

**ESTUDIO DE PROCESOS DE FABRICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
TIBIAS CON BASE EN AGREGADO HÚMEDO**

**GEISY GUERRERO VALLEJO
JESÚS RAMÓN PÉREZ GARCÍA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

**ESTUDIO DE PROCESOS DE FABRICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
TIBIAS CON BASE EN AGREGADO HÚMEDO**

**GEISY GUERRERO VALLEJO
JESÚS RAMÓN PÉREZ GARCÍA**

**Trabajo de Grado
Para optar al título de
Ingeniero Civil**

**DIRECTOR
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN
INGENIERO CIVIL, M.Sc., Ph D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

A Dios que es quien nos regala la vida y la fortaleza necesaria para enfrentar cada día.

A nuestras familias que son nuestro motor y fortaleza en momentos difíciles.

Por ellos y para ellos serán todos nuestros triunfos y éxitos porque de una u otra forma han contribuido para poder alcanzarlos por eso los hacemos merecedores de los nuestros metas.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, por su guía y colaboración en la elaboración de este proyecto.

A Viviana Marcela Pérez, por toda su dedicación y contribución en el transcurso de este proyecto.

A los laboratoristas Jairo Hernández y Germán por su colaboración en el préstamo de los implementos del laboratorio, en especial a Jairo por su ayuda en la elaboración y corte de la placas.

A Esgamo Ltda. y Asfaltar S.A. por proporcionarnos todo el material utilizado en el proyecto.

A nuestras familias y amigos por todo su apoyo físico y emocional.

RESUMEN

TITULO

ESTUDIO DE PROCESOS DE FABRICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS CON BASE EN AGREGADO HÚMEDO¹

AUTORES

GEISY GUERRERO VALLEJO
JESUS RAMON PEREZ GARCIA²

PALABRAS CLAVES

Mezcla Asfáltica Tibia, Fino Húmedo, Asfalto, Espumado, Módulo Dinámico, Esfuerzo

DESCRIPCIÓN

El objetivo principal de este proyecto es determinar un proceso de fabricación de Mezclas Asfálticas Tibia con Base en Agregado Húmedo, con el fin de disminuir el impacto ambiental que causan las emisiones de gases en la construcción de estructuras de pavimento con Mezclas Asfálticas Calientes y a un menor costo que utilizando los aditivos comerciales.

En investigaciones anteriores se trabajaron este tipo de mezclas con aditivos húmedos para lograr espumar el ligante asfáltico, lo cual es necesario para la obtención de la Mezcla Asfáltica Tibia, en este trabajo se pretende comprobar que lo importante para lograr el espumado es la humedad mas que el aditivo mismo, por eso se utilizarán varios porcentajes de humedad de porción fina del agregado para obtener un espumado que logre recubrir de manera aceptable todas las partículas del material pétreo.

Estas diferentes humedades fueron utilizadas en mezclas a pequeña escala con el fin de determinar el procedimiento que se seguiría para la elaboración de la capa de rodadura en una estructura de pavimento, luego se procede a realizar pruebas comparando las diferentes características de la mezcla tibia desarrollada con las de una mezcla caliente común, finalmente los resultados serán analizados para observar el comportamiento de esta nueva mezcla.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de ingenierías físico-mecánicas, escuela de ingeniería civil, director del proyecto Ing. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

ABSTRACT

TITLE

STUDY OF THE PROCESS OF MAKING A WARM ASPHALT MIX BASED ON WET AGGREGATE³

AUTHORS

GEISY GUERRERO VALLEJO
JESUS RAMON PEREZ GARCIA⁴

KEY WORDS

Warm Asphalt Mix, Wet Fine, Asphalt, Foamed, Dynamic Module, Strain

DESCRIPTION:

The main objective of this project is to determinate a process of manufacturing a Warm Asphalt Mix based on wet aggregate, in order to reduce the environmental impact that cause the gas emissions in the construction of a pavement structure with a Hot Asphalt Mix and with a lower cost that using the commercial additives.

Previous researches has worked this type of mix with wet additives to achieve the foamed asphalt binder, which is the key to elaborate the Warm Asphalt Mix, in this work we'll try to verify that is more important the humidity than the additive itself, to achieve the foamed, so we'll using a several variety of percent if humidity in the fine aggregate in order to obtain an acceptable foamed that cover all the particles of the stone material in the mix.

This variety of humidities will be used in little mixes to determinate the procedure to be follow in the construction of the surface layer in a pavement structure, then we'll perform some tests comparing the different characteristics of the Warm Asphalt Mix developed with the same characteristics of a common Hot Asphalt Mix, finally the results will be analyze to observe the behavior of this new mix.

³ Trabajo de Grado

⁴ Facultad de ingenierías físico-mecánicas, escuela de ingeniería civil, director del proyecto Ing. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

TABLA CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. MEZCLAS ÁSFALTICAS.....	20
1.1. PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN	20
1.2. PROPIEDADES GENERALES	21
1.3. TIPOS DE MEZCLAS ASFALTICAS.....	22
1.3.1. Mezclas Frías	22
1.3.2. Mezclas Caliente	23
1.3.3. Mezcla Tibia.....	23
2. MEZCLAS ASFALTICAS TIBIAS	24
2.1. BENEFICIOS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA	24
2.1.1. Consumo de Energía	25
2.1.2. Viscosidad	25
2.1.3. Ambientales	25
2.2. TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE VISCOSIDAD	26
2.2.1. Aditivos Orgánicos.....	26
2.2.2. Tecnologías con Bases Acuosas.....	27
2.2.3. Aditivos Químicos	27
2.2.4. Asfaltos Espumados	27
2.3. PROPIEDADES DEL ESPUMADO.....	27
2.3.1. Viscosidad del asfalto	28
2.3.2. Temperatura	28
2.3.3. Presión.....	28

2.3.4. Cantidad de agua	28
3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	29
3.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	29
3.1.1. Material Pétreo	29
3.1.2. Ligante Asfáltico	31
3.2. PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE LA MEZCLA ASFALTICA TIBIA 32	
3.2.1. Generación del Espumado	32
3.2.2. Obtención de la Mezcla	32
4. DETERMINACIÓN DEL PROCEDIMIENTO	33
4.1. OBETENCIÓN DEL ESPUMADO.....	33
4.1.1. Primera Etapa: Espumado con la totalidad del pasa No. 200 al 3% de humedad.....	33
4.1.2. Segunda Etapa: Espumado con la totalidad del pasa No. 40 al 3% de humedad.....	34
4.1.3. Tercera Etapa: Espumado con el 25% del pasa No. 40 y varias humedades	36
4.2. REALIZACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	38
4.2.1. Primera Etapa: Mezcla con la totalidad del pasa No. 200 al 3% de humedad.....	38
4.2.2. Segunda Etapa: Mezcla con la totalidad del pasa No. 40 al 3% de humedad.....	39
4.2.3. Tercera Etapa: Mezclas con el 25% del pasa No. 40 y varias humedades 40	
4.3. PROCEDIMIENTO SELECCIONADO	41
5. ELABORACION DE VIGAS.....	42

5.1. CONSTRUCCION DE LAS PLACAS	42
5.1.1. Placa con Mezcla Asfáltica Caliente	43
5.1.2. Placa con Mezcla Asfáltica Tibia	46
5.2. CORTE DE LAS PLACAS.....	48
6. COMPARACION DE MEZCLA ASFALTICA TIBIA Y MEZCLA ASFALTICA CALIENTE	52
6.1. PRUEBAS REALIZADAS.....	52
6.1.1. Gravedad Específica Bulk.....	52
6.1.2. Densidad Máxima Teórica (Gmm)	54
6.1.3. Porcentaje de Vacíos.....	56
6.1.4. Módulo Dinámico	56
6.1.5. Resistencia a la Tracción.....	58
6.2. RESULTADOS Y ANALISIS	60
6.2.1. Gravedad Específica Bulk, Densidad Máxima Teórica y Porcentaje de Vacíos	60
6.2.2. Módulo Dinámico	61
6.2.3. Resistencia a la Tracción.....	63
CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA.....	67
ANEXOS.....	68

LISTA TABLAS

Tabla 1. Propiedades de las Mezclas Asfálticas	21
Tabla 2. Franjas Granulométricas para Mezclas Asfálticas	30
Tabla 3. Granulometría Original.....	30
Tabla 4. Granulometría Seleccionada.....	31
Tabla 5. Cantidad de Agua para Cada Humedad	36
Tabla 6. Relación de Expansión y Vida Media.....	37
Tabla 7. Granulometría Para Mezcla Asfáltica Caliente.....	43
Tabla 8. Granulometría Para Mezcla Asfáltica Tibia	46
Tabla 9. Gravedad Bulk MAC	53
Tabla 10. Gravedad Bulk MAT	54
Tabla 11. Gmm Mezcla Caliente.....	55
Tabla 12. Gmm Mezcla Tibia	55
Tabla 13. Resumen Mezcla Caliente	60
Tabla 14. Resumen Mezcla Tibia.....	60
Tabla 15. Módulos Dinámicos Mezcla Caliente	61
Tabla 16. Módulos Dinámicos Mezcla Tibia.....	61
Tabla 17. Esfuerzos y Deformaciones Mezcla Caliente.....	63
Tabla 18. Esfuerzos y Deformaciones Mezcla Tibia	63

LISTA FIGURAS

Figura 1. Comparación Mezclas Asfálticas	22
Figura 2. Reducción de Emisiones	26
Figura 3. Pasa No. 200 Humedecido	33
Figura 4. Ligante Asfáltico a 110°C.....	33
Figura 5. Asfalto Espumado.....	34
Figura 6. Recipiente al Vaciar el Ligante	34
Figura 7. Pasa No. 40 Húmedo.....	35
Figura 8. Ligante Calentándose.....	35
Figura 9. Ligante Espumado	35
Figura 10. Espumado con 3% de Humedad	36
Figura 11. Espumado con 5% de humedad.....	36
Figura 12. Espumado con 8% de humedad.....	37
Figura 13. Espumado con 9% de humedad.....	37
Figura 14. Agregado Calentándose Figura 15. Espumado Vertido	38
Figura 16. Mezcla con la Totalidad del pasa No. 200 al 3% de Humedad.....	39
Figura 17. Agregado Calentándose	39
Figura 18. Mezcla con la Totalidad el Pasa No. 40 al 3% de Humedad	39
Figura 19. Mezcla con 3% humedad Figura 20. Mezcla con 5% humedad	40
Figura 21. Mezcla con 8% humedad Figura 22. Mezcla con 9% humedad	40
Figura 23. Ligante Asfáltico Calentándose	44
Figura 24. Ligante Asfáltico Vertiéndose	44
Figura 25. Materiales Listos Para Mezclarse	45
Figura 26. Placa Compactada.....	45
Figura 27. Pasa No. 40 Humedecido	47
Figura 28. Ligante Asfáltico Espumado	47
Figura 29. Materiales Listos para Mezclar	47

Figura 30. Placas con Mezcla Asfáltica Tibia y Caliente	48
Figura 31. Equipo de Corte de Vigas	48
Figura 32. Primer Corte a la Mitad de la Placa	49
Figura 33. Inicio de Cortes Cada	49
Figura 34. Vigas con 5 cm de Base	50
Figura 35. Corte Superior e Inferior de las Vigas	50
Figura 36. Vigas Terminadas	50
Figura 37. Masa Sumergida.....	53
Figura 38. Masa Seca y Masa Superficie Saturada Seca.....	53
Figura 39. Muestra Mezcla Asfáltica Tibia	55
Figura 40. Muestra Mezcla Asfáltica Caliente	55
Figura 41. Montaje Bomba Vacío.....	55
Figura 42. Montaje Esfuerzo de Tracción	58
Figura 43. Diagrama de Fuerzas Internas	59
Figura 44. Comparación de Módulos Dinámicos	62
Figura 45. Comparación de Ángulos de Desfase.....	62

LISTA ANEXOS

ANEXO A. PRUEBAS REALIZADAS AL LIGANTE ASFÁLTICO	68
ANEXO B. PRUEBAS REALIZADAS A LAS VIGAS.....	69

INTRODUCCIÓN

Una de las necesidades más importantes en la sociedad es transportarse de un lugar a otro y poder hacerlo de forma cómoda y segura, con bajos costos de operación, con estructuras económicas, durables y amigables con el medio ambiente, todos estos son los desafíos a los cuales se debe enfrentar la ingeniería actualmente.

En la construcción de pavimentos suelen ser utilizadas las Mezclas Asfálticas Calientes, aunque este procedimiento requiere una alta temperatura para su elaboración, lo que hace que se liberen grandes cantidades de gases que contribuyen al efecto invernadero, provocando un gran impacto ambiental. La comunidad internacional ha hecho grandes esfuerzos para controlar y reducir este tipo de emisiones al ambiente, un ejemplo claro es el protocolo de Kioto, firmado por más de 187 estados en el 2008 comprometiéndose a reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero.

La ingeniería ha contribuido mucho en este campo con diversas investigaciones para mitigar los efectos que provocan las mezclas calientes sobre el ambiente, y se han desarrollado una gran cantidad de aditivos que reducen las temperaturas a las cuales se puede mezclar el ligante asfáltico, lo cual indirectamente reduce la cantidad de gases emitidos al ambiente, este tipo de mezclas se conocen como Mezclas Asfálticas Tibias, aunque estos aditivos son costosos y en muchos proyectos no es posible su utilización debido al impacto que generan sobre el presupuesto.

Con este proyecto se realizarán una serie de pruebas para determinar el procedimiento apropiado para obtener una Mezcla Asfáltica Tibia utilizando solo agregado fino húmedo, lo cual reduciría los costos de construcción de la estructura de pavimento, pero aun seguiría manejándose una menor temperatura lo que

reduciría tanto la emisión de gases tóxicos al ambiente como la cantidad de combustible utilizado.

Para comenzar se plantearon mezclas a pequeña escala utilizando diferentes procedimientos con el fin de determinar los pasos más eficientes a seguir para la elaboración de una Mezcla Asfáltica Tibia, luego se procede a realizar una prueba comparativa, tratando de determinar si la mezcla desarrollada puede llegar a ser tan eficiente como una mezcla caliente convencional.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un procedimiento de fabricación de mezcla asfáltica tibia que pueda ser usada en la construcción de estructuras de pavimento sin la utilización de aditivos, mediante la implementación de agregados húmedos al asfalto con el propósito de lograr su espumado, y de este modo disminuir costos y emisiones de gases.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Encontrar la humedad requerida para que el asfalto logre su espumado.
- Determinar el procedimiento para desarrollar una mezcla asfáltica tibia utilizando agregados húmedos.
- Comparar la calidad de la MAT desarrollada con la de una MAC utilizada comúnmente.

1. MEZCLAS ÁSFALTICAS

Las mezclas asfálticas son un conglomerado de diversos materiales, tales como agregados pétreos y ligante asfáltico, que se mezclan a una temperatura determinada para formar una masa compacta con propiedades específicas y varias aplicaciones, como la construcción de estructuras de pavimentos. La eficiencia de una mezcla asfáltica depende de la calidad de los materiales utilizados, principalmente del ligante asfáltico y de la porción fina del agregado pétreo, debido a que estos dos son los encargados de recubrir y unir las partículas más grandes del agregado pétreo.

1.1. PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN

Para fabricar una mezcla asfáltica se determina la gradación del material pétreo correspondiente al tipo de mezcla que se desea realizar, luego este se debe calentar a la temperatura correspondiente para realizar la mezcla, comúnmente se utilizan entre los 100°C y 180°C. Del mismo modo se calienta el ligante asfáltico hasta la temperatura deseada para la mezcla y se vierte sobre el agregado, en este punto ambos componentes deben estar a temperaturas que garanticen una viscosidad adecuada del ligante asfáltico y un correcto mezclado. Luego de esto la mezcla asfáltica debe compactarse para garantizar la correcta adherencia de todas las partículas del material pétreo y evitar la desintegración superficial. La cantidad de ligante utilizado puede variar entre un 3% y 6% del peso del material pétreo.

1.2. PROPIEDADES GENERALES

Las propiedades principales que una mezcla asfáltica debe tener son:

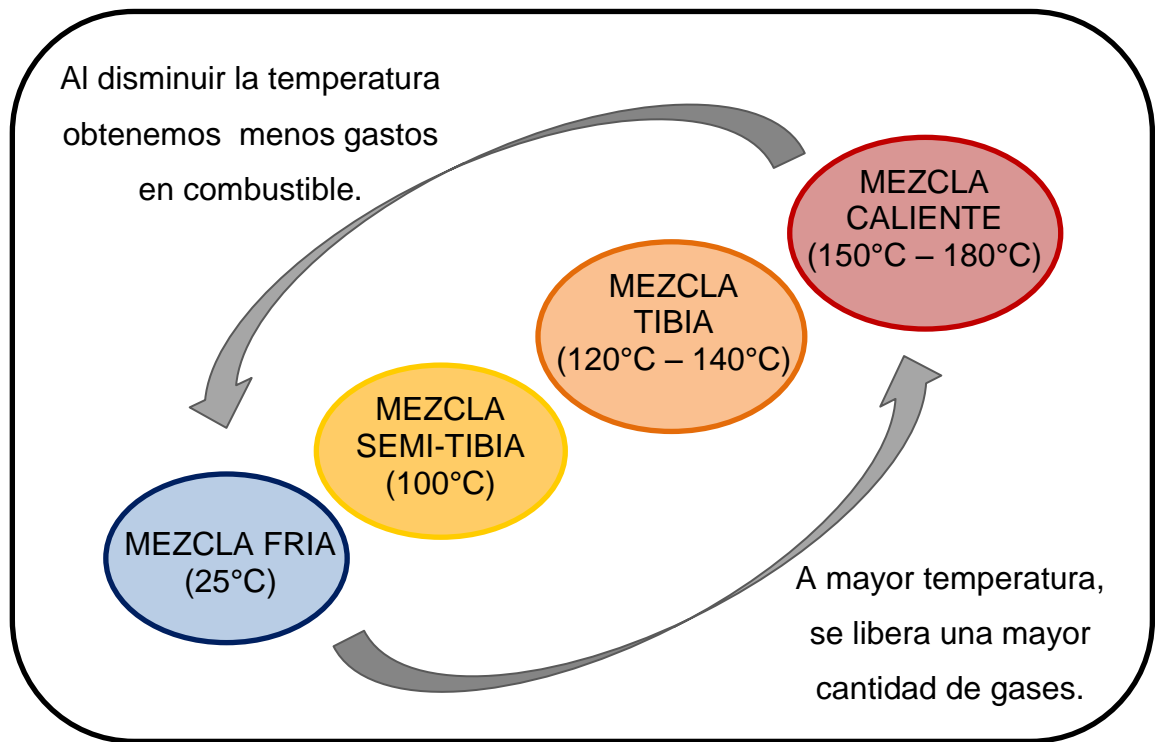
Tabla 1. Propiedades de las Mezclas Asfálticas

PROPIEDADES	
Durabilidad	Consiste en el tiempo en que la estructura de pavimento puede prestar el servicio de manera adecuada, sin sufrir daños graves a causa de efectos ambientales o tráfico de vehículos.
Seguridad	Un pavimento debe conformarse por una mezcla asfáltica con una cantidad adecuada tanto de ligante como de material pétreo, para garantizar la correcta adherencia de las ruedas al mismo.
Resistencia al desgaste	Una mezcla asfáltica que se desgaste rápidamente y de forma irregular, causa que las ruedas de los vehículos no puedan permanecer en su trayectoria.
Trabajabilidad	Las mezclas asfálticas deben ser lo suficientemente fluidas para que puedan ser colocadas en el sitio necesario, pero sin sobrecalentarse estropeando las propiedades del ligante.
Medio Ambiente	Una estructura de pavimento debe construirse de forma que produzca el menor impacto posible sobre el ambiente, respecto a emisiones a la atmosfera y la posibilidad de reciclar sus materiales

1.3. TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas se pueden clasificar de varias formas, la más común de ellas es de acuerdo a la temperatura con la se mezclan, estas se clasifican en Mezclas Frías, Mezclas Calientes y Mezclas Tibias. En la siguiente imagen se comparan algunas de las características cada tipo de mezcla:

Figura 1. Comparación Mezclas Asfálticas



1.3.1. Mezclas Frías

Son aquellas que se mezclan a temperatura ambiente utilizando emulsiones asfálticas o asfaltos espumados, son principalmente utilizadas en la construcción de estructuras de pavimento para vías de segundo orden. Este tipo de mezcla es bastante útil debido a que no requiere calentamiento del agregado ni del ligante, además permite su fabricación en plantas que normalmente producen mezclas en caliente sin necesidad de modificar la planta. Estas mezclas están reglamentadas en el Artículo 440 de la norma INVIAS.

1.3.2. Mezclas Caliente

Este es el tipo de mezcla más común, consiste en el calentamiento del material pétreo y el ligante asfáltico a una temperatura entre 150°C y 180°C, esto produce que el ligante baje lo suficiente su viscosidad para ser mezclado con el agregado, pero al mismo tiempo debe ser lo suficientemente rígido para soportar las posteriores cargas a las que será sometido.

El correcto calentamiento del agregado es de vital importancia para el éxito de la mezcla, si el agregado se calienta demasiado el ligante se endurecerá rápidamente durante el mezclado, si por el contrario el agregado no se calienta lo suficiente se formaran grumos y no será posible realizar la mezcla. Las disposiciones para estas mezclas se encuentran en el Artículo 450 de la norma INVIAS.

1.3.3. Mezcla Tibia

Las mezclas tibias son intermedias entre las frías y calientes, debido a que se logran a una temperatura entre 100°C y 120°C, son bastante aceptables en cuanto al proceso de mezclado se trata y son mas amigables con el medio ambiente, pues al no requerir una alta temperatura de calentamiento, el consumo de combustible es bastante bajo, además las emanaciones al ambiente son significativamente menores a las que se producen al calentar una mezcla caliente.

2. MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS

Como se mencionó anteriormente las mezclas asfálticas con menor temperatura pueden llegar a ser tan eficientes como las calientes y al mismo tiempo reducir los costos de producción y las emisiones ambientales. Es claro que lo mas importante en la construcción de una estructura de pavimento es que sea resistente, durable, manejable y que no tenga un gran impacto sobre el medio ambiente, por esa razón las Mezclas Asfálticas Tibias (MAT) fueron objeto de discusión en el tratado que la Comunidad Económica Europea realizo con Kioto en 1997, como parte de una solución a los gases de efecto invernadero.

El protocolo de Kioto es un acuerdo de orden mundial que se firmo en Kioto, Japón en 1997 con el único propósito de disminuir un 5% las emisiones de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO_2), gas metano (CH_4) y el oxido nitroso (N_2O) entre otros. Esta reducción no implica que cada país deba reducir sus emisiones este porcentaje, pues es una reducción a nivel global, de este modo las reducciones serán proporcionales a las emisiones generadas por cada uno en el momento de firmar el acuerdo. (Elena, 2006)

Por otra parte una mezcla asfáltica tibia reducirá la gravedad de las heridas, que puedan llegar a sufrir los operarios durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica, también disminuirá la cantidad de gases tóxicos que estos tendrán que inhalar.

2.1. BENEFICIOS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA

Como se mencionaba anteriormente, las Mezclas Asfálticas Tibias presentan algunos beneficios con respecto a las Mezclas Asfálticas Calientes, algunos son:

2.1.1. Consumo de Energía

Es uno de los mayores beneficios, debido a que una Mezcla Asfáltica Tibia llega a consumir hasta un 30% menos de energía, esto genera directamente una reducción de los costos de elaboración de la mezcla, pero este ahorro en el consumo energético podría compensarse con el gasto en la posible utilización de aditivos. Por otro lado es correcto pensar, que una planta de asfalto que opere con temperaturas bajas, tendrá un menor desgaste en sus equipos, comparado con el desgaste en una planta que produzca Mezcla Asfáltica Caliente.

2.1.2. Viscosidad

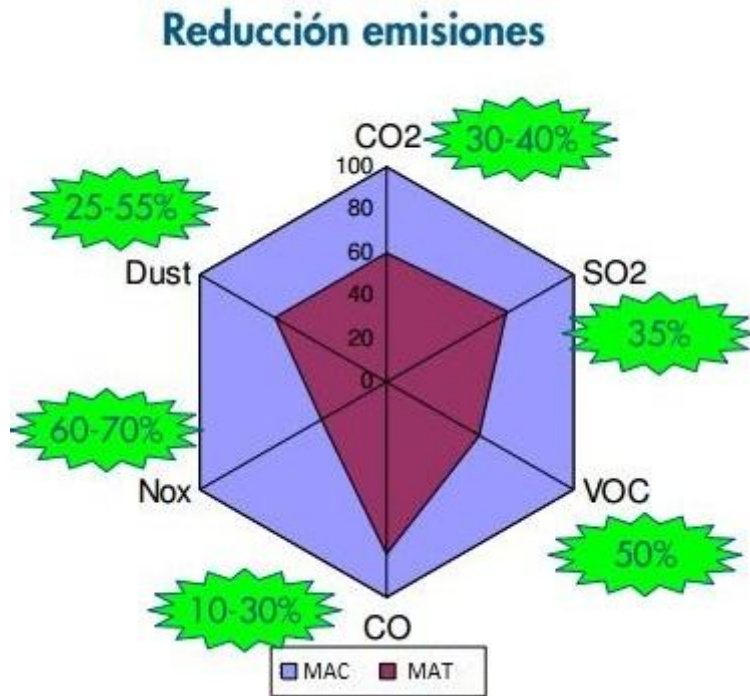
Este beneficio es muy importante debido a que en una Mezcla Asfáltica Tibia es posible mantener el ligante con una baja viscosidad por un mayor tiempo que con una Mezcla Asfáltica Caliente, esto permite que se pueda realizar un mezclado más uniforme y una mejor compactación.

2.1.3. Ambientales

La reducción en las emisiones de gases nocivos para la atmosfera y para la salud junto con la reducción de olores, es el efecto más evidente en el proceso de elaboración de una Mezcla Asfáltica Tibia, pues como el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de EE.UU. dice en su estudio, los gases emitidos en el proceso de elaboración de una Mezcla Asfáltica producen varios efectos adversos en la salud, entre los cuales se encuentran la irritación de la conjuntiva ocular y del tracto respiratorio.

La proporción de reducción en las emisiones de las Mezclas Asfálticas Tibias respecto a las Mezclas Asfálticas Calientes, es apreciable en la Figura 2, los diferentes gases emitidos como el Dióxido de Carbono (CO₂), Dióxido de Azufre (SO₂), Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC), Monóxido de Carbono (CO), Oxido de Nitrógeno (Nox) y partículas de polvo se reducen significativamente utilizando una Mezcla Asfáltica Tibia.

Figura 2. Reducción de Emisiones



Fuente: (POROT, 2008)

2.2. TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE VISCOSIDAD

Es claro que para lograr una buena mezcla asfáltica es necesario reducir la viscosidad del ligante asfáltico, para obtener esto existen varias técnicas que se pueden implementar, estas técnicas son: (ULLOA, 2011)

- Aditivos Orgánicos
- Tecnologías con bases acuosas
- Aditivos químicos
- Asfaltos espumados

2.2.1. Aditivos Orgánicos

Con el objeto de reducir la viscosidad del ligante se puede conseguir un proceso de mezclado más fácil, estos aditivos suelen ser ceras adicionadas al asfalto en su proceso de calentamiento.

2.2.2. Tecnologías con Bases Acuosa

Esta técnica consiste en la aplicación de agua y aire a presión al ligante caliente dentro de un tambor, para generar una explosión en el ligante haciéndolo menos viscoso y que se adhiera con mayor facilidad al material pétreo.

2.2.3. Aditivos Químicos

Los aditivos químicos al igual que las demás técnicas producen una reducción de la temperatura mediante la emulsificación del ligante asfáltico utilizando un emulsionante mezclado con agua e inyectado a presión dentro del asfalto caliente.

2.2.4. Asfaltos Espumados

Los Asfaltos espumados se obtienen mediante la introducción de agua al ligante en su fase de calentamiento, el agua puede adicionarse directamente a presión o de forma sutil dentro del agregado. El asfalto en forma de espuma es posible debido a que el agua introducida se evapora rápidamente, pero no es liberada al ambiente sino que se encapsula en burbujas, a causa de la tensión superficial del ligante.

Este es el principio que se aprovechará en este proyecto para desarrollar una metodología que pueda producir una Mezcla Asfáltica Tibia sin la necesidad de un aditivo especial, simplemente humedeciendo parte de la porción fina del agregado.

2.3. PROPIEDADES DEL ESPUMADO

Existen dos propiedades empíricas que caracterizan el asfalto espumado, estas se denominan vida media y razón de expansión, la vida media consiste en el tiempo que tarda la mezcla asfáltica en reducir su volumen espumado a la mitad, este tiempo indicará cuanto se puede tardar en el proceso de mezclado el material pétreo con el ligante espumado antes de este pierda su expansión. Por otra parte la razón de expansión consiste en la razón entre el volumen del asfalto espumado

y el volumen del asfalto en su estado original, esto indica la trabajabilidad del ligante, es decir, la facilidad con la que podrá mezclarse. (THENOUX, 2002)

Estas dos propiedades dependen de varios factores presentes en la elaboración de una mezcla asfáltica como:

2.3.1. Viscosidad del asfalto

Algunos estudios consideran que esta propiedad no tiene relación alguna con la variación de la razón de expansión ni con la vida media, es decir, un asfalto viscoso (60-70) se comportaría de forma similar a un asfalto menos viscoso (80-100) en el momento en que se introduzca agua mientras se esta calentado.

2.3.2. Temperatura

Asfaltos con mayores temperaturas presentan una mayor razón de expansión al momento de agregarles agua, ya se a presión o junto con el material pétreo.

2.3.3. Presión

Presiones de inyección de agua bajas (menos a 3 bares) producen una reducción tanto en la vida media como en la razón de expansión. (THENOUX, 2002)

2.3.4. Cantidad de agua

Al inyectar una cantidad considerable de agua al asfalto mientras se calienta, es posible obtener una razón de expansión grande, pero esta expansión no se podrá mantener por un largo tiempo, caso contrario con una dosis de agua menor este tiempo podría extenderse un poco mas sacrificando un poco el volumen que aumenta.

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El estudio que se hará para la determinación del procedimiento de elaboración de una Mezcla Asfáltica Tibia con Base en Agregado Húmedo, será de tipo experimental, haciendo cambios en las diferentes variables que se involucran al elaborar una Mezcla Asfáltica y utilizando ensayos de laboratorio.

Para determinar si una Mezcla Asfáltica Tibia con Base en Agregado Húmedo puede llegar a ser usada en una situación real, es necesario realizar un análisis comparativo con respecto a una Mezcla Asfáltica Caliente Convencional, esta comparación se efectuará fallando vigas elaboradas con ambas metodologías y confrontando sus resistencias.

3.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Los materiales que intervienen en el proceso de elaboración de una Mezcla Asfáltica Tibia son el Agregado Pétreo y el Ligante Asfáltico, los cuales se deben someter a ciertas pruebas antes de ser utilizados.

3.1.1. Material Pétreo

El material pétreo fue suministrado por ESGAMO Ltda. Ingenieros Constructores y es proveniente del Rio Sogamoso, este material debe ser clasificado de acuerdo al tamaño de las partículas mediante tamizado, este procedimiento se denomina granulometría.

La granulometría que se tomó como base para la elaboración de las mezclas en este proyecto será la de una Mezcla Densa en Caliente 2 (MDC-2) como lo indica el Instituto Nacional de Vías, en el Artículo 450-07 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.

Tabla 2. Franjas Granulométricas para Mezclas Asfálticas

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm / U.S. Standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
		1½"	1"	¾"	½"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No.80	No.200
		% PASA									
Densa	MDC-1		100	80 - 95	67 - 85	60 - 77	43 - 59	29 - 45	14 - 25	8 - 17	4 - 8
	MDC-2			100	80 - 95	70 - 88	49 - 65	29 - 45	14 - 25	8 - 17	4 - 8
	MDC-3					100	65 - 87	43 - 61	16 - 29	9 - 19	5 - 10
Semidensa	MSC-1		100	80 - 95	65 - 80	55 - 70	40 - 55	24 - 38	9 - 20	6 - 12	3 - 7
	MSC-2			100	80 - 95	65 - 80	40 - 55	24 - 38	9 - 20	6 - 12	3 - 7
Gruesa	MGC-0	100	75 - 95	65 - 85	47 - 67	40 - 60	28 - 46	17 - 32	7 - 17	4 - 11	2 - 6
	MGC-1		100	75 - 95	55 - 75	40 - 60	28 - 46	17 - 32	7 - 17	4 - 11	2 - 6
Alto módulo	MAM		100	80 - 95	65 - 80	55 - 70	40 - 55	24 - 38	10 - 20	8 - 14	6 - 9

Fuente: (INVIAS, 2007)

El material pétreo para los ensayos fue sometido a una granulometría para determinar si era posible su implementación sin necesidad de alterar la distribución de tamaños contenidos. Los resultados obtenidos en esta granulometría fueron:

Tabla 3. Granulometría Original

Tamiz	Peso Retenido [gr]	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	% Pasa (MDC-2)
¾"	0	0	0	100	100
½"	234	7,83	8	92,17	80-95
3/8"	374	12,52	20	79,65	70-88
No. 4	602	20,15	40	59,50	49-65
No. 10	554	18,54	59	40,96	29-45
No. 40	758	25,37	84	15,60	14-25
No. 80	290	9,71	94	5,89	8-17
No. 200	98	3,28	97	2,61	4-8
Pasa No. 200	78	2,61	100	0	0
Total	2988				

Como se puede observar el material carece de la cantidad de finos necesaria para cumplir con la granulometría de una Mezcla Densa en Caliente 2, por lo que será necesario separar el material en los diferentes tamaños y recombinarlo para obtener la granulometría necesaria.

Para seleccionar una granulometría específica se tomó un aproximado del promedio entre los rangos establecidos por el Instituto Nacional de Vías y se calculó el porcentaje de material retenido en cada tamiz para agilizar el proceso de recombinación del material, la granulometría seccionada es:

Tabla 4. Granulometría Seleccionada

Tamiz	% Pasa (MDC-2)	Selección % Pasa	% Retenido Acumulado	% Retenido
3/4"	100	100	0	0
1/2"	80-95	87,5	12,5	12,5
3/8"	70-88	76	24	11,5
No. 4	49-65	57	43	19
No. 10	29-45	27	73	30
No. 40	14-25	19,5	80,5	7,5
No. 80	8-17	12,5	87,5	7
No. 200	4-8	6	94	6,5
Pasa No. 200	0	0	100	6

3.1.2. Ligante Asfáltico

El ligante asfáltico seleccionado es de penetración 60-70 y fue suministrado por ASFALTART S.A. se escogió el ligante mas rígido, pues se considera que si es posible realizar una Mezcla Asfáltica Tibia para el ligante mas rígido, también será posible para el mas blando (penetración 80-100).

Las diferentes pruebas a las que debe ser sometido el ligante asfáltico fueron hechas por parte de ASFALTART S.A. y se encuentran en el Anexo A.1.

3.2. PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE LA MEZCLA ASFALTICA TIBIA

El proceso que se siguió para lograr la Mezcla Asfáltica Tibia se dividió en dos etapas, la generación de un espumado adecuado y el mezclado de este con el material pétreo.

Para estos dos procesos se utilizó una mezcla conformada por 300 gr de material granular y 5,3% de ligante asfáltico (15,9 gr), para hacer una representación a pequeña escala de lo que se realizará en la construcción de una estructura de pavimento real.

3.2.1. Generación del Espumado

Para lograr el espumado adecuado se agregó diferentes cantidades de agua, correspondientes a las humedades escogidas, a una fracción de los finos contenidos en el material pétreo, para posteriormente agregárselo al asfalto que previamente fue calentado a 110°C, esto provoca la reacción que genera el espumado en el ligante asfáltico. Cada uno de estos espumados fue caracterizado determinando su Razón de Expansión y Vida Media, para su posterior comparación y selección.

3.2.2. Obtención de la Mezcla

Cada uno de los espumados logrados fue mezclado con el agregado pétreo para observar la capacidad que tiene de recubrir el agregado y el resultado final de cada mezcla, es decir, después de enfriarse se fractura el bloque, para observar la forma en que el material más grueso se adhirió al fino junto con el ligante.

4. DETERMINACIÓN DEL PROCEDIMIENTO

4.1. OBTENCIÓN DEL ESPUMADO

Lo primero que se realizó antes de comenzar a lograr el espumado, fue separar la porción fina del resto del material pétreo para humedecerla y mezclarla con el ligante asfáltico.

4.1.1. Primera Etapa: Espumado con la totalidad del pasa No. 200 al 3% de humedad

En este ensayo se utilizó la totalidad del pasa No. 200 (18 gr) y se humedeció con 0,5 ml de agua para obtener el 3% de humedad y así proceder a espumar el ligante asfáltico.

Figura 3. Pasa No. 200 Humedecido



Figura 4. Ligante Asfáltico a 110°C

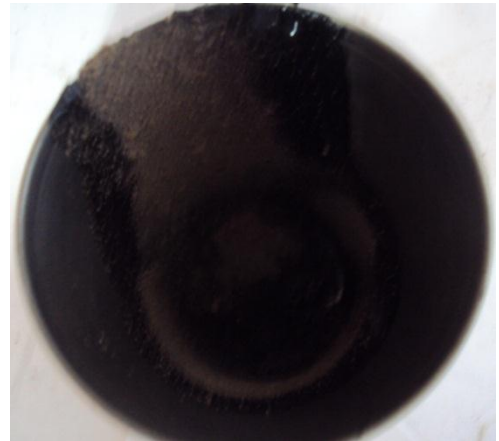


Como se puede observar en la Figura 3 el pasa No. 200 humedecido forma algunos grumos debido a que el material es demasiado fino.

Figura 5. Asfalto Espumado



Figura 6. Recipiente al Vaciar el Ligante



Como se puede ver aun con una pequeña cantidad de agua el ligante asfáltico sufre un gran incremento en su volumen, pero al ser tan fino el material húmedo agregado se adhiere a las paredes del recipiente, algo que impedirá el correcto mezclado de la totalidad del material.

4.1.2. Segunda Etapa: Espumado con la totalidad del pasa No. 40 al 3% de humedad

Dado que el espumado obtenido al humedecer el pasa No. 200 no fue totalmente satisfactorio, se utilizó el material que pasa el tamiz No. 40 para aumentar el tamaño del material agregado y así evitar que se adhiriera a las paredes del recipiente. Se utilizó 58,5 gr de material que pasó el tamiz No. 40 y se humedeció con 1,9 ml de agua, y se procedió a realizar el espumado.

Figura 7. Pasa No. 40 Húmedo



Figura 8. Ligante Calentándose



Como se observa al utilizar una cantidad de fino con mayores tamaños no se forman los mismos grumos que se forman al utilizar sólo el Pasa No. 200.

Figura 9. Ligante Espumado



Se aprecia que la cantidad de material humedecido era muy grande, tanto que no fue posible mezclarlo en su totalidad con el ligante asfáltico, del mismo modo que la mezcla anterior esto no es conveniente para el correcto mezclado.

4.1.3. Tercera Etapa: Espumado con el 25% del pasa No. 40 y varias humedades

Para solucionar lo ocurrido en la mezcla anterior se decidió tomar solo el 25% del material que pasa el tamiz No. 40, es decir 14,6 gr y humedecerlo con un amplio rango de cantidades de agua que se muestran a continuación:

Tabla 5. Cantidad de Agua para Cada Humedad

% Humedad	Cant. Agua [ml]
3	0,4
4	0,6
5	0,7
6	0,9
7	1,0
8	1,2
9	1,3

De este modo algunos de los espumados realizados se pueden apreciar aquí:

Figura 10. Espumado con 3% de Humedad

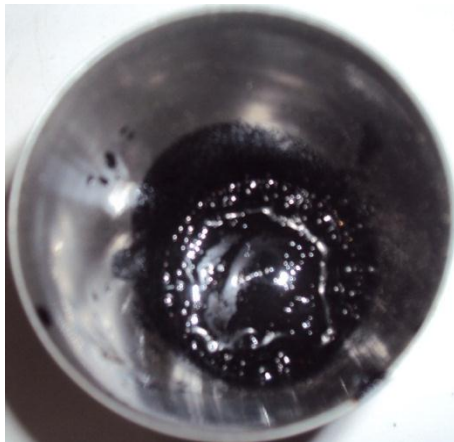


Figura 11. Espumado con 5% de humedad



Figura 12. Espumado con 8% de humedad



Figura 13. Espumado con 9% de humedad



Ahora se presentan los valores para la Relación de Expansión y Vida Media de cada una de las humedades utilizadas.

Tabla 6. Relación de Expansión y Vida Media

Humedad	Relación Expansión	Vida Media [s]
3%	2,50	48
4%	3,00	45
5%	3,33	42
6%	3,75	41
7%	4,17	39
8%	4,67	37
9%	4,83	30

Al observar el comportamiento de estas dos características, es posible reafirmar que con una mayor humedad se obtiene una mayor relación de expansión pero la vida media decrece de forma rápida. Para efectos del proceso que se desea obtener se utilizará una humedad de 8%, pues tiene una relación de expansión un 10% mayor al valor anterior, pero el crecimiento de este valor con 9% de humedad es solo un 3%, lo cual indica que al agregar mas agua la relación de expansión no seguirá creciendo proporcionalmente.

Por otra parte la vida media para 8% de humedad decreció solo un 5% con respecto al anterior, pero disminuyó un 19% al siguiente valor considerado, por esta razón se concluye que la disminución seguirá aumentando si se adiciona más agua, entonces esta humedad será la seleccionada para realizar las siguientes pruebas.

4.2. REALIZACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Ahora con la porción del material pétreo que no fue humedecida, se calentó en la estufa hasta llegar a 110°C, para proceder a mezclarla con el ligante asfáltico espumado en cada uno de los casos ya presentados.

4.2.1. Primera Etapa: Mezcla con la totalidad del pasa No. 200 al 3% de humedad

Luego de realizar el espumado con la totalidad del pasa No. 200 al 3% de humedad, se procedió a verterlo sobre el agregado previamente calentado y mezclarlo hasta obtener el mejor recubrimiento posible.

Figura 14. Agregado Calentándose



Figura 15. Espumado Vertido



Figura 16. Mezcla con la Totalidad del pasa No. 200 al 3% de Humedad



En esta mezcla el agregado no fue cubierto en su totalidad por el ligante asfáltico espumado, pues al no tener un espumado muy bueno, no fue posible realizar un mezclado por mucho tiempo causando un mal recubrimiento de las partículas.

4.2.2. Segunda Etapa: Mezcla con la totalidad del pasa No. 40 al 3% de humedad

La segunda mezcla se realizó vertiendo el ligante asfáltico espumado con la totalidad del pasa No. 40 al 3% de humedad

Figura 17. Agregado Calentándose



Figura 18. Mezcla con la Totalidad el Pasa No. 40 al 3% de Humedad



Esta mezcla no recubrió totalmente el material pétreo, debido a que la cantidad de finos era mayor que la del ligante asfáltico y fue posible realizar una mezcla homogénea entre todos los componentes.

4.2.3. Tercera Etapa: Mezclas con el 25% del pasa No. 40 y varias humedades

Los espumados planteados con las diferentes humedades fueron vertidos sobre material pétreo y se observó la capacidad de cada uno de recubrir el agregado.

Figura 19. Mezcla con 3% humedad



Figura 20. Mezcla con 5% humedad



Figura 21. Mezcla con 8% humedad



Figura 22. Mezcla con 9% humedad



Se aprecia que la cobertura del material granular aumenta en la medida que se incrementa la humedad del fino que se adiciona al ligante asfáltico, pero al mismo

tiempo es necesario contar con un buen tiempo para realizar el mezclado adecuadamente, en este aspecto la mezcla con la humedad de 8% fue la que cumplió los requisitos.

4.3. PROCEDIMIENTO SELECCIONADO

Al observar los resultados obtenidos con las diferentes pruebas realizadas tanto al espumado del ligante asfáltico, como a la mezcla producida con este, es posible establecer un procedimiento para realizar una mezcla tibia con base en agregado húmedo, a continuación se listan los pasos a seguir:

- Cuantificar las cantidades de ligante asfáltico y material pétreo que se deben utilizar para obtener la cantidad de mezcla asfáltica que se desea.
- Separar el 25% del material pétreo que pasa el tamiz No. 40 para agregarle agua hasta obtener el 8% de humedad.
- Calentar el ligante asfáltico y el resto del material pétreo hasta llegar a una temperatura de 110°C.
- Adicionar el fino húmedo al ligante asfáltico cuando este haya alcanzado una temperatura de 110°C y revolverlo para que el fino húmedo se incorpore totalmente.
- Verter el ligante asfáltico espumado sobre el material pétreo previamente calentado a 110°C y mezclar hasta que todo el material este completamente recubierto por el ligante asfáltico.

5. ELABORACION DE VIGAS

Para comparar la eficacia de la Mezcla Asfáltica Tibia con Base en Agregado Húmedo respecto a una Mezcla Asfáltica Caliente convencional se elaborarán vigas con estas mezclas para comparar sus propiedades y así poder determinar si es posible aplicar este nuevo tipo de mezcla asfáltica en la construcción de estructuras de pavimento.

La forma más práctica de realizar vigas con mezcla asfáltica es realizar una placa con dimensiones considerablemente mayores a las requeridas para el número de vigas a utilizar y proceder a cortarla hasta tener las dimensiones apropiadas para las vigas.

5.1. CONSTRUCCION DE LAS PLACAS

La construcción de cada una de las placas se realizó con aproximadamente 100 kg de mezcla asfáltica, un molde en madera con dimensiones 60x60 cm de base y una altura de 10 cm, recubierto por un marco metálico para evitar la ruptura del molde durante la elaboración y compactada utilizando un equipo de compactación tipo saltarín y siguiendo el siguiente proceso:

- Para el caso de la MAT, fue necesario separar el 25% del material pétreo que paso por el tamiz No. 40 para posteriormente humedecerlo.
- El material pétreo se introdujo al horno (el material restante para el caso de la MAT y la totalidad del material pétreo para el caso de la MAC) durante 16 horas a una temperatura un poco superior a la temperatura requerida para cada tipo de mezcla.
- Se calentó el Ligante asfáltico hasta alcanzar la temperatura requerida para cada tipo de mezcla.

- Se llevo el material pétreo desde los hornos hasta el lugar donde se realizó la mezcla y se colocó sobre una estufa para evitar la disminución de la temperatura mientras se realizaba la mezcla
- Al mismo tiempo se colocó el molde en el lugar de compactación y en el fondo de este una fina capa de material arenoso (procedente del mismo tipo de material), para evitar la adherencia de la placa con el suelo.
- Para el caso de la MAT se adiciona el material humedecido al ligante asfáltico para realizar el espumado y luego verterlo sobre el resto del material pétreo.
- Se vertió el ligante asfáltico sobre el material pétreo y se mezcló hasta que todo el material pétreo estuviese recubierto.
- Una vez obtenida la mezcla homogénea se controló la temperatura para comprobar que la mezcla estuviese 20°C por encima de la temperatura de compactación requerida para cada tipo de mezcla (110°C para la MAT y 150°C para la MAC), y se procede a verter la mezcla en el molde.
- Después de que toda la mezcla estuviese en el molde se procede a compactarla, lo mas homogénea posible, hasta que la placa tenga la misma altura del molde.

5.1.1. Placa con Mezcla Asfáltica Caliente

Como se utilizó una Mezcla con 5,3% de ligante Asfáltico y la placa consume 100 kg de mezcla asfáltica, es necesario utilizar 5,3 kg de ligante asfáltico de penetración 60-70 y 94,7 kg de material pétreo que cumpla con la granulometría de una Mezcla Densa en Caliente II, así:

Tabla 7. Granulometría Para Mezcla Asfáltica Caliente

Peso Material Pétreo [kg]	94,7
Peso Ligante Asfáltico [kg]	5,3
Peso Mezcla Asfáltica [kg]	100

Tamiz	% Pasa	% Retenido	Peso Retenido [kg]
3/4"	100	0	0
1/2"	87,5	12,5	11,8
3/8"	76,0	11,5	10,9
No. 4	57,0	19,0	18,0
No. 10	27,0	30,0	28,4
No. 40	19,5	7,5	7,1
No. 80	12,5	7,0	6,6
No. 200	6,0	6,5	6,2
Pasa 200	0	6,0	5,7
		Σ	94,7

Figura 23. Ligante Asfáltico Calentándose



Figura 24. Ligante Asfáltico Vertiéndose



Figura 25. Materiales Listos Para Mezclarse



Figura 26. Placa Compactada



5.1.2. Placa con Mezcla Asfáltica Tibia

De la misma manera que en la mezcla asfáltica caliente se utilizó 5,3% de ligante asfáltico, de este modo fue necesario otros 5,3 kg de este y 94,7 kg de material pétreo que del mismo modo cumple con la granulometría de una Mezcla Densa en Caliente II, separando el 25% del material que pasó el tamiz No. 40 para lograr el espumado con este, las cantidades utilizadas fueron:

Tabla 8. Granulometría Para Mezcla Asfáltica Tibia

Peso Material Pétreo [kg]	94,7
Peso Ligante Asfáltico [kg]	5,3
Peso Mezcla Asfáltica [kg]	100

Tamiz	% Pasa	% Retenido	Peso Retenido [kg]
3/4"	100	0	0
1/2"	87,5	12,5	11,8
3/8"	76,0	11,5	10,9
No. 4	57,0	19,0	18,0
No. 10	27,0	30,0	28,4
No. 40	19,5	7,5	7,1
No. 80	12,5	7,0	5,0
No. 200	6,0	6,5	4,6
Pasa 200	0	6,0	4,3
Material para humedecer [kg]			4,62
Σ			94,7

Cantidad de agua para humedecer [ml] 369,33

Figura 27. Pasa No. 40 Humedecido



Figura 28. Ligante Asfáltico Espumado



Figura 29. Materiales Listos para Mezclar



Figura 30. Placas con Mezcla Asfáltica Tibia y Caliente



5.2. CORTE DE LAS PLACAS

Se procedió a cortar las placas utilizando un equipo de corte. Las vigas se cortaron con una sección de 5 cm de base, 6 cm de altura y con una longitud de 40 cm.

Figura 31. Equipo de Corte de Vigas



Se realizó un primer corte por la mitad de las placas para facilitar la manipulación de las partes restantes. Luego cada parte resultante se cortó en los extremos para tener una longitud total de 40 cm y así proceder a realizar cortes longitudinales separados 5 cm. Finalmente las partes superior e inferior de las vigas terminaron siendo cortadas teniendo cuidado de marcar la parte inferior para posteriormente probar las vigas en ese sentido.

Figura 32. Primer Corte a la Mitad de la Placa



Figura 33. Inicio de Cortes Cada 5 cm



Figura 34. Vigas con 5 cm de Base



Figura 35. Corte Superior e Inferior de las Vigas



Figura 36. Vigas Terminadas



Es importante marcar con cuidado cual es la parte inferior de la placa debido a que en esta zona se depositan la mayor parte de los finos del material pétreo y es la forma en la que realmente se distribuye un pavimento en campo, de este modo, las vigas deben ser probadas así, para representar un pavimento real.

6. COMPARACION DE MEZCLA ASFALTICA TIBIA Y MEZCLA ASFALTICA CALIENTE

Para comparar estos dos tipos de mezclas es necesario hallar algunas de sus propiedades, en primera instancia se determinaron las densidades de cada una de las vigas realizadas, el Porcentaje de Vacíos de Aire, Densidad Máxima Teórica (Gmm), el Módulo Dinámico y el esfuerzo de tracción en el centro de la viga. Teniendo en cuenta todos estos aspectos se procede a evaluar el desempeño de cada una de las mezclas para determinar cual de ellas presenta un mejor comportamiento.

6.1. PRUEBAS REALIZADAS

6.1.1. Gravedad Específica Bulk

El ensayo de Gravedad Específica Bulk fue realizado siguiendo los parámetros establecidos por la norma, “Gravedad específica asfáltica compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficie seca” (INV-733-07).

Este procedimiento requiere encontrar la masa de la muestra seca, sumergida en agua y superficie saturada seca (S.S.S.), la temperatura del agua fue de 25°C para evitar hacer correcciones por temperatura, de este modo es posible determinar la Gravedad Especifica Bulk así:

$$\text{Gravedad Específica Bulk} = \frac{\text{Masa seca}}{\text{Masa}_{S.S.S.} - \text{Masa}_{sum}}$$

Figura 37. Masa Sumergida



Figura 38. Masa Seca y Masa Superficie Saturada Seca



A manera de ejemplo se muestra los datos obtenidos para las primeras vigas de la mezcla en caliente y la mezcla tibia desarrollada:

Tabla 9. Gravedad Bulk MAC

VIGA C-2	
m seca [gr]	2959,6
m sumergida [gr]	1719,8
m S.S.S. [gr]	2961,1
Gravedad Especifica bulk	2,384

Tabla 10. Gravedad Bulk MAT

VIGA T-1	
m seca [gr]	2935
m sumergida [gr]	1696
m S.S.S. [gr]	2936,4

Gravedad Específica bulk	2,366
---------------------------------	--------------

Los datos de las masas utilizados para calcular las gravedades específicas bulk, para todas las vigas utilizadas en los diferentes ensayos se encuentran en el Anexo B.1. para la mezcla caliente y en el Anexo B.2. para la mezcla tibia

6.1.2. Densidad Máxima Teórica (Gmm)

Para determinar el Gmm se sigue el procedimiento de la norma “Gravedad Especifica Máxima Teórica (Gmm) y Densidad de Mezclas Asfálticas para Pavimentos” (INVE-735-07), con una leve variación en el montaje para generar el vacío, debido a que se contaba con un recipiente metálico destinado para generar el vacío dentro de él, pero las masas tomadas y los cálculos se realizan como se especifica en la norma.

Fue necesario separar una muestra de la mezcla realizada para cada una de las placas y calentarla en el horno para que estuviese suelto el material, tomar la masa del recipiente metálico lleno con agua y del recipiente con la muestra, agua y sin vacíos dentro de la muestra.

Figura 39. Muestra Mezcla Asfáltica

Tibia



Figura 40. Muestra Mezcla Asfáltica

Caliente



Figura 41. Montaje Bomba Vacío



Ahora las convenciones utilizadas para cada una de las masas tomadas son:

A: Masa de la muestra seca.

D: Masa del Recipiente lleno con agua.

E: Masa del recipiente lleno con agua y la muestra sin los vacíos.

De este modo los resultados obtenidos para cada una de las mezclas realizadas son:

Tabla 11. Gmm Mezcla Caliente

A [gr]	1500
D [gr]	8165
E [gr]	9066

Gmm 2,504

Tabla 12. Gmm Mezcla Tibia

A [gr]	1500
D [gr]	8165
E [gr]	9058

Gmm 2,471

6.1.3. Porcentaje de Vacíos

Este cálculo se realizó teniendo en cuenta la fórmula para V_a de la norma “Porcentaje de Vacíos de aire en Mezclas Asfálticas Compactadas Densas y Abiertas” (INVE-736-07).

$$V_a = 100 \left(1 - \frac{G_B}{G_{mm}} \right)$$

Donde: G_B : Gravedad Específica Bulk y G_{mm} : Densidad Máxima Teórica.

De este modo a manera de ejemplo se presentan los valores de Porcentaje de Vacíos Obtenidos en las primeras vigas de cada tipo de mezcla.

$$\%Vacios\ MAC = 100 \left(1 - \frac{2,384}{2,504} \right) = 4,788 \%$$

$$\%Vacios\ MAT = 100 \left(1 - \frac{2,366}{2,471} \right) = 4,249 \%$$

Los valores de porcentaje de vacíos llenos de aire para las vigas se encuentran en el Anexo B.1. para la mezcla caliente y en el Anexo B.2. para la mezcla tibia

6.1.4. Módulo Dinámico

Es un número complejo utilizado para caracterizar la relación entre esfuerzo y deformación en las mezclas asfálticas y tiene en cuenta la naturaleza visco-elástica del asfalto.

Para determinar este módulo se utilizó la Máquina de Ensayos Universales Servo-Hidráulicos fabricada por MTS, controlando la deformación en la viga con el LVDT de la máquina y aplicando una carga de compresión sinusoidal. Las deformaciones máximas permitidas fueron 0,05 mm y se realizaron tres ensayos

con cuatro frecuencias diferentes, 1 Hz, 3 Hz, 5 Hz y 10 Hz, a una temperatura de 20°C por lo que no fue necesario utilizar la cámara de temperatura.

El módulo dinámico se puede expresar como:

$$E^* = E_{elastico} + i * E_{viscoso}$$

Su parte elástica y su parte viscosa representadas como un número complejo, aunque la magnitud de este número es la que se comparara más adelante, que se puede expresar como el cociente de la amplitud de la carga aplicada sobre la amplitud de la deformación.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Los datos arrojados por la maquina fueron, deformaciones (LVDT y Deflexómetro), cargas y los tiempos en los que ocurrían estos eventos, para determinar el módulo dinámico se utilizó la hoja de cálculo desarrollada por Fabio Naranjo y Javier Rueda en su tesis de grado “Hoja de Cálculo para Ensayos de Flexión en Cuatro Puntos”. En esta hoja de cálculo los datos eran introducidos y mediante un macro se realizaban los cálculos correspondientes para determinar el módulo dinámico.

Los valores para los módulos dinámicos para todas las vigas se encuentran en el Anexo B.3. para la mezcla caliente y en el Anexo B.4. para la mezcla tibia

6.1.5. Resistencia a la Tracción

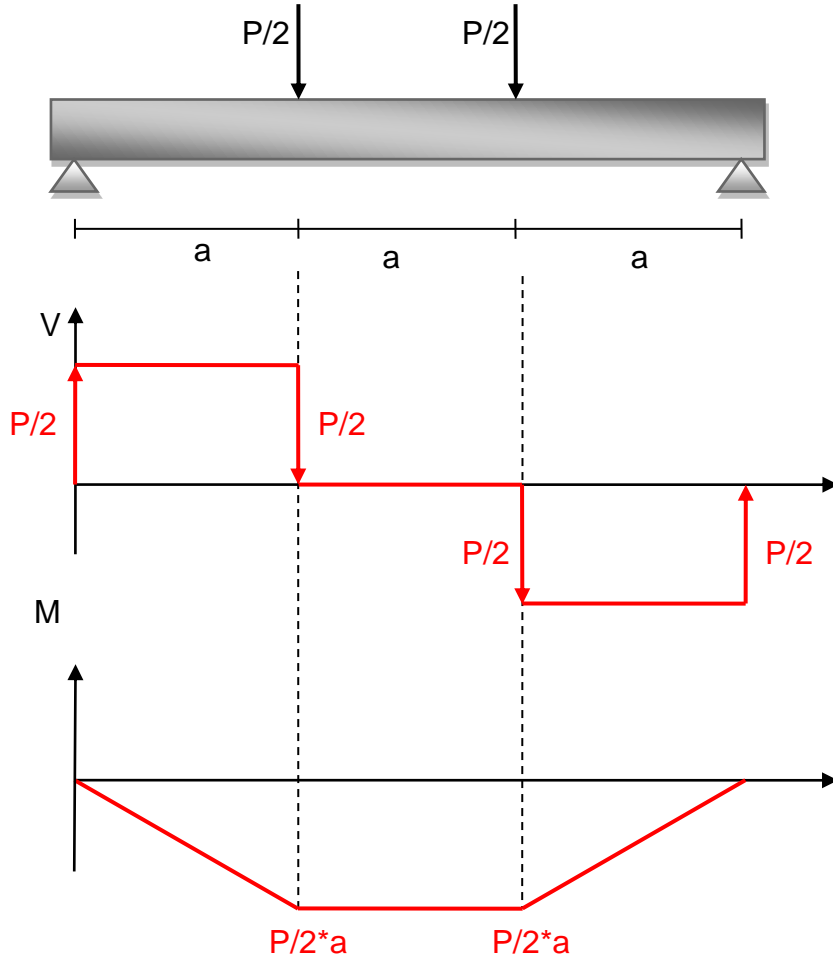
La determinación del esfuerzo de tracción se realizó utilizando la Máquina de Ensayos Universales Servo-Hidráulicos fabricada por MTS, se procede aplicando una carga lineal y con una velocidad constante de 0,5 mm/s hasta que la viga sufra una fractura, entonces se midió la carga que se aplicaba en ese instante.

Figura 42. Montaje Esfuerzo de Tracción



Utilizando la programación de una hoja de cálculo, se toman los datos proporcionados por la maquina (deformaciones y cargas) y se determina la máxima carga que soportó la viga y mediante el siguiente análisis se determina el esfuerzo de tracción en la viga así:

Figura 43. Diagrama de Fuerzas Internas



$$M = \frac{P}{2} * a$$

Ahora el esfuerzo de tracción es:

$$\sigma = \frac{M * \bar{y}}{I_x}$$

Los resultados de los cálculos de los esfuerzos de tracción en cada una de las vigas se encuentran en el Anexo B.3. para la mezcla caliente y en el Anexo B.4. para la mezcla tibia.

6.2. RESULTADOS Y ANALISIS

6.2.1. Gravedad Específica Bulk, Densidad Máxima Teórica y Porcentaje de Vacíos

Los valores resultantes de la Gravedad Especifica Bulk para las vigas utilizadas en los ensayos son:

Tabla 13. Resumen Mezcla Caliente

No. Viga	G. bulk	% Vacíos
C-2	2,384	4,788
C-3	2,376	5,130
C-4	2,379	5,003
C-5	2,382	4,884
C-7	2,360	5,766
Prom.	2,376	5,114
Gmm		2,504

Tabla 14. Resumen Mezcla Tibia

No. Viga	G. bulk	% Vacíos
T-1	2,366	4,249
T-3	2,377	3,816
T-4	2,364	4,323
T-6	2,367	4,218
T-7	2,363	4,357
Prom.	2,368	4,193
Gmm		2,471

Es posible apreciar que la mezcla caliente contiene un mayor porcentaje de vacíos, aunque su gravedad específica y densidad máxima teórica es mayor, esto nos podría indicar que la mezcla caliente tiene una menor cantidad de asfalto efectivo, porque el material pétreo absorbió mayor cantidad de ligante.

6.2.2. Módulo Dinámico

Los valores de módulo dinámico para las vigas probadas a 20°C fueron:

Tabla 15. Módulos Dinámicos Mezcla Caliente

		1 Hz	3 Hz	5 Hz	10 Hz
V C-2	Mod. Dinámico [GPa]	1,060	1,499	1,738	2,167
	Ang. Desfase [°]	31,064	32,257	32,640	31,966
V C-3	Mod. Dinámico [GPa]	0,962	1,417	1,635	2,100
	Ang. Desfase [°]	33,097	29,143	26,275	22,439
V C-4	Mod. Dinámico [GPa]	0,791	1,258	1,532	2,020
	Ang. Desfase [°]	41,829	39,906	38,261	34,948
V C-5	Mod. Dinámico [GPa]	0,787	1,143	1,242	1,582
	Ang. Desfase [°]	34,969	34,553	36,565	34,391
V C-7	Mod. Dinámico [GPa]	0,931	1,428	1,731	2,240
	Ang. Desfase [°]	37,522	35,209	33,887	30,312
Promedio Mod. Dinámico [GPa]		0,906	1,349	1,575	2,022
Promedio Ang. Desfase [°]		35,696	34,213	33,526	30,811

Tabla 16. Módulos Dinámicos Mezcla Tibia

		1 Hz	3 Hz	5 Hz	10 Hz
V T-1	Mod. Dinámico [GPa]	1,153	1,754	2,046	2,582
	Ang. Desfase [°]	36,197	33,330	32,501	29,797
V T-3	Mod. Dinámico [GPa]	1,117	1,734	1,746	2,379
	Ang. Desfase [°]	38,399	31,915	27,731	25,583
V T-4	Mod. Dinámico [GPa]	1,206	1,848	2,153	2,702
	Ang. Desfase [°]	38,019	27,866	32,632	29,056
V T-6	Mod. Dinámico [GPa]	1,343	2,092	2,396	2,755
	Ang. Desfase [°]	37,281	30,714	27,909	27,122
V T-7	Mod. Dinámico [GPa]	1,031	1,527	1,758	2,259
	Ang. Desfase [°]	32,196	28,888	25,804	23,594
Promedio Mod. Dinámico [GPa]		1,170	1,791	2,020	2,535
Promedio Ang. Desfase [°]		36,418	30,542	29,315	27,030

Figura 44. Comparación de Módulos Dinámicos

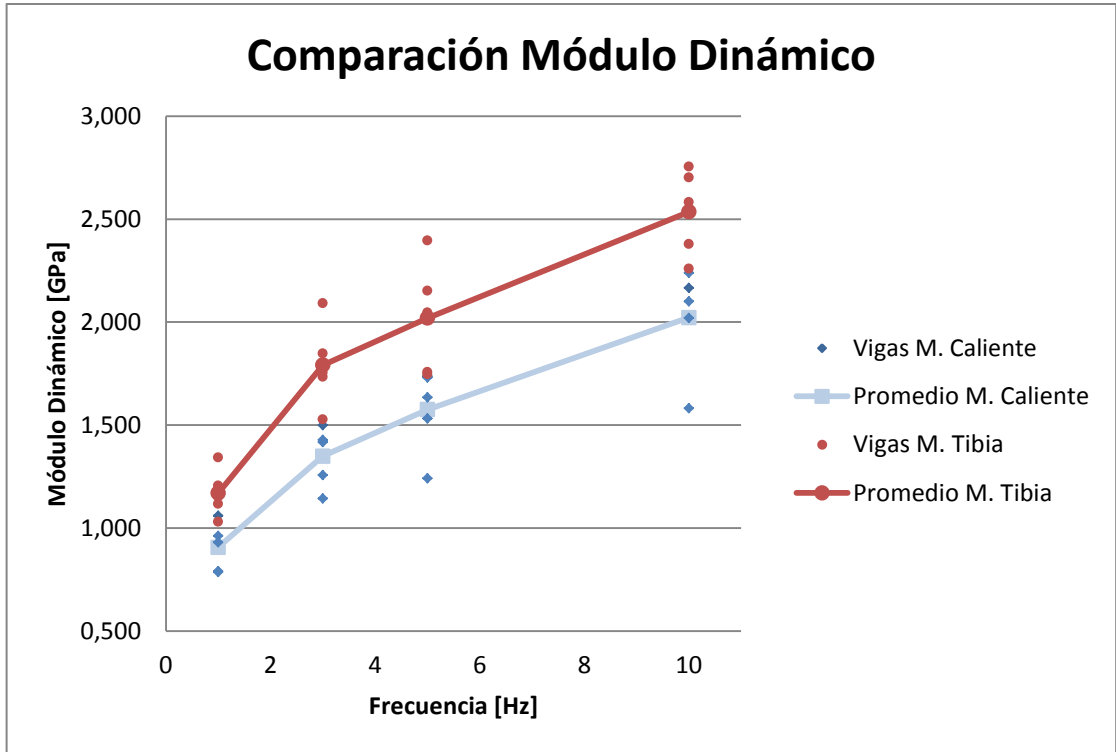
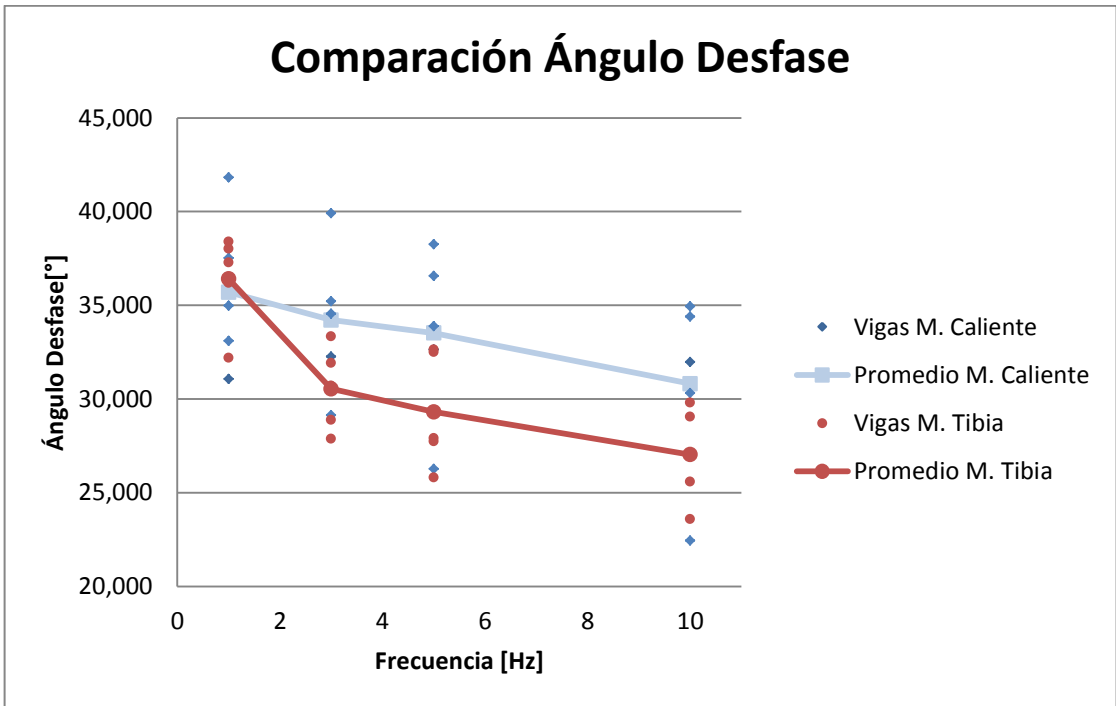


Figura 45. Comparación de Ángulos de Desfase



Se observa que los valores de módulo en todos los casos son mayores para las frecuencias altas, esto se debe a que se necesita mayor carga para deformar las probetas a una mayor velocidad, que si lentamente se aplica esta carga.

Los módulos dinámicos fueron mayores para todas las frecuencias en las vigas de Mezcla Tibia, y los ángulos de desfase generalmente mayores en la Mezcla caliente, lo primero nos indica que las vigas con mezcla tibia presentaron una mayor rigidez que las de mezcla caliente, pero el ángulo de desfase para las dos mezclas es menor a 45°, por lo que en ambas la componente elástica del modulo será mayor que la viscosa.

6.2.3. Resistencia a la Tracción

Los esfuerzos y deformaciones a tracción calculados fueron:

Tabla 17. Esfuerzos y Deformaciones Mezcla Caliente

Viga	Esfuerzo Tracción [MPa]	Deformación [mm]
V C-2	1,854	4,542
V C-3	2,015	6,964
V C-4	1,692	6,634
V C-7	1,664	5,594
Promedio	1,806	5,934

Tabla 18. Esfuerzos y Deformaciones Mezcla Tibia

Viga	Esfuerzo Tracción [MPa]	Deformación [mm]
V T-1	1,993	6,856
V T-3	2,430	6,208
V T-4	2,230	5,795
V T-7	2,174	5,493
Promedio	2,202	6.088

Como es posible observar, el promedio de esfuerzos en la mezcla tibia fue considerablemente mayor al obtenido para la mezcla caliente. Esto podría atribuirse a la diferencia observada en los porcentajes de vacíos llenos con aire, y a la rigidez que presenta esta mezcla, por otra parte, también se presentan mayores deformaciones ante la carga máxima, lo cual indica que puede deformarse más antes de fisurarse.

CONCLUSIONES

- Después de realizar varias pruebas a pequeña escala de las posibles Mezclas Asfálticas Tibias, se observó que por mas pequeña que sea la cantidad de agua adicionada al ligante asfáltico caliente, es posible lograr un espumado de este, lo importante es que este sea lo suficientemente grande y se conserve por el tiempo suficiente para permitir la correcta realización de la mezcla.
- Una vez realizadas varias pruebas con diferentes humedades se comprobó que el espumado obtenido con 8% de humedad en la porción fina adicionada (25% del pasa No. 40) tenía una relación de expansión óptima, además de una vida media aceptable, lo cual permitió que la mezcla se realizara con mayor facilidad y recubriera mejor el material pétreo.
- Conociendo que 8% era la humedad adecuada fue posible establecer los pasos a seguir en la construcción de Mezclas Asfálticas Tibias, como la separación de solo una porción de todo el agregado fino, la rapidez a la hora de verter el ligante asfáltico espumado sobre el material pétreo (antes que el espumado se desvaneciera) y finalmente el correcto mezclado para obtener una cobertura de todo el material.
- La gravedad específica bulk de las diferentes vigas probadas fue bastante similar, pero los porcentajes de vacíos llenos con aire fueron mayores en las probetas de la mezcla asfáltica caliente, debido a que la esta última tuvo una menor cantidad de asfalto efectivo.
- Los módulos dinámicos determinados para las diferentes frecuencias, fueron mayores en todos los casos para las vigas elaboradas con Mezcla Asfáltica Tibia, del mismo modo los esfuerzos de tracción y deformaciones

con carga máxima fueron mayores en este tipo de mezcla, lo cual nos indica que esta mezcla presentó un mejor comportamiento ante la presencia de cargas, es decir una mayor rigidez y resistencia.

- Teniendo en cuenta todo lo anterior se establece que es posible realizar una Mezcla Asfáltica Tibia utilizando solo agregado fino húmedo en el ligante para obtener el espumado y que esta mezcla presenta una calidad comparable con la de una Mezcla Asfáltica Caliente convencional.

RECOMENDACIONES

- Una investigación mas profunda podría realizar pruebas con varias temperaturas para comprobar el efecto de esta variable sobre la resistencia de esta nueva mezcla.
- Se considera que al resistir mayores deformaciones y tener un mayor módulo dinámico, la Mezcla Asfáltica Tibia, puede ser de muy buena calidad, pero es necesario realizar pruebas de ahuellamiento y fatiga para corroborar estos hechos.

BIBLIOGRAFÍA

- CELIS, L. M. (2008). *Mezclas Asfálticas Tibias*. Bucaramanga.
- Elena. (18 de Junio de 2006). *Erenovable*. Recuperado el 30 de Abril de 2012, de erenovable.com/el-protocolo-de-kyoto/
- INVIAS. (2007). Mezclas Asfálticas en Caliente. *Especificaciones Generales de Construcción de Carrterreas*, 3.
- LOPERA, C. H. (2011). *Diseño Y Producción De Mezclas Asfálticas Tibias, A Partir De La Mezcla De Asfalto Y Aceite Crudo De Palma (Elaeis Guineensis)*. Medellín.
- POROT, L. (2008). Mezclas Asfálticas a mas bajas Temperaturas. *XXXV Reunion del Asfalto*. Rosario, Argentina.
- RUEDA, E. (2010). *Análisis Comparativo del Esfuerzo de Tracción en Vigas de Concreto Asfáltico Sometidas a Flexión*. Bucaramanga.
- RUEDA, F. A. (2011). *Hoja De Calculo Para Ensayos De Flexión En Cuatro Puntos*. Bucaramanga.
- THENOUX, G. (2002). *Tecnología de Asfalto Espumado y Diseño de mezcla*. Chile.
- ULLOA, A. (2011). Mezclas Asfálticas Tibias. *Boletín PITRA*, 6.

ANEXO A. PRUEBAS REALIZADAS AL LIGANTE ASFÁLTICO

A.1. Ficha Técnica

	SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES APIAY	SOA-F-413	
	REPORTE RESULTADOS ENSAYOS DE LABORATORIO ASFALTO 60-70	Versión 1	1/1

TANQUE ABIERTO: K-507A
FECHA DESPACHO: 2/18/2012 10:30
TEMPERATURA K-507A (°F): 330
CLIENTE: INCOASFALTOS S.A.
PLACA CARROTANQUE: SZX 287 R6 5316
TIQUETE BASCULA N° 18441

ENSAYO	NORMA	VALOR REPORTADO		REFERENCIA	
		°F	°C	°F	°C
Punto de Ablandamiento	ASTM D 36	124.9	51.6	107-131	42-55
Punto de Inflamación	ASTM D 92	526	275	Min 450	Min 232
Penetración a 25°C, 100 g y 5 s (0.1 mm) al asfalto original	ASTM D 5		51	60 - 70 mm/10	
% Pérdida de masa RTFOT	ASTM D 2872		0.5439	< 1 %	
Solubilidad en tricloroetileno (% peso)	ASTM D 2042		99.96	Min 99.0	
Contenido de agua (% volumen)	ASTM D 95		0.00	Máx 0.2	
Ductilidad a 25°C	ASTM D 113		>140	Min 100	
Penetración a 25°C, 100 g y 5 s (0.1 mm) al asfalto envejecido TFOT	ASTM D 5		38.0	-	
Penetración residual (%)	ASTM D 5		87.4%	Min 52	
Viscosidad Dinámica @ 60°C (P)	ASTM D 4402		3186	Min 1500	
Temperatura de Mezcla (°C)	ASTM D 1559		146.6 - 161.2	Reportar	
Temperatura de Compactación (°C)	ASTM D 1569		136 - 139.8	Reportar	
Índice de penetración	LN.V. E-724		0.4788	-1 hasta +1	

CURVA REOLOGICA

Fecha de ensayo: Saturday, February 18, 2012

TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (cP)
80	318671
100	3483
135	322
150	166
160	103
170	71

Tanque K-507A recibe producción y entrega producto.

Nota: Los resultados correspondientes a los ensayos de Solubilidad en Tricloroetileno, contenido de agua y Ductilidad, corresponden a los valores reportados por Corastellos a partir del análisis de una muestra de Asfalto Apiay tomada el día 5 de Diciembre de 2011 correspondiente al tanque K-507A.

Actualizó: Diana M. Jara G. Profesional Proceso Fecha: 05 / 11 / 07	Revisó: Ing. Willám Barbosa V. Coordinador Proceso Fecha: 11 / 11 / 07	Aprobó: Ing. Rafael Castillo A. Jefe Departamento Producción Fecha: 05 / 12 / 07
---	--	--

Nota: Cualquier documento, físico o magnético, que se encuentre fuera del portal de la Intranet, será considerado como copia no controlada, por lo que su consulta y uso es responsabilidad exclusiva del usuario.

ANEXO B. PRUEBAS REALIZADAS A LAS VIGAS

B.1. Densidad Máxima Teórica (Gmm), Gravedad Especifica Bulk y Porcentaje de Vacíos para la Vigas de Mezcla Asfáltica Caliente,

- A = Masa de la muestra seca
 D = Masa recipiente lleno agua
 E = Masa Recipiente con muestras lleno de agua

A [gr]	1500
D [gr]	8165
E [gr]	9066
Gmm	2,504

Viga C-2	
Dimensiones viga	
b [cm]	5
h [cm]	6,1-5,9
L [cm]	40
Masas tomadas [gr]	
masa seca	2959,6
masa sumergida	1719,8
masa superficie saturada seca	2961,1
Resultados	
Gravedad bulk	2,384
% Vacíos	4,788

Viga C-3	
Dimensiones viga	
b [cm]	5,1
h [cm]	6,1
L [cm]	40,1
Masas tomadas [gr]	
masa seca	3020
masa sumergida	1750,2
masa superficie saturada seca	3021,4
Resultados	
Gravedad bulk	2,376
% Vacíos	5,130

Viga C-4	
Dimensiones viga	
b [cm]	5
h [cm]	6
L [cm]	40
Masas tomadas [gr]	
masa seca	2949,1
masa sumergida	1710,9
masa superficie saturada seca	2950,6
Resultados	
Gravedad bulk	2,379
% Vacíos	5,003

Viga C-5	
Dimensiones viga	
b [cm]	5
h [cm]	5,9
L [cm]	39,9
Masas tomadas [gr]	
masa seca	2925,4
masa sumergida	1698,5
masa superficie saturada seca	2926,7
Resultados	
Gravedad bulk	2,382
% Vacíos	4,884

Viga C-7	
Dimensiones viga	
b [cm]	5,1
h [cm]	5,9
L [cm]	40,7
Masas tomadas [gr]	
masa seca	3065,6
masa sumergida	1768,1
masa superficie saturada seca	3067,2
Resultados	
G bulk	2,360
% Vacíos	5,766

B.2. Densidad Máxima Teórica (Gmm), Gravedad Especifica Bulk y Porcentaje de Vacíos para la Vigas de Mezcla Asfáltica Tibia,

- A = Masa de la muestra seca
 D = Masa recipiente lleno agua
 E = Masa Recipiente con muestras lleno de agua

A [gr]	1500
D [gr]	8165
E [gr]	9058
Gmm	2,471

Viga T-1	
Dimensiones viga	
b [cm]	4,8-5,1
h [cm]	6
L [cm]	40,2
Masas tomadas [gr]	
masa seca	2935
masa sumergida	1696
masa superficie saturada seca	2936,4
Resultados	
Gravedad bulk	2,366
% Vacíos	4,249

Viga T-3	
Dimensiones viga	
b [cm]	5,1
h [cm]	6
L [cm]	40
Masas tomadas [gr]	
masa seca	3006,5
masa sumergida	1743,2
masa superficie saturada seca	3008,1
Resultados	
Gravedad bulk	2,377
% Vacíos	3,816

Viga T-4	
Dimensiones viga	
b [cm]	5,3-5,1
h [cm]	6,3-5,9
L [cm]	40
Masas tomadas [gr]	
masa seca	3072
masa sumergida	1774,1
masa superficie saturada seca	3073,4
Resultados	
Gravedad bulk	2,364
% Vacíos	4,323

Viga T-6	
Dimensiones viga	
b [cm]	5,2-4,9
h [cm]	6,2-6
L [cm]	40
Masas tomadas [gr]	
masa seca	3073
masa sumergida	1776,5
masa superficie saturada seca	3074,8
Resultados	
Gravedad bulk	2,367
% Vacíos	4,218

Viga T-7	
Dimensiones viga	
b [cm]	5,1
h [cm]	5,9
L [cm]	40
Masas tomadas [gr]	
masa seca	2886,3
masa sumergida	1666,6
masa superficie saturada seca	2887,8
Resultados	
Gravedad bulk	2,363
% Vacíos	4,357

B.3. Módulo dinámico y esfuerzos para las vigas de Mezcla Asfáltica Caliente.

MÓDULOS VIGA C-2				
Frecuencia Ensayo	Mod. Dinámico	Ang. Desfase	Mod. Elástico	Esfuerzo V [MPa]
1 Hz-1	1,0574	30,9997	0,9064	0,1519
1 Hz-2	1,0574	31,1184	0,9052	
1 Hz-3	1,0657	31,0751	0,9128	
3 Hz-1	1,4944	32,3696	1,2622	
3 Hz-2	1,4944	32,3593	1,2623	
3 Hz-3	1,5079	32,0406	1,2782	
				Esfuerzo t [MPa]
5 Hz-1	1,7383	32,6878	1,4630	1,8537
5 Hz-2	1,7462	32,6204	1,4708	
5 Hz-3	1,7282	32,6125	1,4557	
10 Hz-1	2,1576	32,0938	1,8279	
10 Hz-2	2,1637	31,9711	1,8355	
10 Hz-3	2,1789	31,8338	1,8511	

MÓDULOS VIGA C-3				
Frecuencia Ensayo	Mod. Dinámico	Ang. Desfase	Mod. Elástico	Esfuerzo V [MPa]
1 Hz-1	0,9404	33,7330	0,7821	0,1763
1 Hz-2	0,9733	32,7785	0,8183	
1 Hz-3	0,9733	32,7785	0,8183	
3 Hz-1	1,4255	29,4597	1,2410	
3 Hz-2	1,4144	28,8913	1,2383	
3 Hz-3	1,4116	29,0770	1,2336	
				Esfuerzo t [MPa]
5 Hz-1	1,6532	26,0156	1,4857	2,0149
5 Hz-2	1,6417	26,1075	1,4742	
5 Hz-3	1,6105	26,7013	1,4388	
10 Hz-1	2,1698	22,6744	2,0021	
10 Hz-2	2,0817	22,7175	1,9202	
10 Hz-3	2,0491	21,9253	1,9009	

MÓDULOS VIGA C-4				
Frecuencia Ensayo	Mod. Dinámico	Ang. Desfase	Mod. Elástico	Esfuerzo V [MPa]
1 Hz-1	0,7971	41,7572	0,5946	0,1410
1 Hz-2	0,7892	41,9022	0,5874	
1 Hz-3	0,7861	41,8279	0,5858	
3 Hz-1	1,2653	39,8796	0,9710	
3 Hz-2	1,2586	39,9237	0,9652	
3 Hz-3	1,2490	39,9137	0,9580	
5 Hz-1	1,5385	38,1455	1,2100	Esfuerzo t [MPa]
5 Hz-2	1,5315	38,2249	1,2031	1,6921
5 Hz-3	1,5253	38,4112	1,1952	
10 Hz-1	2,0569	33,7474	1,7103	
10 Hz-2	2,0099	34,7707	1,6510	
10 Hz-3	1,9938	35,1262	1,6307	

MÓDULOS VIGA C-5				
Frecuencia Ensayo	Mod. Dinámico	Ang. Desfase	Mod. Elástico	Esfuerzo V [MPa]
1 Hz-1	0,7913	34,5285	0,6519	0,0938
1 Hz-2	0,7857	35,1669	0,6423	
1 Hz-3	0,7848	35,2130	0,6412	
3 Hz-1	1,0743	36,5116	0,8635	
3 Hz-2	1,1591	33,5438	0,9660	
3 Hz-3	1,1967	33,6027	0,9967	
5 Hz-1	1,2355	36,3754	0,9948	Esfuerzo t [MPa]
5 Hz-2	1,2415	36,6685	0,9958	1,1851
5 Hz-3	1,2486	36,6517	1,0017	
10 Hz-1	1,0215	24,5550	0,9292	
10 Hz-2	1,5847	34,0563	1,3129	
10 Hz-3	1,5800	34,7258	1,2986	

MÓDULOS VIGA C-7				
Frecuencia Ensayo	Mod. Dinámico	Ang. Desfase	Mod. Elástico	Esfuerzo V [MPa]
1 Hz-1	0,9442	37,2950	0,7511	0,1386
1 Hz-2	0,9321	37,4407	0,7401	
1 Hz-3	0,9181	37,8297	0,7252	
3 Hz-1	1,4469	35,1703	1,1828	Esfuerzo t [MPa]
3 Hz-2	1,4235	35,2230	1,1628	
3 Hz-3	1,4125	35,2337	1,1537	
5 Hz-1	1,7581	33,6009	1,4644	1,6638
5 Hz-2	1,7301	33,9568	1,4351	
5 Hz-3	1,7044	34,1040	1,4113	
10 Hz-1	2,2541	29,7462	1,9571	1,6638
10 Hz-2	2,2435	30,2506	1,9380	
10 Hz-3	2,2212	30,9381	1,9052	

B.4. Módulo dinámico y esfuerzos para las vigas de Mezcla Asfáltica Tibia.

MÓDULOS VIGA T-1				
Frecuencia Ensayo	Mod. Dinámico	Ang. Desfase	Mod. Elástico	Esfuerzo V [MPa]
1 Hz-1	1,1569	35,8341	0,9379	0,1633
1 Hz-2	1,1605	36,0126	0,9387	
1 Hz-3	1,1419	36,7435	0,9150	
3 Hz-1	1,7330	33,9930	1,4368	Esfuerzo t [MPa]
3 Hz-2	1,7693	32,7654	1,4878	
3 Hz-3	1,7594	33,2310	1,4717	
5 Hz-1	2,0288	32,7942	1,7055	1,9926
5 Hz-2	2,0588	32,0491	1,7450	
5 Hz-3	2,0512	32,6588	1,7269	
10 Hz-1	2,5843	29,6683	2,2455	1,9926
10 Hz-2	2,5801	29,8527	2,2377	
10 Hz-3	2,5821	29,8701	2,2391	

MÓDULOS VIGA T-3				
Frecuencia Ensayo	Mod. Dinámico	Ang. Desfase	Mod. Elástico	Esfuerzo V [MPa]
1 Hz-1	1,1279	38,1755	0,8867	0,2025
1 Hz-2	1,1192	38,3456	0,8778	
1 Hz-3	1,1038	38,6764	0,8617	
3 Hz-1	1,4870	30,4120	1,2822	Esfuerzo t [MPa]
3 Hz-2	1,7526	31,7217	1,4907	
3 Hz-3	1,7163	32,1084	1,4537	
5 Hz-1	1,7867	27,9520	1,5783	2,4295
5 Hz-2	1,7476	27,7795	1,5462	
5 Hz-3	1,7049	27,4621	1,5128	
10 Hz-1	2,4555	25,9109	2,2087	2,4295
10 Hz-2	2,3908	25,6340	2,1555	
10 Hz-3	2,2897	25,2033	2,0718	

MÓDULOS VIGA T-4				
Frecuencia Ensayo	Mod. Dinámico	Ang. Desfase	Mod. Elástico	Esfuerzo V [MPa]
1 Hz-1	1,2201	37,1139	0,9729	0,1827
1 Hz-2	1,2192	37,2181	0,9709	
1 Hz-3	1,1775	39,7254	0,9056	
3 Hz-1	1,8263	34,2400	1,5098	Esfuerzo t [MPa]
3 Hz-2	1,8249	34,4235	1,5053	
3 Hz-3	1,8934	32,5725	1,5956	
5 Hz-1	2,1589	32,5352	1,8201	2,2300
5 Hz-2	2,1520	32,6433	1,8121	
5 Hz-3	2,1474	32,7190	1,8067	
10 Hz-1	2,7402	28,6527	2,4047	2,2300
10 Hz-2	2,6942	29,0958	2,3542	
10 Hz-3	2,6705	29,4206	2,3261	

MÓDULOS VIGA T-6				
Frecuencia Ensayo	Mod. Dinámico	Ang. Desfase	Mod. Elástico	Esfuerzo V [MPa]
1 Hz-1	1,3336	37,4576	1,0586	0,1440
1 Hz-2	1,3512	37,1540	1,0769	
1 Hz-3	1,3439	37,2315	1,0700	
3 Hz-1	2,1230	30,0689	1,8373	
3 Hz-2	2,0518	31,3148	1,7528	
3 Hz-3	2,1000	30,7579	1,8046	
5 Hz-1	2,3999	28,0209	2,1186	Esfuerzo t [MPa]
5 Hz-2	2,3313	28,8088	2,0428	1,6998
5 Hz-3	2,4564	26,8964	2,1907	
10 Hz-1	2,7447	28,0972	2,4212	
10 Hz-2	2,7182	27,8248	2,4039	
10 Hz-3	2,8025	25,4437	2,5306	

MÓDULOS VIGA T-7				
Frecuencia Ensayo	Mod. Dinámico	Ang. Desfase	Mod. Elástico	Esfuerzo V [MPa]
1 Hz-1	1,0424	31,2981	0,8907	0,1781
1 Hz-2	1,0311	32,8059	0,8667	
1 Hz-3	1,0198	32,4827	0,8602	
3 Hz-1	1,5379	29,4214	1,3394	Esfuerzo t [MPa]
3 Hz-2	1,5254	28,6594	1,3384	
3 Hz-3	1,5178	28,5830	1,3327	
5 Hz-1	1,7588	25,3534	1,5894	
5 Hz-2	1,7120	24,8451	1,5535	
5 Hz-3	1,8036	27,2137	1,6039	
10 Hz-1	2,3843	24,5523	2,1687	2,1738
10 Hz-2	2,2535	23,5987	2,0651	
10 Hz-3	2,1384	22,6320	1,9738	