



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA VIAL

Fabricación de Hormigones Asfálticos Tibios en el Ecuador

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTOR: Román Chamba, Robert Danilo, Ing.

DIRECTOR: Tapia Chávez, Ángel Guillermo, Mgtr.

LOJA ECUADOR

2017



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Septiembre, 2017

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Magister.

Ángel Guillermo Tapia Chávez

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación, denominado: **Fabricación de hormigones asfálticos tibios en el Ecuador** realizado por **Robert Danilo Román Chamba**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, marzo de 2017

f).

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo **Román Chamba Robert Danilo** declaro ser autor (a) del presente trabajo de titulación: Fabricación de hormigones asfálticos tibios en el Ecuador, de la Titulación Magíster en Ingeniería Vial, siendo Ángel Guillermo Tapia Chávez Mgtr. director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, concepto, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f.....

Autor: Robert Danilo Román Chamba

Cédula: 1900471630

DEDICATORIA

Dedico ésta trabajo a Dios, quien inspiró mi espíritu para la conclusión de ésta investigación en pavimentos. A mis padres quienes me dieron vida, educación, apoyo y consejos todo el tiempo. A mis hermanos por su apoyo moral, espiritual y económico. A los sinodales quienes estudiaron mi tesis y la aprobaron. A todos los que me apoyaron para escribir y concluir esta tesis. Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios y a la Santísima Virgen del Cisne.

Agradezco a mis padres Amado y Angélica ya que gracias a ellos puedo estar en esta linda institución y poder aportar con mis conocimientos. También dedico a mis abuelos y hermanos ya que con ellos sigo siendo una persona de bien pese a cualquier tipo de enfermedad. Y quiero dedicar también a un amigo muy especial que es mi Dios, con el hago todo y esta conmigo en las buenas y en las malas, en las noches más frías y por eso se lo debo todo a él ya que a pesar de mis errores en esta vida él supo perdonarme y comenzar nuevamente.

Tabla de Contenidos

CARATULA.....	i
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
TABLA DE CONTENIDOS.....	vii
LISTA DE TABLAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
CAPÍTULO I.....	3
1.1 Introducción	4
1.2 Planteamiento del problema.....	6
1.3 Justificación	8
1.4 Marco teórico	11
1.4.1 Mezclas asfálticas en general.....	15
1.4.2 Mezclas asfálticas calientes.....	16
1.4.3 Mezclas asfálticas tibias	17
1.4.4 Beneficios de la mezcla tibia	21
1.4.5 Tecnologías para la fabricación de mezclas asfálticas tibias	26
1.4.6 Ensayo Marshall sobre la mezcla asfáltica en caliente	33
1.4.7 Estudio de las mezclas semicalientes en el laboratorio	33
1.4.8 La cera carnauba	34
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES	35
1.5.1 Alcances	35
1.5.2 Limitaciones	36
CAPÍTULO II.....	37
2.1 Estudio del estado de arte.....	38
2.1.1 Agregados pétreos	38
2.1.2 Propiedades de los agregados que se utilizan en mezclas asfálticas.....	38
2.1.3 Caracterización de los agregados	39
2.1.4 Graduación y tamaño máximo de partícula	40
2.1.5 Determinación de la abrasión.....	40
2.1.6 Índice de plasticidad.....	40

2.1.7 Determinación de la solidez de los áridos mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio	40
2.1.8 Resistencia a la peladura	41
2.1.9 Porcentaje de caras fracturadas en los agregados.....	41
2.1.10 Angularidad de los agregados finos.....	41
2.1.11 Equivalente de arena del agregado fino	41
2.1.12 Partículas alargadas y achatadas.....	41
2.1.13 Materiales deletéreos	41
2.1.14 Peso específico.....	41
2.1.15 Peso unitario de los agregados	42
2.2 Requisito que deben cumplir los agregados Pétreos.....	43
2.3 Granulometría por tamizado para determinación de porcentajes de agregados.....	44
2.3.1 Diseño granulométrico o combinación de agregados para mezclas asfálticas....	44
2.4 Ligante asfáltico	45
2.4.1 Composición Química	46
2.4.2 Comportamiento del ligante asfáltico.....	48
2.4.3 Comportamiento a altas temperaturas.....	48
2.4.4 Comportamiento a baja temperatura	49
2.4.5 Envejecimiento.....	49
2.4.6 Efectos del Envejecimiento del Ligante en la Mezcla	50
2.4.7 Asfalto ecuatoriano.....	51
2.4.8 Caracterización del asfalto AC-20	51
2.4.9 Ceras orgánicas	52
CAPÍTULO III.....	56
3.1 Metodología	57
CAPÍTULO IV	59
4.1 Resultados de los ensayos ejecutados para diseño de mezcla asfáltica.....	60
4.1.1 Análisis granulométrico	60
4.1.2 Resumen de resultados.....	62
4.1.3 Diseño de la combinación granulométrica para determinación de porcentajes de agregados.....	63
4.1.4 Combinación granulométrica.....	65
4.1.5 Resultados de los ensayos de laboratorio para caracterizar asfalto AC-20	66
4.1.6 Caracterización de la cera carnauba	66
CAPÍTULO V	68
5 Análisis e interpretación de resultados de la mezcla asfáltica tibia.....	69
5.1 Trabajo de laboratorio para elaboración de especímenes	69

ANEXOS.....	96
-------------	----

Lista de tablas

Tabla 1. Reducciones en las temperaturas para obtener mezclas asfálticas mediante diferentes métodos.....	14
Tabla 2. Antecedentes cronológicos de la producción de mezclas tibias WMA.....	17
Tabla 3. Consumo de combustible en función de la temperatura.....	24
Tabla 4. Clasificación de las mezclas asfálticas por temperatura.....	27
Tabla 5. Tabla 405-5.1. MOP-001-F-2002	39
Tabla 6. Equivalente de arena MTOP-001-F-2002.....	44
Tabla 7. Objetivos y actividades de la investigación	57
Tabla 8. Características del agregado pétreo usado en el estudio.....	62
Tabla 9. Resumen de los materiales pasantes de los ensayos de granulometría	63
Tabla 10: Diseño o composición granulométrico combinado.....	64
Tabla 11. Resultados de la caracterización del asfalto AC-20.....	66
Tabla 12: Caracterización técnicas de la Cera.....	67
Tabla 13. Viscosidades a diferentes temperaturas para concentraciones de cera	71
Tabla 14. Diseño de mezclas asfálticas en caliente	78
Tabla 15. Resumen del diseño de la mezcla.....	80
Tabla 16. Proporcionamiento de los agregados para la mezcla.....	81
Tabla 17. Resultados de Gravedad Específica Bulk para el diseño de la mezcla en caliente.	85
Tabla 18. Valores referentes para Marshall	86
Tabla 19: Resultados del ensayo Marshall.....	87
Tabla 20. Gmm y % de vacíos para la mezcla a 130 °C.	90

Lista de figuras

Figura 1. Ilustración del concepto de desarrollo sostenible.	10
Figura 2. Temperatura de fabricación, consumo de combustible	11
Figura 3. Comportamiento de la viscosidad del asfalto en función.....	11
Figura 4. Tecnologías Para Producir MAT.	20
Figura 5. Consumo de combustible vs temperatura	24
Figura 6. Comparación de la Emisión de gases entre HMA y WMA.....	25
Figura 7. Comparación en el nivel de.....	25
Figura 8. Rangos de temperatura para producción de mezclas asfálticas.....	26
Figura 9. Relación viscosidad/temperatura	29
Figura 10. Agregados Pétreos de la cantera Catamayito	38
Figura 11. Juego de Tamices.....	45
Figura 12. Comportamiento del ligante asfáltico	48
Figura 13. Planta Palma Carnauba	54
Figura 14. Cera Carnaúba	55
Figura 15. Curva de distribución Granulométrica Combinada	65
Figura 16. Preparación de la mezcla cera-asfalto	69
Figura 17. Muestras de asfalto para ensayo de viscosidad	70
Figura 18. Viscosímetro Brookfield y muestras de asfalto	70
Figura 19: Aguja utilizada para el ensayo	71
Figura 20. Curva viscosidad-temperatura del asfalto AC-20 sin modificar.....	72
Figura 21. Curva viscosidad-temperatura del asfalto modificado con el 1% de cera carnauba	72
Figura 22. Curva viscosidad-temperatura del asfalto modificado con el 3% de cera carnauba	73
Figura 23. Curva viscosidad-temperatura del asfalto modificado con el 5% de cera carnauba	73
Figura 24. Comportamiento de la Viscosidad vs. Temperatura del asfalto modificado con Cera Carnauba	74
Figura 25. % de Asfalto vs % de vacíos con aire.	79
Figura 26. % de Asfalto vs Estabilidad.....	79
Figura 27. % de Asfalto vs % Relación Bitumen/Vacíos.....	79
Figura 28: % de Asfalto vs Flujo.....	79
Figura 29. % de Asfalto vs Densidad Bulk.	80
Figura 30. % de Asfalto vs % Vacíos en el Agregado Mineral.	80
Figura 31: Añadido de la cera	82

Figura 32. Mezcla homogénea y 100% cubierta los agregados	82
Figura 33. Compactado de las briquetas.....	83
Figura 34. Extractor de briquetas	83
Figura 35. Briquetas extraídas	84
Figura 36. Proceso de gravedad específica bulk.....	85
Figura 37. Briquetas en el baño maría a 60°C y secado de la superficie	86
Figura 38. Ensayo Marshall	87
Figura 39. Briquetas ensayadas	88
Figura 40. Llenado del picnómetro de vacío	89

RESUMEN

Considerando la contaminación ambiental de las mezclas asfálticas se han desarrollado tecnologías para reducir las temperaturas de trabajo para ahorrar energía, menores emisiones y mayor nivel de seguridad en obra. Para ello se propone la fabricación de hormigones asfálticos tibios en el Ecuador, con el objetivo de desarrollar las mezclas asfálticas tibias para reducir la temperatura de mezclado y compactación, modificando la viscosidad del asfalto.

En la mayor parte de Europa y Estados Unidos se han utilizado una serie de tecnologías, en éste trabajo se utiliza la cera carnauba como aditivo reductor de viscosidad.

Este trabajo se hizo en forma experimental en laboratorio logrando unos resultados satisfactorios en cuanto al desempeño de la mezcla asfáltica tibia comparada con las mezclas en caliente.

Con base en lo anterior se puede concluir que la cera carnauba es una opción viable para reducir la viscosidad del asfalto a menores temperaturas y se puede utilizar en la producción de mezclas asfálticas.

Palabras clave: Mezclas asfálticas tibias, asfalto modificado, cera carnauba, viscosidad.

ABSTRACT

Considering the environmental contamination of the asphalt mixtures technologies have been developed to reduce working temperatures to save energy, lower emissions and a higher level of safety on site. In order to do so, it is proposed the manufacture of warm asphalt concrete in Ecuador, with the aim of developing the warm asphalt mixtures to reduce the mixing and compaction temperature, modifying the asphalt viscosity.

In most of Europe and the United States a series of technologies have been used, in this work carnauba wax is used as a viscosity reducing additive.

This work was done experimentally in the laboratory, achieving satisfactory results regarding the performance of the warm asphalt mixture compared to hot mixtures.

Based on the above, it can be concluded that carnauba wax is a viable option to reduce the viscosity of the asphalt at lower temperatures and can be used in the production of asphalt mixtures.

Key words: Warm asphalt mixtures, modified asphalt, carnauba wax, viscosity.

CAPÍTULO I

1.1 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 (Hernando & Palacio, 2011).

De la misma forma, en el proceso de colocación del pavimento, la mezcla caliente es uno de los principales contaminantes, debido a que la mezcla debe hacerse a altas temperaturas, generando una gran cantidad de gases tóxicos, que empeoran el efecto invernadero.

En virtud de lo anterior, Estados Unidos y Europa ya se han adelantado estudios en búsqueda de nuevas alternativas en la pavimentación, complementando que con mezclas asfálticas tibias se podrá disminuir éste gran daño que se está causando el ecosistema. La reducción en emisiones de gases tóxicos, así como el ahorro en el consumo de combustibles en los procesos de mezclado y compactación, son unas de las principales ventajas de ésta tecnología (Marcela & Amado, 2008).

Los beneficios esperados del proyecto se verían 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.

Un primer acercamiento al objeto de estudio, permite conocer de la existencia de varios métodos de prueba para la producción de este tipo de mezclas (WMA) estos métodos tienen como común denominador 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 HMA.

El presente trabajo de investigación está dirigido a Ingenieros Civiles y empresas dedicadas al desarrollo y aplicación de mezclas asfálticas, así como a los contratistas de obras públicas interesados en preservar el medio ambiente mediante la utilización en las obras de materiales menos contaminantes.

Consciente de la importancia que para el equilibrio ambiental tiene la utilización de las mezclas asfálticas tibias, el presente trabajo tiene como propósito diseñar y producir en laboratorio mezclas asfálticas tibias a partir de la mezcla de asfalto y la cera carnauba.

Con éste proyecto se buscó crear una mezcla asfáltica alrededor de los 120 y 140 °C, las cuales son llamadas mezcla asfáltica tibia.

Por ésta razón se adicionó una cera natural llamada carnauba, en forma de hojuelas, que tiene un punto de fusión de 83 °C, lo cual durante el proceso de fabricación de la mezcla ayuda a disminuir la viscosidad del asfalto, facilita la manejabilidad de la mezcla y permite un mezclado a temperaturas inferiores a la de una mezcla en caliente con las mismas propiedades mecánicas.

Así mismo, se realizaron mezclas a diferentes temperaturas (110, 130, y 150 °C), todas con adición de cera carnauba, con el fin de comprobar la calidad de las mezclas y sus propiedades mecánicas mediante el ensayo Marshall.

La estructura de este trabajo se compone de seis apartados, de los cuales los primeros cinco están destinados al planteamiento del problema de investigación, la justificación, los objetivos que se persiguen con el trabajo llevado a cabo, el marco teórico y la metodología adoptada para la realización del mismo.

El sexto y último apartado está destinado a presentar los resultados de la investigación efectuada. Entre otras actividades desarrolladas en dicho apartado, se presenta la caracterización del asfalto Base, los resultados de la dosificación en laboratorio de la cera asfalto, la caracterización de los materiales agregados de la mezcla y se presentan los resultados del estudio técnico para la mezcla asfáltica utilizando cera carnauba.

1.2 Planteamiento del problema

“Uno de los principales problemas que se presenta hoy en día con respecto al medio ambiente es el calentamiento global, se debe principalmente a la emisión de dióxido de carbono” (Cardona & Leguizamón, 2013). “A nivel global y local, la industria de la construcción contribuye significativamente al consumo de energía y de recursos naturales, así como a la generación de impactos ambientales, como emisiones a la atmósfera y generación de residuos” (Arista & Aguillón, 2013). “Una de las causas de la contaminación asociada a la construcción de infraestructuras de transporte es la emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera” (Rubio, Martínez, Baena, & Moreno, 2012). “El empleo de altas temperaturas en la fabricación de mezclas asfálticas convencionales, contribuye al calentamiento global y ocasiona elevados consumos de energía, además de afectar negativamente la salud de las personas encargadas de la manipulación de estas mezclas” (Benítez, Zapata, & Araujo, 2015).

El dióxido de carbono que es responsable del 80% de las emisiones totales; durante miles de años, las emisiones de dióxido de carbono se mantuvieron estables, sin embargo a aumentado mucho desde la Revolución Industrial pasando de 280 ppm en el año 1800 a 380 ppm. en la actualidad, esta evolución ha venido acompañada de un aumento de la temperatura media que ha pasado de 13,7 °C a 14,4 °C.

El impacto económico como consecuencia del calentamiento global es enorme, pues dicho fenómeno está asociado a una mayor frecuencia e intensidad de los desastres naturales y la pérdida de tierras debido al aumento del nivel de los océanos, así como a PIB no generado como consecuencia de la disminución en la producción agrícola, en tal sentido, se estima por ejemplo que el costo de la inacción frente al calentamiento global podría ascender al 8% del PIB por año en 2100.

La mezcla asfáltica es un material para construcción de pavimentos, compuesto por asfalto y un agregado mineral. El asfalto actúa como un agente ligante y aglutinador de las partículas minerales, formando una masa cohesiva muy efectiva, por lo que resulta un material muy atractivo para construir carpetas de rodadura (Hernando & Palacio, 2011).

La fabricación de mezclas asfálticas en caliente necesitan de altas temperaturas para su construcción y compactación (150°C-180°C), energía que especialmente se usa para evaporar el agua del granular y crear una viscosidad adecuada en el asfalto, de tal manera que sea suficientemente manejable y fluido (Javier, Ortiz, Guillermo, Pumarejo, & Moreno, 2013).

“En tal sentido, la producción de las mezclas en caliente requiere de altas temperaturas de fabricación y compactación que generan contaminación del medio ambiente” (Cardona & Leguizamón, 2013).

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. 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 (Lopera & Córdoba, 2013).

La reducción de la temperatura alcanzada por WMA proviene de la utilización de diversas tecnologías que se han desarrollado en los últimos años, y que se pueden clasificar en los siguientes tres grupos: aditivos orgánicos, aditivos químicos, y los procesos de formación de espuma a base de agua. Aunque todos ellos persiguen el mismo objetivo, el proceso de fabricación es diferente. Por lo tanto, su objetivo es principalmente para reducir la viscosidad del betún, que a su vez mejora la trabajabilidad de la mezcla, produce menos emisiones, y por lo general crea mejores condiciones de trabajo (Rubio et al., 2012).

“Estos beneficios han motivado el rápido crecimiento de la evolución de las tecnologías WMA en todo el mundo, especialmente durante la última década” (Haggag, Mogawer, & Bonaquist, 2011).

“En nuestro medio no se cumplen adecuadamente las temperaturas de compactación en campo para muchos casos, es importante promover el uso de aditivos que garanticen que a 100°C o menos se puede compactar sin perder la calidad de la carpeta asfáltica” (García, 2010).

La reducción de la calefacción de producción de la mezcla, no sólo involucra un menor consumo de combustible, sino también, significativas reducciones en la cantidad de emisiones de partículas de los agregados finos, en la cantidad de gases de efecto invernadero generados, en la cantidad de humo generada por el betún, lo cual es especialmente relevante en torno a las máquinas de pavimentación, y por ende la reducción en la cantidad de combustibles fósiles no renovables utilizados.

La problemática que se ha planteado relativa a las dificultades técnicas, los mayores costos y el impacto ambiental de las mezclas asfálticas en caliente (HMA) dan pie para que se formule como principal pretensión de este trabajo la de fabricar mezclas asfálticas tibias, empleando un bioinsumo que se puede producir en nuestro país, como es la cera carnauba. En tal sentido, la pregunta problema que se pretende responder con este trabajo es: ¿La modificación de la viscosidad del asfalto, mediante la mezcla del asfalto base y cera carnauba sirven para reducir la temperatura de producción de la mezcla y compactación?

1.3 Justificación

En el quehacer profesional de la Ingeniería Civil, son reiteradas las inquietudes que se generan en los proyectos de pavimentación de mallas viales relacionadas con la mejor forma de reducir costos en la materia prima, en la producción y en el desecho de materiales, a esta situación, se suma la imperiosa necesidad ética, legal y ambiental, de ayudar a la sostenibilidad del ambiente a través de la implementación de alternativas que contribuyan a la minimización de impactos ambientales negativos.

A partir de ello, el fundamento del presente trabajo gira en torno a una solución para la producción de mezclas asfálticas, de forma tal que reduzca el uso de alta calefacción aplicada sobre la mezcla para la adhesión de partículas, y con ello, disminuya significativamente, el uso de combustibles fósiles para alimentar dicho sistema de calefacción.

Cabe recordar que en la actualidad la oferta en soluciones para la producción de mezclas asfálticas en el país, se limita únicamente a las mezclas en caliente, entre tanto, las firmas de pavimentación nacionales, no identifican la necesidad de invertir en proyectos de investigación, desarrollo e innovación para la implementación de nuevas tecnologías asfálticas, de ahí la importancia del presente proyecto de investigación (Hernando & Palacio, 2011).

Después de realizar la recopilación, análisis y selección de la información acerca de las mezclas tibias, podemos concluir que esta tecnología es un gran aporte para disminuir el impacto ambiental. El desarrollo de esta tecnología con enfoque en la reducción de temperatura de mezcla y compactación empezó en 1997, para cumplir con el Protocolo de Kyoto. 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 los cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos

a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales (Lopera & Córdoba, 2013).

“El desarrollo de las nuevas tecnologías en las mezclas asfálticas contribuye con la disminución del envejecimiento del ligante en el proceso de fabricación, lo cual mejorará el comportamiento a la fatiga del material” (Torres & Noreña, 2012). “Los aditivos orgánicos, se aplican generalmente en dosis de entre 2% y 4% del total de la masa de asfalto” (Avendaño, González, & Bayona, 2015).

Para el mejor entendimiento del impacto que estas mezclas pueden tener, sería bueno recordar el concepto de desarrollo sostenible, ampliamente aplicado y desarrollado actualmente. Según la Comisión de las Naciones Unidas, se entiende por desarrollo sostenible “aquel desarrollo que permite satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las sociedades futuras de satisfacer sus propias necesidades”. Por lo tanto, a partir de la anterior definición queda claro que el desarrollo sostenible no se centra solo en lo que a impacto ambiental se refiere, sino que una tres áreas independientes: desarrollo económico, desarrollo social y protección ambiental, como podemos observar en la Figura 1. Las mezclas semicalientes son consistentes con los ideales descritos por el desarrollo sostenible (Inmbbers, 2012).

Las mezclas asfálticas tibias o semicalientes surgen como respuesta al consumo elevado de energía de las mezclas convencionales; que permite el mezclado, la compactación y colocación en obra a temperaturas inferiores, las cuales varían entre 20 y 60°C. La reducción de la temperatura no desmejora las propiedades mecánicas y dinámicas de la mezcla y además, aporta beneficios como la disminución de costos, el descenso de emisiones de gases efecto invernadero y la reducción de energía (Figura 2).

Para lograr estas reducciones se han realizado diferentes investigaciones en el mundo, siendo las más empleadas las modificaciones de asfaltos con diferentes agentes reductores de viscosidad, entre los cuales se encuentran las ceras y los tensoactivos, que dadas sus características modifican la curva de viscosidad del cemento asfáltico y permiten reducir las temperaturas de fabricación y compactación de la mezcla asfáltica (Figura 3) (Javier et al, 2013).

Gil Redondo et al. por medio de ensayos con el Reómetro de Corte Dinámico (DSR) y de la calorimetría diferencial de barrido (DSC), establecieron que ceras Slack, Fischer-Tropsch,

amidas de ácidos grasos y ceras de polietileno, afectan el comportamiento reológico y las propiedades físicas del asfalto (Javier et al., 2013).

Entre los resultados obtenidos resaltan que las ceras slack reducen la viscosidad del ligante a medida que se disminuye las temperaturas de fabricación del aglomerado, lo que a su vez provoca una disminución de la rigidez del asfalto. Por otra parte, las ceras Fischer-Tropsch, la cera amida y ceras de polietileno redujeron la temperatura de fabricación del aglomerado, mejorando las características mecánicas, puesto que hay un aumento en la rigidez del asfalto (Arega & Bhasin, 2012).

Estos resultados indican que se puede reducir la temperatura de una mezcla asfáltica entre 20 y 30°C, sin alterar sus propiedades físicas.



Figura 1. Ilustración del concepto de desarrollo sostenible.

Fuente: D'Angelo et al.

Elaborado por: El autor

Basados en los estudios desarrollados, desde la perspectiva medioambiental y en la hipótesis de modificar la viscosidad del asfalto, se plantea el uso de nuevas tecnologías para reducir las temperaturas de fabricación y compactación de las mezclas asfálticas convencionales usadas en el Ecuador y mostrar los resultados experimentales obtenidos y su comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas cerradas con granulometría que pasan el tamiz $\frac{3}{4}$.

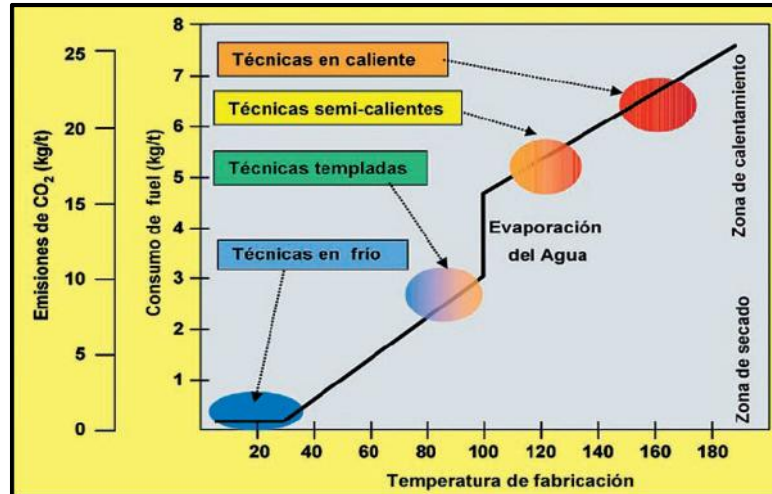


Figura 2. Temperatura de fabricación, consumo de combustible y cantidad de emisiones de gases efecto invernadero.
Fuente: Mezclas bituminosas a baja temperatura.
Elaborado por: El autor

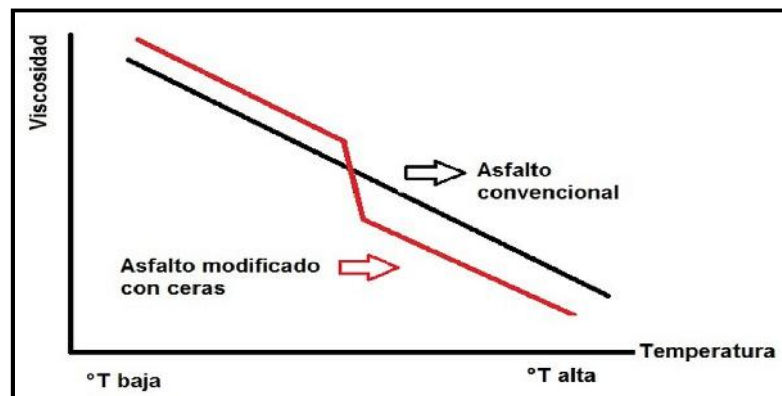


Figura 3. Comportamiento de la viscosidad del asfalto en función de a temperatura.
Fuente: Comportamiento de mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos modificados con ceras.
Elaborado por: El autor

1.4 Marco teórico

“Los asfaltos (WMA) se introdujo en Europa a finales de 1990 y en Estados Unidos a principios de 2004” (Arega, Bhasin, Motamed, & Turner, 2011). Los antecedentes cronológicos respecto a la investigación en mezclas asfálticas tibias, tienen inicio en el año 1995, cuando 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. Entre el año 1999-2001 se dan a conocer los 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. En el año

2003, los estudios sobre mezclas tibias, son presentados en la Convención Anual de la Asociación Nacional de Pavimento Asfáltico NAPA; 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). En el año 2005, se crea el 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. En el año 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. En el año 2007, AASHTO y FHWA, realiza visitas guiadas a experiencias en WMA, en Francia, Alemania y Noruega. Entre el año 2008 y 2012, se han realizado a nivel mundial diferentes tipos de investigaciones relevantes a las MAT, en Colombia especialmente se realizan investigaciones de nivel académico (Lopera & Córdoba, 2013).

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 los cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales (Lopera & Córdoba, 2013).

De esta necesidad de trabajar a menores temperaturas se desarrollaron los diversos tipos de mezclas tibias que existen actualmente y se ha demostrado que se obtienen grandes ventajas por facilidad de trabajo y reducción de la contaminación ambiental (García, 2010). La reducción de la temperatura alcanzada por WMA proviene de la utilización de diversas tecnologías que se han desarrollado en los últimos años, y que se pueden clasificar en los siguientes tres grupos: aditivos orgánicos, aditivos químicos, y los procesos de formación de espuma a base de agua. (Rubio et al., 2012).

Es preciso decir, que en las WMA fabricadas con asfalto modificado con cera de carnauba, se reduce la temperatura de producción y compactación de las mismas, y la emisión de gases al medio ambiente disminuye respecto a las mezclas asfálticas en caliente (Cardona & Leguizamón, 2013).

Cemento asfáltico: son asfaltos refinados o una combinación de asfalto refinado y aceite fluidificante de consistencia apropiada para trabajos de pavimentación. Estos asfaltos

refinados son muy duros y se les da la consistencia, mezclándolos con aceites o residuos provenientes de la destilación del petróleo de base asfáltica.

Los cementos asfálticos se dividen en grados según su dureza o consistencia, que es medida mediante el ensayo de penetración medido en 1/10 mm, valor que es inverso a la dureza (García, 2010).

El asfalto en Ecuador se obtiene del proceso de destilación del crudo que se ejecuta en la refinería de Esmeraldas, refinería principal del país y productora única de asfalto y diluidos asfálticos. Actualmente producen un solo tipo de Asfalto que tiene las características de un AC 20 (García, 2010). Cera de carnauba: la cera de carnauba se obtiene de las hojas de la palma copernicia prunifera.

Esta palma crece en la región de Ceará, al noreste de Brasil. Una vez que se cortan las hojas, se secan y trituran para que la cera se desprenda.

Esta cera se conoce también como la "reina de las ceras", por sus características e infinidad de aplicaciones. La cera de carnauba es reconocida por sus propiedades de brillo, combina dureza con resistencia al desgaste, su punto de fusión es de 78 a 85 °C (SA, 2016). Mezcla Asfáltica Tibia (WMA): las mezclas asfálticas tibias son elaboradas, colocadas y compactadas a temperaturas inferiores a las convencionales, exigiéndose que sus características y su comportamiento en servicio sean iguales o superiores a los de las mezclas convencionales (Larcen, Daguerre, Williams, Asurmendi, & Ferrín, 2011).

Recientemente la industria de la construcción, se ha enfocado en la reducción de las temperaturas en la producción y aplicación de las mezclas asfálticas. Típicamente la producción y aplicación de mezclas en caliente requiere que los materiales se calienten entre 135°C y 180°C.

La temperatura viene dictada por parte de la viscosidad del ligante asfáltico, siendo necesario aplicar calefacción para garantizar un revestimiento homogéneo y completo de los agregados por parte del asfalto. Dichas limitaciones, deberán tomarse en cuenta a la hora de considerar las posibilidades de reducir las temperaturas de producción y aplicación; junto con la necesidad de garantizar las propiedades mecánicas del nuevo pavimento inmediatamente después de la terminación de la obra, para reducir a su mínima expresión, los riesgos y la interrupción del tránsito.

La clave está en la difusión del ligante por el esqueleto mineral de los agregados. Ante este panorama, se han introducido varias opciones para lograr dichos objetivos de reducción, aplicando temperaturas significativamente reducidas, como se detalla en la siguiente tabla (Hernando & Palacio, 2011).

Tabla 1. Reducciones en las temperaturas para obtener mezclas asfálticas mediante diferentes métodos

Proceso de Mezclas asfálticas tibias	Compañía	Aditivos	Temperatura de Producción (en planta) °C	Reporte de uso	Aproximado Total Toneladas producidas a la fecha
ADITIVOS- CERAS					
Sasobit (Fischer-Tropsch cera)	Sasol	Si, en Alemania añadieron un promedio 2.5	Variados, 1 20°C–130°C	Alemania y Otros países Por todo el mundo	>10 millones de toneladas por todo el mundo
Asfalto -B (Montan cera)	Romonta	Si, en Alemania añadieron un promedio de 2.5% a peso	Variados, 115°C–135°C	Alemania	Desconocido
Licomont BS 100 (aditivo) o Súbit (ácido adiposo amidas)	Clariant	Si, alrededor de 3% del peso	Variados, 115°C–135°C	Alemania	>322.500 metros cuadrados desde 1994
3E LT or Ecoflex(proprietario)	Colas	Si 2% del peso	Variados, 115°C–135°C	Francia	Desconocidos
PROCESO ESPUMADO					
Aspha-min (zeolite)	Eurovia y MHI	Si, alrededor de 0.3% en peso total de la mezcla	Entre 110°C y 135°C	Alemania, Francia y Estados Unidos	Alrededor de 300,000 toneladas
ECOMAC (mezcla fría antes de echarla)	Screg	Si (tipo y calidad desconocida)	Situado alrededor de 45°C (113°F)	Francia	Algunas pruebas
LEA, también EBE y EBT (espumoso De una porción de fracción agregada)	LEACO, Fairco, y EIFFAGE Travaux Publics	Si, 0.2% en peso de archivador de capa y agente de adhesión	<100°C	Francia, España, Italia y estados Unidos	>100,000 toneladas
LEAB® (espuma directa con aditivo archivador)	BAM	Si, añadieron un 0.1% en peso	90°C (194°F)	Países Bajos	Siete proyectos comerciales
Proceso de espuma					

Proceso de Mezclas asfálticas tibias	Compañía	Aditivos	Temperatura de Producción (en planta) °C	Reporte de uso	Aproximado Total Toneladas producidas a la fecha
LT Asfalto (asfalto espumoso con adición de Higroscopio) pasta de relleno para mantener funcionalidad	Nynas	Si, añadieron 0.5-1.0% de una pasta de relleno de Higroscopia	90°C	Países bajos e Italia	Desconocido
Mezclas tibias de asfalto espumoso	Kolo Veidekke, Shell Bitumen (Derechos patentes por todo el mundo excepto U.S.), y BP (derechos patentes U.S.)	Inyeccion de agua alta presion	110-120°	Francia, noruega, también Canadá, Italia, Luxemburgo, países bajos, Suecia, Suiza y reino unido	>60,000 toneladas
Aparición de tecnologías de Estados Unidos					
Evotherm™ (agregado caliente cubierto con emulsión)	Mead-Westvaco	Si	85-115 C	Francia, también Canadá y , China, Suráfrica y Estados Unidos	> 17,000 toneladas
Doble-Barrel Green	Astec	Inyeccion de agua a presión vaporizada	116-135 °C	Estados Unidos	>4,000 toneladas
Advera (zeolite)	PQ Corporation	Si, alrededor de 0.25% de peso total de la mezcla	Variados, 120°C–130°C	Estados Unidos	>10,000 toneladas

Fuente: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 2008

Elaborado por: El autor

1.4.1 Mezclas asfálticas en general

Una mezcla asfáltica es la combinación de asfalto con agregados minerales pétreos de diversos tamaños, en una porción y temperatura adecuada. La porción y temperatura a la cual se realice la mezcla determinarán las propiedades físicas y el desempeño de la misma. Estas mezclas se utilizan en la pavimentación de carreteras y construcción de pistas de aterrizaje en aeropuertos, entre otros.

La mezcla asfáltica debe ser:

- Durable, para resistir los efectos del agua, la cual tiende a despegar el recubrimiento asfáltico del agregado, así como, resistir la abrasión del tránsito.
- Resistente, para tener la suficiente estabilidad para soportar las solicitaciones del tránsito.
- Impermeable, para que los componentes no estén bajo las acciones directas de los agentes atmosféricos.
- Trabajable, para su fácil colocación y compactación en terreno.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por:

- 90% de agregados pétreos grueso y fino
Agregado grueso (Retenido en el tamiz N° 4)
Agregado fino (Retenido entre el tamiz N° 4 y el 200)
- 5% de polvo mineral (Pasa tamiz N° 200)
- 5% de asfalto (60-70 o 80-100)

Los componentes de la mezcla son de vital importancia para el buen funcionamiento del pavimento. Es por eso, que debe tenerse muy presente la calidad del ligante asfáltico y el polvo mineral, los cuales son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo (Marcela & Amado, 2008).

1.4.2 Mezclas asfálticas calientes

Una mezcla asfáltica en caliente es el tipo más común de mezclas asfálticas, en la cual el agregado y el asfalto son calentados a una temperatura superior a los 140 °C y mezclados a esta temperatura, con el fin de que el asfalto al estar en un estado fluido, recubra completamente el agregado en forma homogénea y así mismo, permita una buena manejabilidad durante el proceso de extensión y compactación.

Este asfalto también debe tener la capacidad de ser lo suficientemente rígido para impedir las deformaciones plásticas del pavimento; esto se logra gracias a la variación de la viscosidad contra la temperatura que ésta posee. A altas temperaturas (mayores a 100 °C) el asfalto se comporta como un líquido viscoso, mientras que a bajas temperaturas (menores a 100 °C) tiene un comportamiento visco-elástico.

Una temperatura adecuada de los agregados es esencial para controlar la temperatura de la mezcla (Hernando & Palacio, 2011).

1.4.3 Mezclas asfálticas tibias

El objetivo de estas tecnologías es bajar las temperaturas de trabajo, principalmente de compactación, Para ello existen diferentes técnicas que buscan reducir la viscosidad del ligante asfáltico y que pueden aplicarse tanto en mezclas continuas como discontinuas. Dichas técnicas se separan en tres categorías definidas como:

1. Disminuir la viscosidad utilizada en aditivos orgánicos.
2. Uso de Asfaltos espumados.
3. Empleo de aditivos químicos (emulsiones).

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 los 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, 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 y compactación empezó en 1997, para cumplir con el Protocolo de Kyoto. La alternativa también facilita el trabajo de pavimentación en los países en los que el invierno es muy riguroso, una vez que la mezcla tibia enfría más lentamente que la mezcla en caliente.

En 2002, especialistas de los Estados Unidos empezaron a investigar esta técnica, que rápidamente sería adoptada por ese país. En Brasil, se empezó a investigar la tecnología, adaptándola para las condiciones de trabajo locales (Hernando & Palacio, 2011).

1.4.3.1 Antecedentes cronológicos en trabajos con mezclas tibias (WMA)

Los antecedentes cronológicos en el trabajo con mezclas tibias se presentan en la tabla N°2.

Tabla 2. Antecedentes cronológicos de la producción de mezclas tibias WMA

AÑO	ANTECEDENTES
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 Euraspalt/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
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.
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 Advere WMA). Durante el proceso de acarreo, las mezclas fueron conducidas cerca de 90 minutos desde una planta portátil en Cody, Wyo. Aunque fue difícil la logística, las cuadrillas de pavimentación lograron buenas densidades: el promedio de Advere 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. Reuniones con el Fórum Alemán de Bitumen, con el objetivo de considerar algunas actividades del grupo de Trabajo sobre Reducción de Temperatura.
2008	El TWG desarrollo una guía de especificaciones para la Construcción de Carreteras con WMA en formato AASHTO. El Departamento de Transporte de Texas desarrollo especificaciones que permiten a los constructores de todos los estados usar las WMA. En Nashville se desarrolló la 1° Conferencia Internacional de las WMA. Pruebas documentadas WMA, se realizaron en 32 estados de USA. Se patentaron 30 nuevas tecnologías WMA en USA.
2010	Pruebas documentadas WMA en 45 estados de USA y 10 provincias canadienses. 30 estados en USA y Canadá tienen especificaciones WMA. Cerca de 20 tecnologías WMA se patentaron en USA y se encuentran disponibles a nivel mundial.
2011	Se realizó la 2° Conferencia Internacional de las WMA, que atrajo a más de 550 personas de los 45 estados y 24 ciudades de St. Louis. Se hicieron revisiones prácticas en USA, Sur África y Europa. Más de 45 documentos técnicos fueron presentados. Un estudio conducido por FHWA, determino el incremento en el uso de WMA, de 17 millones de toneladas en 2009 a 47 millones de toneladas en 2010.
2012	En El Salvador, se introdujo el aditivo Evotherrm, dando inicio a la construcción con WMA. Se hicieron 2 tramos de prueba, uno ubicado en Sonsonate donde se colocaron 428 toneladas y otro en San Vicente, frente al ingenio Jiboa, donde se colocaron 60 toneladas.

Fuente: Alonzo R. y otros. Tesis UES, Prowell B., WMA: Best Practices. Página Web: Asfalca.

Elaborado por: El autor



Figura 4. Tecnologías Para Producir MAT.

Fuente: Rodríguez, J. Análisis de desempeño de mezclas asfálticas tibias.

Elaborado por: El autor

1.4.4 Beneficios de la mezcla tibia

1.4.4.1 Consumo de energía

La reducción del consumo de energía es el beneficio más obvio de las mezclas tibias y es discutido en la literatura como uno de los dos principales beneficios de ésta.

Los estudios han demostrado que la reducción del consumo de energía de alrededor de 30% se puede lograr mediante la reducción de las temperaturas de producción en la planta de asfalto. La reducción en el consumo de energía reduce a su vez el costo de la producción de la mezcla, pero puede haber también un añadido por reducción en los costos involucrados en el uso del proceso de mezcla tibia, es decir, para los aditivos y/o equipos de modificación, o sea es obvio se agrega cierto costo para la adición del modificador, en éste caso la cera carnauba.

Otro beneficio adicional de la reducción de las temperaturas de producción que a veces se menciona es el menor desgaste y rotura de la planta de asfalto (Hernando & Palacio, 2011).

Mayor productividad: Pavimentación en zonas frías o a la noche, Extensión en la temporada de aplicación de asfalto, mayores distancias de acarreo de mezcla, más rápida apertura al tránsito.

Mejora la densidad de compactación, Extiende la vida útil del pavimento.

1.4.4.2 Emisiones

Otra de las ventajas de la mezcla tibia es la reducción de las emisiones debido a la reducida temperatura de producción. De acuerdo a la literatura, la producción de mezcla tibia reduce significativamente las emisiones de gas carbónico y los olores, en comparación con la producción de mezclas en caliente.

Cabe recordar que las emisiones de producción de mezcla - asfalto y la colocación pueden, en ciertos niveles elevados, ser perjudiciales para la salud. En 2000, el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de EE.UU. publicó un estudio de riesgo sobre los efectos en la Salud Ocupacional de la exposición a la mezcla- asfalto. En esta revisión, el

NIOSH evaluó los efectos potenciales para la salud de la exposición ocupacional a asfalto. En 1977, el NIOSH determinó que entre los efectos adversos para la salud por la exposición se encuentran la irritación de las membranas de la conjuntiva y el tracto respiratorio.

Con las mezclas WMA se pueden lograr reducciones entre el 25 y 55% en las partículas de polvo, entre 30% y 40% en las emisiones de gas carbónico, entre 60% y 70% en las de óxido de nitrógeno, 50% en compuestos orgánicos volátiles y 35% en las emisiones de dióxido de azufre.

1.4.4.3 Viscosidad

La funcionalidad de las tecnologías de WMA se basa en la reducción de la viscosidad del asfalto.

La viscosidad reducida permite al agregado ser totalmente cubierto a una temperatura inferior a lo que tradicionalmente se requiere en las mezclas de producción en caliente.

Debido a la viscosidad reducida, los procesos de mezcla tibia pueden funcionar como una ayuda en la compactación y algunos beneficios relacionados con este son mencionados a menudo en relación con este tipo de mezclas.

Una parte importante para la investigación a realizarse se considera los ensayos de viscosidad, debido a que el asfalto y los fluidos líquidos o semisólidos se puede conocer el comportamiento a través de la viscosidad y saber de esta manera si el aditivo modificador puede comportarse como un reductor de la viscosidad, que es lo que básicamente se requiere para poder calentar el asfalto a una temperatura menor.

Debido a la estructura química del asfalto se puede tener comportamientos diferentes y la viscosidad juega un papel muy importante para poder conocer de qué manera el aditivo modificador en éste caso la cera carnauba puede modificar dicha viscosidad.

1.4.4.4 Técnicos

Producción, colocación y compactación a temperaturas más frías, lo cual genera un control de densidades más eficaz.

Aumento en las distancias de transporte, dado que por la menor temperatura de producción hay una mayor conservación de la energía de compactación de los equipos, por tanto se requiere menos esfuerzo para obtener las densidades requeridas, en otras palabras, los

menores requerimientos de temperatura para la compactación de la mezcla, agilizan el trabajo aumentando las distancias de cobertura de la mezcla asfáltica lo que se traduce en una disminución de los costos.

Se puede incorporar además un mayor porcentaje de RAP (reciclaje de pavimentos asfálticos) debido a las bajas temperaturas.

Se puede lograr también una apertura al tráfico en menor tiempo comparado con las mezclas en caliente y obtener una menor oxidación en el asfalto por los gradientes de temperatura (Hernando & Palacio, 2011).

Mezclas uniformes (Menor segregación), Mejor trabajabilidad (juntas, compactación, etc.), menor envejecimiento de los ligantes.

Tiene la misma resistencia y calidad, usa las mismas especificaciones que las mezclas en caliente.

La pavimentación se puede realizar en lugares con climas más fríos.

1.4.4.5 De seguridad

Mejores condiciones de trabajo, seguridad y salud laboral y ausencia/disminución de partículas en suspensión.

1.4.4.6 Económicos

Menor gasto en conservación de las instalaciones, Ampliación de la temporada/jornada de aplicación, Almacenamiento en silos por mayor período de tiempo (Bardesi & Soto, 2012).

Menor desgaste de los elementos mecánicos de la planta, y se pueden usar plantas existentes para la fabricación de las mezclas en caliente (Marcela & Amado, 2008).

Gracias a un estudio realizado, se pudo conocer el consumo de combustible de una planta de mezcla asfáltica en caliente en función de la temperatura de los agregados.

Tabla 3. Consumo de combustible en función de la temperatura

TEMPERATURA DE LOS ÁRIDOS (°C)	CONSUMO DE COMBUSTIBLE (KG FUEL/T AGLOMERADO)
140	6,6
160	7,3
180	7,9

Fuente: Mezclas semicalientes con Aspha-min

Elaborado por: El autor

Se puede concluir que a menor temperatura el combustible que debe ser empleado es menor. Realizando una regresión logarítmica, con el fin de extrapolar los datos y con ello poder encontrar el consumo de combustible aproximado para una temperatura de 100 °C, observamos que:

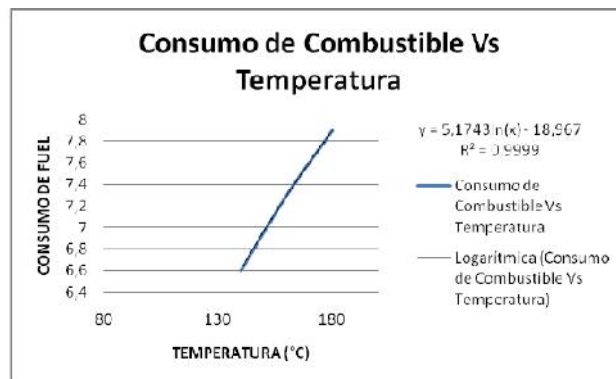


Figura 5. Consumo de combustible vs temperatura

Fuente: Mezclas semicalientes con Aspha-min

Elaborado por: El autor

Reemplazando x por 100 °C, tenemos Y= 4.9 Kg Fuel/T aglomerado, por tanto el ahorro de combustible (38%) se hace significativo con relación a las mezclas en caliente (Marcela & Amado, 2008).

Se reducen grandemente los gases y olores en la mezcla asfáltica tibia con asfalto tibio.



Figura 6. Comparación de la Emisión de gases entre HMA y WMA
Fuente: Ulloa A., “Mezclas Asfálticas Tibias (MAT)”. Boletín Técnico Vol. 2. N°13. Programa de Infraestructura del Transporte.
Elaborado por: El autor

Un mejor ambiente laboral para los obreros que trabajan colocando y compactando la mezcla asfáltica en campo.

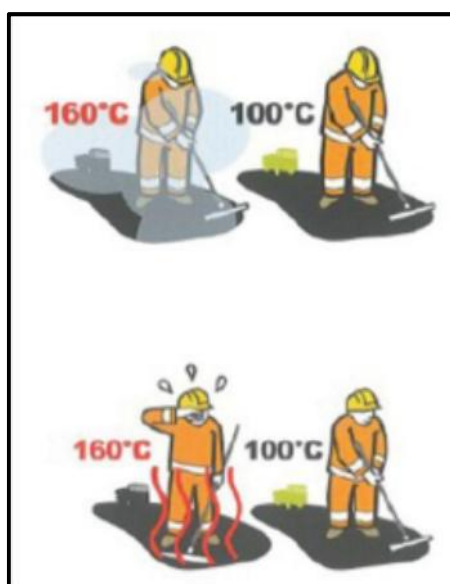


Figura 7. Comparación en el nivel de Confort En la mano de obra entre HMA y WMA.
Fuente: Ulloa A., “Mezclas Asfálticas Tibias (MAT)”.
Elaborado por: El autor

1.4.4.7 Estudios realizados por CECA ARKEMA GROUP en Argentina

Se realizó una prueba de campo durante octubre de 2008 en Argentina, en la cual se colocó una capa superficial con una temperatura de colocación por debajo de los 110 °C y de compactación por debajo de 100 °C como se puede ver en la figura 31.



Figura 8: Colocación en Argentina de mezcla asfáltica tibia

Fuente: Rodríguez J. A., "Análisis de desempeño de mezclas asfálticas tibias".

Elaborado por: El autor

1.4.5 Tecnologías para la fabricación de mezclas asfálticas tibias

Las mezclas asfálticas tibias son un intermedio entre las mezclas calientes y las templadas, en cuanto a temperatura se refiere.

La Figura 6 muestra una clasificación de producción de mezclas asfálticas por gradiente calorífico y van desde frío hasta caliente. La gama de temperaturas es amplia y van desde 0°C a 30°C es decir temperatura ambiente hasta lograr los 180°C .en producción (Hernando & Palacio, 2011).

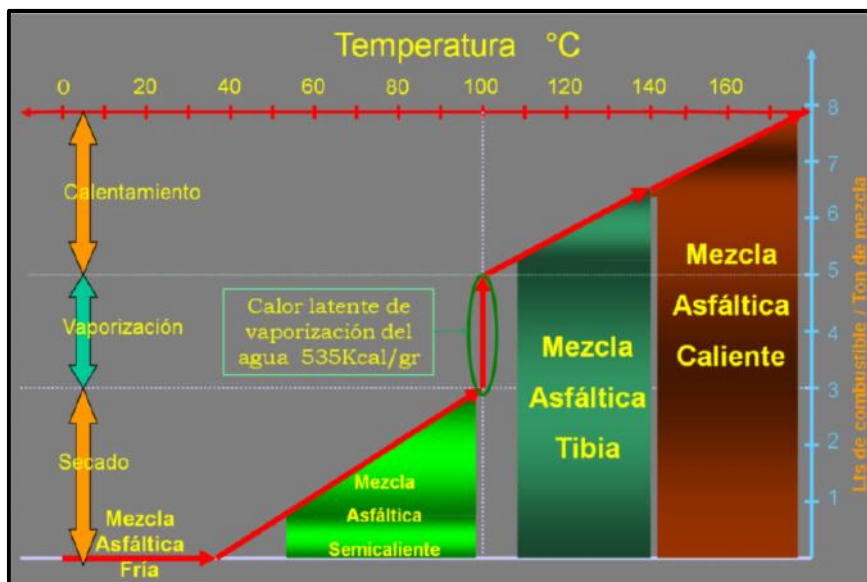


Figura 9. Rangos de temperatura para producción de mezclas asfálticas

Fuente: Comisión permanente del asfalto nov.2008

Elaborado por: El autor

Tabla 4. Clasificación de las mezclas asfálticas por temperatura

Nombre de la Mezcla	Temperatura	Objetivo	Logro
Mezclas en Frío	de 25°C a 60°C	Permitir la incorporación en la mezcla de una alta proporción, de material reciclado.	Las mezclas en Frío con emulsiones asfálticas donde los agregados se revisten a temperaturas bajas en una emulsión de asfalto en agua, pueden utilizarse como capas intermedias, capas de refuerzo e incluso, capas de rodadura.
Mezclas Semitempladas	60°C a 100°C	Maximizar los ahorros energéticos y las emisiones aprovechando parte de la humedad presente en los agregados.	Se están desarrollando varios productos y procesos para producir mezclas semi-templadas, a partir de emulsiones en planta, que resulten convencionales a los procesos de mezcla en caliente. Aunque los procesos más ambiciosos de reducción de temperatura hacen uso de las propiedades de espumado del asfalto, cuando entra en contacto con el aire y la humedad bajo presión; así, a medida que se expande el volumen del asfalto, su viscosidad disminuye y
Nombre de la Mezcla	Temperatura	Objetivo	Logro
			se hace posible el revestimiento completo de los agregados. (Hassan, 2009)
Mezclas Tibias WMA	100°C a 135°	Reducir los requerimientos térmicos de las mezclas en caliente	Se mantienen o mejoran las características de rendimiento final de la mezcla asfáltica, para ello se requiere una tecnología para reducir la viscosidad del ligante durante las fases de mezcla y tendido, sin tener un efecto negativo a las temperaturas de uso. (Transportation Research Board of the National Academies, 2009)
Mezclas en caliente	135°C a 180°	Producción de mezcla asfáltica convencionalmente.	Son mezclas producidas por técnicas convencionales donde la temperatura de producción es elevada. Estas mezclas son de alto desempeño.

Fuente: Comisión permanente del asfalto nov 2008

Elaborado por: El autor

Dentro de los sistemas para preparar mezclas tibias se pueden distinguir dos grandes grupos, según que incorporen, o no, algo de agua al sistema para producir una espumación del betún.

1.4.5.1 Sistema tibias sin agua

Los que no incorporan agua, recurren o bien a la incorporación de aditivos químicos o a la de ceras.

Dentro de los aditivos químicos encontramos productos, como el **Iterlow-T®**, o el **Cecabase RT92 Bio** que con pequeñas proporciones, 0,2 % - 0,4 % s/b, y sin modificar la viscosidad del

betún ni sus características empíricas y reológicas actúan en la interfase betún/áridos aumentando la fluidez de la mezcla.

En general la incorporación en el betún de estos productos es fácil, lográndose con una pequeña agitación o incluso diluyendo en línea durante la carga de cisternas. También se puede incorporar en la misma planta de mezcla en tanque o en la báscula de betún.

Hay otros aditivos más complejos, como el **Rediset®WMX** desarrollado por Akzo Nobel, compuestos por mezclas de ceras parafínicas sintéticas, resinas de hidrocarburos, polímeros termoplásticos e inhibidores de oxidación de los denominados químicos que sí modifican la viscosidad del betún lo que nos permite poder manejar éste a menor temperatura, permitiendo reducir la Tª de fabricación en unos 30°C y la de compactación incluso por debajo de los 100°C. Es posible también incorporar estos aditivos por vía seca con un equipo móvil de dosificación automático en la planta asfáltica.

Otros productos con los que es posible reducir la viscosidad del betún son las ceras. Dentro de éstas hay diferentes tipos: Naturales, parafínicas, no parafínicas 100 % sintéticas, no parafínicas parcialmente sintéticas, amidas de ácidos grasos, de polietileno, etc.

Entre las de origen natural, está el comercialmente denominado **Asphaltan-B®**, mezcla de una cera natural de Montana refinada con una amida de ácido graso, que tiene un punto de fusión entre 82 y 95°C. Más conocido y empleado con éxito en muchos países es el **Sasobit®**, cera tipo Fisher-Tropsh, con un punto de fusión mayor de 98°C y que se solubiliza en el betún entre 110 y 115°C y que tras la puesta en obra de la mezcla, en régimen de temperatura decreciente, solidifica entre 125 y 65°C en forma de pequeños cristales regularmente distribuidos.

Otro producto disponible es el **Licomont® BS 100** de Clariant, obtenida por reacción de amidas con ácidos grasos, cuyo punto de fusión se encuentra entre 141 y 146°C. Existen otros productos de este mismo tipo que han venido empleándose en técnicas de impermeabilización in situ. Otro producto de este grupo es el **Rheofalt®LT70**, aditivo compuesto (de alto y bajo peso molecular) formado por mezcla de ceras parafínicas sintéticas, resinas de hidrocarburos, polímero termoplástico e inhibidores de oxidación; actúa como reductor de viscosidad del ligante permitiendo fabricar mezclas entre -20 y -40°C a la temperatura habitual.

Con niveles de precio inferiores a éstos, pero también con menor calidad por su heterogeneidad, es posible encontrar subproductos de la fabricación de ceras polietilénicas que cumplan una función similar.

Con ellas se consigue bajar la viscosidad del ligante en el rango de las temperaturas altas y por tanto la temperatura durante el proceso de mezclado y compactación (en general, unos

20-30°C). Por el contrario, en el rango de temperaturas de servicio las viscosidades aumentan mejorando el comportamiento a deformación plástica y el módulo de la mezcla en comparación al que tendría con el betún original.

La forma de adición habitual es al betún en proporciones del 2,5 al 4%, es decir, alrededor del 0,12-0,18% sobre mezcla, aunque en EE.UU. suelen ir a dotaciones inferiores. La incorporación previa de aditivos al betún quizás sea una de las maneras más fáciles de trabajar para el fabricante de mezclas asfálticas ya que no necesita actuar sobre la planta, salvo en lo relativo a disminuir la temperatura de los áridos entre 20°C y 50°C. Esta técnica se ha probado con éxito en diversas obras del Ministerio de Fomento, CCAA y Ayuntamientos, incluso existe una experiencia con betunes modificados.

En la figura 7 se puede apreciar la disminución de la viscosidad del betún con aditivo respecto a un B 60/70 convencional.

Se observa que a partir de 90°C hay un cambio de tendencia en la curva de viscosidad, gracias al cual podemos trabajar la mezcla a temperaturas más bajas.

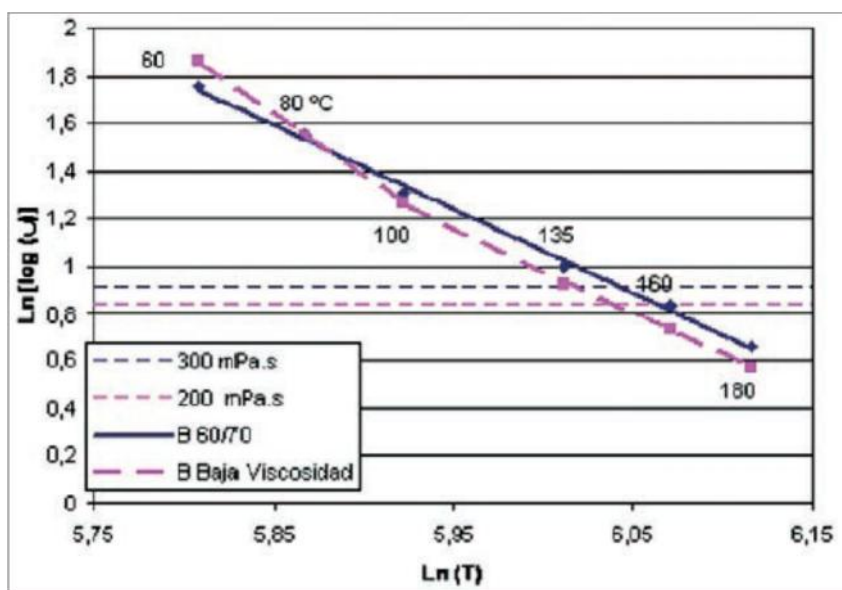


Figura 10. Relación viscosidad/temperatura
Fuente: Mezclas bituminosas a bajas temperaturas
Elaborado por: El autor

1.4.5.2 Mezclas tibias con incorporación de agua

La incorporación de pequeñas cantidades de agua a una mezcla bituminosa en caliente tiene dos objetivos: producir la espumación del betún facilitando la envuelta del árido y reducir el rozamiento entre partículas minerales facilitando la compactación. Aunando ambos efectos se pueden reducir las temperaturas de fabricación y puesta en obra para obtener, si todo marcha

bien, mezclas con características similares a las obtenidas en mezclas convencionales en caliente.

Existen varios métodos para incorporar agua al sistema que podemos agrupar en:

- Inducir la espumación incorporando al mezclador un filler hidrofílico.
- Inducir la espumación incorporando al mezclador, áridos parcialmente húmedos.
- Inyectar espuma directamente al mezclador.

Filleres hifrofílicos

Aunque no el único, el más difundido es la zeolita que es un aluminosilicato. Su uso es conocido desde mediados de los noventa en Alemania.

Actualmente las zeolitas sintéticas más conocidas son las denominadas **Aspha-min®**, que emplea Eurovia, y **Advera®** de PQ Corporation.

Esta zeolita sintética contiene en su forma cristalina alrededor de un 20-25 % de agua, por lo que al añadirse, en pequeñas proporciones (0,3 % s/a), a los áridos calientes (alrededor de 130°C) justo antes del proceso de envuelta liberan el agua en forma de vapor. Se produce un efecto de “espumado”, aumentando el volumen del ligante, lo que permite la envuelta a temperaturas más bajas de las habituales.

Con este sistema conseguimos reducir la temperatura de aplicación de la mezcla entre 20°C – 30°C lo que puede suponer un ahorro de 1 a 3 litros de fuel por tonelada de mezcla, lo que puede representar un - 20 %, -30 % del consumo total de una mezcla a 160°C.

Además de las zeolitas, existen otros productos como el desarrollado por Nynas con el nombre de **LT-Asphalt®** que combina un proceso de espumación basado en un ligante específico con la incorporación de un 0,5- 1,0% de un fíller hidrofílico que ayuda a mantener el control de la humedad de la espuma. Los áridos se calientan a 90°C.

Incorporación de áridos húmedos al mezclador

El más difundido procedimiento es el del mezclado secuencial con espumación inducida.

Procedimiento conocido como LEA® (Low Energy Asphalt, en inglés), registrado por el grupo francés Appia-Eiffage. Existen tres versiones:

- Método **EBE®**: Enrobé Basse Energie, en francés. Se secan y calientan hasta unos 140°C los áridos gruesos y parte de la arena. A continuación, se envuelven con todo el betún que se inyecta a 170°C. Posteriormente se añade el resto de la fracción fina, fría y húmeda, induciéndose la espumación que facilita la envuelta de la arena fría

llegándose a una temperatura final de unos 100°C y manteniendo la mezcla una humedad residual que facilita la manejabilidad necesaria para la puesta en obra.

- Método **EBT®**: Enrobé Basse Température, en francés. Se calienta todo el árido hasta los 100°C, lo que supone que no está totalmente seco. No obstante puede incorporarse agua para llevar al sistema a una humedad del orden del 1-1,5% que asegure la posterior espumación. A continuación se introduce el betún a 170°C y se forma la espuma que permite la envuelta. La mezcla producida termina a unos 95°C y manteniendo la mezcla una humedad residual que facilita la manejabilidad necesaria para la puesta en obra.
- Método **EBT®-2**. En esta variante del anterior, se secan los áridos gruesos y parte de la arena hasta unos 130-150°C. A continuación se introduce la arena húmeda de forma que la mezcla se sitúa a unos 100°C. Se incorpora el betún a 170°C, formándose la espuma que permite la envuelta. Si es preciso, antes del betún, se añadirá el agua precisa (humedad del 1-1,5%) para conseguir la espumación del betún. El resto es igual al anterior.

Opcionalmente la mezcla puede incorporar un 0,5% de un mejorador de adhesividad justo antes del mezclado.

En principio, estos sistemas pueden ser utilizados en cualquier tipo de planta, continúa o discontinua, a las que deberá adaptarse una línea para la introducción del agua y otra para el aditivo. No obstante, debe tenerse en cuenta que para ello es preciso poder regular los quemadores para ajustar las temperaturas de los áridos bastante por debajo de las temperaturas habituales de trabajo. La temperatura final de la mezcla es inferior a 100°C y presenta un aspecto similar a una mezcla en caliente convencional pero sin emisión de humo. A destacar la buena trabajabilidad de estas mezclas en el extendido y sobre todo en la formación de juntas. La energía de compactación será algo superior a la convencional para lograr expulsar el agua residual. Se consigue con un aumento de pasadas con el compactador de neumáticos. Al terminar su puesta en obra las mezclas tienen características mecánicas cercanas a sus valores definitivos, y su humedad residual es inferior a 0,5 %.

Incorporación directa de espuma betún

Se trata de una técnica antigua, años 50, bastante utilizada en algunos países como Sudáfrica y Canadá pero que en Europa (se ha realizado alguna obra de reciclado en Noruega, Gran Bretaña y Países Bajos) y, más concretamente, en España es una técnica que continúa casi en periodo de experimentación.

La espuma es otra posibilidad que tenemos de aplicar un betún en carretera a temperaturas más bajas de las usuales a las que aplicamos las mezclas en caliente, y hasta ahora se ha utilizado preferentemente en reciclado de firmes y en estabilizaciones de suelos, en sistemas que podríamos considerar como mezclas en frío.

El proceso de espumación es aparentemente simple y se produce al inyectar, a presión, agua, en cantidades pequeñas (aproximadamente un 2 %), en el betún caliente. A la salida del conducto el betún se expansiona aumentando su volumen unas 10-20 veces produciéndose la espumación de éste con la que fácilmente se consigue envolver los áridos. La efectividad del proceso de espumación se valora a través de 3 parámetros:

- a) Tasa de Expansión Máxima, (corresponde a la mayor expansión volumétrica).
- b) Relación de Expansión (la relación existente entre el volumen máximo alcanzado por la espuma y el inicial del betún después de un tiempo definido).
- c) Vida media: el tiempo en segundos que tarda la espuma en perder el 50 % del volumen máximo alcanzado. Valores típicos pueden estar comprendidos entre 40 y 80 segundos. Es la medida de la estabilidad de la espuma.

Estos parámetros se verán influenciados por la naturaleza del betún (parecen funcionar mejor los nafténicos y parafínicos), la temperatura de éste durante el proceso, el % de agua añadida y los aditivos eventualmente utilizados en alguna de las fases (agua y/o betún). Cuanto mayor sea el tiempo de expansión conseguimos que la mezcla con los áridos sea mejor.

Para el estudio en laboratorio de mezclas con espuma de betún se emplean miniplantas que reproducen de una forma bastante fidedigna las condiciones industriales.

Se ha podido ver que la adición de cal hidratada o de cemento mejora considerablemente la resistencia al agua de estas mezclas fabricadas con espuma-betún.

A efectos de su aplicación en mezclas semicalientes se han desarrollado dos procedimientos:

- Mezclas con betún y espuma. Se conoce como WAM-Foam Process y no emplea ningún tipo de aditivos. Está patentado por Shell. El procedimiento consiste en calentar los áridos (sin fíller) a unos 130°C y se mezcla en primer lugar con un ligante blando (que constituye aproximadamente el 25% del ligante total) y después con el ligante duro que se incorpora espumado (inyección en línea de un 2-5% de agua fría al betún a 180°C). En Europa el procedimiento se ha empleado de forma habitual en Noruega.
- Envuelta en doble tambor. Desarrollado por Astec, el procedimiento se desarrolla en las plantas de doble tambor a las que se añade en el tambor exterior de mezclado un

grupo de inyectores por los que se incorpora la espuma de betún. El árido se calienta en el tambor interior hasta los 135-140°C, se mezcla con la espuma en el tambor exterior y puede compactarse hasta los 115°C (Bardesi & Soto, 2012).

1.4.6 Ensayo Marshall sobre la mezcla asfáltica en caliente

Este método realizado por el Ing. Bruce Marshall del Mississippi State Highway Department, siendo posteriormente mejorado por el Army Corps of Engineering de los Estados Unidos, quien añadió ciertas características al procedimiento Marshall para ensayar mezclas asfálticas mediante diversas investigaciones para el desarrollo de muchos de sus criterios y procedimientos de prueba. Es ampliamente utilizado para mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que usan cemento asfáltico y agregados de granulometrías cerradas, que deben tener como máximo un tamaño máximo nominal de 25 mm (1 pulgada). Se puede usar tanto para realizar el diseño en laboratorio de la mezcla como para hacer el respectivo control de calidad durante la pavimentación. Los aspectos principales del ensayo son: el análisis densidad-vacíos y el ensayo de estabilidad y flujo, en muestras de mezclas asfálticas compactadas (Méndez, Morán, & Pineda, 2014).

1.4.7 Estudio de las mezclas semicalientes en el laboratorio

Los ensayos para el diseño de estas mezcla en el laboratorio serán los mismos que los utilizados para las mezclas convencionales: Sensibilidad al agua, Deformaciones plásticas, huecos, densidades, etc.

Habrá que tener en cuenta a la hora de fabricar las probetas la temperatura recomendada de fabricación y compactación para acercarse lo más posible a las condiciones de obra, lo que no siempre es posible, especialmente en las técnicas que incorporan agua porque los tiempos de mezclado en laboratorio suelen ser mayores que en los mezcladores de las plantas.

Los resultados deben ser, como mínimo, similares a los obtenidos con los betunes convencionales a las temperaturas habituales, 160°C, de fabricación. Pero no necesariamente idénticos. En especial, se debe tener en cuenta que las menores temperaturas de fabricación hacen que el betún sufra un menor envejecimiento y, por tanto, el ligante final será más blando que en la mezcla en caliente convencional correspondiente. Como consecuencia, son esperables valores algo menores de módulo y deformaciones en pista algo mayores.

En este tipo de mezclas y como consecuencia de la variación de la viscosidad, en algunos casos, del betún aditivado y, por tanto de su manejabilidad las probetas Marshall deben fabricarse a diferentes temperaturas de mezclado y compactación con la curva teórica obtenida en el laboratorio y el % de betún necesario (Bardesi & Soto, 2012).

1.4.8 La cera carnauba

Es un tipo de cera que se obtiene de las hojas de la palma *Copernicia prunifera*. Esta palma es endémica de América del Sur y crece en la región de Ceará, al noreste del Brasil. Para evitar que la palma pierda agua durante la época de sequía, que en la región noreste de Brasil dura hasta seis meses, la planta se cubre de una espesa capa de cera compuesta de ésteres, alcoholes y ácidos grasos de alto peso molecular. Una vez que se cortan las hojas, se secan y trituran para que la cera se desprenda.

Esta cera se conoce también como la "reina de las ceras", por sus características e infinidad de aplicaciones. La cera de carnaúba es reconocida por sus propiedades de brillo. Combina dureza con resistencia al desgaste. Su punto de fusión es de 78 a 85 °C, el más alto entre las ceras naturales.

La cera de carnaúba contiene principalmente ésteres de ácidos grasos (80-85 %), alcoholes grasos (10 a 15 %), ácidos (3 a 6 %) e hidrocarburos (1 a 3 %). La cera de carnaúba tiene dioles esterificados grasos (cerca 20 %), ácidos grasos hidroxilados (cerca del 6 %) y ácido cinnámico (cerca de 10 %). El ácido cinnámico, es un antioxidante, puede ser hidroxilado o metoxilado.

1.4.8.1 La planta

Copernicia prunifera, conocida como carnaúba, palma carnaúba o carnaubeira, es un árbol de la familia Arecaceae, es una especie de palma nativa del noreste de Brasil.

Las palmeras adultas alcanzan un tamaño de 15 m de altura, 10 m raramente en cultivo. El diámetro es de 25 cm. La corona es densa y redonda y tiene 5 m de alto y de ancho. Las hojas tienen forma de abanico y miden 1,5 m de ancho. El largo pecíolo de 1 m de largo está armado con dientes afilados. Las hojas son de color verde oscuro a azul-verde, ambas partes están recubiertas de cera. La inflorescencia es de 2 m de largo, en estrecha panícula que se extiende muy por encima de la corona de hojas. Las flores son de color marrón amarillento y bisexuales. Los frutos son redondos de 2,5 cm de grosor y marrón a negro.

1.4.8.2 Concepto de viscosidad

La viscosidad se puede definir como una medida de la resistencia a la deformación del fluido. Éste concepto relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación (Rodríguez, 2014).

1.4.8.3 Balance costo beneficio

Costo:

Obviamente se agregan ciertos costos dependiendo de la tecnología, en éste caso la cera carnauba.

COSTOS DIRECTO PARA MEZCLA CONVENCIONAL

Unidad	Cantidad	Precio Unitario
m3	1	82.82

COSTOS DIRECTO PARA MEZCLA MODIFICADA

Unidad	Cantidad	Cera (Kg)	Precio Unitario
m3	1	2.02	108.26

Estos costos están en función del tiempo, es decir, no sufren alteraciones, son constantes, aun cuando se presenten grandes cambios en el volumen de producción, es decir, fluctúan en relación a un período dado; lo importante es que dichos costos no son afectados por cambios de la actividad dentro de un rango relevante.

Para la presente investigación no se realizó un análisis detallado de estos costos debido a que la información que se dispone pertenece a la empresa, y en caso de requerir el porcentaje de influencia de este costo para un análisis total de costo de producción para la empresa privada, cada una de estas dispone de su propio porcentaje de costo indirecto estará en función de la maquinaria, infraestructura, personal, tecnología, capital etc. que cada empresa maneje o disponga.

Ahorro:

- a) Energía
- b) Menor desgaste y rotura de equipos
- c) Mayor productividad
 - Pavimentación en zonas frías o a la noche
 - Extensión en la temporada de aplicación de asfalto
 - Mayores distancias de acarreo de mezcla
 - Más rápida apertura al tránsito que con las mezclas calientes
- d) Mejora la densidad de compactación
 - Compactado en la mitad del tiempo comparado con mezclas en caliente
- e) Extiende la vida útil de pavimento

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.5.1 Alcances

Modificar la viscosidad del asfalto AC-20, utilizando la tecnología de los aditivos orgánicos (cera carnauba), agregando al asfalto en porcentaje a su peso, (1%, 3% y 5%), y evaluar su comportamiento con el viscosímetro rotacional Brookfield.

El diseño realizado será de una mezcla asfáltica densa, analizada mediante las propiedades volumétricas Bailey, únicamente para el comportamiento de los agregados de tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ " y cemento asfáltico AC-20, proporcionados por la constructora DIEZ Y DIEZ.

La presente investigación abordará el diseño teórico y de laboratorio, de la mezcla asfáltica caliente, excluyendo para la presente la ejecución de un tramo de prueba.

Se obtendrá la fabricación de la mezcla asfáltica tibia aplicando el método Marshall, utilizando la tecnología de la cera orgánica carnauba para modificar la viscosidad del asfalto convencional.

La fabricación de la mezcla asfáltica será elaborada en el laboratorio y su comportamiento se evaluará mediante una producción realizada en el mismo, posteriormente se realizarán los ensayos de control de calidad en laboratorio, para garantizar las propiedades de la mezcla asfáltica tibias.

1.5.2 Limitaciones

La aplicación de la mezcla asfáltica tibia, será exclusivamente para el uso como carpeta de rodadura, excluyendo cualquier otra utilidad que se le pueda dar.

El presente proyecto de titulación abordará solamente una investigación teórica y el diseño en laboratorio de la mezcla asfáltica en caliente, volviéndose tibia con la aplicación de la tecnología de aditivos orgánicos, excluyendo para éste la construcción de un tramo de prueba.

Para la mezcla asfáltica tibia solo se utilizará la cera carnauba, excluyendo para ésta investigación el diseño con otras tecnologías.

Para el diseño de la mezcla asfáltica tibia, se realizarán los ensayos a los agregados de tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ ", arena triturada, arena lavada y filler, que serán proporcionados por la empresa constructora Diez y Diez, que se encuentra asfaltando un tramo de la vía Catamayo Macará.

Para el diseño de la mezcla asfáltica tibia, no se llevará a cabo la caracterización a la cera natural, se utilizará la proporcionada por la empresa proveedora.

CAPITULO II

2.1 Estudio del estado de arte

2.1.1 Agregados pétreos

Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en las capas de las carreteras, con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos (Méndez et al., 2014).

El agregado constituye entre el 90 y el 95 por ciento, en peso, y entre el 75 y el 85 por ciento, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. Ver Foto 1.



Figura 11. Agregados Pétreos de la cantera Catamayito
Fuente: Elaboración propia
Elaborado por: El autor

2.1.2 Propiedades de los agregados que se utilizan en mezclas asfálticas

2.1.2.1 Definiciones específicas:

Relleno Mineral: Porción de material que pasa el tamiz INEN 75 micrones (N° 200).

Densidad: Es la masa de la unidad de volumen de las partículas del árido a una temperatura especificada. El volumen no incluye los poros saturables de las partículas ni los huecos entre éstas.

Agregado Fino: Porción de material que pasa el tamiz INEN 4.75 mm. (N° 4) y es retenida en el tamiz INEN 75 micrones (N° 200).

Agregado Grueso: Agregado cuyas partículas son retenidas por el tamiz INEN 4.75 mm. (N° 4) (Ministerio, 2002).

2.1.3 Caracterización de los agregados

Los agregados estarán compuestos de partículas de piedra triturada, grava triturada, grava o piedra natural, arena, etc., de tal manera que cumplan los requisitos de graduación que se establecen en la Tabla 404-5.1 ó 405-5.1 de estas especificaciones según corresponda, y se clasifican en “A”, “B” y “C” (Ministerio, 2002).

- *Agregados tipo A:* Son aquellos en los cuales todas las partículas que forman el agregado grueso se obtienen por trituración. El agregado fino puede ser arena natural o material triturado y, de requerirse, se puede añadir relleno mineral para cumplir las exigencias de graduación antes mencionadas. Este relleno mineral puede ser inclusive cemento Portland, si así se establece para la obra.
- *Agregados tipo B:* Son aquellos en los cuales por lo menos el 50% de las partículas que forman el agregado grueso se obtienen por trituración. El agregado fino y el relleno mineral pueden ser triturados o provenientes de depósitos naturales, según la disponibilidad de dichos materiales en la zona del proyecto.
- *Agregados tipo C:* Los agregados tipo C para hormigón asfáltico son aquellos provenientes de depósitos naturales o de trituración, según las disponibilidades propias de la región, siempre que se haya verificado que la estabilidad, medida en el ensayo de Marshall, se encuentre dentro de los límites fijados en la Tabla 405-5.2 de estas especificaciones.

Tabla 5. Tabla 405-5.1. MOP-001-F-2002

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4
1" (25.4 mm.)	100	--	--	--
3/4" (19.0 mm.)	90 - 100	100	--	--
1/2" (12.7 mm.)	--	90 - 100	100	--
3/8" (9.50 mm.)	56 - 80	--	90 - 100	100
Nº 4 (4.75 mm.)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100
Nº 8 (2.36 mm.)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
Nº 16 (1.18 mm.)	--	--	--	40 - 80
Nº 30 (0.60 mm.)	--	--	--	25 - 65
Nº 50 (0.30 mm.)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
Nº 100 (0.15 mm.)	--	--	--	3 - 20
Nº 200 (0.075 mm.)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Fuente: MOP-001-F-2002

Elaborado por: El autor

Los agregados serán fragmentos limpios, resistentes y duros, libres de materia vegetal y de exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables, así como de material mineral cubierto de arcilla u otro material inconveniente.

Se utilizarán agregados completamente secos y de no poder cumplirse ésto, se instalarán dos secadores en serie, de tal forma que cuando se termine la operación de mezclado, la humedad de los agregados no exceda de 1%.

2.1.4 Graduación y tamaño máximo de partícula

2.1.4.1 Graduación

Todas las especificaciones de mezcla asfáltica en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de distribución de diferentes tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertos porcentajes en una serie de tamices. Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla (Méndez et al., 2014).

2.1.4.2 Tamaño de las partículas

Existen dos maneras de obtener el tamaño máximo del agregado.

a) Tamaño máximo nominal de partícula.

El tamaño máximo nominal de un agregado, es el menor tamaño de la malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado, la malla de tamaño máximo nominal, puede retener de 5% a 15% del agregado dependiendo del número de tamaño.

b) Tamaño máximo de partícula

Es el menor tamiz por el que se pasa toda la muestra.

2.1.5 Determinación de la abrasión

Es la resistencia de los agregados a resistir los efectos de abrasión e intemperie a los cuales serán sometidos en los procesos de producción, colocación, compactación y en su vida de servicio. La resistencia de un agregado al desgaste y a la abrasión es medida a partir del ensayo en la Máquina de Los Ángeles regido por la norma (AASHTO T-96).

2.1.6 Índice de plasticidad

El índice de plasticidad (IP) es el rango de humedades en el que el suelo tiene un comportamiento plástico. Por definición, es la diferencia entre el Límite líquido y el Límite plástico.

2.1.7 Determinación de la solidez de los áridos mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio

Esta estimación se logra mediante repetidas inmersiones del árido en soluciones saturadas con sulfato de sodio o de magnesio, seguidas por secado al horno para deshidratar parcial o completamente la sal precipitada en los espacios porosos

permeables. La fuerza expansiva interna, derivada de la rehidratación de la sal en la reinmersión, simula la expansión del agua al congelarse en el interior de los poros del árido. Este método de ensayo proporciona información útil para juzgar su desempeño, cuando la información del material expuesto a las condiciones ambientales reales, no esté disponible.

2.1.8 Resistencia a la peladura

Este método describe el procedimiento, para determinar la retención de una capa bituminosa en la superficie del agregado en presencia de agua mediante inmersión estática. Aplicado a asfaltos líquidos y semisólidos.

2.1.9 Porcentaje de caras fracturadas en los agregados

Son aquellas partículas de agregado que tienen al menos el mínimo número de caras fracturadas o quebradas, ya sea por medio natural o por triturado artificial.

2.1.10 Angularidad de los agregados finos

Es el porcentaje de vacíos de aire presentes en agregados sueltos.

2.1.11 Equivalente de arena del agregado fino

Esta prueba de equivalente de arena tiene como objetivo principal el determinar la calidad que tiene un suelo que se va emplear en las capas de un pavimento, esta calidad es desde el punto de vista de su contenido de finos indeseables de naturaleza plástica.

2.1.12 Partículas alargadas y achatadas

Es la determinación de los porcentajes de partículas planas, partículas alargadas o de partículas planas y alargadas.

2.1.13 Materiales deletéreos

Es la determinación aproximada de los terrones de arcillas y de partículas deleznales (friables) en los agregados naturales. Las especificaciones de la obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etcétera) en el agregado, que provoquen deterioro cuando estos se apliquen para la producción de mezclas asfálticas.

2.1.14 Peso específico

El peso específico de un agregado (también conocido como gravedad específica), es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de

agua. El peso específico es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados en la mezcla, de acuerdo al peso.

Otra razón importante por la cual es necesario conocer el peso específico de los agregados usados es: que este ayuda en el cálculo de porcentaje de vacíos de aire de las mezclas compactadas. Todas las mezclas de pavimentación deben incluir un cierto porcentaje (en volumen) de vacíos o espacios de aire. Estos espacios desempeñan una labor importante en el pavimento terminado.

Se ha desarrollado tres tipos de peso específico para tener en cuenta la porosidad del agregado, debido a que esta afecta la cantidad de asfalto que se requiere para cubrir las partículas de agregado y también el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla final; estos tres tipos son:

- Peso específico Bulk.
- Peso específico aparente.
- Peso específico efectivo.

La determinación de esta propiedad (peso específico) incluyendo los tres tipos ya mencionados, se logra mediante el ensayo de Gravedad Específica y Absorción del Agregado.

El peso específico total de una muestra incluye todos los poros de la muestra. El peso específico aparente no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros y espacios capilares que se llenarían de agua al saturar la muestra.

El peso específico efectivo excluye, del volumen de la muestra, todos los poros y espacios capilares que absorben asfalto. Ninguna de estas suposiciones, excepto en casos muy raros, es verdadera; sin embargo, el peso específico efectivo, el cual discrimina entre poros permeables al agua y poros permeables al asfalto, es el que más se acerca al valor correcto que debe ser usado en los cálculos de mezclas asfálticas (Méndez et al., 2014).

2.1.15 Peso unitario de los agregados

Este método de ensayo cubre la determinación del peso unitario suelto o compactado y el cálculo de vacíos en el agregado fino, grueso o en una mezcla de ambos, basados en la misma determinación.

2.2 Requisito que deben cumplir los agregados Pétreos

Los agregados serán fragmentos limpios, resistentes y duros, libres de materia vegetal y de exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables, así como de material mineral cubierto de arcilla u otro material inconveniente. Se utilizarán agregados completamente secos y de no poder cumplirse ésto, se instalarán dos secadores en serie, de tal forma que cuando se termine la operación de mezclado, la humedad de los agregados no exceda de 1%.

Además de los requisitos granulométricos y los referentes a su producción, que se indicaron anteriormente, los agregados deben cumplir con las siguientes exigencias:

Los agregados gruesos no deberán tener un desgaste mayor de 40% luego de 500 revoluciones de la máquina de Los Ángeles, cuando sean ensayados a la abrasión, según la norma INEN 860. La porción de los agregados que pasa el tamiz INEN 0.425 mm. (Nº 40), deberá tener un índice de plasticidad menor a 4, según lo establecido en las Normas INEN 691 y 692.

El agregado no debe experimentar desintegración ni pérdida total mayor del 12%, cuando se lo someta a 5 ciclos de inmersión y lavado con sulfato de sodio, en la prueba de durabilidad, como lo dispone la Norma INEN 863, salvo que las especificaciones indiquen otra cosa.

Los agregados serán de características tales que, al ser impregnados con material bituminoso, más de un 95% de este material bituminoso permanezca impregnando las partículas, después de realizado el ensayo de resistencia a la peladura, según la Norma AASHTO T 182. El filler deberá cumplir con los requisitos especificados en la Norma AASHTO M 17.

Los agregados gruesos retenidos en el tamiz INEN 4.75 mm deben tener cierta angularidad. El 85% de agregado grueso deberá tener por lo menos una cara fracturada y el 80% del agregado grueso deberá tener por lo menos dos caras fracturadas, según la Norma ASTM D5821.

La angularidad de los agregados finos es determinada como el porcentaje de vacíos de aire presente en los agregados pasantes el tamiz INEN 2.36 mm. El valor mínimo requerido es de 45% según la Norma ASTM C1252. El equivalente de arena se realiza en los agregados pasantes el tamiz INEN 4.75 mm. Norma AASHTO T 176 (ASTM D2419). Los valores mínimos recomendados son los siguientes:

Tabla 6. Equivalente de arena MTOP-001-F-2002.

	Equivalente de Arena	
	Tráfico Liviano y Medio	Tráfico Pesado
Base	35	40
Capa de Rodadura	45	50

Fuente: MOP-001-F-2002

Elaborado por: El autor

El máximo porcentaje en peso de partículas alargadas y achatadas retenidas en el tamiz INEN 4.75mm cuya relación entre las dimensiones máximas y mínimas mayor que 5, no deberá ser mayor de un 10% según la Norma ASTM D4791.

El máximo porcentaje de materiales deletéreos en los agregados es de 1% en peso según la Norma ASTM C142.

2.3 Granulometría por tamizado para determinación de porcentajes de agregados.

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior), Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica.

Su finalidad es obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo. Así es posible también su clasificación mediante sistemas como AASHTO. El ensayo es importante, ya que gran parte de los criterios de aceptación de suelos para ser utilizados en bases o sub-bases de carreteras, presas de tierra o diques, drenajes, etc., depende de este análisis.

Para obtener la distribución de tamaños, se emplean tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente.

Para suelos con tamaño de partículas mayor a 0,074 mm. (74 micrones) se utiliza el método de análisis mecánico mediante tamices de abertura y numeración indicado en la tabla 4. Para suelos de tamaño inferior, se utiliza el método del hidrómetro, basado en la ley de Stokes.

2.3.1 Diseño granulométrico o combinación de agregados para mezclas asfálticas.

Se obtiene una combinación de agregados para diversos fines, por ejemplo, para mejorar un agregado con uno de mejor calidad de modo que el agregado combinado resulte aceptable, o para corregir las deficiencias en la gradación que puedan tener.

Un problema que se presenta a menudo es el de determinar en qué proporción mezclar dos o más materiales para cumplir una cierta gradación que cumpla con los requisitos establecidos por las normas, para los tamices que especifica esta, podemos describir dos métodos para conseguir esto:

a) **Método gráfico**

En una gráfica, donde en la parte superior e inferior se marcan los porcentajes a usar de cada agregado y a la derecha e izquierda los porcentajes que pasan, como la que se mostrar en la figura 8, se marcan los rangos que delimita la norma para el porcentaje que pasa para cada tamiz.

b) **Método por tanteos**

Sin trazar la gráfica de los datos. Por ejemplo, en primer lugar se podría prestar la atención a la cantidad que pasa el tamiz No. 50, ya que muchos técnicos del hormigón consideran que esta cantidad ejerce una influencia importante sobre la trabajabilidad del hormigón. En principio, podría considerarse una mezcla 50-50%, y ver si con esta relación se satisfacen los requisitos para todos los tamices, y a partir de este primer tanteo variar las proporciones hasta cumplir con todos los tamices.

Al hacer la combinación de los agregados es deseable, siempre que sea factible, producir una granulometría que se aproxime lo más posible a la medida de los límites de las especificaciones.



Figura 12. Juego de Tamices

Fuente: Macopmine

Elaborado por: El autor

2.4 Ligante asfáltico

El asfalto es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfáltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y

ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida.

Los materiales asfálticos se emplean en la elaboración de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones, ya sea para aglutinar los materiales pétreos utilizados, para ligar o unir diferentes capas del pavimento; o bien para estabilizar bases o subbases. También se pueden usar para construir, fabricar o impermeabilizar otras estructuras, tales como algunas obras complementarias de drenaje, entre otras.

Siendo un material visco-elasto-plástico, el asfalto, a diversas temperaturas tiene diferentes comportamientos. Al momento de la mezcla del asfalto con el agregado, este debe estar a muy altas temperaturas para asegurar el comportamiento de un líquido viscoso fácil de entreverar con el agregado; formando una muy delgada capa de recubrimiento asfáltico sobre cada partícula de material granular y así asegurar la cohesión que deberá existir en la mezcla compactada.

En el campo, el asfalto tendrá un comportamiento elasto-plástico, de manera que el pavimento, por ser flexible, es capaz de deformarse con la aplicación de una carga y regresar a su posición original luego de esta ser retirada. A veces, en temperaturas muy elevadas, el ligante alcanza su punto de ablandamiento y aún en campo tiene un comportamiento algo viscoso (García, 2010).

El asfalto es un material aglomerante de color que varía de pardo oscuro a negro, de consistencia semisólida, cuyos constituyentes predominantemente betunes que le dan la naturaleza como tales o se obtienen por destilación del petróleo (Sosa, 2012).

2.4.1 Composición Química

Al igual que el petróleo, los asfaltos son mezclas complejas de hidrocarburos en diferentes proporciones. La mayor parte de los compuestos que forma parte del asfalto son hidrocarburos pesados, de estructura molecular compleja y alto peso molecular; debido a que la mayoría de compuestos livianos fueron extraídos en el proceso de refinación. Como componentes más importantes tenemos:

Asfaltenos.- Los asfaltenos están formados por sistemas de anillos aromáticos polinucleares, rodeados de cadenas alquílicas con un peso molecular que va de 1.000 a 4.000 unidades de masa atómica (UMA) de estructura plana, mejor conocida como microestructura. Estos se agrupan en cinco o seis cadenas para formar un cristal cuyo peso molecular está entre 4.000

y 10.000. Estos cristales también se unen para formar las llamadas micelas con peso molecular que varía de 40.000 a 40.000.000. Los asfaltenos concentran los compuestos indeseables de los asfaltos, pues contienen los metales pesados y azufre. El contenido de asfaltenos en un cemento asfáltico varía generalmente entre un 15% y un 20%.

El contenido de asfaltenos en un cemento asfáltico que varía generalmente entre un 15% y 20%. Por lo general, el valor no dice nada del comportamiento en servicio, pero en el crudo pesado y mediano generan un producto de mayor calidad que un crudo liviano.

Maltenos. Los aromáticos constituyen entre el 40 y 65 % de la composición total de los asfaltos, son las fracciones de menor peso molecular en la estructura de los asfaltos, representan la mayor proporción de los dispersantes de los asfaltenos peptizados.

Los aromáticos son compuestos donde predominan las moléculas insaturadas de peso molecular de entre 300 a 2000, no polares, con especial capacidad para actuar como disolventes de otras cadenas hidrocarbonadas de alto peso molecular.

Son sustancias solubles en normal n-heptano y está constituido por resinas, saturados y aromáticos.

Las resinas son agregados muy polares de color marrón o marrón claro, sólidos o semisólidos, solubles en n-heptano y, al igual que los asfaltenos, son compuestos de carbono, hidrógeno y cantidades menores de nitrógeno, oxígeno y azufre. Las resinas son materiales muy adhesivos y actúan como dispersantes o peptizantes de los asfaltenos.

Parafinas. Las parafinas se definen en grandes rasgos como ceras que se presentan de modo natural en diversas fracciones del petróleo crudo. Se dividen principalmente en dos grupos: parafinas normales y microcristalinas. El rasgo más notable de ambos tipos es su resistencia al agua y al vapor de agua.

Dentro de cada clase, las propiedades de los productos varían considerablemente y ciertos grados tienen usos específicos.

La variación procede de diferencias en la fuente de crudo, porción de crudo usada para la producción de parafinas y técnicas de refinado diferentes.

La parafina es una mezcla de hidrocarburos, sólida y cristalina, completamente derivada de la porción del petróleo crudo designada destilado de parafina, o del destilado de esquitos, o

de la síntesis de hidrocarburos, por solidificación a temperatura baja y presión, o por disolvente. Se caracteriza por su estado sólido a la temperatura atmosférica (25°C), se deforma relativamente poco a temperatura, incluso bajo presión considerable, y tiene poca viscosidad, 35-45 SSU a 99°C (Sosa, 2012).

2.4.2 Comportamiento del ligante asfáltico

El ligante asfáltico tiene tres características importantes en el desempeño de la mezcla asfáltica: susceptibilidad a la temperatura, visco elasticidad y envejecimiento.

El cemento asfáltico es un material visco elástico, debido a que simultáneamente muestra las características: viscosidad y elasticidad. Para altas temperaturas ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), el cemento asfáltico actúa casi enteramente como un fluido viscoso. A temperaturas muy bajas ($<0\text{ }^{\circ}\text{C}$), se comporta mayormente como un sólido elástico.

Para temperaturas intermedias se ha encontrado que en la mayoría de los sistemas de pavimentos, el cemento asfáltico tiene ambas características: fluido viscoso y sólido elástico.

Debido a su naturaleza visco elástica, el comportamiento del ligante asfáltico depende tanto de la temperatura como del porcentaje de carga. En la Figura 9. Se puede observar que el flujo del asfalto puede ser el mismo para una hora a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ o 10 h a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Con esto el efecto del tiempo y de la temperatura se encuentra relacionado; el comportamiento a alta temperatura en un período corto de tiempo, equivale a uno con baja temperatura pero con una duración más larga (García, 2010).

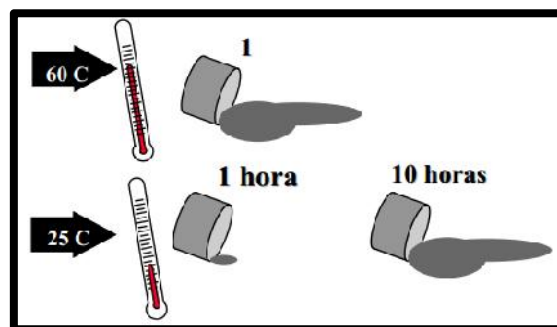


Figura 13. Comportamiento del ligante asfáltico
Fuente: Antecedentes de la Metodología Superpave
Elaborado por: El autor

2.4.3 Comportamiento a altas temperaturas

A altas temperaturas (desiertos), o bajo cargas sostenidas (camiones a bajas velocidades), el cemento asfáltico actúa como un líquido viscoso y fluye. La viscosidad es la característica que describe la resistencia de los líquidos a fluir. Si pudiera observarse con un poderoso

microscopio, un líquido como el asfalto fluir lentamente, se vería el movimiento relativo de las capas adyacentes del líquido, quizá del espesor de una molécula.

La fuerza de fricción, o resistente, entre estas capas depende de la velocidad relativa a la que se desliza una sobre otra. La fuerza resistente entre las capas se debe a que fluyen a velocidades ligeramente diferentes. La capa superior trata de arrastrar a la inferior, mientras que esta última trata de frenar a aquélla. La relación entre la fuerza resistente y la velocidad relativa puede ser muy diferente en la mayoría de los líquidos.

Líquidos viscosos como el asfalto caliente son a veces llamados plásticos, porque una vez que comienzan a fluir no regresan a su posición original. Por esto, en climas cálidos algunos pavimentos asfálticos fluyen bajo cargas repetidas y forman roderas. Sin embargo, las roderas de los pavimentos asfálticos en climas cálidos son también influidas por las propiedades de los agregados y es probablemente más correcto decir que es la mezcla asfáltica la que tiene un comportamiento plástico.

2.4.4 Comportamiento a baja temperatura

El asfalto se comporta a baja temperatura (en los días fríos de invierno), o bajo cargas repetidas (camiones a alta velocidad), como un sólido elástico, o sea como bandas de goma que se deforman al ser cargados y retornan a su forma original al ser descargados. La deformación elástica se recupera completamente.

Si se aplica una carga excesiva, el sólido elástico puede romperse. Aunque el asfalto es un sólido elástico a baja temperatura, puede volverse demasiado frágil y agrietarse bajo carga excesiva. Por esto el agrietamiento a baja temperatura (lowtemperature cracking) a veces ocurre en pavimentos asfálticos en climas fríos. En tales casos las “cargas” se deben a esfuerzos internos que se desarrollan en el pavimento cuando el proceso de contracción se restringe (por ejemplo, durante y después de una rápida caída de la temperatura) (García, 2010).

2.4.5 Envejecimiento

Existe otra característica especial de los asfaltos. Debido a que los componen moléculas orgánicas, reaccionan con el oxígeno del medio ambiente. Esta reacción se llama oxidación y cambia la estructura y composición de las moléculas del asfalto; puede provocar que se haga más duro o frágil, dando origen al término “endurecimiento por oxidación” o “endurecimiento por envejecimiento”.

Este fenómeno ocurre en el pavimento a una velocidad relativamente baja, si bien es mucho más rápido en un clima cálido que en uno frío. Así, el endurecimiento por oxidación es estacional, siendo más marcado en el verano que en el invierno. Debido a este tipo de endurecimiento, los pavimentos asfálticos nuevos pueden ser propensos a este fenómeno si no se compactan adecuadamente.

En este caso, la falta de compactación origina un alto contenido de vacíos en la mezcla, lo que facilita el ingreso de una mayor cantidad de aire a la mezcla asfáltica, e incrementar el endurecimiento por oxidación.

La oxidación se produce más rápidamente a altas temperaturas. Es por ello que parte del endurecimiento ocurre durante el proceso de producción, cuando es necesario calentar el cemento asfáltico para permitir el mezclado y compactación.

Volatilización es otro tipo de endurecimiento ocurre durante el mezclado en caliente y construcción. A altas temperaturas los componentes volátiles del asfalto se evaporan. Estos componentes volátiles livianos del tipo aceites ablandarían al asfalto, de permanecer dentro de él (García, 2010).

2.4.6 Efectos del Envejecimiento del Ligante en la Mezcla

Existe otra característica especial de los asfaltos. Debido a que los componen moléculas orgánicas, reaccionan con el oxígeno del medio ambiente. Esta reacción se llama oxidación y cambia la estructura y composición de las moléculas del asfalto; puede provocar que se haga más duro o frágil, dando origen al término “endurecimiento por oxidación” o “endurecimiento por envejecimiento”.

La oxidación se produce más rápidamente a altas temperaturas. Es por ello que parte del endurecimiento ocurre durante el proceso de producción, cuando es necesario calentar el cemento asfáltico para permitir el mezclado y compactación.

Volatilización es otro tipo de endurecimiento ocurre durante el mezclado en caliente y construcción. A altas temperaturas los componentes volátiles del asfalto se evaporan. Estos componentes volátiles livianos del tipo aceites ablandarían al asfalto, de permanecer dentro de él.

Durante la vida útil de la estructura de un pavimento flexible se requiere normalmente dar un mantenimiento superficial a la capa de rodadura para evitar el desgaste por oxidación del asfalto expuesto a la intemperie. Siempre hay que tomar en cuenta este factor en cualquier

diseño o estudio ya que el endurecimiento en demasía del ligante asfáltico producirá tal rigidización de la capa de rodadura, que esta llega a comportarse como un pavimento rígido y a la vez quebradizo por su reducido espesor.

El proceso de oxidación del asfalto se produce por la exposición constante a los rayos ultravioletas, los cambios de temperatura, exceso de calentamiento, entrada de agua y oxígeno a la mezcla, etc. Ya que se han identificado las causales del problema, se puede con procedimientos sencillos minimizarlos para proteger la inversión que representan las carreteras.

Además de la oxidación producida durante la vida útil de la carpeta, también se produce un envejecimiento bastante acelerado durante el proceso de calentamiento del asfalto para producir la mezcla y por causa de la película delgada que envuelve al agregado a calentado a altas temperaturas (García, 2010).

2.4.7 Asfalto ecuatoriano

El asfalto en Ecuador se obtiene del proceso de destilación del crudo que se ejecuta en la refinería de Esmeraldas, refinería principal del país, productora única de asfalto y diluidos asfálticos. Actualmente producen un solo tipo de Asfalto que tiene las características de un AC 20.

Teniendo regiones con 2 climas diferentes (Costa y Amazonia de clima caliente, Sierra de clima templado) se podría considerar mejor tener dos o más clasificaciones PG que se adapten mejor a las necesidades según los climas de las regiones del país. Pero realmente un AC 20 tiene una clasificación PG que lo hace apto para cualquier zona de nuestro país exceptuando las carreteras de la Sierra que están a más de 4000mts de altura, razón por la cual son ligeramente más frías que las demás vías de la Sierra y requerirán de un Asfalto blando (García, 2010).

El cemento asfáltico debe ser homogéneo, libre de agua, y no debe formar espuma cuando se calienta a 175 °C.

2.4.8 Caracterización del asfalto AC-20

El asfalto puede ser caracterizado de tres maneras, según el reglamento técnico centroamericano RTCA 75.01.22:047. Estas formas de caracterizar el asfalto resultan útiles si la interpretación de los resultados es apropiada, el asfalto se puede caracterizar por grado de viscosidad, por grado de penetración y por grado de desempeño. Independientemente de cada caracterización intenta evaluar la consistencia del asfalto a una o varias temperaturas,

así como evaluar propiedades relacionadas con pureza, susceptibilidad al envejecimiento y seguridad (Jorge & Delgado, 2011).

El principio fundamental de la caracterización por grado de viscosidad es determinar la viscosidad absoluta a 60 °C y verificar los demás requisitos para el asfalto AC-20, el cual proviene de la Refinería Estatal de Esmeraldas, ubicada en la provincia y ciudad con el mismo nombre.

Se realizaron los siguientes ensayos para conocer sus propiedades en estado original y sobre el residuo del TFOT:

- Viscosidad Absoluta a 60 °C (ASTM D2171).
- Viscosidad Cinemática a 135 °C (ASTM D2170).
- Punto de inflamación con copa abierta Cleveland (ASTM D92).
- Densidad relativa (25 °C).
- Índice de Penetración.
- Penetración a 25 °C (ASTM D 5).
- Punto de ablandamiento (°C).
- Viscosidad a 60 °C (ASTM D2171). Al residuo del envejecido TFO. (Horno de película delgada por sus siglas en ingles)
- Efecto del calor y el aire en materiales asfálticos mediante el horno de película delgada TFO. (ASTM D1754).
- Ductilidad a 25 °C (ASTM D113). Al residuo del envejecido TFO.

2.4.9 Ceras orgánicas

Los aditivos orgánicos, generalmente son ceras que se mezclan junto con el asfalto, mejorando la trabajabilidad, gracias a que se reduce la viscosidad y la lubricación del mismo tanto durante la producción de la mezcla como durante la compactación de la misma, con la consiguiente reducción en las temperaturas, generando notables beneficios de tipo ambiental.

Esto se debe a que cuando la mezcla alcanza el punto de fusión de las ceras adicionadas, estas trabajan y la viscosidad del asfalto disminuye, garantizando de esta manera un correcto cubrimiento de las partículas de agregados. Una vez la mezcla ha sido extendida y compactada, la temperatura disminuye, haciendo que las ceras se solidifiquen y empiecen a contribuir en el incremento de la dureza del asfalto.

Las ceras que se emplean en estos procesos, son moléculas complejas formadas por cadenas hidrocarbonadas con temperaturas de fusión entre 80 °C y 120 °C, haciendo que en este intervalo, se produzca la modificación de las propiedades del asfalto. La variación en el punto de fusión, se debe principalmente a la longitud de la cadena de carbonos, la cual generalmente es mayor a 45 carbonos. Los aditivos orgánicos, se aplican generalmente en dosis de entre 2% y 4% del total de la masa del asfalto. Actualmente, se conocen tres tipos principales de Aditivos Orgánicos que se utilizan durante la fabricación de las mezclas asfálticas tibias:

CERAS FISCHER – TROPSCH.- estas ceras son obtenidas a partir de procesos químicos destinados a producir hidrocarburos líquidos a partir de gas de síntesis, el cual a su vez es un combustible gaseoso que se obtiene sometiendo algunas sustancias ricas en carbono, tales como hulla, carbón, coque, nafta y biomasa, a un proceso químico en elevadas temperaturas.

El producto, es una cera que tiene contenidos variables de Monóxido de Carbono (CO₂) y de Hidrogeno (H₂).

AMIDAS ACIDAS GRASAS.- estas ceras son producidas por medios sintéticos a partir de la reacción de amidas con grasas acidas. Las amidas como tal, se obtienen a partir de la unión de una amina con un ácido carboxílico, formando un compuesto orgánico conocido también como amina acida.

CERAS DE MONTANA.- esta Cera también es conocida como Cera de Lignito o como Cera OP. Consiste en una cera dura que se obtiene a partir de la extracción utilizando disolventes de determinados tipos de lignito o carbón pardo. Los yacimientos comerciales de este tipo de ceras son muy escasos, encontrándose la mayoría ubicados en Alemania y en la cuenca del Rio Ione en California, Estados Unidos (Avendaño et al., 2015).

2.4.9.1 Cera Carnauba

La cera de carnauba es extraída de las hojas de la palma carnauba, cuyo nombre científico es Copernicia Prunifera, este árbol pertenece a la familia de las Arecaceae. A esta planta también se le conoce con los nombres de carnauba o carnaubeira y es una especie nativa de la región noreste de Brasil.



Figura 14. Planta Palma Carnauba

Fuente: wikiwand

Elaborado por: El autor

Las hojas tienen forma de abanico, pueden llegar a medir hasta 1.5 metros de ancho. Poseen una coloración verde oscuro o azul-verde, ambas partes están recubiertas de cera.

Para evitar que la palma pierda agua durante la época de sequía, que en la región noreste de Brasil dura hasta seis meses, la planta se cubre de una espesa capa de cera compuesta de ésteres, alcoholes y ácidos grasos de alto peso molecular.

2.4.9.2 Proceso de extracción agroindustrial

La cera de carnauba se obtiene desmenuzando o cocinando la hojas de palma de carnauba (*Copernicia cerifera* Mart.). El producto posteriormente se depura. El producto crudo no se comercializa en el mercado.

Durante la estación seca, la palma silvestre de carnauba, que se encuentra principalmente en el norte de Brasil y que crece aproximadamente 15 m de altura, forma escamas de cera en sus hojas en forma de abanico, que miden aproximadamente 2 m de longitud. Éstas ayudan a proteger el árbol contra la evaporación que se produce durante la estación seca.

La cera se recoge durante la estación seca cortando 6-8 hojas de la palma de carnauba cada 2 meses. Las escamas de cera se aflojan cuando se encogen las hojas, y posteriormente se pican, se desmenuzan o se cepillan, o se elimina la cera mecánicamente. La cera se depura en agua hirviendo y después se filtra. Una vez ha cuajado, se rompe en trozos. La cera de carnauba es de color amarillo fuerte a amarillo, o también de color verdoso a verde oscuro (con un colorido que depende de la purificación). En su estado fundido, emite un olor acre característico, pero no desagradable. Tiene una capacidad de endurecimiento alta (la más alta encontrada en cualquier otro tipo de cera, incluyendo los productos sintéticos) y es extremadamente difícil de saponificar (el desarrollo de emulsiones de alcohol e hidrocarburos impide la formación de jabón).

La cera de carnauba es reconocida por sus propiedades de brillo. Combina dureza con resistencia al desgaste, su punto de fusión es de 78 a 85 °C, el más alto entre las ceras naturales.

Esta cera está compuesta por ésteres de ácidos grasos en un 80 a 85%, alcoholes grasos en un 10 a 15%, ácidos de un 3 a 6% e hidrocarburos a 1 a 3%.



Figura 15. Cera Carnaúba

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

Tiene una infinidad de aplicaciones: sus raíces tienen un uso medicinal y son un eficiente diurético; los frutos son muy ricos en nutrientes y se utilizan para la alimentación animal; el tronco tiene una madera de buena calidad, empleada en la construcción.

2.4.9.3 Usos

La cera de carnaúba es cosechada de las hojas de la palma, y tiene numerosas aplicaciones: se utiliza en productos para pulir los coches, los zapatos, el suelo, y se mezcla a menudo con cera de abeja para distintas aplicaciones; combinada con aceite de coco es también uno de los principales ingredientes de la cera utilizada por los surfistas en sus tablas; se utiliza en la preparación de productos industriales culinarios, se cubren los alimentos con esta cera para darles un aspecto brillante, hallándose en esta forma en confites como los M&M's y el Tic TAC, y también en algunos chocolates; encuentra también aplicaciones en la industria farmacéutica, como cobertura de algunos medicamentos y en la industria cosmética, en las cremas y barra de labios, donde actúa como emoliente y formador de película.

CAPÍTULO III

3.1 Metodología

El estudio que se realizará es de tipo experimental, y durante el proceso de la investigación el producto de la mezcla del asfalto con la cera es evaluado en su desempeño utilizando como técnicas los ensayos de laboratorio.

Para alcanzar cada uno de los objetivos específicos y, resolver y dar cumplimiento al objetivo general es necesario realizar una búsqueda bibliográfica de forma constante, de recursos relacionados con el tema de las mezclas tibias y los métodos de producción, de igual manera, resulta de la mayor importancia llevar a cabo ensayos en laboratorio para saber cuál es el potencial del bioasfalto.

Las actividades orientadas a lograr cada uno de los objetivos de la investigación se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 7. Objetivos y actividades de la investigación

OBJETIVO	ACTIVIDADES
Desarrollar las mezclas asfálticas tibias como una nueva tecnología para reducir la temperatura de mezclado y compactación de las mezclas asfálticas convencionales, bajo condiciones de materiales de la localidad.	• Selección de las fuentes de producción de la cera carnauba, solicitar su caracterización, identificar sus componentes y definir con base en los resultados; la cantidad de 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 cera carnauba y asfalto base. • Realización de ensayos de viscosidad Brookfield, para cada porcentaje de adición de cera carnauba al asfalto.
Definir las características de los agregados, cera y del asfalto AC-20.	• 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 MOP-001-F-2002. • Solicitar al proveedor de la cera la caracterización de la misma.

	• Elaboración de ensayos de penetración, punto de ablandamiento e índice de penetración del asfalto base.
Obtener el asfalto modificado a partir de la mezcla de la cera carnauba y asfalto.	• Mezcla de la cera carnauba con el asfalto base al 1%, 3% y 5% del peso del asfalto. • Elaboración de la curva reológica del asfalto modificado, con el fin de determinar las temperaturas mezclado y compactación de las mezcla. • Escogencia del porcentaje óptimo de cera carnauba, que le proporcione al asfalto base la mayor disminución de la viscosidad a la misma temperatura, y cumpla la norma MOP-001-F- 2002.
Diseñar la mezcla asfáltica en caliente de acuerdo al Método Marshall y ensayo Marshall agregando la cantidad óptima de la cera en la cantidad óptima del asfalto en caliente.	• Calcular la curva granulométrica para una mezcla asfáltica densa de la faja $\frac{3}{4}$", y definirla como curva para la fórmula de trabajo. • Elaboración del diseño de la mezcla asfáltica de acuerdo al método Marshall, dibujar las curvas y definir la fórmula de trabajo. • Fabricación de las probetas a utilizar, con diferentes temperaturas de mezcla de 110, 130 y 150 °C. • Elaboración de las probetas usadas en laboratorio, con la fórmula de trabajo obtenida para ejecutar las pruebas de desempeño mecánicas (Marshall) de las mezclas.
Establecer una comparación que permita la evaluación de desempeño en el laboratorio, entre las mezclas asfálticas tibias a partir de la cera carnauba, y las mezclas asfálticas producidas en caliente.	• Comparación de los resultados de desempeño de la mezcla tibia con resultados de las mezclas en caliente, establecidas en las normas del MOP-001-F- 2002.

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

CAPÍTULO IV

4.1 Resultados de los ensayos ejecutados para diseño de mezcla asfáltica

4.1.1 Análisis granulométrico

ANALISIS GRANULOMETRICO						
PROY. : TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL						
OBRA : MEZCLA ASFÁLTICA						
UBIC. : CATAMAYO MUESTRA: '3/4"						
FECHA : DICIEMBRE-2016 OPERADOR E.B.R. PROFUND.: STOKC						
MATERIAL: 3/4"						
PESO IN.: 3,485.00 LIMITE LIQUIDO: 0.00						
LIMITE PLASTICO 0.00						
MALLA No.	MASA RET. PARCIAL	MASA RET. ACUMULADA	% RET.	% PASA	% PASA CORREG.	% RET.AC
3	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/4	41.04	41.04	1.18	98.82	98.82	1.18
1/2	2,512.77	2,553.81	73.28	26.72	26.72	73.28
3/8	763.72	3,317.53	95.19	4.81	4.81	95.19
# 4	89.14	3,406.67	97.75	2.25	2.25	97.75
PASA # 4	78.33	78.33	2.25			
SUMAN	3,485	3,485	100.00			
PESO HUM=	78.3	w% =	0.00	P.SECO=	78	
# 8	15.81	15.81	20.18	79.82	1.79	98.21
# 16	1.53	17.34	22.14	77.86	1.75	98.25
# 30	1.03	18.37	23.45	76.55	1.72	98.28
# 50	1.60	19.97	25.49	74.51	1.67	98.33
# 100	3.95	23.92	30.54	69.46	1.56	98.44
# 200	10.91	34.83	44.47	55.53	1.25	98.75
PASA #200	43.50	43.50	55.53			
SUMAN	78.33	78.33	100.00			

ANALISIS GRANULOMETRICO						
PROY. : TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL						
OBRA : MEZCLA ASFÁLTICA						
UBIC. : CATAMAYO MUESTRA: '1/2"						
FECHA : DICIEMBRE-2016 OPERADOR E.B.R. PROFUND.: STOKC						
MATERIAL: 1/2"						
PESO IN.: 6,095.00 LIMITE LIQUIDO: 0.00						
LIMITE PLASTICO 0.00						
MALLA No.	MASA RET. PARCIAL	MASA RET. ACUMULADA	% RET.	% PASA	% PASA CORREG.	% RET.AC
3	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/4	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1/2	49.30	49.30	0.81	99.19	99.19	0.81
3/8	2,100.92	2,150.22	35.28	64.72	64.72	35.28
# 4	3,838.59	5,988.81	98.26	1.74	1.74	98.26
PASA # 4	106.19	106.19	1.74			
SUMAN	6,095	6,095	100.00			
PESO HUM=	106.2	w% =	0.00	P.SECO=	106	
# 8	34.63	34.63	32.61	67.39	1.17	98.83
# 16	6.11	40.74	38.37	61.63	1.07	98.93
# 30	2.39	43.13	40.62	59.38	1.03	98.97
# 50	2.57	45.70	43.04	56.96	0.99	99.01
# 100	8.08	53.78	50.65	49.35	0.86	99.14
# 200	15.49	69.27	65.23	34.77	0.61	99.39
PASA #200	36.92	36.92	34.77			
SUMAN	106.19	106.19	100.00			

ANALISIS GRANULOMETRICO

PROY. : TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL OBRA : MEZCLA ASFÁLTICA UBIC. : CATAMAYO FECHA : DICIEMBRE-2016						
MUESTRA: ARENA LAVADA OPERADOR E.B.R. PROFUND.: STOKC						
MATERIAL: ARENA			LIMITE LIQUIDO:		0.00	
PESO IN.: 4,075.00			LIMITE PLASTICO		0.00	
MALLA No.	MASA RET. PARCIAL	MASA RET. ACUMULADA	% RET.	% PASA	% PASA CORREG.	% RET.AC
3	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/4	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/8	2.94	2.94	0.07	99.93	99.93	0.07
# 4	814.40	817.34	20.06	79.94	79.94	20.06
PASA # 4	3,257.66	3,257.66	79.94			
SUMAN	4,075	4,075	100.00			
PESO HUM=	3257.7	w% =	0.00	P.SECO=	3258	
# 8	755.45	755.45	23.19	76.81	61.40	38.60
# 16	661.33	1416.78	43.49	56.51	45.17	54.83
# 30	717.94	2134.72	65.53	34.47	27.56	72.44
# 50	561.13	2695.85	82.75	17.25	13.79	86.21
# 100	326.40	3022.25	92.77	7.23	5.78	94.22
# 200	138.85	3161.10	97.04	2.96	2.37	97.63
PASA #200	96.56	96.56	2.96			
SUMAN	3257.66	3257.66	100.00			

ANALISIS GRANULOMETRICO

PROY. : TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL OBRA : MEZCLA ASFÁLTICA UBIC. : CATAMAYO FECHA : DICIEMBRE-2016						
MUESTRA: ARENA TRITURADA OPERADOR D.I.C. PROFUND.: STOKC						
MATERIAL: FINO TRITURADO			LIMITE LIQUIDO:		0.00	
PESO IN.: 4,930.00			LIMITE PLASTICO		0.00	
MALLA No.	MASA RET. PARCIAL	MASA RET. ACUMULADA	% RET.	% PASA	% PASA CORREG.	% RET.AC
3	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/4	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1/2	2.40	2.40	0.05	99.95	99.95	0.05
3/8	28.07	30.47	0.62	99.38	99.38	0.62
# 4	1,773.38	1,803.85	36.59	63.41	63.41	36.59
PASA # 4	3,126.15	3,126.15	63.41			
SUMAN	4,930	4,930	100.00			
PESO HUM=	3126.2	w% =	0.00	P.SECO=	3126	
# 8	1080.22	1080.22	34.55	65.45	41.50	58.50
# 16	466.61	1546.83	49.48	50.52	32.03	67.97
# 30	355.34	1902.17	60.85	39.15	24.83	75.17
# 50	403.82	2305.99	73.76	26.24	16.64	83.36
# 100	314.19	2620.18	83.81	16.19	10.26	89.74
# 200	214.72	2834.90	90.68	9.32	5.91	94.09
PASA #200	291.25	291.25	9.32			
SUMAN	3126.15	3126.15	100.00			

ANALISIS GRANULOMETRICO

PROY. : TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL						
OBRA : MEZCLA ASFÁLTICA						
UBIC. : CATAMAYO			MUESTRA: FILLER			
FECHA : DICIEMBRE-2016			OPERADOR D.I.C. PROFUND.: STOKC			
MATERIAL: FINO TRITURADO			LIMITE LIQUIDO:		0.00	
PESO IN.: 270.31			LIMITE PLASTICO		0.00	
MALLA No.	MASA RET. PARCIAL	MASA RET. ACUMULADA	% RET.	% PASA	% PASA CORREG.	% RET. AC
3	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/4	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/8	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
# 4	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
PASA # 4	270.31	270.31	100.00			
SUMAN	270	270	100.00			
PESO HUM=	270.3	w% =	0.00	P. SEC0=	270	
# 8	0.24	0.24	0.09	99.91	99.91	0.09
# 16	0.84	1.08	0.40	99.60	99.60	0.40
# 30	3.21	4.29	1.59	98.41	98.41	1.59
# 50	11.91	16.20	5.99	94.01	94.01	5.99
# 100	38.85	55.05	20.37	79.63	79.63	20.37
# 200	114.69	169.74	62.79	37.21	37.21	62.79
PASA #200	100.57	100.57	37.21			
SUMAN	270.31	270.31	100.00			

4.1.2 Resumen de resultados

Todos los especímenes fueron fabricados en laboratorio de la Universidad Técnica Particular de Loja, en la cual en todas las mezclas se diseñó una sola granulometría densa y se empleó cinco agregados pétreo de un banco del cantón Catamayo, mina catamayito, a este material se le realizaron todos los ensayos correspondientes de acuerdo a la normatividad ecuatoriana, obteniendo las siguientes características representadas en la tabla 8., los resultados de los ensayos de caracterización realizados a los agregados en el laboratorio, en la cual se observa que todos los agregados cumplen las especificaciones.

Tabla 8. Características del agregado pétreo usado en el estudio

Característica del ensayo	Unidad	Norma MTOP	Especificación MTOP		Resultados
			Mín.	Máx.	
Gravedad específica del llenante mineral	-	811.2.02a	--	--	2.33
Equivalente de arena	%	811.2.02a	50	--	90.70
Desgaste los Ángeles	%	811-2.02	--	40	27.95
Pérdidas en ensayo de solidez Sulfato de sodio (5 ci.)	%	811.2.02a	--	12	1.90
Gravedad específica y absorción del agregado fino	-	811.2.02a	--	--	2.55/3.76
Gravedad específica y absorción del agregado grueso	-	811.2.02a	--	--	2.60/1.43
Partículas fracturadas mecánicamente (Mín. 1 Cara)	%	811.2.02a	85	--	98.66
Partículas fracturadas mecánicamente (Mín. 2 Cara)	%	811.2.02a	80	--	95.73
Partículas planas y alargadas (Relación 5:1)	%	811.2.02a	--	10	6.99
Materiales deletéreos agregado grueso	%	811.2.02a	--	1	0.53
Materiales deletéreos agregado fino	%	811.2.02a	--	1	0.84

Fuente: MOP-001-F-2002

Elaborado por: El autor

En el ANEXO A se muestra los informe de los resultados de laboratorio correspondientes.

4.1.3 Diseño de la combinación granulométrica para determinación de porcentajes de agregados

En la tabla 9 se presenta el resumen de los materiales pasantes de cada uno de los ensayos granulométricos.

Tabla 9. Resumen de los materiales pasantes de los ensayos de granulometría

PROY. : TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL OBRA : DISEÑO MEZCLAS ASFÁLTICA LOCALZ : CATAMAYO FECHA : DIC.-2016						
MUESTRA # 1: 3/4" MUESTRA # 2: 1/2" MUESTRA # 3: ARENA TRITU. MUESTRA # 4: ARENA LAVAD. MUESTRA # 5: FILLER						
TAMIZ N°	MUESTRAS % Q' PASAN					
	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 5	N° 6
1"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	-
3/4"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	-
3/8"	4.81	64.72	99.38	99.93	100.00	-
N° 4	2.25	41.54	63.43	79.94	100.00	-
N° 8	1.79	1.17	41.54	61.40	99.91	-
N° 50	1.67	0.99	16.69	13.79	94.01	-
N° 200	1.25	0.61	5.96	2.37	37.21	-

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

Tabla 10: Diseño o composición granulométrico combinado

MEZCLA FAJA 3/4" INSTITUTO DEL ASFALTO								
Proyecto: Trabajo de titulación Maestría en Ingeniería Vial			DISEÑO GRANULOMÉTRICO TAMAÑO NOMINAL 3/4"				FECHA: Diciembre 2016	
Tamaño del Tamiz	MINA	TAMAÑO DEL TAMIZ (PORCENTAJE QUE PASA)						
		1"	3/4"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 50	No. 200
Arido 3/4	Catamayito	100.00	100.00	4.81	2.25	1.79	1.67	1.25
Arido 1/2	Catamayito	100.00	100.00	64.72	41.54	1.17	0.99	0.61
Arena Triturada	Catamayito	100.00	100.00	99.38	63.43	41.54	16.69	5.96
Arena Lavada	Catamayito	100.00	100.00	99.93	79.94	61.40	13.79	2.37
Filler	Catamayito	100.00	100.00	100.00	100.00	99.91	94.01	37.21
Especificaciones Deseadas		100	90 - 100	56 - 80	35 - 65	23 - 49	5 - 19	2 - 8
GRADUACIÓN COMBINADA PARA MEZCLAS PRUEBA								
Tamaño del Tamiz	Porcentaje Usado	TAMAÑO DEL TAMIZ PORCENTA QUE PASA						
		1"	3/4"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 50	No. 200
Arido 3/4	22%	22.00	22.00	1.06	0.50	0.39	0.37	0.28
Arido 1/2	25%	25.00	25.00	16.18	10.39	0.29	0.25	0.15
Arena Triturada	12%	12.00	12.00	11.93	7.61	4.98	2.00	0.72
Arena Lavada	34%	34.00	34.00	33.98	27.18	20.88	4.69	0.81
Filler	7%	7.00	7.00	7.00	7.00	6.99	6.58	2.60
TOTAL:	100%	100	100	70	53	34	14	5
Especificaciones Deseadas		100	100	80	65	49	19	8
		100	90	56	35	23	5	2
FAJA DE TRABAJO		100	100	77	60	40	19	8
		100	92	63	46	28	9	2

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

El diseño granulométrico que se hizo para el trabajo de graduación, se realizó de acuerdo a los parámetros establecidos para una mezcla densa.

Formula de trabajo (dosificación) resultante:

Grava $\frac{3}{4}$ "	22 %
Grava $\frac{1}{2}$ "	25 %
Arena triturada	12 %
Arena lavada	34%
Filler	7%

4.1.4 Combinación granulométrica

Mezcla de agregados y formula de trabajo mediante el análisis volumétrico, el cual nos otorga una mezcla de gradación densa, los resultados se presentan a continuación.

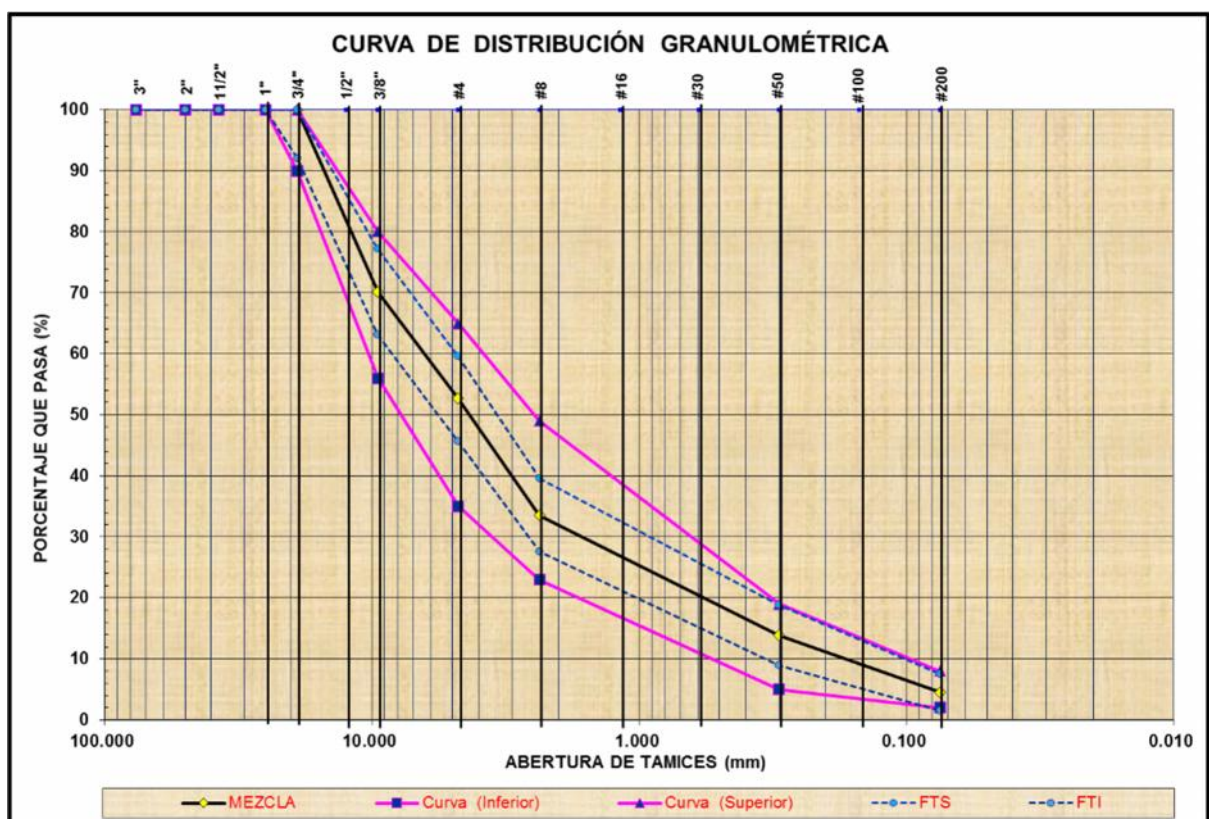


Figura 16. Curva de distribución Granulométrica Combinada

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

El árido es adecuado para preparar la mezcla asfáltica ya que la curva granulométrica se encuentra dentro de los límites que establece los requisitos de gradación de la ASTM C33.

4.1.5 Resultados de los ensayos de laboratorio para caracterizar asfalto AC-20

Los ensayos que se necesitan para evaluar las propiedades requeridas de calidad del cemento asfáltico son varios. La Tabla No. 11 presenta la comparación entre los valores especificados en la norma NTE-INEN 2515 Enmienda 1 (NTE-INEN 2515, 2014) y los resultados de los ensayos de caracterización realizados al asfalto en laboratorio.

Tabla 11. Resultados de la caracterización del asfalto AC-20

Características de ensayo	Unidad	Especificación	Resultados
Sobre muestra Original			
Viscosidad Absoluta (60 °C)	Pa.s	160 - 240	210
Viscosidad Cinemática (135 °C)	Pa.s	300 mín.	353
Punto de Inflamación (°C)	° C	232 mín.	295
Densidad Relativa (25 °C)	g/cm ³	1.00	1.0218
Índice de Penetración	-	- 1,5 a 1	-1.0
Penetración (25°C)	mm/10	60 -70	70
Punto de Ablandamiento °C	° C	47 - 58	48
Sobre residuo del (TFOT. 5 horas a 163 °C)			
Viscosidad Absoluta (60 °C)	Pa.s	800 máx.	888
Cambio de Masa (%)	%	1.0 máx.	-0.32
Ductilidad (25 °C)	cm	50 mín.	42

Fuente: Pincay, 2017 Método RAMCODES

Elaborado por: El autor

Observaciones: Los valor de viscosidad absoluta y ductilidad del residuo están fuera de especificación, de hace varios años el asfalto producido en la refinería de Esmeraldas ha tenido la particular característica de envejecerse prematuramente, es decir, un proceso de oxidación acelerado; de manera que no siempre se cumplen las características requeridas según normas internacionales para un asfalto después de pasar por el proceso de envejecimiento en película delgada (TFOT).

Conociendo los problemas del asfalto en el Ecuador, se debe buscar soluciones en las cuales no haya tanta agresividad hacia el asfalto durante las etapas iniciales de mezcla y compactación. Además de buscar siempre diseños de mezclas densas que no estén expuestas a tanta oxidación. Y esta es una de las razones más importantes para considerar el uso de mezclas tibias (García, 2010).

4.1.6 Caracterización de la cera carnauba

Como objetivo uno se realizó la adquisición de la cera carnauba, para ello fue necesario realizar un pedido especial por la inexistencia de éste aditivo en el país.

La muestra fue suministrada por Almon del Ecuador S.A., ubicada en la capital del país.

En el presente trabajo de investigación se utilizará la cera carnauba para modificar la viscosidad del asfalto y lograr con el objetivo de bajar la temperatura de mezcla y compactación de las mezclas asfálticas convencionales.

La apariencia sólida, de color amarillo intenso, ésta cera se conoce también como la "reina de las ceras", por sus características e infinidad de aplicaciones. La cera de carnaúba es reconocida por sus propiedades de brillo y cuentan con las siguientes características ver tabla 12.

Tabla 12: Caracterización técnicas de la Cera

Características	Normas	Carnauba extraída de palma
Punto de fusión (°C)	82.5-86 °C American Wax	83°C
Penetración (d mm)	ASTM D -1321	0 - 2

Fuente: Almon del Ecuador S.A.

Elaborado por: El autor

Su punto de fusión es el más alto entre las ceras naturales, en el ANEXO C se detallan la caracterización de la cera proporcionada por la empresa que la suministra.

CAPÍTULO V

5 Análisis e interpretación de resultados de la mezcla asfáltica tibia

5.1 Trabajo de laboratorio para elaboración de especímenes

5.1.1 Producción de mezcla asfáltica tibia

El diseño de mezcla asfáltica en caliente obtenido en el capítulo cuatro, generó una dosificación con las siguientes proporciones: Agregado grueso $\frac{3}{4}$ " 22%, Agregado intermedio $\frac{1}{2}$ " 25%, Arena triturada 12%, Arena lavada 34% y filler de 7%. Este diseño fue el utilizado para la producción en laboratorio de la mezcla asfáltica tibia con cera carnauba, producida a una temperatura de 110 °C, 130 °C y 150 °C, las cuales serán evaluadas y sometidas a ensayos que permitan medir sus propiedades.

5.1.2 Trabajo de laboratorio para la determinación de la curva viscosidad-temperatura del asfalto modificado y sin modificar

En primer lugar se preparan las muestras mediante la mezcla de la cera y el asfalto.

Para observar el comportamiento de la viscosidad del asfalto AC-20, utilizado en ésta investigación, se realizó 3 mezclas cera-asfalto y una sin modificar, con relación al peso del porcentaje óptimo del asfalto.



Figura 17. Preparación de la mezcla cera-asfalto

Fuente: Laboratorio Etsconsuelos

Elaborado por: El autor

Se identifican las cuatro muestras de asfalto, el primero con asfalto sin modificar, el segundo con el 1%, el tercero con el 3% y el cuarto con el 5% de la cera carnauba, como se muestra a continuación:



Figura 18. Muestras de asfalto para ensayo de viscosidad
Fuente: Propia
Elaborado por: El autor

Se realizó el ensayo de viscosidad a cada una de las muestras a diferentes temperaturas para obtener la curva viscosidad-temperatura de cada una de ellas, mediante la utilización del viscosímetro rotatorio Brookfield (DV3T) utilizado para ésta investigación, ver figura N° 18, Las Agujas usadas para determinar las Viscosidades fueron la N° 27 y N° 21, como se muestra en la figura N° 19.



Figura 19. Viscosímetro Brookfield y muestras de asfalto
Fuente: Laboratorio de pavimentos de la compañía HeH.
Elaborado por: El autor



Figura 20: Aguja utilizada para el ensayo
Fuente: Laboratorio de pavimentos de la CIA. HeH.
Elaborado por: El autor

Dado que la cera carnaúba lo consideramos como un aditivo modificador de la viscosidad del asfalto convencional, su utilización y dosificación obedeció a los parámetros que se usan para dichos objetivos, es decir, se establece una cantidad que se encuentre entre 0% y 5%, controlando los resultados obtenidos con cada porcentaje. Para tal efecto se consideraron cantidades de 1%, 3%, y 5% generando con estos valores una regresión logarítmica en el plano viscosidad vs temperatura.

Con el fin de determinar el potencial reductor de viscosidad de cera carnaúba en el asfalto, se procedió a elaborar las pruebas y ensayos de viscosidad frente al asfalto base utilizado (ver tabla 11), la dosificación utilizada en los ensayos es la siguiente: 1%, 3%, y 5%.

Los resultados de la dosificación para la cera carnaúba en los porcentajes indicados y utilizando como asfalto base el AC-20 se presentan a continuación.

Tabla 13. Viscosidades a diferentes temperaturas para concentraciones de cera

% CERA AÑADIDO	TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)			
	135	150	170	190
	VISCOSIDAD (cSt)			
Asfalto sin modificar	360	180	80	40
1%	330	170	80	40
3%	300	150	70	40
5%	290	150	70	40

Fuente: Propia
Elaborado por: El autor

Las curvas resultantes del ensayo realizado con el viscosímetro rotatorio Brookfield, se presentan a continuación:

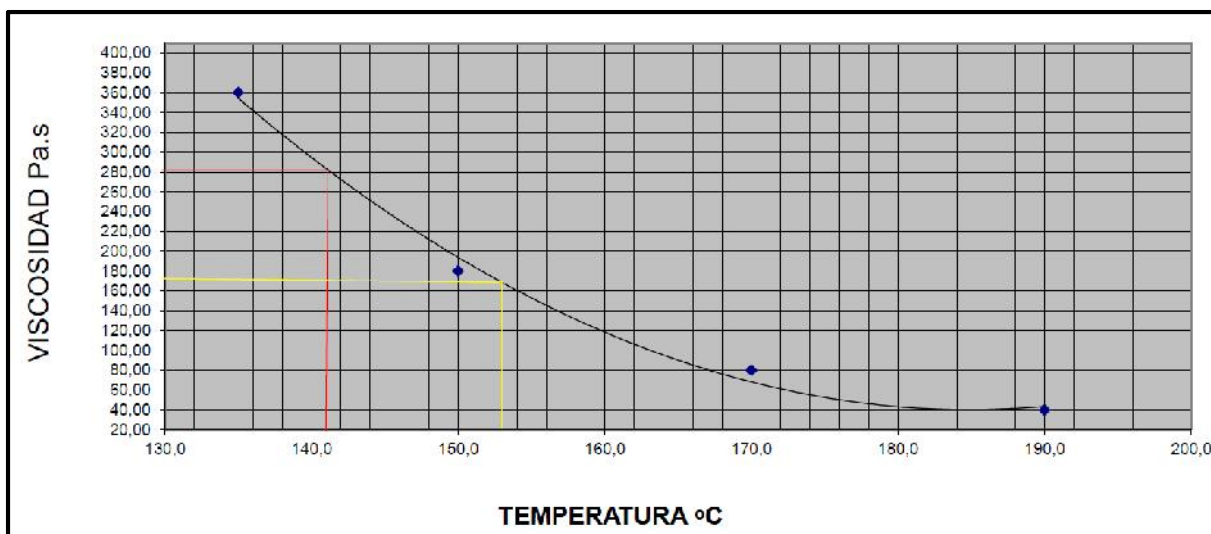


Figura 21. Curva viscosidad-temperatura del asfalto AC-20 sin modificar

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

Temperaturas de mezcla: 153 °C y Compactación: 141 °C.

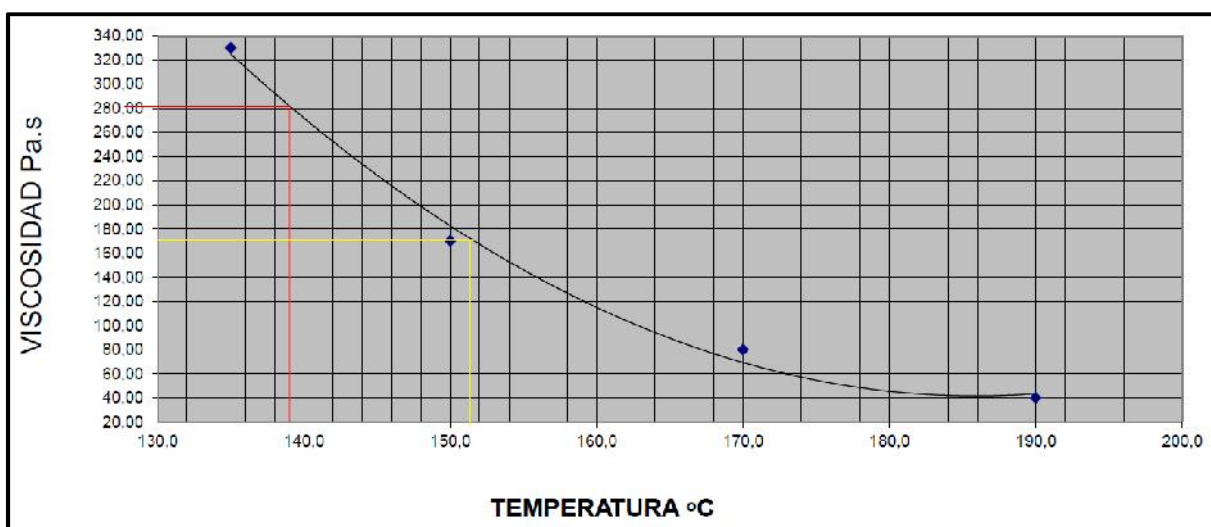


Figura 22. Curva viscosidad-temperatura del asfalto modificado con el 1% de cera carnauba

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

Temperaturas de mezcla: 151,5 °C y Compactación: 139 °C.

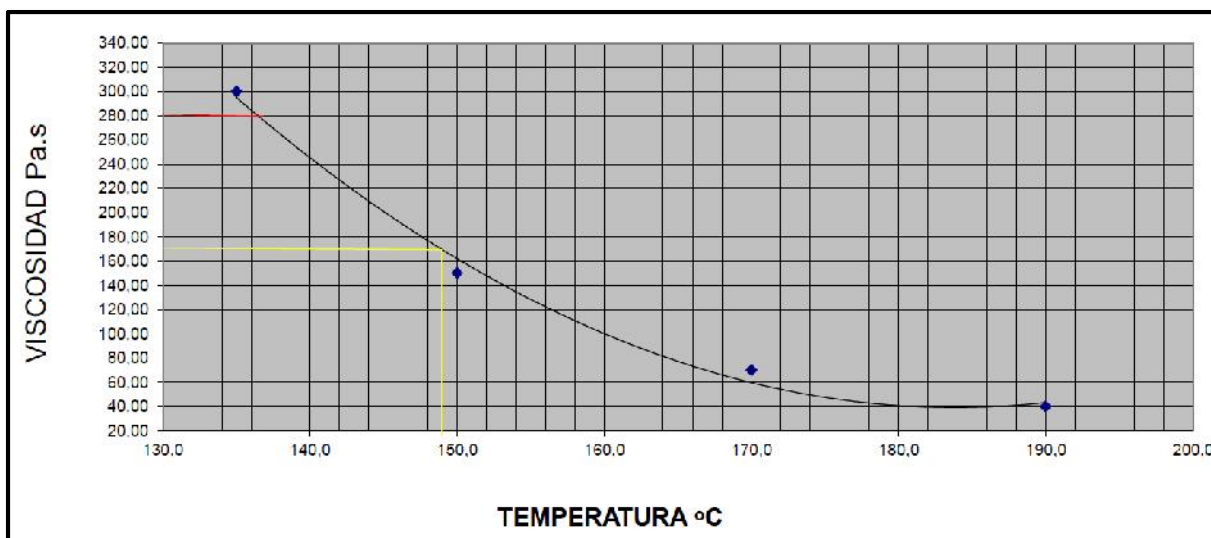


Figura 23. Curva viscosidad-temperatura del asfalto modificado con el 3% de cera carnauba

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

Temperaturas de mezcla: 149 °C y Compactación: 136.4 °C.

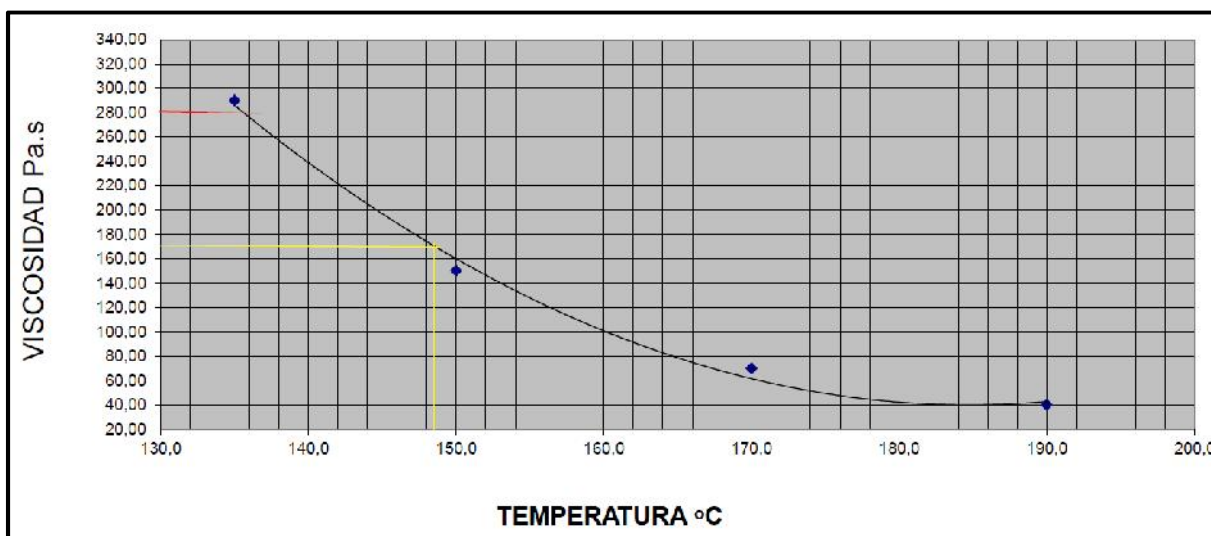


Figura 24. Curva viscosidad-temperatura del asfalto modificado con el 5% de cera carnauba

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

Temperaturas de mezcla: 148.6 °C y Compactación: 135.8 °C.

En el ANEXO D se detallan los resultados de laboratorio correspondientes a las curvas de viscosidad-temperatura individuales del asfalto convencional y modificado.

Con la ayuda de la herramienta Excel se las superpuso a las cuatro curvas para proceder a analizar el comportamiento de la viscosidad con variación del porcentaje de la cera carnauba.

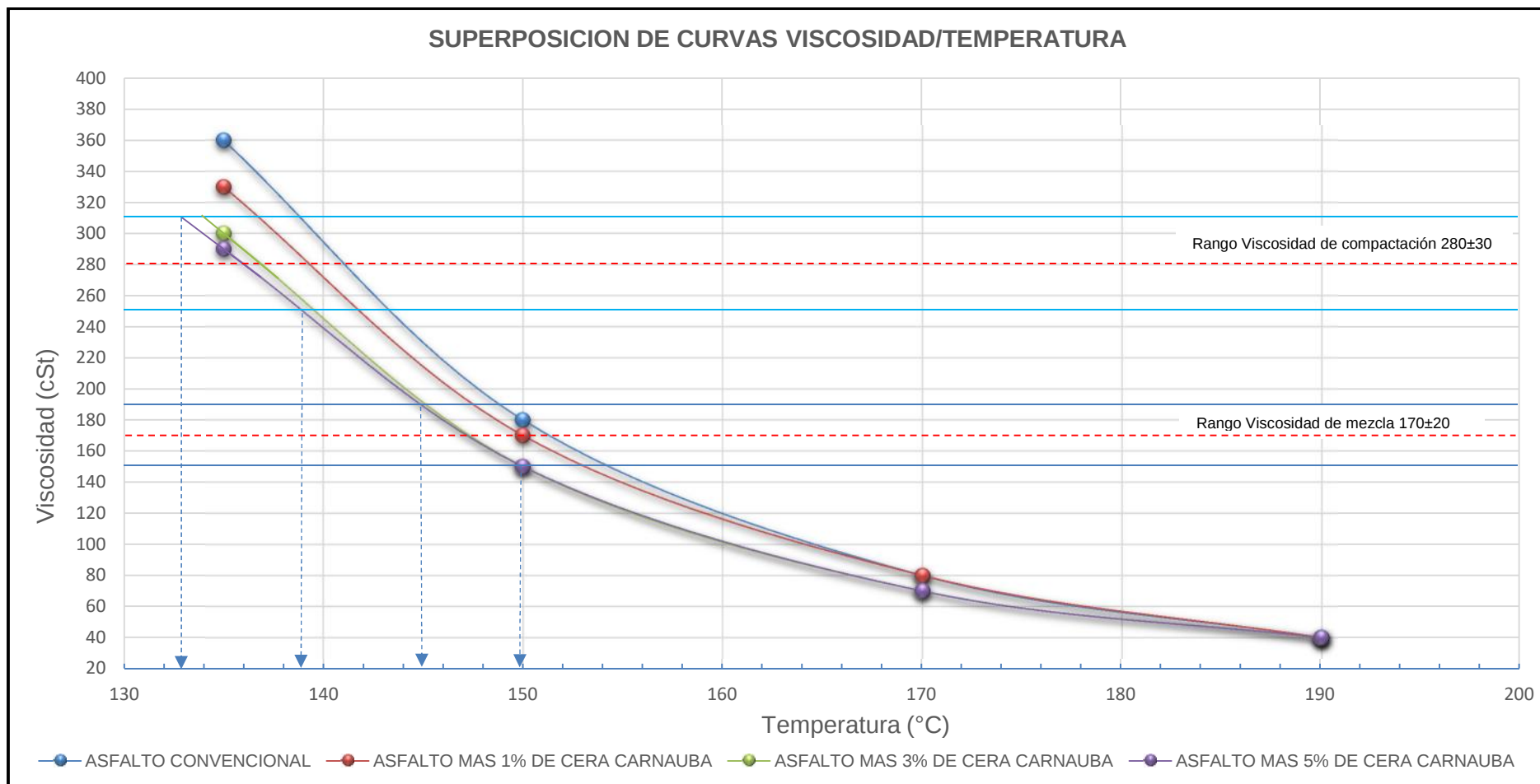


Figura 25. Comportamiento de la Viscosidad vs. Temperatura del asfalto modificado con Cera Carnauba

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

La figura 24 nos muestra el comportamiento de la viscosidad del asfalto AC-20, al agregar en porcentaje la cera carnaúba.

Con ello se determina gráficamente el contenido óptimo de la cera, en base al criterio de diseño del Instituto Norteamericano del Asfalto, para cualquier tipo de diseño, las temperaturas de trabajo se determinan por la viscosidad del asfalto, observando cuál de las curvas se encuentra más baja, lo que quiere decir que la viscosidad es menor, siendo ese el porcentaje óptimo de la cera a utilizar en el presente proyecto, como se ve en la figuras 24.

De los resultados obtenidos y extractados de las curvas reológicas, se escoge el porcentaje óptimo de la cera carnauba con el 5% de adición con relación al peso del asfalto, dado que posee el mayor potencial reductor de la viscosidad, con ello se procede a elaborar las mezclas asfálticas tibias a diferentes temperaturas de mezclas y compactación, una vez determinado el contenido óptimo del asfalto, mediante los procedimientos de las mezclas asfálticas en caliente.

El ensayo basado en AASHTO T 245-97(2008), la cual establece que la temperatura de mezclado para cemento asfáltico es aquella que produce una viscosidad de 170 ± 20 centistoke (cSt), para el cemento asfáltico AC-20 que se ocupó, éste rango de viscosidades se logra con temperaturas de 145 a 150 °C; mientras que las viscosidades para compactación según AASHTO T 245-97(2008) serán de 280 ± 30 cSt, alcanzándolas en el cemento asfáltico utilizado en el rango de temperaturas de 133 a 139 °C, los cuales fueron obtenidos de la carta viscosidad-temperatura con el 5% de cera de la Figura 24.

De acuerdo al criterio del instituto de asfalto, si se quisiera una viscosidad de 170 cSt, el cambio de temperatura no va a ser mayor a 5 grados, de manera que no sería representativo.

Pero los criterios de mezcla y compactación para mezclas asfálticas tibias son diferentes, se toma en cuenta para la temperatura de mezcla, una temperatura a la que el ligante pueda recubrir al agregado en su totalidad, según lo indicado en la primera fase de la guía de diseño NCHRP 9-43 (Ramon, 2011) para mezclas tibias, se debe escoger la temperatura de mezcla según la cobertura que se aprecie sobre el agregado sea el 100%; usando éste criterio para éste proyecto se determinó la de temperatura de mezcla de 130 °C.

Para obtener la temperatura mínima de compactación se puede estimar de manera experimental, para éste proyecto se realizarán tres series de briquetas a diferentes

temperaturas y se tomará la que cumpla con los valores referentes Marshall establecidas en las normas del MOP-001-F 2002.

5.1.3 Trabajo de laboratorio para el diseño de la mezcla

Ya obtenida la caracterización de los materiales pétreos y el Bioasfalto con sus temperaturas de trabajo para la producción de la mezcla en tibio se procedió a elaborar el diseño Marshall con el fin de obtener la fórmula de trabajo para la elaboración de las probetas y evaluar su desempeño, los resultados se presentan a continuación.

Objetivo. Definir el contenido óptimo de asfalto y la gradación de los agregados, de manera que la mezcla asfáltica obtenida en laboratorio cumpla con los requisitos de gradación, estabilidad, fluencia, densidad y porcentajes de vacíos, de acuerdo con las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y puentes MOP-001-F 2002.

El diseño resultante se traduce en una "FÓRMULA DE TRABAJO" que permite evaluar las características de la mezcla bajo cualquier circunstancia.

La "FÓRMULA DE TRABAJO" en el presente estudio, está basada en el empleo de los materiales en las proporciones determinadas, también se tuvo en cuenta la concentración crítica del llenante mineral para el control de la relación filler/betún durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica en laboratorio. Cualquier cambio en la procedencia de los agregados y/o su proporcionamiento en la mezcla implica modificaciones en el diseño.

Esas pruebas se realizaron con el fin de contar con los resultados de referencia, para la mezcla utilizando agregados convencionales que se ajustan a las normas del MTOP y realizando la prueba Marshall standard, mediante temperatura de mezclado a 150 °C. Se utilizaron porcentajes de asfalto de 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%.

Se ha obtenido graficas en función del porcentaje de asfalto para las siguientes propiedades: Estabilidad, relación estabilidad/Flujo, Flujo, Densidad Bulk, Porcentaje de vacíos con aire y porcentaje de vacíos de los agregados pétreos. Los análisis realizados toman como referencia los criterios de aceptación de las Especificaciones Generales para la construcción de caminos y puentes MOP-001-F 2002.

El porcentaje de vacíos con aire disminuye a medida que aumenta el porcentaje de asfalto, el rango de variación obtenido está entre 8 y 4%, valores aceptables. Para un porcentaje de

asfalto del 6.5% se obtiene el menor valor (4.0%) para el cual se obtendría la mezcla con menor susceptibilidad a deformarse. Ver Figura 25.

Los valores de estabilidad obtenidos son normales, variando entre 1750 lb y 2100 lb. Se encuentra que el valor para 6.5% de asfalto representa una resistencia intermedia de 1848 lb. Ver Figura 26.

Los valores del % de relación Bitumen/Vacíos varían entre 55 y 80 %, rango que está dentro de los límites de los valores usualmente aceptables. Ver Figura 26.

Lo anterior es congruente con los resultados de Flujo que se muestra en la Figura 27, los que varían en un rango estrecho entre 9.2 y 13.28 Pulg./100, rango que está en el centro de los límites aceptables, estos resultados muestran una mezcla que tiende a ser flexible.

Los valores de densidad Bulk obtenidos según la Figura 29 indican valores usuales para este tipo de mezcla, alrededor de 2320 gr/cm³ para porcentajes de asfalto de 6.5%.

En la Figura 30 se observa que los porcentajes de vacíos en el agregado mineral varían en un rango estrecho entre 14.23 y 16.36% y son mayores al valor mínimo aceptable para una mezcla tipo C (14%), por su forma y su ubicación significa que la mezcla compactada no son tan sensibles al contenido del asfalto.

Tabla 14. Diseño de mezclas asfálticas en caliente

PROYECTO: TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL FAJA DE TRABAJO: 3/4" INSTITUTO DEL ASFALTO GRADO DE CEMENTO ASFALTICO: AC-20 GOLPES: 75 FECHA: 12-2016																											
CONTROL DE LA MEZCLA ASFALTICA EN LABORATORIO																											
MATERIALES					MEZCLA ASFALTICA										% EN VOLUMEN			% VACIOS EN AGREGADOS MINERALES	% ASFALTO EFECTIVO EN LA MEZCLA	% RELACION BITUMEN VACIOS	ESTABILIDAD (lbs)				FLUJO 0.01"		
AGREGADOS	% AGREGADOS	% DOSIFICACION	PESO ESPECIFICO AGREGADOS (gr)	PESO ESPECIFICO 25/25°C ASFALTO	MUESTRA	P. Aire Seco (gr)	P. Aire S.S.S. (gr)	P. agua (gr)	VOLUMEN (cm³)	PESO ESPECIFICO BULK (gr/cm³)	PESO ESPECIFICO MAXIMO TEORICO (gr/cm³)	PESO ESPECIFICO MAXIMO MEDIDO (gr/cm³)		% ASFALTO ABSORVIDO	AGREGADOS	VACIOS CON AIRE	C. A. AFECTIVO				FACTOR DE CORRECCION	LECTURA (kN)	LECTURA (lbs)	CORREGIDA			
3/4"	22.00	21.01	2.603		1	1082.35	1082.95	600.13	482.82	2.242		W. m	1000.42						1.14	6.76	1516	1728	9.68				
1/2"	25.00	23.88	2.599		2	1018.20	1019.90	568.06	451.84	2.253		W. f+a	6885.00						1.25	6.28	1408	1760	9.12				
Arena Trt	12.00	11.46	2.546		3	1114.56	1115.23	620.27	494.96	2.252		W. f+a+m	7475.00						1.09	7.31	1639	1787	8.84				
Arena lav	34.00	32.47	2.584																								
Filler	7.00	6.69	2.332	1.016	4							RICE															
C.A.		4.50																									
TOTAL	100	100	2.568			PROMEDIO				2.249	2.403	2.438	0.624	83.64	7.74	8.62	16.36	3.90	56.29					1759	9		
3/4"	22.00	20.9	2.603		1	999.93	1000.87	563.33	437.54	2.285		W. m	1000.21						1.32	6.49	1455	1921	9				
1/2"	25.00	23.8	2.599		2	1042.34	1043.37	585.33	458.04	2.276		W. f+a	6885.00						1.19	7.33	1644	1956	9.72				
Arena Trt	12.00	11.4	2.546		3	1025.26	1026.32	579.00	447.32	2.292		W. f+a+m	7476.00						1.25	6.92	1552	1940	10.11				
Arena lav	34.00	32.3	2.584																								
Filler	7.00	6.7	2.332	1.016	4							RICE															
C.A.		5.00																									
TOTAL	100	100	2.568			PROMEDIO				2.284	2.386	2.444	1.058	84.51	6.54	8.95	15.49	3.99	63.21					1939	10		
3/4"	22.00	20.79	2.603		1	1046.30	1047.34	598.42	448.92	2.331		W. m	1000.00						1.25	7.44	1669	2086	11				
1/2"	25.00	23.63	2.599		2	1088.06	1089.12	622.24	466.88	2.330		W. f+a	6885.00						1.19	8.03	1801	2143	11.02				
Arena Trt	12.00	11.34	2.546		3							W. f+a+m	7476.00														
Arena lav	34.00	32.13	2.584																								
Filler	7.00	6.62	2.332	1.016	4							RICE															
C.A.		5.50																									
TOTAL	100	100	2.568			PROMEDIO				2.331	2.369	2.445	1.392	85.77	4.68	9.55	14.23	4.18	72.95					2114	11		
3/4"	22.00	20.68	2.603		1	1031.84	1032.69	592.48	440.21	2.344		W. m	1000.00						1.32	6.92	1552	2048	12				
1/2"	25.00	23.50	2.599		2	1027.40	1027.34	588.44	438.90	2.341		W. f+a	6885.00						1.32	6.93	1554	2051	12				
Arena Trt	12.00	11.28	2.546		3	1080.15	1080.98	617.00	463.98	2.328		W. f+a+m	7473.00						1.19	7.54	1691	2012	12				
Arena lav	34.00	31.96	2.584																								
Filler	7.00	6.58	2.332	1.016								RICE															
C.A.		6.00																									
TOTAL	100	100	2.568			PROMEDIO				2.338	2.352	2.427	1.396	85.57	3.69	10.74	14.43	4.69	78.91					2037	12		
3/4"	22.00	20.57	2.603		1	1203.46	1204.29	685.02	519.27	2.318		W. m	1000.00						1.00	7.81	1751	1751	13.85				
1/2"	25.00	23.38	2.599		2	1159.45	1160.18	659.41	500.77	2.315		W. f+a	6885.00						1.04	7.69	1725	1794	13				
Arena Trt	12.00	11.22	2.546		3	1083.89	1084.66	617.21	467.45	2.319		W. f+a+m	7471.00						1.19	7.49	1680	1999	13				
Arena lav	34.00	31.79	2.584		4																						
Filler	7.00	6.55	2.332	1.016								RICE															
C.A.		6.50																									
TOTAL	100	100	2.568			PROMEDIO				2.317	2.336	2.415	1.508	84.38	4.07	11.56	15.62	5.09	78.47					1848	13		

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

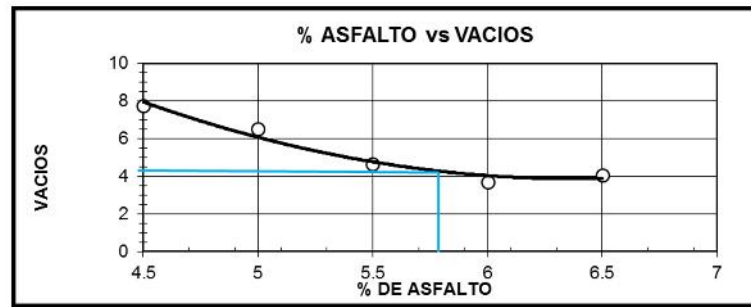


Figura 26. % de Asfalto vs % de vacíos con aire.

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

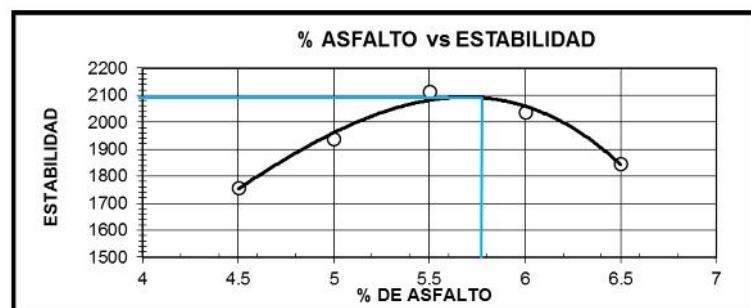


Figura 27. % de Asfalto vs Estabilidad.

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

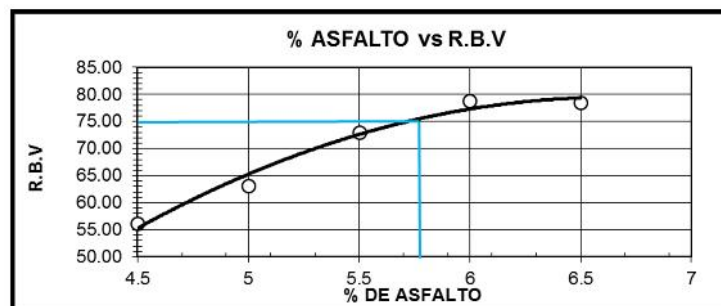


Figura 28. % de Asfalto vs % Relación Bitumen/Vacíos.

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

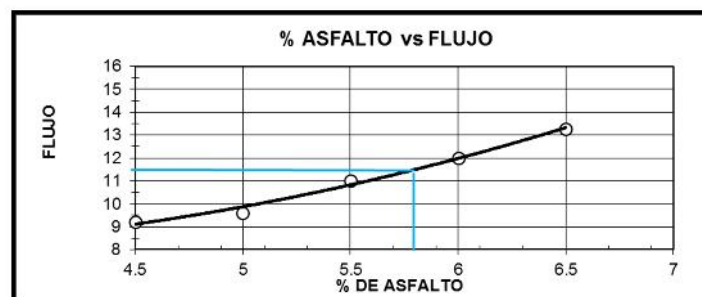


Figura 29: % de Asfalto vs Flujo.

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

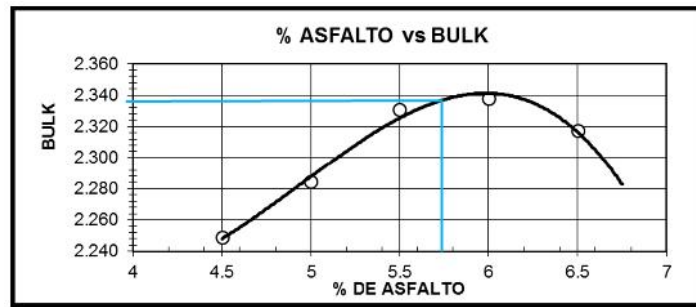


Figura 30. % de Asfalto vs Densidad Bulk.

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

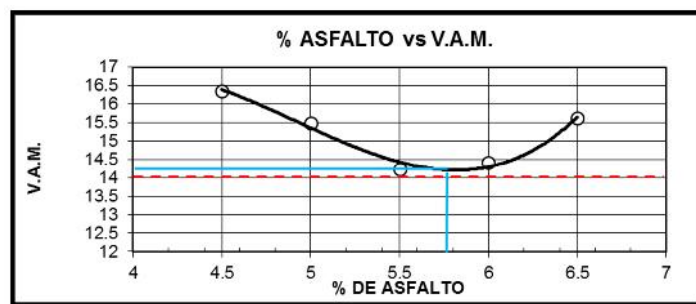


Figura 31. % de Asfalto vs % Vacíos en el Agregado Mineral.

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

Tabla 15. Resumen del diseño de la mezcla

RESUMEN :		REQUERIMIENTOS	
<u>PORCENTAJE OPTIMO</u>	5.75 %	5.5 %	6 %
<u>ESTABILIDAD</u>	2,090 lb	>	1,800 lb
<u>FLUENCIA</u>	11.50 1/100	8.0 1/100	14 1/100
<u>DENSIDAD</u>	2336.0 gr/cm3		

RESUMEN :		REQUERIMIENTOS	
<u>VACIOS CON AIRE</u>	4.40 %	3 %	5 %
<u>VACIOS DE AGRAGADO MINERAL</u>	14.25 %	>	14 %
<u>RELACION BITUMEN VACIOS</u>	75.00 %	65 %	75 %
<u>PESO ESPECIFICO MAXIMO TEORICO</u>	2.35 gr/cm3		

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

5.1.4 Trabajo de laboratorio para elaborar la mezcla

El diseño de mezcla asfáltica en caliente obtenido en el capítulo cuatro, generó una dosificación con las siguientes proporciones: Agregado grueso $\frac{3}{4}$ " 22%, Agregado intermedio $\frac{1}{2}$ " 25%, Arena triturada 12%, Arena lavada 34% y filler de 7%, en el presente capítulo se determinó el 5% de cera optima y el 5.75% del porcentaje óptimo de asfalto.

En la tabla 16, se muestran los resultados que representan las respectivas cantidades de agregado y asfalto necesarias para realizar la producción de la mezcla asfáltica. El peso de la muestra de asfalto y agregado utilizado, fue calculado de acuerdo al porcentaje en masa de cada uno de estos componentes que se encuentra presente en cada una de las briquetas, teniendo como masa para cada briketa 1500 g.

Tabla 16. Proporcionamiento de los agregados para la mezcla

AGREGADOS	% AGREGADO	% DOSIFICACIÓN
GRAVA $\frac{3}{4}$:	22%	20.74%
GRAVA $\frac{1}{2}$:	25%	23.56%
ARENA TRITURADA:	12%	11.31%
ARENA LAVADA:	34%	32.05%
FILLER:	7%	6.60%
ASFALTO:		5.75%
TOTAL:	100%	100%

RESUMEN									
CERA EN %	Nro. BRIQ.	P. TOT. MUEST. (gr)	ASFALTO (gr)	AGR. $\frac{3}{4}$ " (gr)	AGR. $\frac{1}{2}$ " (gr)	ARENA TRIT. (gr)	ARENA LAV. (gr)	FILLER (gr)	CERA (gr)
5	1	1500	86.25	311.03	353.44	169.65	480.68	98.96	4.31

Fuete: Propia

Elaborado por: El autor

Se colocó los agregados en el horno para eliminar la humedad y evita que altere los resultados, la temperatura de secado es 10 °C por encima de la de mezcla, así como también al asfalto, luego se mezcló de forma manual hasta obtener una muestra homogénea y cubierta los agregados en un 100%, tomando a ésta como temperatura de mezclado.

Para agregar la cera se puede hacer vía húmeda o seca, para ésta investigación se utilizó mediante vía seca, o sea agregándole directamente en la mezcla como se observa en la figura 31.

Seguidamente se mezcló en seco los agregados y se forma un cráter en el centro, donde se añade la cantidad de asfalto determinado, calentado previamente a la temperatura de mezcla, y la cera carnauba, como se observa en la figura No. 31, se mezcla rápidamente todos los materiales hasta obtener una mezcla completa y homogénea a la temperatura especificada.

En ésta etapa se confirma que la temperatura mínima necesaria para cubrir el 100 de los agregados con el asfalto es de 130 °C.



Figura 32: Añadido de la cera
Fuente: Propia
Elaborado por: El autor



Figura 33. Mezcla homogénea y 100% cubierta los agregados
Fuente: Propia
Elaborado por: El autor

5.1.5 Trabajo de laboratorio para elaborar las briquetas

Para determinar las propiedades mecánicas establecidas por Marshall, se preparó tres series de briquetas con incrementos de temperatura de fabricación de 110°C, 130°C y 150°C, agregando el 5% de cera carnauba a la masa del contenido óptimo de asfalto, para comparar en el laboratorio el desempeño mecánico, contra los requeridos para mezclas convencionales establecidas por las especificaciones técnicas del MTOP para tráfico pesado.

Se prepararon 6 briquetas por cada temperatura de fabricación; para lo cual se procedió a pesar los diferentes tipos de agregados, asfalto y cera, para producir una mezcla que resulte una briketa compactada de 6.35 ± 1.27 mm de altura, para lo cual se preparó la cantidad de 1500 gr. de mezcla para cada briketa.

Compactación de especímenes

- Se calientan tanto el molde limpio como el martillo de compactación, en el horno y la cocina, respectivamente.
- Se coloca papel filtro al fondo del molde, antes de introducir la mezcla.
- Se introduce la cantidad dosificada completa en el molde, compactando con una espátula 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en el interior.
- Cuando se alcanza la temperatura de compactación, se coloca en el sujetador de molde y se ejercen 75 golpes con el martillo de compactación con caída libre de 18 pulgadas.
- Se posiciona el molde en posición inversa y se le da el mismo número de golpes.



Figura 34. Compactado de las briquetas

Fuente: Laboratorio de pavimentos UTPL

Elaborado por: El autor

- Se deja en curado las briquetas hasta que estas se enfríen.
- Se extraen las briquetas con la ayuda de un extractor.



Figura 35. Extractor de briquetas

Fuente: Laboratorio UTPL

Elaborado por: El autor



Figura 36. Briquetas extraídas

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

5.1.6 Trabajo de laboratorio ensayos Marshall sobre mezclas asfálticas tibias

Con el fin de evaluar la resistencia, la calidad y la capacidad de las mezclas asfálticas a temperaturas de 110, 130 y 150 °C con adición de cera carnaúba, fue necesario realizar una serie de ensayos de laboratorio para demostrar por medio de un comparativo entre ellas, la factibilidad de utilizar e implementar la nueva tecnología de la **mezcla asfáltica tibia** en las obras civiles de pavimentación.

El trabajo de laboratorio de las muestras de mezcla asfáltica se realiza a través del procedimiento Marshall, el cual comprende los siguientes ensayos:

- Gravedad Específica Bulk (AASHTO T 166-10).
- Determinación del Gmm y porcentaje de vacíos.
- Estabilidad y Flujo (AASHTO T 245-97 (2008)).

Gravedad Específica Bulk de Mezclas Asfálticas en Caliente Compactadas Utilizando Especímenes Saturados Superficialmente Secos

Para la medición de la densidad de las probetas se utilizó la metodología de la norma “Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficie seca” (ASTM D2726).

El procedimiento seguido para realizar este ensayo fue el siguiente:

- Luego de la compactación de las briquetas y posterior extracción, se dejaron curando a temperatura ambiente.
- Se registra el peso seco de cada briqueta.
- Se sumergen las briquetas en un recipiente con agua a una temperatura de 25°C por un tiempo aproximado de 10 minutos.

- Luego se remueven los especímenes y se colocan en la canastilla previamente tarada, registrando el peso sumergido de la briqueta.
- Inmediatamente se sacan los especímenes del agua, secando superficialmente con una toalla, y registrando el peso de la briqueta superficialmente seco.



Figura 37. Proceso de gravedad específica bulk

Fuente: Laboratorio de pavimentos UTPL

Elaborado por: El autor

La gravedad específica Bulk de los especímenes presentan los resultados siguientes:

Tabla 17. Resultados de Gravedad Específica Bulk para el diseño de la mezcla en caliente.

CALCULO DE LA DENSIDAD BULK					
N° MUESTRA	TEMPERATURA DE MEZCLA (°C)	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C)	GRAVEDAD ESPEIFICA BULK	DENDIDAD BULK (gr./cm3)	PROMEDIO (gr./cm3)
1	110	90	2.347	2.347	2.33
2			2.297	2.297	
3			2.335	2.335	
4			2.379	2.379	
5			2.344	2.344	
6			2.289	2.289	
1	130	110	2.376	2.376	2.37
2			2.397	2.397	
3			2.377	2.377	
4			2.364	2.364	
5			2.387	2.387	
6			2.340	2.340	
1	150	130	2.398	2.398	2.40
2			2.406	2.406	
3			2.408	2.408	
4			2.389	2.389	
5			2.404	2.404	
6			2.402	2.402	

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

Resistencia de Mezclas Bituminosas al Flujo Plástico de Mezclas Bituminosas Utilizando el Aparato Marshall, Basado en norma: AASHTO T 245-97 (2008).

Tabla 18. Valores referentes para Marshall

CRITERIO	TRÁFICO PESADO	
	MÍN.	MÁX.
Número de golpes por cara	75	
Estabilidad (lb)	1800	-
Flujo (0.01")	8	14

Fuente: MOP-001-F-2002

Elaborado por: El autor

Se procedió a realizar el ensayo Marshall con los mismos procedimientos que el de una MAC.

- Las briquetas se sumergen en baño maría a una temperatura de 60 °C durante 30 minutos. Luego se seca el espécimen, colocándose en la parte interna del cabezal inferior de ensayo e inmediatamente se coloca el segmento superior del cabezal de ensayo, poniendo el ensamble completo en posición en la máquina de ensayo.
- La temperatura a la cual debe mantenerse las mordazas es de 21.1 y 37.8 °C, para lo cual se debe recurrir a un baño de agua para alcanzar la temperatura especificada.
- Se lubrica la mordaza así como también las barras guías, una vez listo el equipo de carga Marshall para el ensayo, se saca la probeta del agua y se seca rápidamente su superficie.
- Se coloca la probeta centrada en la mordaza y se coloca el medidor del flujo sobre la barra guía y se encera.
- Se aplica la carga a la briqueta hasta que se produzca la rotura, registrando el valor máximo de carga, éste se registra como valor de estabilidad, las briquetas cuyas alturas no están comprendidas dentro de la tolerancia de 6.35 ± 1.7 mm, se las procede a corregirlas tomado en cuenta la ecuación de calibración del anillo de carga.

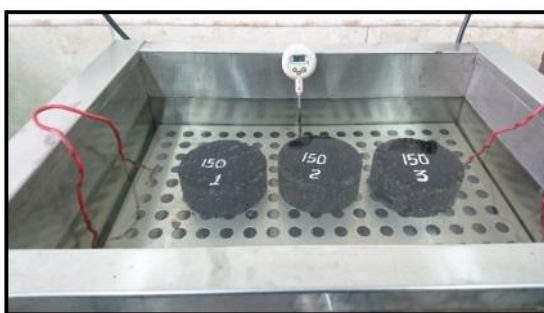


Figura 38. Briquetas en el baño maría a 60°C y secado de la superficie

Fuente: Laboratorio UTPL

Elaborado por: El autor



Figura 39. Ensayo Marshall

Fuente: Laboratorio UTPL

Elaborado por: El autor

Ejemplo de cálculo de estabilidad y flujo para un 4.0% de contenido de Asfalto.

Ecuación del anillo para estabilidad:

$$Fi (Li) = 1.00E-08*(Li)^3 + (-8.00E-06)*(Li)^2 + 0.044600*(Li) + (-0.066800)$$

Dónde: Li= Lectura del días del anillo

Tabla 19: Resultados del ensayo Marshall

CÁLCULO DE LA ESTABILIDAD Y FLUJO								
N° MUESTRA	TEMPERATURA DE MEZCLA (°C)	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C)	LECTURA DEL DIAL (Li)	ESTABILIDAD (Lb.)	ESTABILIDAD CORREGIDA	ESTABILIDAD PROMEDIO (Lb.)	FLUJO (0.25mm)	FLUJO PROMEDIO
1	110	90	132	1282	1526	1452	16	13
2			135	1311	1560		14	
3			153	1485	1381		13	
4			146	1418	1616		13	
5			105	1021	1347		14	
6			100	972	1283		10	
1	130	110	186	1802	2145	1979	12	13
2			192	1860	2027		13	
3			248	2395	2060		14	
4			180	1745	1814		13	
5			190	1841	2006		14	
6			158	1533	1824		13	
1	150	130	158	1533	1916	2021	15	14
2			236	2281	2281		14	
3			204	1975	2054		14	
4			180	1745	1902		15	
5			190	1841	2006		14	
6			178	1725	1967		14	

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor



Figura 40. Briquetas ensayadas
Fuente: Laboratorio de pavimentos UTPL
Elaborado por: El Autor

Este ensayo nos valida la modificación de la viscosidad del asfalto, mediante la mezcla cera-asfalto y nos corrobora las temperaturas de trabajo para la mezcla asfáltica tibia.

El mínimo de estabilidad Marshall requerido en pavimentos para tráfico pesado, lo cual se consideró para éste proyecto, es de 1800 lbs. como se muestra en la tabla 18.

Se puede ver que la mayor carga (estabilidad) antes de la falla la soporta las briquetas con mezclas asfálticas a 150 °C, siguen las briquetas con mezclas a 130 °C y por último las briquetas con mezcla a 110 °C. Así mismo se puede apreciar la deformación máxima (flujo).

Las muestras con temperatura de mezcla de 130 y 150 °C, compactadas a 110 y 130 °C respectivamente, superan el mínimo requerido por las normas del MTOP (1800 lb.), de manera que la estabilidad Marshall de estas muestras son aceptables y cumplen con la especificación.

Con relación al flujo todas las muestras cumplen con las especificaciones ya que se encuentran entre 8 y 14 (0.01”), de acuerdo a lo que establece la norma del MTOP.

Con ello podemos observar que la temperatura de mezcla y compactación, más baja para mezclas asfálticas tibias que se pueden utilizar en la pavimentación es de 130 °C y 110 °C respectivamente.

En el ANEXO E se detallan los resultados de laboratorio correspondientes al ensayo Marshall.

Determinación del Gmm y porcentaje de vacíos.

El porcentaje de vacíos se halló utilizando la norma “Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas” (ASTM D2041).

Este ensayo se realiza a las briquetas que cumplieron con las especificaciones del MTOP, en el procedimiento anterior, para validar con el % de vacíos.

La muestra se obtuvo enfriando la mezcla hasta la temperatura ambiente desintegrando los agregados de forma manual, la masa para este ensayo fue mayor al mínimo recomendado por la norma.

Se realizan tres ensayos para obtener la densidad rice promedio en gr./cm³.

A continuación se tomó un picnómetro y se procedió a calibrar con agua a una temperatura de 25 °C, al cual se lo pesó vacío en el aire y se determinó el agua requerido para llenarlo, mediante el uso de una placa de vidrio, designando éste peso como D.



Figura 41. Llenado del picnómetro de vacío

Fuente: Laboratorio de pavimentos UTPL

Elaborado por: El autor

Pesar el picnómetro con la muestra y designar al peso neto (peso de la muestra) como A, luego se agrega suficiente agua a una temperatura de 25 °C para cubrir la muestra completamente y colocamos la tapa.

Se coloca el picnómetro de vacío con la muestra y el agua en un dispositivo de agitación mecánica, para remover el aire atrapado en la muestra aumentando gradualmente la presión de vacío hasta que el manómetro de presión residual marque 27.5 ± 2.5 mm de Hg. durante el período de 15 ± 2 minutos.

Luego de la remoción del aire atrapado, se llenó totalmente el picnómetro tratando de no introducir aire en la muestra, se cubrió con la placa de vidrio y se determinó la masa del picnómetro más muestra más agua y placa, se designó éste peso como E, a continuación se muestran los resultados.

A continuación se presentan los resultados del ensayo realizado a las probetas para hallar la gravedad máxima medida (Gmm) y con el halla el % de vacíos.

Tabla 20. Gmm y % de vacíos para la mezcla a 130 °C.

Probeta a 130 °C							
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Promedio	
Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos
2.435	2.52	2.451	3.17	2.457	3.37	2.45	3.02

Fuente: Propia

Elaborado por: El autor

Los resultados y el cálculo del Gmm para cada probeta se encuentran en el anexo F.

Con éste ensayo se pretendía evaluar la compactación de las muestras según el tipo de mezcla asfáltica utilizada.

Se puede ver que las briquetas fabricadas a 130 °C y con ese porcentaje de vacío se aprecia que la mezcla asfáltica tibia se deja compactar de una forma fácil, debido a que se encuentra dentro de los rangos de vacío de aire establecidos por las normas del MTOP.

Conclusiones

Se logró el objetivo de fabricar una mezcla asfáltica tibia, a una temperatura de mezcla de 130 °C y de compactación de 110 °C, obteniendo un excelente recubrimiento del agregado, mediante la modificación de la viscosidad del asfalto, por acción de la cera carnauba.

Se comprobó que la cera carnaúba modifica la viscosidad del asfalto AC-20, con la ayuda del viscosímetro Brookfield, con el cual se obtuvo la curva reológica del asfalto convencional y el bioasfalto.

Las mezclas tibias con asfalto modificado con cera carnauba pueden producirse a menores temperaturas con relación a las mezclas asfálticas convencionales.

Se determinó el 5% del peso del asfalto como porcentaje óptimo de cera, dando como resultado una reducción de la temperatura de trabajo de alrededor de 5 puntos con relación a la convencional.

La temperatura de diseño para la compactación en laboratorio de la mezcla asfáltica tibia con cera carnauba, es menor que la temperatura utilizada en una mezcla asfáltica en caliente.

La mezcla asfáltica tibia a 130 °C está dentro del rango normal de porcentaje de vacíos con aire establecidos por las normas del MTOP (3% - 5%), lo cual implica que ésta mezcla es de fácil compactación.

La mezcla asfáltica tibia con cera carnauba produce una serie de ventajas, como la disminución de emisiones volátiles a la atmósfera, una mejor trabajabilidad debido a la reducción de la viscosidad del asfalto, un ahorro en el consumo de energía y combustible y una disminución significativa de olores que producen las mezclas convencionales.

El asfalto ecuatoriano de acuerdo a los resultados de la investigación trabaja bien con la cera carnauba y responde mecánicamente cumpliendo las especificaciones.

Se puede concluir que este tipo de mezclas es viable en nuestro medio, permitiendo su utilización bajar las temperaturas de trabajo entre un rango de 20 a 40°C de las mezclas convencionales.

Así mismo se concluye que los resultados de esta investigación se encuentran dentro del rango de las mezclas asfálticas tibias (ver figura 8.).

Un aspecto muy importante a considerar en la construcción de obras viales es el factor económico; como se observó en el numeral 1.4.8.3 la diferencia de costos en la fabricación de pavimentos con mezcla modificada frente a la mezcla convencional tiene un incremento en costo del 30.72 por ciento, teniendo en cuenta que por sus propiedades físico – mecánicas la vida útil será mayor donde el ahorro será a largo plazo, lo que demuestra la conveniencia de la utilización de la mezcla modificada.

De la elaboración de ésta investigación se desprenden varias interrogantes que pueden ser de inicio de futuras investigaciones y de las cuales se hace mención a dos de ellas:

- Dado que la cera carnaúba es considerado un aditivo orgánico, evaluar el comportamiento del bioasfalto en su estructura química.
- En base al ensayo de tracción indirecta evaluar la cohesión interna de las briquetas.

Recomendaciones

Debido a la urgencia de proveer soluciones al calentamiento global y la necesidad de optimizar los procesos constructivos, se considera importante continuar con la investigación de éste tema, para lo cual se hace las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones:

Encontrar el factor Beneficio-Costo, con el fin de analizar la viabilidad de la implementación de la tecnología de mezclas asfálticas tibias con aditivo cera carnaúba en Ecuador.

En nuestro medio por lo general no se cumple con la temperatura de compactación en campo, por lo que es importante incentivar el uso de la cera carnauba para bajar la misma a 110 °C.

Realizar un tramo de prueba real con la mezcla asfáltica tibia, con el fin de evaluar su comportamiento efectivo.

Se recomienda utilizar la cera carnauba, como reductor de viscosidad del asfalto, siempre y cuando cumplan con los parámetros de calidad expuestos.

Estas ventajas deben ser señaladas a la atención de políticos y autoridades del transporte, quienes deben estar convencidos de los beneficios proporcionados por las MAT y realizar tramos de pruebas.

Se recomienda sea anexado en las especificaciones vigentes de proyectos viales, en atención a los resultados demostrados en ésta investigación.

Lista de referencias

- Arega, Z., & Bhasin, A. (2012). Binder Rheology and Performance in Warm Mix Asphalt, 7, 51. Retrieved from http://ctr.utexas.edu/wp-content/uploads/pubs/0_6591_1.pdf
- Arega, Z., Bhasin, A., Motamed, A., & Turner, F. (2011). Influence of Warm-Mix Additives and Reduced Aging on the Rheology of Asphalt Binders with Different Natural Wax Contents, (October), 1453–1459. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000315](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000315).
- Arista, G., & Aguillón, Jo. (2013). Análisis de Ciclo de Vida y Ecodiseño para la construcción en México, 96. Retrieved from <http://evirtual.uaslp.mx/Habitat/innobitat01/CAHS/Art%EDculos/LIBROS Y REVISTAS/AN%C1LISIS DE CICLO DE VIDA Y ECODISE%D1O PARA LA CONSTRUCCI%D3N EN M%C9XICO.pdf>
- Avendaño, M., González, J., & Bayona, D. (2015). Asfaltos Y Mezclas Asfálticas, 19. Retrieved from https://es.scribd.com/search?page=1&content_type=tops&query=mezclas tibias
- Bardesi, A., & Soto, J. (2012). Mezclas bituminosas a baja temperatura : mezclas en frío , templadas y semicalientes., 9.
- Benítez, A., Zapata, K., & Araujo, E. (2015). EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA, SUSTITUYENDO EN SU FABRICACIÓN, PARTE DEL AGREGADO PÉTREO, POR ESCORIA DE ALTO HORNO, 1–63.
- Cardona, J., & Leguizamón, R. (2013). ESTUDIO DE LA COHESIÓN INDIRECTA DE ASFALTOS MODIFICADOS CON CERAS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS, 32. Retrieved from <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/11321/1/CardonaGomezJohnAlejandro2013.pdf>
- García, M. (2010). Comparación del comportamiento mecánico de mezcla asfáltica tibia y mezcla asfáltica caliente., 106.
- Haggag, M., Mogawer, W., & Bonaquist, R. (2011). Fatigue Evaluation of Warm-Mix Asphalt Mixtures, 26–32. <http://doi.org/10.3141/2208-04>
- Hernando, C., & Palacio, L. (2011). DISEÑO Y PRODUCCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS, A PARTIR DE LA MEZCLA DE ASFALTO Y ACEITE CRUDO DE PALMA (ELAEIS GUINEENSIS), 106.
- Inmbers, E. (2012). Investigación de Nuevas Mezclas de Baja Energía para la Rehabilitación Superficial, 1, 74.
- Javier, O., Ortiz, R., Guillermo, L., Pumarejo, F., & Moreno, O. (2013). Comportamiento de mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos modificados con ceras, 3461, 18. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612013000100009&lang=pt
- Jorge, Q., & Delgado, S. (2011). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano, 14.
- Larcen, D., Daguerre, L., Williams, E., Asurmendi, A., & Ferrín, L. (2011). APLICACIÓN DE MEZCLAS ASFALTICAS TIBIAS EN LA CIUDAD AUTONOMA DE BUENOS AIRES - TRAMOS EXPERIMENTALES, 8. Retrieved from <https://www.ing.unlp.edu.ar/sitio/investigacion/archivos/jornadas2011/ic03.pdf>
- Lopera, C., & Córdoba, J. (2013). DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA A PARTIR DE LA MEZCLA DE ASFALTO Y ACEITE CRUDO DE PALMA, 99–108. Retrieved

- from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532013000300011&lang=pt
- Marcela, L., & Amado, C. (2008). MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS.
- Méndez, G., Morán, J., & Pineda, L. (2014). DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA , MEDIANTE LA METODOLOGÍA MARSHALL , UTILIZANDO ASFALTO ESPUMADO, 218.
- Ministerio, M. (2002). ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES, 772.
- Ramon, B. (2011). *Warm Design Practices for Warm Mix Asphalt*.
- Rodriguez, J. (2014). ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8431/1/T-ESPE-048015.pdf>
- Rubio, C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). Warm mix asphalt : an overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76–84. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>
- SA, A. D. E. (2016). CARNAUBA. Retrieved from <http://almonecuador.com/carnauba/>
- Sosa, J. (2012). ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL ASFALTO PRODUCIDO EN LA REFINERÍA ESTATAL DE ESMERALDAS, 81. Retrieved from <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/467/1/T-UCE-0017-9.pdf>
- Torres, E., & Noreña, A. (2012). MEZCLAS TIBIAS: UNA NUEVA TECNOLOGÍA PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CONVENCIONALES, 50. Retrieved from <http://es.slideshare.net/Giovannooty/modificacin-de-asfaltos-para-mezclas-tibias>

ANEXOS

ANEXO A



ESTUDIOS DE SUELOS, LABORATORIO, CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORIA
 Tele-fax: 2540594. Celular: 093883061-099692335 Email: estisuelton@gmail.com

PROYECTO:	TRABAJO DE TITULACION
-----------	-----------------------

YACIMIENTO:	CATAMAYITO
--------------------	------------

FECHA:	dic-11
--------	--------

RESISTENCIA A LA DISGREGACIÓN

SERIE GRUESA

SERIE FINA

ESTACION CARLOS LOA - EQUADOR
Oswaldo W. Guallo
Laboratorio



ESTSUELCON CIA. LTDA.

ESTUDIOS DE SUELOS, LABORATORIO, CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORIA

ENSAYO DE ABRASION INEN 861

PROYECTO:	TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL		
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA	MUESTRA:	MINA CATAMAYITO
UBICACIÓN:	CATAMAYO	PROF:	STOCK
FECHA:	DICIEMBRE/2016	OPERADOR:	E.B.R.

ENSAYO DE ABRASIÓN MÉTODO A

TAMIZ PASA	TAMIZ RET.	MASA IN.	MASA FINAL	%
1 1/2"	1"	1,250.34		
1"	3/4"	1,251.35		
3/4"	1/2"	1,250.71		
1/2"	3/8"	1,251.06		
SUMA		5,003.46	3,605.00	27.95%
ESPECIF.:		40.00%	CUMPLE	SI

Número de esferas:	11	Masa carga abrasiva	4,420.00 gr.
Porcentaje de Abrasión:			27.95 %

Valor de abrasión en % $V = (A - B) / A \times 100$	Desgaste a la Abrasión Máximo Porcentaje 40%
--	---

OBSERVACIONES: _____





ESTSUELCON CIA. LTDA.

ESTSUELCON CIA. LTDA.

ESTUDIOS DE SUELOS, LABORATORIO, CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORIA

Tele-fax: 2540594. Celular: 093883061-099692335 Email: estsuelcon@gmail.com

ENSAYO DE ADHERENCIA DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS

PROYEC:	TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL		
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA		
LOCALZ.:	CATAMAYO	MUESTRA :	MEZCLA FAJA 3/4"
FECHA:	DICIEMBRE-2016	PROFUND.:	STOCK
		OPERADOR:	E.B.R.
		NORMA	ASTM D 1664

ADHERENCIA EN AGREGADOS GRUESOS			
TAMIZ		MASA GR.	
TAMIZ PASA.	TAMIZ RET.	MUESTRA	ASFALTO
3/8"	1/4"	100.02	5.60

TIEMPOS Y TEMPERATURAS					
MATERIAL BITUMINOS	T° DE MEZCLA	TIEMPO DE MEZCLA	T° DE CURADO	TIEMPO DE CURADO	TIEMPO DE INMERSIÓN EN AGUA
O					
CEM. ASF.	142+-3	2.0-3.0 min	-	o requiere	16-18 hr.

RESULTADOS	
CANtera	JUBONES
ASFALTO	AC-20
ADHERENCIA	+95%

Ing. Ovando W. Castillo

LABORATORIO





ESTSUELCON CIA. LTDA.

ESTUDIOS DE SUELOS, LABORATORIO, CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORIA

Tele-fax: 2540594. Celular: 093883061-099692335 Email: estsuelcon@gmail.com

ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE PARTÍCULAS ALARGADAS

PROYEC:	TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL	
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA	
LOCALZ.:	CATAMAYO	MUESTRA : MEZCLA FAJA 3/4"
FECHA:	DICIEMBRE-2016	PROFUND.: STOCK
		OPERADOR: C.G.
		NORMA ASTM D 4791

PORCENTACE DE PARTICULAS ALARGADAS

TAMIZ RET.	MASA GR.	MASA DE PARTICULAS ALARGADAS	% PARTICULAS ALARGADAS
2"	0.00	0.00	-
1 1/2"	0.00	0.00	-
1"	0.00	0.00	-
3/4"	5000.00	312.62	6.25%
1/2"	2000.00	161.43	8.07%
3/8"	1000.30	84.90	8.49%
SUMA=	8000.30	558.95	6.99%
ESPECIF.:	10.00%	CUMPLE	SI

Ing. Ovidio W. Castillo





ESTSUELCON CIA. LTDA.

ESTUDIOS DE SUELOS, LABORATORIO, CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORIA

Tele-fax: 2540594. Celular: 093883061-099692335 Email: estsuelcon@gmail.com

ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE CARAS FRACTURADAS

PROYEC:	TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL		
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA		
LOCALZ.:	CATAMAYO	MUESTRA :	MEZCLA FAJA 3/4"
FECHA:	DICIEMBRE-2016	PROFUND.:	STOCK
		OPERADOR:	C.G.
		NORMA ASTM	D5821

CARAS FRACTURADAS

TAMAYO MÁXIMO NOMINAL	3/4"
PESO DE LA MUESTRA	1501.93
TAMIZ RETENIDO	1/2"
PESO MINIMO 1 CARA FRACTURADA	1469.03
PESO MINIMO 2 CARAS FRACTURADAS	1425.02
PESO PARTICULAS CUESTIONABLES	25.63
% MINIMO 1 CARA FRACTURADA	98.66%
ESPECIF.	85%
CUMPLE	SI
% MINIMO 2 CARA FRACTURADA	95.73%
ESPECIF.	80 %
CUMPLE	SI





ESTSUELCON CIA. LTDA.

ESTUDIOS DE SUELOS, LABORATORIO, CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORIA

Tele-fax: 2540594. Celular: 093883061-099692335 Email: estsuelcon@gmail.com

ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE DELETÉREOS

PROYEC: TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL

OBRA: MEZCLA ASFÁLTICA

LOCALZ.: CATAMAYO

FECHA: DICIEMBRE-2016

MUESTRA : MEZCLA FAJA 3/4"

PROFUND.: STOCK

OPERADOR: C.G.

NORMA ASTM C 142

DELETÉREOS AGREGADO GRUESO

TAMIZ RET.	MASA IN.	MASA MUESTRA LAVADA	% DELETÉREOS
1 1/2"	0.00	0.00	-
3/4"	0.00	0.00	-
3/8"	2000.68	8.83	0.44%
N° 4	1000.48	7.00	0.70%
SUMA=	3001.16	15.83	0.53%
ESPECIF.:	1.00%	CUMPLE	SI

DELETÉREOS AGREGADO FINO

TAMIZ RET.	MASA IN.	MASA MUESTRA LAVADA	% DELETÉREOS
#16	25.00	0.21	0.84%
ESPECIF.:	1.00%	CUMPLE	SI

Ing. *[Signature]* Castillo





ESTSUELCON CIA. LTDA.

ESTUDIOS DE SUELOS, LABORATORIO, CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORIA

Tele-fax: 2540594. Celular: 093883061-099692335 Email: estsuelcon@gmail.com

PORCENTAJE DE FINOS EN ARENAS

PROYEC:	TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL		
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA		
LOCALZ.:	CATAMAYO	MUESTRA:	MEZCLA FAJA 3/4"
FECHA:	DICIEMBRE-2016		

MUESTRA: TRITURADO

NORMA : ASTM D-2419

EXP. No.	LECTURA ARENA	LECTURA ARCILLA	E. A PARCIAL
	CC.	CC.	%
1	265	295	89.8
2	260	285	91.2
3	255	280	91.1
4			
VALOR MEDIO:			90.7
ESPECIF.:	50.00%	CUMPLE	SI

PROCENTAJE DE FINOS:

9.3 %

Ing. Evidio M. Casapillo





ESTSUELCON CIA. LTDA.

ESTSUELCON CIA. LTDA.

ESTUDIOS DE SUELOS, LABORATORIO, CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORIA

Tele-fax: 2540594. Celular: 093883061-099692335 Email: estsuelcon@gmail.com

PESO ESPECIFICO DE AGREGADOS

PROYEC:	TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA
LOCALZ.:	CATAMAYO
FECHA:	DICIEMBRE-2016

MUESTRA:

PESO ESPECIFICO 3/4"=

2.603 g/cm³

PESO ESPECIFICO 1/2"=

2.599 g/cm³

PESO ESPECIFICO ARENA LAVADA=

2.584 g/cm³

PESO ESPECIFICO ARENA TRITURADA=

2.546 g/cm³

PESO ESPECIFICO FILLER=

2.332 g/cm³

Ing. *[Signature]* David W. Castillo





ESTSUELCON CIA. LTDA.

ESTSUELCON CIA. LTDA.

ESTUDIOS DE SUELOS, LABORATORIO, CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORIA

Tele-fax: 2540594. Celular: 093883061-099692335 Email: estsuelcon@gmail.com

PESO ESPECIFICO DE AGREGADOS

PROYEC:	TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL		
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA		
LOCALZ.:	CATAMAYO	MUESTRA:	FILLER
FECHA:	DICIEMBRE-2016		

MUESTRA: Arena Lavada y 1/2" Grueso Triturado

PESO ESPECIFICO AGREGADO FINO

NORMA DE ENSAYO: ASTM C-128

DATOS:		
PESO PICNOMETRO MAS AGUA:	1248.21	gr
PESO PICNOMETRO:	445.60	gr
VOLUMEN PICNOMETRO:	802.61	cc
PESO TOTAL:	1533.77	gr
PESO SUELO SECO:	455.05	gr
DENSIDAD MASIVA:	2.12	gr/cm ³
DENSIDAD SSS:	2.332	gr/cm ³
DENSIDAD APARENTE:	2.68	gr/cm ³
ABSORCION:	9.88%	

Ing. Ovidio W. Castillo





ESTSUELCON CIA. LTDA.

ESTSUELCON CIA. LTDA.

ESTUDIOS DE SUELOS, LABORATORIO, CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORIA

Tele-fax: 2540594. Celular: 093883061-099692335 Email: estsuelcon@gmail.com

PESO ESPECIFICO DE AGREGADOS

PROYEC:	TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL		
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA		
LOCALZ.:	CATAMAYO	MUESTRA:	Arena Lav. Y 1/2"
FECHA:	DICIEMBRE-2016		

MUESTRA: Arena Lavada y 1/2" Grueso Triturado

PESO ESPECIFICO AGREGADO FINO

NORMA DE ENSAYO: ASTM C-128

DATOS:		
PESO PICNOMETRO MAS AGUA:	1247.05	gr
PESO PICNOMETRO:	444.58	gr
VOLUMEN PICNOMETRO:	802.47	cc
PESO TOTAL:	1553.54	gr
PESO SUELO SECO:	486.12	gr
DENSIDAD MASIVA:	2.51	gr/cm ³
DENSIDAD SSS:	2.584	gr/cm ³
DENSIDAD APARENTE:	2.71	gr/cm ³
ABSORCION:	2.86%	

PESO ESPECIFICO AGREGADO GRUESO

NORMA DE ENSAYO: ASTM C-127

DATOS:		
PESO EN EL AIRE:	3560.00	gr
PESO SUMERGIDO:	2190.00	gr
PESO SECO:	3505.00	gr
DENSIDAD MASIVA:	2.56	gr/cm ³
DENSIDAD SSS:	2.599	gr/cm ³
DENSIDAD APARENTE:	2.67	gr/cm ³
ABSORCION:	1.57%	

Ing. Ovidio W. Castillo





ESTSUELCON CIA. LTDA.

ESTUDIOS DE SUELOS, LABORATORIO, CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORIA

Tele-fax: 2540594. Celular: 093883061-099692335 Email: estsuelcon@gmail.com

PESO ESPECIFICO DE AGREGADOS

PROYEC:	TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL		
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA		
LOCALZ.:	CATAMAYO	MUESTRA :	ARENA TRIT. Y 3/4"
FECHA:	DICIEMBRE-2016		

MUESTRA: Agregado triturado Arena triturada y 3/4"

PESO ESPECIFICO AGREGADO ARENA

NORMA DE ENSAYO: ASTM C-128

DATOS:		
PESO PICNOMETRO MAS AGUA:	1298.66	gr
PESO PICNOMETRO:	476.65	gr
VOLUMEN PICNOMETRO:	822.01	cc
PESO TOTAL:	1602.31	gr
PESO SUELO SECO:	481.88	gr
DENSIDAD MASIVA:	2.454	gr/cm3
DENSIDAD SSS:	2.546	gr/cm3
DENSIDAD APARENTE:	2.704	gr/cm3
ABSORCION:	3.76%	

PESO ESPECIFICO AGREGADO 3/4"

NORMA DE ENSAYO: ASTM C-127

DATOS:		
PESO EN EL AIRE:	3905.00	gr
PESO SUMERGIDO:	2405.00	gr
PESO SECO:	3850.00	gr
DENSIDAD MASIVA:	2.567	gr/cm3
DENSIDAD SSS:	2.603	gr/cm3
DENSIDAD APARENTE:	2.664	gr/cm3
ABSORCION:	1.43%	



ANEXO B



ESTSUELCON CIA. LTDA.

ESTUDIOS DE SUELOS, LABORATORIO, CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORIA
Telo-fax: 2540594. Celular: 093883061-095692335 Email: estsuelcon@gmail.com

MEZCLA FAJA 3/4" INSTITUTO DEL ASFALTO

PROYEC : TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL

OBRA : MEZCLA ASFÁLTICA

LOCALZ.: CATAMAYO

FECHA : DICIEMBRE-2016

MUESTRA # 1: 3/4"

MUESTRA # 2: 1/2"

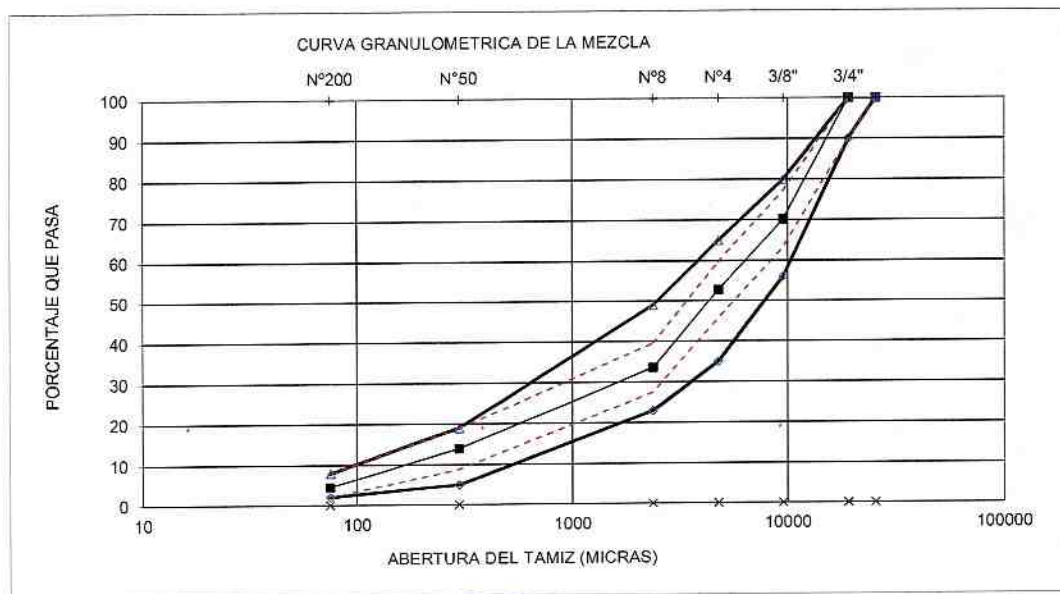
MUESTRA # 3: ARENA TRIT.

MUESTRA # 4: ARENA LAV.

MUESTRA # 5: FILLER

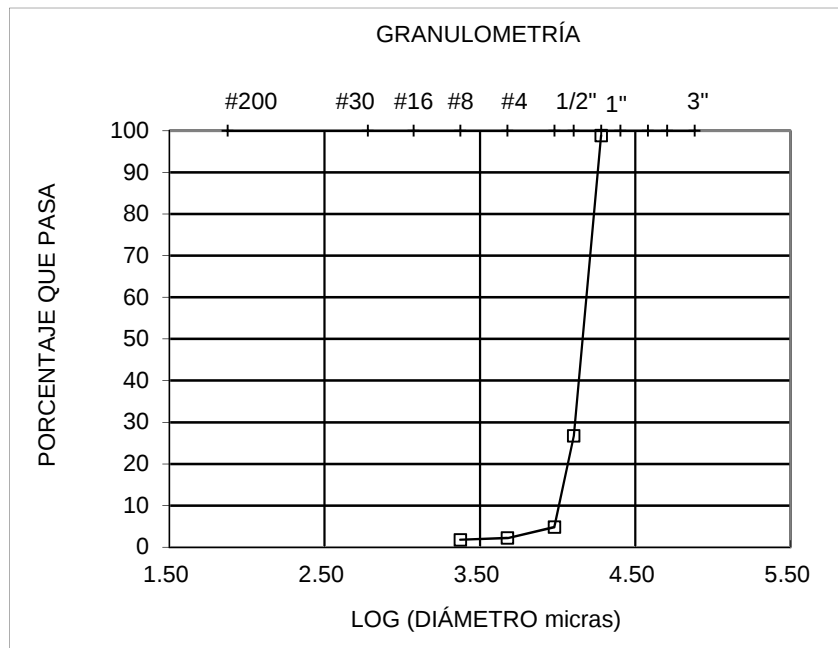
TAMIZ	MUESTRAS % PASA					NORMA MOP		MEZCLA	MEZCLA
N°	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 5	MINIMO	MAXIMO	% PASA	% R.A.
1"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00
3/4"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	90.00	100.00	100.00	0.00
3/8"	4.81	64.72	99.38	99.93	100.00	56.00	80.00	70.14	29.86
N°4	2.25	41.54	63.43	79.94	100.00	35.00	65.00	52.67	47.33
N°8	1.79	1.17	41.54	61.40	99.91	23.00	49.00	33.54	66.46
N°50	1.67	0.99	16.69	13.79	94.01	5.00	19.00	13.89	86.11
N°200	1.25	0.61	5.96	2.37	37.21	2.00	8.00	4.55	95.45

MUESTRA N° 1 % = 22
MUESTRA N° 2 % = 25
MUESTRA N° 3 % = 12
MUESTRA N° 4 % = 34
MUESTRA N° 5 % = 7



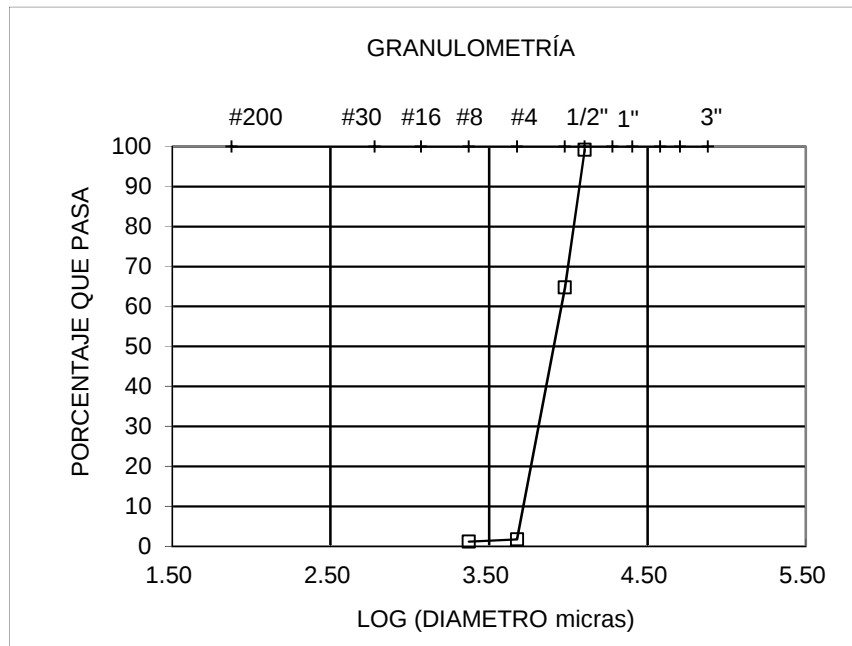
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

PROY. : TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL						
OBRA : MEZCLA ASFÁLTICA						
UBIC. : CATAMAYO			MUESTRA: 3/4"			
FECHA : DICIEMBRE-2016			OPERADOR E.B.R. PROFUND. : STOKC			
MATERIAL: 3/4"			LIMITE LIQUIDO: 0.00			
PESO IN.: 3,485.00			LIMITE PLASTICO 0.00			
MALLA No.	MASA RET. PARCIAL	MASA RET. ACUMULADA	% RET.	% PASA	% PASA CORREG.	% RET. AC
3	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/4	41.04	41.04	1.18	98.82	98.82	1.18
1/2	2,512.77	2,553.81	73.28	26.72	26.72	73.28
3/8	763.72	3,317.53	95.19	4.81	4.81	95.19
# 4	89.14	3,406.67	97.75	2.25	2.25	97.75
PASA # 4	78.33	78.33	2.25			
SUMAN	3,485	3,485	100.00			
PESO HUM=	78.3	w% =	0.00	P. SECO=	78	
# 8	15.81	15.81	20.18	79.82	1.79	98.21
# 16	1.53	17.34	22.14	77.86	1.75	98.25
# 30	1.03	18.37	23.45	76.55	1.72	98.28
# 50	1.60	19.97	25.49	74.51	1.67	98.33
# 100	3.95	23.92	30.54	69.46	1.56	98.44
# 200	10.91	34.83	44.47	55.53	1.25	98.75
PASA #200	43.50	43.50	55.53			
SUMAN	78.33	78.33	100.00			



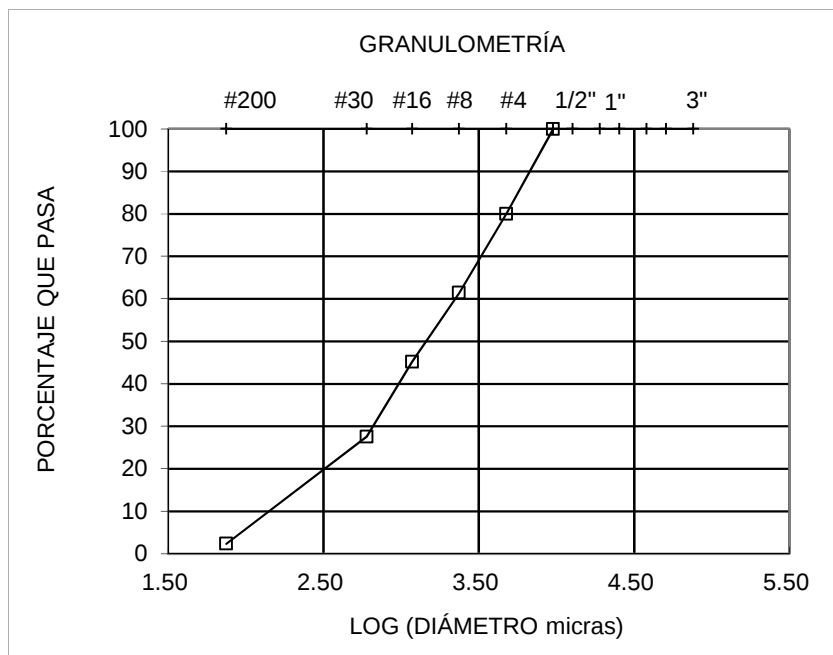
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

PROY. : TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL						
OBRA : MEZCLA ASFÁLTICA						
UBIC. : CATAMAYO			MUESTRA: 1/2"			
FECHA : DICIEMBRE-2016			OPERADOR E.B.R. PROFUND. STOKC			
MATERIAL: 1/2"			LIMITE LIQUIDO: 0.00			
PESO IN.: 6,095.00			LIMITE PLASTICO 0.00			
MALLA No.	MASA RET. PARCIAL	MASA RET. ACUMULADA	% RET.	% PASA	% PASA CORREG.	% RET. AC
3	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/4	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1/2	49.30	49.30	0.81	99.19	99.19	0.81
3/8	2,100.92	2,150.22	35.28	64.72	64.72	35.28
# 4	3,838.59	5,988.81	98.26	1.74	1.74	98.26
PASA # 4	106.19	106.19	1.74			
SUMAN	6,095	6,095	100.00			
PESO HUM=	106.2	w% =	0.00	P. SECO=	106	
# 8	34.63	34.63	32.61	67.39	1.17	98.83
# 16	6.11	40.74	38.37	61.63	1.07	98.93
# 30	2.39	43.13	40.62	59.38	1.03	98.97
# 50	2.57	45.70	43.04	56.96	0.99	99.01
# 100	8.08	53.78	50.65	49.35	0.86	99.14
# 200	15.49	69.27	65.23	34.77	0.61	99.39
PASA #200	36.92	36.92	34.77			
SUMAN	106.19	106.19	100.00			



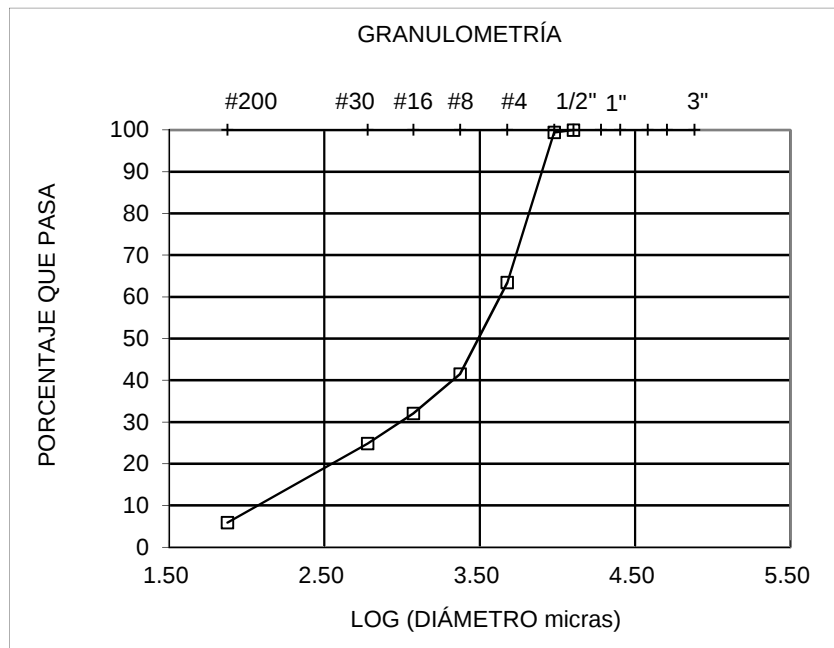
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

PROY. : TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL						
OBRA : MEZCLA ASFÁLTICA						
UBIC. : CATAMAYO			MUESTRA: ARENA LAVADA			
FECHA : DICIEMBRE-2016			OPERADOR E.B.R. PROFUND.: STOKC			
MATERIAL: ARENA			LÍMITE LÍQUIDO: 0.00			
PESO IN.: 4,075.00			LÍMITE PLÁSTICO 0.00			
MALLA No.	MASA RET. PARCIAL	MASA RET. ACUMULADA	% RET.	% PASA	% PASA CORREG.	% RET. AC
3	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/4	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/8	2.94	2.94	0.07	99.93	99.93	0.07
# 4	814.40	817.34	20.06	79.94	79.94	20.06
PASA # 4	3,257.66	3,257.66	79.94			
SUMAN	4,075	4,075	100.00			
PESO HUM=	3257.7	w% =	0.00	P. SECO=	3258	
# 8	755.45	755.45	23.19	76.81	61.40	38.60
# 16	661.33	1416.78	43.49	56.51	45.17	54.83
# 30	717.94	2134.72	65.53	34.47	27.56	72.44
# 50	561.13	2695.85	82.75	17.25	13.79	86.21
# 100	326.40	3022.25	92.77	7.23	5.78	94.22
# 200	138.85	3161.10	97.04	2.96	2.37	97.63
PASA #200	96.56	96.56	2.96			
SUMAN	3257.66	3257.66	100.00			



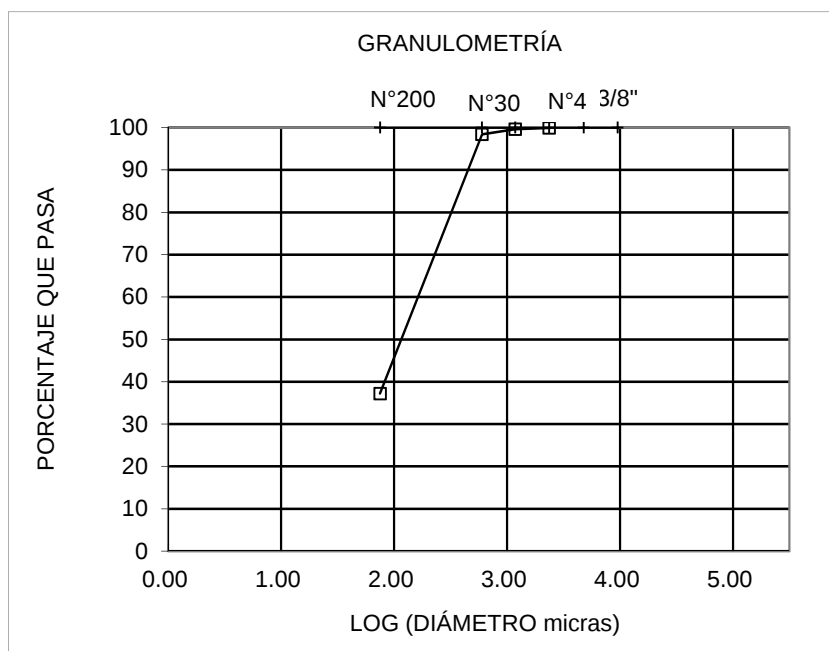
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

PROY. : TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL						
OBRA : MEZCLA ASFÁLTICA						
UBIC. : CATAMAYO			MUESTRA: ARENA TRITURADA			
FECHA : DICIEMBRE-2016			OPERADOR D.I.C. PROFUND.: STOKC			
MATERIAL: FINO TRITURADO			LÍMITE LÍQUIDO: 0.00			
PESO IN.: 4,930.00			LÍMITE PLÁSTICO 0.00			
MALLA NO.	MASA RET. PARCIAL	MASA RET. ACUMULADA	% RET.	% PASA	% PASA CORREG.	% RET. AC
3	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/4	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1/2	2.40	2.40	0.05	99.95	99.95	0.05
3/8	28.07	30.47	0.62	99.38	99.38	0.62
# 4	1,773.38	1,803.85	36.59	63.41	63.41	36.59
PASA # 4	3,126.15	3,126.15	63.41			
SUMAN	4,930	4,930	100.00			
PESO HUM=	3126.2	w% =	0.00	P. SECO=	3126	
# 8	1080.22	1080.22	34.55	65.45	41.50	58.50
# 16	466.61	1546.83	49.48	50.52	32.03	67.97
# 30	355.34	1902.17	60.85	39.15	24.83	75.17
# 50	403.82	2305.99	73.76	26.24	16.64	83.36
# 100	314.19	2620.18	83.81	16.19	10.26	89.74
# 200	214.72	2834.90	90.68	9.32	5.91	94.09
PASA #200	291.25	291.25	9.32			
SUMAN	3126.15	3126.15	100.00			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

PROY. : TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL						
OBRA : MEZCLA ASFÁLTICA						
UBIC. : CATAMAYO			MUESTRA: FILLER			
FECHA : DICIEMBRE-2016			OPERADOR D.I.C. PROFUND.:STOKC			
MATERIAL: FINO TRITURADO			LIMITE LIQUIDO: 0.00			
PESO IN.: 270.31			LIMITE PLASTICO 0.00			
MALLA No.	MASA RET. PARCIAL	MASA RET. ACUMULADA	% RET.	% PASA	% PASA CORREG.	% RET.AC
3	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/4	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/8	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
# 4	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
PASA # 4	270.31	270.31	100.00			
SUMAN	270	270	100.00			
PESO HUM=	270.3	w% =	0.00	P.SECO=	270	
# 8	0.24	0.24	0.09	99.91	99.91	0.09
# 16	0.84	1.08	0.40	99.60	99.60	0.40
# 30	3.21	4.29	1.59	98.41	98.41	1.59
# 50	11.91	16.20	5.99	94.01	94.01	5.99
# 100	38.85	55.05	20.37	79.63	79.63	20.37
# 200	114.69	169.74	62.79	37.21	37.21	62.79
PASA #200	100.57	100.57	37.21			
SUMAN	270.31	270.31	100.00			



ANEXO C



ALMON DEL ECUADOR S.A.

*cerca de tu empresa,
cerca del mundo*

CERTIFICATE OF ANALYSIS

MATERIAL: CARNAUBA WAX

LOTE NUMBER: 39

ESPECIFICACION: REFINED LIGHT FATTY GREY T-3 UN FLAKES

NETT WTS: 25 KGS

BATCH: 24315

MANUFACTURED DATE: 25/09/2015

VALIDITY DATE: 25/09/2020

POINTS	Standard	RESULTADOS
Moisture Content	0.50% 105 °C- 3H	0.40
Melting point	82.5-86°C American Wax	83.00 °C
Ash Content	0.20% max Astm D 482-87	0.13
Acid Value	6-12 Astm D 1386-59	9,13
Saponification Value	78-88 Astm D 1387-59	82,26
Ester Value	70-82 Astm D 1387-59	73,28

ANEXO D



LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES

Ing. Julio Hidalgo G

Campamento Km 26

Proyecto: **Asfaltos Modificados**

Origen: **U.T.P.L**

Ensayado por: **NAN**

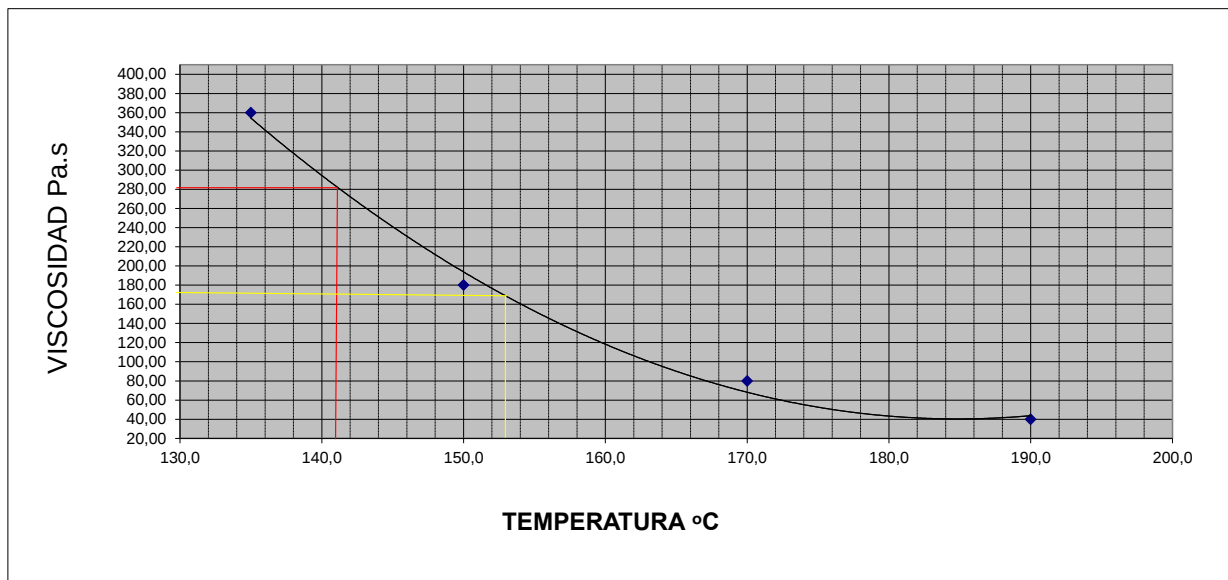
Fecha: **2017-02-25**

ASFALTO **SIN MODIFICAR**

GRÁFICO DE VISCOSIDAD vs TEMPERATURA

Temp. de mezclado: **153 °C**

Temp. De Compactación: **141 °C**





LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES

Ing. Julio Hidalgo G

Campamento Km 26

Proyecto: **Asfaltos Modificados**

Origen: **U.T.P.L**

Ensayado por: **NAN**

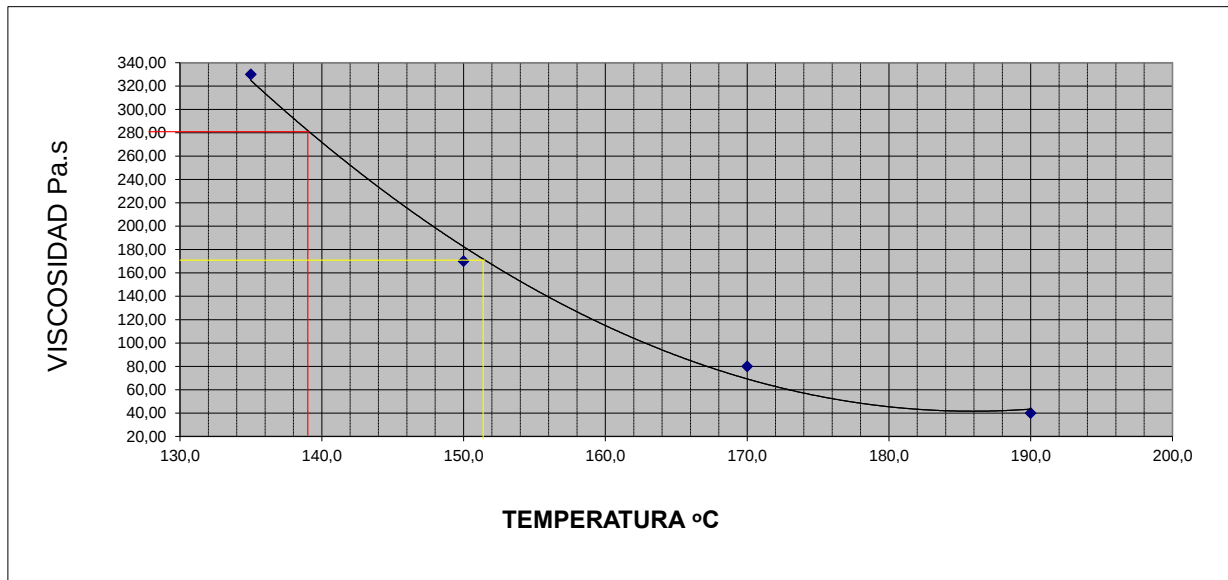
Fecha: **2017-02-25**

ASFALTO MODIFICADO C.O.C: 1 %

GRÁFICO DE VISCOSIDAD vs TEMPERATURA

Temp. de mezclado: **151,5 °C**

Temp. De Compactación: **139 °C**





LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES

Ing. Julio Hidalgo G

Campamento Km 26

Proyecto: **Asfaltos Modificados**

Origen: **U.T.P.L**

Ensayado por: **NAN**

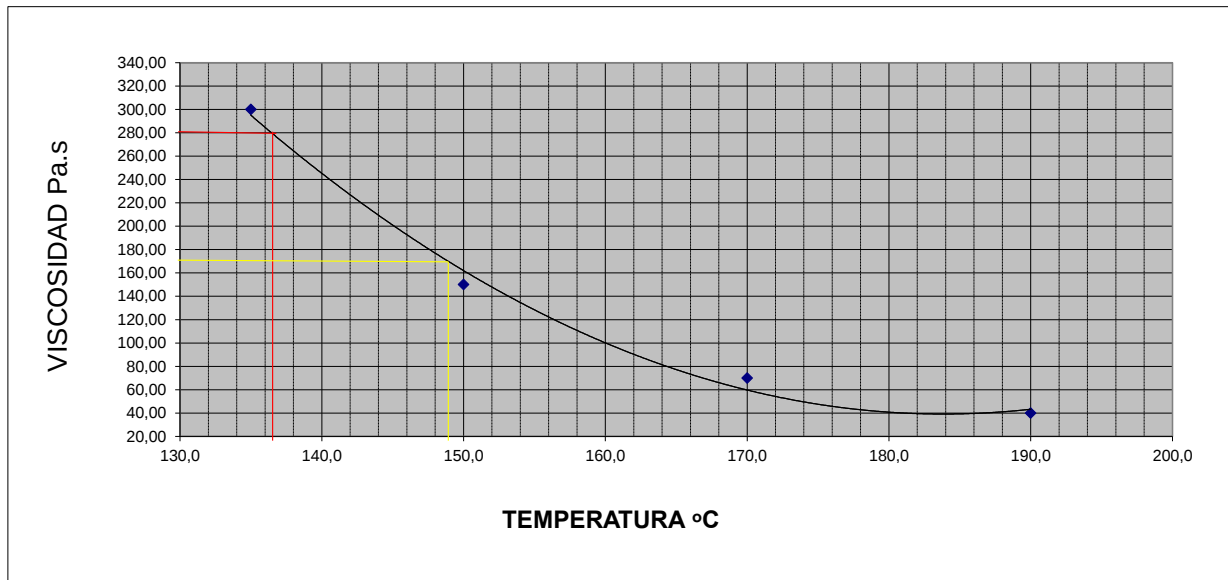
Fecha: **2017-02-25**

ASFALTO MODIFICADO **C.O.C: 3 %**

GRÁFICO DE VISCOSIDAD vs TEMPERATURA

Temp. de mezclado: **149 °C**

Temp. De Compactación: **136,4°C**





LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES

Ing. Julio Hidalgo G

Campamento Km 26

Proyecto: **Asfaltos Modificados**

Origen: **U.T.P.L**

Ensayado por: **NAN**

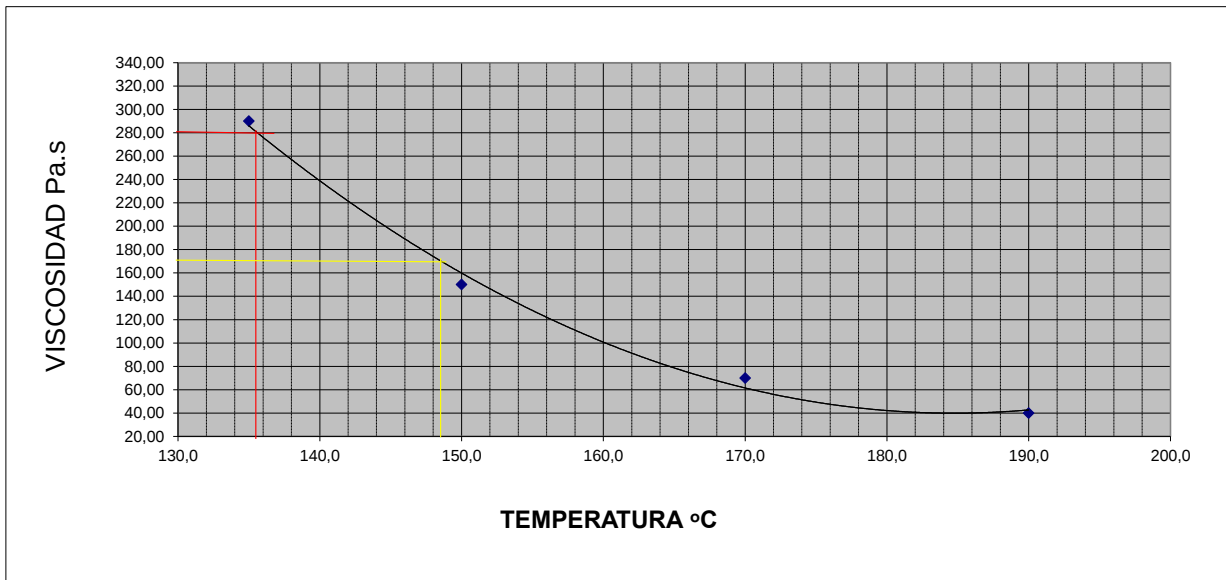
Fecha: **2017-02-25**

ASFALTO MODIFICADO C.O.C: 5 %

GRÁFICO DE VISCOSIDAD vs TEMPERATURA

Temp. de mezclado: **148.6 °C**

Temp. De Compactación: **135,8°C**



ANEXO E



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

LABORATORIO DE ASFALTOS

Fecha toma de muestra: 02 de junio de 2017

Fecha informe: 05 de junio de 2017

Norma: ASTM D2041

ENSAYO RICE

DATOS GENERALES

Proyecto: TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL
Ubicación: Ciudad de Loja
Tesisista: Ing. Robert Román Chamba
Tema: Mezclas Asfálticas Tibias
Solicitado por: Ing. Robert Román Chamba
Información:

No.	PESO DE LA MUESTRA (gr.)	PESO RECIPIENTE + AGUA + PLACA (25 °C) (gr.)	PESO RECIPIENTE + AGUA + PLACA + MUESTRA (25 °C) (gr.)	DENSIDAD RICE
1	1152.18	7597	8276	2.435
2	1145.16	7597	8275	2.451
3	1145.17	7597	8276	2.457

Observaciones: Ensayo realizado con muestra no compactada obtenida del laboratorio, mezclada a 130 °C y compactada a 110 °C.

MSc. Ana Ortiz Viñán
LABORATORIO ASFALTOS

MSc. Ángel Tapia Chávez
SUPERVISOR

**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA***La Universidad Católica de Loja***LABORATORIO DE ASFALTOS**

Fecha informe: 29 de mayo de 2017

Norma: **ASTM D2726****DENSIDAD BULK****DATOS GENERALES**

Proyecto: TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL
Ubicación: Ciudad de Loja
Constructor: Ing. Robert Román Chamba
Fiscalizador: Mezclas Asfálticas Tibias
Solicitado por: Ing. Robert Román Chamba
Información:

No.	RESULTADOS LABORATORIO					
	TEMPERATURA DE MEZCLA °C	ESPOSOR	PESO AIRE (gr)	PESO EN AGUA (gr)	PESO AIRE S.S.S.	DENSIDAD BULK MUESTRA
1	110	6.10	1102.99	635.14	1105.09	2347.04
2		6.10	1064.77	606.59	1070.2	2296.69
3		6.94	1260.86	723.05	1263.05	2334.93
4		5.90	1123.62	651.97	1124.2	2379.39
5		5.62	1033.27	593.3	1034.14	2343.87
6		5.72	1013.14	576.24	1018.81	2289.22
1	130	5.85	1102.88	639.8	1103.92	2376.28
2		6.10	1162.55	678	1163.1	2396.52
3		7.10	1354.64	785.25	1355.04	2377.44
4		6.20	1175.33	678.51	1175.59	2364.47
5		6.13	1180.11	686.05	1180.39	2387.24
6		5.87	1073.08	616.01	1074.59	2340.01
1	150	5.65	1077.71	628.9	1078.33	2397.95
2		6.43	1245.38	728.1	1245.73	2405.93
3		6.20	1201.16	702.8	1201.59	2408.15
4		6.13	1166.25	678.4	1166.48	2389.46
5		6.10	1164.31	680.21	1164.47	2404.31
6		6.00	1147	669.62	1147.14	2401.99

MSc. Ana Ortiz Viñán
RESPONSABLE

MSc. Ángel Tapia Chávez
SUPERVISOR

**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA***La Universidad Católica de Loja***LABORATORIO DE ASFALTOS**

Fecha toma de muestra: 04 de marzo de 2017

Fecha realización ensayo: 06 de marzo de 2017

ENSAYO ESTABILIDAD MARSHALL

Norma: ASTM D 4123 82

DATOS GENERALES

Proyecto: TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL
Ubicación: Ciudad de Loja
Tesis: Robert Román Chamba
Tema: Mezclas Asfálticas Tibias
Solicitado por: Robert Román Chamba
Información:

No.	MUESTRA		DENSIDAD ESPECÍFICA BULK				RESULTADOS ENSAYO MARSHALL			
	ESPESOR (cm)	VOLUMEN	PESO AIRE (gr)	PESO EN AGUA (gr)	PESO SSS (gr)	DENSIDAD BULK	ESTABILIDAD			FLUJO
							OBTENIDA	FACTOR CORRECCIÓN Norma ASTM D 1559	CORREGIDA	
1	6.1	469.95	1102.99	635.14	1105.09	2.348	1282	1.19	1525.96	16
2	6.1	463.61	1064.77	606.59	1070.2	2.297	1311	1.19	1560.47	14
3	6.94	540	1260.86	723.05	1263.05	2.335	1485	0.93	1381.04	13
4	5.9	472.23	1123.62	651.97	1124.2	2.38	1418	1.14	1615.97	13
5	5.62	440.84	1033.27	593.3	1034.14	2.344	1021	1.32	1347.12	14
6	5.72	442.57	1013.14	576.24	1018.81	2.29	972	1.32	1282.91	10
1	5.85	464.12	1102.88	639.8	1103.92	2.377	1802	1.19	2144.57	12
2	6.1	485.1	1162.55	678	1163.1	2.397	1860	1.09	2027.06	13
3	7.1	569.79	1354.64	785.25	1355.04	2.378	2395	0.86	2059.90	14
4	6.2	497.08	1175.33	678.51	1175.59	2.365	1745	1.04	1814.38	13
5	6.13	494.34	1180.11	686.05	1180.39	2.388	1841	1.09	2006.16	14
6	5.87	458.58	1073.08	616.01	1074.59	2.341	1533	1.19	1824.44	13
1	5.65	449.43	1077.71	628.9	1078.33	2.398	1533	1.25	1916.43	15
2	6.43	517.63	1245.38	728.1	1245.73	2.406	2281	1.00	2280.62	14
3	6.2	498.79	1201.16	702.8	1201.59	2.409	1975	1.04	2053.62	14
4	6.13	488.08	1166.25	678.4	1166.48	2.39	1745	1.09	1901.61	15
5	6.1	484.26	1164.31	680.21	1164.47	2.405	1841	1.09	2006.16	14
6	6	477.52	1147	669.62	1147.14	2.402	1725	1.14	1966.96	14

Observaciones: Muestras fabricadas y ensayadas en el Laboratorio de asfaltos de la UTPL, se realizaron tres juegos de briquetas a 110, 130 y 150 °C respectivamente.

Ing. Ana Ortiz Viñán
LABORATORIO ASFALTOS

MSc. Angel Tapia Ch.
SUPERVISIÓN