

# DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA A PARTIR DE LA MEZCLA DE ASFALTO Y ACEITE CRUDO DE PALMA

## WARM MIX ASPHALT DESIGN FROM MIX ASPHALT AND CRUDE PALM OIL

CONRADO H. LOPERA PALACIO

*Magister en Ingeniería: infraestructura y sistema de transporte, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, conralopera@yahoo.es*

JORGE E. CÓRDOBA MAQUILÓN

*Ph.D. Ingeniería. Profesor Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, jecordob@unal.edu.co*

Recibido para revisar Marzo 13 de 2012, aceptado Septiembre 25 de 2012, versión final Marzo 3 de 2013

**RESUMEN:** El aumento de la conciencia ambiental y una regulación más estricta de las emisiones atmosféricas han permitido desarrollar las mezclas asfálticas tibias (WMA). Estas mezclas se producen a una temperatura menor que las mezclas en calientes reduciendo la viscosidad del asfalto y disminuyendo los costos de producción por la reducción en el consumo de combustible. Para reducir la viscosidad a bajas temperaturas se utilizan aditivos químicos sin embargo es la primera vez que se utiliza en Colombia el aceite crudo de palma como aditivo reductor de viscosidad del asfalto. Colombia es el primer productor de aceite de palma en América Latina y el cuarto a nivel mundial. La gradación de la mezcla se obtuvo con 54.1% de gruesos, 41.7% de finos y 4.2% de llenante utilizando cal hidratada, y se mezcló con asfalto de penetración 60-70, modificado con crudo de palma al 1%. El diseño se realizó por el método Marshall, la temperatura de producción de la mezcla se redujo, así como la viscosidad del asfalto y se mejoró el desempeño de la mezcla asfáltica tibia comparada con la mezcla asfáltica en caliente.

**PALABRAS CLAVE:** Mezclas asfálticas tibias, viscosidad, temperatura, asfalto, aceite crudo de palma.

**ABSTRACT:** Increased environmental awareness and stricter regulation of atmospheric emissions have allowed develop the warm mix asphalt (WMA). These mixtures are produced at a lower temperature than the mixtures in hot reducing the viscosity of the asphalt and decreasing production costs by reducing the fuel consumption. To reduce the viscosity at low temperatures using chemical additives yet it is the first time that is used in Colombia crude palm oil as an additive reducer in asphalt viscosity. Colombia is the largest producer of palm oil in Latin America and the fourth worldwide. The gradation of the mixture was obtained with 54.1% of fat, 41.7% fines and 4.2% of filling using hydrated lime, and mixed with 60-70 penetration asphalt, modified with 1% crude palm. The design is performed by the Marshall method, the production temperature of the mixture is reduced and the viscosity of the asphalt and improved performance of the warm mix asphalt compared to the hot mix asphalt.

**KEYWORDS:** Warm mix asphalt, viscosity, temperature, asphalt, crude palm oil.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las carreteras son esenciales para el bienestar de la humanidad, tanto en términos sociales como económicos, pero es innegable que su construcción, mantenimiento y uso tienen un impacto negativo en el ambiente. Para minimizar parte de esos impactos, la respuesta de los ingenieros ha sido la producción y aplicación de mezclas asfálticas a temperatura reducida. En esta línea, se ha desarrollado la técnica para producir las mezclas tibias, la cual explora las distintas opciones y su eficacia a la hora de reducir el impacto medioambiental en la construcción y mantenimiento de las carreteras pavimentadas.

Efectivamente, una mayor concientización acerca del necesario sostenimiento del medio ambiente aunado a las estrictas regulaciones de emisiones de gases por parte de los entes reguladores ha llevado a que se desarrollen nuevas técnicas para la producción de mezclas de asfalto tibio (WMA, Warm Mix Asphalt) con lo cual se busca reducir las altas temperaturas utilizadas en la producción de las mezclas en caliente (HMA, Hot Mix Asphalt). En este contexto, la Ingeniería Civil propone como principal innovación la utilización de mezclas asfálticas en “tibio”, con las cuales lo que se pretende es reducir las temperaturas de mezclado, compactación y viscosidad de la mezcla asfáltica.

Consciente de la importancia que para el equilibrio ambiental tiene la utilización de las mezclas de asfalto tibias, la presente investigación tiene como propósito diseñar y producir en laboratorio mezclas asfálticas tibias a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma. Los beneficios esperados se verán reflejados en la reducción del consumo de energía durante la producción de la mezcla asfáltica y la reducción de las emisiones tanto en la fase de producción como en la de colocación.

Existen varios métodos para la producción de este tipo de mezclas (WMA) estos métodos tienen en común la reducción de la viscosidad del asfalto a una temperatura determinada, lo cual permite al agregado estar plenamente cubierto a temperaturas más bajas que en la producción de la mezcla asfáltica en caliente (HMA).

Las investigaciones sobre WMA se han centrado mucho en la producción con varias tecnologías. En este trabajo se investiga el potencial del aceite crudo de palma como agente reductor de la viscosidad en el asfalto para posteriormente evaluar sus características de desempeño y compararlas con las de la mezcla en caliente (HMA).

## 2. MARCO TEÓRICO

Las mezclas tibias se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 100°C y 135°C, su producción involucra nuevas tecnologías a partir de las cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales. El concepto de mezcla tibia surgió en Europa [1], tras la necesidad de una mezcla bituminosa que ofreciera economía de energía y tuviera el mismo desempeño de las mezclas bituminosas en caliente.

El desarrollo de esta tecnología con enfoque en la reducción de temperatura de mezcla [2] y compactación empezó en 1997, para cumplir con el Protocolo de Kyoto [3]. Esta alternativa también facilita el trabajo de pavimentación en los países en los que el invierno es muy riguroso [4], una vez que la mezcla tibia enfría más lentamente que la mezcla en caliente.

En 2002, especialistas de los Estados Unidos [5]

empezaron a investigar esta técnica, que rápidamente sería adoptada por ese país [6]. En Brasil, se empezó a investigar la tecnología, adaptándola para las condiciones de trabajos locales.

### 2.1 Antecedentes en la producción de mezclas asfálticas tibias (WMA)

Los antecedentes cronológicos en el trabajo con mezclas tibias se presentan en la tabla 1.

**Tabla 1.** Antecedentes en la producción de WMA

AÑO	ANTECEDENTE
1995	En 1995, Shell y Kolo Viedekke, iniciaron un programa en conjunto, para el desarrollo de un producto, y del proceso para la fabricación de mezcla agregado - asfalto a temperaturas más bajas; obteniendo mejores propiedades o equivalentes condiciones de desempeño, con relación a las mezclas tradicionales en caliente.
1999-2001	Reportes iniciales de las tecnologías de la mezcla tibia en el Congreso Eurasphalt/Eurobitume, el Fórum Alemán de Bitumen, Conferencia sobre Pavimentos Asfálticos en Sudáfrica, principalmente.
2002	Recorrido de exploración a Dinamarca, Alemania y Noruega realizado por directores de NAPA para examinar las tecnologías de la mezcla asfáltica tibia (WMA), Aspha-min, la Espuma y el Sasobit. En la agenda de trabajo del grupo, se incluyeron reuniones con el Fórum Alemán de Bitumen, con el objetivo de considerar algunas actividades del grupo de Trabajo sobre Reducción de Temperatura.
2003	Los estudios sobre mezclas tibias, son presentados en la Convención Anual de la Asociación Nacional de Pavimento Asfáltico NAPA.
2003	El Centro Nacional para la Tecnología en Asfalto, investiga sobre los procesos de las mezclas tibias, Alpha-min (zeolite cristalino) y Sasobit (una cera de Fsher-Tropsch). La investigación es patrocinada por NAPA, Administración Federal de Carreteras FHWA, Eurovia (Aspha-min) y Sasol (Sasobit).
2004	Meadwestva company, introduce Evothem DAT (aditivo químico) a la mezcla, al tiempo que apoya la investigación de NCAT.
2004	La demostración de mezclas tibias, es presentada en el Mundo del Asfalto.
2004	Las primeras pruebas de campo fueron realizadas en Florida y Carolina del Norte
2005	Formación del grupo de trabajo (TWG) de la mezcla Asfáltica Tibia de NAPA-FHWA. El objetivo principal del trabajo es la implementación adecuada a través de recolección de datos y análisis, de un método genérico de especificaciones técnicas en WMA.
2005	Declaración de investigación de problemas sometido a la consideración de la American Association of State Highway and Transportation Officials ,AASHTO.

AÑO	ANTECEDENTE
2005	Se realizan pruebas de campo en Florida, Indiana, Maryland, New Hampshire, Ohio; y en Canadá.
2005	La NCAT, publica sus primeros reportes sobre Sasobit y Aspha-min.
2006	Durante la Conferencia de Pavimento Asfáltico en el Mundo del Asfalto, se presenta una sesión de medio día sobre mezclas tibias
2006	Grupo de Trabajo Técnico TWG, publica lineamientos sobre el funcionamiento y pruebas ambientales.
2006	Con base en la declaración de investigación de problemas, cuyo documento fue sometido en 2005 a evaluación por parte de la AASHTO, se define como de alta prioridad la destinación de fondos de la investigación en WMA.
2006	El TWG, somete dos declaraciones más de investigación, a consideración por parte de la AASHTO.
2006	Se realizan pruebas de campo en: California, con la mezcla de hule asfáltico; Michigan, Missouri, sobre la nueva aplicación para evitar baches causados por temperatura en la carretera; Nueva York, donde se probó el nuevo proceso de Asfalto de bajo consumo de energía; Ohio, donde se realizó una exhibición abierta al público con 225 asistentes; Carolina del Sur, Texas, Virginia y Wisconsin, también se realizaron exhibiciones abiertas al público.
2006	Un contratista de Missouri, realiza trabajos de producción de pavimento con mezcla en tibio partiendo de una prueba exitosa.
2006	NCAT publica un reporte sobre el Evotherm.
2006	Para la realización de la Conferencia Anual de NAPA, fueron requeridas numerosas presentaciones
2007	AASHTO y FHWA, realiza visitas guiadas a experiencias en WMA, en Francia, Alemania y Noruega.
2007	La sesión de trabajo de 2007, del Grupo en Investigación de Transporte TRB, tuvo como único tema WMA
2007	Astec Industries introduce su tecnología de asfalto espumado.
2007	Meadwestva company, presenta el sistema de introducción de la Tecnología del Asfalto Dispersado (DAT) para el Evotherm.
2007	Se desarrolla, Advera WMA, un producto a partir de Zeolite, introducido por PQ Corporation.
2007	Demostración en calle de San Antonio en la Reunión Anual de la APWA.
2007	30.000 toneladas de diferentes tecnologías de WMA, son colocadas cerca de Yellowstone, para el mes de Agosto.  En las pruebas realizadas en la Yellowstone, se utilizaron 9,000 toneladas métricas de asfalto, en cada una de las tres secciones (Sección de Control, Sección Sasobit y Sección de Advera WMA). Durante el proceso de acarreo, las mezclas fueron conducidas cerca de 90 minutos desde una planta portátil en Cody, Wyo.

AÑO	ANTECEDENTE
2007	Aunque fue difícil la logística, las cuadrillas de pavimentación lograron buenas densidades: el promedio de Advera WMA-93.9% de densidad teórica máxima; el promedio de Sasobit – 93.4%. Neitke, quien estuvo a cargo del proyecto, declaró que: “La densidad no fue difícil de alcanzar, aun cuando las temperaturas de la mezcla bajan”, ante lo cual, “Parecía un tanto difícil mantener bajas las temperaturas de la mezcla; las temperaturas de producción tenían una tendencia a brincar de 120 a 127°C. Las pruebas mostraron que los agregados se secaron adecuadamente aun con las temperaturas bajas. Los contenidos de humedad estaban abajo del máximo de 0.5% tanto para las mezclas en tibio como para la mezcla de control”.
2007	Son realizadas numerosas pruebas de campo, en California, Illinois, Nueva Jersey, Nueva York, Carolina del Norte, Ohio, Carolina del Sur, Tennessee, Texas, Virginia, Wisconsin, Wyoming y otros estados; y en Ontario.

Fuente: Revista HMAT, 2008

## 2.2 Aceite Crudo de Palma

La palma de aceite es una planta tropical propia de climas cálidos que crece en tierras por debajo de los 500 metros sobre el nivel del mar. Su origen se ubica en el golfo de Guinea en el África occidental. De ahí su nombre científico, *Elaeis guineensis Jacq.*, y su denominación popular: palma africana de aceite. Su introducción a la América tropical se atribuye a los colonizadores y comerciantes esclavos portugueses, que la usaban como parte de la dieta alimentaria de sus esclavos en el Brasil.

En 1932, Florentino Claes fue quien introdujo la palma africana de aceite en Colombia y fueron sembradas con fines ornamentales en la Estación Agrícola de Palmira (Valle del Cauca). Pero el cultivo comercial sólo comenzó en 1945 cuando la United Fruit Company estableció una plantación en la zona bananera del departamento del Magdalena.

La expansión del cultivo en Colombia ha mantenido un crecimiento sostenido. A mediados de la década de 1960 existían 18.000 hectáreas en producción y hoy existen más de 360.000 hectáreas (2010) en 73 municipios del país.

## 2.3 Planta de palma de aceite

En una palma de aceite se mezclan flores masculinas y femeninas, de las que nacen frutos por millares,

esféricos, ovoides o alargados, para conformar racimos compactos de entre 10 y 40 kilogramos de peso. Antes de adquirir el color anaranjado rojizo del sol tropical que les brinda la madurez, los frutos son de color violeta oscuro, casi negro. En su interior guardan una única semilla, la almendra o palmiste, que protegen con el cuesco, un endocarpio leñoso rodeado, a su vez, por una pulpa carnosa. Ambas, almendra y pulpa, proveen aceite. La primera, el de palmiste, y la segunda, el de palma propiamente dicha.

El procesamiento de los frutos de la palma de aceite se lleva a cabo en la planta de beneficio o planta extractora. En ella se desarrolla el proceso de extracción del aceite crudo de palma y de las almendras o del palmiste. El proceso consiste en esterilizar los frutos, desgranarlos, macerarlos, extraer el aceite de la pulpa, clarificarlo y recuperar las almendras del bagazo resultante. De las almendras se obtienen dos productos: el aceite de palmiste y la torta de palmiste que sirve para alimento animal.

Al fraccionar el aceite de palma se obtienen también dos productos: la oleína y la estearina de palma. La primera es líquida y se puede mezclar con cualquier aceite vegetal, la otra es la fracción más sólida y sirve para producir grasas, principalmente margarinas y jabones. Las propiedades de cada una de las porciones del aceite de palma explican su versatilidad, así como sus numerosas aplicaciones.

Por su composición física, el aceite de palma puede usarse en diversas preparaciones sin necesidad de hidrogenarse, proceso mediante el cual se forman las grasas trans, indeseables ácidos grasos precursores de enfermedades como la diabetes y los problemas cardiovasculares, entre otras.

### 3. METODOLOGIA

El estudio que se realizó fue de tipo experimental, y durante la investigación el bio-asfalto se evaluó en su desempeño utilizando como técnica los ensayos de laboratorio.

Las actividades más importantes que se desarrollaron fueron:

- Ubicación y selección de las fuentes de producción

de aceite crudo de palma, para caracterizar dicho crudo, identificar sus componentes y definir con base en los resultados; el material vegetal que resulta más apropiado para utilizarlo como modificador de la viscosidad del asfalto.

- Caracterización del asfalto base que se desea modificar, para definir sus propiedades.
- Dosificación y mezcla en laboratorio, de las proporciones crudo de palma y asfalto base.
- Realización de ensayos de viscosidad Brookfield, para cada porcentaje de adición de crudo de palma.
- Elaboración de curvas de viscosidad vs temperatura, ensayos de penetración, punto de ablandamiento e índice de penetración del bioasfalto producido.
- Escogencia del porcentaje óptimo de crudo de palma, que le proporcione al asfalto base la mayor disminución de la viscosidad a la misma temperatura, y cumpla la norma INVIAS.
- Elaboración de la curva reológica del asfalto modificado (bioasfalto), con el fin de determinar las temperaturas mezclado y compactación de las mezcla.
- Definición de la fuente de los materiales pétreos, para elaborar la mezcla asfáltica.
- Caracterización por medio de ensayos de laboratorio, de los materiales a utilizar de acuerdo a la norma INVIAS 2007.
- Calcular la curva granulométrica para una mezcla asfáltica semidensa MSC-2, y definirla como curva para la fórmula de trabajo.
- Fabricación de las probetas a utilizar, para cada porcentaje de asfalto definido.
- Elaboración del diseño de la mezcla asfáltica de acuerdo al método Marshall, dibujar las curvas y definir la formula de trabajo.
- Elaboración de las probetas usadas en laboratorio, con la fórmula de trabajo obtenida para ejecutar las pruebas de desempeño dinámico de las mezclas.
- Comparación de los resultados de desempeño de la mezcla tibia con resultados de las mezclas en caliente.

#### 4. RESULTADOS

Después de analizar varias muestras de diferentes partes del país, se seleccionó la muestra de “dismaprim”, esta plantación está ubicada en el departamento de Cundinamarca y cuenta con las siguientes características químicas: crudo de Palma 100% vegetal, apariencia semi-sólida, color naranja o rojizo. Dependiendo del tiempo de almacenamiento puede cambiar la acidez y puede presentar un olor rancio. En la tabla 2 se pueden ver las características de la muestra escogida.

**Tabla 2.** Características generales del crudo de palma y características del crudo de “dismaprim”

ESPECIFICACION	VALORES	UNIDADES	METODO AOCs
Acidez	5.0 Max	%Palmitico	Ca5a-40
Color	15R-20R;30A	Celda ½”	Cc13b-45
Humedad y material. volátil	0.15 Max	%	Ca2c-25
Impurezas	0.1 Máx	%	Ca3-46
Índice de peróxido	4.0 Máx	Meq/kg	Cd8-53
Índice de lodo	53-55	Wijs	Cd1-25
Punto de fusión Mettler	39.0-40.	°C	Cc18-80
Hierro	1.0 Máx	Ppm	Ca 15-75
Cobre	Negativo	Ppm	Ca 15-75
Características del crudo de palma de Dismaprim			
ESPECIFICACION	VALORES	UNIDADES	METODO AOCs
Acidez	4.0 Max	%Palmitico	Ca5a-40
Color	15R	Celda ½”	Cc13b-45
Humedad y material. volátil	0.11	%	Ca2c-25
Impurezas	0.1	%	Ca3-46
Índice de peróxido	3.0 Máx	Meq/kg	Cd8-53
Índice de lodo	50	Wijs	Cd1-25
Punto de fusión Mettler	40	°C	Cc18-80
Hierro	0.0	Ppm	Ca 15-75
Cobre	Negativo	Ppm	Ca 15-75

Fuente: Dismaprim

Otras muestras analizadas fueron suministradas por Palmagro, ubicada en becerril Cesar y crudo de palma de Santa Marta, ninguna de estas muestras cumplieron con los controles de calidad, por eso se descartaron, ver tablas 3 y 4 respectivamente.

**Tabla 3.** Características del crudo de palma de Palmagro

ESPECIFICACION	VALORES	UNIDADES	METODO AOCs
Acidez	5.0	%Palmitico	Ca5a-40
Color	15R	Celda ½”	Cc13b-45
Humedad y material. volátil	0.09	%	Ca2c-25
Impurezas	0.1	%	Ca3-46
Índice de peróxido	3.0	Meq/kg	Cd8-53
Índice de lodo	50	Wijs	Cd1-25
Punto de fusión Mettler	39	°C	Cc18-80
Hierro	0.0	Ppm	Ca 15-75
Cobre	Negativo	Ppm	Ca 15-75

Fuente: Palmagro

**Tabla 4.** Características del crudo de palma de Santa Marta

ESPECIFICACION	VALORES	UNIDADES	METODO AOCs
Acidez	9.0	%Palmitico	Ca5a-40
Color	15R	Celda ½”	Cc13b-45
Humedad y material. volátil	0.20	%	Ca2c-25
Impurezas	0.9	%	Ca3-46
Índice de peróxido	5.0	Meq/kg	Cd8-53
Índice de lodo	61	Wijs	Cd1-25
Punto de fusión Mettler	39	°C	Cc18-80
Hierro	1,3	Ppm	Ca 15-75
Cobre	Negativo	Ppm	Ca 15-75

Fuente: crudo Santa Marta

Se realizan los ensayos de laboratorio con el fin de identificar las características del asfalto base a utilizar, cuyos resultados se pueden ver en la tabla 5.

**Tabla 5.** Ensayo de viscosidad asfalto base 60-70

ENSAYO DE VISCOSIDAD BROOKFIELD LD DV-II + PRO ASFALTO BASE 60-70 ECOPEPETROL					
Temperatura de ensayo	60°	80°	100°	135°	150°
Velocidad de giro en rpm	1.2	12	70	120	200
Referencia o número y tamaño del vástago utilizado	27	27	27	21	21
Torque 1 medido expresado en %	95.4	90	90.2	89.1	74.3

ENSAYO DE VISCOSIDAD BROOKFIEL LD DV-II + PRO ASFALTO BASE 60-70 ECOPELROL					
Torque 2 medido expresado en %	95.3	90.1	90.2	89	74.2
Torque 3 medido expresado en %	95.3	90	90.1	89	74.1
Viscosidad 1 (cp)	199000	18563	3221	370.8	185.8
Viscosidad 2 (cp)	199000	18563	3221	370.8	185.5
Viscosidad 3 (cp)	199000	18563	3218	370.8	185.2
Promedio viscosidad (cp)	<b>199000</b>	<b>18563</b>	<b>3220</b>	<b>371</b>	<b>186</b>

Dado que el crudo de Palma se considera como un aditivo modificador de la viscosidad del asfalto base, su utilización y dosificación obedeció a los parámetros que se usan para dichos objetivos, es decir, se establece una cantidad que sea menor a 1%, controlando los resultados obtenidos con cada porcentaje. Para tal efecto se consideraron cantidades de 0.3%, 0.5%, 0.7% y 1.0% generando con estos valores una regresión logarítmica en el plano viscosidad vs temperatura.

#### 4.1 Viscosidades para la mezcla asfalto y crudo de palma

Se realizó ensayo de viscosidad para la mezcla de asfalto base y aceite crudo de palma en los porcentajes de 0.3%, 0.5%, 0.7% y 1.0% y a diferentes temperaturas, y a distintas muestras, entre ellas “dismaprim” y “palmagro” resultados que se muestran en las tablas 6 y 7, y donde se puede observar que el crudo de palma procedente de “dismaprim”, y con el 1% de adición con relación al peso del asfalto, posee el mayor potencial reductor de la viscosidad.

**Tabla 6.** Viscosidad de la mezcla asfalto y aceite crudo de palma a diferentes temperaturas “dismaprim”

% CRUDO DE PALMA	TEMPERATURAS (°C) / VISCOSIDAD (CENT POISES)				
	60°	80°	100°	135°	150°
	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP
0,3%	186000	17625	3100	357,1	188,3
	185900	17646	3150	358,2	185,2
	186100	17583	3200	358,2	184,2
	<b>186000</b>	<b>17618</b>	<b>3150</b>	<b>358</b>	<b>186</b>

% CRUDO DE PALMA	TEMPERATURAS (°C) / VISCOSIDAD (CENT POISES)				
	60°	80°	100°	135°	150°
0,5%	174000	16800	3150	351	183
	175000	17125	3100	353	185
	174000	17042	3009	353	182
	<b>174333</b>	<b>16989</b>	<b>3086</b>	<b>352</b>	<b>183</b>
0,7%	138000	14300	2200	300	150
	135000	14100	2500	295	160
	136000	14000	2450	310	157
	<b>136333</b>	<b>14133</b>	<b>2383</b>	<b>302</b>	<b>156</b>
1%	122000	10005	1650	180	100
	124000	10000	1655	175	102
	121800	9900	1657	175,9	100
	<b>122600</b>	<b>9968</b>	<b>1654</b>	<b>178</b>	<b>101</b>

**Tabla 7.** Viscosidad de la mezcla asfalto y aceite crudo de palma a diferentes temperaturas “Palmagro”

VISCOSIDADES (CENT POISES) / CONCENTRACIONES: PALMAGRO					
%	60° C	80° C	100° C	135° C	150° C
0,3	186000	17618	3038	358	186
0,5	160265	17308	3050	350	181
0,7	141263	14500	2398	289	156
1,0	132007	12324	2001	270	142

De los resultados obtenidos de las tablas 6 y 7, se escoge el crudo de palma procedente de Dismaprim, y con el 1% de adición con relación al peso del asfalto.

#### 4.2 Características de los materiales

Los materiales pétreos se obtienen de una planta para el procesamiento de agregados en el Valle de Aburrá y de la cual se obtiene la caracterización de acuerdo a ensayos realizados a dichas muestras, donde las proporciones fueron de 54.1% gruesos, un 41.7% de finos y un 4.2% de llenante. Para determinar en el laboratorio las propiedades del material se utilizaron las normas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) 2007. El Bioasfalto utilizado fue el aceite crudo de palma de “dismaprim” al 1%, para la producción de la mezcla se utilizó el diseño Marshall con el cual se obtuvo la fórmula de trabajo; que sirvió para elaborar las briquetas y evaluar el desempeño de la mezcla.

En las tablas 8, 9 y 10 se pueden observar la

caracterización de los agregados gruesos, finos, llenante mineral y los valores de la norma INVÍAS, donde se puede evidenciar que los agregados cumplen con dicha norma.

**Tabla 8.** Caracterización de los agregados gruesos

ENSAYO	RESULTADOS	ESPECIFICACIÓN INVÍAS ART. 400-07
Peso Específico Aparente	2.861	--
Peso Específico Aparente SSS	2.892	--
Peso Específico Nominal	2.953	--
Absorción	1.09%	--
Desgaste en La Máquina de Los Ángeles	23.7%	25% máx
Desgaste Micro-Deval	4.3%	20% máx
10% de Finos	257.64 KN 207.45 KN 80.5%	Seco: 110 KN mín Húmedo: -- Húmedo/Seco: 75% mín
Solidez en Sulfato de Sodio	0.7%	12% máx
Caras Fracturadas	88/81	1 cara/ 2 caras 85/70 mín
Partículas Planas y Alargadas (relación 1:5)	1.0%	10% máx
Limpieza Superficial del Agregado Grueso	0.45%	0.5% máx

**Tabla 9.** Caracterización de los agregados finos

ENSAYO	RESULTADOS	ESPECIFICACIÓN INVÍAS ART. 400-07
Peso Específico Aparente	2.766	--
Peso Específico Aparente SSS	2.792	--
Peso Específico Nominal	2.840	--
Absorción	0.94%	--
Solidez en Sulfato de Sodio	1.1%	12% máx
Angularidad (método A)	49.1%	45% mín
Índice de Plasticidad	NP	NP
Equivalente de Arena	61%	50% mín

**Tabla 10.** Caracterización del llenante mineral

ENSAYO	RESULTADOS	ESPECIFICACIÓN INVÍAS ART. 400-07
Peso Específico del Llenante	2.768	--
Concentración Crítica del Llenante	0.417	Mayor que la concentración real
Peso Unitario Aparente del Llenante en Tolueno + 5% de cal hidratada NARE	0.8 g/cm <sup>3</sup>	0.5 a 0.8 g/cm <sup>3</sup>
Vacíos del llenante compactado en seco	41.62	38% mín

El asfalto utilizado fue Normalizado de penetración 60-70 modificado con crudo de palma al 1%, y cuyas características se pueden ver en la tabla 11.

**Tabla 11.** Caracterización del asfalto 60-70 modificado al 1% con aceite crudo de palma

ENSAYO	RESULTADOS
Peso Específico	1.006
Penetración a 25°C (0.1 mm)	62
Punto de ablandamiento (°C)	51
Índice de Penetración	-0.41

### 4.3 Diseño Marshall

Mediante el ensayo Marshall se determinó el contenido óptimo de betún para una mezcla de agregados de composición y granulometría determinada. Para ello se prepararon cinco juegos de tres briquetas con 75 golpes por cada cara con incrementos del medio por ciento (0.5%) en el contenido de asfalto en peso sobre la mezcla total.

Los contenidos de asfalto variaron desde 4.0 hasta 6.5%, los agregados en fracciones representativas fueron calentados a una temperatura de 165°C, el asfalto se calentó a 155°C y se mezclaron hasta obtener un conjunto homogéneo.

Las probetas se compactaron a una temperatura de 140°C con 75 golpes por cada cara, con la energía de compactación correspondiente a un martillo de 10 lbs. de peso y 18" de caída. Una vez frías las briquetas se determinaron la densidad seca y la densidad húmeda

superficie seca, como específica la norma. Además, se realizan los ensayos de estabilidad y deformación, previa inmersión en un baño de agua a 60°C y durante un tiempo de 30 minutos. En la tabla 12 se observan las especificaciones técnicas del INVIAS para mezcla asfálticas.

**Tabla 12.** Especificaciones técnicas del INVIAS

ESPECIFICACIONES DEL INVIAS PARA MEZCLA ASFALTICA	
Gradación	MSC-2
Estabilidad	Mínimo 900 Kg
Flujo	Entre 2 – 3.5 mm
Vacíos en la mezcla total	Entre 4 – 6%
Vacíos en los agregados	Mínimo 15%
Vacíos llenos con asfalto	Entre 65 – 75%
Relación llenante/ligante efectivo	0.8 – 1.2
Relación estabilidad/flujo	300 – 600 Kg/mm
Tracción Indirecta	Mínimo 80%

#### 4.3.1 Formula de trabajo

De acuerdo con los resultados obtenidos, las normas de diseño del INVIAS, de diseño de mezclas asfálticas, se escogió la formula de trabajo que se describe en la tabla 13.

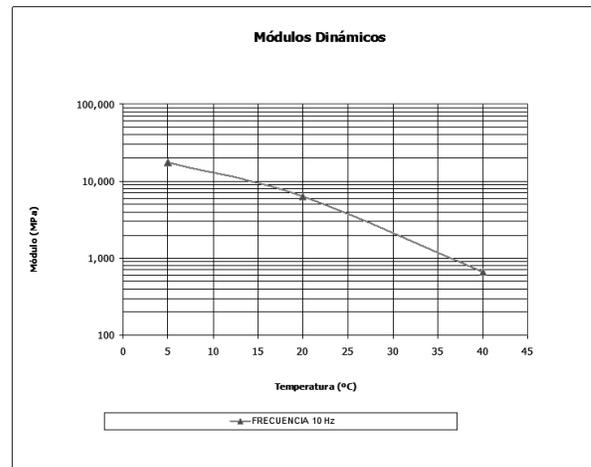
**Tabla 13.** Formula de trabajo encontrada

FORMULA DE TRABAJO	
Gradación	MSC-2
Contenido óptimo de asfalto	4.6%
Densidad	2499 Kg/m <sup>3</sup>
Estabilidad Marshall	1245 Kg
Flujo	2.8 mm
Vacíos en la mezcla total	4.7 %
Vacíos en los agregados	15.1 %
Vacíos llenos con asfalto	68.6 %
Relación estabilidad/flujo	444.6 Kg/mm
Relación llenante / ligante efectivo	0.98
Concentración crítica del llenante	0.417
Concentración real del llenante	0.257
Tracción Indirecta	84.4%

#### 4.4 Modulo Dinámico

Se determinó el módulo dinámico de una probeta tipo Marshall, por medio del principio de tensión

indirecta. El principio enuncia que al aplicar una carga compresiva a través del diámetro de una muestra cilíndrica, se produce una tensión sobre un diámetro ortogonal al cual se aplica la carga. Al registrar la carga vertical aplicada y la deformación horizontal producida se obtuvo el módulo dinámico [MPa], cuyos resultados se pueden ver en la figura 1.



**Figura 1.** Módulos dinámicos para frecuencia de 10 Hz con temperaturas de 5, 20 y 40°C

#### 4.5 Deformación permanente

La prueba es útil para identificar el potencial de ahuellamiento de una mezcla asfáltica, teniendo en cuenta que la mezcla no será ahuellable si al cabo de los 3600 ciclos de carga el porcentaje de deformación axial (relación entre la deformación vertical final y el espesor inicial) en los especímenes es menor del 1%, la mezcla podrá ser ahuellable si ésta deformación axial se encuentra entre el 1% y el 2% y no cumple por ahuellamiento cuando esta deformación supera el 2%. En la tabla 14 se puede ver que la mezcla no será ahuellable.

**Tabla 14.** Deformación permanente mezcla asfáltica

Espécimen	4	5
Altura (mm)	55,1	55,3
Diámetro (mm)	100,3	100,0
Densidad Aparente BULK	2,491	2,487
Temperatura de ensayo (Celsius)	40	40
Esfuerzo de ensayo (100 KPa)	100	100
Duración del ensayo (pulsos)	3600	3600

Esfuerzo de acondicionamiento (KPa)	10	10
Período de acondicionamiento (seg.)	120	120
Deformación axial después de acondicionamiento, %	0,0416	0,0332
Deformación axial después de 10 Pulsos, %	0,5373	0,3911
Deformación axial después de 100 Pulsos, %	0,7121	0,6248
Deformación axial después de 1000 Pulsos, %	0,7905	0,8259
Deformación axial después de 1400 Pulsos, %	0,8069	0,8555
Deformación axial después de 1800 Pulsos, %	0,8276	0,8794
Deformación axial después de 3600 Pulsos, %	0,8976	0,9416
Promedio de Deformación, %	<b>0,9196</b>	

#### 4.6 Fatiga a esfuerzo controlado

Los resultados de las pruebas de resistencia a la fatiga y módulo dinámico por esfuerzo controlado se presentan en la tabla 15. Las condiciones normales de ensayo son 20°C de temperatura y diferentes niveles de esfuerzo horizontal inducido y frecuencia de 2,5 Hz.

**Tabla 15.** Resistencia a la fatiga

Probeta	$\sigma_{x_{max}}$ (KPa)	Módulo** (MPa)	Nº CICLOS	Strain ( $\mu\epsilon$ )	Bulk
15	550	3191.5	492	353,3	2,487
13	530	3538.5	480	307,1	2,487
19	380	3016.5	1778	258,2	2,494
20	340	3249.0	1641	214,5	2,490
11	350	3521.5	2116	203,7	2,496
3	300	3356.0	2317	183,3	2,496
14	200	3209.0	9804	127,8	2,504

Con base en los resultados de laboratorio que se acaban de presentar se realiza una comparación del desempeño de las mezclas asfálticas en caliente y las mezclas asfálticas tibias que se puede observar en la tabla 16, y donde se muestra un buen desempeño de la mezcla asfáltica tibia.

**Tabla 16.** Desempeño de mezclas asfálticas en caliente y tibias

TIPO DE MEZCLA	MODULO DINAMICO FRECUENCIA 10 HERTZ		
	5°	20°	40°
MSC-2 CALIENTE	<b>18901 Mpa</b>	<b>5697 MPa</b>	<b>1168 MPa</b>
MSC-2 TIBIA	<b>17616 Mpa</b>	<b>6362 MPa</b>	<b>666 Mpa</b>

TIPO DE MEZCLA	LINEA DE FATIGA A ESFUERZO CONTROLADO		
	a	b	c
MSC-2 CALIENTE	-0.363	3.568	0,961
MSC-2 TIBIA	-0,319	3,376	0,929
TIPO DE MEZCLA	DEFORMACION PERMANENTE %		
	MSC-2 CALIENTE		
MSC-2 TIBIA	1.0345		
MSC-2 TIBIA	0,9196		

#### 5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados de los ensayos de laboratorio, podemos afirmar que las mezclas asfáltica tibias ofrecen una gran solución para minimizar el impacto medioambiental que generan la emisión de gases debido a la combustión y calentamiento de materiales. En el mundo hay una gran variedad de tecnologías con las cuales se pueden producir mezclas tibias; el crudo de palma de Colombia es otra alternativa viable que se puede tener en cuenta para este fin, la cual brinda beneficios económicos técnicos y ambientales.

Las pruebas de laboratorio muestran al crudo de palma como un aditivo de gran potencial reductor de viscosidad y a su vez la mezcla producida con este refleja una buena resistencia mecánica y desempeño producidas a menor temperatura.

De los tres tipos de crudo de palma que se evaluaron, el que brindo el mejor resultado como reductor fue el de dismaprim, dado que se obtuvieron los valores más altos de reducción en viscosidad, por esta razón fue el utilizado para modificar el asfalto base al 1%, y la temperatura de producción de la mezcla se logró disminuir de 155°C a 126°C.

#### REFERENCIAS

- [1] Koenders, B.G., Stoker, D.Ä., Bowen, C., De Groot, P., Larsen, O., Hardy, D. y Wilms, P.K., "Proceso de innovación en la producción de asfalto y la aplicación para obtener bajas temperaturas de operación", Barcelona: s.n., Congreso y Euraspalt Eurobitume. 2000.
- [2] Koenders, B.G., Stoker, D.Ä., Robertus, C., Larsen, O. y Johansen, J., Espuma WAM-, la producción de asfalto a

temperaturas de funcionamiento más bajas”. ISAP. 2002.

[3] Vaitkus, A., Vorobjovas, V., Ziliute, L., “The Research on the use of warm mix”. Riga : s.n., Baltiic Institute. 2009.

[4] Hassan, Marwa. “Life-Cycle Assessment of Warm-Mix Asphalt An Environmental and Economic Perspective”. Lousiana Univerty, Civil Engineering Class. 2009.

[5] Gandhi, Tejash. Effects of warm asphalt additives on asphalt and mixture propperties. Clemson University. s.l. : Disertación para optar el título de Ph.D en Ing. Civil, 2008.

[6] Mullins, Oliver C. “Asphaltenes, heavt oils, and petroleomics. New York”: Springer, 2007.