de elasticidad y el módulo de corte están relacionados por:

$$E = 2(1 + \mu)G$$

donde  $\mu$  es la relación de Poisson. El valor de  $\mu$  depende de la compresibilidad del material, y se puede suponer que es 0.5 para los betunes puros casi incompresibles, mientras que los valores de  $<0.5$  deben considerarse para los asfaltos. Así,

$$E \approx 3G$$

En la prueba de fluencia estática, se aplica una carga constante, y la deformación resultante se mide como una función del tiempo de carga. Se pueden medir las deformaciones en tiempos de carga de aproximadamente 1 a  $10^5$  segundos o más.

En las pruebas dinámicas, el esfuerzo cortante se aplica generalmente como una tensión sinusoidal variable de amplitud constante y frecuencia fija. La deformación del material también varía sinusoidalmente con la misma frecuencia que la tensión aplicada. Las pruebas se llevan a cabo a varios valores de frecuencia, y la relación de la tensión a la deformación se puede representar como la inversa de la frecuencia angular. El grado de elasticidad del asfalto en las condiciones de prueba está dado por la cantidad de respuesta de deformación fuera de fase del esfuerzo cortante aplicado, y esto se conoce como el ángulo de fase. Para materiales puramente elásticos, el ángulo de fase es cero. Para materiales puramente viscosos, el ángulo de fase es  $90^\circ$ .

En analogía al módulo elástico E y al módulo de corte G, el módulo de rigidez del asfalto se puede dar como (Van der Poel, 1954):

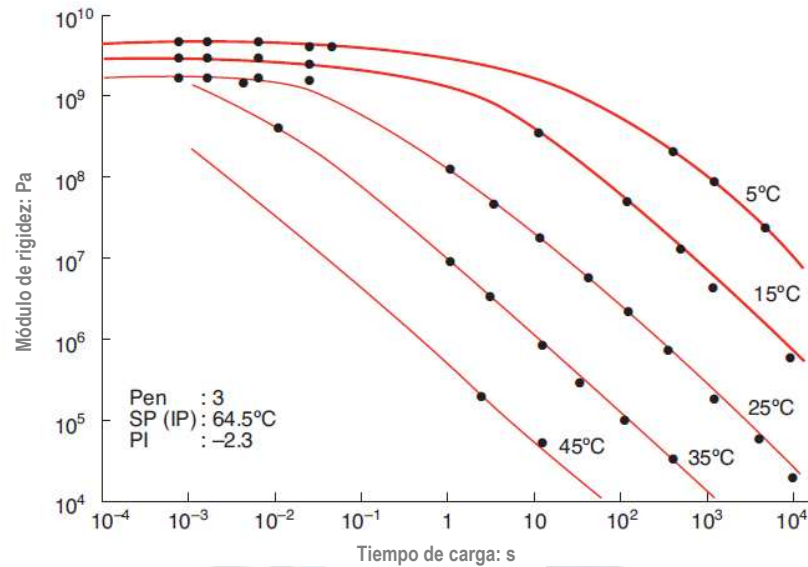
$$S_E \sim 3S_G$$

Combinando pruebas de fluencia con pruebas dinámicas, se puede cubrir un rango considerable de módulos de rigidez y tiempos de carga. Al parecer las curvas de tiempo de carga y rigidez obtenidas a diferentes temperaturas para un tipo de asfalto tienen la misma forma y, si se desplazan a lo largo del eje del tiempo de carga, coincidirían.

El efecto de los cambios en la temperatura y el tiempo de carga en el módulo de rigidez de tres betunes diferentes se muestran en los Gráficos 11, 12 y 13.

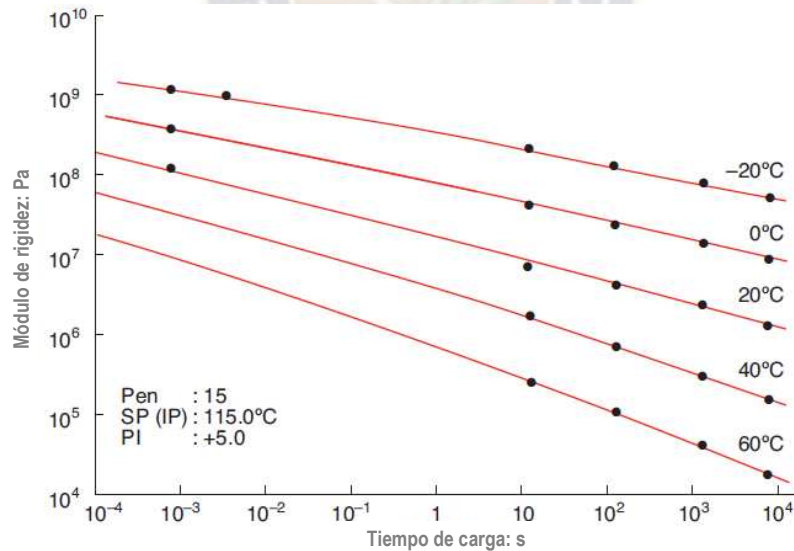
El Gráfico 11 muestra un asfalto de bajo IP (Índice de Penetración) -2.3. En tiempos de carga muy cortos, el módulo de rigidez es virtualmente constante, asintótico hacia  $2.5 \times 10^9$  a  $3.0 \times 10^9$  Pa, y es, en esta región, en gran medida independiente de la temperatura y el tiempo de carga (es decir,  $S = E$ ). El efecto del IP se ilustra claramente comparando los Gráficos 11 y 12. El asfalto con el IP más alto (+5) (Gráfico 12) es considerablemente más rígido a temperaturas más altas y tiempos de carga más largos (es decir, es menos susceptible a la temperatura).

**Gráfico N° 11. Efecto de temperatura y tiempo de carga en el módulo de rigidez de un asfalto con bajo IP**



Fuente: The Shell Bitumen Handbook [25]

**Gráfico N° 12. Efecto de temperatura y tiempo de carga en el módulo de rigidez de un asfalto con alto IP**



Fuente: The Shell Bitumen Handbook [25]

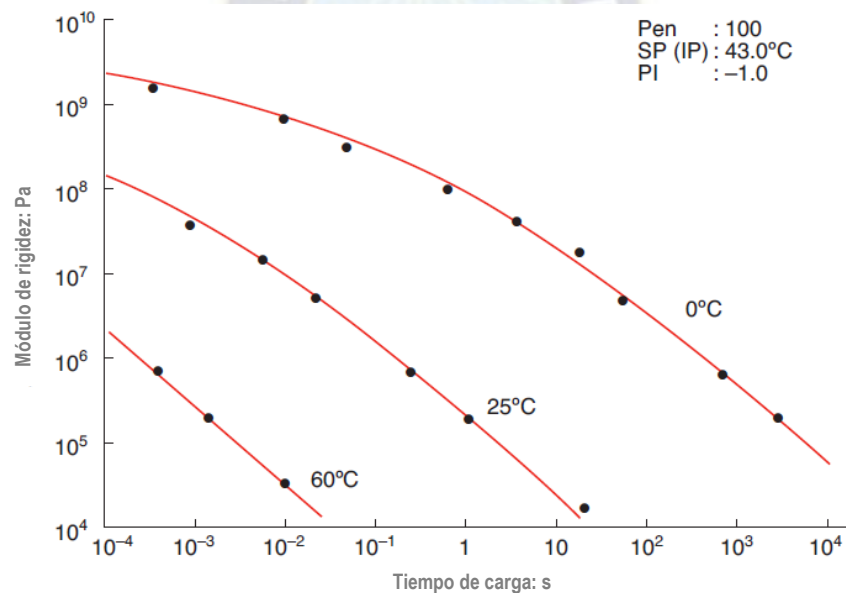
El Gráfico 13 muestra la relación para un asfalto de penetración 100 con un IP de -1.0. En un tiempo de carga de 0.02 s (que equivale a una velocidad del vehículo de alrededor de 50 km/h) el módulo de rigidez es de aproximadamente  $10^7$  Pa a 25°C,



pero cae a aproximadamente  $5 \times 10^4$  Pa a  $60^\circ\text{C}$ . A bajas temperaturas, el módulo de rigidez es alto y, por lo tanto, no se produce deformación permanente. Sin embargo, a mayor temperatura o tiempos de carga más largos (tráfico lento o estacionario), el módulo de rigidez se reduce sustancialmente y, en estas condiciones, es mucho más probable que se produzca una deformación permanente de la superficie de la carretera.

Para apreciar completamente el significado del módulo de rigidez y su medición, es necesario considerar la deformación bajo tensión de sólidos y líquidos simples. El comportamiento de deformación de los materiales viscoelásticos puede derivarse.

**Gráfico N° 13. Efecto de temperatura y tiempo de carga en el módulo de rigidez en un asfalto con penetración 100**



Fuente: The Shell Bitumen Handbook [25]

### Predicción del módulo de rigidez [25]

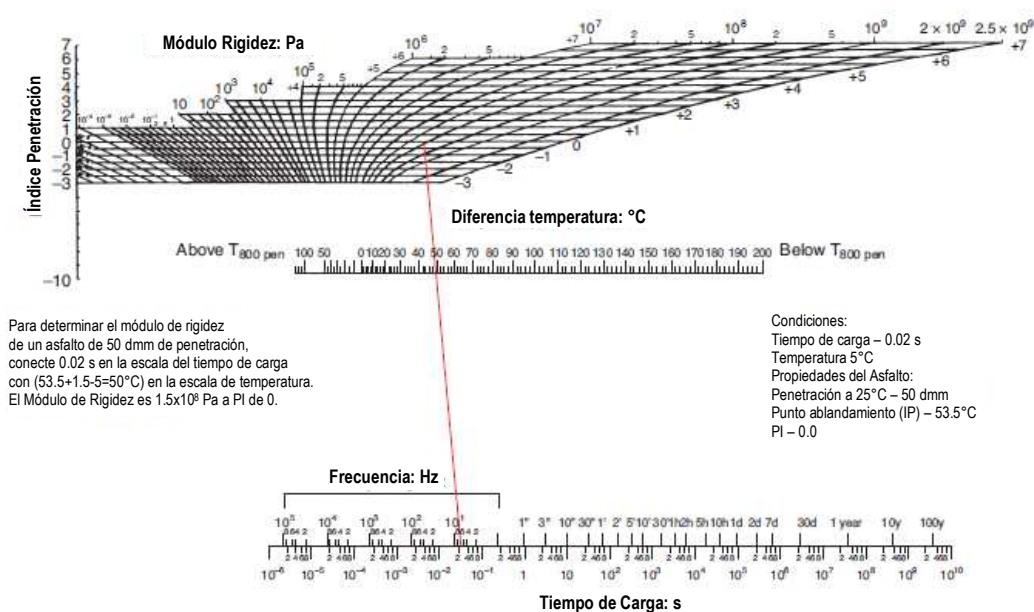
Si la medición directa del módulo de rigidez no es factible, puede predecirse usando el nomograma de Van der Poel (Heukelom, 1973; Van der Poel, 1954). Van der Poel demostró que dos asfaltos del mismo IP en el mismo tiempo de carga tienen los

mismos módulos de rigidez a temperaturas que difieren de sus respectivos puntos de ablandamiento en la misma cantidad.

Se probaron más de 40 tipos de asfaltos con valores de IP que variaban de +6.3 a -2.3 a muchas temperaturas y frecuencias, usando tanto pruebas de fluencia como pruebas dinámicas. A partir de los datos de prueba, Van der Poel produjo un nomograma a partir del cual, utilizando solo la penetración y el punto de ablandamiento, es posible predecir el módulo de rigidez de un asfalto en un amplio rango de condiciones de temperatura y tiempos de carga.

El nomograma permite la predicción del módulo de rigidez dentro de un factor de 2, que se considera de valor práctico en relación con el amplio rango de módulos de rigidez. El Gráfico 14 muestra un nomograma de Van der Poel con el módulo de rigidez determinado para un bitumen de penetración de 40/60 con un tiempo de carga de 0,02 s y una temperatura de prueba de 5°C.

Gráfico N° 14. Nomograma para determinar el módulo de rigidez de asfaltos



Fuente: The Shell Bitumen Handbook [25]

La menor temperatura de producción para WMA causa cambios en la consistencia y susceptibilidad a la temperatura del asfalto, debido a un menor envejecimiento

durante la producción. A partir de lo señalado, aunque inicialmente se usen los mismos asfaltos, el asfalto en la WMA después de la producción tendrá una rigidez diferente a la de HMA. Esto se puede explicar fácilmente con el nomograma de Van der Poel. Puede determinarse a partir del anterior gráfico que para el asfalto con un punto de ablandamiento más alto y un IP mayor, la WMA daría lugar a un módulo de rigidez superior en comparación con el del HMA. Esto tiene un efecto directo sobre la rigidez de la mezcla bituminosa y es la razón más importante para los problemas de ahuellamiento.



## **CAPITULO IV:**

### **4. PROPIEDADES DE WMA**

En este capítulo se presentará las propiedades más importantes de WMA y sus diferencias con HMA convencional. También se expondrán las posibles áreas problemáticas del desempeño de WMA a partir del estudio de la literatura y finalmente se discutirá brevemente los métodos de ensayos para la evaluación de las propiedades de WMA, proponiendo ajustes a los métodos cuando sea necesario para una mejor caracterización de la WMA.

#### **4.1 Métodos de evaluación de la mezcla**

Tradicionalmente los ensayos que se realizan para establecer las propiedades de una mezcla son realizados una vez ejecutada la misma, los ingenieros confían en las pruebas de laboratorio mediante las cuales se realizó el diseño óptimo de la mezcla y verifican esta condición mediante ensayos de campo (por ejemplo el ensayo Marshall).

Debido a que WMA es una tecnología relativamente nueva, el conocimiento de las propiedades empíricas para este tipo de mezclas es significativamente menor que para la HMA, pudiendo presentarse diferencias en la temperatura y/o tecnología de producción de WMA que pueden incluir la modificación de las propiedades de adhesión del asfalto y del agregado y cambios en la consistencia del aglutinante a corto y largo plazo. Esto puede indicar la necesidad de la modificación de la metodología para realizar pruebas y diferencias en la caracterización y requisitos de especificación de WMA. Sin embargo, hasta ahora, la mayor parte de las investigaciones se han llevado a cabo con las mismas composiciones de mezcla y se evalúa con los mismos criterios para WMA y HMA.

Se pueden mencionar ensayos fundamentales los que están dirigidos a predecir el rendimiento del asfalto (p.e. rigidez, propiedades de fatiga), en este tipo de ensayos

solamente sería necesario correcciones menores referidas a las temperaturas de preparación de muestras y el tiempo de curado para las pruebas de WMA.

Podemos mencionar también ensayos de simulación que están diseñados para simular condiciones específicas in situ, por ejemplo la rueda de carga y la compactación giratoria que tratan de simular el proceso de densificación del pavimento. Estos ensayos son usados para comparar el rendimiento mecánico entre una mezcla convencional HMA y WMA.

Las pruebas que se han determinado en el alcance del presente trabajo de investigación son las siguientes:

1. Compactación
2. Sensibilidad a la humedad
3. Rigidez de la mezcla
4. Deformaciones permanentes

#### **4.1.1 Ensayo de Compactación**

##### **Método de prueba**

Existen tres maneras de compactar las muestras cilíndricas en laboratorio, el método tradicional es usando el martillo Marshall, el uso de compactadores giratorios establecidos en el método SUPERPAVE no está extendido todavía en nuestro medio y existe el tercer método de compactación vibratoria que es comparable con el método de martillo Marshall.

##### **Pertinencia para WMA**

Debido a la reducción del tiempo de compactación por la disminución de la viscosidad y la disminución al envejecimiento del asfalto en el proceso de producción, se reduce el número total de pasadas de rodillos necesarios para

alcanzar una densidad especificada. Esto puede permitir ahorrar energía de compactación y extender el tiempo de compactación que puede ser especialmente importante en el pavimentado a baja temperatura.

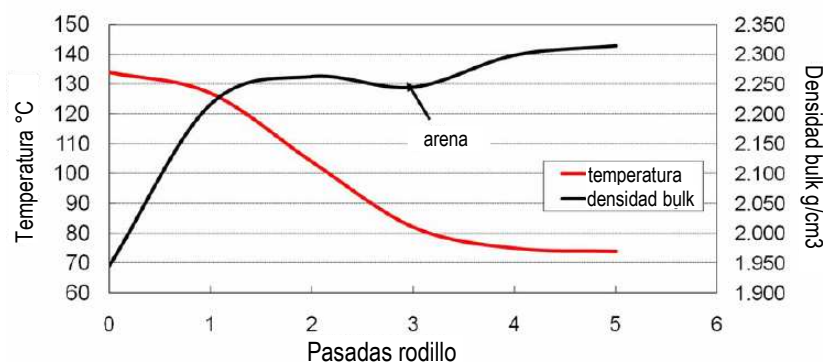
## Investigaciones

Los datos de compactación señalados en la investigación [32] indican que el compactador giratorio es insensible a las temperaturas de compactación y, por lo tanto, no debe utilizarse para la evaluación de WMA. Indica que el martillo de Marshall y la compactación vibratoria dan resultados más confiables que simulan las condiciones de servicio a temperaturas de compactación más bajas.

## Pruebas de campo

De la investigación realizada se cita los ensayos de campo realizadas para una mezcla que contiene 3% de Sasobit en Alemania [6], ver el Gráfico 15. Las pruebas confirman la suposición de que por encima del punto de fusión de la cera, la compactación requiere menos esfuerzo y se puede hacer a una temperatura más baja en comparación con HMA. Después de sólo una pasada de rodillo, se obtuvo un grado de compactación de aproximadamente el 96% y con dos pasadas de rodillo se alcanzó casi la densidad más alta posible, después de lo cual la compactación aumenta sólo ligeramente.

Gráfico N° 15. Datos de compactación de ensayos de campo para mezcla con Sasobit al 3%.



Fuente: Experience with Warm Mix Asphalt in Germany [37]



## **Ajuste del método de ensayo**

Al igual que con HMA, la compactación de laboratorio de WMA utilizando el martillo Marshall debe simular la densidad que finalmente se logrará en el campo. Por lo tanto, la temperatura de compactación debe reducirse para simular la temperatura de pavimentación.

### **4.1.2 Ensayos de sensibilidad a la humedad**

La susceptibilidad a la humedad puede ser un tema importante para las tecnologías de WMA. Si la humedad contenida en el agregado no se evapora completamente durante el mezclado debido a las bajas temperaturas de mezcla, el agua puede retenerse en el agregado, lo que a su vez podría conducir a una mayor susceptibilidad al daño por humedad.

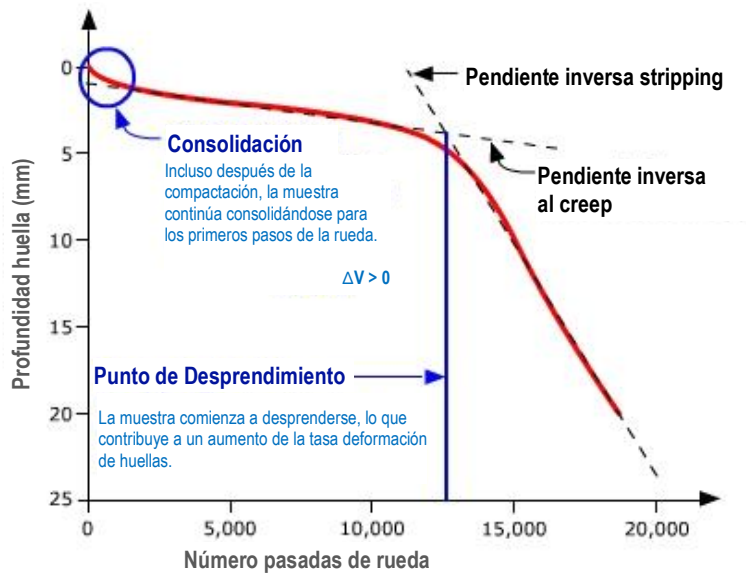
#### **Métodos de prueba**

El método mayormente utilizado según norma ASTM D4867 es la resistencia a la tracción indirecta cuyo principio es determinar la relación de resistencia a la tracción indirecta entre dos subconjuntos iguales, uno de los cuales se mantiene seco a temperatura ambiente mientras que el otro subconjunto se satura y se almacena en agua a temperatura de acondicionamiento elevada. La evaluación de los resultados de las pruebas implica no sólo la resistencia a la tracción medida, sino también la observación visual del recubrimiento de aglutinante sobre la superficie del agregado expuesto y las observaciones del agregado fracturado o triturado. Esto permite determinar la separación de agregados (fallo de adhesión) causada por la humedad.

Otro método que indirectamente mide el daño por humedad de mezclas bituminosas es el Aparato de la Rueda Cargada de Hamburgo (HWTB). Este es un método de prueba simulado que permite determinar la resistencia del asfalto a las deformaciones permanentes (rutting). Además, la sensibilidad a la humedad se mide como el punto de inflexión de desmoldeo ilustrado en el Gráfico 16. Es el

número de pasadas en las que la deformación de la muestra es el resultado de daño por humedad y no solo por las deformaciones.

Gráfico N° 16. Punto de inflexión stripping de HWTD



Fuente: Pavement interactive. Laboratory Wheel Tracking Devices [38]

## Investigación

Se citan las investigaciones realizadas sobre la sensibilidad a la humedad en Alabama [32] donde se evaluaron los aditivos Sasobit, Aspha-min y Evotherm. En el primer ensayo se realizó la relación de resistencia a la tracción (TSR) a diferentes temperaturas de compactación con agregados secados al horno. Los resultados se muestran en la Tabla 9 donde se observa que el uso de todos estos aditivos redujo la TSR en comparación con la HMA de control. Sólo tres de los nueve especímenes probados (tres tipos de aditivos en diferentes temperaturas y combinaciones de agregados) satisfacen el requisito Superpave de 0,8 para la relación entre la resistencia a la tracción de las muestras saturadas e insaturadas. Los resultados de la prueba también mostraron cierta variabilidad en los datos de un tipo agregado al siguiente. Los peores resultados en todos los casos mostraron Aspha-min (tecnología que contiene agua), que se cree que está conectada con la emulsión

del aglutinante a partir de la humedad liberada de la zeolita, causando un fallo cohesivo.

Después de esta resistencia a la tracción de Sasobit y Aspha-min productos con antiestripping aditivos líquidos fueron probados, pero los resultados no mostraron los resultados esperados. Aspha-min dio como resultado un valor de TSR aún peor que se puede conectar con la reducción de la viscosidad del ligante del agente antiestripping líquido. Y mientras que Sasobit dio lugar a TSR aceptable, la resistencia real a la tracción para ambas muestras saturadas e insaturadas había disminuido más de dos veces en comparación con la misma mezcla sin aditivo antiestripping. Después se ensayó Aspha-min con una adición de una cantidad diferente y método de adición de cal hidratada y se demostró que tenía un efecto positivo sobre TSR.

Esta investigación también proporciona resultados de HWTD para las mismas mezclas. Todos los resultados se presentan en la Tabla 9. Los resultados de HWTD confirman principalmente los valores de TSR correspondientes, con la excepción de Evotherm, donde el punto de inflexión de separación fue mayor que para la mezcla de control. Confirma la conclusión de que las mezclas que contienen zeolita tienen menor resistencia a la humedad que la mezcla de control.

**Tabla N° 9. Resumen de ensayos a la sensibilidad a la humedad**

<b>Agregado</b>	<b>Tipo de Mezcla</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Punto de Inflexión</b>	<b>TSR (Ensayo Tracción Indirecta)</b>
<b>Granito</b>	Control	Ninguno	6500	1.16
<b>Granito</b>	Sasobit	Ninguno	3975	0.71
<b>Granito</b>	Aspha-min	Ninguno	3450	0.67
<b>Granito</b>	Evotherm	Ninguno	No observado	0.96
<b>Granito</b>	Aspha-min	1.5% limo hidratado	No observado	0.75
<b>Granito</b>	Sasobit	0.4% aditivo adherente	No observado	0.94
<b>Caliza</b>	Control	Ninguno	2500	0.65
<b>Caliza</b>	Aspha-min	Ninguno	1700	0.51
<b>Caliza</b>	Sasobit	Ninguno	2900	0.91
<b>Caliza</b>	Evotherm	Ninguno	2550	0.62

**Fuente: Evaluation Of Sasobit® For Use In Warm Mix Asphalt [7]**

## **Ajuste del método de ensayo**

El uso de la prueba de la rueda de Hamburgo parece ser particularmente importante para la evaluación de las tecnologías de WMA, ya que como método de prueba simulado permite determinar directamente el rendimiento de la mezcla sin tener mucha experiencia en el rendimiento real del campo. El beneficio de este método de ensayo es que permite la evaluación de dos propiedades al mismo tiempo - rutting y sensibilidad a la humedad. El método de ensayo ha demostrado ser sensible a factores que son importantes para WMA [32] - incluyendo rigidez del ligante, duración del envejecimiento a corto plazo, temperatura de compactación y tratamientos anti-desprendimiento.

En la actualidad, el método principal para determinar la resistencia a deformaciones permanentes es el ensayo de rueda de carga (wheel tracking). La introducción de este método de ensayo para WMA como un procedimiento estándar para la evaluación de la susceptibilidad a la humedad y la deformación ayudaría a implementar WMA.

### **4.1.3 Módulo de Rigidez de la Mezcla**

La rigidez del asfalto depende tanto de las propiedades del asfalto como del esqueleto mineral, donde el asfalto es responsable de las propiedades viscoelásticas, mientras que el esqueleto mineral influye en las propiedades elásticas y plásticas. La proporción de cada una depende del tiempo de carga y de la temperatura a la que se aplicó la carga.

#### **Métodos de prueba**

La rigidez de la mezcla puede medirse por una variedad de métodos, por ejemplo, ensayos de flexión y vibración en una viga, pruebas uniaxiales y triaxiales directas en especímenes cilíndricos o ensayos de tracción indirecta en muestras cilíndricas.

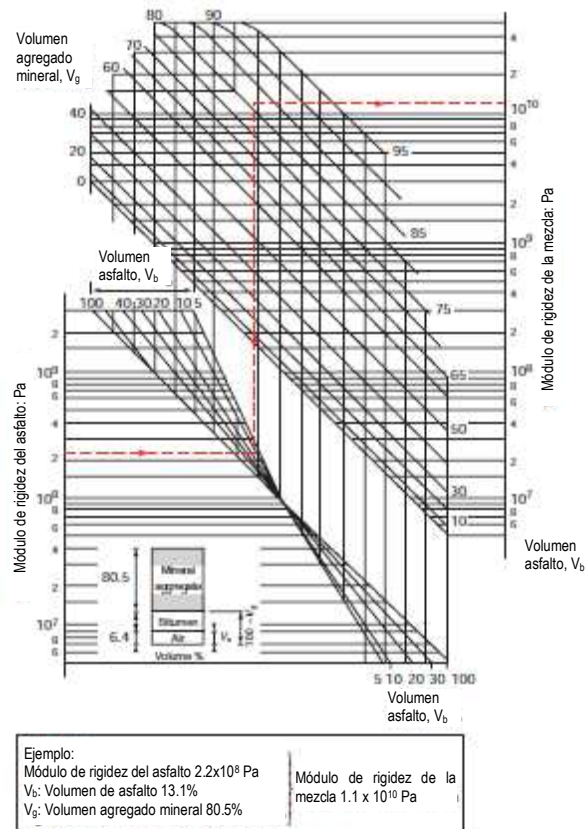
#### **Pertinencia para WMA**

Los componentes y composiciones de la mezcla pueden ser extremadamente diversos, lo que dificulta la predicción de las propiedades de una mezcla particular. Sin embargo, es evidente que uno de los factores clave que influyen en la rigidez final de una mezcla es la rigidez del asfalto. Esta es una cuestión importante con respecto a las diferencias entre HMA y WMA, ya que, la rigidez del asfalto en WMA se ve afectada por las diferencias de temperatura de producción, proceso de mezcla y posiblemente por cambios en el diseño de la mezcla.

La predicción del módulo de rigidez podría ser una herramienta útil para diseñar el WMA con respecto a la elección de la rigidez del asfalto, la predicción de la rigidez del pavimento y posibles problemas con deformaciones permanentes, y sugiriendo posibles ajustes en el espesor del pavimento de WMA. Existen varios métodos de predicción para la rigidez del asfalto y se pueden usar para determinar las diferencias entre HMA y WMA, y ayudar a diseñar la mezcla y/o elegir el asfalto correcto. El modelo de predicción Shell [25] que en la forma de un nomograma se ilustra en el Gráfico 17 requiere tres parámetros:

- el módulo de rigidez del asfalto
- el porcentaje de volumen del asfalto
- el porcentaje de volumen del agregado mineral

Gráfico N° 17. Nomograma para estimar el módulo de rigidez de mezclas asfálticas



Fuente: The Shell Bitumen Handbook [25]

## Investigaciones

Se realizó un experimento [19] para determinar el módulo elástico para productos de WMA - Sasobit, Aspha-min y Evotherm - en una amplia gama de temperaturas y con dos tipos de agregados diferentes. Los investigadores concluyeron que el uso de estos aditivos no cambia significativamente el valor del módulo elástico y que el grosor del pavimento diseñado no se vería afectado por el uso de estas tecnologías WMA.

### 4.1.4 Deformaciones permanentes

Las deformaciones permanentes del asfalto se forman en la respuesta a la baja rigidez del material, cuando la rigidez del asfalto es inferior a 0,5 MPa [25]. Este comportamiento de rigidez viscosa se produce en asfalto a altas temperaturas o largos tiempos de carga y es mucho más complejo que en la zona elástica de mezcla. La rigidez en esta fase es una función de:



- rigidez del asfalto,
- vacíos en agregados minerales,
- tipo agregado, forma, clasificación, textura, trabazón, etc.
- compactación (contenido vacío, método de compactación, etc.),
- condiciones de confinamiento.

### **Métodos de prueba**

La resistencia de las mezclas a deformaciones permanentes debe determinarse con los siguientes métodos:

- Rueda de carga, bajo norma europea EN12697-22
- Ensayo Marshall, AASHTO T 245
- Ensayo de compresión cíclica, bajo norma europea EN-12697-25

Principalmente en EE.UU. se han utilizado otros métodos como ser la rueda cargada de Hamburgo (HWTD) AASHTO T324, que mide deformaciones y la susceptibilidad a la humedad de una muestra de mezcla asfáltica conformada por una placa, preparada en laboratorio o tomada en obra, la cual se sumerge en agua a una temperatura de 50°C.

Se tiene otro método, Asphalt Pavement Analyzer (APA) AASHTO T340, que permite predecir las deformaciones permanentes y la susceptibilidad a la humedad mediante pasadas repetidas. Se pueden ensayar diferentes formas de especímenes con este método, incluyendo especímenes cilíndricos preparados con compactador giratorio y/o vibratorio.

### **Pertinencia para WMA**

Existe una preocupación general por el rendimiento de WMA al ahuellamiento, debido a que la disminución en temperatura de mezclado puede conducir a un secado incompleto de los agregados y un revestimiento insuficiente con asfalto. Otro aspecto que puede influir en la disminución de la resistencia a las deformaciones permanentes es el menor endurecimiento oxidativo del asfalto debido a una menor

temperatura de producción y compactación. Esto puede sugerir el uso de un asfalto más duro.

Para evaluar el impacto del problema de ahuellamiento se han realizado muchas investigaciones para determinar la resistencia de WMA a deformaciones permanentes, incluyendo evaluaciones de laboratorio y las pruebas de campo.

### **Investigaciones**

Los resultados de las diferentes investigaciones de las pruebas realizadas por ensayo de la rueda cargada de Hamburgo que se encontraron durante el estudio de la literatura se resumen en la Tabla 10. La profundidad de la huella en un número especificado de pasadas de rueda o el número de pasadas hasta el fallo se indica en la tabla.

Los resultados de la prueba no deben ser comparados uno con otro ya que se ensayaron diferentes mezclas en diferentes condiciones. Los resultados de ahuellamiento pueden estar influenciados por numerosos factores como el tipo de mezcla, los agregados utilizados, el tipo de asfalto, la temperatura y el método de compactación, el curado y los parámetros volumétricos. Sin embargo, la investigación específica trató los especímenes en condiciones comparables que eran similares a todas las muestras con la mezcla de control que tenía una temperatura de compactación más alta que la muestra WMA. Por lo tanto, los resultados, si se comparan con una mezcla de control correspondiente, muestran la tendencia a la resistencia al ahuellamiento en cada uno de los productos WMA.

Los resultados muestran que Sasobit redujo el ahuellamiento en todas las investigaciones. Para otros aditivos los resultados variaron en diferentes investigaciones o diferentes tratamientos de la mezcla.

El buen comportamiento de Sasobit puede explicarse por la formación de la estructura de rejilla en el asfalto por debajo del punto de cristalización de la cera. Este proceso endurece el aglutinante y aumenta la resistencia a las deformaciones permanentes del asfalto.

Tabla N° 10. Resumen de diferentes investigaciones con ensayo rueda de carga de Hamburgo

Tipos de Mezcla	Profundidad ahuellamiento (número de pasadas) con HWTB			
	Control	Evotherm	Sasobit	Aspha-min
Granito	7.31 (10000)	6.78 (10000)	11.75 (10000)	20.39 (10000)
Granito+0.4% aditivo adherencia	7.31 (10000)	-	6.5 (10000)	-
Granito+1.5% cal hidratada	7.31 (10000)	-	-	2.73 (10000)
Caliza	17.00 (10000)	12.61 (10000)	15.78 (10000)	11.25 (10000)

Fuente: Evaluation of Potential Processes for Use in Warm Mix Asphalt [40]



## CAPITULO V:

### 5. ENSAYOS DEL ASFALTO

Este capítulo incluye la preparación, los resultados y la discusión de las pruebas de asfalto. La teoría sobre fue expuesta en el Capítulo III Propiedades del asfalto. Los resultados completos de las pruebas se pueden encontrar en el Anexo 1.

#### 5.1 Procedimiento experimental

Se utilizó el aditivo Honeywell Titan™ de tipo cera polietilénica (sintética) para mezclarlo con el asfalto tipo 60/70, y obtener un asfalto con las propiedades adecuadas para producir WMA.

La caracterización del asfalto 60/70 se realizó de acuerdo con la Especificación de Asfaltos con Grado de Penetración ASTM D946 del año 2015, cuyos valores se muestran en la Tabla.

Tabla N° 11. Caracterización Asfalto 60/70 según Norma ASTM D 946

CARACTERISTICAS	UNIDAD	NORMAS		ESPECIFICACION		VALORES	OBSERV.
		ASTM	AASHTO	Mín.	Máx.		
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s	dmm	D 5	T 49	60	70	62	CUMPLE
Punto de Ablandamiento	°C	D 36	T 53	46		50	CUMPLE
Punto de inflamación (Copa abierta Cleveland)	°C	D 92	T 48	230		>230	CUMPLE
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min	cm	D 113	T 51	100		>100	CUMPLE
Solubilidad en tricloretileno	%	D 2042	T 44	99		99.2	CUMPLE
Ensayo sobre residuo de Película Delgada (RTFOT)							
Pérdida por calentamiento	%	D 2872	---		0.8	0.19	CUMPLE
Penetración Retenida a 25°C	%	D 5	T 49	52		53	CUMPLE
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min	cm	D 113	T 51	50		>50	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia.

Los ensayos de laboratorio realizados se presentan en Anexo adjunto al presente trabajo de investigación.

El asfalto 60/70 utilizado en la presente investigación es de procedencia Colombiana de la compañía ECOPETROL.

El procedimiento experimental para el asfalto se realizó en tres etapas, tal como se muestra en la Figura 22:

**Etapa 1:** Se obtuvo del proveedor una muestra del asfalto base 60/70 y tres muestras mezcladas con el aditivo antes indicado en las siguientes proporciones: 1%, 2% y 3%.

**Etapa 2:** Tanto al asfalto original 60/70 como a las muestras mezcladas con aditivo, se realizaron los siguientes ensayos:

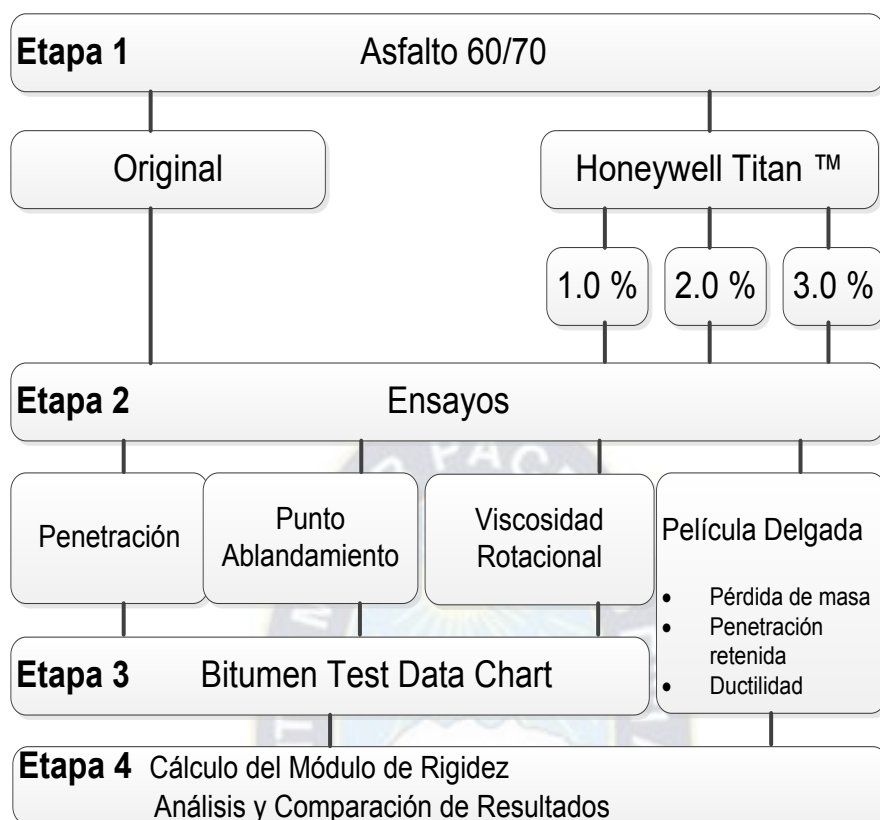
- a) Penetración a 25°C (ASTM D5)
- b) Punto de ablandamiento (ASTM D36)
- c) Viscosidad rotacional a 120, 135 y 150°C (ASTM D4402)
- d) Película delgada (ASTM D1754)

**Etapa 3:** Procesamiento de los resultados:

- a) Evaluación de la reología de asfalto comportamiento viscosidad-temperatura
- b) Elección del contenido de aditivo para el diseño de la mezcla
- c) Estimación de la temperatura teórica de mezclado
- d) Evaluación teórica del módulo de rigidez para el asfalto

**Etapa 4:** Análisis y Comparación de Resultados

**Figura N° 22: Procedimiento experimental para el asfalto original y con aditivo**



Fuente: Elaboración propia

## 5.2 Descripción de ensayos realizados

Los ensayos del asfalto se realizaron de acuerdo con los requisitos exigidos por la norma internacional ASTM (American Society for Testing and Materials). Estos ensayos permiten verificar la calidad del asfalto por métodos convencionales y ampliamente conocidos. Los métodos y condiciones de cada ensayo se describen a continuación.

- Penetración: según ASTM D5
- Punto de ablandamiento: según ASTM D36
- Viscosidad Rotacional: según ASTM D1439



### 5.3 Análisis de los resultados ensayos del asfalto

El resumen de los resultados de las pruebas realizadas se muestra en la siguiente tabla:

Tabla N° 13. Resultados de ensayos de laboratorio

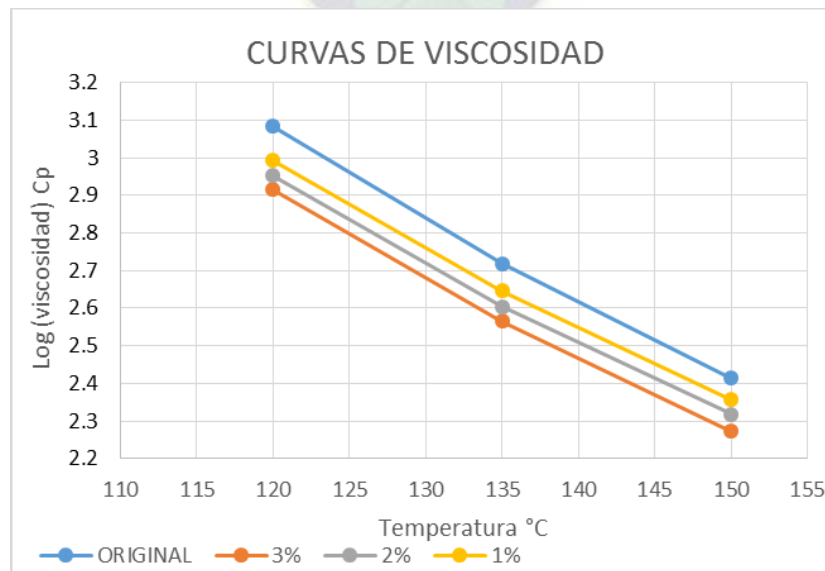
TIPO DE ASFALTO	PENETRACION A 25°C	PUNTO DE ABLANDAMIENTO	VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD (°C)			INDICE DE PENETRACION Ip
			120	135	150	
<b>Especificación</b>	ASTM D5	ASTM D36	ASTM D 4422			
<b>Unidad</b>	1/10 mm	°C	Cp			-
<b>Original 60/70</b>	62	50	1210	523	259	-0.7
<b>1% Honeywell Titan™ 7205</b>	52	53	982	442	227	-0.4
<b>2% Honeywell Titan™ 7205</b>	45	65	897	402	208	1.7
<b>3% Honeywell Titan™ 7205</b>	37	78.5	822	367	187	3.3

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran la tendencia esperada de reducción de la viscosidad a temperaturas intermedias y altas. La disminución de la viscosidad depende de la cantidad de aditivo adicionado obteniendo la mayor disminución para un 3% incorporado.

Graficando el logaritmo de los valores de viscosidad, se obtienen las curvas de viscosidad que se presentan a continuación.

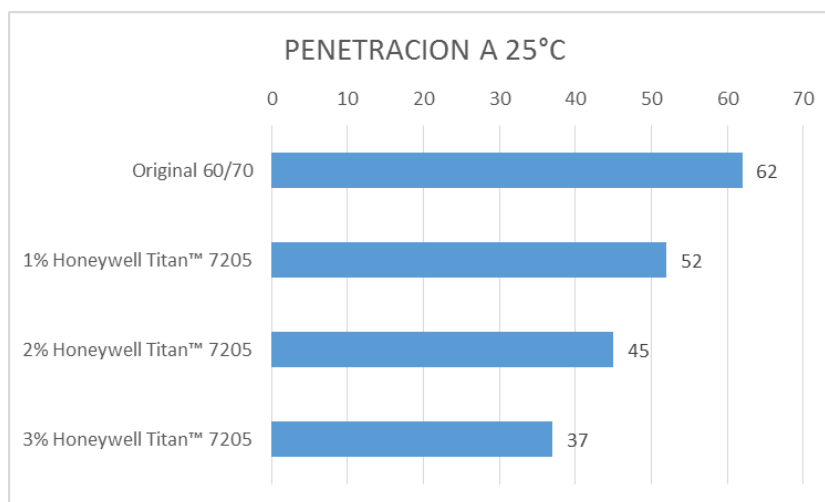
Gráfico N° 18. Viscosidades obtenidas en Viscosímetro Rotacional



Fuente: Elaboración propia

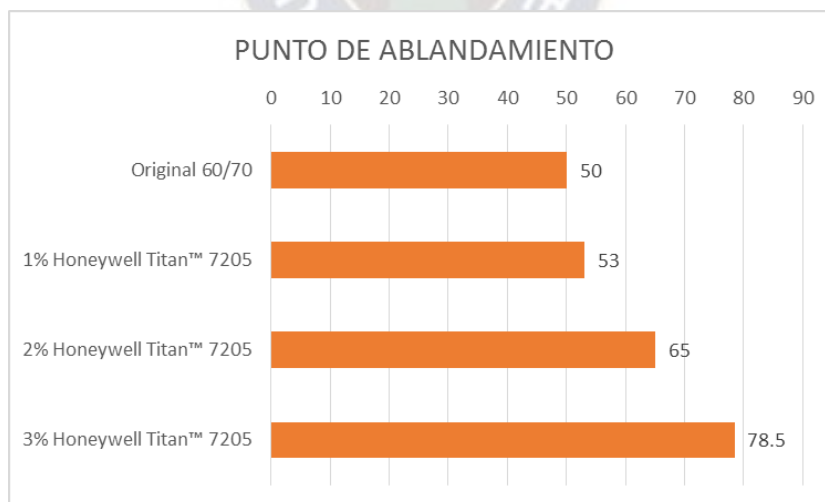
Para la temperatura por debajo del punto de fusión de la cera se observa, en el ensayo de penetración, que el valor disminuye proporcionalmente a mayor cantidad de aditivo, mientras que para el ensayo de punto de ablandamiento los valores se incrementan.

**Gráfico N° 19. Valores de penetración a 25°C**



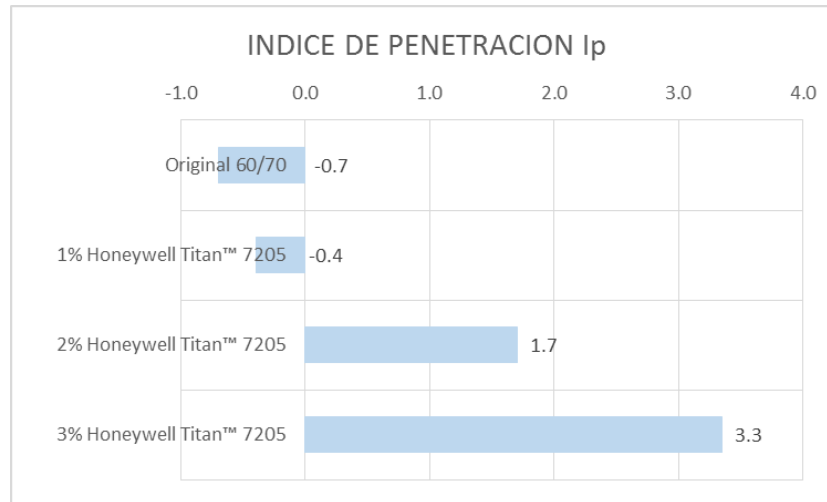
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico N° 20. Valores obtenidos del ensayo Punto de Ablandamiento**



Fuente: Elaboración propia

El Índice de penetración presenta un incremento desde valores negativos para el asfalto original, hasta valores positivos al incorporarse el aditivo. Se observa un incremento significativo para un valor de 2% de aditivo incorporado.

**Gráfico N° 21. Valores calculados del Índice de Penetración**

Fuente: Elaboración propia

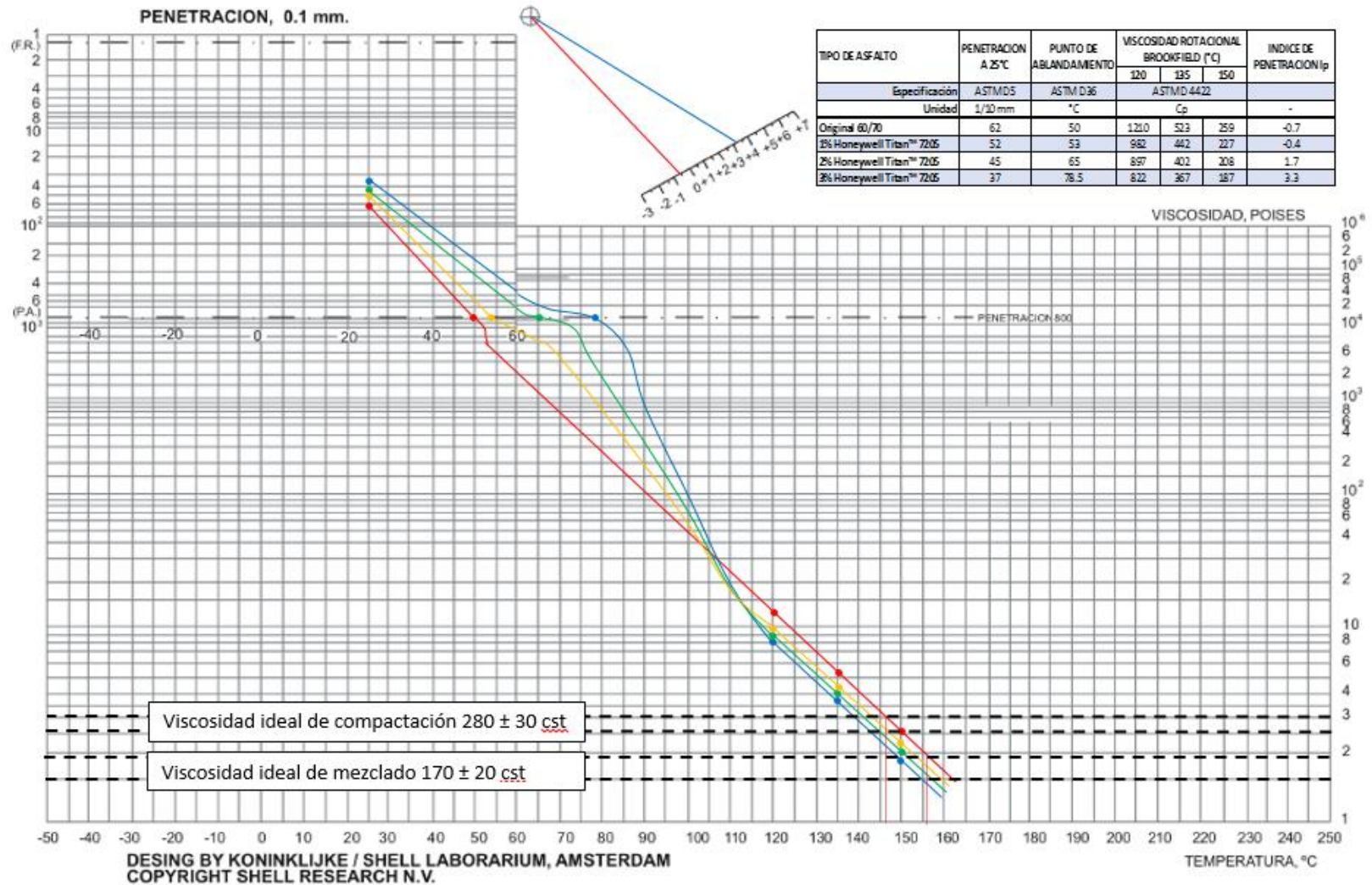
#### 5.4 Bitumen Test Data Chart (BTDC)

Los resultados de los ensayos efectuados en el viscosímetro rotacional (cP centipoises) se expresaron en unidades de Poises con el fin de situarlos en el Gráfico de Datos de Prueba de Betún (BTDC).

En este gráfico puede usarse para determinar la temperatura de mezclado y pavimentación y para ilustrar los cambios en las propiedades del asfalto después de la adición del aditivo.

El gráfico de BTDC está relacionado con el rendimiento del asfalto mediante la prueba de penetración y punto de ablandamiento asociada a las temperaturas en servicio, la viscosidad dinámica ligada a temperaturas mayores y la viscosidad cinemática que representa las temperaturas de mezcla y compactación y el punto de ruptura Fraass temperaturas bajas.

Gráfico N° 22. Gráfico BTDC



Fuente: Elaboración propia

Durante la producción de un asfalto es importante conocer las viscosidades del asfalto, si la viscosidad del asfalto es demasiado alta durante el mezclado, el agregado no será recubierto adecuadamente, mientras que si la viscosidad es demasiado baja, el asfalto cubrirá el agregado fácilmente pero puede drenar el agregado durante el almacenamiento o el transporte. Para un recubrimiento satisfactorio, la viscosidad debe ser de aproximadamente  $170 \pm 20$  cst [25].

Durante la compactación, si la viscosidad es demasiado baja, la mezcla será excesivamente móvil, dando como resultado el empuje del material delante del rodillo. Las viscosidades elevadas reducirán significativamente la trabajabilidad de la mezcla, y se conseguirá poca compactación adicional. Se reconoce ampliamente que la viscosidad óptima del asfalto para compactación está entre  $280 \pm 30$  cst [25].

Las temperaturas adoptadas para el asfalto 60/70 son:

- Temperatura de mezclado  $155^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de compactación  $145^{\circ}\text{C}$

### 5.5 Cálculo del Módulo de Rigidez del Asfalto

De acuerdo con lo indicado en el capítulo 3, a partir del nomograma de Van der Poel es posible estimar el módulo de rigidez del asfalto para condiciones dadas de temperatura y tiempo de carga, utilizando sólo penetración y punto de ablandamiento.

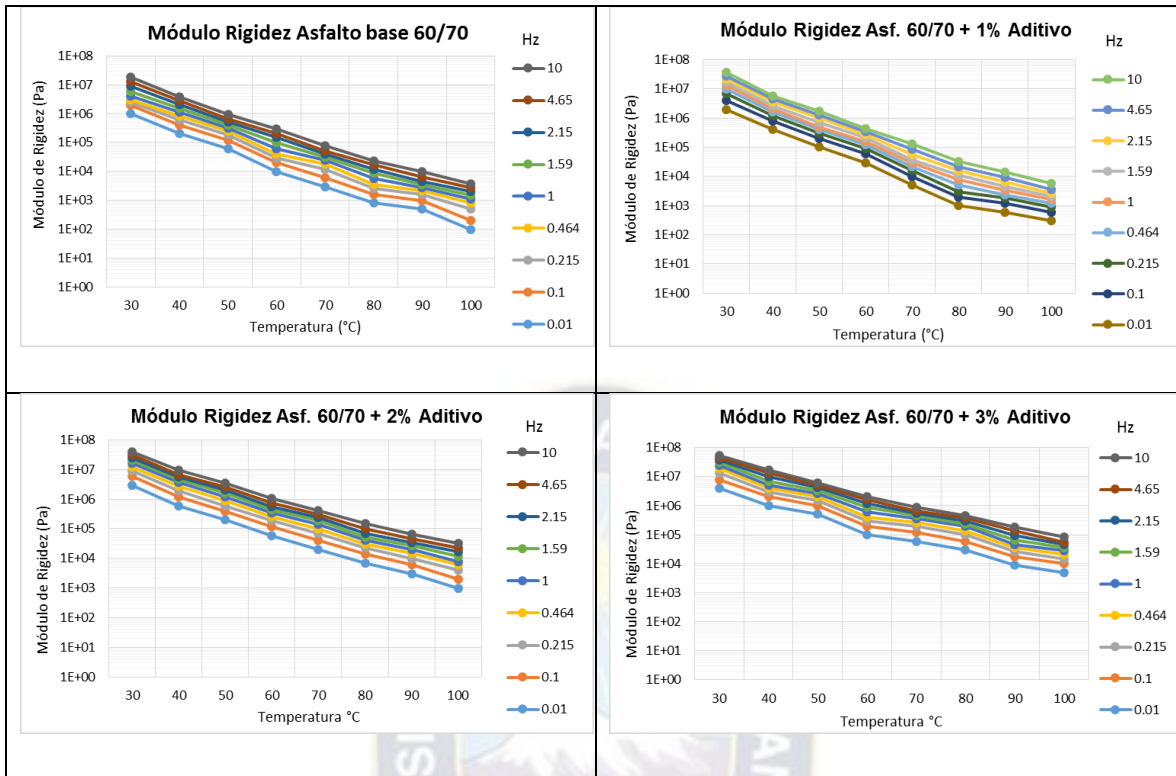
Para determinar estos valores se han considerado las siguientes condiciones de temperatura y tiempo de carga en Hz [ref. Martins Zaumanis]:

- Temperatura desde  $30$  a  $100^{\circ}\text{C}$  con un intervalo de  $10$  grados centígrados.
- Tiempo de carga para una variación en la frecuencia en Hertzios desde:  $0.01$ ,  $0.1$ ,  $0.215$ ,  $0.464$ ,  $1.0$ ,  $1.59$ ,  $2.15$ ,  $4.65$  y  $10.0$ .

Bajo las condiciones señaladas se obtuvieron los siguientes resultados:

#### Gráfico N° 23. Cálculo del módulo de rigidez versus temperatura

Gráfico N° 23. Cálculo del módulo de rigidez versus temperatura

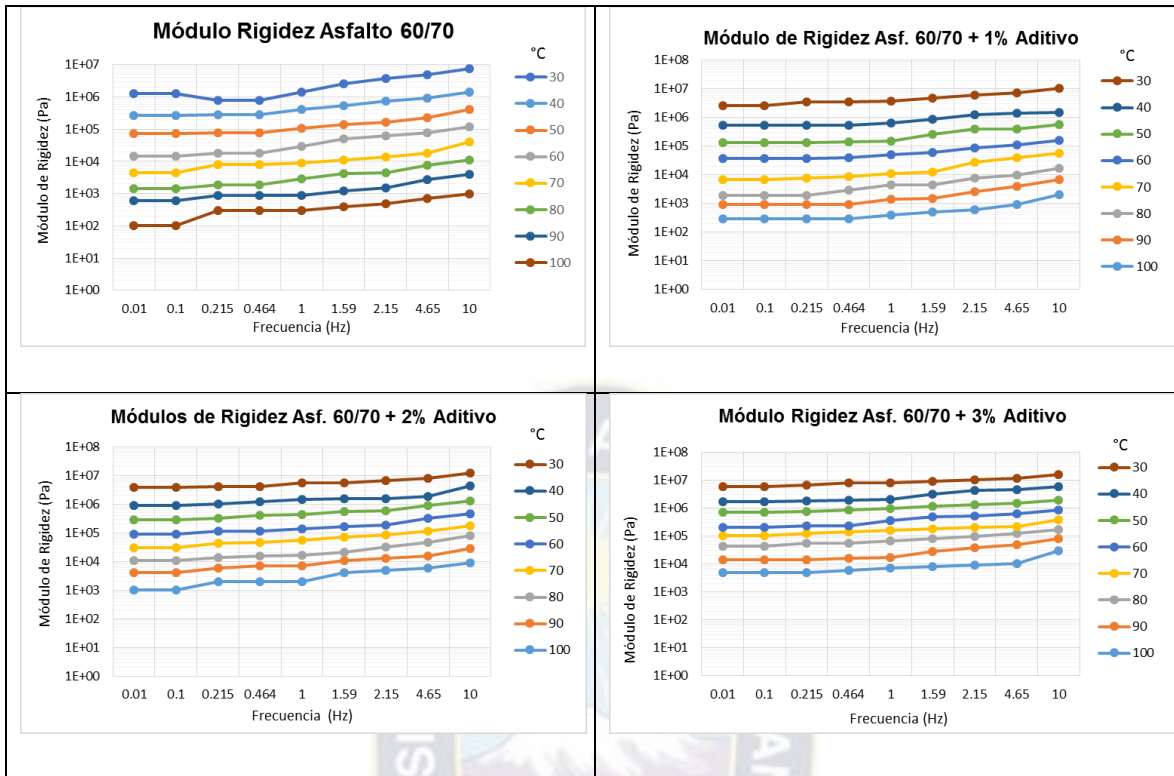


Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar de los gráficos obtenidos, el valor del módulo se incrementa cuando se evalúa a menor temperatura. En el asfalto base 60/70, por ejemplo para un ciclo de carga de 10 Hz, se observa una tendencia de incremento del módulo desde 1.000 Pa (100°C) hasta 6.000.000 Pa (30°C). Dicho incremento para el asfalto base más 3% de aditivo se presenta desde 30.000 Pa (100°C) hasta 10.000.000 Pa (30°C).



Gráfico N° 24. Cálculo del módulo de rigidez versus frecuencia



Fuente: Elaboración propia

De los gráficos anteriores se observa una tendencia de incremento en los valores del módulo a medida que se incrementa el ciclo de carga en Hz. En el asfalto base 60/70, por ejemplo para una temperatura de 30°C, se observa una tendencia de incremento del módulo desde 1.000.000 Pa (0.01 Hz) hasta 6.000.000 Pa (10 Hz). Dicho incremento para el asfalto base más 3% de aditivo se presenta desde 4.000.000 Pa (0.01 Hz) hasta 10.000.000 Pa (10 Hz).

## 5.6 Ensayo de Película Delgada

El ensayo de película delgada es un procedimiento que somete a la muestra de asfalto a condiciones de endurecimiento que se aproximan a aquellas que ocurren normalmente en las operaciones iniciales de mezcla en planta.

En la tabla a continuación se muestran los resultados de los ensayos de realizados para el asfalto original y con aditivo.

**Tabla N° 14. Resultados ensayo Película Delgada**

ENSAYO	Unidad	ASTM D 946		Tipo Asfalto	
		Mín.	Máx.	60/70	60/70+Titan3%
Penetración (25°C, 100g, 5 seg)	dmm	60	70	62	37
Punto de ablandamiento	°C	46	-	50	78
Ductilidad a 25°C, 5cm/min	cm	100	-	>100	>100
<b>Ensayo sobre el residuo de RTFOT</b>					
Pérdida de masa	%	-	0.8	0.19	0.25
Penetración retenida	%	52	-	53	31
Ductilidad a 25°C, 5cm/min.	cm	50	-	>50	40
Punto de ablandamiento	°C	-	-	78	79

**Fuente: Elaboración propia**

Como puede observarse en la tabla anterior, se presenta una disminución (endurecimiento) en la penetración del asfalto original 60/70, efecto normal debido al envejecimiento. Este efecto es menor para el asfalto con aditivo Titan al 3%, debido a que a temperaturas de servicio 25°C la cera se cristaliza, por lo que podemos inferir que experimenta un menor envejecimiento inicial a corto plazo.

Es notorio también el incremento del punto de ablandamiento para el asfalto original 60/70 debido al endurecimiento del mismo, efecto que no se presenta para el asfalto con aditivo Titan al 3%, debido a que es menos susceptible a la temperatura en condiciones de servicio (IP>1).

Las propiedades de ductilidad después del envejecimiento muestran que el asfalto con aditivo Titan al 3% es menos dúctil, debido al endurecimiento del mismo.

### 5.7 Punto de Fragilidad de Fraass (PFF)

Se define como punto de Fragilidad de Fraass a la temperatura en °C a la cual se observa la primera fisura o el primer rompimiento en la superficie de la película asfáltica a causa de la rigidez que va adquiriendo el material al enfriarse.

Para el presente trabajo de investigación se ha considerado el artículo publicado por los autores F Th Bats and G van Gooswilligen, Caracterización Reológica Práctica de Pavimentos Bituminosos [41], mediante el cual el PFF puede ser estimado con base en los valores de penetración e índice de penetración.

Los datos obtenidos de ensayos de laboratorio son los mostrados a continuación.

Tabla N° 14. Resultados ensayo Película Delgada

TIPO DE ASFALTO	PENETRACION A 25°C	INDICE DE PENETRACION Ip
<b>Especificación</b>	ASTM D5	
<b>Unidad</b>	1/10 mm	-
<b>Original 60/70</b>	62	-0.7
<b>60/70+1% Honeywell Titan™ 7205</b>	52	-0.4
<b>60/70+2% Honeywell Titan™ 7205</b>	45	1.7
<b>60/70+3% Honeywell Titan™ 7205</b>	37	3.3

Fuente: Elaboración propia

Con base en la información anterior se estimaron los valores del PFF con base en el siguiente gráfico.



---

## CAPITULO VI:

### 6. ENSAYOS DE MEZCLA ASFALTICA TIBIA

Este capítulo presenta los resultados experimentales efectuados en el Laboratorio de Asfaltos de la Universidad Técnica de Oruro.

Las propiedades de la mezcla tibia, generada a partir del aditivo Honeywell Titan 7250 al 3%, se evalúan y se comparan con las propiedades de la mezcla caliente patrón elaborada con asfalto 60/70.

Las características volumétricas, estabilidad Marshall, fluencia y módulo de rigidez se evalúan para las muestras WMA y HMA. También se discuten la temperatura óptima de mezcla y compactación.

La preparación de las muestras y las pruebas se realizaron de acuerdo con las normas ASTM. Los resultados de ensayos de caracterización de los agregados, granulometrías, combinación de agregados, diseño de mezcla asfáltica y cálculos completos de las pruebas se presentan en el Anexo A.

#### 6.1 Procedimiento experimental

El procedimiento se realizó en las etapas esquematizadas tal como se muestra en la Figura 23:

**Etapas 1:** Se definió la misma composición de agregados tanto para producir WMA como para HMA, a partir de dichas proporciones se elaboraron dos tipos de mezclas:

- a) Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente de referencia con asfalto base 60/70
- b) Diseño de Mezcla Asfáltica Tibia asfalto base más 3% de aditivo Honeywell Titan 7250

La temperatura de compactación para la mezcla de referencia se define en 145°C y se elaboran las probetas para realizar el diseño Marshall.

Se preparan probetas de la mezcla con 3% de aditivo Honeywell Titan 7250 con las siguientes temperaturas de compactación: 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C y 150°C y se mide sus densidades.

**Etapas 2:** Ejecutar el ensayo Marshall para la mezcla de referencia obteniendo los parámetros del ensayo.

Con base en la densidad máxima de la mezcla de referencia se calcula la temperatura de compactación de la mezcla tibia con 3% de aditivo Honeywell Titan 7250.

Ejecutar el ensayo Marshall para la mezcla con 3% de aditivo Honeywell Titan 7250 obteniendo los parámetros del ensayo.

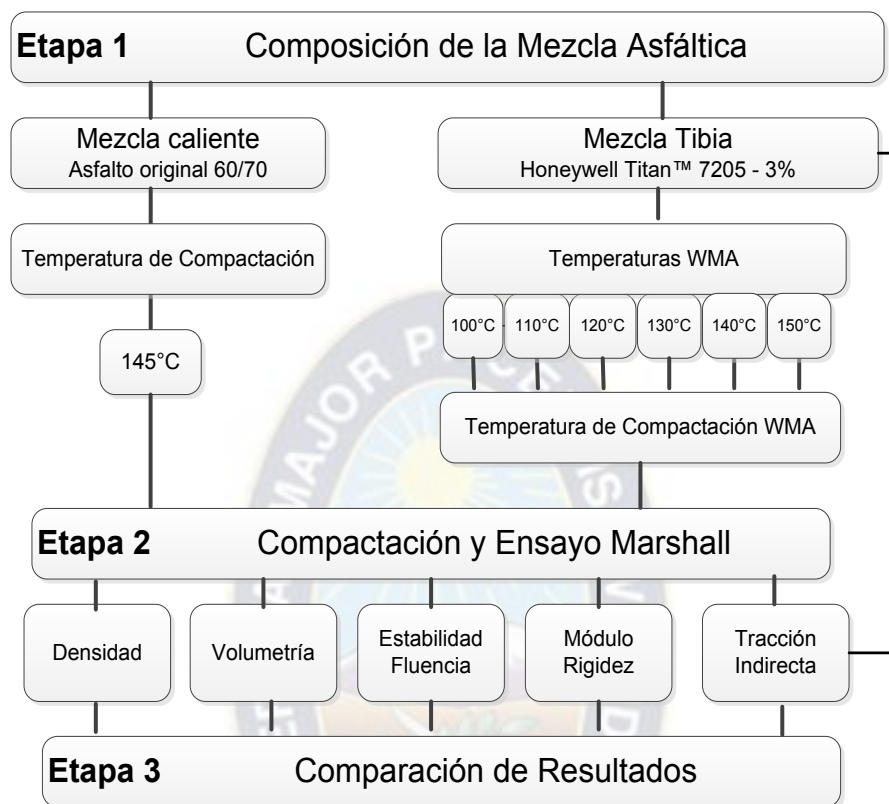
Realizar el cálculo de las propiedades físicas y volumétricas de ambas mezclas elaboradas, determinar el módulo de rigidez de las mezclas y la tracción indirecta.

**Etapas 3:** Comparación de los resultados:

- e) Comparación del porcentaje de vacíos de la mezcla
- f) Comparación de las densidades de compactación
- g) Comparación de la fluencia de ambas mezclas
- h) Comparación de módulo de rigidez
- i) Comparación del ensayo de Tracción Indirecta



Figura N° 23. Procedimiento experimental para la mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia

## 6.2 Composición de la mezcla

### 6.2.1 Agregados

Los agregados empleados para este trabajo de investigación corresponden a los producidos en el Proyecto de asfaltado del tramo Uyuni – Atocha en el banco de préstamos denominado “Tres Cerrillos”.

Los tamaños nominales de la producción del agregado grueso corresponden a  $\frac{3}{4}$ ” y  $\frac{3}{8}$ ”.

Los ensayos realizados para la caracterización de los agregados fueron:

- Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos      ASTM C136
- Peso específico y absorción del agregado grueso      ASTM C127
- Peso específico y absorción del agregado fino      ASTM C 128

### 6.2.1.1 Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos

Para el propósito de la presente investigación se realizó el análisis granulométrico para la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente, habiéndose utilizado las normas ASTM D3515 y AASHTO M 323 para un tamaño máximo nominal  $\frac{3}{4}$ " y la faja "C" de la especificación establecida por la Administradora Boliviana de Carretas (ABC) también para un tamaño máximo de  $\frac{3}{4}$ ".

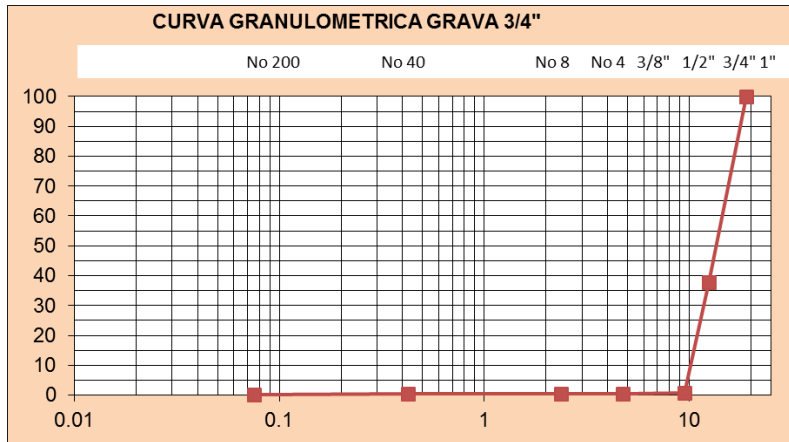
La tabla a continuación muestra los límites que corresponden a ambas Normas.

Tabla N° 15. Límites de granulometría

TAMIZ No	ABERTURA (mm)	ASTM D 3515 D4		FAJA "C" - ABC		AASHTO M 323	
		LIMITES		LIMITES		LIMITES	
		Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
1"	25	100	100	-	-	100	-
$\frac{3}{4}$ "	19	90	100	97	100	90	100
$\frac{1}{2}$ "	12.5	-	-	76	88	-	90
$\frac{3}{8}$ "	9.5	56	80	-	-	-	-
Nº4	4.75	35	65	49	59	-	-
Nº8	2.36	23	49	36	45	23	49
Nº16	1.18	-	-	-	-	-	-
Nº 30	0.6	-	-	-	-	-	-
Nº 40	0.475	-	-	14	22	-	-
Nº 50	0.3	5	19	-	-	-	-
Nº100	0.15	-	-	-	-	-	-
Nº200	0.075	2	8	3	7	2	8

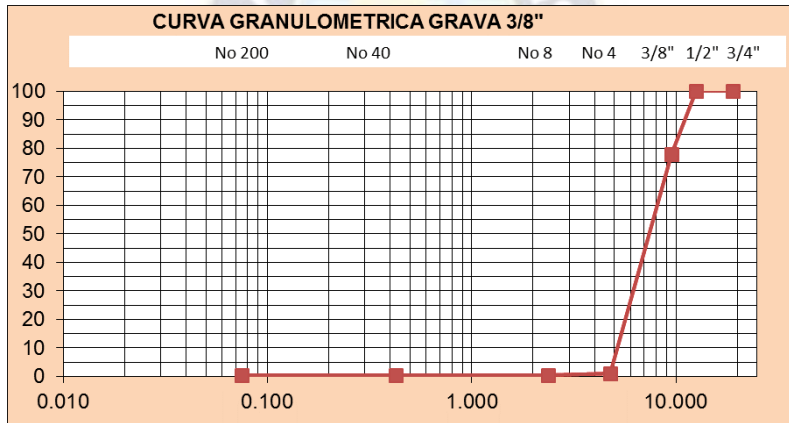
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico N° 25. Curva granulométrica grava 3/4"**



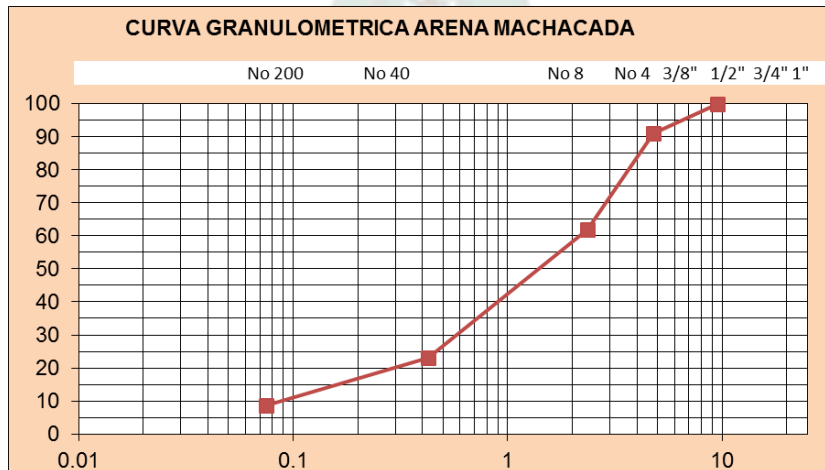
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico N° 26. Curva granulométrica grava 3/8"**



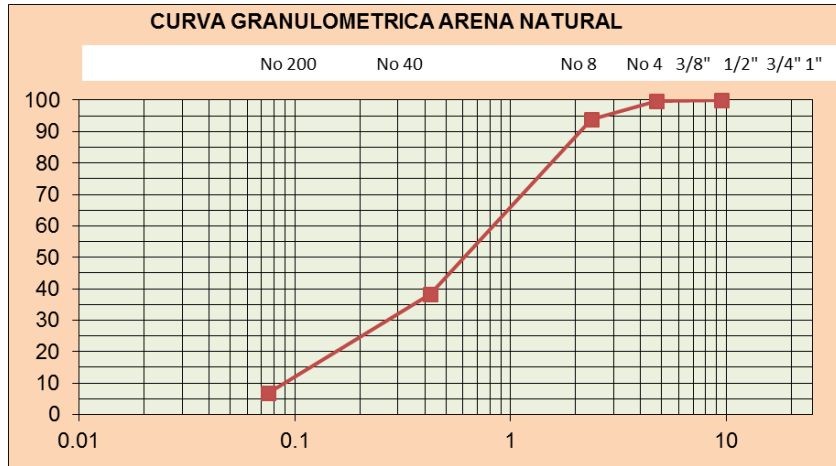
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico N° 27. Curva granulométrica arena chancada**



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 28. Curva granulométrica arena natural



Fuente: Elaboración propia

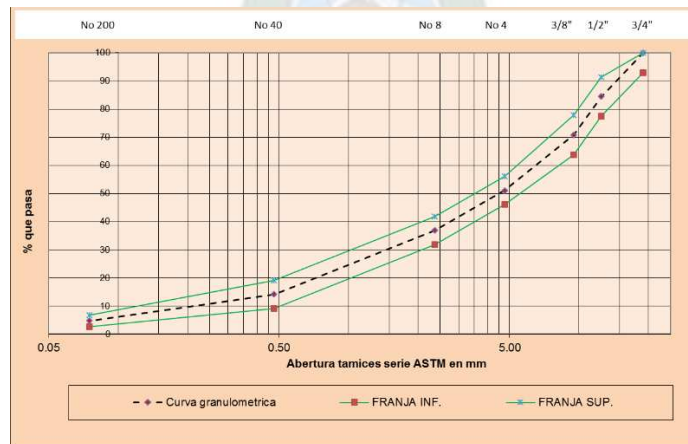
Del análisis realizado se ha determinado dos combinaciones que cumplen las especificaciones antes citadas cuyas composiciones se muestran a continuación.

Tabla N°16. Composición de mezcla especificación Faja "C" - ABC

No	DIAMETRO mm.	AGREGADOS GRANULOMETRIA				COMBINACIONES				GRANUL. FINAL 100%	ESPECIFICACIONES TECNICAS ABC "C" 3/4"
		GRAVA 3/4"	GRAVA 3/8"	AREN MACH	ARE NAT	GRAVA 3/4"	GRAVA 3/8"	AREN MACH	ARE NAT		
		PQP %	PQP %	PQP %	PQP %	25%	20%	47%	8%		
3/4"	19.00	100.00	100.00	100.00	100.00	25.00	20.00	47.00	8.00	100.0	97 - 100
1/2"	12.50	37.75	100.00	100.00	100.00	9.44	20.00	47.00	8.00	84.4	76 - 88
3/8"	9.50	0.84	78.11	100.00	100.00	0.21	15.62	47.00	8.00	70.8	
N4	4.75	0.45	0.92	91.08	99.70	0.11	0.18	42.81	7.98	51.1	49 - 59
N8	2.36	0.41	0.47	62.02	94.00	0.10	0.09	29.15	7.52	36.9	36 - 45
N40	0.475	0.35	0.39	23.20	38.42	0.09	0.08	10.90	3.07	14.1	14 - 22
N200	0.075	0.25	0.31	8.59	6.72	0.06	0.06	4.04	0.54	4.7	3 - 7

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 29. Curva granulométrica combinada especificación Faja "C" - ABC



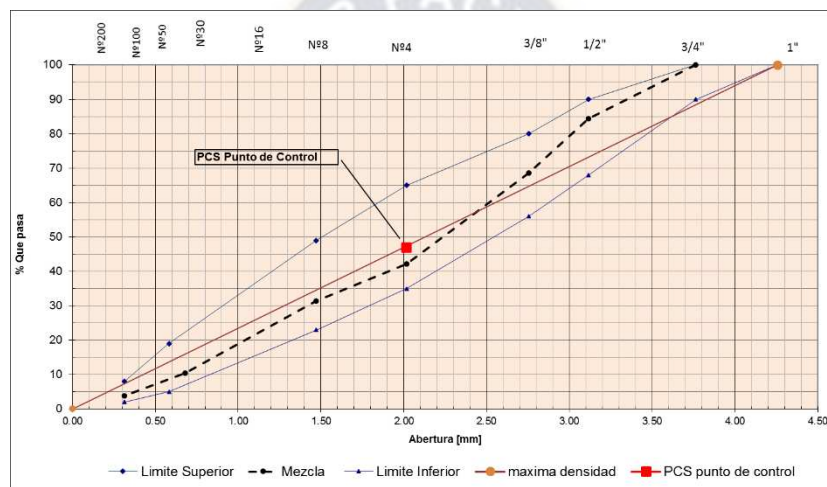
Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 17. Composición de mezcla especificaciones ASTM D3515 y AASHTO M 323

COMBINACION DE AGREGADOS																	
No	DIAMETRO mm	AGREGADOS GRANULOMETRIA				COMBINACIONES				GRANUL FINAL 100%	ESPECIFICACIONES TECNICAS						
		GRAVA 3/4 PQP %	GRAVA 3/8 PQP %	AREN MACH PQP %	AREN NAT PQP %	GRAVA 3/4 25%	GRAVA 3/8 30%	AREN MACH 35%	AREN NAT 10%		No	ASTM D 3515	AASHTO M 323				
3/4"	19.000	100.00	100.00	100.00	100.00	25.00	30.00	35.00	10.00	100.00	3/4"	90	-	100	90	-	100
1/2"	12.500	37.75	100.00	100.00	100.00	9.44	30.00	35.00	10.00	84.44	1/2"	-	-	-	-	-	90
3/8"	9.500	0.84	78.11	100.00	100.00	0.21	23.43	35.00	10.00	68.64	3/8"	56	-	80	-	-	-
N4	4.750	0.45	0.92	91.08	99.70	0.11	0.28	31.88	9.97	42.24	N4	35	-	65	-	-	-
N8	2.360	0.41	0.47	62.02	94.00	0.10	0.14	21.71	9.40	31.35	N8	23	-	49	23	-	49
N40	0.425	0.35	0.39	18.20	38.42	0.09	0.12	6.37	3.84	10.42	N50	5	-	19	-	-	-
N200	0.075	0.25	0.31	8.59	6.72	0.06	0.09	3.01	0.67	3.83	N200	2	-	8	2	-	8

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 30. Curva granulométrica método SUPERPAVE



Fuente: Elaboración propia

La Norma AASHTO M 323 define al PCS como el tamiz que define el punto de corte entre mezclas finas y gruesas para cada tamaño de agregado máximo nominal, cuyos valores se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N° 17. PCS punto de control para el tamaño agregado nominal máximo de la mezcla (% que pasa)

Tamaño del agregado máximo nominal	37.5 mm	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.5 mm
Tamiz Primario de Control	9.5 mm	4.75 mm	4.75 mm	2.36 mm	2.36 mm
PCS Punto de Control (% que pasa)	47	40	47	39	47

Fuente: Elaboración propia

Finalmente la norma señala que cuando la combinación de agregados pasa por debajo del punto de control PCS será clasificada como agregado grueso, mientras que si pasa por encima será clasificada como agregado fino.

La mezcla elaborada para el presente trabajo tiene un tamaño máximo nominal de 19 mm y un PCS de 47 para el tamiz No 4, la curva granulométrica pasa por debajo del PCS, como se observa en el gráfico No 30 y es clasificada como agregado grueso.

Dado que los agregados ensayados permiten obtener una buena gradación y cumplir con la especificación ASTM D3515, se elige esta combinación que cumple con el método de Diseño SUPERPAVE cuya graduación provee una máxima densidad de la mezcla.

#### 6.2.1.2 Pesos específicos y absorción de agregados fino y grueso

Los valores de los pesos específicos de los agregados fino y grueso se emplearán posteriormente en la determinación de los factores volumétricos de la mezcla asfáltica.

Los resultados de los pesos específicos Bulk de los agregados finos y gruesos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 18: Pesos específicos de los agregados. Fuente: ensayos laboratorio UTO<sup>2</sup>

	Agregado Grueso	Agregado Fino
Peso específico Bulk (Gsb) (gr/cc)	2.595	2.527

Fuente: Elaboración propia

<sup>2</sup> Universidad Técnica de Oruro – Laboratorio de Asfaltos



### 6.3 Preparación de las probetas de ensayo

En la Tabla 19 se muestra la distribución de los agregados para la elaboración de las probetas de ensayo. El peso total del agregado requerido para cada probeta es 1200 gr.

Tabla N° 19. Composición granulométrica de la mezcla

COMBINACION DE AGREGADOS																	
No	DIAMETRO mm	AGREGADOS GRANULOMETRIA				COMBINACIONES				GRANUL FINAL 100%	ESPECIFICACIONES TECNICAS						
		GRAVA 3/4" PQP %	GRAVA 3/8" PQP %	AREN MACH PQP %	AREN NAT PQP %	GRAVA 3/4" 25%	GRAVA 3/8" 30%	AREN MACH 35%	AREN NAT 10%		No	ASTM D 3515	AASHTO M 323				
3/4"	19.000	100.00	100.00	100.00	100.00	25.00	30.00	35.00	10.00	100.00	3/4"	90	-	100	90	-	100
1/2"	12.500	37.75	100.00	100.00	100.00	9.44	30.00	35.00	10.00	84.44	1/2"	-	-	-	-	-	90
3/8"	9.500	0.84	78.11	100.00	100.00	0.21	23.43	35.00	10.00	68.64	3/8"	56	-	80	-	-	-
N4	4.750	0.45	0.92	91.08	99.70	0.11	0.28	31.88	9.97	42.24	N4	35	-	65	-	-	-
N8	2.360	0.41	0.47	62.02	94.00	0.10	0.14	21.71	9.40	31.35	N8	23	-	49	23	-	49
N40	0.425	0.35	0.39	18.20	38.42	0.09	0.12	6.37	3.84	10.42	N50	5	-	19	-	-	-
N200	0.075	0.25	0.31	8.59	6.72	0.06	0.09	3.01	0.67	3.83	N200	2	-	8	2	-	8

Fuente: Elaboración propia

La temperatura de mezclado para la mezcla asfáltica en caliente de control, fue de 155°C de acuerdo con lo obtenido en el nomograma de Heukelom.

### 6.4 Compactación

La compactación se realizó de acuerdo con el método Marshall, utilizando un martillo de 10 lb de peso con una altura de caída de 18"; se aplicaron 75 golpes por cada cara de las probetas de ensayo que corresponde a tráfico pesado según las recomendaciones establecidas por el Instituto del Asfalto de los Estados Unidos de Norteamérica.

Tabla N° 20. Criterios de Diseño del Método Marshall

CRITERIOS METODO MARSHALL	Tráfico Ligero		Tráfico Medio		Tráfico Pesado	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Compactación, número de golpes en cada cara de las briquetas	35		50		75	
Estabilidad Marshall (lb)	750	---	1200	---	1800	---
Flujo (0.25 mm) (0.01 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de Vacíos (%)	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral VAM (%) Tamaño Máx. 3/4"	12	---	13	---	14	---

CRITERIOS METODO MARSHALL	Tráfico Ligero		Tráfico Medio		Tráfico Pesado	
	Mín.	Máy.	Mín.	Máy.	Mín.	Máy.
Porcentaje de vacío rellenos de Asfalto (%)	70	80	65	78	65	75

Fuente: Instituto del Asfalto de EE.UU. [34]

### 6.5 Diseño Marshall de la Mezcla de Control

El diseño Marshall elaborado sobre la mezcla asfáltica en caliente de control con asfalto 60/70 convencional determina valores de contenido de asfalto para los siguientes parámetros:

- Estabilidad Marshall 5.7 %
  - Gravedad Específica 6.3 %
  - Vacíos de la Mezcla  $V_a$  6.2 %
- Promedio 6.06 %**

Se adopta un porcentaje de 6% valor que cumple con los criterios de tráfico pesado según los criterios de Manual del Instituto del Asfalto [34].

Los resultados del diseño se muestran en resumen en la siguiente tabla y gráfico mostrados a continuación. El detalle donde se incluyen el cálculo de gravedades específicas de agregados y el peso específico del asfalto se incluye en Anexo al presente trabajo.

Tabla N° 21. Diseño Método Marshall mezcla caliente de control

**DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE - METODO MARSHALL**

**ASTM D 6929    ASTM D 6927    ABC A0613**

PROYECTO: "ELABORACION DE MEZCLAS ASFALTICAS TIBIAS MEDIANTE EL USO DE CERA POLIETILENICA" COMPACTACION 75 (G/C)  
 CA 60-70  
 FECHA: 22 de diciembre del 2017 FACTOR ANILLO 9.63 Lb./Div  
 Gravedad Especifica Efectiva del agregado Total Gse. = 2.637     $G_b = 1.008 \text{ gr./cc}$     Gravedad Especifica Bulk del agregado Total Gsb. = 2.573

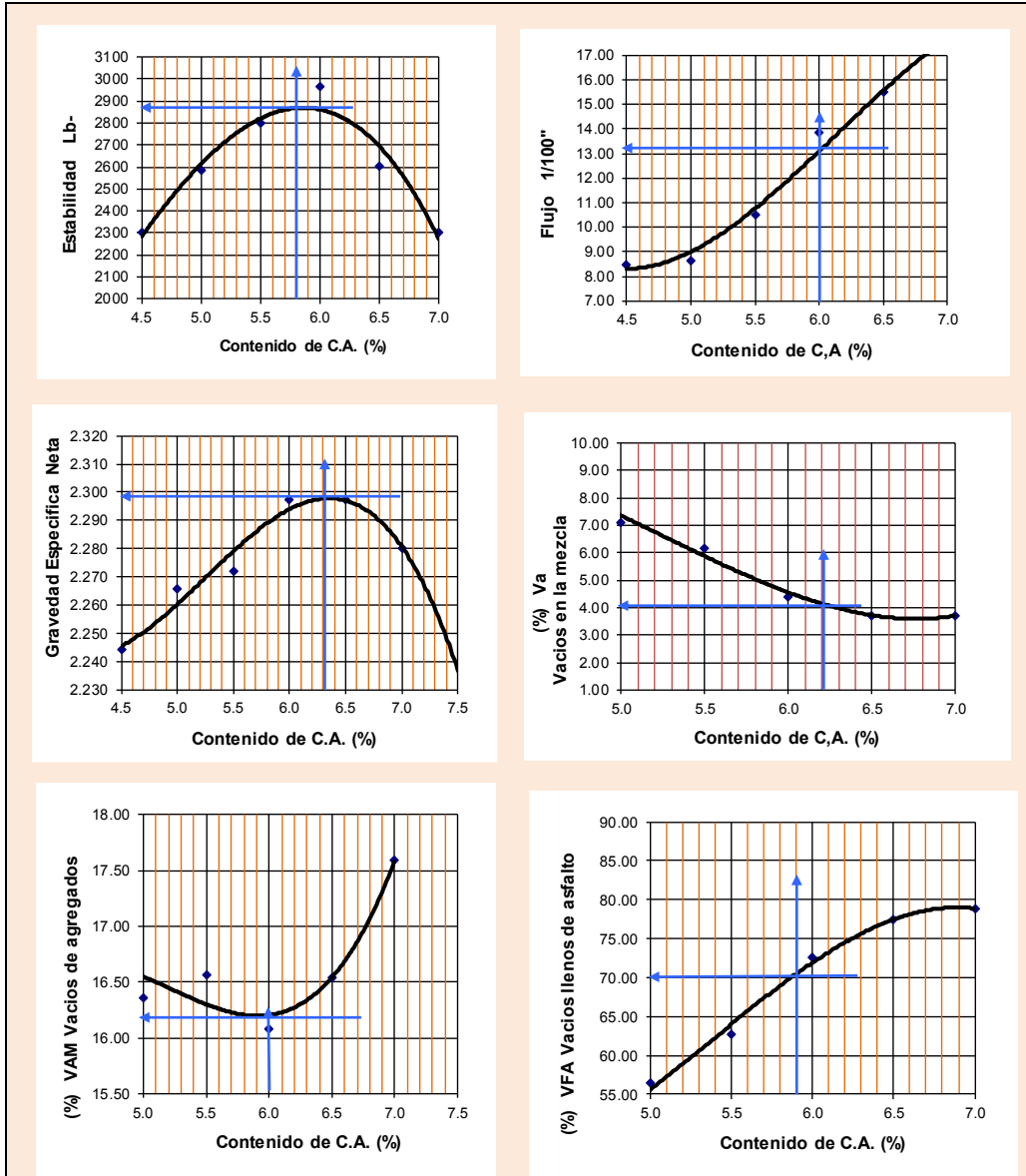
Identificación	Peso Agregados calientes gr.	Peso Asfalto calientes gr.	Altura de Briqueta cm.	Porcent de Asfalto b	Peso de Briqueta en			Volumen Briqueta cc f	Gravedad Especifica			% de Vacios			Factor de Altura	Estabilidad Marshall lb			Flujo 1/100"					
					En el aire (Gr.) c	sup seca (Gr.) d	En el agua (Gr.) e		Bulk (briqueta) Gmb. j	Promedio (briqueta) Gmb. k	Maxima Teorica Gmm. l	Mezcla Va m	Agregados VAM n	Llenos de asfalto VFA o		Lectura del Dial p	Real q	Media	Real s	Media s1				
									d-e	c / f		(1)	(2)	(3)		(4)								
1			6.34	4.50	1,134.9	1,139.7	630.6	509.1	2.229					1.0030	246	2376.1		8.0						
2			6.35	4.50	1,130.8	1,136.6	636.2	500.4	2.260					1.0000	230	2214.9		9.0						
3			6.32	4.50	1,132.5	1,136.7	631.8	504.9	2.243	2.244	2.458	8.70	16.72	47.96	1.0080	238	2310.3	2,300	8.5 8.5					
4			6.33	5.00	1,138.4	1,142.7	636.2	506.5	2.248					1.0050	260	2516.3		9.5						
5			6.31	5.00	1,132.5	1,137.2	639.4	497.8	2.275					1.0110	255	2482.7		8.5						
6			6.34	5.00	1,135.4	1,139.4	640.2	499.2	2.274	2.266	2.440	7.13	16.36	56.43	1.0030	285	2752.8	2,584	8.0 8.7					
7			6.38	5.50	1,143.5	1,148.7	647.3	501.4	2.281					0.9925	280	2676.2		11.0						
8			6.39	5.50	1,140.0	1,144.3	641.3	503.0	2.266					0.9900	300	2860.1		10.5						
9			6.38	5.50	1,142.5	1,148.0	644.5	503.5	2.269	2.272	2.421	6.17	16.56	62.77	0.9925	300	2867.3	2,801	10.0 10.5					
10			6.37	6.00	1,149.5	1,154.1	654.1	500.0	2.299					0.9950	307	2941.6		14.0						
11			6.36	6.00	1,148.0	1,152.4	653.1	499.3	2.299					0.9975	315	3025.9		13.5						
12			6.40	6.00	1,148.6	1,153.4	652.7	500.7	2.294	2.297	2.404	4.42	16.08	72.52	0.9875	307	2919.5	2,962	14.0 13.8					
13			6.36	6.50	1,150.1	1,153.2	652.9	500.3	2.299					0.9975	262	2516.8		16.0						
14			6.38	6.50	1,153.2	1,157.1	654.6	502.5	2.295					0.9925	284	2714.4		15.5						
15			6.39	6.50	1,148.6	1,151.2	651.3	499.9	2.298	2.297	2.386	3.73	16.53	77.47	0.9900	270	2574.1	2,602	15.0 15.5					
16			6.40	7.00	1,153.4	1,155.6	648.4	507.2	2.274					0.9875	231	2196.7		18.0						
17			6.38	7.00	1,151.6	1,154.9	649.6	505.3	2.279					0.9925	245	2341.7		17.0						
18			6.39	7.00	1,154.7	1,157.0	652.3	504.7	2.288	2.280	2.369	3.73	17.59	78.79	0.9900	248	2364.4	2,301	16.5 17.2					

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico N° 31. Diseño Marshall de la mezcla de control**

**DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE - METODO MARSHALL**

PROYECTO: "ELABORACION DE MEZCLAS ASFALTICAS TIBIAS MEDIANTE EL USO DE CERA POLIETILENICA"



VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO MARSHALL

CARACTERISTICAS	% DE ASFALTO	VALORES CON % C.A.	ESPECIFICACIONES
Estabilidad (Lb.)	6.00	2962	> 1800 Lb. (75 Golpes)
Gravedad Especifica Neta Gmb.	6.00	2.297	.....
% de Vacios de la Mezcla (Va)	6.00	4.42	3 - 5
% de Vacios de Agregado Mineral (VAM)	6.00	16.08	≥ 14
% de Vacios Llenos de Asfalto (VFA) = R.B.V.	6.00	72.52	65 - 75
Fluencia 1 / 100"	6.00	13.8	8 - 14
<b>OPTIMO PROMEDIO DE ASFALTO ( % )</b>		<b>6.00</b>	
Consideracion Va= 4.42 %			

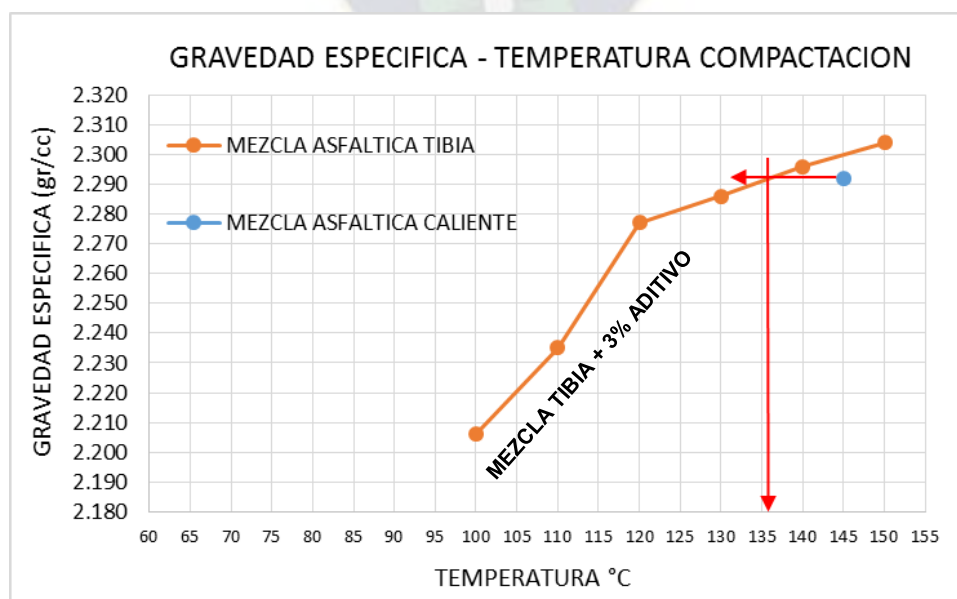
Fuente: Elaboración propia

## 6.6 Temperatura de compactación de Mezcla Tibia

Para la determinación de la temperatura de compactación de la mezcla tibia se adoptó la metodología citada en el numeral 2.8.3 del presente trabajo, la que recoge las recomendaciones de la Asociación de Pavimentos Asfálticos de Alemania [26] para definir la temperatura de compactación de una mezcla tibia, a través de la elaboración de muestras de mezcla tibia a diferentes temperaturas de compactación: 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C y 150°C y determinando sus gravedades específicas expresadas en un gráfico Gravedad Específica – Temperatura Compactación.

A partir de los datos obtenidos, con el propósito de lograr una composición óptima de la mezcla asfáltica tibia, se incluye en el gráfico el valor de la gravedad específica de la mezcla de control y se determina la temperatura de compactación de la mezcla tibia para la misma gravedad específica de la mezcla de control con un valor de 2.297 gr/cc. Los resultados se muestran a continuación.

Gráfico N° 32. Determinación de temperatura de compactación WMA



Fuente: Elaboración propia

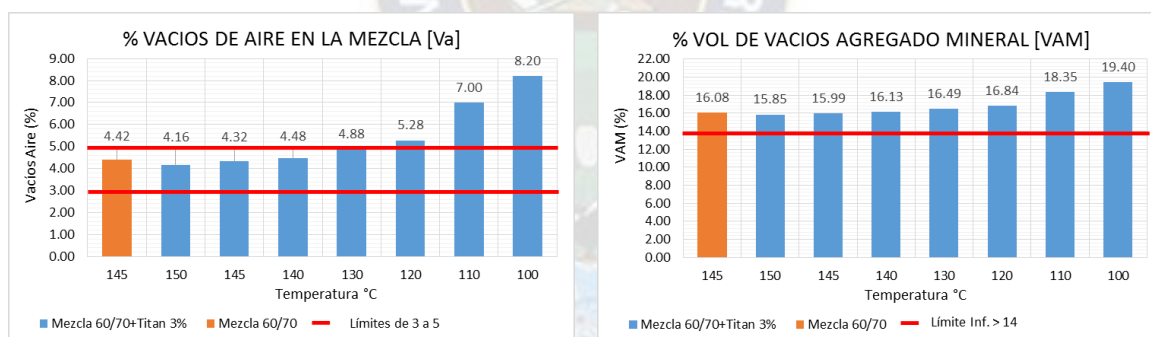
Como puede observarse la temperatura de compactación de la mezcla producida con asfalto 60/70 más 3% de aditivo Honeywell Titan es de 135°C.

La cantidad de 3% aditivo utilizado corresponde a la máxima recomendada por el fabricante, es decir, que con esta dosificación se logró obtener la menor temperatura de compactación posible que el aditivo utilizado puede alcanzar, ya que al disminuir dicha cantidad la temperatura tendería a incrementarse de acuerdo con lo indicado en el acápite 2.8.1 del presente trabajo.

## 6.7 Evaluación del Porcentaje de Vacíos

A continuación se muestra en el Gráfico 33 la evaluación comparativa de los porcentajes de vacíos en la mezcla (Va) y el porcentaje de vacíos de agregado mineral (VAM), y su variación a diferentes temperaturas.

**Gráfico N° 33. Comparación % de vacíos**



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en ambos casos el porcentaje de vacíos se incrementa a menor temperatura de compactación, se percibe que existen leves incrementos en el porcentaje de vacíos hasta 130°C y que a partir de este valor el incremento es mucho mayor. Este efecto se debe al incremento en la viscosidad del asfalto a menor temperatura lo que no permite que la compactación sea la óptima y disminuya la estabilidad Marshall y se incremente el flujo de la mezcla.



Cabe destacar que la temperatura de compactación a 130°C, donde no se aprecia una variación considerable en el porcentaje de vacíos, coincide razonablemente con la temperatura de compactación definida para la mezcla tibia en el numeral 6.6, por lo que dicha temperatura se puede establecer por ambos procedimientos.

### 6.8 Módulo de Rigidez de las Mezclas

De acuerdo con lo señalado en el numeral 4.1.3 del presente trabajo, se puede calcular el Módulo de rigidez de la mezcla a partir del modelo de predicción de Shell [25] que en la forma de un nomógrafo requiere tres parámetros:

- el módulo de rigidez del asfalto
- el porcentaje de volumen del asfalto
- el porcentaje de volumen del agregado mineral

De la volumetría de las mezclas de control en caliente y la mezcla tibia a partir del aditivo Honeywell Titan al 3%, se calculan los parámetros requeridos:

Tabla N° 22. Composición volumétrica de las mezclas (%)

TIPO MEZCLA	Aire	Asfalto	Agregado
Asfalto 60/70	5.195	9.675	85.130
Asfalto 60/70+Titan 3%	5.180	11.300	83.520

Fuente: Elaboración propia

Para la determinación de los módulos de ambos tipos de mezclas se consideró adoptar la rigidez del asfalto a una temperatura de 30°C y una frecuencia de 10 Hz, cuyos resultados son:

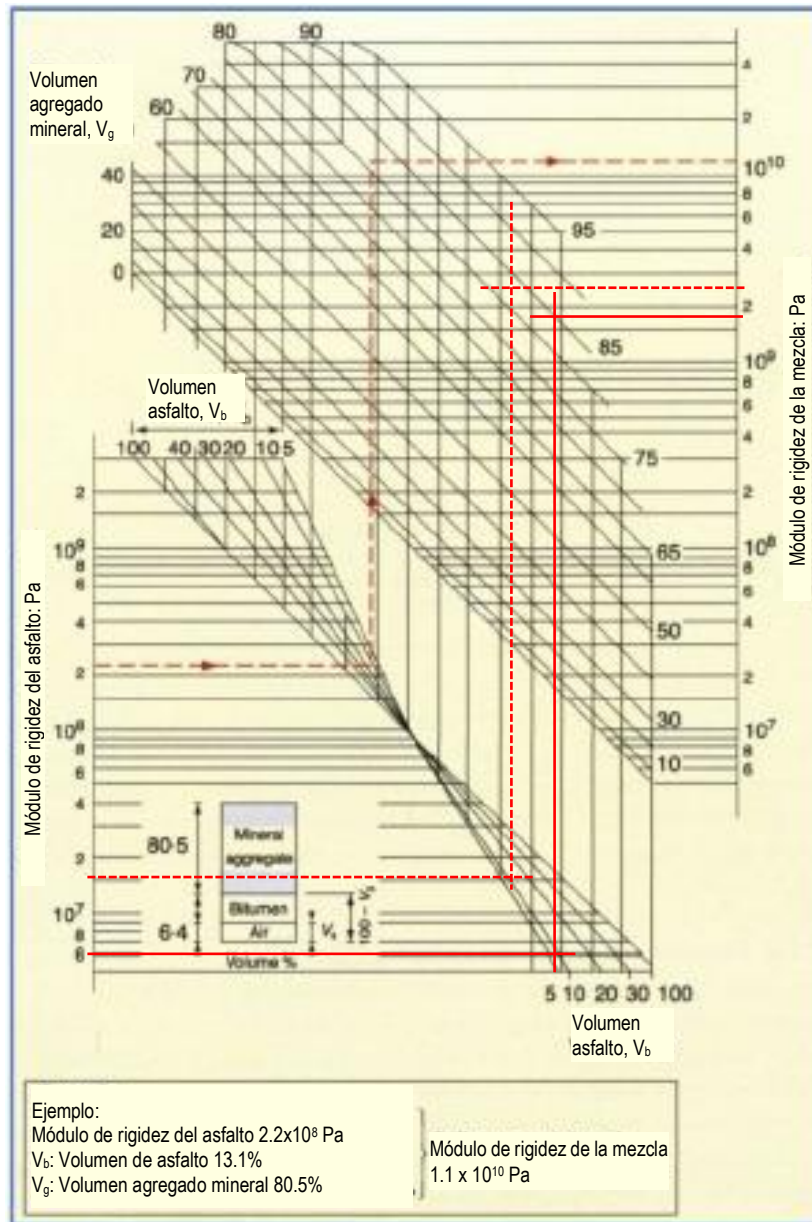
- 6.000.000 Pa ( $6 \times 10^6$ ) Asfalto 60/70
- 10.000.000 Pa ( $1 \times 10^7$ ) Asfalto 60/70+Titan3%

Con los datos antes indicados y utilizando el nomograma del gráfico 34 para la predicción del módulo de rigidez, se obtienen los siguientes valores.

- $1.8 \times 10^9$  Pa = 1800 MPa para la mezcla con Asfalto 60/70
- $2.5 \times 10^9$  Pa = 2500 MPa para la mezcla con Asfalto 60/70+Titan3%

El mayor módulo de rigidez de la mezcla con asfalto 60/70 con aditivo Titan al 3% se debe principalmente al mayor módulo de rigidez del asfalto, producto de la adición del aditivo Honeywell Titan 3750.

Gráfico N° 34. Predicción módulo rigidez de la mezcla



Fuente: Elaboración propia

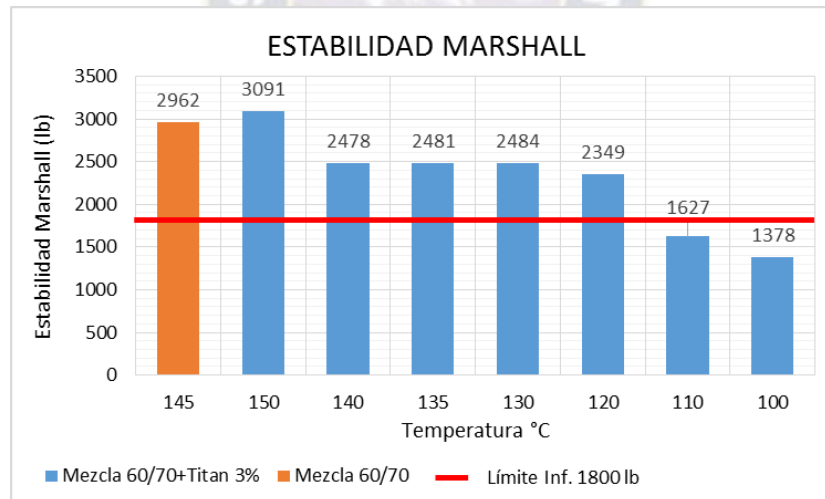
## 6.9 Estabilidad y fluencia de la mezcla

Los resultados de la estabilidad de Marshall, que son una medida de la carga máxima aplicada a cada muestra antes de la falla, se muestran en el Gráfico 35.

Los resultados para la mezcla con Titán al 3% muestran una tendencia a la disminución de la carga aplicada a medida que se disminuye la temperatura de compactación, tendencia razonable pues a menor temperatura la compactación no logra una adecuada densificación de la mezcla.

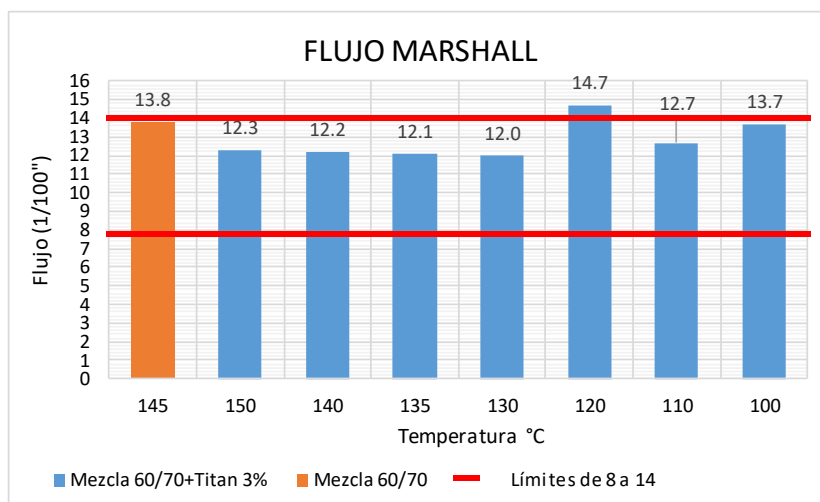
Comparando la estabilidad entre la mezcla patrón y la mezcla con Titan al 3%, se observa que ésta última tiene 484 lb menos de estabilidad Marshall, sin embargo, esta disminución no afecta a la mezcla con Titan al 3% ya que el valor de 2.478 lb es mucho mayor a 1.800 lb recomendado para tráfico pesado.

**Gráfico N° 35. Comparación estabilidad Marshall**



**Fuente: Elaboración propia**

Los resultados del flujo de Marshall, que es la cantidad de deformación de la mezcla antes de que se produzca el fallo, se presentan en el Gráfico 36. El flujo puede considerarse como una propiedad opuesta a la estabilidad.

**Gráfico N° 36. Comparación flujo Marshall**

Fuente: Elaboración propia

Los resultados para la mezcla con Titán al 3% muestran un valor casi constante de valor de flujo entre 150 a 130 °C, a partir del cual el flujo se incrementa a medida que la temperatura disminuye.

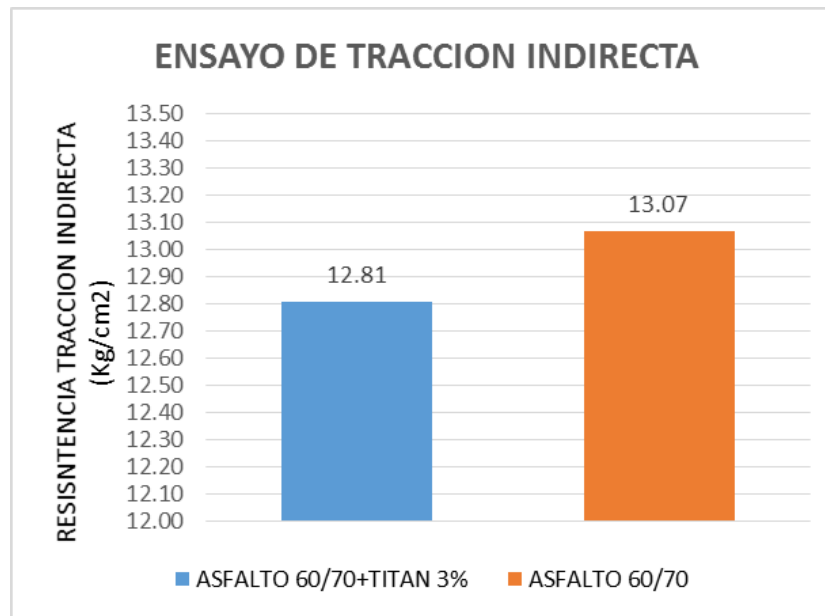
Comparando el flujo entre la mezcla patrón y la mezcla con Titan al 3%, se observa que ésta última tiene 1.6 (13.8-12.2) décimas de pulgada menos de flujo, esto significa mayor resistencia a la deformación bajo una carga crítica probada en laboratorio a 60°C durante el ensayo Marshall.

### 6.10 Resistencia a la Tracción Indirecta

El ensayo de tracción indirecta, destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper.

Del ensayo realizado se presentan los siguientes resultados.

Gráfico N° 37. Comparación resistencia a la tracción indirecta



Fuente: Elaboración propia

Se observa que la mezcla tibia presenta menor resistencia frente a la mezcla de control en caliente, la diferencia no es muy considerable y alcanza a 0.26 Kg/cm<sup>2</sup>.

---

## CAPITULO VII:

### 7. COSTOS

En este capítulo se expondrá la comparación entre los costos de producción que diferencian a las mezclas tibias de las convencionales, obtenida de la revisión bibliográfica en el presente trabajo de investigación. Está claro que estos costos englobaran numerosos factores, algunos de los cuales permanecerán invariables para ambos tipos de mezclas, por lo que se nombraran aquellos que representan una mayor diferencia.

Kristjansdottir y otros autores en investigaciones que se efectuaron en la Universidad de Washington [6], señalaron que en algunas obras donde se midió el consumo energético, había generalmente una reducción de entre un 20 y un 75% en comparación con las mezclas convencionales, dependiendo de cuanto disminuía la temperatura de producción. Algo importante a tener en cuenta a la hora de hablar de los costos es que este beneficio energético depende indudablemente del tipo de energía y el costo de la misma.

Así pues, si el costo energético es alto, el beneficio será mayor. Si la energía proviene de materiales pétreos o de la electricidad, se requieren alrededor de 300.000 BTU<sup>3</sup> para producir una tonelada de mezcla convencional, lo que equivale más o menos a 7,6-11,4 litros de gasolina o diesel o de 2.5 a 3.5 termias de gas natural [13].

La tabla 23 muestra los costos generales de producir una mezcla convencional y los ahorros estimados al usar mezclas tibias, basados en costos locales de energía [6,13]. Los costes para plantas específicas o para áridos concretos (p.ej. contenido en humedad de los áridos) varían.

---

<sup>3</sup> La British Thermal Unit, de símbolo BTU o BTu, es una unidad de energía inglesa. Equivale aproximadamente a 252 calorías. Una BTU representa la cantidad de energía que se requiere para elevar en un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua en condiciones atmosféricas normales. [Fuente: Wikipedia]



**Tabla N° 23. Costos de producción de mezclas convencionales y ahorros en WMA en diferentes proyectos.**

<b>Localización</b>	<b>Islandia</b>	<b>Honolulu,</b>	<b>Joliet, Illinois</b>
<b>Fuente de energía</b>	<b>Gasolina</b>	<b>Diesel</b>	<b>Gas natural</b>
Cantidad para producir 1 tonelada de mezcla convencional <sup>a</sup>	7.6 – 11.4 litros	7.6 – 11.4 litros	2.5 – 3.5 termias
Costo del combustible <sup>b</sup>	0.66 \$/litro	0.58 – 0.79 \$/litro	0.70 – 0.80 \$/termia
Costo del combustible para hacer 1 tonelada de mezcla convencional <sup>c</sup>	5.00-7.50 \$/Tn	4.40-9.00 \$/Tn	1.75-2.80 \$/Tn
Electricidad necesaria para producir 1 tonelada de mezcla convencional <sup>d</sup>	8-14 KWh	8-14 KWh	8-14 KWh
Costo de electricidad industrial <sup>e</sup>	0.02 \$/KWh	0.1805 \$/KWh	0.0445 \$/KWh
Costo de la electricidad para producir 1 tonelada de mezcla convencional <sup>f</sup>	0.16-0.28 \$/Tn	1.44-2.53 \$/Tn	0.36-0.64 \$/Tn
Costo energético total para producir 1 tonelada de mezcla convencional <sup>g</sup>	5.16-7.78 \$/Tn	5.84-11.53 \$/Tn	2.11-3.44 \$/Tn
20% ahorro con WMA <sup>h</sup>	1.00-1.50 \$/Tn	0.88-1.88 \$/Tn	0.36-0.56 \$/Tn
50% ahorro con WMA <sup>i</sup>	2.50-3.75 \$/Tn	2.20 – 4.50 \$/Tn	0.88 –1.40\$/Tn
<p>a. El contenido de humedad del agregado se considera entre 2 - 4%. Las cantidades de combustible son promedios generales.</p> <p>b. Costos tomados en cada área donde se encuentra la empresa productora de HMA.</p> <p>c. El rango de costos mostrados corresponde a la cantidad más baja de combustible multiplicada por el costo más bajo de combustible y la cantidad más alta de combustible multiplicada por el costo más alto de combustible. En general este costo representa el precio para secar y calentar los agregados.</p> <p>d. Rango obtenido de [21]. Esto constituye otros requisitos de energía no proporcionados por el secador de agregados.</p> <p>e. Valor tomado como promedio de la página web Reykjavik Energy, <a href="http://www.or.is">www.or.is</a> (Iceland).</p> <p>f. El rango mostrado corresponde al menor requerimiento de electricidad multiplicado por el menor costo de electricidad y el mayor requerimiento de electricidad multiplicado por el mayor costo de electricidad.</p> <p>g. Costo de combustible más costo de electricidad.</p> <p>h. La estimación se realizó con base en el rango mínimo y máximo del costo del combustible (c), multiplicado por el 20%.</p> <p>i. La estimación se realizó con base en el rango mínimo y máximo del costo del combustible (c), multiplicado por el 50%.</p>			

**Fuente: Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving [6], A Review of Warm Mix Asphalt [8]**

El uso de productos para mezclas tibias aumenta los costos asociados a distintos aspectos de estas tecnologías. Kristjansdottir y otros autores [6] tabularon una serie de costos (Tabla 24) para algunos de los productos más comerciales en el mercado. El objetivo de esta tabla no es comparar las distintas tecnologías, sino destacar que el uso de mezclas tibias lleva consigo una serie de costos que deben ser superados

por el ahorro que se produce. Dado que estas tecnologías son nuevas, sus costos fluctúan y fluctuarán, y con el aumento del uso probablemente disminuirán con el tiempo.

**Tabla N° 24. Costos de varias tecnologías WMA. [6, 13]**

<b>Tecnología WMA</b>	<b>Aspha-Min</b>	<b>Sasobit</b>	<b>Evotherm <sup>a</sup></b>
Modificación de los equipos o costos de instalación	0\$ - 40.000\$	0\$ - 40.000\$	Mínimos
Costos del material	0.60\$/lb <sup>b</sup>	0.80\$/lb <sup>c</sup>	7-10% más que el ligante
Dosificación recomendada	0.3% por masa de la mezcla	1.5-3% por masa de ligante	Usar en lugar del ligante
Costo aproximado por tonelada de mezcla	3.60\$	1.30-2.60\$	3.50-4.00\$
a. Información obtenida de empresa Mead Westvaco. b. Información obtenida de empresa Hubbard Construction. c. Información obtenida de empresa Sasol Wax.			

**Fuente: Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving [6], A Review of Warm Mix Asphalt [8]**

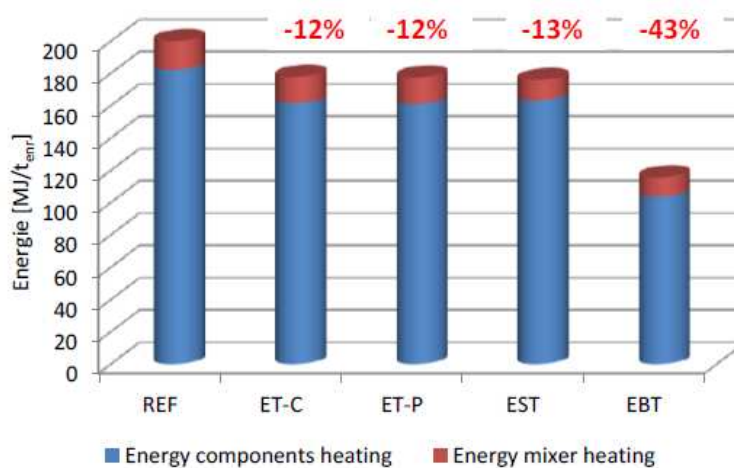
Por otro lado, existen otras tecnologías, tales como REVIX o Rediset que no requieren modificaciones en la planta. En algunos casos sí que requieren pequeñas modificaciones para adicionar los productos al ligante líquido en la planta. Comparado con las convencionales, el coste adicional de este tipo de tecnologías depende principalmente del costo de los productos. Los contratistas generalmente perciben riesgos antes los procesos y tecnologías nuevos y, como resultado, aumentan los precios de contratación. Kristjansdottir y otros autores [6] sugiere que los riesgos asociados con las mezclas tibias puede de manera general clasificarse en rendimiento a largo plazo e incerteza. Mientras que el rendimiento ha sido por lo general satisfactorio, es necesaria una mayor cantidad de investigación acerca de la equivalencia en vida útil y rendimiento de las mezclas tibias con respecto a las convencionales.

Por otra parte, se hace referencia al estudio realizado en Laboratorio de vías de circulación (LAVOC), Instituto Federal Suizo de Tecnología de Lausana (EPFL),

Suiza, Junio 2012 [18], donde se desarrolló el cálculo de la energía tanto para la producción de HMA como para WMA, esta investigación no brinda información sobre costos de producción directamente, sin embargo, enuncia los ahorros en consumo de energía.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente figura:

**Figura N° 24. Ahorros en consumo de energía**



**Fuente: Energy In Warm Mix Asphalt. 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress [18]**

En la figura anterior se compara la energía utilizada en MJ/ton de una mezcla en caliente de referencia (REF) con otras cuatro mezclas tibias:

- ET-C mezcla tibia con adición de cera Fischer-Tropsch
- ET-P mezcla tibia con adición de aditivo químico
- EST mezcla asfáltica semi-tibia con control de humedad
- EBT mezcla asfáltica con agregados mezclados en frío

Como se puede observar la mayor cantidad de energía se consume en calentar los agregados y luego en calentar la mezcla. En comparación con la mezcla en caliente de referencia, los ahorros en energía representan entre 12-13%, y desde un punto de vista teórico, los ahorros de energía con la producción de WMA son bastante moderados.

**CAPITULO VIII:****8. BENEFICIOS AMBIENTALES**

La principal característica en torno a la que gira la innovación introducida por estas mezclas es la reducción de temperatura conseguido durante el proceso de producción y de extendido y compactación. A lo largo de este capítulo se expondrá la revisión bibliográfica sobre las ventajas ambientales, de modo que quede claro el auténtico avance y ahorro que suponen estas mezclas asfálticas.

**8.1 Emisiones y exposición laboral a temperaturas inferiores de producción y colocado de mezclas asfálticas**

Como se indicó anteriormente, la reducción de las temperaturas de producción de mezclas asfálticas presenta ventajas ambientales importantes sobre las emisiones, exposiciones laborales y consumo de energía. La industria de las mezclas asfálticas en caliente conoce esto desde hace muchos años. El mayor reto, sin embargo, ha sido siempre conseguir una calidad de mezclas asfálticas a temperaturas de operación inferiores o a temperatura ambiente.

En los últimos años, nuevos procesos de producción a temperaturas comprendidas entre 80 y 135°C han atraído gran interés debido a la posibilidad de aproximarse o incluso alcanzar la calidad de la mezcla en caliente y lograr reducciones en el consumo de energía, las emisiones y la exposición laboral.

En tal sentido, fue llevado a cabo un estudio por la compañía Shell Bitumen [33] el cual se realizó en octubre de 2006 en Florencia en una planta mezcladora que se había modificado para producir asfalto de acuerdo con el proceso WAM Foam que fue descrito en el punto 2.4.2. Tecnología de Espumación.

El asfalto duro utilizado para WAM era de un grado de penetración 20/30 y el suave era un grado V10000 por clasificación de viscosidad cinemática.

Los objetivos del estudio fueron los siguientes:

- Determinar las exposiciones personales para aplicaciones para la empresa de carreteras CONGLOBIT. Dicha empresa utiliza el proceso WAM Foam para producir y extender mezclas asfálticas bajo el nombre "Greenfalt".
- Comparar, en condiciones de exposición en campo, el tipo de emisiones utilizando Greenfalt con las producidas utilizando HMA (mezcla en caliente convencional).
- Recoger y comparar los valores de emisión de las operaciones de mezcla en la planta de asfalto durante la producción de WAM y HMA.

Se determinaron las exposiciones a partículas y se compararon con los Límites de Exposición Laboral (OEL) italianos para humos de asfalto (asfalto de petróleo número CAS 8052-42-4). Algunos países, tales como Italia en 2003, han adoptado las recomendaciones de la Conferencia Americana de Sanitarios Industriales del Gobierno (ACGIH) en la legislación nacional. En enero de 2000, ACGIH modificó sus límites de exposición recomendados (REL) para humos de asfalto. El límite era 5 mg/m<sup>3</sup> medido como aerosoles totales (minerales y orgánicos). El último valor REL es 0,5 mg/m<sup>3</sup>, medido como aerosol soluble en benceno de la fracción inhalable, es decir la fracción orgánica de los aerosoles totales. Los aerosoles totales se miden utilizando una casete de 37 mm de caras cerradas equipada con un filtro de PTFE, que es un toma muestras de "aerosol total" (fracción respirable). Los aerosoles orgánicos totales se extraen y se cuantifican luego (Fracción Soluble en Benceno o BSF). Obsérvese que la fracción inhalable se considera como similar a BSF para este trabajo. Las duraciones de toma de muestras para HMA y WAM estaban comprendidas entre 3 y 4 horas, lo que se adoptó a fin de obtener una cantidad mayor que la mínima (BSF > 0,1 mg/m<sup>3</sup>) requerida por NIOSH<sup>4</sup> 5042. Las posiciones en las cuales fueron ubicadas las tomas de muestras fueron las siguientes:

---

<sup>4</sup> Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional, Agencia Federal de los EE.UU.



Figura N° 25. Toma de muestras



**Fuente:** Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying [33]

- Dos toma muestras próximas a la cámara de mezclado; debido a la saturación observada de los filtros en el caso de la producción de mezcla en caliente, se añadió un tercer filtro con un tiempo de toma de muestras de 60 minutos. No se observó saturación alguna en el caso de WAM Foam.
- Dos toma muestras situadas en el extremo superior de las tolvas de descarga.
- Uno o más toma muestras en el punto de descarga.
- Toma muestras estática, aproximadamente a 50 m de distancia de la planta mezcladora.

El 26 de octubre el trabajo de pavimentación implicaba la construcción de una capa estructural utilizando Greenfalt. Se extendió en el lugar una cantidad de 870 toneladas de Greenfalt con una longitud de 1.300 m, 3,5 m de anchura y con espesores de 90, 50 y 90 mm para las tres secciones de esta capa.



Las temperaturas del aire registradas eran 19°C por la mañana y 30°C a las 3 de la tarde. El estado del tiempo era nublado, sin viento. La duración de la toma de muestras por el personal de pavimentación fue aproximadamente 400 minutos.

La toma de muestras para las medidas de exposición se realizó para los siguientes puestos de trabajo:

- Un operador de la terminadora.
- Dos operadores de la plantilla maestra.
- Un obrero/rastrillador experto.
- Un operador de la compactadora.

Se utilizaron bombas personales para la toma de muestras de humos con un caudal de 2 l/min. El material se recogió sobre filtros (2 µm) dispuestos en el casete estándar de 37 mm.

- Aerosoles totales, lo que representa los aerosoles minerales y orgánicos.
- BSF extraído del filtro con benceno, lo que representa los aerosoles orgánicos totales (la parte restante se considera como la fracción mineral o MF).

Se tomaron también dos muestras estáticas a fin de abarcar el área total del lugar de trabajo en la carretera y comprobar si existían fuentes de aerosoles distintas del tren de extensión.

Durante todo el día de la toma de muestras, debió observarse la ausencia de humos (visual y olfativa) durante la extensión de la mezcla de asfalto en caliente únicamente se apreció algo de vapor de agua procedente del agua utilizada para la compactadora.

**Figura N° 26. Ausencia de emisiones durante el colocado de la mezcla tibia**

**Fuente: Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying [33]**

Las casetes de filtro estándar de 37 mm se utilizaron en serie con tubos adsorbentes a fin de recoger la fracción de vapores (gases). El adsorbente adecuado utilizado para atrapar los compuestos volátiles es XAD-2 con secciones adsorbentes anterior y posterior. Las secciones anterior y posterior se extrajeron por separado utilizando dicloro metano para comprobar la ruptura. El análisis y las cuantificaciones fueron realizados por medio de cromatografía de gases con detección por ionización de llama (GCFID).

El muestreo y el análisis se llevaron a cabo de acuerdo con NIOSH 5042 NMAM<sup>5</sup> (MF y BSF usando muestreadores de 37 mm) con algunos cambios menores.

La determinación y cuantificación de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH) en las fracciones solubles en benceno se realizaron sobre los toma muestras de HMA. Esto no se ha hecho en el caso de WAM, dado que la cantidad de materia orgánica recogida era demasiado pequeña para dicho análisis. La identificación del compuesto se basa en los 16 compuestos de prioridad mencionados en la lista de

<sup>5</sup> NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), Fourth Edition

la EPA (Agencia de Protección Ambiental) de los EE. UU. El análisis de PAH se llevó a cabo de acuerdo con el método interno de AMS 1057-1 de Shell (basado en el método 610-EPA para aguas residuales). Los PAH se extrajeron con THF<sup>6</sup> de la parte orgánica de las partículas recogidas (BSF) y se analizaron mediante HPLC-UV<sup>7</sup>.

## 8.2 Resultados del consumo de combustible en la planta de asfalto

El consumo de combustible (gas) se midió a diferentes niveles de capacidad de producción de la planta en el intervalo de 60-100%. Los resultados mostraron una reducción en el consumo de combustible de un 35%.

Durante la producción de mezcla asfáltica, para el trabajo de pavimentación en la autopista Florencia- Pisa-Livorno en Italia, varios contaminantes del aire (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, TOC y polvo) emitidos por la chimenea de la planta mezcladora fueron medidos por la empresa noruega Det Norske Veritas AS.

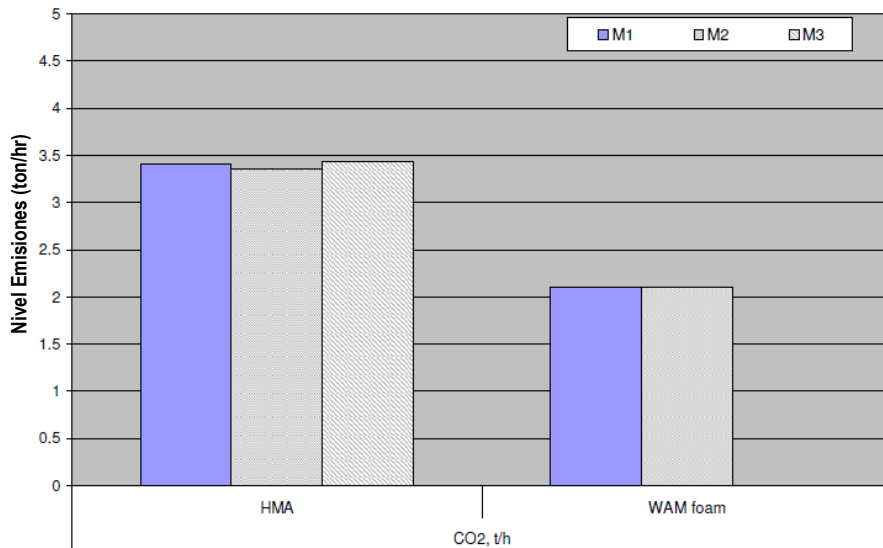
En los gráficos 38, 39 y 40 se presentan los resultados obtenidos para un ritmo de producción de 140 toneladas de mezcla por hora. La disminución de las temperaturas de operación desde 180°C en la producción de mezcla caliente a aproximadamente 125-130°C en la producción de mezcla de asfalto templada produjo una reducción considerable en la cantidad de emisiones de gas y polvo.

---

<sup>6</sup> Tetrahidrofurano

<sup>7</sup> High Performance Liquid Chromatography - Cromatografía Líquida de Alta Eficacia

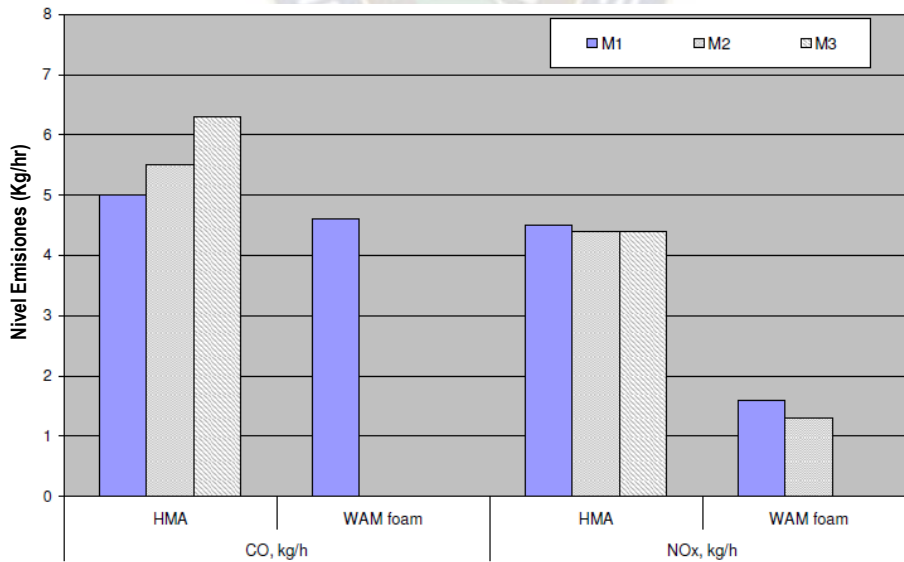
Gráfico N° 38. Niveles de emisión de CO<sub>2</sub> en tres momentos de medida en la planta de asfalto.



Fuente: Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying [33]

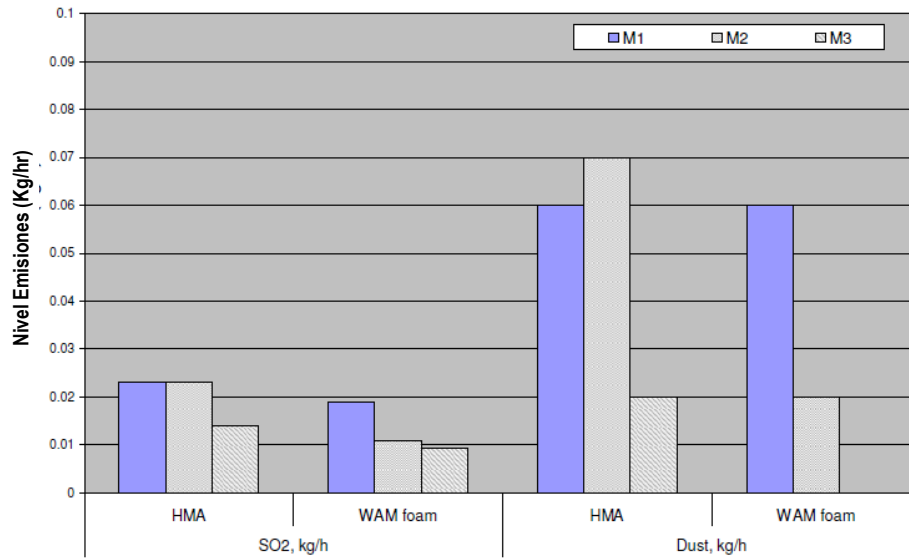
Se muestra la emisión de CO<sub>2</sub> en toneladas por hora y la reducción de las emisiones alcanzada es aproximadamente de un 35%.

Gráfico N° 39. Niveles de emisión de CO y NO<sub>x</sub> medida en tres momentos de en la planta de asfalto



Fuente: Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying [33]

Las reducciones de CO alcanzadas fueron aproximadamente de un 8% y la reducción de NO<sub>x</sub> fue aproximadamente de un 60%.

**Gráfico N° 40. Niveles de emisión de SO<sub>2</sub> y polvo en tres momentos de medida en la planta de asfalto**

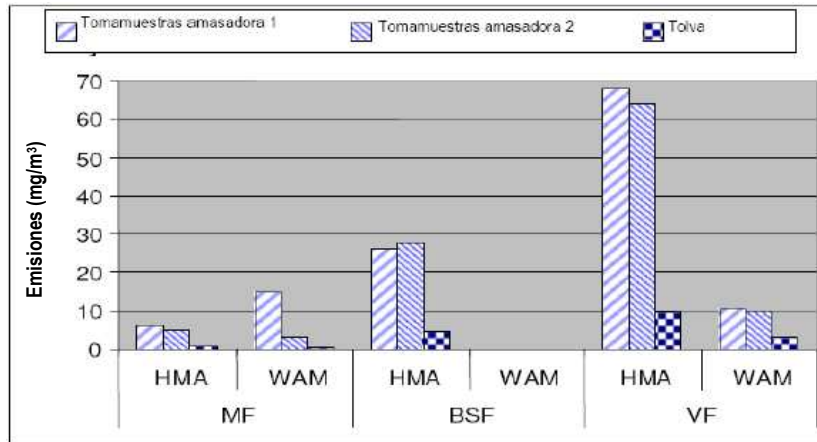
Fuente: Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying [33]

Los niveles de emisión de SO<sub>2</sub> y polvo son bajos, pero pueden obtenerse todavía reducciones del orden del 25 al 30%.

### 8.3 Resultados de las emisiones medidas en la planta de asfalto

Se hace referencia a un estudio de emisiones en una planta mezcladora realizado el año 2000, dicho estudio es el más extenso en una planta de este tipo. Los resultados (en mg/m<sup>3</sup>) se presentan en el Gráfico 41, en la cual MF indica la fracción mineral, BSF la fracción soluble en benceno y VF la fracción volátil.

Gráfico N° 41. Emisiones en una planta asfaltadora



Fuente: Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying [33]

- Se aprecia que la descarga de la amasadora es el punto en el que se emiten más humos.
- La fracción mineral (MF) se encontró similar.
- La fracción orgánica (BSF) se encontró notablemente mayor para HMA (hasta 200 veces mayor). Los aerosoles orgánicos representan una pequeña parte de las emisiones totales para WAM al contrario que HMA (hasta el 4% y el 90% respectivamente).
- La fracción volátil (VF) se encontró mayor para HMA (hasta 6 veces mayor).
- Debido al nivel muy bajo de BSF emitida con WAM, las fracciones volátiles pueden representar casi la totalidad de las emisiones orgánicas (hasta el 99%).

#### 8.4 Resultados de las mediciones de exposición en el lugar de pavimentación

Los valores de exposición (corregidos por ensayo en blanco de campo) se dan en la Tabla 25. Se trata de valores Medios Ponderados por Tiempo (TWA) de 8 horas. Los valores TWA de 8 horas corresponden a la exposición media a lo largo de un turno de trabajo de 8 horas. Este valor es preferido en muchos casos dado que es más representativo de un día de trabajo total.



Tabla N° 25. Valores de exposición

TWA de 8 h en mg/m <sup>3</sup>	Extensión WAM (día 2)		
	MF	BSF	SV
Conductor de la asphaltadora	0,22	0,05	3,45
Obrero de la maestra 1	0,19	0,08	2,40
Obrero de la maestra 2	0,19	0,07	1,18
Rastrillador	0,16	0,14	2,93
Conductor de la apisonadora	0,13	0,03	0,79
Estático 1	0,97	0,02	0,32
Estático 2	0,14	0,01	0,23

Fuente: Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying [33]

La parte principal de los aerosoles es inorgánica (polvo mineral). Los datos de exposición relevantes (BSF) han sido comparados con los valores OEL italianos. Sobre una base de Media Ponderada por Tiempo de 8 h, ninguno de los valores medidos excedía de estos OEL. Debe entenderse que en todos los casos (producción en caliente y tibia) los valores determinados son muy inferiores a cualquier exposición laboral o límite ambiental. Esto demuestra claramente que tanto la producción de mezcla en caliente como la WAM-Foam son plenamente aceptables desde un punto de vista laboral y ambiental. Cuando se comparan con las medidas de exposición previas de Shell conducidas sobre la pavimentación HMA, estas emisiones se encuentran en el rango inferior (comúnmente 0,05-0,60 mg/m<sup>3</sup> en BSF). El mismo nivel de magnitud (< 0,05) se registró anteriormente cuando se utilizaron ligantes de grado de penetración usuales (v.g. 35/50) a aproximadamente 150°C. Los datos de BSF son también consistentes con los datos de exposición de los estudios anteriores de la Compañía (hasta 0,05 mg/m<sup>3</sup>). Los valores estáticos se encontraron más bien elevados, especialmente en términos de polvo mineral. Esto se explica probablemente por el tráfico al otro lado de la autopista.

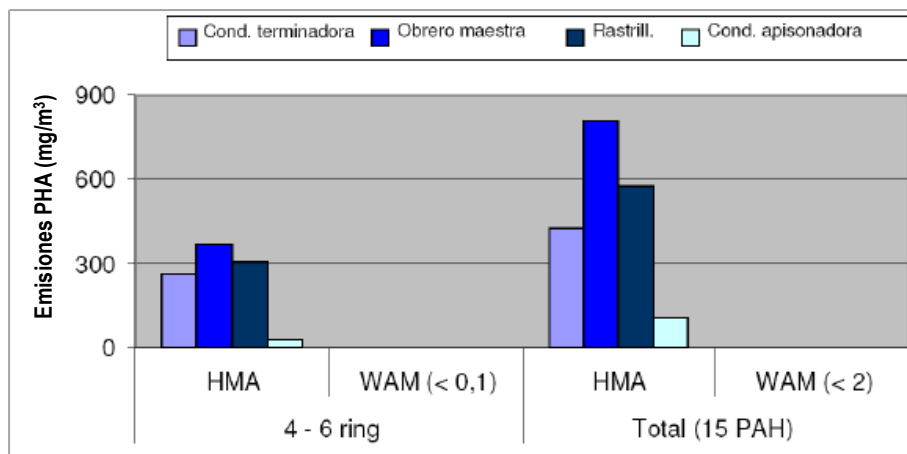
### 8.5 PHA<sup>8</sup> medido en BSF

Las concentraciones de PAH son los valores sumados para los BSF y los VF. Los resultados del análisis se presentan en el Gráfico 42 y los valores se expresan en

<sup>8</sup> Hidrocarburo Aromático Policíclico – Enciclopedia libre Wikipedia

ng/m<sup>3</sup> (nano gramo/metro cúbico). Se presenta la suma de los compuestos de 4-6 anillos y la suma de 15 PAH detectados. Los resultados son consistentes con los valores BSF: cuanto mayor es la fracción orgánica, tanto más alto es el contenido de PAH. Los valores para la mezcla caliente presentados en el Gráfico son valores típicos derivados de medidas de exposición previas realizadas por Shell.

Gráfico N° 42. Emisiones PHA según estudio



Fuente: Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying [33]

El estudio llevado a cabo por Shell Bitumen muestra que en la producción de mezclas asfálticas, la tecnología WAM Foam es significativamente más respetuosa con el medio ambiente en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, polvo y aerosol orgánico.

Los aerosoles orgánicos, expresados en fracción soluble en benceno, emitidos con WAM a aproximadamente 125°C están comprendidas en el rango inferior encontrado comúnmente para la extensión de mezclas en caliente cuando se utiliza una administración satisfactoria del producto (v.g. el uso de la temperatura mínima recomendada).

Los resultados obtenidos en este estudio están de acuerdo con un estudio previo de Shell Bitumen, que demuestra que en el intervalo de temperatura relevante para aplicaciones de pavimentación (aproximadamente 140 a 190°C), la tasa de emisión

de humos aumenta por un factor de 2 por cada 12°C aproximadamente de aumento en la temperatura.



## CAPITULO IX

### 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 9.1 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó un estudio exhaustivo de la literatura donde se examina la implementación del ciclo completo de una Mezcla Asfáltica Tibia (Warm Mix Asphalt WMA). En la primera parte, se describen diferentes tecnologías de producción de WMA y las características de productos utilizados para su elaboración. En la segunda parte, la atención se centra en los métodos de evaluación del asfalto como de la mezcla asfáltica y los resultados experimentales, éstos últimos mediante la utilización de la cera polietilénica de marca Honeywell Titan 7250.

- Se logró el objetivo de crear una mezcla asfáltica tibia utilizando como aditivo la cera polietilénica Honeywell Titan 7520. Durante la investigación se pudo comprobar que el aditivo logró disminuir la temperatura de compactación a un máximo de 135°C con una dosificación de 3%, valor máximo recomendado por el fabricante.

Cabe mencionar que la temperatura de compactación de 135°C se encuentra en el rango de 100°C a 140°C correspondiente a mezclas tibias.

- Para estudiar las propiedades de compactación entre ambas mezclas se utilizó el martillo Marshall para la compactación de las probetas de ensayo a 75 golpes por cara. Del diseño Marshall elaborado para la mezcla caliente de control se determinó la gravedad específica de diseño de 2.297 gr/cc. Para la mezcla tibia se elaboraron tres juegos de probetas compactadas a diferentes temperaturas 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C y 150°C, con base en los cuales se determinó la temperatura de compactación de la mezcla tibia, para la misma gravedad específica que la mezcla de control, obteniendo un valor de 135°C.

El valor de temperatura de compactación obtenido se pudo verificar al realizar el análisis del porcentaje de vacíos de la mezcla ( $V_a$ ), donde se pudo observar que el porcentaje de vacíos en la mezcla tibia no presentó variaciones significativas hasta una temperatura de 130°C.

- Mediante el nomograma de Van der Poel se pudo estimar el módulo de rigidez de ambos asfaltos estudiados, observando una tendencia de incremento del módulo de rigidez a temperaturas en el rango de 30°C a 40°C (temperaturas de servicio), por el efecto de endurecimiento del asfalto.

Se observó un incremento en el módulo de rigidez en el asfalto con la cera polietilénica Honeywell Titan™ 7205, cuyo incremento es proporcional a la adición de 1%, 2% hasta 3%. En comparación con el asfalto original 60/70, éste alcanza una rigidez de 6 MPa, mientras que con 3% de cera la rigidez estimada llega a 10 MPa (60% de incremento), también medido para una temperatura de 30°C.

Con relación al módulo de rigidez de ambas mezclas asfálticas, nuevamente la mezcla tibia presentó una rigidez de 2500 MPa mayor al módulo de la mezcla caliente de control, que presentó un valor de 1800 MPa.

A partir de los valores obtenidos se puede inferir que la mezcla tibia obtenida a partir del aditivo Honeywell Titan™ 7205 tiene mejores cualidades para poder absorber cargas de tráfico y por consiguiente presentar mejor comportamiento a las deformaciones.

- La reducción de la temperatura de compactación de la mezcla tibia produce un menor envejecimiento inicial del asfalto en los procesos de transporte, colocación y compactación, esta condición pudo observarse en el ensayo de RTFOT donde el asfalto con aditivo Titán al 3% presentó un menor endurecimiento frente al asfalto original. En general un menor envejecimiento

durante la producción y el proceso de pavimentación tiende a mejorar la flexibilidad de los pavimentos, lo que reduce la susceptibilidad a la fatiga y el agrietamiento por temperatura resultando en la mayor vida útil de los pavimentos.

- De la revisión de la literatura encontrada se ha determinado que en el proceso de producción de mezclas asfálticas el mayor costo está asociado al secado y mezclado de los agregados, proceso que es muy similar para los ambos tipos de mezclas, luego le siguen los costos de mezclado y compactado durante el colocado de la mezcla. Debido a la disminución de la temperatura de mezclado y compactación en las mezclas tibias se ha establecido con base en estudios realizados que el ahorro puede estar en un margen del 20% al 50%, lo que significa un ahorro desde un 0.88 a 4.50 \$us por tonelada de mezcla producida con diésel.
- El principal beneficio de la tecnología de la mezcla tibia es la capacidad de reducir la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. La tasa de reducción, sin embargo, está relacionada con la cantidad de energía que se usa en la planta de asfalto y otros procesos que están conectados con la producción y el colocado de WMA. De la literatura revisada y con base en estudios efectuados en Florencia – Italia se determinó una reducción de CO<sub>2</sub> en 35% en toneladas por hora, una reducción de CO en un 8% en kg/h y la reducción de NOx de 60% en kg/h.

Finalmente, se puede concluir que las mezclas tibias tienen el potencial de reemplazar a las mezclas tradicionales, por lo que se incluye en el presente trabajo de investigación una propuesta de Especificación Especial para la elaboración de Mezclas Tibias (Anexo). Se estima que la implementación de regulaciones ambientales más estrictas en materia de contaminación del aire estimularía el desarrollo más rápido de la tecnología de mezclas tibias.

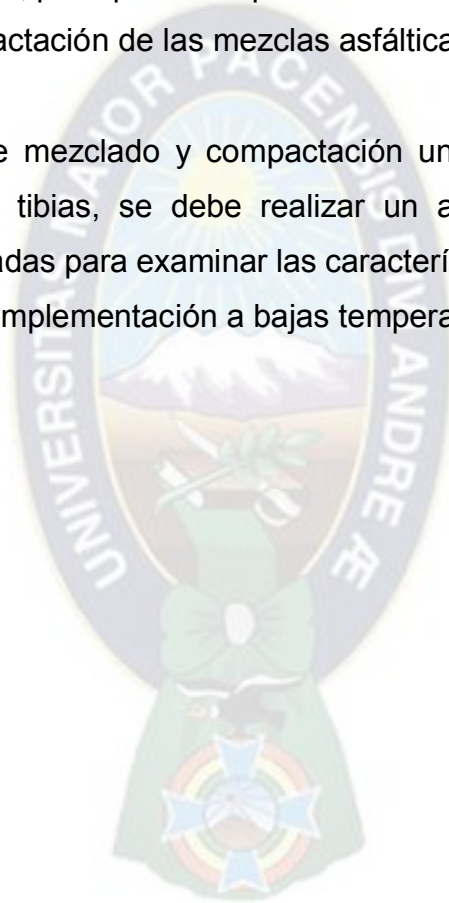


## 9.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar mayores investigaciones sobre las propiedades de asfaltos modificados para la producción de mezclas tibias, mediante el diseño de mezclas por el método SUPERPAVE.

Se recomienda el estudio de elaboración de mezclas asfálticas tibias con asfaltos modificados con polímeros, principalmente para determinar las mejores condiciones de trabajabilidad y compactación de las mezclas asfálticas.

Al ser la temperatura de mezclado y compactación una variable sensible en la elaboración de mezclas tibias, se debe realizar un análisis cuidadoso de las condiciones climáticas dadas para examinar las características de una mezcla tibia, en particular antes de la implementación a bajas temperaturas.



---

**REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

1. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México, Instancias y Organismos Internacionales. página web del producto. [Online] [Cita: 21 enero 2018.]  
<http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/cambioclimatico/Instancias%20e%20Instituciones%20Internacionales.pdf>
- 2: National Green Technology Policy. Kementerian Tenaga, Teknologi Kerajaan Dan Air, Malaysia Energy Centre. 07/21/09.
- 3: D'Angelo, John, et al. Warm-Mix Asphalt: European Practise. American Trade Initiatives. Washington, DC : U.S. Department of Transportation, February 2008.
- 4: K M Muthen. Foamed Asphalt Mixes - Mix Design Procedure. © SABITA Ltd & CSIR Transportek. June 1999.
- 5: Jenkins KJ et al. Half-Warm Foamed Bitumen Treatment, A New Process. 7 Th Conference On Asphalt Pavements For Southern Africa. 1999.
- 6: Kristjansdottir, Olof. Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving. University of Washington. 2006.
- 7: Graham C., Hurley, Prowell, Brian D. Evaluation Of Sasobit® For Use In Warm Mix Asphalt. National Center for Asphalt Tecnology. Auburn University. June 2005.
- 8: Chowdhury, Arif and Button, Joe. A Review of Warm Mix Asphalt. Texas Transportation Institute. Springfield, Virginia : National Technical Information Service, December 2008. Technical report.
- 9: The German Bitumen Forum. Progress Report. June 2006.
- 10: Audrius Vaitkus et. al. Analysis and Evaluation of Possibilities for the Use of Warm Mix Asphalt in Lithuania. The Baltic Journal Of Road And Bridge Engineering. 2009.
- 11: Thorsten Butz. Warm Asphalt Mix – Technologies, Research and Experience.
- 12: Health Effects of Occupational Exposure to Asphalt. Hazard Review. U.S. Department Of Health And Human Services. Public Health Service Centers for Disease Control and Prevention National Institute for Occupational Safety and Health. December 2000.
- 13: Chowdhury, Arif and Button, Joe. A Review of Warm Mix Asphalt. Texas Transportation Institute. Springfield, Virginia : National Technical Information Service, December 2008. Technical report.

- 14: H.A. Rondón-Quintana, J.A. Hernández-Noguera, and F.A. Reyes-Lizcano. Mezclas asfálticas tibias: revisión desde el punto de vista técnico, económico y ambiental. *Ingeniería e Investigación*, Vol 35, No 3, 2015.
- 15: Stacey Diefenderfer, P.E., and Amy Hearon. Laboratory Evaluation of a Warm Asphalt Technology for Use in Virginia. Virginia Transportation Research Council. Research Report. December 2008.
- 16: Feipeng Xiao a, Serji N. Amirkhanian. Effects of liquid antistrip additives on rheology and moisture susceptibility of water bearing warm mixtures. *Construction and Building Materials*, March 2010.
- 17: Annette Smith. Advera® WMA Zeolite. WMA Technical Working Group. December 12, 2007.
- 18: Nicolas Bueche, André Gilles Dumont. Energy In Warm Mix Asphalt. 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul, 13-15th June 2012.
- 19: Graham C., Hurley Brian D. Prowell. Evaluation Of Evotherm® For Use In Warm Mix Asphalt. National Center for Asphalt Tecnology. Auburn University. June 2006.
- 20: Página web del Producto. Advera. <https://www.pqcorp.com/products/zeolites/advera>.
- 21: Investigación de Nuevas Mezclas de Baja Energía para la Rehabilitación Superficial (INMBERS). Laboratorio de Ingeniería de la Construcción. Tecnología Y Sostenibilidad. Gobierno de España.
- 22: Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Soluble binder content. Página web del Producto. <https://doi.org/10.3403/30251698> (published 31/08/2012).
- 23: Ramon Bonaquist. Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt. Transportation Research Board. Washington, D.C. 2011.
- 24: Superpave Mixture Design Guide. WesTrack Forensic Team Consensus Report. Washington, DC. February 2001.
- 25: Dr Robert N. Hunter, Andy Self and Professor John Read. The Shell Bitumen Handbook. Sixth edition. Shell International Petroleum Company Ltd 2015.
- 26: Warm mix asphalts. Asphalt. Deutscher Asphaltverband e.V. 2009.
- 27: Steven W. Perkins. Synthesis Of Warm Mix Asphalt Paving Strategies For Use In Montana Highway Construction. Final Report. Western Transportation Institute Montana State University – Bozeman. November 2009.
- 28: Rodrigo Delgadillo Sturla. Nociones de Viscoelasticidad Lineal. Universidad Técnica Federico Santa María.

- 29: Asphalt handbook MS-4. Institute, Asphalt. 7th edition. USA : Asphalt Institute, 2007, pp. 765-767.
- 30: Hurley, Graham and Prowell, Brian. Evaluation of Potential Processes for Use in Warm Mix Asphalt. Alabama : National Center for Asphalt Technology, Auburn University, 2006. NCAT report Nr.06-02.
- 31: Hainian Wang et. al. Effect of warm mixture asphalt (WMA) additives on high failure temperature properties for crumb rubber modified (CRM) binders. Construction and Building Materials. October 2012.
- 32: M. Lecomte, F. Deygout and A. Menetti. Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying temperatures. Shell Bitumen.
- 33: M. Lecomte et. al. Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying. Shell Bitumen, 307 rue d'Estienne d'Orves, 92708 Colombes, Paris, France.
- 34: MS-2 Asphalt Mix Design Methods, Seventh Edition 2014, Asphalt Institute.
- 35: Mohd Ezree Abdullah et.al. Warm Mix Asphalt Technology: A Review. 2014 Penerbit UTM Press.
- 36: Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 691, Washington D.C. 2011.
- 37: Lothar Drüschner. Experience with Warm Mix Asphalt in Germany. DEUTAG GmbH & Co.KG, Jun 2009.
- 38: Pavement interactive. Laboratory Wheel Tracking Devices. [http://pavementinteractive.org/index.php?title=Laboratory Wheel Tracking Devices](http://pavementinteractive.org/index.php?title=Laboratory_Wheel_Tracking_Devices).
- 39: M.F.C. van de Ven, K.J. Jenkins and H.U. Bahia s.n., 2004. Concepts used for development of bitumen specifications.
- 40: Graham C. Hurley and Brian D. Prowell. Evaluation of Potential Processes for Use in Warm Mix Asphalt. National Center for Asphalt Technology.
- 41: F Th de Bats and G van Gooswilligen, Practical Rheological Characterisation of Paving Grade Bitumens, Shell Research, Amsterdam.

**“ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFALTICAS  
TIBIAS MEDIANTE EL USO DE CERA  
POLIETILENICA”**

**ANEXO DE ENSAYOS DE  
LABORATORIO DE ASFALTOS**

**“ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFALTICAS  
TIBIAS MEDIANTE EL USO DE CERA  
POLIETILENICA”**

**ANEXO**

**PRODUCTOS HONEYWELL**



**“ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFALTICAS  
TIBIAS MEDIANTE EL USO DE CERA  
POLIETILENICA”**

**ANEXO ESPECIFICACION  
TECNICA ELABORACION DE  
MEZCLA TIBA**