

# **MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS**

**LYDA MARCELA CELIS AMADO**

**CARLOS GERARDO SERRANO FLÓREZ**

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

**2008**

**MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS**

**LYDA MARCELA CELIS AMADO  
CARLOS GERARDO SERRANO FLÓREZ**

**Tesis de Grado Modalidad Investigación**

**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  
BUCARAMANGA**

**2008**

A Dios quien es mi guía en todo momento; a mis padres (Oscar Celis y Mariela Amado) por su comprensión, esfuerzo y apoyo en todo momento; a mi hermano por su incondicionalidad; y a mis amigos por brindarme toda su confianza.

Lyda Marcela Celis Amado

A Dios, mis padres (Gerardo Serrano y Myriam Consuelo Flórez), mis hermanos (Silvia Juliana, Diego Fernando, Andrés Mauricio), mi abuela (Mariela Santos de Flórez), mi novia (Laura Margarita Durán) y toda mi familia.

Carlos Gerardo Serrano Flórez

## **AGRADECIMIENTOS**

Ing. Eduardo Castañeda Pinzón, por su apoyo y guía durante el desarrollo de este proyecto de investigación.

Paviandi, quien muy cordialmente nos obsequió el agregado necesario para nuestra investigación.

Laboratoristas Jairo y Germán Hernández, por su colaboración en el préstamo de los espacios e implementos para desarrollar nuestra tesis.

Nuestro compañero Sergio Armando Chávez, con quien trabajamos en conjunto para conseguir el material y tamizarlo. Así mismo, nos ayudó a conseguir el asfalto adecuado.

Ana Lucía Villamizar y su futuro esposo Jhoann Castaño, quienes nos ayudaron a conseguir la zeolita, elemento esencial de nuestro proyecto.

Nuestras familias y amigos, por su apoyo moral y psicológico para sacar adelante nuestra tesis.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1. MEZCLAS ASFÁLTICAS COMUNES</b>	<b>3</b>
1.1. Mezclas Asfálticas en General	3
1.2. Mezclas Asfálticas en Caliente	5
1.3. Mezcla Asfáltica en Frío	7
<b>2. NUEVO TIPO DE MEZCLA ASFÁLTICA</b>	<b>8</b>
2.1. Mezcla Asfáltica Tibia	8
2.2. Ventajas de la Mezcla Asfáltica Tibia	10
2.3. Tecnologías para la Fabricación de Mezclas Asfálticas Semi-Calientes	12
2.3.1. Tecnología Wam-Foam ®	13
2.3.2. Tecnología de Aditivos Orgánicos	13
2.3.2.1. Sasobit ®	13
2.3.2.2. Asphaltan B ®	13
2.3.3. Tecnología Aspha-Min ®	14
<b>3. PROCESO DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>16</b>
3.1. Tecnología Empleada en la Investigación para la Fabricación de la Mezcla Asfáltica Tibia	16
3.2. Descripción	18
3.3. Caracterización de Materiales Empleados	18
3.3.1. Agregado Mineral	18
3.3.1.1. Origen de los Agregados	18
3.3.1.2. Ensayos Realizados al Agregado	18
3.3.2. Asfalto	19
3.3.2.1. Pruebas Efectuadas al Asfalto	19

3.3.2.1.1. Ensayo de Penetración	19
3.4. Creación de una Mezcla Asfáltica Tibia	19
3.4.1. Mezclas de Control	19
3.4.2. Mezclas Asfálticas Tibias	21
3.4.2.1. Pruebas Efectuadas a la Zeolita	21
3.4.2.1.1. Ensayo de Humedad	21
3.4.2.1.2. Calentar Zeolita	21
3.4.2.1.3. Reacción de la Zeolita con Asfalto Caliente	21
3.4.2.1.4. Semejanza entre Zeolita Húmeda y Fino Húmedo	21
3.4.2.2. Mezclas de Prueba	22
3.4.2.2.1. Mezcla Asfáltica a 100°C, con 0,3% (de la totalidad de la mezcla) de Zeolita Seca, agregada al Asfalto Antes de Verter	22
3.4.2.2.2. Mezcla Asfáltica a 100°C, con 0,3% (de la totalidad de la mezcla) de Zeolita Húmeda, agregada al Asfalto Antes de Verter	22
3.4.2.2.3. Mezcla Asfáltica a 100°C, Reemplazando Fino (Ret. 200), por Zeolita Húmeda	23
3.4.2.2.4. Mezcla Asfáltica a 100°C, Reemplazando el 50% de Fino (Pasa 200), por Zeolita Húmeda	23
3.5. Diseño y Fabricación de Probetas	24
3.5.1. Metodología Usada para la Fabricación de Probetas	24
3.5.2. Preparación de Probetas	24
3.5.3. Preparación de las Mezclas	25
3.5.4. Compactación de las Probetas	26
3.6. Pruebas Efectuadas sobre las Muestras	27
3.6.1. Medición de Densidad de Mezclas Asfálticas Compactadas	27
3.6.2. Determinación del Módulo de Elasticidad	28
3.6.3. Medición de Estabilidad y Flujo	29
3.6.4. Determinación del Efecto del Agua sobre la Resistencia a la Compresión de las Mezclas Asfálticas Compactadas	30
3.6.5. Determinación del Gmm y Porcentaje de Vacíos	31

<b>4.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>33</b>
4.1.	Caracterización de Materiales Empleados	33
4.1.1.	Ensayo de Penetración	33
4.2.	Creación de una Mezcla Asfáltica Tibia	34
4.2.1.	Mezclas de Control	34
4.2.1.1.	Mezcla Asfáltica a 140°C	34
4.2.1.2.	Mezcla Asfáltica a 100°C	34
4.2.1.3.	Mezcla Asfáltica a 80°C	34
4.3.	Mezclas Asfálticas Tibias	35
4.3.1.	Pruebas Efectuadas a la Zeolita	35
4.3.1.1.	Calentar Zeolita	35
4.3.1.2.	Ensayo de Humedad	35
4.3.1.3.	Reacción de la Zeolita con Asfalto Caliente	36
4.3.1.4.	Semejanza entre Zeolita Húmeda y Fino Húmedo	37
4.3.2.	Mezclas de Prueba	38
4.3.2.1.	Mezcla Asfáltica a 100°C, con 0,3%(de la totalidad de la mezcla) de Zeolita Húmeda, Agregada al Asfalto Antes de Verter	38
4.3.2.2.	Mezcla Asfáltica a 100°C, con 0,3% (de la totalidad de la mezcla) de Zeolita Seca, Agregada al Asfalto Antes de Verter	38
4.3.2.3.	Mezcla Asfáltica a 100°C, Reemplazando Fino (Ret. 200), por Zeolita Húmeda	39
4.3.2.4.	Mezcla Asfáltica a 100°C, Reemplazando el 50% de Fino (Pasa 200), por Zeolita Húmeda.	39
4.4.	Diseño y Fabricación de Probetas	40
4.5.	Pruebas Efectuadas sobre las Muestras	42
4.5.1.	Medición de Densidad de Mezclas Asfálticas Compactadas	42
4.5.2.	Determinación del Módulo de Elasticidad	45
4.5.3.	Medición de Estabilidad y Flujo	47
4.5.4.	Determinación del Porcentaje de Vacíos de Aire	48

<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>49</b>
5.1. Determinación del Módulo de Elasticidad	49
5.1.1. Efecto del Agua Sobre las Mezclas	49
5.2. Medición de Estabilidad y Flujo	51
5.3. Determinación del Porcentaje de Vacíos de Aire	54
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>55</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>56</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>57</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág
<b>Tabla 1.1.</b> Clasificación de las Mezclas Asfálticas	4
<b>Tabla 2.1.</b> Consumo de Combustible en Función a la Temperatura	10
<b>Tabla 2.2.</b> Consumo de Combustible para una Temperatura de 100°C	11
<b>Tabla 2.3.</b> Temperatura de Fabricación y Extendido	14
<b>Tabla 2.4.</b> Efecto en las Propiedades del Aglomerado	14
<b>Tabla 2.5.</b> Emisiones de Mezcla Asfáltica Caliente y Mezcla Asfáltica Semi-caliente	15
<b>Tabla 3.1.</b> Franjas Granulométricas	20
<b>Tabla 3.2.</b> Granulometría Mezclas de Control	20
<b>Tabla 3.3.</b> Granulometría para Realizar Probetas con Mezcla Asfáltica Tibia	25
<b>Tabla 3.4.</b> Granulometría para Realizar Probetas con Mezcla Asfáltica a 100°C y 140°C	26
<b>Tabla 4.1.</b> Características y Densidad Bulk de la Probeta con Mezcla Asfáltica a 140°C	42
<b>Tabla 4.2.</b> Características y Densidad Bulk de la Probeta con Mezcla Asfáltica a 100°C	44
<b>Tabla 4.3.</b> Características y Densidad Bulk de la Probeta con Mezcla Asfáltica a 100°C con Zeolita	43
<b>Tabla 4.4.</b> Módulo de Elasticidad de Probetas	45
<b>Tabla 4.5.</b> Módulo de Elasticidad de Probetas Afectadas por el Agua	46
<b>Tabla 4.6.</b> Estabilidad y Flujo Promedio para Cada Tipo de Mezcla	47
<b>Tabla 4.7.</b> Gmm y % de Vacíos para Cada Tipo de Mezcla	48
<b>Tabla 5.1.</b> Diferencia del Módulo Elástico de las Probetas Antes y Después de Ser Afectadas por el Agua	50
<b>Tabla 5.2.</b> Estabilidad y Flujo de las Probetas para Cada Tipo de Mezcla	51
<b>Tabla 5.3.</b> Estabilidad y Flujo de las Probetas Afectadas por el Agua	52
<b>Tabla 5.4.</b> Diferencia en la Estabilidad y Flujo de las Probetas Antes y Después de Ser Afectadas por el Agua	52
<b>Tabla 5.5.</b> Gmm y % de Vacíos Promedio para Cada Tipo de Mezcla	54

## LISTA DE FIGURAS

	Pag
<b>Figura 1.1.</b> Asfalto en Estado Líquido Viscoso	5
<b>Figura 1.2.</b> Asfalto en Estado Visco-Elástico	6
<b>Figura 2.1.</b> Humos Generados por la Mezcla Asfáltica en Caliente	9
<b>Figura 2.2.</b> Consumo de Combustible Vs. Temperatura	11
<b>Figura 2.3.</b> Técnicas de fabricación de mezclas asfálticas	12
<b>Figura 2.4.</b> Zeolita Sintética Asphan-min	14
<b>Figura 2.5.</b> Mezcla Asfáltica Semi-Caliente	15
<b>Figura 2.6.</b> Mezcla Asfáltica Caliente	15
<b>Figura 3.1.</b> Zeolita Húmeda – Zeolita Seca	16
<b>Figura 3.2.</b> Zeolita Añadida al Asfalto Caliente	17
<b>Figura 3.3.</b> Mezclas Asfáltica Tibia (100°C) con Zeolita	17
<b>Figura 3.4.</b> Martillo de Compactación	27
<b>Figura 3.5.</b> Soporte para Molde y Pedestal de Compactación	27
<b>Figura 3.6.</b> Muestra Pesada en Seco	28
<b>Figura 3.7.</b> Muestra Pesada en Agua	28
<b>Figura 3.8.</b> Máquina Marshall para Determinación de Módulo elástico.	29
<b>Figura 3.9.</b> Máquina Marshall para determinación de la Estabilidad y Flujo	30
<b>Figura 3.10.</b> Inmersión en Vacío	31
<b>Figura 3.11.</b> Probetas en Agua a 15°C	31
<b>Figura 3.12.</b> Baño de María a 60°C	31
<b>Figura 3.13.</b> Sistema de Vacío	32
<b>Figura 3.14.</b> Erlenmeyer con la Muestra	32
<b>Figura 4.1.</b> Penetrómetro	33
<b>Figura 4.2.</b> Aguja de Penetración	33
<b>Figura 4.3.</b> Moldes de la Muestra	33
<b>Figura 4.4.</b> Mezcla Asfáltica a 140°C	34
<b>Figura 4.5.</b> Mezcla asfáltica a 100°C	34
<b>Figura 4.6.</b> Mezcla Asfáltica a 80°C	34

<b>Figura 4.7.</b> Calentando Zeolita Seca y Húmeda	35
<b>Figura 4.8.</b> Añadiendo Zeolita Seca	36
<b>Figura 4.9.</b> Asfalto Efervesciendo	36
<b>Figura 4.10.</b> Añadiendo Zeolita Húmeda	36
<b>Figura 4.11.</b> Asfalto Expandiéndose	36
<b>Figura 4.12.</b> Fino Húmedo Agregado al Asfalto Caliente	37
<b>Figura 4.13.</b> Asfalto Produciendo Pocas Burbujas	37
<b>Figura 4.14.</b> Mezcla Asfáltica a 100°C, con 0,3% (de la totalidad de la mezcla) de Zeolita Húmeda, Agregada al Asfalto Antes de Verter	38
<b>Figura 4.15.</b> Mezcla Asfáltica a 100°C, con 0,3% (de la totalidad de la mezcla) de Zeolita Seca, Agregada al Asfalto Antes de Verter	38
<b>Figura 4.16.</b> Mezcla Asfáltica a 100°C, Remplazando Fino (Ret. 200), por Zeolita Húmeda	39
<b>Figura 4.17.</b> Mezcla Asfáltica a 100°C, Remplazando el 50% de Fino (Pasa 200), por Zeolita Húmeda	39
<b>Figura 4.18.</b> Probetas con los Tres Tipos de Mezclas	40
<b>Figura 4.19.</b> Probeta con Mezcla Asfáltica a 100°C, Reemplazando el 50% de Fino (Pasa 200), por Zeolita Húmeda	40
<b>Figura 4.20.</b> Probeta con Mezcla Asfáltica a 100°C	41
<b>Figura 4.21.</b> Probeta con Mezcla Asfáltica a 140°C	41

## LISTA DE ANEXOS

	Pag
<b>ANEXO A:</b> CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	59
<b>ANEXO B:</b> CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS	67
<b>ANEXO C:</b> ENSAYOS REALIZADOS A LAS PROBETAS	77

## RESUMEN

### TITULO

MEZCLAS ASFALTICAS TIBIAS.\*

### AUTORES

LYDA MARCELA CELIS AMADO

CARLOS GERARDO SERRANO FLÓREZ\*\*

### PALABRAS CLAVES

Mezclas asfálticas

Zeolita

Reducción

Tibio

Propiedades

Ventajas ambientales

Aditivo

### DESCRIPCIÓN

En la concepción de este proyecto, el principal factor fue la reducción de la temperatura de mezclado, compactación y extendido de una mezcla asfáltica. Se quiso encontrar una metodología para la fabricación de mezclas asfálticas a 100°C, denominadas "Mezclas Asfálticas Tibias" en la cual se usaría un aditivo que pudiera colaborar con este fin.

Se investigó y analizó si la zeolita (aditivo mineral) al ser añadida a una mezcla asfáltica, podría disminuir la temperatura de operación, sin afectar la calidad y resistencia de la misma. Esto sabiendo que las mezclas asfálticas tibias presentan ventajas ambientales importantes sobre las emisiones, exposiciones laborales y consumo de energía.

Para esto fue necesario la realización de ensayos habituales en el estudio de las mezclas asfálticas como: Granulometría, Compactación y Compresión Simple, Módulo de elasticidad, Estabilidad y flujo, Porcentaje de vacios en aire, en donde se logró la caracterización de las muestras permitiéndonos realizar una evaluación de los resultados obtenidos.

Es por eso que en este proyecto se presenta un estudio explícito del comportamiento de este aditivo adicionado en mezclas asfálticas, con el fin de observar la viabilidad del uso de estas y ver la importancia que tienen los pavimentos en las construcciones civiles.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\*Faculta de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: EDUARDO CASTAÑEDA PINZÓN. Ingeniero Civil.

## SUMMARY

### TITTLE

MEZCLAS ASFALTICAS TIBIAS.\*

### AUTHORS

LYDA MARCELA CELIS AMADO

CARLOS GERARDO SERRANO FLÓREZ\*\*

### KEYWORDS

Asphaltic mix

Zeolite

Reduction

Warm

Properties

Environmental advantages

Additive

### DESCRIPTION

In the conception of this project, the main factor was the reduction of the mixture, compaction and extend temperature of an asphalt mixture. It was wanted to find a methodology for the manufacture of asphalt mixtures to 100°C, denominated "Warm Asphalt Mixtures" in which an additive would be used to collaborate with this aim.

It was researched and analyzed if the zeolite (mineral additive) added to a mix asphalt, could allow a lower operation temperature, without affecting the quality and strength of it. This fact is considered, knowing that warm asphalt mixtures have significant environmental benefits on emissions, job exposures and industrial energy consumption.

It was necessary laboratory tests used in the study of asphalt mixtures as: Grain size, simple compaction and compression, Modulus of elasticity, Stability and Flow, Percentage of empty air, which permits the succeeded in the characterizing of the samples, allowing the results evaluation.

That's why in this project is presented an explicit study of the behaviour of this additive added in asphalt mixtures, in order to observe the feasibility of using these and see the importance of the pavements in civil constructions.

---

\* Grade work.

\*\*Phisico-Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering School. Director: EDUARDO CASTANEDA PINZÓN. Civil Engineer.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años la competitividad en la industria de la construcción, ha hecho que empecemos a buscar nuevas alternativas que mejoren la calidad de nuestros productos y procesos constructivos. Todos estos cambios deben estar enfocados a la reducción de costos de operación, incrementar el rendimiento de la mano de obra y su seguridad industrial y, por último, pero no menos importante, el cuidado del medio ambiente.

Es por esto que una de las principales ramas de la ingeniería civil que debe ser intervenida y mejorada, es la construcción vial. Esta área es una de las más agresivas con el medio ambiente, debido a que en la construcción de una vía es necesario talar miles de árboles, destruyendo así parte de nuestra valiosa flora y fauna silvestre.

Así mismo, en el proceso de pavimentado, el asfalto caliente es uno de los principales contaminantes, debido a que la mezcla asfáltica debe hacerse a muy altas temperaturas, generando una gran cantidad de gases tóxicos, que empeoran el efecto invernadero. Otro gran daño al medioambiente con el asfalto es que al empezar a pavimentar, se riega gran cantidad de sustancias bituminosas que escurren hasta los ríos o quebradas cercanas, contaminando así estos afluentes de agua y matando a los peces y demás animales que allí habitan.

En virtud de lo anterior, Estados Unidos y Europa ya se han adelantado estudios en búsqueda de nuevas alternativas en la pavimentación, contemplando que con mezclas asfálticas tibias se podrá disminuir este gran daño que se le está causando al ecosistema. La reducción en la emisión de gases tóxicos, así como el ahorro en el consumo de combustible en los procesos de mezclado y compactación, son unas de las principales ventajas de esta nueva tecnología. Tal vez no es una solución total para la contaminación, pero, definitivamente si es un alivio y una forma de reducirla considerablemente.

Esta tecnología se podrá usar siempre y cuando sea factible su implementación y cumpla con los requisitos técnicos y ambientales. Es decir, la inversión no debe ser muy alta, la resistencia de este pavimento con la mezcla asfáltica tibia debe ser mayor o al menos igual al de mezcla asfáltica caliente. La durabilidad debe ser prolongada, las plantas de mezclado deben ser accesibles, el proceso constructivo no debe ser muy engorroso y por supuesto, que ayude al medio ambiente con todas las ventajas que este tipo de mezcla tiene.

Con este proyecto se buscó crear una mezcla asfáltica alrededor de los 100° C, más comúnmente llamada mezcla asfáltica tibia, sabiendo que el agregado calentado a una temperatura inferior a la especificada, difícilmente se adhiere al asfalto, produciendo además, una mezcla de difícil manipulación que no se deja extender.

Por esta razón se adicionó un mineral llamado zeolita, en forma de polvo, que contiene entre un 20 y un 25% de agua de cristalización, la cual durante el proceso de fabricación de la mezcla libera progresivamente agua, ayudando a disminuir la viscosidad de la sustancia bituminosa, facilita la manejabilidad de la mezcla y permite un mezclado a temperatura inferior a la de una mezcla convencional con las mismas propiedades mecánicas. Esta manejabilidad a menor temperatura se mantiene hasta el momento de la puesta en obra de la mezcla, garantizando de esta forma unas características óptimas, especialmente en lo relativo a la facilidad de compactación.

Así mismo, se realizaron mezclas a diferentes temperaturas (140° y 100° C), unas con adición de zeolita y otras sin ésta. Para observar las diferencias entre estas dos tecnologías y hacer un comparativo entre ellas, se realizaron una serie de ensayos con el fin de comprobar la calidad de las mezclas.

## **1. MEZCLAS ASFÁLTICAS COMUNES**

### **1.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN GENERAL**

Una mezcla asfáltica es la combinación de asfalto con agregados minerales pétreos de diversos tamaños, en una proporción y temperatura adecuada. La proporción y temperatura a la cual se realice la mezcla determinaran 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 sollicitaciones del tránsito.
- Impermeable, para que los componentes no estén bajo la acción directa 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 N° 200)

5% de ligante asfáltico. (60 -70 ó 80 -100)

Los componentes de la mezcla son de vital importancia para el buen funcionamiento del pavimento. Es por esto, 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.

En el **Artículo (400 – 07)** de las Especificaciones Generales de Carreteras de la Norma INVIAS, se pueden observar que tipo de componentes debe tener una buena mezcla asfáltica.

Las mezclas asfálticas se clasifican según:

Parámetro	Tipo de mezcla
Fracciones de agregados	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura	Caliente
	Frió
Proporción de vacíos	Cerradas
	Semicerradas
	Abiertas
	Porosas
Tamaño máximo del agregado	Finas
	Gruesas
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

**Tabla 1.1.** Clasificación de las mezclas asfálticas.

Este proyecto se enfocó en la clasificación según la temperatura de mezclado, en la cual encontramos que existen mezclas asfálticas en caliente, en frío y, últimamente, un nuevo tipo de mezcla asfáltica tibia.

## 1.2. MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE

Una mezcla Asfáltica en Caliente es el tipo más común de mezcla asfáltica, 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 de 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 éste posee. A altas temperaturas (mayores a 100°C) el asfalto se comporta como un líquido viscoso, mientras que a bajas temperaturas (menores a 60°C) tiene un comportamiento visco-elástico.

**Figura 1.1.** Asfalto en estado liquido viscoso.



**Figura 1.2.** Asfalto en estado Visco-Elástico.



Una temperatura adecuada de los agregados es esencial para controlar la temperatura de la mezcla. Si los agregados son calentados excesivamente, puede provocar que el asfalto se endurezca de forma acelerada durante la etapa de mezclado. Si ocurre lo contrario, que el agregado sea calentado a una temperatura inferior a la especificada, el tiempo de mezclado será mayor debido a que el asfalto difícilmente se adherirá, produciendo una mezcla difícil de manipular y que no se deja extender. La proporción en peso del asfalto con respecto al total de la mezcla puede ser entre 3% y 6%.

La fabricación de mezclas asfálticas en caliente se debe regir por **Artículo (450 – 07)** de las Especificaciones Generales de Carreteras de la Norma INVIAS.

### 1.3. MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO

Una mezcla asfáltica en frío es una mezcla de agregados pétreos con emulsiones de asfalto fluidificado; cuya mezcla, aplicación y compactación, se realiza bajo condiciones ambientales y se caracteriza por la trabajabilidad que ésta presenta, semanas después de su fabricación. Esta propiedad se debe a que el ligante permanece con una baja viscosidad durante un largo periodo de tiempo, haciendo posible su almacenamiento. Este puede ser calentado hasta un máximo de **60°C**, mientras que los agregados no requieren secado, ni calentamiento alguno.

Así mismo, después de extender la mezcla en capas de espesor reducido, la evaporación del fluidificante hace que ésta se endurezca de forma rápida, entrando en un proceso de maduración en la cual se presenta un incremento de la resistencia y la cohesión, debido a la rotura de la emulsión. Si se desea retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío, se recomienda el sellado con lechadas asfálticas.

Una ventaja de este tipo de mezcla es que puede ser elaborada en la misma planta para la elaboración de mezclas en caliente, omitiendo el uso del sistema de secado y calentamiento del agregado y el asfalto. De igual forma, es posible que sea preparada sobre la calzada en la cual va a ser aplicada la mezcla, haciendo uso de maquinaria simple. Otra ventaja es que la emulsión asfáltica fluidificada se adapta más fácilmente a los agregados que contienen finos de difícil remoción y pueden ser mezclados durante un largo periodo de tiempo.

Las mezclas asfálticas en frío se utilizan principalmente en la construcción y mantenimiento de carreteras secundarias. Estas se rigen por el Artículo (440 – 07) “Mezcla Densa en Frío” de las Especificaciones Generales de Carreteras de la Norma INVIAS.

## 2. NUEVO TIPO DE MEZCLA ASFÁLTICA

### 2.1. MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA

La reducción de las temperaturas de producción de mezclas asfálticas presenta ventajas ambientales importantes sobre emisiones, consumo de energía y exposiciones laborales. La meta es conseguir una calidad adecuada de las mismas, a temperaturas de operación inferiores o a temperatura ambiente. Bajo estos criterios es necesario siempre evaluar nuevas alternativas de trabajo que permitan obtener procesos más eficientes y rentables en los diferentes entornos en que se trabaja.

Este proyecto se basó en la creación de una mezcla asfáltica tibia, con la que se pueden superar ciertas desventajas que las dos mezclas asfálticas existentes y explicadas anteriormente (en Caliente y en Frio) presentan.

Esta mezcla asfáltica tibia es una mezcla en la cual el agregado y el asfalto son calentados hasta una temperatura de alrededor de los **100°C**, a la cual se le añade algún aditivo (Según el tipo de tecnología) que ayude a que el asfalto recubra completamente el agregado durante la etapa de mezclado y que permita extender y compactar fácilmente la mezcla.

El problema más significativo de las mezclas asfálticas en caliente es que generan gran cantidad de gases tóxicos, entre los cuales encontramos el  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}_2$ ; así mismo, se generan emisiones contaminantes de los COV (Compuestos Orgánicos Volátiles) procedentes del betún debido a las altas temperaturas empleadas, lo cual produce un sobrecalentamiento de la atmósfera.

Por lo tanto, desde este punto de vista, la tecnología de mezclas en caliente va en contra de la tendencia de eliminación y limitación de la emisión de gases a la atmósfera, que el Protocolo de Kioto impulsa.

El Protocolo de Kioto es un acuerdo internacional firmado en 1997, en el cual se pretende detener el cambio climático, reduciendo en un 5% las emisiones de gases que ocasionan el calentamiento global. Entre ellos están: Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), Gas Metano ( $\text{CH}_4$ ), Oxido Nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de Azufre ( $\text{SF}_6$ ). Con el fin de verificar el cumplimiento de este acuerdo, se hallará el promedio de las emisiones generadas en el periodo de 2008 a 2012 y se comparará con las emisiones generadas en el año 1990.

Además de producir un efecto devastador a la atmosfera, estos gases producidos por las mezclas asfálticas en caliente, también causan un daño enorme a los trabajadores que la manipulan, debido a que se ven forzados a inhalarlos, causando serios daños en sus pulmones; así como la posibilidad de sufrir alguna quemadura de alto riesgo por las altas temperaturas que se generan. Adicionalmente, el daño que se le causa al ecosistema es incalculable, debido a que al ser extendida y compactada, se presenta una escorrentía de bitumen, la cual llega a los afluentes de agua afectando la flora y la fauna encontradas en el sitio.

Gracias a las grandes cualidades de las mezclas asfálticas tibias, estos efectos negativos para la atmosfera y el medio ambiente pueden disminuir radicalmente, por la reducción de temperatura que este tipo de mezcla maneja. Así mismo, cabe aclarar que esta reducción en la temperatura no afecta la calidad del pavimento gracias al aditivo que se utiliza, mientras que las mezclas asfálticas en frio por su baja temperatura, si se ven afectadas.

**Figura 2.1.** Humos generados por la mezcla asfáltica en caliente.



## 2.2. VENTAJAS DE LA MEZCLA ASFALTICA TIBIA

Hoy en día se pueden enmarcar ciertas ventajas de las mezclas asfálticas tibias frente a las mezclas en caliente:

- Tiene la misma resistencia y calidad.
- Ahorro de energía de mezclado y compactación.
- Ahorro de combustible.
- Menor oxidación del asfalto.
- Usa las mismas especificaciones.
- Menor desgaste de los elementos mecánicos de la planta.
- La mezcla se puede transportar mayores distancias.
- Facilita la extensión y compactación de la mezcla.
- Pronta apertura al tráfico después de la compactación.
- La pavimentación se puede realizar con un clima más frío.
- Disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Reducción en la producción de humos y olores de la fabricación y puesta en obra.
- Mejores condiciones de trabajo de los operarios.
- Puede usar las plantas existentes para la fabricación de mezclas en caliente.

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.

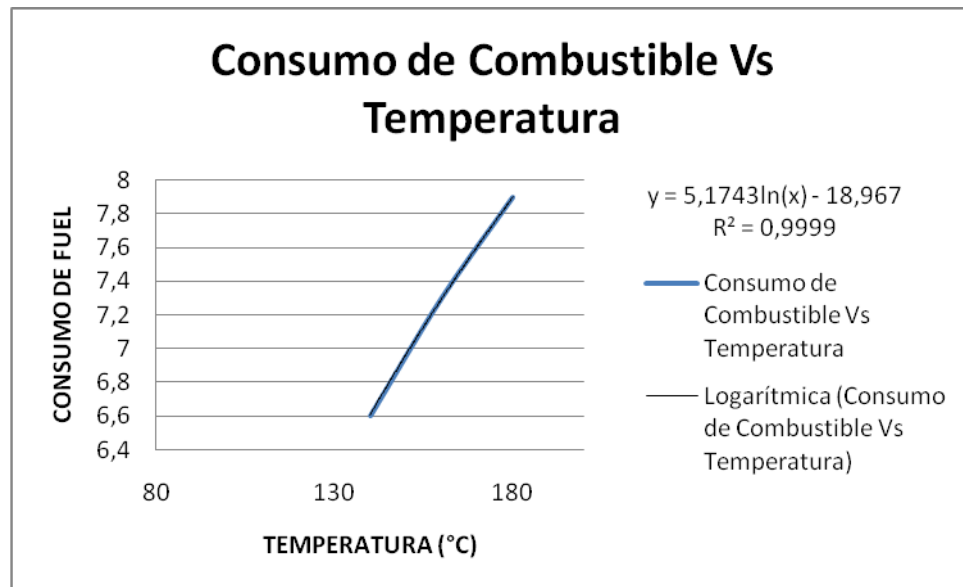
Tabla 2.1. Consumo de combustible en función a la temperatura.

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

(Comunicación libre: mezclas semicalientes con Aspha-min . ecología en acción)

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 2.2.** Consumo de Combustible vs Temperatura.



Reemplazando:

$$Y = 5,1743 * \ln(100^\circ\text{C}) - 18,67$$

$$Y = 4,9 \text{ (Kg Fuel/T Aglomerado) Consumo de combustible para } 100^\circ\text{C}$$

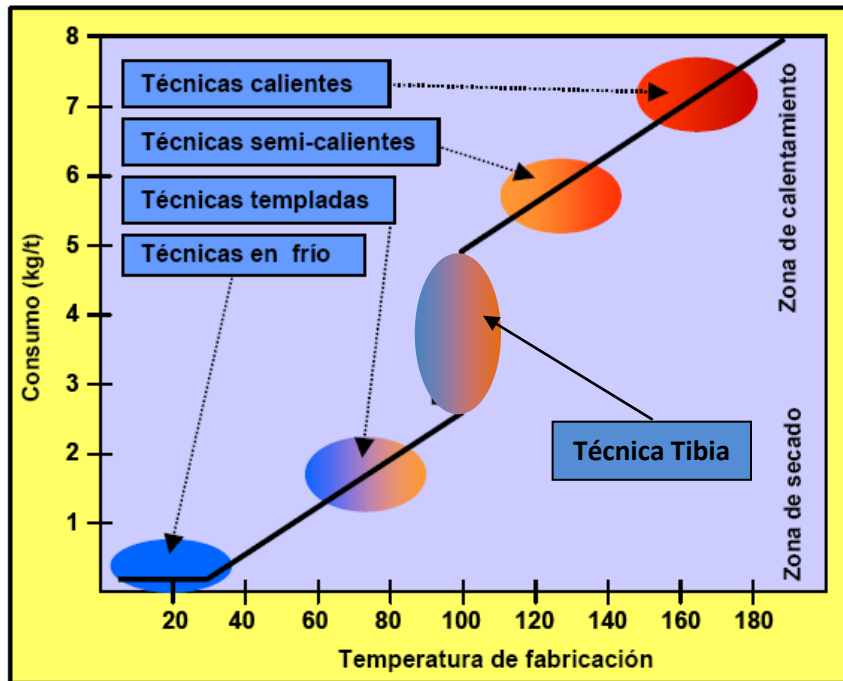
**Tabla 2.2.** Consumo de combustible para una temperatura de 100°C.

TEMPERATURA DE LOS ÁRIDOS ( °C)	CONSUMO DE COMBUSITBLE ( KG FUEL/T AGLOMERADO)
100	4,9

Por lo tanto, para la elaboración de una mezcla asfáltica tibia, a 100°C, el ahorro de combustible (38%) se hace significativo en comparación con el consumo de combustible para las mezclas asfálticas en caliente.

### 2.3. TECNOLOGÍAS PARA LA FABRICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS SEMI-CALIENTES.

Figura 2.3. Técnicas de fabricación de mezclas asfálticas.



(Fuente: Alberto Bardesi y María Martínez Nicolau, 2005)

Las mezclas asfálticas tibias son un intermedio entre las mezclas Semi-calientes y las mezclas templadas, en cuanto a temperatura se refiere. Debido a que las franjas de temperatura de la técnica Semi-caliente (120°C a 140°C) y la Técnica Tibia (100°C) son muy cercanas, se creó la mezcla asfáltica tibia basándose en las tecnologías utilizadas en la fabricación de mezclas asfálticas Semi-calientes.

Hoy en día existen tres tecnologías patentadas para la fabricación de las mezclas asfálticas Semi-calientes:

### **2.3.1 Tecnología Wam-Foam® (Patentado Por Shell Y Kolo Veidekke)**

Esta tecnología emplea un sistema ligante de dos componentes:

- Blando, con este componente en la primera etapa del mezclado se envuelve totalmente el agregado.
- Duro, este componente se espuma introduciéndole agua en el momento de su entrada en el mezclador.

Una buena trabajabilidad de la mezcla se logra mediante la reducción de la viscosidad del ligante, la cual se puede compactar a temperaturas de (80 - 90 °C). El problema de esta tecnología es que requiere modificaciones en la planta de fabricación, mientras que los beneficios siguen siendo los de una mezcla de menor temperatura; ahorro de combustible (30%), reducción en la emisión de partículas sólidas (50%) y gases de efecto invernadero (30%).

### **2.3.2. Tecnología de Aditivos Orgánicos**

Con el fin de modificar la curva de Viscosidad vs. Temperatura, esta tecnología emplea aditivos orgánicos de bajo punto de fusión. Los aditivos empleados y patentados son:

#### **2.3.2.1. Sasobit®**

Es una resina hidrocarbonada soluble en el asfalto, formada por cadenas alifáticas largas, presente en forma de polvo o de hojuelas. Esta se incorpora al asfalto en un 3%, antes de realizar el mezclado.

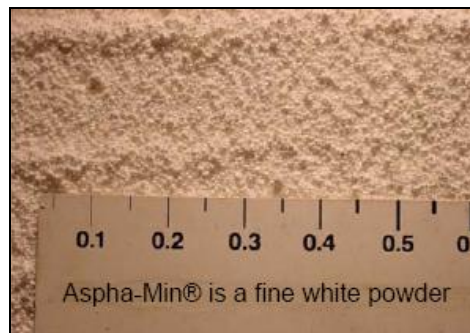
#### **2.3.2.2. Asphaltan B®**

Es una resina estérica de bajo peso molecular presente en forma granular, la cual se añade en un 2% a un 4 % directamente al mezclador o directamente al asfalto antes de verter, este puede ser convencional o modificado.

### 2.3.3. Tecnología Aspha-Min<sup>®</sup>, (Patentado por Eurovia.)

Esta tecnología se basa en la adición de 0,3% de la masa de la mezcla, de una zeolita sintética en forma de polvo, al mismo tiempo en que el asfalto se vierte en el mezclador. Esta zeolita al calentarse, libera agua de hidratación la cual hace que el asfalto se espume, permitiendo la reducción de la temperatura de fabricación. Este procedimiento puede ser empleado con todo tipo de asfaltos ya sean convencionales o modificados, así como en el reciclado de mezclas.

**Figura 2.4.** Zeolita sintética Asphan-min.



(warm mix asphalt technology - Matthew Corrigan)

**Tabla 2.3.** Temperatura de fabricación y extendido.

Temperatura de fabricación y extendido			
T° de las mezclas	Sin zeolita	Con zeolita	variación
En los camiones	159°C	131°C	-28°C
En la extendedora	157°C	130°C	-27°C

(Comunicación libre: mezclas semicalientes con Aspha-min<sup>®</sup>. ecología en acción)

**Tabla 2.4.** Efecto en las propiedades del aglomerado.

Efecto en las propiedades del aglomerado				
Especificación		Sin zeolita	Con Zeolita	Variación
% huecos	$4 \leq v \leq 8$	6,5	7,3	+0,8
Textura (mm)	$\geq 0,8$	0,98	1,03	+0,05

(Comunicación libre: mezclas semicalientes con Aspha-min<sup>®</sup>. ecología en acción)

Al igual que en las demás mezclas a menor temperatura de la usual, esta tecnología también presenta gran cantidad de beneficios ambientales y de consumo de combustible. Produce un ahorro de 20% en la cantidad de combustible consumido por la planta, se producen reducciones de un 18% a 23% en las emisiones de COV, COV, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>.

**Tabla 2.5.** Emisiones de mezcla asfáltica caliente y mezcla asfáltica semi-caliente.

<b>Emisiones de las mezclas en calientes ( mg/m<sup>3</sup> )</b>			
<b>170°C sin zeolita</b>		<b>140 con zeolita Aspha-Min</b>	
<b>Aerosoles</b>	<b>Aerosoles + vapor</b>	<b>Aerosoles</b>	<b>Aerosoles + vapor</b>
< 0,8	0,8-2,7	< 0,36	0,36-0,6

(Comunicación libre: mezclas semicalientes con Aspha-min . ecología en acción)

**Figura 2.5.** Mezcla asfáltica Semi-caliente.



**Figura 2.6.** Mezcla asfáltica caliente.



(warm mix asphalt technology - Matthew Corrigan)

Debido a los resultados obtenidos en obra esta tecnología con zeolita Aspha-Min ha demostrado su utilidad para la fabricación de mezclas bituminosas, lo cual la ha hecho merecedora a el reconocimiento por parte del Director del “Service d’études techniques des routes et autoroutes (Sétra)” otorgando una Carta de Innovación a esta tecnología y resaltando su contribución a la reducción de contaminantes a la atmósfera y por la reducción del consumo energético.

### 3. PROCESO DE INVESTIGACION

#### 3.1. TECNOLOGÍA EMPLEADA EN LA INVESTIGACIÓN PARA LA FABRICACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA

Este proyecto empleó el tipo de tecnología patentado por Eurovia, en la cual para fabricar la mezcla asfáltica tibia se utilizó como aditivo, zeolita. Se eligió esta tecnología debido a los innumerables beneficios ecológicos que esta posee y a que en el país (Colombia) existen yacimientos de zeolita, lo cual permite la futura utilización de esta tecnología en la pavimentación vial.

Para la investigación se realizaron algunas modificaciones a la tecnología;

- La temperatura de mezclado fue a 100°C.
- La zeolita empleada es proveniente de Barrancabermeja.
- Se utilizó una proporción de 2.84% sobre la masa de la mezcla.

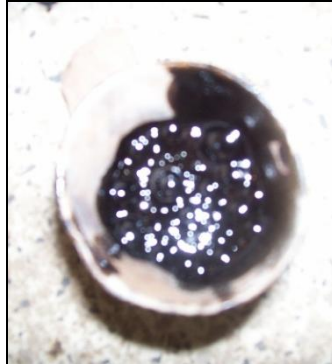
La zeolita es un aluminosilicato presente de forma natural en rocas de origen volcánico que contiene óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), con cavidades de dimensiones moleculares de 3 a 10 angstrom. Este mineral tiene iones grandes y moléculas de agua con libertad de movimiento, lo cual le permite el intercambio iónico. Gracias a esta estructura molecular la zeolita tiene la capacidad de desprender agua de manera continua a medida que se calienta a temperaturas relativamente bajas, teniendo la posibilidad de ser rehidratada sumergiéndola en agua.

**Figura 3.1.** Zeolita húmeda – Zeolita seca.



Gracias a esta propiedad de la zeolita, fue posible la fabricación de la mezcla asfáltica tibia a 100°C, debido a que al ser añadida a la mezcla, producía un espumado del asfalto, el cual se expandía y permitía el fácil y total recubrimiento de los agregados, reduciendo el tiempo de mezclado.

**Figura 3.2.** Zeolita añadida al asfalto caliente.



Asfalto espumándose

**Figura 3.3.** Mezclas asfáltica tibia (100°C) con zeolita



## **3.2. DESCRIPCIÓN**

A continuación se presenta una breve descripción con las etapas en que se desarrollo esta investigación:

- Consulta bibliográfica.
- Caracterización de materiales utilizados.
- Creación de una mezcla asfáltica tibia.
- Diseño y fabricación de probetas.
- Ensayo de muestras.
- Análisis de resultados.

## **3.3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES EMPLEADOS**

### **3.3.1. Agregado Mineral**

#### **3.3.1.1. Origen de los Agregados.**

Para la realización de este proyecto se trabajó con el agregado proveniente del yacimiento ubicado junto a la cuenca media del cañón del río Chicamocha (Pescadero), departamento de Santander. El material fue suministrado por la empresa PAVIANDI.

#### **3.3.1.2. Ensayos Realizados al Agregado.**

Es necesario tener en cuenta que para la realización de obras importantes, la clasificación visual de los agregados debe ser complementada con ensayos de laboratorio que determinen características funcionales, por esto se debe cumplir los requisitos de calidad del agregado mineral sugeridos por el **Artículo (450 – 07)** de las Especificaciones Generales de Carreteras de la Norma INVIAS, aplicable al diseño de mezclas MDC-2. El agregado de Pescadero tiene un estudio realizado en el laboratorio de Pavimentos de la Universidad Industrial de Santander y en el anexo A se pueden apreciar los resultados.

### **3.3.2. Asfalto**

Se utilizó asfalto (60-70), producido por la refinería de ECOPETROL de Barrancabermeja, el cual fue suministrado por la empresa Tecno Pavimentos. Se empleo este tipo de asfalto debido a que si la mezcla asfáltica tibia era posible realizarla con el asfalto (60-70), también cumpliría con un asfalto menos rígido como el (80-100); así mismo, es el asfalto adecuado para el tipo de temperatura promedio del país.

#### **3.3.2.1. Pruebas efectuadas al asfalto**

##### **3.3.2.1.1. Ensayo de Penetración**

El ensayo se realizo con énfasis en la norma “Penetración de los materiales asfálticos” I.N.V. E – 706 – 07, con el fin de determinar la consistencia del material asfaltico y encontrar que tan rígido es.

### **3.4. CREACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA**

Con el fin de poder realizar una mezcla asfáltica a una temperatura de 100°C de fácil recubrimiento, se procedió a realizar una serie de mezclas para encontrar la cantidad, forma y momento ideal para añadir la zeolita. De igual manera, se realizaron mezclas a diferentes temperaturas sin adición de zeolita, para observar el comportamiento de éstas (mezclas de control).

#### **3.4.1. Mezclas de Control**

Estas mezclas se realizaron con el fin de observar el comportamiento de la combinación entre el asfalto y los agregados a diferentes temperaturas, comparando la calidad del recubrimiento y el tiempo que éstos tardaban en mezclarse.

### Diseño de mezcla

- Se manejó las franjas granulométricas del tipo de mezcla MDC-2.
- Porcentaje de asfalto utilizado: 5.5%

**Tabla 3.1.** Franjas granulométricas.

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

**Tabla 3.2.** Granulometría mezclas de control.

<b>Peso de la muestra (g)</b>	300
-------------------------------	-----

GRANULOMETRÍA		
Tamiz	Paviandi	
	%Pasa	%Retiene
¾"	100	
½"	90	10
3/8"	79	11
No. 4	56	23
No. 10	39	17
No. 40	15	24
No. 80	9	6
No. 200	6	3
Pasa 200		6
<b>Total</b>		<b>100</b>

Se realizaron las siguientes mezclas de control:

- Mezcla asfáltica a 140°C
- Mezcla asfáltica a 100°C
- Mezcla asfáltica a 80°C

### **3.4.2. Mezclas Asfálticas Tibias**

Luego de observar y analizar las mezclas de control, se procedió a realizar el nuevo tipo de mezcla asfáltica tibia a 100°C, agregando el aditivo mineral zeolita, variando el porcentaje, la húmeda y etapa de aplicación de esta.

#### **3.4.2.1. Pruebas Efectuadas a la Zeolita**

##### **3.4.2.1.1. Ensayo de Humedad**

Se colocó 50g de zeolita húmeda, en una tara de 11g de peso, y se introdujo la tara en el horno a una temperatura de 100°C, durante 24 horas; después se retiró la tara del horno y se procedió a pesar la muestra de zeolita ya seca, con el fin de hallar la humedad de la zeolita.

##### **3.4.2.1.2. Calentar Zeolita**

Se tomó una muestra de zeolita seca y una muestra de zeolita húmeda, se calentaron y se observó el comportamiento de estas al aplicarles calor.

##### **3.4.2.1.3. Reacción de la Zeolita con Asfalto Caliente**

Se calentó asfalto hasta llegar a una temperatura alrededor de los 100°C, a continuación se vertió el asfalto en dos taras, luego se agregó zeolita húmeda y zeolita seca respectivamente a cada una de las taras y se observó la reacción producida en cada una de ellas.

##### **3.4.2.1.4. Semejanza entre Zeolita Húmeda y Fino Húmedo**

Luego de haberse realizado el ensayo de humedad a la zeolita, se pudo determinar el porcentaje de agua que contenía y se procedió a agregar esa misma cantidad de agua al fino. Después este se vertió en asfalto caliente y se observó la reacción. Este proceso se realizó con el fin de observar si el fino húmedo produce la misma espumación que la zeolita húmeda produce.

#### **3.4.2.2. Mezclas de Prueba**

Con el fin de encontrar la mejor metodología para la fabricación de una mezcla asfáltica tibia, se realizaron una serie de mezclas de prueba donde se pudiera observar el buen recubrimiento del agregado, por el asfalto a una temperatura de 100°C, mediante el uso de la zeolita. Se varió el porcentaje de zeolita utilizada y la forma de aplicarla.

##### **3.4.2.2.1. Mezcla Asfáltica a 100°C, con 0,3% (de la Totalidad de la Mezcla) de Zeolita seca, Agregada al Asfalto Antes de Verter**

Se utilizó 300g de muestra, de los cuales 5.5% corresponden al porcentaje de asfalto y 0,3% al porcentaje de zeolita seca, el restante es granulometría.

Para generar esta mezcla, se agrega zeolita seca al asfalto caliente para que éste produzca espumación; se transfieren los agregados a un recipiente de mezclado y se procede a elaborar una abertura en su centro, dentro del cual se vierte el asfalto espumado por acción de la zeolita seca, debiendo estar todos los materiales en ese instante a una temperatura de 100°C, para el proceso de mezclado.

##### **3.4.2.2.2. Mezcla Asfáltica a 100°C, con 0,3% (de la Totalidad de la Mezcla) de Zeolita Húmeda, Agregada al Asfalto Antes de Verter**

Se utilizó 300g de muestra, de los cuales 5.5% corresponden al porcentaje de asfalto, y 0,3% al porcentaje de zeolita húmeda; el restante es granulometría.

Para generar esta mezcla, se agrega zeolita húmeda al asfalto caliente para que este produzca mayor espumación; se transfieren los agregados a un recipiente de mezclado y se procede a elaborar una abertura en su centro, dentro del cual se vierte el asfalto espumado por acción de la zeolita húmeda, debiendo estar todos los materiales en ese instante a una temperatura de 100°C, para el proceso de mezclado.

#### **3.4.2.2.3. Mezcla Asfáltica a 100°C, Reemplazando Fino (Ret. 200), por Zeolita Húmeda**

Se utilizó 300g de muestra, de los cuales 5.5% corresponden al porcentaje de asfalto y 2,84% al porcentaje de zeolita húmeda, correspondiente al porcentaje de fino retiene 200 el cual es reemplazado; el restante es granulometría.

Para generar esta mezcla, se transfieren los agregados a un recipiente de mezclado y se hace a continuación una abertura en su centro, dentro del cual se vierte la zeolita húmeda y luego el asfalto, debiendo estar todos los materiales a una temperatura de 100°C, excepto la zeolita, para el proceso de mezclado.

#### **3.4.2.2.4. Mezcla Asfáltica a 100°C, Reemplazando el 50% de Fino (Pasa 200), por Zeolita Húmeda**

Se utilizó 300g de muestra, de los cuales 5.5% corresponden al porcentaje de asfalto y 2,84% al porcentaje de zeolita húmeda correspondiente a la mitad del porcentaje de fino pasa 200 el cual es reemplazado, el restante es granulometría.

Para generar esta mezcla, se transfieren los agregados a un recipiente de mezclado y se hace a continuación una abertura en su centro, dentro del cual se vierte la zeolita húmeda y luego el asfalto, debiendo estar todos los materiales a una temperatura de 100°C, excepto la zeolita, para el proceso de mezclado.

### 3.5. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

Después de estudiar y analizar detalladamente los resultados obtenidos sobre el comportamiento de las mezclas de prueba, se tomó la decisión de adoptar como óptima para la mezcla asfáltica tibia, ***la Mezcla asfáltica a 100°C, reemplazando el 50% de fino (Pasa 200), por zeolita húmeda.***

#### 3.5.1. Metodología Usada para la Fabricación de Probetas

Para la fabricación de las probetas se utilizó la metodología de la norma “Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall” (INV E – 748 – 07), para cada probeta se necesitan aproximadamente 1200 g de ingredientes.

Este método consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de aproximadamente 101.6 mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2½") de altura, y describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de la resistencia a la deformación plástica de especímenes cilíndricos de mezclas asfálticas para pavimentación, empleando el aparato Marshall; tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio como para el control en obra de las mismas.

#### 3.5.2. Preparación de Probetas

Número de probetas fabricadas y temperatura de mezcla:

- Mezcla asfáltica a 100°C, reemplazando el 50% de fino (Pasa 200), por zeolita húmeda
  - 3 probetas para ser afectadas por el agua
  - 3 probetas para determinar la resistencia máxima
  
- Mezcla asfáltica a 100°C
  - 3 probetas para ser afectadas por el agua
  - 3 probetas para determinar la resistencia máxima

- Mezcla asfáltica a 140°C
  - 3 probetas para ser afectadas por el agua
  - 3 probetas para determinar la resistencia máxima

TOTAL PROBETAS FABRICADAS = 18

Se utilizó asfalto (60-70) para cada una de las mezclas; y se optó por hacer triplicados de probetas para tener una mayor precisión mediante el promedio de los datos.

### 3.5.3. Preparación de las Mezclas:

- **Mezcla Asfáltica a 100°C, Reemplazando el 50% de Fino (Pasa 200), por Zeolita Húmeda (Mezcla Asfáltica Tibia)**

**Tabla 3.3.** Granulometría para realizar probetas con mezcla asfáltica tibia.

<b>Peso del agregado (g)</b>	1134
<b>Peso del asfalto (g)</b>	66
<b>Peso de la muestra (g)</b>	1200

<b>GRANULOMETRÍA</b>			
<b>Tamiz</b>	<b>%Pasa</b>	<b>%Retiene</b>	<b>Peso (g)</b>
3/4"	100		
1/2"	90	10	113,4
3/8"	79	11	124,74
No. 4	56	23	260,82
No. 10	39	17	192,78
No. 40	15	24	272,16
No. 80	9	6	68,04
No. 200	6	3	34,02
Pasa 200		3	34,02
Zeolita		3	34,02
<b>Total</b>		<b>100</b>	<b>1134</b>

- **Mezcla asfáltica a 100°C y 140°C (Mezclas de control)**

**Tabla 3.4.** Granulometría para realizar probetas con mezcla asfáltica a 100°C y 140°C.

<b>Peso del agregado (g)</b>	1134
<b>Peso del asfalto (g)</b>	66
<b>Peso de la muestra (g)</b>	1200

<b>GRANULOMETRÍA</b>			
<b>Tamiz</b>	<b>%Pasa</b>	<b>%Retiene</b>	<b>Peso (g)</b>
3/4"	100		
1/2"	90	10	113,4
3/8"	79	11	124,74
No. 4	56	23	260,82
No. 10	39	17	192,78
No. 40	15	24	272,16
No. 80	9	6	68,04
No. 200	6	3	34,02
Pasa 200		6	68,04
<b>Total</b>		<b>100</b>	<b>1134</b>

Se transfieren los agregados a un recipiente de mezclado y se hace a continuación una abertura en su centro, dentro del cual se vierte la zeolita húmeda (si es el caso) y luego el asfalto, debiendo estar todos los materiales en ese instante alrededor de una temperatura de 100°C ó 140°C, respectivamente, para el proceso de mezcla.

#### **3.5.4. Compactación de las Probetas:**

Simultáneamente con la preparación de la mezcla, el molde se pone a calentar. A continuación se coloca una hoja de papel en el fondo del molde antes de colocar la mezcla, con el fin de que no se pegue, luego se vierte la mezcla en el molde y se le dan 15 golpes por un costado. Se coloca otra hoja de papel sobre la superficie de la mezcla y se procede a aplicar 75 golpes con el martillo Marshall. Se retira la placa de base, y se coloca en el extremo opuesto del molde; se vuelve a montar éste en la plataforma y se aplica el mismo número de golpes a la cara invertida de la muestra.

Después de la compactación, se retira la base y se deja enfriar la muestra 24 horas; luego se saca cuidadosamente la probeta del molde mediante un gato hidráulico, se marca, se mide su espesor y se coloca sobre una superficie plana.

**Figura 3.4.** Martillo de compactación



**Figura 3.5.** Soporte para molde



y Pedestal de compactación

### **3.6. PRUEBAS EFECTUADAS SOBRE LAS MUESTRAS**

Con el fin de evaluar la resistencia, la calidad y la capacidad de las mezclas asfálticas a temperaturas de 100°C, 140°C y 100°C con adición de zeolita, 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.

#### **3.6.1. Medición de Densidad de Mezclas Asfálticas Compactadas**

Para la medición de 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” (INV E – 733 – 07).

Este método consiste en el empleo de mezclas asfálticas compactas, compuestas con granulometría MDC-2 de textura superficial densa e impermeable y describe el

procedimiento que se debe seguir para la medición de la densidad Bulk, determinada en relación a su peso seco, sumergido y saturado en superficie seca.

**Figura 3.6.** Muestra pesada en seco



**Figura 3.7.** Muestra pesada en agua



### **3.6.2. Determinación del Módulo de Elasticidad**

Este es un ensayo que permite obtener la resistencia a la compresión simple de mezclas bituminosas compactadas, así como su deformabilidad bajo efecto de carga axial.

Las probetas se sometieron a “baño de maría”, durante 4 horas, a una temperatura aproximada de 15°C. Para que la probeta conservara la temperatura durante el ensayo se introdujo dentro de un recipiente metálico, en el cual se mantuvo el agua a la temperatura requerida.

Al momento de hallar el módulo de elasticidad se tuvo como característica importante, la aplicación de la carga a una velocidad de (0.1”/ minuto); el modulo elástico se determinó, aplicando progresivamente el 30% de la carga de falla y tomando lecturas de deformación.

Se utilizó la metodología de la Norma “Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas” (INV E – 747 – 07).

**Figura 3.8.** Maquina Marshall para determinación de modulo elástico.



### **3.6.3. Medición de Estabilidad y Flujo**

Para llevar a cabo la medición de estabilidad y flujo se colocaron las probetas en un baño de agua durante 40 minutos, manteniendo el baño a una temperatura aproximada de 60°C.

Seguidamente se retira una probeta del baño de agua, al instante, se procedió a lubricar las barras guías y se colocó centrada la probeta en las mordazas y se situó el conjunto centrando en la prensa Marshall.

Se aplicó inmediatamente la carga sobre la probeta con la prensa a una rata de deformación constante de 50.8 mm (2") por minuto, hasta que ocurrió la falla. Este procedimiento se repitió con todas las probetas elaboradas.

Se utilizó la metodología de la norma "Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall" (INV E – 748 – 07).

**Figura 3.9.** Maquina Marshall para determinación de la estabilidad y flujo.



#### **3.6.4. Determinación del Efecto del Agua Sobre la Resistencia a la Compresión de las Mezclas Asfálticas Compactadas**

Con el fin de medir la pérdida de resistencia a la compresión que se produce por la acción del agua sobre las mezclas asfálticas compactadas, se utilizó la metodología de la norma “Ensayo de Inmersión-Compresión” (INV E – 738 – 07).

Este método consiste en la determinación de un índice numérico de pérdida producida al comparar las resistencias a la compresión simple obtenidas entre probetas recién moldeadas y curadas al aire y probetas duplicadas sometidas a la acción del agua, en las condiciones que se señalan en esta norma.

Para llevar a cabo este método, se tomó un grupo de probetas, a las cuales se les realizó una a una la inmersión en vacío durante 5 minutos; posteriormente se sumergieron en un baño de agua a una temperatura aproximada de 60°C durante 24 horas, y al final de este periodo se trasladaron a un baño de agua regulado a 15°C durante 2 horas. A continuación se determinó la resistencia a la compresión de acuerdo a la norma (INV E – 747).

**Figura 3.10.** Inmersión en vacío



**Figura 3.11.** Probetas en agua a 15°C



**Figura 3.12.** Baño de maría a 60°C



### **3.6.5. 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” (INV E – 736).

Se introdujeron las probetas al horno durante 20 minutos a una alta temperatura con el fin de hacer más fácil la desintegración de cada una de ellas para realizar posteriormente el ensayo de vacíos.

A continuación se tomó un erlenmeyer y se procedió a pesarlo, seguidamente se le introdujo agua y se le aplicó vacío, se peso el conjunto (erlenmeyer + agua); por último, se le agregó al conjunto (erlenmeyer + agua) parte de la muestra desintegrada (800gr), con el fin de hallar la gravedad máxima medida (Gmm) y con ella el porcentaje de vacíos que tenía cada muestra.

**Figura 3.13.** Sistema de vacío



**Figura 3.14.** Erlenmeyer con la muestra



## 4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados a las muestras, así como la descripción del comportamiento y características finales de las mezclas.

### 4.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES EMPLEADOS

#### 4.1.1. Ensayo de Penetración

Según el ensayo de penetración, el asfalto es (60-70).

Figura 4.1. Penetrómetro



Penetración: 61 décimas de mm

Figura 4.2. Aguja de penetración



Figura 4.3. Moldes de la muestra



## 4.2. CREACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA

### 4.2.1. Mezclas de Control

#### 4.2.1.1. Mezcla Asfáltica a 140°C



**Figura 4.4.** Mezcla asfáltica a 140°C.

- Total recubrimiento de los agregados.
- Facilidad en el mezclado.
- Tiempo de mezclado corto.
- Temperatura de mezclado (140°C).
- Gran producción de gases.

#### 4.2.1.2. Mezcla Asfáltica a 100°C



**Figura 4.5.** Mezcla asfáltica a 100°C.

- Aparentemente quedó bien recubierta.
- Difícil mezclado.
- Tiempo de mezclado largo.
- Pocos vapores y gases.
- Temperatura de mezclado (100°C)

#### 4.2.1.3. Mezcla Asfáltica a 80°C



**Figura 4.6.** Mezcla asfáltica a 80°C.

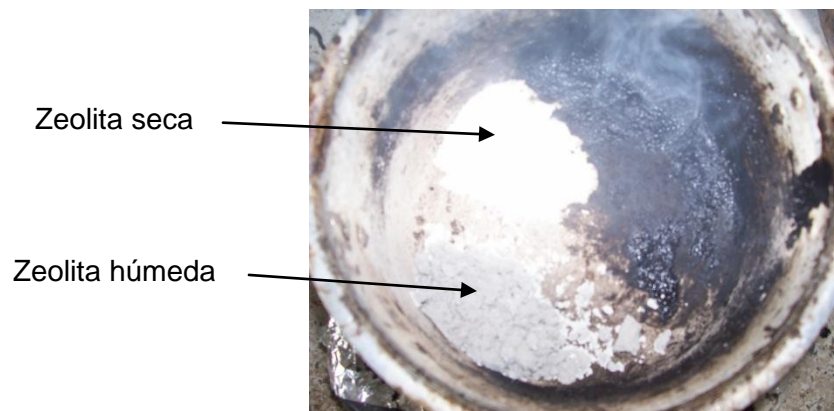
- No quedó bien recubierta.
- Difícil mezclado.
- Tiempo de mezclado largo.
- Pocos vapores y gases.
- Temperatura de mezclado (80°C)

### 4.3. MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS

#### 4.3.1. Pruebas Efectuadas a la Zeolita

##### 4.3.1.1. Calentar Zeolita

Figura 4.7. Calentando Zeolita seca y húmeda.



No se observó una reacción significativa en ninguno de los dos casos. Solo se produjo una pequeña liberación de agua.

##### 4.3.1.2. Ensayo de Humedad

Temperatura en el horno: 100°C

Peso tara: 11g

Peso zeolita húmeda: 50g

Peso tara + zeolita húmeda: 61g

Peso zeolita seca + tara: 46.08g

Duración del secado: 24 horas

(Peso tara + zeolita húmeda) - (Peso zeolita seca + tara)

61g - 46.08g - 11g = 3.92g

% de humedad de la zeolita: **7.84%**

#### 4.3.1.3. Reacción de la Zeolita con Asfalto Caliente

##### Zeolita Seca Agregada al Asfalto

**Figura 4.8.** Añadiendo Zeolita seca



**Figura 4.9.** Asfalto efervesciendo



Al agregar la zeolita seca al asfalto caliente, este produjo un espumado o efervescencia como se puede apreciar en la imagen. El asfalto se expandió 2 cm.

##### Zeolita Húmeda Agregada al Asfalto

**Figura 4.10.** Añadiendo Zeolita húmeda



**Figura 4.11.** Asfalto expandiéndose



Al agregar la zeolita húmeda al asfalto caliente se observó una espumación y expansión significativa. La expansión y espumación del asfalto fue mayor con zeolita húmeda (4 cm), que con zeolita seca (2 cm).

#### 4.3.1.4. Semejanza entre Zeolita Húmeda y Fino Húmedo

Se percibieron burbujas en el asfalto caliente al agregarle el fino húmedo, pero el asfalto no se expande de igual forma como cuando se le agrega zeolita. Se concluye que con fino húmedo no es posible realizar la mezcla asfáltica tibia, debido a que es necesaria la expansión y efervescencia del asfalto para lograr recubrir muy bien todo el agregado.

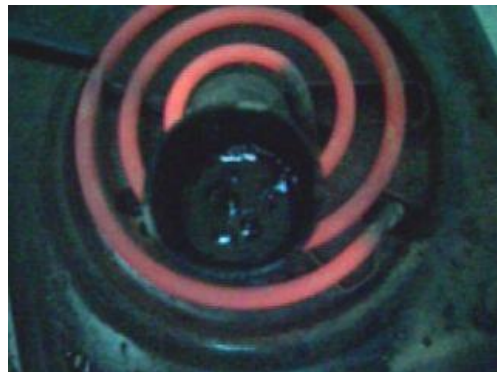
**Figura 4.12.**

Fino húmedo agregado al asfalto caliente



**Figura 4.13.**

Asfalto produciendo pocas burbujas



% de Humedad del fino: 7.84%

#### 4.3.2. Mezclas de Prueba

##### 4.3.2.1. Mezcla Asfáltica a 100°C, con 0,3%(de la Totalidad de la Mezcla) de Zeolita Húmeda, Agregada al Asfalto Antes de Verter.



Figura 4.14.

- ✓ Realmente la mezcla se hizo a 90°C, pues cuando empezó a mezclar, la temperatura se fue bajando.
- ✓ Se agregó la zeolita húmeda (0,3%) al asfalto, se percibieron burbujas y una expansión, luego se vertió en el agregado y se mezcló.
- ✓ Aparentemente el agregado quedó bien cubierto.
- ✓ Se Utilizó un % de asfalto de 5.5 = 16.5g
- ✓ Se empleó 300g de granulometría
- ✓ El tiempo de mezclado fue extenso

##### 4.3.2.2. Mezcla Asfáltica a 100°C, con 0,3% (de la Totalidad de la Mezcla) de Zeolita Seca, Agregada al Asfalto Antes de Verter.



Figura 4.15.

- ✓ Aparentemente la granulometría quedó bien cubierta.
- ✓ La mezcla se hizo a 100°C.
- ✓ Se agregó la zeolita seca al asfalto, se percibieron burbujas y una expansión, luego se vertió en el agregado y se mezcló.
- ✓ Se Utilizó un % de asfalto de 5.5 = 16.5g
- ✓ Se empleó 300g de granulometría.
- ✓ % de zeolita: 0,3%
- ✓ El tiempo de mezclado fue extenso.

#### 4.3.2.3. Mezcla Asfáltica a 100°C, Reemplazando Fino (Ret. 200), por Zeolita Húmeda



Figura 4.16.

- ✓ Se agregó la zeolita húmeda al agregado caliente y encima se le vertió el asfalto caliente y se mezcló.
- ✓ Al agregar el asfalto al resto de la mezcla (zeolita húmeda + granulometría) se percibieron pocas burbujas.
- ✓ Esta vez la mezcla fue más fácil; la granulometría se cubrió en menor tiempo, y aparentemente quedó cubierta la granulometría en su totalidad.
- ✓ La mezcla quedó de color café claro.
- ✓ % de zeolita: 3%, Se Utilizo un % de asfalto de 5.5 = 16.5g.
- ✓ La mezcla se realizó a una temperatura de 100°C.

#### 4.3.2.4. Mezcla Asfáltica a 100°C, Reemplazando el 50% de Fino (Pasa 200), por Zeolita Húmeda.



Figura 4.17.

- ✓ Se utilizó un % de asfalto de 5.5= 16.5g.
- ✓ La mezcla se realizó a una temperatura de 100°C.
- ✓ El peso total de la mezcla 300g.
- ✓ Utilizamos 9g de zeolita (3%).
- ✓ Teniendo en cuenta la granulometría de la zeolita se decidió reemplazar el 50% del pasa 200.
- ✓ Se agregó la zeolita húmeda al agregado caliente y encima se le vertió el asfalto caliente y se mezcló.
- ✓ Gran expansión y efervescencia del asfalto.
- ✓ La mezcla fue fácil, la granulometría se cubrió en menor tiempo y aparentemente quedó muy bien recubierta.

✓ **Se escogió este tipo de mezcla para la fabricación de las probetas.**

#### 4.4. DISEÑO Y FABRICACION DE PROBETAS

##### Probetas Fabricadas

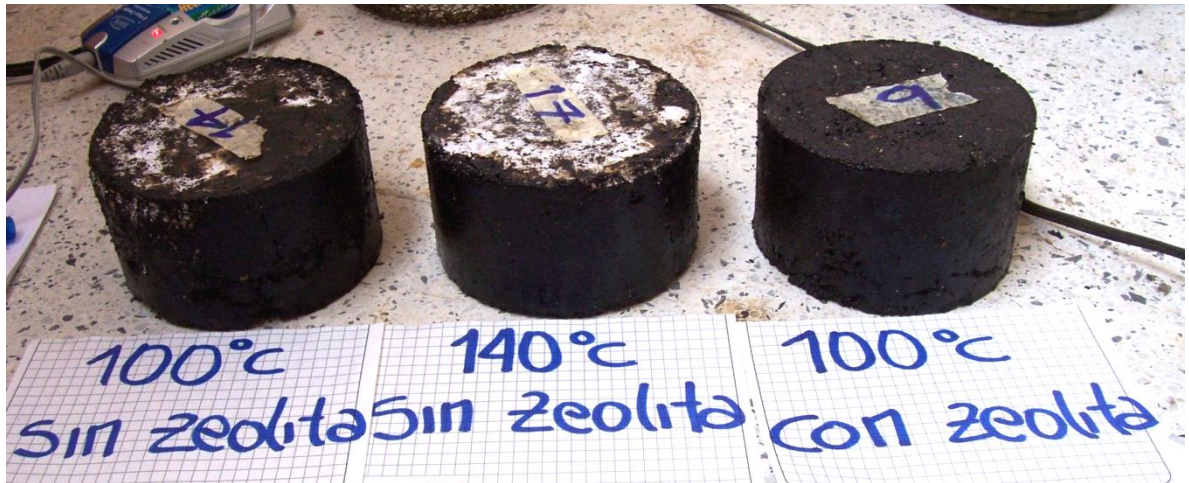


Figura 4.18. Probetas con los tres tipos de mezclas

Probeta con Mezcla Asfáltica a 100°C, Reemplazando el 50% de Fino (Pasa 200), por Zeolita Húmeda



Figura 4.19.

**Probeta con Mezcla Asfáltica a 100°C**



**Figura 4.20.**

**Probeta con Mezcla Asfáltica a 140°C**



**Figura 4.21.**

#### 4.5. PRUEBAS EFECTUADAS SOBRE LAS MUESTRAS

##### 4.5.1. Medición de Densidad de Mezclas Asfálticas Compactadas

En este capítulo se puede encontrar las características promedio para cada tipo de mezcla.

#### MEZCLA ASFÁLTICA A 140°C

Tabla 4.1. Características y Densidad Bulk de la probeta con mezcla asfáltica a 140°C.

<b>CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS</b>			
% de asfalto	5.5		
Tipo de mezcla	<i>Sin Zeolita</i>		
Temperatura de mezclado	<b>140° C</b>		
Diámetro muestra	10,32	cm	
<b>Promedio</b>		<b>Unidad</b>	<b>Fórmula</b>
1. Muestra N°	7,11,13,16,17,18		
2. Fecha	15/09/2008		
3.1 Espesor promedio	6,02	cm	Sum(3)/(3*10)
4. Peso muestra al aire	1164,83	g	
5. Peso muestra en agua	683,78	g	
Temperatura del agua	25	°C	
6. Peso muestra S.S.S	1165,50	g	
7. Volumen muestra	481,7166667	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
8. Densidad de Bulk	<b>2,42</b>	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7)
10. Peso unitario	2,41		(9)*0,997

### MEZCLAS ASFÁLTICAS A 100°C CON ZEOLITA

**Tabla 4.3.** Características y Densidad Bulk de la probeta con mezcla asfáltica a 100°C con Zeolita.

<b>CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS</b>			
% de asfalto	5.5		
Tipo de mezcla	<b>Con Zeolita</b>		
Temperatura de mezclado	<b>100° C</b>		
Diámetro muestra	10,32	Cm	
<b>Promedio</b>		<b>Unidad</b>	<b>Fórmula</b>
1. Muestra N°	<b>1,3,5,8,9,10</b>		
2. Fecha	15/09/2008		
3.1 Espesor	5,99	cm	Sum(3)/(3*10)
4. Peso muestra al aire	1152,15	G	
5. Peso muestra en agua	666,48	G	
Temperatura del agua	25	°C	
6. Peso muestra S.S.S	1153,40	G	
7. Volumen muestra	486,9166667	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
8. Densidad de Bulk	<b>2,37</b>	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7)
10. Peso unitario	2,36		(9)*0,997

## MEZCLA ASFÁLTICA A 100°C

**Tabla 4.2.** Características y Densidad Bulk de la probeta con mezcla asfáltica a 100°C.

<b>CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS</b>			
% de asfalto	5.5		
Tipo de mezcla	<b><i>Sin Zeolita</i></b>		
Temperatura de mezclado	<b>100° C</b>		
Diámetro muestra	10,32	Cm	
Promedio	Unidad	Fórmula	
1. Muestra N°	2,4,6,12,14,15		
2. Fecha	15/09/2008		
3.1 Espesor promedio	6,02	cm	Sum(3)/(3*10)
4. Peso muestra al aire	1161,35	g	
5. Peso muestra en agua	677,52	g	
Temperatura del agua	25	°C	
6. Peso muestra S.S.S	1162,57	g	
7. Volumen muestra	485,05	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
8. Densidad de Bulk	<b>2,39</b>	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7)
10. Peso unitario	2,39		(9)*0,997

Las Características y Peso Especifico Aparente o Densidad Bulk, de cada probeta, se pueden encontrar en el anexo B.1.

#### 4.5.2. Determinación del Módulo de Elasticidad

Con este ensayo se pretendía comparar el modulo elástico que cada tipo de mezcla tenía y observar el cambio en el modulo elástico al ser afectadas las mezclas por el agua. Esto con el fin de determinar si las probetas de la mezcla asfáltica tibia se afectaban de gran manera al estar en contacto con agua. El modulo elástico para cada muestra se encuentra en el anexo C.2.

Tabla 4.4. Modulo de elasticidad de probetas.

<b>Probetas a 140°C</b>			
Muestra 7	Muestra 16	Muestra 18	<b>Promedio</b>
E (Kpa)	E (Kpa)	E (Kpa)	<b>E (Mpa)</b>
12758,81	11211,18	12433,30	<b>12,13</b>

<b>Probetas a 100°C con Zeolita</b>			
Muestra 1	Muestra 3	Muestra 5	<b>Promedio</b>
E (Kpa)	E (Kpa)	E (Kpa)	<b>E (Mpa)</b>
10690,45	9679,81	10728,79	<b>10,37</b>

<b>Probetas a 100°C</b>			
Muestra 2	Muestra 4	Muestra 6	<b>Promedio</b>
E (Kpa)	E (Kpa)	E (Kpa)	<b>E (Mpa)</b>
10127,30	9656,78	9790,97	<b>9,86</b>

## Probetas Afectadas Por el Agua

Tabla 4.5. Modulo de elasticidad de probetas afectadas por el agua.

<b>Probetas a 140°C Antes de Ser Afectadas por Acción del Agua</b>			
Muestra 11	Muestra 13	Muestra 17	Promedio
E (Kpa)	E (Kpa)	E (Kpa)	E (Mpa)
10981,29	10644,11	10203,58	<b>10,61</b>
<b>Probetas a 140°C Después ser Afectadas por Acción del Agua</b>			
Muestra 11	Muestra 13	Muestra 17	Promedio
E (Kpa)	E (Kpa)	E (Kpa)	E (Mpa)
10977,40	10505,93	9989,47	<b>10,49</b>

<b>Probetas a 100°C con Zeolita Antes de Ser Afectadas por Acción del Agua</b>			
Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Promedio
E (Kpa)	E (Kpa)	E (Kpa)	E (Mpa)
10419,83	10457,69	10717,78	<b>10,53</b>
<b>Probetas a 100°C con Zeolita Después de Ser Afectadas por Acción del Agua</b>			
Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Promedio
E (Kpa)	E (Kpa)	E (Kpa)	E (Mpa)
10154,54	10356,54	10616,70	<b>10,38</b>

<b>Probetas a 100°C Antes de Ser Afectadas por Acción del Agua</b>			
Muestra 12	Muestra 14	Muestra 15	Promedio
E (Kpa)	E (Kpa)	E (Kpa)	E (Mpa)
10644,11	10063,24	10384,11	<b>10,36</b>
<b>Probetas a 100°C Después de Ser Afectadas por Acción del Agua</b>			
Muestra 12	Muestra 14	Muestra 15	Promedio
E (Kpa)	E (Kpa)	E (Kpa)	E (Mpa)
10124,24	10039,74	10155,84	<b>10,11</b>

#### 4.5.3. Medición de Estabilidad y Flujo

Con esta prueba se quería establecer la carga y deformación máxima promedio para cada tipo de mezcla para que ocurriera la falla. La estabilidad y flujo para cada muestra se encuentra en anexo C.3

**Tabla 4.6.** Estabilidad y flujo promedio para cada tipo de mezcla.

<b>Probetas a 140°C</b>							
Muestra 7		Muestra 16		Muestra 18		<b>Promedio</b>	
Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo
14,86	22	18,24	25	14,64	20	<b>15,91</b>	<b>22</b>

<b>Probetas a 140°C Afectadas Por Acción del Agua</b>							
Muestra 11		Muestra 13		Muestra 17		<b>Promedio</b>	
Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo
17,11	20	14,41	18	12,61	24	<b>14,71</b>	<b>20</b>

<b>Probetas a 100°C con Zeolita</b>							
Muestra 1		Muestra 3		Muestra 5		<b>Promedio</b>	
Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo
17,11	20	12,16	22	15,76	22	<b>15,01</b>	<b>21</b>

<b>Probetas a 100°C con Zeolita Afectadas Por Acción del Agua</b>							
Muestra 8		Muestra 9		Muestra 10		<b>Promedio</b>	
Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo
13,06	23	14,41	20	12,39	15	<b>13,29</b>	<b>19</b>

<b>Probetas a 100°C</b>							
Muestra 2		Muestra 4		Muestra 6		<b>Promedio</b>	
Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo
17,11	10	12,39	21	10,58	29	<b>13,36</b>	<b>20</b>

<b>Probetas a 100°C Afectadas Por Acción del Agua</b>							
Muestra 12		Muestra 14		Muestra 15		<b>Promedio</b>	
Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo
12,16	23	15,31	30	12,16	19	<b>13,21</b>	<b>24</b>

#### 4.5.4. Determinación del Porcentaje de Vacíos de Aire

En este capítulo se presentan los resultados del ensayo realizado a las probetas para hallar la Gravedad máxima medida (Gmm) y con él hallar el % de vacíos. Los resultados y el cálculo del Gmm para cada probeta se encuentran en el anexo C.1.

Tabla 4.7. Gmm y % de vacíos para cada tipo de mezcla.

Probetas a 140°C							
Muestra 7		Muestra 16		Muestra 18		Promedio	
Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos
2,45	1,51	2,45	1,53	2,45	1,45	<b>2,45</b>	<b>1,50</b>

Probetas a 140°C Afectadas Por Acción del Agua							
Muestra 11		Muestra 13		Muestra 17		Promedio	
Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos
2,45	1,67	2,48	1,63	2,45	1,70	<b>2,46</b>	<b>1,67</b>

Probetas a 100°C con Zeolita							
Muestra 1		Muestra 3		Muestra 5		Promedio	
Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos
2,45	3,79	2,45	2,62	2,45	3,40	<b>2,45</b>	<b>3,27</b>

Probetas a 100°C con Zeolita Afectadas por Acción del Agua							
Muestra 8		Muestra 9		Muestra 10		Promedio	
Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos
2,45	4,55	2,45	2,85	2,45	2,98	<b>2,45</b>	<b>3,46</b>

Probetas a 100°C							
Muestra 2		Muestra 4		Muestra 6		Promedio	
Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos
2,48	3,42	2,48	3,72	2,48	4,12	<b>2,48</b>	<b>3,75</b>

Probetas a 100°C Afectadas Por Acción del Agua							
Muestra 12		Muestra 14		Muestra 15		Promedio	
Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos	Gmm	% de Vacíos
2,48	3,23	2,48	3,44	2,48	3,67	<b>2,48</b>	<b>3,45</b>

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. Determinación de la Deformabilidad

Con base en medidas del modulo elástico, se estableció la diferencia de la rigidez de las mezclas. Se puede observar que el modulo elástico es mayor en las muestras con la mezcla fabricada a 140°C (12.13Mpa – 10.61Mpa), donde podemos decir que estas tiene una menor deformación unitaria con respecto a la carga, luego encontramos a las probetas con la Mezcla Asfáltica Tibia (10.37Mpa – 10.53Mpa) y por último las muestras con la mezcla fabricada a 100°C sin zeolita (9.86Mpa – 10.36Mpa).

#### 5.1.1. Efecto del Agua Sobre las Mezclas

Con el fin de determinar la pérdida de la cohesión, producida por la acción del agua sobre las muestras, mediante el ensayo de inmersión-compresión, se halló el índice de resistencia conservada por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Índice de resistencia conservada, \%} = (R2 / R1) \times 100$$

R1 = Resistencia a compresión de las probetas antes de sumergir.

R2 = Resistencia a compresión de las probetas después de sumergidas.

**Tabla 5.1.** Diferencia del modulo elástico de las probetas antes y después de ser afectadas por el agua:

<b>Probetas a 140°C</b>	
Diferencia modulo elástico	Índice de resistencia conservada
E (Mpa)	%
0,12	98,88

<b>Probetas a 100°C con Zeolita</b>	
Diferencia modulo elástico	Índice de resistencia conservada
E (Mpa)	%
0,16	98,52

<b>Probetas a 100°C</b>	
Diferencia modulo elástico	Índice de resistencia conservada
E (Mpa)	%
0,26	97,52

Como se puede observar, el índice de resistencia conservada después de ser afectadas las muestras por el agua, es mayor en las probetas con mezcla asfáltica fabricada a 140°C (98.88%), después se encuentran a las probetas con mezcla fabricada a 100°C con zeolita (98,52%), pero no existe una diferencia significativa entre estos dos tipos de mezcla, mientras que más alejada encontramos a las probetas fabricadas a 100°C sin zeolita (97.52%). Este índice de resistencia conservada, es el porcentaje de la resistencia que mantiene la muestra después de ser afectadas por el agua.

Con esto se puede decir que existe una menor perdida en la cohesión y por lo tanto hay una mayor adherencia del asfalto con el agregado para las dos primeras mezclas, común y tibia.

## 5.2. Medición de Estabilidad y Flujo

Con el fin de determinar la calidad de las muestras se realizó el ensayo de estabilidad y flujo, en el cual se puede ver la carga y deformación máxima para que ocurra la falla. Se quiere comparar que carga resiste cada tipo de mezcla y el cambio que ocurre en su resistencia al ser afectadas por agua.

**Tabla 5.2.** Estabilidad y flujo de las probetas para cada tipo de mezcla.

<b>Probetas a 140°C</b>	
Estabilidad (Kg)	Flujo (mm)
1591,35	5,61

<b>Probetas a 100°C con Zeolita</b>	
Estabilidad (Kg)	Flujo (mm)
1501,27	5,42

<b>Probetas a 100°C</b>	
Estabilidad (Kg)	Flujo (mm)
1336,13	5,01

Se puede ver que la mayor carga (estabilidad) antes de la falla la soporta las probetas con mezcla asfáltica a 140°C, siguen las probetas con Mezcla Tibia y por último las probetas con mezcla a 100°C. Así mismo, se puede observar el mismo orden decreciente en cuanto a la deformación máxima (flujo).

### **Probetas Afectadas Por el Agua (a.p.a)**

**Tabla 5.3.** Estabilidad y flujo de las probetas afectadas por el agua.

<b>Probetas a 140°C (a.p.a)</b>	
Estabilidad (Kg)	Flujo (mm)
1471,25	5,19

<b>Probetas a 100°C con Zeolita (a.p.a)</b>	
Estabilidad (Kg)	Flujo (mm)
1328,63	4,85

<b>Probetas a 100°C (a.p.a)</b>	
Estabilidad (Kg)	Flujo (mm)
1321,12	6,05

Se observa que la mayor carga (estabilidad) antes de la falla, para las probetas afectadas por el agua, la soporta las probetas con la mezcla asfáltica fabricada a 140°C, le siguen las probetas con Mezcla Tibia y por último las probetas con la mezcla fabricada a 100°C. En cuanto a la mayor deformación (flujo) la tiene las probetas con la mezcla a 100°C, luego las probetas con la mezcla fabricada a 140°C y por último las probetas con la Mezcla Tibia.

Ahora se comparará el cambio que existe en la carga y deformación máxima, para cada tipo de mezcla, antes y después de ser afectadas por el agua.

**Tabla 5.4.** Diferencia en la Estabilidad y flujo de las probetas antes y después de ser afectadas por el agua.

<b>Probetas a 140°C</b>
Diferencia
Estabilidad (%)
7,55

Probetas a 100°C con Zeolita
Diferencia
Estabilidad (%)
11,50

Probetas a 100°C
Diferencia
Estabilidad (%)
1,12

Se puede ver que la mayor diferencia en estabilidad, la tiene la mezcla asfáltica tibia con zeolita, luego la mezcla fabricada a 140°C y por último la mezcla fabricada a 100°C. Con lo que se podría concluir que la resistencia máxima de la mezcla asfáltica tibia se ve más afectada con la acción del agua que las demás mezclas. Pero esta aseveración no puede hacerse de forma segura, debido a que esta diferencia en estabilidad se realizó para dos tipos de probetas diferentes, ya que al realizar el ensayo de estabilidad y flujo, la probeta es fallada. La forma de concluir esto, sería tener la posibilidad de determinar la estabilidad para la misma probeta antes y después de ser afectada por el agua.

### 5.3. Determinación del Porcentaje de Vacíos de Aire

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

**Tabla 5.5.** Gmm y % de vacios promedio para cada tipo de mezcla.

<b>Probetas a 140°C</b>	
Promedio	
Gmm	% de Vacios
2,46	2,03

<b>Probetas a 100°C con Zeolita</b>	
Promedio	
Gmm	% de Vacios
2,45	3,67

<b>Probetas a 100°C</b>	
Promedio	
Gmm	% de Vacios
2,48	3,63

Se puede observar que las probetas con mezcla asfáltica tibia tienen casi el doble del porcentaje de vacíos de las probetas con mezcla fabricada a 140°C y un 0.04% más que las probetas con mezcla fabricada a 100°C. Se aprecia con este porcentaje de vacíos, que la mezcla asfáltica tibia se deja compactar de una forma fácil, debido a que se encuentra en los rangos normales de vacíos con aire.

## CONCLUSIONES

- Se logró el objetivo de crear una mezcla asfáltica tibia, a una temperatura de 100°C, obteniendo un excelente recubrimiento del agregado, mediante la expansión y efervescencia del asfalto, por acción de la zeolita.
- Se comprobó que la zeolita húmeda produce una mayor efervescencia y expansión del asfalto que la misma zeolita seca y un fino húmedo.
- Se logró crear una mezcla asfáltica a menor temperatura (100°C) de la que se registraba en la literatura encontrada (120°C).
- Los ensayos de laboratorio muestran que la mezcla asfáltica tibia mediante el uso del mineral zeolita, tiene mejores características mecánicas que la mezcla fabricada a 100°C.
- Según el ensayo de inmersión compresión, el cual sí se realiza sobre la misma muestra (antes y después de ser afectada), se podría concluir que en la Mezcla Tibia se presenta una buena adherencia del asfalto con el agregado. Pero según el ensayo de estabilidad y flujo, la resistencia máxima de la Mezcla Asfáltica Tibia, se ve más afectada que el resto de las mezclas, lo cual diría que la adherencia no es buena. Por lo cual se puede decir que los ensayos realizados para comprobar la afectación de las mezclas por el agua no son concluyentes.
- La mezcla asfáltica tibia está dentro del rango normal de porcentaje de vacíos con aire establecido por INVIAS (3% - 5%), lo cual implica que esta mezcla es de fácil compactación.
- Se hace indispensable hacer algunas recomendaciones para comprobar la verdadera resistencia y afectación al tráfico y al agua de una mezcla asfáltica tibia.

## RECOMENDACIONES

Debido a la urgencia de proveer soluciones al calentamiento global y la necesidad de optimizar los procesos constructivos, se considera que es de suma importancia continuar con la investigación de mezclas asfálticas tibias, hasta el punto en el que se obtenga una mezcla resistente a los efectos del agua y pueda usarse en la pavimentación de obras civiles en Colombia. Después de ver y analizar los resultados obtenidos en los ensayos realizados en esta investigación, se hacen las siguientes recomendaciones para las futuras investigaciones:

- Se hace indispensable contar con equipos de calentamiento, mezclado y compactación de mezclas bituminosas, de alta tecnología, con el fin de evitar errores en la fabricación de las probetas.
- Realizar una pequeña pavimentación con la Mezcla Asfáltica Tibia, con el fin de comprobar de forma práctica, la resistencia que ésta posee, al tráfico y a los efectos del agua. (Ensayo a escala real)
- Encontrar el factor Beneficio-Costo, con el fin de analizar la viabilidad de la implementación de la tecnología de mezclas asfálticas tibias con aditivo Zeolita en Colombia.
- Para la realización de los ensayos se recomienda utilizar deformímetros digitales, de mayor precisión y control, con el fin de disminuir el error en la medición.

## BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO Innovate Highway Technologies.
- Asociación de Fabricantes de Asfalto Emulsión del Asfalto Emulsión Manual Básico.
- Asphalt Institute. Construction of Hot Mix Asphalt Pavements. Manual Series No.22. Second Edition, 1999.
- CHAVEZ, Sergio. Relación entre Propiedades Mecánicas de Concretos Asfálticos bajo carga Estática y Dinámica, Bucaramanga; Tesis de Grado Universidad Industrial de Santander, 2008.
- Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, Instituto Nacional de Vías.
- Evaluación de la exposición a los trabajadores de Pavimento Asfalto Humos Uso Tradicional y Nontraditional Técnicas en el Diario AIHA (American Industrial Hygiene Association).
- ICONTEC, Normas Técnicas Colombianas. Bogotá; 2002.
- Normas de Ensayo de Materiales Para Carreteras, Instituto Nacional de Vías.
- P.C. de Groot, C. Bowen, B.G. Koenders, D.A. Stoker, O. Larsen, J. Johansen, A comparison of emissions from hot mixture and warm asphalt mixture production, Proceedings IRF congress, Paris, June 2001, paper O022.
- Potti, J.J. (2004): Innovaciones en mezclas bituminosas.
- Comunicación libre: mezclas semicalientes con Aspha-min<sup>®</sup>. ecología en acción
- CORRIGAN, Matthew. Warm Mix Asphalt Technology.

# **ANEXOS**

## ANEXO A: CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

**Anexo A.1:** Ensayo de Análisis Granulométrico por tamizado original del material de la cantera de Chicamocha

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
LABORATORIO DE DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
ENSAYO DE GRANULOMETRIA**

FECHA: \_\_\_\_\_  
 PROYECTO: \_\_\_\_\_  
 LOCALIZACION: \_\_\_\_\_  
 MUESTRA: \_\_\_\_\_

PESO TARA (gr)	370
TARA + MUESTRA HUMEDA (gr)	10915
TARA+MUESTRA SECA (gr)	9715
PESO AGUA (gr)	
PESO MUEST. SECA (gr)	9345
HUMEDAD (%)	

PESO INICIAL DE LAMUESTRA gr : \_\_\_\_\_  
 PESO DESPUES DE LAVADO gr : \_\_\_\_\_  
 PORCENTAJE DE ERROR %: \_\_\_\_\_

MALLA No	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	PORCIENTO RETENIDO PARCIAL	% PASA LA MALLA	MALLA No	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	PORCIENTO RETENIDO PARCIAL	% QUE PASA LA MALLA
****	mm	gr	%	%	****	mm	gr	%	%
2"	50,8				10	2	915	9,472	28,934
1 1/2"	36,1				20	0,84			
1"	25,4	1500	15,528	84,472	40	0,42	2090	21,636	7,298
3/4"	19,05	1135	11,749	72,723	60	0,25			
1/2"	12,7				100	0,149			
3/8"	9,52	2255	23,344	49,379	200	0,074	680	7,039	0,259
No 4	4,75	1060	10,973	38,406	PASA 200	****	25	0,259	0,000
SUMA	****	5950	61,594	38,406	SUMA	****	3710	38,406	
					TOTAL		9660	100,000	

D10= \_\_\_\_\_ CU=(D60 / D10) = \_\_\_\_\_ GRAVAS \_\_\_\_\_ %  
 D30= \_\_\_\_\_ CC=(D30)<sup>2</sup>/D10\*D60 = \_\_\_\_\_ ARENAS \_\_\_\_\_ %  
 D60= \_\_\_\_\_ FINOS \_\_\_\_\_ %

(Trabajo de grado: "relación entre propiedades mecánicas de concretos asfálticos bajo carga estática y dinámica". Autor: Sergio Armando Chavez. UIS. 2008)

**Anexo A.2:** Ensayo de porcentaje de caras fracturadas del material de la cantera del Río Chicamocha



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
 LABORATORIO DE DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
 ENSAYO DE CARAS FRACTURADAS**

FECHA:  
 PROYECTO:  
 LOCALIZACION:  
 MUESTRA:

TAMAÑO	A	B	C	D	E
	PESO MUESTRA gr	PESO CARAS FRACTURADAS (gr)	% CARAS FRACTURADAS	GRANULOMETRIA GRADACION Orig.	C X D
1 1/2" - 1"	2000	1555	77,75	15,52795031	1207,29814
1" - 3/4"	1500	1070	71,33333333	11,7494824	838,129745
3/4" - 1/2"	1200	820	68,33333333	14,00621118	957,091097
1/2" - 3/8"	300	175	58,33333333	9,33747412	544,68599
SUMA		3620	70,75	50,62111801	3547,20497

% Caras Fracturadas = 70,07361963

(Trabajo de grado: "relación entre propiedades mecánicas de concretos asfálticos bajo carga estática y dinámica". Autor: Sergio Armando Chavez. UIS. 2008)

**Anexo A.3:** Ensayo de Sanidad de sulfato de sodio del material de la cantera del Río Chicamocho

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

ENSAYO DE SANIDAD DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCION DE LAS SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO  
 SEGÚN NORMA INVIAS E-220

FECHA \_\_\_\_\_  
 PROYECTO \_\_\_\_\_  
 LOCALIZACION \_\_\_\_\_  
 DESCRIPCION \_\_\_\_\_

TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO
SUMA		

TAMAÑO TAMICES		GRADACION MUESTRA ORIGINAL %	PESO FRACCION ANTES DEL ENSAYO P1(Gr)	PESO FRACCION DESPUES DEL ENSAYO P1(Gr)	PERDIDA Gr	% QUE PASA EL TAMIZ DESPUES DEL ENSAYO. % PERDIDA REAL	GRADACION ORIGINAL * % PERDIDA REAL
PASANTE	RETENIDO						
1"	3/4"	60	1500	1435,32	64,68	4,312	55,688
3/4"	1/2"	26,8	670	666,17	3,83	0,571641791	26,22835821
1/2"	3/8"	13,2	330	313,84	16,16	4,896969697	8,303030303
SUMA		100	2500	2415,33	84,67	9,780611488	90,21938851

PERDIDAS DEL ENSAYO DE SOLIDEZ UTILIZANDO EL SULFATO DE SODIO = 9,7806 %

EXAMEN CUALITATIVO	#	%
PARTICULAS ANTES DEL ENSAYO	75	100
PARTICULAS DESPUES DEL ENSAYO	75	100
PARTICULAS DESCASCARADAS	7	9,33
PARTICULAS DESINTEGRADAS	0	0
PARTICULAS AGRIETADAS	0	0
PARTICULAS PARTIDAS	0	0
PARTICULAS LAJADAS	0	0
PARTICULAS RESQUEBRAJADAS	0	0

OBSERVACIONES \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

(Trabajo de grado: "relación entre propiedades mecánicas de concretos asfálticos bajo carga estática y dinámica". Autor: Sergio Armando Chavez. UIS. 2008)

**Anexo A.4:** Ensayo de Equivalente de arena del material de la cantera del Río Chicamocha



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
EQUIVALENTE DE ARENA**

FECHA: \_\_\_\_\_  
 PROYECTO: \_\_\_\_\_  
 LOCALIZACION: CHICAMOCHA \_\_\_\_\_  
 ENSAYO No: \_\_\_\_\_

MODO DE PREPARACION MUESTRA: MATERIAL PASA No4	1	2	3
TEMPERATURA: 25 GRADOS			
ALTURA DE LA ARCILLA H1	3,3	3,2	3,4
ALTURA DE LA ARENA H2	2,5	2,4	2,5
EQUIVALENTE DE ARENA % (H2/H1)	75,75757576	75	73,52941176
EQUIVALENTE DE ARENA % (H2/H1) Valor Equivalente Redondeado	76	75	74
ESPECIFICACION PARA HORMIGONES	DEBE SER MAYOR DE 75%		

Promedio	Promedio Redondeado
75	75

(Trabajo de grado: “relación entre propiedades mecánicas de concretos asfálticos bajo carga estática y dinámica”. Autor: Sergio Armando Chavez. UIS. 2008)

**Anexo A.5:** Ensayo de Peso unitario y porcentaje de vacíos de los materiales gruesos y Ensayo de peso específico y absorción de agregados gruesos del material de la cantera del Río Chicamocha



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
LABORATORIOS DESUELOS Y PAVIMENTOS**

<b>AGREGADO GRUESO</b>	
SOLICITANTE	FECHA
	D    M    A
PROCEDENCIA:	MUESTRA #
MATERIAL:	
DESCRIPCION:	
NORMA (NTC):	
<b>GRAVEDADES ESPECIFICAS</b>	
DATOS:	
A= peso de la muestra en condicion S.S.S., en el aire.....	5000 Gramos
Pa= peso de la canasta sumergida en el agua.....	1810 Gramos
Pb = peso de la canasta + muestra S.S.S., sumergida en el agua.....	4321 Gramos
B= peso de lamuestra en agua = Pb-Pa.....	3111 Gramos
C= peso delamuestra secada en el horno.....	4670 Gramos
CÁLCULOS:	
Gravedad especifica real.....	$\frac{C}{(C-B)} = 2,9955099$
Gravedad especifica aparente.....	$\frac{C}{(A-B)} = 2,4722075$
Gravedad especifica aparente S.S.S.....	$\frac{A}{(A-B)} = 2,6469031$ (D)**
<b>PESO UNITARIO</b>	
CALIBRADOR DEL MEDIDOR:	
P1= Peso del medidor + vidrio.....	3040 Gramos
P2= Peso del medidor + vidrio + agua.....	5870 Gramos
V= Volumen del medidor.....	$\frac{(P2-P1)}{1000} = 2,83$ Gramos
DATOS:	
Pm= Peso del medidor vacio.....	2560 Gramos
Pc= Peso del medidor + material S.S.S compactado.....	7292 Gramos
Ps = Peso del medidor + material S.S.S suelto.....	6726 Gramos
Peso unitario del agregado S.S.S compactado.....	$\frac{(Pc-Pm)}{V} = 1672,0848$ K <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> (E**)
Peso unitaio del agregado S.S.S suelto	$\frac{(Ps-Pm)}{V} = 1472,0848$ K <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
% de absorción.....	$\frac{(A-C)*100}{C} = 7,0663812$ %
% de vacios.....	$\frac{(D*1000-E)}{(D*10)} = 36,828636$ %
OBSERVACIONES:	
LABORATORISTA	Vo.Bo
JAIRO HERNANDEZ SALAZAR	DIRECTOR ESCUELA ING. CIVIL

(Trabajo de grado: "relación entre propiedades mecánicas de concretos asfálticos bajo carga estática y dinámica". Autor: Sergio Armando Chavez. UIS. 2008)

**Anexo A.6:** Ensayo de Peso unitario y porcentaje de vacíos de los materiales finos y Ensayo de peso específico y absorción de agregados finos del material de la cantera del Río Chicamocha



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
LABORATORIOS DESUELOS Y PAVIMENTOS**

AGREGADO GRUESO	
SOLICITANTE	FECHA
	D    M    A
PROCEDENCIA:	MUESTRA #
MATERIAL: DESCRIPCION: NORMA (NTC):	
GRAVEDADES ESPECIFICAS	
DATOS:	
A= Peso de la frasco + Agua hasta la marca, en el aire.....	655 Gramos
B= Peso de la muestra en condicion S:S:S en el aire.....	500 Gramos
C= Peso de la muestra. Frasco y agua agregada hasta la marca, en el aire.....	970 Gramos
D= Peso de la muestra secada al horno.....	493,6 Gramos
CÁLCULOS:	
Gravedad especifica real.....	$\frac{D}{(A-C+D)} = 2,7637178$
Gravedad especifica aparente.....	$\frac{D}{(A+B-C)} = 2,6681081$
Gravedad especifica aparente S.S.S.....	$\frac{B}{(A+B-C)} = 2,7027027$ (E)**
PESO UNITARIO	
CALIBRADOR DEL MEDIDOR	
P1= Peso del medidor + vidrio.....	Gramos
P2= Peso del medidor + vidrio + agua.....	Gramos
V= Volumen del medidor.....	$\frac{(P2-P1)}{1000} = 2,835$ Gramos Gramos
DATOS:	
Pm= Peso del medidor vacio.....	2560
Pc= Peso del medidor + material S.S.S compactado.....	7390
Ps = Peso del medidor + material S.S.S suelto.....	6728,33
Peso unitario del agregado S.S.S compactado.....	$\frac{(Pc-Pm)}{V} = 1703,7037$ K <sup>3</sup> m <sup>3</sup> (F**)
Peso unitario del agregado S.S.S suelto.....	$\frac{(Ps-Pm)}{V} = 1470,3104$ K <sup>3</sup> m <sup>3</sup>
% de absorción.....	$\frac{(B-D)*100}{C} = 0,6597938$ %
% de vacios.....	$\frac{(E*1000-F)}{(E*10)} = 36,962963$ %
OBSERVACIONES:	
LABORATORISTA	Vo.Bo
JAIRO HERNANDEZ SALAZAR	DIRECTOR ESCUELA ING. CIVIL

(Trabajo de grado: "relación entre propiedades mecánicas de concretos asfálticos bajo carga estática y dinámica". Autor: Sergio Armando Chavez. UIS. 2008)

**Anexo A.7: Ensayo de Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados del material de la cantera del Río Chicamocha**



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
 LABORATORIOS DESUELOS Y PAVIMENTOS

**ENSAYO DE INDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO SEGÚN NORMA INVIAS 230**

Fecha: \_\_\_\_\_  
 Proyecto: \_\_\_\_\_  
 Localización: \_\_\_\_\_  
 Descripción: \_\_\_\_\_

**INDICE DE ALARGAMIENTO**

TAMANO TAMICES		PESO MUESTRA GRAMOS	PESO MATERIAL RETE. EN EL CALIBRADOR	% RETENIDO EN EL CALIBRADOR	% RETENIDO GRADACION ORIGINAL	% RETENIDO CALIBRADOR * RETENIDO GRAD. ORI.
PASANTE	RETENIDO					
1 1/2"	1"	1500	359,34	23,966	15,52795031	371,9875776
1"	3/4"	1135	195	17,18061674	11,7494824	201,863354
3/4"	1/2"	700	249,66	35,66571429	14,00621118	499,5415262
1/2"	3/8"	240	75	31,25	9,33747412	291,7960663
SUMA =		3575	879	108,052331	50,62111801	1365,188524

**INDICE DE APLANAMIENTO**

TAMANO TAMICES		PESO MUESTRA GRAMOS	PESO MATERIAL PASA. EN EL CALIBRADOR	% PASA EN EL CALIBRADOR	% RETENIDO GRADACION ORIGINAL	% RETENIDO CALIBRADOR * RETENIDO GRAD. ORI.
PASANTE	RETENIDO					
1 1/2"	1"	1500	295	19,66666667	15,52795031	305,3830228
1"	3/4"	1135	135	11,89427313	11,7494824	139,7515528
3/4"	1/2"	700	135	19,28571429	14,00621118	270,119787
1/2"	3/8"	240	45	18,75	9,33747412	175,0776398
SUMA =		3575	610	69,59665408	50,62111801	890,3320024

Índice de Alargamiento = 26,96875489 %  
 Índice de Aplanamiento = 17,58815367 %

observaciones = \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

(Trabajo de grado: "relación entre propiedades mecánicas de concretos asfálticos bajo carga estática y dinámica". Autor: Sergio Armando Chavez. UIS. 2008)

**Anexo A.8:** Ensayo de Resistencia al desgaste de los agregados por medio de la maquina de los Ángeles del material de la cantera del Río Chicamocha



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**

**ABRASION DE AGREGADOS EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES**

FECHA: \_\_\_\_\_  
 PROYECTO: \_\_\_\_\_  
 LOCALIZACION: \_\_\_\_\_  
 ENSAYO No: \_\_\_\_\_

**DATOS SOBRE GRADACION, CARGA ABRASIVA Y REVOLUCIONES**

TAMAÑO		PESO Y GRADACION DE LA MUESTRA						
PESO	RETENIDO	A	B	C	D	E	F	G
3"	2 1/2"					2500		
2 1/2"	2"					2500		
2"	1 1/2"					5000	5000	
1 1/2"	1"	1250					5000	5000
1"	3/4"	1250						5000
3/4"	1/2"	1250	2500					
1/2"	3/8"	1250	2500					
3/8"	1/4"			2500				
1/4"	No 4			2500				
No 4	No 8				5000			
No esferas		12	11	8	6	12	12	12

PRUEBAS	1	2	3	4	5
Gradación usada	A				
No de esferas	12				
No de revoluciones	500				
Pa = muestra seca antes del ensayo ( Gr )	5000				
Pb = peso muestra seca despues del ensayo y despues de lavar sobre el tamiz No 12 ( Gr )	3780				
Perdida de material ( Pa - Pb )	1220				
% Desgaste = (( Pa - Pb ) / Pa ) *100	24,4				
Especificación					

OBSERVACIONES
VoBo

(Trabajo de grado: "relación entre propiedades mecánicas de concretos asfálticos bajo carga estática y dinámica". Autor: Sergio Armando Chavez. UIS. 2008)

## ANEXO B: CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS

**Anexo B.1:** Geometría y Densidad Bulk ó Peso específico aparente de las mezclas asfálticas compactadas

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
% de asfalto	5.5		
Tipo de mezcla	Con Zeolita		
Temperatura de mezclado	100° C		
Diámetro muestra	10,32	cm	
		Unidad	Fórmula
1. Muestra N°	<b>1</b>		
2. Fecha	15/09/2008		
3. Espesores muestra.	59,16	mm	
	59,66	mm	
	58,5	mm	
3.1 Espesor promedio	5,91	cm	Sum(3)/(3*10)
4. Peso muestra al aire	1136	g	
5. Peso muestra en agua	655,5	g	
Temperatura del agua	25	°C	
6. Peso muestra S.S.S	1137,7	g	
7. Volumen muestra	482,2	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
8. Densidad Bulk	2,36	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
10. Peso unitario	2,35		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
% de asfalto	5.5		
Tipo de mezcla	Sin Zeolita		
Temperatura de mezclado	100° C		
Diámetro muestra	10,32	cm	
		Unidad	Fórmula
1. Muestra N°	<b>2</b>		
2. Fecha	15/09/2008		
3. Espesores muestra.	58,42	mm	
	60,18	mm	

	60,96	mm	
<b>3.1 Espesor promedio</b>	5,99	cm	Sum(3)/(3*10)
<b>4. Peso muestra al aire</b>	1143,5	g	
<b>5. Peso muestra en agua</b>	667,5	g	
<b>Temperatura del agua</b>	25	°C	
<b>6. Peso muestra S.S.S</b>	1144,2	g	
<b>7. Volumen muestra</b>	476,7	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
<b>8. Densidad Bulk</b>	2,40	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
<b>10. Peso unitario</b>	2,39		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
<b>% de asfalto</b>	5.5		
<b>Tipo de mezcla</b>	Con Zeolita		
<b>Temperatura de mezclado</b>	100° C		
<b>Diámetro muestra</b>	10,32	cm	
		<b>Unidad</b>	<b>Fórmula</b>
<b>1. Muestra N°</b>	<b>3</b>		
<b>2. Fecha</b>	15/09/2008		
<b>3. Espesores muestra.</b>	58,58	mm	
	58,08	mm	
	57,5	mm	
<b>3.1 Espesor promedio</b>	5,81	cm	Sum(3)/(3*10)
<b>4. Peso muestra al aire</b>	1152,2	g	
<b>5. Peso muestra en agua</b>	669,3	g	
<b>Temperatura del agua</b>	25	°C	
<b>6. Peso muestra S.S.S</b>	1152,5	g	
<b>7. Volumen muestra</b>	483,2	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
<b>8. Densidad Bulk</b>	2,38	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
<b>10. Peso unitario</b>	2,38		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
<b>% de asfalto</b>	5.5		
<b>Tipo de mezcla</b>	Sin Zeolita		
<b>Temperatura de mezclado</b>	100° C		
<b>Diámetro muestra</b>	10,32	cm	
		<b>Unidad</b>	<b>Fórmula</b>
<b>1. Muestra N°</b>	<b>4</b>		

<b>2. Fecha</b>	15/09/2008		
<b>3. Espesores muestra.</b>	61,28	mm	
	61,66	mm	
	61,24	mm	
<b>3.1 Espesor promedio</b>	6,14	cm	Sum(3)/(3*10)
<b>4. Peso muestra al aire</b>	1174,4	g	
<b>5. Peso muestra en agua</b>	684,2	g	
<b>Temperatura del agua</b>	25	°C	
<b>6. Peso muestra S.S.S</b>	1175,3	g	
<b>7. Volumen muestra</b>	491,1	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
<b>8. Densidad Bulk</b>	2,39	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
<b>10. Peso unitario</b>	2,38		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
<b>% de asfalto</b>	5.5		
<b>Tipo de mezcla</b>	Con Zeolita		
<b>Temperatura de mezclado</b>	100° C		
<b>Diámetro muestra</b>	10,32	cm	
		<b>Unidad</b>	<b>Fórmula</b>
<b>1. Muestra N°</b>	<b>5</b>		
<b>2. Fecha</b>	15/09/2008		
<b>3. Espesores muestra.</b>	60,96	mm	
	61,08	mm	
	60,3	mm	
<b>3.1 Espesor promedio</b>	6,08	cm	Sum(3)/(3*10)
<b>4. Peso muestra al aire</b>	1149,1	g	
<b>5. Peso muestra en agua</b>	664,4	g	
<b>Temperatura del agua</b>	25	°C	
<b>6. Peso muestra S.S.S</b>	1150,2	g	
<b>7. Volumen muestra</b>	485,8	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
<b>8. Densidad Bulk</b>	2,37	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
<b>10. Peso unitario</b>	2,36		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS	
<b>% de asfalto</b>	5.5
<b>Tipo de mezcla</b>	Sin Zeolita
<b>Temperatura de mezclado</b>	100° C

<b>Diámetro muestra</b>	10,32	cm	
		<b>Unidad</b>	<b>Fórmula</b>
<b>1. Muestra N°</b>	<b>6</b>		
<b>2. Fecha</b>	15/09/2008		
<b>3. Espesores muestra.</b>	59,38	mm	
	57,08	mm	
	57,54	mm	
<b>3.1 Espesor promedio</b>	5,80	cm	Sum(3)/(3*10)
<b>4. Peso muestra al aire</b>	1141,6	g	
<b>5. Peso muestra en agua</b>	664	g	
<b>Temperatura del agua</b>	25	°C	
<b>6. Peso muestra S.S.S</b>	1143,4	g	
<b>7. Volumen muestra</b>	479,4	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
<b>8. Densidad Bulk</b>	2,38	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
<b>10. Peso unitario</b>	2,37		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
<b>% de asfalto</b>	5.5		
<b>Tipo de mezcla</b>	Sin Zeolita		
<b>Temperatura de mezclado</b>	140° C		
<b>Diámetro muestra</b>	10,32	cm	
		<b>Unidad</b>	<b>Fórmula</b>
<b>1. Muestra N°</b>	<b>7</b>		
<b>2. Fecha</b>	15/09/2008		
<b>3. Espesores muestra.</b>	61,06	mm	
	60,24	mm	
	60,54	mm	
<b>3.1 Espesor promedio</b>	6,06	cm	Sum(3)/(3*10)
<b>4. Peso muestra al aire</b>	1170,9	g	
<b>5. Peso muestra en agua</b>	686,6	g	
<b>Temperatura del agua</b>	25	°C	
<b>6. Peso muestra S.S.S</b>	1171,5	g	
<b>7. Volumen muestra</b>	484,9	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
<b>8. Densidad Bulk</b>	2,41	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
<b>10. Peso unitario</b>	2,41		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
% de asfalto	5.5		
Tipo de mezcla	Con Zeolita		
Temperatura de mezclado	100° C		
Diámetro muestra	10,32	cm	
		Unidad	Fórmula
1. Muestra N°	8		
2. Fecha	15/09/2008		
3. Espesores muestra.	58,74	mm	
	59,24	mm	
	60,14	mm	
3.1 Espesor promedio	5,94	cm	Sum(3)/(3*10)
4. Peso muestra al aire	1156	g	
5. Peso muestra en agua	664,4	g	
Temperatura del agua	25	°C	
6. Peso muestra S.S.S	1159	g	
7. Volumen muestra	494,6	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
8. Densidad Bulk	2,34	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
10. Peso unitario	2,33		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
% de asfalto	5.5		
Tipo de mezcla	Con Zeolita		
Temperatura de mezclado	100° C		
Diámetro muestra	10,32	cm	
		Unidad	Fórmula
1. Muestra N°	9		
2. Fecha	15/09/2008		
3. Espesores muestra.	60,88	mm	
	60,16	mm	
	59,94	mm	
3.1 Espesor promedio	6,03	cm	Sum(3)/(3*10)
4. Peso muestra al aire	1158,8	g	
5. Peso muestra en agua	672,5	g	
Temperatura del agua	25	°C	
6. Peso muestra S.S.S	1159,6	g	
7. Volumen muestra	487,1	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)

<b>8. Densidad Bulk</b>	2,38	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
<b>10. Peso unitario</b>	2,37		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
<b>% de asfalto</b>	5.5		
<b>Tipo de mezcla</b>	Con Zeolita		
<b>Temperatura de mezclado</b>	100° C		
<b>Diámetro muestra</b>	10,32	cm	
		<b>Unidad</b>	<b>Fórmula</b>
<b>1. Muestra N°</b>	<b>10</b>		
<b>2. Fecha</b>	15/09/2008		
<b>3. Espesores muestra.</b>	60,9	mm	
	61,78	mm	
	61,7	mm	
<b>3.1 Espesor promedio</b>	6,15	cm	Sum(3)/(3*10)
<b>4. Peso muestra al aire</b>	1160,8	g	
<b>5. Peso muestra en agua</b>	672,8	g	
<b>Temperatura del agua</b>	25	°C	
<b>6. Peso muestra S.S.S</b>	1161,4	g	
<b>7. Volumen muestra</b>	488,6	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
<b>8. Densidad Bulk</b>	2,38	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
<b>10. Peso unitario</b>	2,37		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
<b>% de asfalto</b>	5.5		
<b>Tipo de mezcla</b>	Sin Zeolita		
<b>Temperatura de mezclado</b>	140° C		
<b>Diámetro muestra</b>	10,32	cm	
		<b>Unidad</b>	<b>Fórmula</b>
<b>1. Muestra N°</b>	<b>11</b>		
<b>2. Fecha</b>	15/09/2008		
<b>3. Espesores muestra.</b>	61,38	mm	
	62,66	mm	
	61,58	mm	
<b>3.1 Espesor promedio</b>	6,19	cm	Sum(3)/(3*10)
<b>4. Peso muestra al aire</b>	1167,3	g	
<b>5. Peso muestra en agua</b>	684	g	

Temperatura del agua	25	°C	
6. Peso muestra S.S.S	1168,2	g	
7. Volumen muestra	484,2	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
8. Densidad Bulk	2,41	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
10. Peso unitario	2,40		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
% de asfalto	5.5		
Tipo de mezcla	Sin Zeolita		
Temperatura de mezclado	100° C		
Diámetro muestra	10,32	cm	
		Unidad	Fórmula
1. Muestra N°	12		
2. Fecha	15/09/2008		
3. Espesores muestra.	60,36	mm	
	61,1	mm	
	61,58	mm	
3.1 Espesor promedio	6,10	cm	Sum(3)/(3*10)
4. Peso muestra al aire	1177	g	
5. Peso muestra en agua	688,3	g	
Temperatura del agua	25	°C	
6. Peso muestra S.S.S	1178	g	
7. Volumen muestra	489,7	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
8. Densidad Bulk	2,40	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
10. Peso unitario	2,40		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
% de asfalto	5.5		
Tipo de mezcla	Sin Zeolita		
Temperatura de mezclado	140° C		
Diámetro muestra	10,32	cm	
		Unidad	Fórmula
1. Muestra N°	13		
2. Fecha	15/09/2008		
3. Espesores muestra.	59,9	mm	
	59,38	mm	
	60,4	mm	

<b>3.1 Espesor promedio</b>	5,99	cm	Sum(3)/(3*10)
<b>4. Peso muestra al aire</b>	1157,3	g	
<b>5. Peso muestra en agua</b>	684,3	g	
<b>Temperatura del agua</b>	25	°C	
<b>6. Peso muestra S.S.S</b>	1158	g	
<b>7. Volumen muestra</b>	473,7	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
<b>8. Densidad Bulk</b>	2,44	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
<b>10. Peso unitario</b>	2,44		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
<b>% de asfalto</b>	5.5		
<b>Tipo de mezcla</b>	Sin Zeolita		
<b>Temperatura de mezclado</b>	100° C		
<b>Diámetro muestra</b>	10,32	cm	
		<b>Unidad</b>	<b>Fórmula</b>
<b>1. Muestra N°</b>	<b>14</b>		
<b>2. Fecha</b>	15/09/2008		
<b>3. Espesores muestra.</b>	60,4	mm	
	58,46	mm	
	59,86	mm	
<b>3.1 Espesor promedio</b>	5,96	cm	Sum(3)/(3*10)
<b>4. Peso muestra al aire</b>	1164,3	g	
<b>5. Peso muestra en agua</b>	680,1	g	
<b>Temperatura del agua</b>	25	°C	
<b>6. Peso muestra S.S.S</b>	1165,6	g	
<b>7. Volumen muestra</b>	485,5	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
<b>8. Densidad Bulk</b>	2,40	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
<b>10. Peso unitario</b>	2,39		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
<b>% de asfalto</b>	5.5		
<b>Tipo de mezcla</b>	Sin Zeolita		
<b>Temperatura de mezclado</b>	100° C		
<b>Diámetro muestra</b>	10,32	cm	
		<b>Unidad</b>	<b>Fórmula</b>
<b>1. Muestra N°</b>	<b>15</b>		
<b>2. Fecha</b>	15/09/2008		

<b>3. Espesores muestra.</b>	61,52	mm	
	61	mm	
	61,51	mm	
<b>3.1 Espesor promedio</b>	6,13	cm	Sum(3)/(3*10)
<b>4. Peso muestra al aire</b>	1167,3	g	
<b>5. Peso muestra en agua</b>	681	g	
<b>Temperatura del agua</b>	25	°C	
<b>6. Peso muestra S.S.S</b>	1168,9	g	
<b>7. Volumen muestra</b>	487,9	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
<b>8. Densidad Bulk</b>	2,39	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
<b>10. Peso unitario</b>	2,39		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
<b>% de asfalto</b>	5.5		
<b>Tipo de mezcla</b>	Sin Zeolita		
<b>Temperatura de mezclado</b>	140° C		
<b>Diámetro muestra</b>	10,32	cm	
		<b>Unidad</b>	<b>Fórmula</b>
<b>1. Muestra N°</b>	<b>16</b>		
<b>2. Fecha</b>	15/09/2008		
<b>3. Espesores muestra.</b>	59,34	mm	
	59,12	mm	
	60,7	mm	
<b>3.1 Espesor promedio</b>	5,97	cm	Sum(3)/(3*10)
<b>4. Peso muestra al aire</b>	1163,7	g	
<b>5. Peso muestra en agua</b>	682,1	g	
<b>Temperatura del agua</b>	25	°C	
<b>6. Peso muestra S.S.S</b>	1164,1	g	
<b>7. Volumen muestra</b>	482	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
<b>8. Densidad Bulk</b>	2,41	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
<b>10. Peso unitario</b>	2,41		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
<b>% de asfalto</b>	5.5		
<b>Tipo de mezcla</b>	Sin Zeolita		
<b>Temperatura de mezclado</b>	140° C		
<b>Diámetro muestra</b>	10,32	cm	

		Unidad	Fórmula
1. Muestra N°	17		
2. Fecha	15/09/2008		
3. Espesores muestra.	58,06	mm	
	58,9	mm	
	59,3	mm	
3.1 Espesor promedio	5,88	cm	Sum(3)/(3*10)
4. Peso muestra al aire	1158,7	g	
5. Peso muestra en agua	678,5	g	
Temperatura del agua	25	°C	
6. Peso muestra S.S.S	1159,3	g	
7. Volumen muestra	480,8	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
8. Densidad Bulk	2,41	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
10. Peso unitario	2,40		(9)*0,997

CONTROL DE MEZCLAS ASFALTICAS			
% de asfalto	5.5		
Tipo de mezcla	Sin Zeolita		
Temperatura de mezclado	140° C		
Diámetro muestra	10,32	cm	
		Unidad	Fórmula
1. Muestra N°	18		
2. Fecha	15/09/2008		
3. Espesores muestra.	60,24	mm	
	60,24	mm	
	60,52	mm	
3.1 Espesor promedio	6,03	cm	Sum(3)/(3*10)
4. Peso muestra al aire	1171,1	g	
5. Peso muestra en agua	687,2	g	
Temperatura del agua	25	°C	
6. Peso muestra S.S.S	1171,9	g	
7. Volumen muestra	484,7	cm <sup>3</sup>	(6)-(5)
8. Densidad Bulk	2,42	g/cm <sup>3</sup>	(4)/(7) ó
10. Peso unitario	2,41		(9)*0,997

## ANEXO C: ENSAYOS REALIZADOS A LAS PROBETAS

**Anexo C.1:** Peso específico Teórico Máximo (Gmm) de mezclas asfálticas y porcentaje de vacíos.

$$Gmm = \frac{A}{(B-(C-A))}$$

$$\% \text{ de vacios} = \left( 1 - \frac{\text{Peso específico aparente}}{\text{Peso específico teórico máximo}} \right) * 100$$

- A =           Peso de la muestra al aire  
 B =           Peso del picnómetro + agua a 25°C  
 C =           Peso de la muestra sin vacíos + Picnómetro + agua

Muestra	A	B	C	Gmm	% de Vacios
1	800	1955	2428,3	2,45	3,79
2	800	1955	2432,9	2,48	3,42
3	800	1955	2428,3	2,45	2,62
4	800	1955	2432,9	2,48	3,72
5	800	1955	2428,3	2,45	3,40
6	800	1955	2432,9	2,48	4,12
7	800	1955	2428,7	2,45	1,51
8	800	1955	2428,3	2,45	4,55
9	800	1955	2428,3	2,45	2,85
10	800	1955	2428,3	2,45	2,98
11	800	1955	2428,7	2,45	1,67
12	800	1955	2432,9	2,48	3,23
13	800	1955	2432,9	2,48	1,63
14	800	1955	2432,9	2,48	3,44
15	800	1955	2432,9	2,48	3,67
16	800	1955	2428,7	2,45	1,53
17	800	1955	2428,7	2,45	1,70
18	800	1955	2428,7	2,45	1,45

### ANEXO C.2: Ensayo módulo de elasticidad

Muestra No 1		zeolita						
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10690,45
0,02	53,84	0,02	53,84	0,01	53,84	0,01	53,84	
0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,02	161,53	
0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	
E1	10611,33	E2	11048,28	E3	10231,61	E4	10870,59	

Muestra No 2		100°C						
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10127,30
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	
0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	
0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	
E1	9544,09	E2	10230,10	E3	10176,51	E4	10558,51	

Muestra No 3		zeolita						
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 9679,81
0,02	53,84	0,02	53,84	0,01	53,84	0,02	53,84	
0,03	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	
0,04	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	
E1	8586,45	E2	9715,46	E3	10133,08	E4	10284,26	

Muestra No 4		100°C						
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 9656,78
0,03	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	
0,04	107,69	0,03	107,69	0,03	107,69	0,03	107,69	
0,04	161,53	0,04	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	
0,05	215,37	0,04	215,37	0,04	215,37	0,04	215,37	
E1	8297,97	E2	9834,84	E3	10438,35	E4	10055,95	

Muestra No 5		zeolita						
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10728,79
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	
0,02	107,69	0,03	107,69	0,03	107,69	0,03	107,69	
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	
0,03	215,37	0,04	215,37	0,03	215,37	0,04	215,37	
E1	9827,29	E2	10979,54	E3	11556,78	E4	10551,57	

Muestra No 6		100°C						
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 9790,97
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	
0,03	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	0,03	107,69	
0,04	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	
0,04	215,37	0,04	215,37	0,04	215,37	0,04	215,37	
E1	9397,88	E2	9991,92	E3	9861,40	E4	9912,70	

Muestra No 7		140°C						
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 12758,81
0,01	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,01	53,84	
0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	
0,02	161,53	0,03	161,53	0,02	161,53	0,02	161,53	
0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	
E1	13304,06	E2	12350,16	E3	12960,19	E4	12420,82	

Muestra No 16		140°C						
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 11211,18
0,02	53,84	0,03	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	
0,03	107,69	0,03	107,69	0,03	107,69	0,03	107,69	
0,03	161,53	0,04	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	
0,03	215,37	0,04	215,37	0,04	215,37	0,03	215,37	
E1	11210,29	E2	11265,08	E3	11162,52	E4	11206,81	

Muestra No 18		140°C						
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 12433,30
0,01	53,84	0,01	53,84	0,02	53,84	0,01	53,84	
0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	
0,02	161,53	0,02	161,53	0,03	161,53	0,02	161,53	
0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	
E1	12596,26	E2	12363,45	E3	12363,45	E4	12410,03	

**PROBETAS ANTES DE SER AFECTADAS POR EL AGUA**

Muestra No 15		100°C							
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio	
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10384,11	
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,01	53,84		
0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69		
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53		
0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37		
E1	10885,94	E2	10270,41	E3	10484,77	E4	9895,33		

Muestra No 12		100°C							
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio	
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10336,55	
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84		
0,03	107,69	0,03	107,69	0,03	107,69	0,02	107,69		
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53		
0,04	215,37	0,04	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37		
E1	10827,38	E2	9678,29	E3	10533,46	E4	10307,07		

Muestra No 14		100°C							
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio	
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10063,24	
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84		
0,02	107,69	0,03	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69		
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53		
0,03	215,37	0,04	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37		
E1	10819,06	E2	10231,29	E3	10063,81	E4	9138,79		

Muestra No 8		Zeolita							
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio	
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10419,83	
0,01	53,84	0,01	53,84	0,01	53,84	0,01	53,84		
0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69		
0,02	161,53	0,02	161,53	0,02	161,53	0,02	161,53		
0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37		
E1	10307,37	E2	10578,03	E3	10430,44	E4	10363,48		

Muestra No 9		Zeolita							
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio	
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10457,69	
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84		
0,03	107,69	0,02	107,69	0,03	107,69	0,03	107,69		
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53		
0,04	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37		
E1	10442,80	E2	10656,79	E3	10133,24	E4	10597,92		

Muestra No 10		Zeolita							
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio	
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10717,78	
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84		
0,03	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69		
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53		
0,04	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37		
E1	9947,70	E2	10857,00	E3	10797,01	E4	11269,39		

Muestra No 11		140°C							
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio	
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10981,29	
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84		
0,03	107,69	0,03	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69		
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53		
0,04	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37		
E1	10172,42	E2	10827,65	E3	11431,39	E4	11493,68		

Muestra No 13		140°C							
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio	
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10644,11	
0,02	53,84	0,01	53,84	0,01	53,84	0,01	53,84		
0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69		
0,03	161,53	0,02	161,53	0,02	161,53	0,02	161,53		
0,03	215,37	0,03	215,37	0,02	215,37	0,03	215,37		
E1	9318,53	E2	10373,74	E3	12292,09	E4	10592,08		

Muestra No 17									
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio	
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10203,58	
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84		
0,03	107,69	0,02	107,69	0,03	107,69	0,03	107,69		
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53		
0,04	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37		
E1	10482,50	E2	9810,57	E3	10321,52	E4	10199,73		

**PROBETAS DESPUES DE SER AFECTADAS POR EL AGUA**

Muestra No 15		100°C						
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10155,84
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	
0,03	107,69	0,03	107,69	0,02	107,69	0,03	107,69	
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	
0,04	215,37	0,04	215,37	0,03	215,37	0,04	215,37	
E1	9741,68	E2	10323,01	E3	10356,54	E4	10202,13	

Muestra No 12		100°C						
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10124,24
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	
0,03	107,69	0,03	107,69	0,03	107,69	0,03	107,69	
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	
0,04	215,37	0,04	215,37	0,04	215,37	0,04	215,37	
E1	9902,14	E2	10147,25	E3	10033,43	E4	10414,16	

Muestra No 14		100°C						
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10039,74
0,02	53,84	0,01	53,84	0,02	53,84	0,01	53,84	
0,03	107,69	0,02	107,69	0,03	107,69	0,02	107,69	
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	
0,04	215,37	0,03	215,37	0,04	215,37	0,03	215,37	
E1	9391,59	E2	10512,67	E3	9969,84	E4	10284,86	

Muestra No 8		Zeolita							
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio	
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10154,54	
0,02	53,84	0,02	53,84	0,01	53,84	0,02	53,84		
0,03	107,69	0,03	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69		
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53		
0,04	215,37	0,04	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37		
E1	9250,88	E2	9609,96	E3	10659,21	E4	11098,13		

Muestra No 9		Zeolita							
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio	
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10356,54	
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84		
0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69		
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53		
0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37		
E1	10675,48	E2	10365,35	E3	9968,84	E4	10416,47		

Muestra No 10		Zeolita							
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio	
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10616,70	
0,02	53,84	0,02	53,84	0,01	53,84	0,02	53,84		
0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69		
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53		
0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37		
E1	10560,08	E2	10560,08	E3	10504,71	E4	10841,94		

Muestra No 11		140°C							
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio	
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10977,40	
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84		
0,03	107,69	0,03	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69		
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53		
0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37	0,03	215,37		
E1	10492,81	E2	11154,38	E3	11108,03	E4	11154,38		

Muestra No 13		140°C							
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio	
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 10505,93	
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84		
0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69	0,02	107,69		
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53		
0,03	215,37	0,03	215,37	0,04	215,37	0,03	215,37		
E1	10511,04	E2	10678,81	E3	10678,81	E4	10155,06		

Muestra No 17									
Ensayo No 1		Ensayo No 2		Ensayo No 3		Ensayo No 4		Promedio	
Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	Deform. Unit	Carga (Kpa)	E = 9989,47	
0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84	0,02	53,84		
0,03	107,69	0,03	107,69	0,03	107,69	0,03	107,69		
0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53	0,03	161,53		
0,04	215,37	0,04	215,37	0,04	215,37	0,04	215,37		
E1	9421,94	E2	10321,52	E3	10250,73	E4	9963,71		

### ANEXO C.3: Ensayo estabilidad y flujo

Muestra 1		Zeolita				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
3,8	2	3847,5	0,2	3847,5	17114,5327	17,1145327

Muestra 2		100°C				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
3,8	1	3847,5	0,1	3847,5	17114,5327	17,1145327

Muestra 3		Zeolita				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
2,7	2,2	2733,75	0,22	2733,75	12160,3258	12,1603258

Muestra 4		100°C				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
2,75	2,05	2784,375	0,205	2784,375	12385,5171	12,3855171

Muestra 5		Zeolita				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
3,5	2,2	3543,75	0,22	3543,75	15763,3853	15,7633853

Muestra 6		100°C				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
2,35	2,87	2379,375	0,287	2379,375	10583,9873	10,5839873

Muestra 7		140°C				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
3,3	2,15	3341,25	0,215	3341,25	14862,6205	14,8626205

Muestra 8		Zeolita				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
2,4	2,3	2430	0,23	2430	10809,1785	10,8091785

Muestra 9		Zeolita				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
3,2	1,98	3240	0,198	3240	14412,238	14,412238

Muestra 10		Zeolita				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
2,75	1,45	2784,375	0,145	2784,375	12385,5171	12,3855171

Muestra 11		140°C				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
3,8	1,98	3847,5	0,198	3847,5	17114,5327	17,1145327

Muestra 12		100°C				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
2,7	2,3	2733,75	0,23	2733,75	12160,3258	12,1603258

Muestra 13		Zeolita				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
3,2	1,8	3240	0,18	3240	14412,238	14,412238

Muestra	14	100°C				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
3,4	3	3442,5	0,3	3442,5	15313,0029	15,3130029

Muestra	15	100°C				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
2,7	1,85	2733,75	0,185	2733,75	12160,3258	12,1603258

Muestra	16	140°C				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
4,05	2,5	4100,625	0,25	4100,625	18240,4888	18,2404888

Muestra	17	140°C				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
2,8	2,35	2835	0,235	2835	12610,7083	12,6107083

Muestra	18	140°C				
Estabilidad (Vueltas)	Flujo (vueltas)	Estabilidad (Libras)	Flujo (pulg)	Estabilidad (Lbf)	Estabilidad (N)	Estabilidad (KN)
3,25	1,98	3290,625	0,198	3290,625	14637,4293	14,6374293