

ADITIVOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFALTICAS DE ALTA RESISTENCIA A LA
DEFORMACION PERMANENTE

JORGE EDUARDO SERRANO MALAGON
JOSE WILLINTHON ORTIZ CAICEDO



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER



FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS
BUCARAMANGA
2007

ADITIVOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFALTICAS DE ALTA RESISTENCIA A LA
DEFORMACION PERMANENTE

JORGE EDUARDO SERRANO MALAGON
JOSE WILLINTHON ORTIZ CAICEDO

Tesis de grado en la modalidad de 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 INGENIERIAS FISICOMECANICAS
BUCARAMANGA
2007

A DIOS, a mis padres, a mis tías Margarita y Rosa, a mis hermanos por su cariño y apoyo a mi novia por su amor y aguante incondicional, a mis amigos por estar en las buenas y malas. Les estaré agradecido por siempre.

Jorge Eduardo Serrano Malagón

A Dios, a mi madre por todo su amor y su comprensión, a la memoria de mi padre quien me brindó todo en la vida, a mi abuela por sus bendiciones, a mi novia por su constante apoyo y a todos mis familiares y amigos que de alguna forma me ayudaron a alcanzar este logro.

José Willinthon Ortiz Caicedo

AGRADECIMIENTOS

Los Autores expresan sus agradecimientos a:

DIOS

Ing. Eduardo Castañeda Pinzón

Ing. Emilio Arenas

Germán Hernández y Jairo Hernández

Corasfaltos Colombia

Termo-Tasajero

A nuestros amigos y familiares

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE ANEXOS	15
RESUMEN	16
ABSTRACT	18
TITTLE	18
INTRODUCCION	20
1. CAPAS DE RODAMIENTO	22
1.1 STONE MATRIX ASPHALT	22
1.1.1 Reseña histórica	22
1.1.2 Generalidades.....	22
1.1.3 Composición de la mezcla.....	23
1.1.3.1 Agregado grueso.....	23
1.1.3.2 Agregado fino	23
1.1.3.3 Filler mineral.....	23
1.1.3.4 Cemento asfáltico.....	23
1.1.3.5 Fibras espesantes	24
1.1.3.6 Granulometría	24
1.1.4 Principios del Stone Matrix Asphalt	25
1.1.5 Ventajas	25
1.1.6 Aplicación.....	26
1.2 MEZCLAS MDC-2 Y MDC-3.....	27
1.2.1 Generalidades.....	27
1.2.2 Composición de la mezcla.....	27
1.2.2.1 Agregado mineral	27
1.2.2.2 Cemento asfáltico.....	28
1.3 MEZCLA M1	28
1.3.1 Generalidades.....	28

1.3.2	Composición de la mezcla	28
1.4	COMPARACIÓN DE GRADACIÓN Densa Y DISCONTINUA.....	29
1.5	BENEFICIOS ECONÓMICOS (SMA – MEZCLA CONVENCIONAL).....	29
2.	METODOLOGIA DEL ESTUDIO.....	30
2.1	DESCRIPCION.....	30
2.2	MATERIALES EMPLEADOS.....	30
2.2.1	Agregado mineral.....	30
2.2.1.1	Procedencia.....	30
2.2.1.2	Tamaño Máximo Nominal	30
2.2.1.3	Ensayos Previos Realizados al Agregado	30
2.2.2	Cemento Asfáltico Modificado	31
2.2.3	Fibra de Celulosa.....	31
2.2.4	Ceniza Volante*	32
2.2.4.1	CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS VOLANTES	33
2.2.4.1.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICA.....	33
2.3	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS	35
2.3.1	Granulometrías Recomendadas	35
2.3.1.1	Gradación SMA.....	35
2.3.1.2	Gradación MDC-2 y MDC-3	35
2.3.1.3	Gradación M1	35
2.3.2	Granulometrías de Mezclas Estudiadas	35
2.3.3	Determinación del Porcentaje Óptimo de Asfalto.....	36
2.3.3.1	Ecuación de Duriez	36
2.3.3.2	Porcentajes Óptimos de Asfalto en las Mezclas.....	36
2.3.4	Metodología usada para la fabricación de probetas.....	37

2.3.4.1	Número de probetas fabricadas	40
2.3.4.2	Temperatura de mezcla y compactación	41
2.3.4.3	Nivel de compactación de probetas	41
2.4	ENSAYOS.....	41
2.4.1	Medición de Densidad Bulk y Contenido de Vacíos	41
2.4.2	Determinación del Módulo Elástico a 7.5 ° C	44
2.4.3	Ensayo Creep sin Confinar a 60 ° C (Carga Estática).....	46
2.4.4	Estabilidad – Flujo.....	50
2.4.5	Análisis De Porcentaje De Vacios	53
2.4.6	Análisis de escurrimiento de asfalto	55
3.	RESULTADOS DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL	57
3.1	AGREGADOS.....	57
3.1.1	Caracterización de los Agregados	57
3.1.2	Petrología Mineral de Agregados	57
3.2	ASFALTO.....	58
3.2.1	Características Reológicas del Asfalto	58
3.3	CONFORMACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	58
3.3.1	Granulometría Utilizada	58
3.3.2	Porcentaje de Asfalto Utilizado	59
3.4	CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS.....	59
3.4.1	Nomenclatura	59
3.4.2	Geometría	60
3.5	ANÁLISIS DE DENSIDAD Y VACÍOS.....	60
3.5.1	Densidad Bulk	60
3.5.1.1	Curva de Peso Específico Vs. % Asfalto	60

3.5.2	Vacíos con Aire	61
3.5.2.1	Curva de Vacíos con Aire Vs. % Asfalto	61
3.5.3	Vacíos en el Agregado Mineral.....	61
3.5.3.1	Curva VAM Vs. Porcentaje de Asfalto	61
3.5.4	Vacíos Llenos de Asfalto	62
3.5.4.1	Curva VAF Vs. % Asfalto	62
3.6	EVALUACION DE MODULO ELASTICO.....	63
3.6.1	Mezcla MDC-2	63
3.6.1.1	Curva Esfuerzo Vs. Deformación	63
3.6.1.2	Módulos de Elasticidad	64
3.6.2	Mezcla MDC-3	64
3.6.2.1	Curva Esfuerzo Vs. Deformación	64
3.6.3	Mezcla M1.....	65
3.6.3.1	Curva Esfuerzo Vs. Deformación	65
3.6.3.2	Módulos de Elasticidad	66
3.6.4	Mezcla SMA - CELULOSA	66
3.6.4.1	Curva Esfuerzo Vs. Deformación	66
3.6.4.2	Módulos de Elasticidad	67
3.6.5	Mezcla SMA - CENIZA	67
3.6.5.1	Curva Esfuerzo Vs. Deformación	67
3.6.5.2	Módulos de Elasticidad	68
3.7	DEFORMACIÓN A 60° C (ENSAYO CREEP SIN CONFINAR)	69
3.7.1	Gráficos Deformación Vs. Tiempo (MDC-2).....	69
3.7.2	Gráficos Deformación Vs. Tiempo (MDC-3).....	70
3.7.3	Gráficos Deformación Vs. Tiempo (M1).....	71

3.7.4	Gráfico Deformación Vs. Tiempo (SMA- CELULOSA).....	72
3.7.5	Gráfico Deformación Vs. Tiempo (SMA- CENIZA).....	73
3.8	ESTABILIDAD MARSHALL.....	74
3.9	FLUJO MARSHALL.....	74
3.10	ENSAYO DE ESCURRIMIENTO.....	75
3.11	TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS.....	75
4.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE MEZCLAS.....	77
4.1	DESCRIPCIÓN.....	77
4.2	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	77
4.2.1	Densidad Bulk.....	77
4.2.2	Vacíos Con Aire.....	78
4.2.3	Vacíos en el Agregado Mineral.....	78
4.2.4	Vacíos Llenos de Asfalto.....	79
4.2.5	Módulo Elástico a 7.5 ° C.....	80
4.2.6	Creep sin Confinar a 60 ° C.....	81
4.2.7	Estabilidad Marshall.....	83
4.2.8	Flujo Marshall.....	84
4.2.9	Escurrimiento.....	84
5.	RECOMENDACIONES.....	86
6.	CONCLUSIONES.....	87
7.	BIBLIOGRAFIA.....	88

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 RANGOS GRANULOMÉTRICOS DEL SMA	24
TABLA 2 CONTENIDO DE HUMEDAD (%HUM), PÉRDIDAS A LA INCINERACIÓN (%P.F.), DENSIDAD REAL, (D.R.), DENSIDAD APARENTE (D.A.), POROSIDAD (%POR) Y SUPERFICIE ESPECÍFICA (S.E.) DE LAS CENIZAS VOLANTES SELECCIONADAS.....	34
TABLA 3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE TAMAÑO DE GRANO (MM) PARA LAS CENIZAS VOLANTES	34
TABLA 4 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LAS CENIZAS VOLANTES. CONTENIDOS EN % EN PESO.....	34
TABLA 5 PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO.....	36
TABLA 6 NIVEL DE COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA.....	41
TABLA 7 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS	57
TABLA 8 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE AGREGADOS.....	57
TABLA 9 PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL ASFALTO	58
TABLA 10 GRADACIONES EMPLEADAS MDC-2, MDC-3, M1 Y SMA (SMA-CENIZA Y SMA-CELULOSA).....	59
TABLA 11 PORCENTAJES DE ASFALTO EMPLEADOS.....	59
TABLA 12 MÓDULOS ELÁSTICOS DE LA MEZCLA MDC-2	64
TABLA 13 MÓDULOS ELÁSTICOS DE LA MEZCLA MDC-2	65
TABLA 14 MÓDULOS ELÁSTICOS DE LA MEZCLA M1	66
TABLA 15 MÓDULOS ELÁSTICOS DE LA MEZCLA SMA - CELULOSA	67
TABLA 16 MÓDULOS ELÁSTICOS DE LA MEZCLA SMA - CENIZA	68
TABLA 17 DEFORMACIÓN FINAL CREEP MDC-2	69
TABLA 18 DEFORMACIÓN FINAL CREEP MDC-3	70
TABLA 19 DEFORMACIÓN FINAL CREEP M1.....	71
TABLA 20 DEFORMACIÓN FINAL CREEP SMA-CELULOSA	72
TABLA 21 DEFORMACIÓN FINAL SMA-CENIZA.....	73
TABLA 22 RESULTADOS EN LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	76

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	IMAGEN TRANSVERSAL DE MEZCLA SMA (DERECHA) Y TRADICIONAL (IZQUIERDA).....	24
FIGURA 2	MEZCLA SMA Y MEZCLA TRADICIONAL.....	25
FIGURA 3	MEZCLA SMA EN TERRENO	26
FIGURA 4	MEZCLA DENSA Y DISCONTINUA EN CALIENTE	29
FIGURA 5	DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LAS CENIZAS VOLANTES DE TERMO-TASAJERO	34
FIGURA 6	GRADACIÓN TÍPICA DE LA MEZCLA.....	35
FIGURA 7	PESO ESPECÍFICO COMPACTADO VS PORCENTAJE DE ASFALTO 60	
FIGURA 8	VACÍOS CON AIRE EN LAS MEZCLAS EN ESTUDIO	61
FIGURA 9	VAM VS PORCENTAJE DE ASFALTO	62
FIGURA 10	VAF VS PORCENTAJE DE ASFALTO	63
FIGURA 11	ESFUERZO VS DEFORMACIÓN MDC-2	64
FIGURA 12	ESFUERZO VS DEFORMACIÓN MDC-3	65
FIGURA 13	ESFUERZO VS DEFORMACIÓN M1	66
FIGURA 14	ESFUERZO VS DEFORMACIÓN SMA- CELULOSA.....	67
FIGURA 15	ESFUERZO VS DEFORMACIÓN SMA- CENIZA.....	68
FIGURA 16	DEFORMACIÓN VS TIEMPO MDC-2	69
FIGURA 17	DEFORMACIÓN VS TIEMPO MDC-3	70
FIGURA 18	DEFORMACIÓN VS TIEMPO M1	71
FIGURA 19	DEFORMACIÓN VS TIEMPO SMA-CELULOSA	72
FIGURA 20	DEFORMACIÓN VS TIEMPO SMA-CENIZA	73
FIGURA 21	RESISTENCIA A LA CARGA.....	74
FIGURA 22	RESISTENCIA A LA CARGA.....	74
FIGURA 23	ENSAYO DE ESCURRIMIENTO	75

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A.	CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	90
ANEXO B.	CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS	100
ANEXO C.	DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR MARSHALL	106
ANEXO D.	ENSAYOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD	111
ANEXO E.	ENSAYO CREEP	114
ANEXO F.	ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO	118
ANEXO G.	ESCURRIMIENTO	122

RESUMEN

ADITIVOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFALTICAS DE ALTA RESISTENCIA A LA DEFORMACION PERMANENTE*

AUTORES:

SERRANO MALAGON, Jorge Eduardo
ORTIZ CAICEDO, Jose Willinthon**

PALABRAS CLAVES:

STONE MATRIX ASPHALT
MEZCLA DENSA EN CALIENTE
MEZCLA DISCONTINUA EN CALIENTE
CENIZAS VOLANTES

DESCRIPCIÓN

Los avances tecnológicos de finales del siglo XX han permitido desarrollar concretos bituminosos de características especiales que presentan un comportamiento muy superior a las mezclas densas convencionales. Entre las tecnologías más difundidas y exitosas están las mezclas del tipo Stone Matrix Asphalt (SMA).

En Colombia el uso de dicha mezcla aun no se ha tenido en cuenta debido a la poca información y normatividad con que se cuenta. En la universidad Industrial de Santander se realizó un estudio inicial usando fibras disponibles comercialmente a nivel local que arrojaron resultados satisfactorios en cuanto a comportamiento mecánico pero al evaluar su resistencia a factores climáticos, los resultados no fueron tan favorables.

Por esta razón, el presente trabajo consiste en:

1. Analizar la respuesta a las deformaciones permanentes y la fatiga de un SMA fabricado con una gradación abierta de agregados pétreos y un asfalto modificado con polímeros estabilizado con cenizas volantes ya que la fibra de celulosa utilizada para la fabricación del SMA es costosa pues no es producida en el país, y la que se encuentra comercialmente presentó un comportamiento inapropiado ante la acción del agua.
2. Comparar dichos resultados con los obtenidos en el proyecto "ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE DEFORMACIÓN EN LAS MEZCLAS MDC-2, MDC-3, M1 Y STONE MATRIX ASPHALT" en el que se usó la

anteriormente mencionada y en el que se confirmó la superioridad de las propiedades mecánicas del SMA.

El SMA con cenizas volantes tuvo la mayor resistencia a la carga y las menores deformaciones entre todas las mezclas en estudio; también presentó porcentajes de escurrimiento superiores al permitido. Se recomienda analizar nuevas granulometrías y tipos de asfalto y otros porcentajes de celulosa y ceniza, que permitan optimizar el comportamiento de la mezcla sobre todo al reducir el escurrimiento de asfalto, y evaluar en ella la complejidad de sus propiedades de deformación.

* Tesis de Grado

* * Facultad de ingenierías físico mecánicas. Ingeniería civil. ING. EDUARDO
ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN

ABSTRACT

TITLE

ADDITIVES TO PRODUCE ASPHALTIC MIXTURES OF HIGH RESISTANCE TO THE PERMANENT DEFORMATION *

AUTHORS:

SERRANO MALAGON, Jorge Eduardo
ORTIZ CAICEDO, José Willinthon * *

KEY WORDS:

STONE MATRIX ASPHALT
HOT DENSE MIXTURES
DISCONTINUOUS DENSE MIXTURES
FLYING ASHES

DESCRIPTION

The technological advances of final of the XX century have allowed the development of bituminous concretes of special characteristics that, in some aspects, present a very superior behavior to the conventional dense mixtures. Among the most diffused and successful technologies are the mixtures of the type Stone Matrix Asphalt (SMA).

In Colombia the use of this mixture has not been considered yet due to the little information and standards available. In the Industrial University of Santander it has been carried out an initial study using fibers commercially available at local level that showed satisfactory results for mechanical behavior but when evaluating their resistance to climatic factors, the results were not so favorable.

For this reason, the present work consists in:

1. Analyzing the answer to permanent deformations and fatigue of a SMA manufactured with an open gradation of stony aggregates and an asphalt modified with polymers stabilized with flying ashes since the cellulose fiber used for the production of the SMA is expensive because it is not produced in the country, and the one that is commercially available presented an inappropriate behavior to the action of the water.
2. To compare these results with those obtained in the project "COMPARATIVE ANALYSIS OF PROPERTIES OF DEFORMATION IN THE MIXTURES MDC-2, MDC-3, M1 AND STONE MATRIX ASPHALT" in which it was used the previously mentioned fiber and in which it was confirmed the superiority of the mechanical properties of the SMA.

The SMA with flying ashes had the biggest resistance to the load and the smallest deformations among all the mixtures in study; it is also more economic in the short and long term, due to their little thickness and the low price of the ash. It also presented glide percentages superior to the allowed. It is recommended to analyze new grains, contents and types of asphalt and other cellulose and ash percentages that allow to optimize the behavior of the mixture mainly by reducing the asphalt glide, and to evaluate in it, by means of diverse tests, the complexity of their properties of deformation.

* DEGREE Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical engineering. Civil Engineering. ENGINEER
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON

INTRODUCCION

Los tipos más frecuentes de falla asociados a la aplicación reiterada de las cargas del tránsito para un pavimento flexible, son la fisuración de las capas asfálticas y la acumulación de deformaciones permanentes en todas las capas componentes de la estructura y en el suelo de fundación. Las deformaciones plásticas conducen a la formación de "ahuellamientos" que comprometen la comodidad y la seguridad, y en consecuencia, la calidad de la circulación de los usuarios.

Al respecto, el diseño estructural de los pavimentos se ha orientado a establecer valores límites de las tensiones y deformaciones con el objeto de valorar el período de tiempo para el que, bajo determinadas condiciones de sollicitación, resultarán profundidades de huellas compatibles para un nivel de servicio esperado o proyectado. Con este objetivo los métodos de diseño actuales deben adoptar criterios de falla.

Los esfuerzos y deformaciones producidos por el tráfico pesado, a lo largo de la vida en servicio de los pavimentos flexibles, causan daños de diferente naturaleza y grado de severidad. Estos deterioros pueden caracterizarse de distintas maneras: deformaciones plásticas (ahuellamiento), fisuras, desprendimientos, etc.

El incremento del contenido de asfalto produce en las mezclas bituminosas un efecto favorable sobre su comportamiento a fatiga, si bien este mayor porcentaje de asfalto podría llegar a derivar en la aparición de deformaciones plásticas y/o exudaciones. Además, permite aumentar la resistencia al envejecimiento, pues la capa que rodea a los agregados es de mayor espesor.

Las mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA), desarrolladas originalmente en Alemania, son caracterizadas como mezclas discontinuas para capas de pavimento delgadas; en los SMA se emplean fibras como materiales componentes.

Las fibras incorporadas en las mezclas bituminosas son el medio ideal para elevar las proporciones de ligante sin riesgos de exudación. De tal forma, se puede disponer de una película de asfalto más gruesa envolviendo a los agregados.

Químicamente, las fibras que han sido empleadas en este estudio son inertes, resistentes y no presentan problemas de toxicidad. Todas estas ventajas deben ser valoradas a la hora de definir la calidad final del producto, pues la aplicación de estas nuevas tecnologías permitiría disponer de mezclas asfálticas con un comportamiento superior a un relativo bajo costo

De acuerdo a la experiencia en países que han utilizado este tipo de mezclas se puede decir que:

- SMA es una mezcla asfáltica de excelente desempeño a largo plazo, específicamente debido a su alta resistencia a la deformación permanente bajo un tráfico pesado.
- La cantidad y calidad de los agregados son esenciales. La granulometría discontinua del agregado es importante para lograr un esqueleto de piedras altamente resistente lo que redundará en la alta estabilidad del SMA evitando deformaciones permanentes.

- Un alto contenido de ligante asfáltico reduce el envejecimiento y agrietamiento, por tanto es otra base para una larga vida útil.
- Para una buena homogeneidad de la mezcla y evitar segregación y drenaje del ligante asfáltico se recomienda el uso de fibras como aditivo estabilizador.
- La SMA debe ser colocada y compactada a temperaturas mayores a las mezclas tradicionales ya que el entrelazado de partículas se rigidiza en exceso con temperaturas menores.

En Colombia, la SMA apenas empieza a evaluarse, los únicos estudios acerca del SMA en la UIS fueron los realizados por los ingenieros Emilio Arenas Romero y Andrés Julián Serrano Corzo en su tesis de grado “ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE DEFORMACIÓN EN LAS MEZCLAS MDC-2, MDC-3, M1 Y STONE MATRIX ASPHALT” la cual consistió en la fabricación de probetas tipo SMA estabilizadas con fibra de celulosa *cellosize QP 52000h*, la cual se probó ante la acción del agua presentando un comportamiento inapropiado, pues se convierte en gel, además cuando se sumerge una probeta de este tipo en agua se torna extremadamente resbalosa, lo cual compromete la seguridad del conductor. Se probó entonces estabilizar el SMA con cenizas volantes provenientes de la termo eléctrica de Tasajero (Termo-Tasajero en Norte de Santander).

Este estudio es un aporte inicial a dicha evaluación; busca comparar algunas propiedades de deformación de las mezclas MDC-2, MDC-3, M1 y SMA estabilizado con ceniza volante, mediante un proceso de diseño, fabricación y análisis similar, usando los mismos materiales pétreos locales y asfalto modificado.

En el primer capítulo se enuncian las propiedades principales, funcionamiento y composición de las mezclas en estudio, junto a algunas recomendaciones constructivas y de diseño. En el segundo capítulo es relatada la metodología empleada, que abarca las etapas de caracterización de materiales, diseño, fabricación y ensayo de probetas. El tercero muestra los resultados de la campaña experimental, generados a partir de pruebas de laboratorio que permitieron medir algunas propiedades de deformación de las emulsiones; en el capítulo cuarto se realiza un análisis comparativo de mezclas con base en estos resultados y en el capítulo final se presentan las conclusiones del proyecto.

NOTA: Se realizaron pruebas sobre la fibra de celulosa, para determinar su comportamiento a la acción de factores erosionantes, como el sol y el agua, esta última resulto insatisfactoria ya que se notó que la fibra de celulosa *cellosize qp*, absorbía una gran cantidad de agua hasta el punto de cambiar su estado de sólido a gel y dicha situación no mejoraba con la incorporación de asfalto, por lo que se decidió que evidentemente era inadecuada para la realización de un SMA, ante este problema se decidió trabajar con cenizas volantes y se decidió reproducir la realización de las probetas de la tesis “ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE DEFORMACIÓN EN LAS MEZCLAS MDC-2, MDC-3, M1 Y STONE MATRIX ASPHALT” para utilizar los resultados obtenidos en dicha tesis como comparativos.

1. CAPAS DE RODAMIENTO

Esta es la capa superficial del pavimento que recibe directamente la acción del tránsito; debe ser segura para el manejo, tener una superficie uniforme, suave y confortable, que aumente la comodidad del usuario, buena drenabilidad, un color conveniente para la reflexión luminosa, bajo ruido por rodadura, y alta resistencia a la deformación permanente, el deslizamiento, la abrasión y la desintegración por efectos ambientales.

Durante años, las mezclas densas en caliente (entre las que se incluyen la MDC-2 y MDC-3) se han empleado en Colombia como capas de rodadura. El principal problema al que se han enfrentado, ha sido su escasa resistencia a la deformación permanente, siendo incontables los proyectos en los que, en pocos meses, se presentan deformaciones que se esperarían dentro de muchos años. Por esta razón, crece constantemente la necesidad de evaluar otros tipos de mezcla, que resistan la carga producida por el tráfico, sin generar altas deformaciones. Como una alternativa para ello, han sido ideados los microaglomerados discontinuos en caliente, de los que hacen parte, las mezclas M1 y SMA.

1.1 STONE MATRIX ASPHALT

1.1.1 Reseña histórica

La mezcla SMA para pavimento fue desarrollada en Alemania a finales de los años 60. Se deseaba obtener un pavimento de máxima resistencia al desgaste y deterioro causado por los neumáticos de clavos en las rutas europeas. Una empresa de pavimentos, STRABAG, con la colaboración de J. Rettenmaier (líder en Tecnología de Fibras) desarrolló la mezcla SMA. Después de la prohibición del uso de neumáticos de clavos, se verificó que el pavimento SMA aseguraba pavimentos durables que exhibían una muy elevada resistencia al desgaste en las rutas de alto tránsito.

Como consecuencia de ello, en 1984 se normalizó el sistema SMA en Alemania. Luego comenzó a ser utilizado en otros países de Europa, Estados Unidos y Asia Pacífica. Muchos países han establecido sus propias normas para SMA, y la CEN (Comisión de Standards Europeos) está en proceso de fijar una norma europea estandarizada. Asimismo, en Estados Unidos, Australia, Nueva Zelanda, China, Corea del Sur, Taiwan y otros grandes países asiáticos, el SMA está ganando rápidamente la aceptación de las autoridades viales y la industria del asfalto.

1.1.2 Generalidades

El SMA es una mezcla de poco espesor y granulometría discontinua, es decir, que en ella aparecen partículas en su mayoría distribuidas entre dos tamaños extremos (generalmente 3/8" y N ° 4), con una proporción relativamente baja de los otros tamaños. Se prepara en caliente y consiste de dos partes: un agregado grueso de alta calidad o esqueleto y un mastic a base de arenas, filler, fibras de celulosa y cemento asfáltico, con o sin aditivos modificadores. Tiene una vida útil normal de 30 años; su costo de construcción es del orden de 53 dólares por m² (11 menos que las mezclas convencionales) y no requiere mantenimiento, mientras las demás gastan anualmente en ello, el 25 % de su valor inicial.

Es difícil precisar una guía de diseño exacta para mezclas SMA; aspectos esenciales como la consistencia del esqueleto mineral y el mastic bituminoso, y consecuentemente, la textura de la superficie y estabilidad de la mezcla, están ampliamente relacionados con la gradación escogida y la cantidad y tipo de filler y celulosa empleados.

1.1.3 Composición de la mezcla

En este proyecto, al igual que en la norma INVIAS, se llamará agregado grueso a la fracción de roca retenida en el tamiz N ° 4, filler mineral al polvo que pasa por el tamiz N ° 200 y agregado fino al material comprendido entre ellos.

1.1.3.1 Agregado grueso

Debe provenir preferiblemente de minerales tales como el Granito, Gabro, Diabasa y Basalto, extraídos de la marisma y el lecho de ríos. Tiene que ser en su totalidad gravilla triturada, no absorbente, con un máximo de 20% de partículas planas y alargadas y resistencia al intemperismo acelerado no menor al 15%, si se usa Na₂SO₄. Generalmente se dosifica en cantidades cercanas al 70 % del peso total de la mezcla.

Este debe ser material 100% triturado, arena o una mezcla de los dos. Su intemperismo acelerado en sulfato de sodio no debe exceder el 15 % y su límite líquido debe ser menor a 25. Comúnmente, constituye el 15 % del peso total de la mezcla.

1.1.3.2 Agregado fino

Este debe ser material 100% triturado, arena o una mezcla de los dos. Su intemperismo acelerado en sulfato de sodio no debe exceder el 15 % y su límite líquido debe ser menor a 25. Comúnmente, constituye el 15 % del peso total de la mezcla.

1.1.3.3 Filler mineral

El filler puede ser polvo de piedras calizas u otro material disponible; al momento de usarlo debe estar suficientemente seco para fluir libremente sin formar aglomeraciones, carecer de impurezas orgánicas y tener un índice de plasticidad menor a 4. Se dosifica típicamente en cantidades del orden del 10% del peso total de la mezcla.

1.1.3.4 Cemento asfáltico

El SMA contiene ligante en cantidades que varían entre el 6 y 8 % del peso total, razón por la cual requieren la adición de un sustrato fibroso, comúnmente a base de celulosa, que en este caso será reemplazado por cenizas volantes, que disminuye el riesgo de exudación. Su temperatura de mezcla varía normalmente entre 155 y 163 ° C y se recomienda que no supere los 177 ° C; esta cantidad elevada de betún, da una vida útil prolongada al pavimento.

El escurrimiento y envejecimiento en mezclas asfálticas ha disminuido en los últimos años, al difundirse el uso de asfaltos modificados con polímeros. Estos tienen el valor agregado de mejorar la adherencia y disminuir la susceptibilidad térmica y pueden ser incluidos en diseños SMA.

1.1.3.5 Fibras espesantes

Las fibras son aplicadas en proporciones entre el 0.3 y 0.5 % del peso total. Deben añadirse poco antes de la mezcla, sin calentarse previamente para evitar su deterioro, esparciéndoles uniformemente. No modifican químicamente el asfalto, pero intervienen en las propiedades físicas de la mixtura, permitiendo incrementar el contenido del mismo. Tienden a espesar el betún, manteniendo estable el esqueleto pétreo durante el proceso de mezcla, almacenaje intermedio, pavimentación, y evitando el drenaje de asfalto antes de compactar. La fibra comercial en Colombia (cellosize qp 52000h) presentó un comportamiento negativo ante la aplicación de agua, por lo que se decidió utilizar cenizas volantes como estabilizantes para el SMA.

1.1.3.6 Granulometría

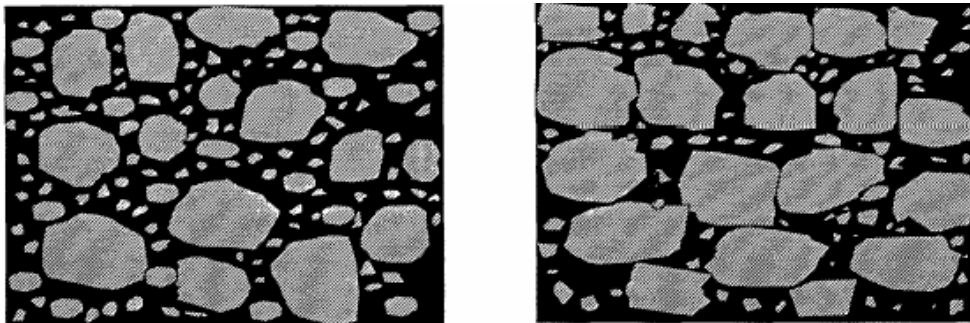


Figura 1 Imagen transversal de mezcla SMA (derecha) y Tradicional (izquierda)

La gradación discontinua del SMA es un factor determinante en su diseño, ya que su estabilidad y resistencia, están ampliamente relacionadas con la calidad y composición del esqueleto pétreo. Debe ser seleccionada de acuerdo al espesor de la carpeta compactada, pero en forma general se adapta a los siguientes rangos.

TAMIZ N °	% QUE PASA
¾	100
½	85-95
3/8	75 máx.
N ° 4	20-28
N ° 8	16-24
N ° 30	12-16
N ° 50	12-15
N ° 200	8-10

Tabla 1 Rangos granulométricos del SMA

1.1.4 Principios del Stone Matrix Asphalt

Se caracteriza por su alto contenido en áridos gruesos y su distribución en un esqueleto de estructura controlada. Los vacíos de la matriz estructural están llenados por un asfalto modificado con polímeros de alta viscosidad. El elevado contenido de agregados – de por lo menos 70% - asegura un contacto perfecto entre las partículas después de la compactación. El grado de viscosidad de la mezcla se obtiene por el agregado de arena triturada.

Las mezclas de SMA tienen un contenido de asfalto mayor a 6,5%. El asfalto se mantiene estabilizado en la composición granulada de áridos durante el proceso de mezcla, almacenaje intermedio, transporte, pavimentación y compactación por el agregado de un aditivo en base a fibras celulósicas que se pretende reemplazar en este caso con cenizas volantes.

La utilización de fibras celulósicas no modifica químicamente al asfalto pero interviene en las propiedades físicas permitiendo incrementar el contenido del mismo. Tiende a espesar el bitumen evitando que el mismo drene de la mezcla previo a la compactación. El contenido de fibra celulósica debe ser 0.3% en peso calculado sobre mezcla total.

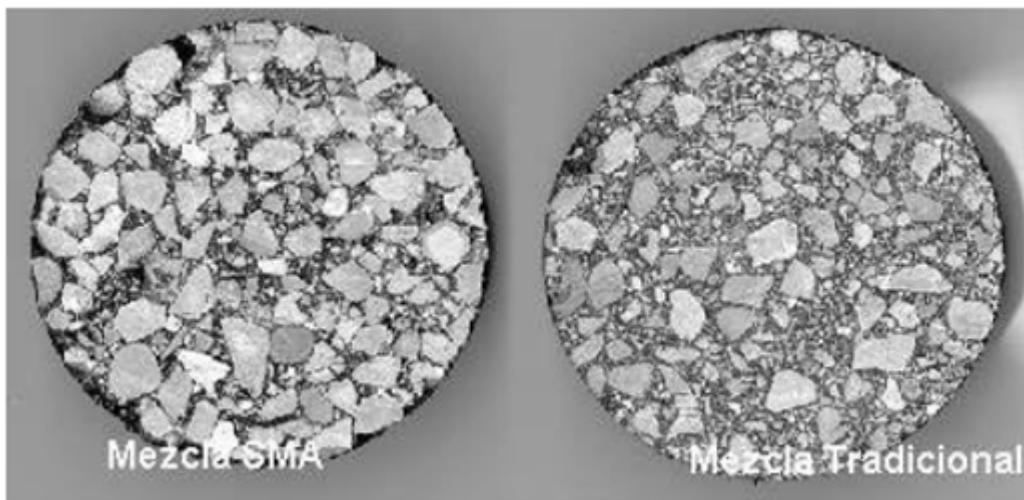


Figura 2 Mezcla SMA y Mezcla tradicional

1.1.5 Ventajas

Buena estabilidad a elevadas temperaturas: La mezcla de SMA presenta un esqueleto pétreo de áridos de alta calidad que provee un incremento en la fricción interna y resistencia al corte dando así una estabilidad extremadamente elevada.

Buena flexibilidad a bajas temperaturas: La mezcla de SMA utiliza un mastic rico en asfalto que ofrece propiedades superiores a las de un concreto denso en caliente en sus características de resistencia al fisuramiento térmico.

Elevada resistencia al desgaste: La mezcla de SMA tiene bajo contenido en vacíos de aire totales que le confiere impermeabilidad y le provee buena resistencia al envejecimiento, a la humedad y eleva la durabilidad.

Elevada capacidad adhesiva entre los agregados y el bitumen: Estas mezclas SMA tienen una gran cantidad de filler y asfalto, las fibras celulósicas se agregan como estabilizante. Ello se hace para absorber bitumen, espesar la película bituminosa y mejorar la adhesión bitumen / áridos.

Una mezcla que no tiende a separarse: Se obtiene una eficiente estabilización de la mezcla para evitar la separación de las partículas áridas gruesas

Buena resistencia al deslizamiento: Debido a la profundidad de su textura superficial y al uso de áridos gruesos, se obtiene una excelente resistencia al deslizamiento.

Salpicado reducido: Debido a la profundidad de textura superficial hay menos salpicado de agua y, de noche, es menor el reflejo de la superficie y se mejora la visibilidad de las demarcaciones del camino.

Menos ruido de tráfico: SMA presenta generalmente disminución de ruidos debidos a las propiedades de textura conseguidos. Ello lo hace sumamente útil en áreas residenciales o zonas donde se requiere silencio

1.1.6 Aplicación

La SMA debe ser colocada y compactada a temperaturas mayores a las de las mezclas tradicionales, ya que el entrelazado de partículas se rigidiza en exceso, a causa del alto contenido de asfalto. Antes de extenderla, la superficie de aplicación debe estar seca y libre de cualquier material suelto y la temperatura ambiente debe mantenerse arriba de los 10° C. La capa delgada del SMA debe colocarse sobre una superficie nivelada, donde los baches hayan sido tapados con mezclas en caliente o en frío.



Figura 3 Mezcla SMA en terreno

Las características de este tipo de mezclas las hacen especialmente indicadas para su extendido sobre pavimentos de hormigón o en refuerzos en superficies sometidas a condiciones de tráfico exigentes. Quizá su mayor inconveniente sea la dificultad de su compactación, ya que solo es posible conseguir el 97 % del valor sugerido por ciertas normas, si este proceso, junto a la fabricación y extensión, se llevan a cabo con gran cuidado.

1.2 MEZCLAS MDC-2 Y MDC-3

1.2.1 Generalidades

La MDC-2 y MDC-3 son mezclas densas en caliente, también llamadas concreto asfáltico. Están definidas como la combinación uniformemente dosificada de agregado y asfalto, mezclados mientras se mantiene una temperatura previamente determinada en el laboratorio, que garantiza la mejor adherencia entre ellos.

A diferencia del SMA, están incluidas en la norma INVIAS, que controla los diseños de pavimentos en Colombia. No requieren la adición de fibras celulósicas que eviten la exudación, pues no poseen un elevado contenido de asfalto, y su gradación densa les confiere una mayor cantidad de huecos de aire totales.

Son mezclas efectivas en condiciones de tráfico moderadas, pero presentan problemas de estabilidad ante sollicitaciones de carga exigentes. Su vida útil es pequeña en comparación con mezclas como el SMA, luego requieren grandes inversiones en gastos de reparación y mantenimiento.

Han sido empleadas durante años en diseños de pavimentos en Colombia; según el INVIAS la MDC – 2 debe emplearse en carpetas de espesor mayor a 3cm, mientras la MDC – 3 se utiliza en los demás casos.

1.2.2 Composición de la mezcla

Estas mezclas están compuestas por los siguientes elementos: agregado grueso, fino, filler mineral y cemento asfáltico.

1.2.2.1 Agregado mineral

Los requerimientos de calidad del agregado, exigidos por el INVIAS para el diseño de estas mezclas, están descritos en el artículo 400 – 02 (tabla 400.1).

Deben tener una naturaleza tal, que al entrar en contacto con el asfalto se adhieran lo mayor posible a él, sin generar desprendimientos por afecto del agua y el tránsito.

El agregado grueso se dosifica en una cantidad cercana al 35 % del peso total de la mezcla. Deberá provenir de la trituración de roca o grava; sus fragmentos han de ser limpios, durables, sin exceso de partículas planas y alargadas, blandas o desintegrables. En el momento de la mezcla estarán libres de polvo, arcilla o cualquier otro material que pueda disminuir la adhesión con el asfalto.

El agregado fino será arena natural, de trituración o una combinación de ambas. Sus granos han de ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular. Al igual que en la

fracción gruesa debe asegurarse la adherencia con el asfalto, garantizando que estén libres de sustancias extrañas. Generalmente constituye el 55 % del peso de la mezcla.

El llenante mineral podrá provenir de la trituración del agregado empleado en el diseño o de productos comerciales como la cal hidratada y el cemento Portland y será aplicado en una proporción del orden del 6 % del peso de la mezcla.

1.2.2.2 Cemento asfáltico

El cemento asfáltico empleado en este tipo de mezclas, según la norma INVIAS, puede ser convencional o modificado; en el primer caso, es escogido en función de las características climáticas de la región entre el asfalto 60 -70 y 80 -100 (tabla 400.2, Art. 400 – 02) y en el segundo, debe cumplir con los requerimientos señalados en el mismo artículo, en la tabla 400.4. Se aplica en una cantidad aproximada del 5 % en peso.

1.3 MEZCLA M1

1.3.1 Generalidades

Esta mezcla hace parte de los llamados microaglomerados discontinuos en caliente, basados en el uso de cementos asfálticos modificados (aunque pueden usarse los convencionales) y la adición, en algunos casos, de fibras poliméricas, celulósicas o de fibra de vidrio; emplean áridos de alta calidad con un tamaño máximo de 12 mm. En Colombia, al igual que en España, son clasificadas en dos tipos: Las mezclas F (capas finas) con espesores entre 2 y 3.5cm y las M (monogranulares) con grosores entre 1 y 2cm. Utilizan una granulometría abierta con un contenido de áridos gruesos cercano al 70 % del peso total, que como se mencionó anteriormente, aumenta la fricción interna de la mezcla, mejorando su estabilidad.

Respecto a las mezclas tradicionales ha sido comprobado que ofrecen mayor seguridad al conductor a cualquier velocidad; tienen buen drenaje superficial en tiempo de lluvia, impidiendo la formación de una película de agua continua cuando las precipitaciones son bajas; reducen el ruido de 1.5 a 2Db en pavimento seco y de 2 a 4Db en pavimento mojado y son más durables debido al tipo y cantidad de ligante que utilizan. Contienen gran cantidad de vacíos con aire; generalmente se emplean como capas de rodadura, sin función estructural, y son puestas sobre mezclas densas para satisfacer los requerimientos de calidad de rodamiento del tránsito, al permitir que el agua de lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, ocupando los vacíos de la carpeta, con lo que se minimiza el acuaplaneo, se reduce la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos adyacentes y se mejora la visibilidad. Su comportamiento está basado en lineamientos similares a los del SMA, pero su diseño incluye una diferente dosificación de agregado, asfalto y fibra, que hace de ella una mezcla de menor desempeño.

1.3.2 Composición de la mezcla

El agregado mineral, debe cumplir con los requisitos señalados en el artículo 400 – 02 (tabla 400.1) de la norma INVIAS. Su naturaleza y manejo, deben adaptarse a lo descrito en el ítem referente a las mezclas densas en caliente. El material bituminoso empleado, deberá ser cemento asfáltico modificado con polímeros que corresponda a

los tipos II o III, señalados en la tabla 400.4 del mismo artículo. Por ser una mezcla discontinua su composición es similar a la del SMA, aunque no siempre requieren la adición de fibras.

1.4 COMPARACIÓN DE GRADACIÓN DENSA Y DISCONTINUA

En la Figura 4 se aprecian las granulometrías de una mezcla densa típica, de las que hacen parte la MDC-2 y la MDC-3, y de una discontinua, como la M1 y el SMA.

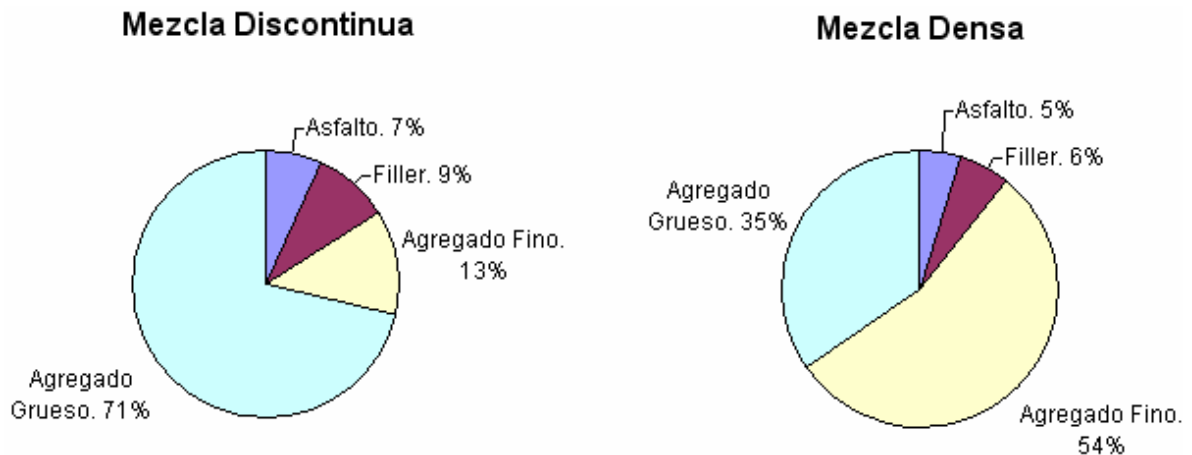


Figura 4 Mezcla densa y discontinua en caliente

1.5 BENEFICIOS ECONÓMICOS (SMA – MEZCLA CONVENCIONAL)

- Costos sobre la inversión inicial: la mezcla convencional tiene un costo adicional por sellos después del primer año, mientras que el SMA con fibra de celulosa permanece sin incrementos debido a que este tipo de microcarpetas con macrotexturas no llevan ningún recubrimiento durante su tiempo de vida útil.
- Por cada 25,000 m² de pavimento que se haga con SMA en vez del asfalto convencional, tendrá un ahorro suficiente para hacer otros 3,600 m² más con pavimento SMA.
- El costo inicial [por m²] de una mezcla tipo SMA, es más económico debido a los pocos espesores de carpeta que maneja (1.5 – 4 cm) comparada con mezclas tradicionales. La reducción puede variar entre el 15 – 20 %.
- El ahorro más significativo se tiene en el mantenimiento del pavimento, pues el SMA posee vidas útiles de 30 años y las mezcla tradicionales de 5 años. En países como Alemania, Estados Unidos y México la experiencia en mezclas tipo SMA lo comprueban.

2. METODOLOGIA DEL ESTUDIO

2.1 DESCRIPCION

En resumen, esta investigación se desarrolló alcanzando las siguientes etapas:

- Consulta bibliográfica incluyendo tesis realizadas anteriormente, textos e información encontrada en Internet.
- Caracterización de materiales; debido a que se utilizaron exactamente los mismos materiales (agregados y asfalto) que en el proyecto de grado “ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE DEFORMACIÓN EN LAS MEZCLAS MDC-2, MDC-3, M1 Y STONE MATRIX ASPHALT”, se utilizaron los mismos resultados que se incluyen en el ANEXO A. Se realizó una prueba adicional de punto de ablandamiento al asfalto y otra para determinar las densidades de la fibra CELLOSIZ QP 52000H y la ceniza volante de la Termoeléctrica Termotasajero.
- Diseño y fabricación de probetas
- Ensayo de muestras
- Análisis de resultados

2.2 MATERIALES EMPLEADOS

2.2.1 Agregado mineral

2.2.1.1 Procedencia

El total del agregado utilizado proviene de la cantera ubicada junto al río Chicamocha, del sector conocido como Pescadero, departamento de Santander.

2.2.1.2 Tamaño Máximo Nominal

Corresponde a la abertura del tamiz inmediatamente menor a aquel que retiene una cantidad mayor o igual al 10 % del peso total del árido. En este caso, con base en el análisis granulométrico, este valor es de $\frac{1}{2}$ ".

2.2.1.3 Ensayos Previos Realizados al Agregado

Para cumplir los requisitos de calidad del agregado mineral, sugeridos en la norma INVIAS (aplicable al diseño de mezclas MDC-2, MDC-3 Y M1) y de la AASHTO para el caso del SMA, este fue sometido a las siguientes pruebas.

- Granulometría (INV E-213)
- Petrología mineral
- Desgaste en la máquina de los ángeles (INV E-219)
- Sanidad frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio (INV E-220)
- Equivalente de arena (INV E -133)

- Índice de aplanamiento y alargamiento (INV E-230)
- Porcentaje de caras fracturadas (INV E-217)
- Peso específico del agregado grueso, fino y filler mineral (INV E-232, 233)
- Porcentaje de absorción del agregado grueso, fino y filler mineral (INV E-232, 233)

Nota: En la prueba de Desgaste en la Máquina de los Ángeles, fueron ensayadas por separado, las muestras de rocas metamórficas e ígneas (Ver Anexo A).

Dichos ensayos fueron realizados previamente durante la realización del Proyecto

2.2.2 Cemento Asfáltico Modificado

En vías en donde existen altos grados de tráfico pesado, mayores velocidades de servicio, mayor número de cargas por eje y en zonas climáticas con temperaturas extremas, se solicita que una mezcla posea una muy buena resistencia a las deformaciones elásticas y a la fatiga y una reducción en la susceptibilidad térmica.

Un asfalto ideal es aquel que se comporta de manera similar en todo el rango de temperatura de servicio; el ligante común, presenta cambios continuos de sus características, dependiendo de su temperatura de operación, mientras el modificado, debido a la disminución de su susceptibilidad térmica, mantiene constantes sus propiedades.

Los asfaltos modificados consisten en la adición de polímeros a ligantes convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, la resistencia a las deformaciones causadas por factores climatológicos y de tránsito.

El objeto por el cual se modifica un asfalto es contar con ligantes mucho más viscosos que desempeñen excelentes comportamientos en condiciones elevadas de temperatura, produciendo tolerancia al esfuerzo, reducción de deformaciones permanentes (ahuellamiento o rutting), rigidez en la mezcla de capaz de rodamiento, aumento de la elasticidad para la disminución del fisuramiento a bajas temperaturas (low temperature cracking), mayor resistencia a la fatiga (fatigue cracking) y que mejoren la adhesión ligante – agregado en presencia de agua. Todo esto se realiza mediante la modificación del balance en su comportamiento visco-elástico a través del rango temperaturas de aplicación y servicio.

El asfalto modificado empleado en la fabricación de probetas MDC-2, MDC-3, M1 y SMA, fue el MEXPHALTE PM – Tipo II, producido por Shell Colombia S.A.

2.2.3 Fibra de Celulosa

La celulosa añadida en el proyecto anterior a la mezcla SMA, fue la CELLOSIZE QP 52000H; esta no ha sido fabricada expresamente para dicha aplicación, como sucede en países como Alemania, España, México y Estados Unidos donde existen empresas dedicadas a la producción de fibra especial para diseños SMA. Tiene una textura granular fina y fue dosificada en una cantidad del 0.4 % del peso total, un instante antes de la mezcla y sin haberse calentado previamente.

Esta fibra de celulosa demostró ser inadecuada para el diseño de mezclas asfálticas al presentaron comportamiento inapropiado ante la acción del agua.

2.2.4 Ceniza Volante*

Se puede definir a las cenizas volantes como el producto sólido y en estado de fina división procedente de la combustión de carbón pulverizado en los hogares de centrales termoeléctricas y que es arrastrado por los gases del proceso y recuperado de los mismos en los filtros.

Las cenizas volantes producidas en las centrales termoeléctricas se han empleado principalmente como adición en mezclas de hormigón y en estabilización de bases granulares, pero no se ha profundizado su aplicación dentro de la dosificación en mezclas asfálticas, lo cual sería una alternativa de solución para mejorar la capacidad estructural de la mezcla asfáltica y estabilizar un asfalto tipo SMA, además de mitigar el problema ambiental que genera este desperdicio ocasionado por la combustión del carbón, además de que se reducen los costos de los materiales empleados en la construcción de obras de infraestructura vial.

La ceniza volante se decidió aplicar en el mismo volumen que las fibras de celulosa para poder reproducir los ensayos realizados en la tesis "ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE DEFORMACIÓN EN LAS MEZCLAS MDC-2, MDC-3, M1 Y STONE MATRIX ASPHALT", la densidad de la fibra de celulosa cellosize qp 52000h es de 0.61g/cm^3 y la de la ceniza de Termo-Tasjero es de 2.3g/cm^3 .

Las cenizas volantes son materiales inorgánicos pulvulentos producidos durante los procesos de combustión y gasificación de carbón, constituidas por partículas esféricas (compuestas principalmente de SiO_2 y Al_2O_3 , y en menor proporción por óxidos de Ca, Fe, S... y elementos traza), cuarzo, mullita, magnetita, anortita-albita, anhidrita, ettringita, tridimita-cristobalita, hematites y cal.

En el ámbito internacional las cenizas volantes son utilizadas en grandes cantidades, especialmente en la producción de cementos y concretos, rellenos estructurales y no estructurales, muros de contención, estabilización de desechos, bases y sub-bases para pavimentos, como acondicionador de suelos y, en algunos casos, en los pavimentos rígidos.

Se debe tener en cuenta que, para el caso de Colombia, las vías deben cumplir los criterios de diseño de acuerdo con las especificaciones del artículo 450 de las técnicas de construcción de carreteras [Invías, 2002], además de evaluar la rigidez en la mezcla asfáltica, ya que la fisuración prematura de las capas asfálticas depende de la estabilidad y el flujo. La utilización de las cenizas volantes en la construcción de carreteras se realiza en la estabilización de bases y sub-bases, pero no se han desarrollado estudios en los cuales se evalúe el comportamiento de las cenizas volantes en la mezcla asfáltica como estabilizante de un concreto asfalto modificado tipo SMA.

* UMAÑA PEÑA, Juan Carlos; Tesis doctoral: Síntesis de Zeolitas a Partir de Cenizas Volantes de Centrales Termoeléctricas de Carbón, Universitat Politècnica de Catalunya. (2002)

2.2.4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS VOLANTES

2.2.4.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA

En el estudio de caracterización física se han incluido los análisis de contenido de humedad, las pérdidas a la incineración, distribución granulométrica, densidad real y aparente, porosidad y superficie específica.

2.2.4.1.1.1 Humedad y pérdidas a la incineración

La determinación de estos dos parámetros es de gran importancia debido a que un alto contenido de humedad o de pérdidas a la incineración influye negativamente en la calidad de la ceniza. La pérdida a la incineración se debe generalmente a la presencia de inquemados o de fases minerales inestables a altas temperaturas.

La ceniza de Termo-Tasajero tiene un 26.7%, de humedad debido al hecho de que las muestras fueron tomadas directamente de los precipitadores electrostáticos con excepción de Tasajero la cual fue tomada de la balsa de decantación. Hecho por el cual se debe secar en horno hasta obtener una humedad <1%.

Los resultados de la determinación de la pérdida a la incineración muestran un valor alto de 16.2% determinado para la ceniza volante de Termo-Tasajero. El porcentaje de pérdida a la incineración puede ser un indicador de la eficiencia de combustión de una central termoeléctrica. Estos altos valores indican la presencia de carbón inquemado lo cual representa grandes deficiencias en sus sistemas de combustión.

2.2.4.1.1.2 Densidad real y aparente

La densidad real muestra un valor promedio de 2.3 g cm⁻³,

Las cenizas volantes de Termo-Tasajero, a pesar de presentar un alto contenido en carbón inquemado, el factor más influyente en la densidad (2.3 g cm⁻³) son los niveles elevados de fases cristalinas aluminosilicatadas.

La densidad aparente de las muestras tiene un valor de 0.75 g cm⁻³. El factor predominante que influye en la variación de la densidad aparente es la porosidad de la muestra de ceniza volante como se observa en la Tabla 2. A mayor porosidad el valor de la densidad aparente es menor. También un factor a tener en cuenta, en valores de la densidad baja es la presencia de cenoesferas e inquemados.

2.2.4.1.1.3 Porosidad

El valor de porosidad de las cenizas volantes estudiadas es de 67.39%

2.2.4.1.1.4 Superficie específica BET

La superficie específica de las cenizas volantes analizadas fue de 11.21 m² g⁻¹ (Tabla 2). Las cenizas volantes de Termo-Tasajero presentan los valores más altos de superficie específica, altos, debido a las características morfológicas de estas cenizas volantes, al alto contenido en inquemados de alta porosidad.

CENIZA	%HUM	%P.F.	D.R. [g/cm ³]	D.A. [g/cm ³]	%POR	S.E. [m ² /g]
TASAJERO	26,72	16,23	2,30	0,75	67,39	11,21

Tabla 2 Contenido de humedad (%HUM), pérdidas a la incineración (%P.F.), densidad real, (D.R.), densidad aparente (D.A.), porosidad (%POR) y superficie específica (S.E.) de las cenizas volantes seleccionadas.

2.2.4.1.1.5 Distribución del tamaño de grano

CENIZA	Percentil 10	Mediana	Percentil 90
TASAJERO	11,0	58,6	238,3

Tabla 3 Resultados del análisis de tamaño de grano (μm) para las cenizas volantes

La ceniza volante de Tasajero presenta una distribución normal de tamaño de grano, con modas altas cerca de 100 μm .

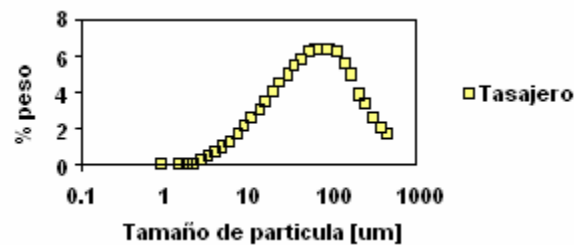


Figura 5 Distribución granulométrica de las cenizas volantes de Termo-Tasajero

2.2.4.1.1.6 Análisis morfológico

De acuerdo con el análisis morfológico se puede clasificar las cenizas de Termo-Tasajero como:

Cenizas volantes con alto contenido de formas irregulares principalmente de carbón inquemado.

Cenizas Tasajero							
Mullita	Cuarzo	Anhidrita	Calcita	Cal	Magnetita	Feldespato	Vidrio
19,4	29,7	<0,1	<0,1	<0,1	0,8	<0,1	50,2

Tabla 4 Composición mineralógica de las cenizas volantes. Contenidos en % en peso

2.3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

2.3.1 Granulometrías Recomendadas

2.3.1.1 Gradación SMA

La norma alemana ZTV Asphalt define la granulometría del SMA en función del espesor de la capa de rodadura compactada, que debe medir entre 1.5 y 4cm; por lo general, este grosor es 2.5 a 3 veces el tamaño máximo nominal del árido. Las curvas granulométricas extraídas de esta norma, son clasificadas en los siguientes rangos de ancho de capa: 3.5 – 4cm, 3 – 4cm, 2.5 – 3.5cm y 1.5 – 2.5cm.

El agregado empleado en este diseño tiene un TMN de ½", es decir, que el espesor de la capa compactada debe estar entre 1.25 y 1.5" (3.18 y 3.81cm).

Por esta razón en este proyecto, se utilizó la granulometría correspondiente al rango de 3 – 4cm, que hace referencia a la mezcla llamada SMA 0/8s.

2.3.1.2 Gradación MDC-2 y MDC-3

Los límites granulométricos exigidos por el INVIAS para este tipo de mezclas, están descritos en el artículo 450 – 02.

2.3.1.3 Gradación M1

Los límites granulométricos señalados en la norma del INVIAS para el diseño de las mezclas M1 (artículo 452 – 02).

2.3.2 Granulometrías de Mezclas Estudiadas

La siguiente gráfica muestra los rangos granulométricos exigidos en las normas mencionadas con anterioridad.

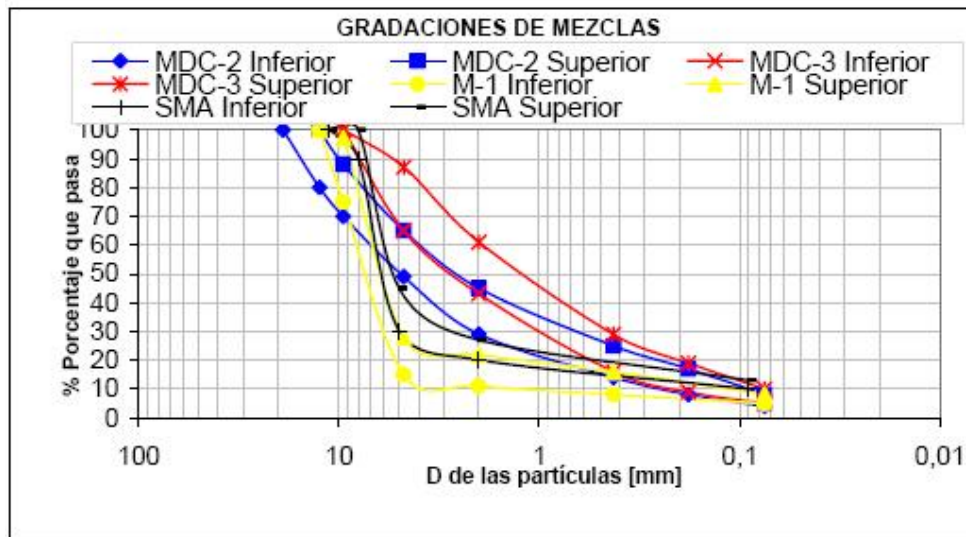


Figura 6 Gradación típica de la mezcla

2.3.3 Determinación del Porcentaje Óptimo de Asfalto

El ensayo Marshall permite seleccionar el contenido óptimo de asfalto promediando los valores correspondientes a la densidad y estabilidad máxima y el valor medio del porcentaje de vacíos con aire permitido en las especificaciones; sin embargo, antes de fabricar las probetas este puede calcularse por medio de ecuaciones empíricas, facilitando la selección de las cantidades de asfalto que serán analizadas.

2.3.3.1 Ecuación de Duriez

La ecuación de Duriez permite calcular el porcentaje óptimo de asfalto respecto al peso total de la mezcla, principalmente con base en su gradación, mediante la siguiente ecuación:

$$\%Asfalto = K \times \alpha \times Sa^{\frac{1}{5}}$$

El valor K corresponde al módulo de riqueza, una constante proporcional a la película de betún que recubre el árido que se elige de acuerdo al tipo de mezcla, sin tener en cuenta su gradación; Sa es la superficie específica del agregado calculada según la siguiente expresión y α su factor de corrección.

$$100 \times Sa = \frac{G}{4} + 2.2g + 12A + 150F$$

Donde,

G = % Pasa tamiz 1/4"

g = % Pasa tamiz 1/4" - % Retenido tamiz N ° 60

A = % Pasa tamiz N ° 60 - % Retenido tamiz N ° 200

F = % Pasa N ° 200

2.3.3.2 Porcentajes Óptimos de Asfalto en las Mezclas

La cantidad óptima de asfalto, sirve de referencia para su dosificación en el diseño. En este estudio las probetas fueron fabricadas con dos cantidades de betún por encima y por debajo del valor ideal determinado.

TIPO DE MEZCLA	k	α	% ÓPTIMO DE DURIEZ
MDC-2	3,2	1	5,25
MDC-3	3,2	1	5,62
M1	3,7	1	5,974
SMA	3,7	1	6,55

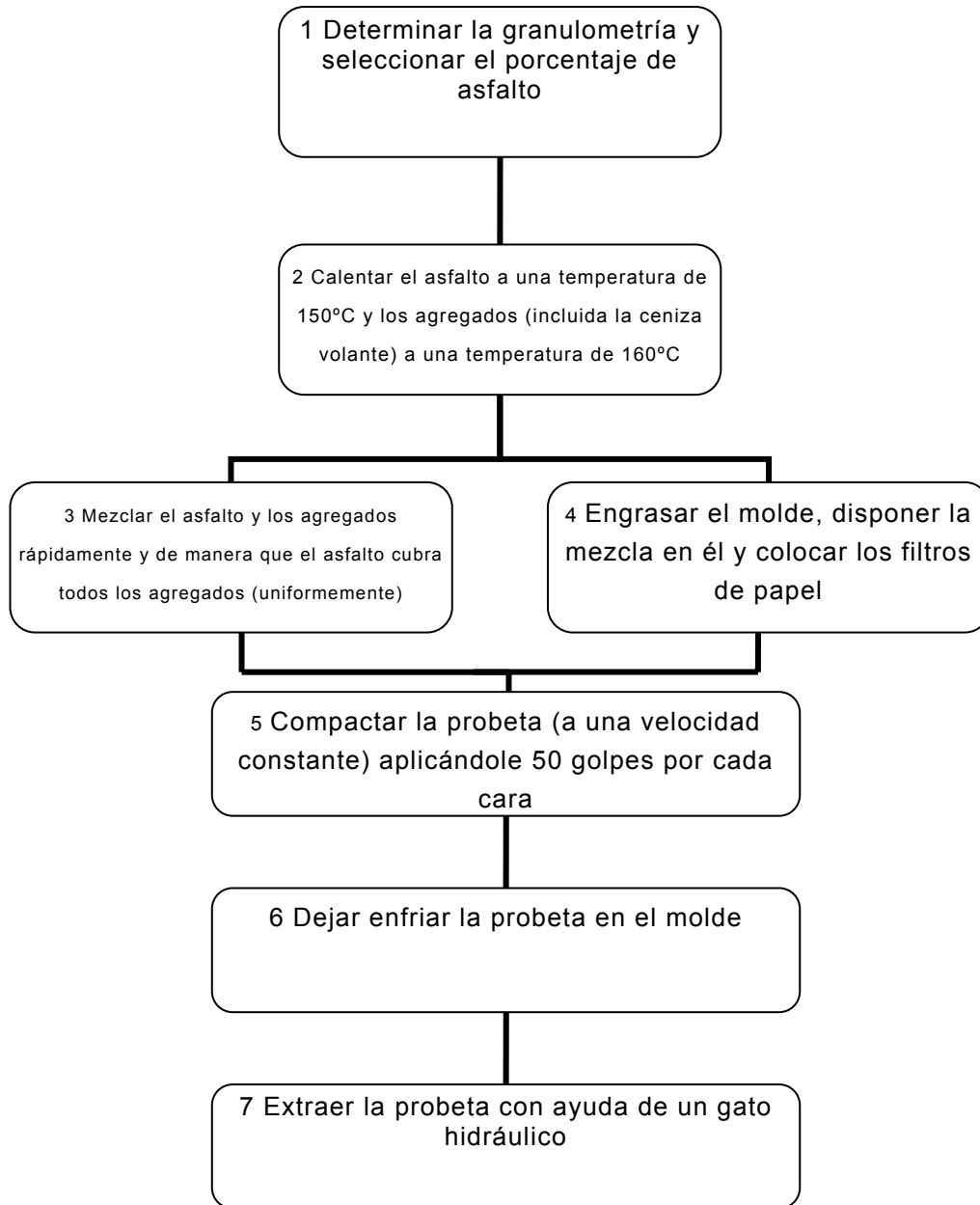
Tabla 5 Porcentaje óptimo de asfalto

2.3.4 Metodología usada para la fabricación de probetas

Las probetas fueron fabricadas según la metodología Marshall (INV E-748) con un peso total de la mezcla de 1200 gramos. Este método fue planteado por Bruce Marshall en el departamento de carreteras de Mississippi y permite determinar la proporción adecuada de asfalto en una mixtura de granulometría dada, para darle suficiente estabilidad y trabajabilidad; solo puede emplearse en el diseño de mezclas en caliente con agregado de tamaño máximo de 1”.

Nota: Se anexa fotografías para una mejor descripción del ensayo.

Procedimiento Para La Elaboración De La Probeta Por El Método Marshall



NOTA: Todos los utensilios usados para el mezclado del asfalto con los agregados deben de estar calientes, al igual que los moldes





2.3.4.1 Número de probetas fabricadas

La norma del INVIAS recomienda fabricar para cada mezcla 3 muestras por contenido de asfalto. Generalmente se diseñan probetas para cinco contenidos diferentes con incrementos del 0.5 % del peso total, con el fin de evaluar detalladamente su comportamiento y omitir resultados incoherentes, que reflejan errores ocasionados durante el proceso de fabricación y medición.

En este estudio fueron fabricadas tres probetas por contenido de asfalto y analizados cuatro contenidos por mezcla con incrementos del 0.5 % en peso, para un total de 12 muestras las cuales van a ser comparadas con las 48 realizadas anteriormente.

2.3.4.2 Temperatura de mezcla y compactación

Las probetas fueron fabricadas garantizando una temperatura de mezcla y compactación de 153°C de acuerdo a las recomendaciones del productor del asfalto empleado, se debe tener especial cuidado de no sobrepasar esta temperatura para no estropear las propiedades estabilizantes del asfalto modificado.

2.3.4.3 Nivel de compactación de probetas

Depende del número de golpes por cara que se aplique durante el ensayo; entre mayor sea, más altas serán las densidades obtenidas y menores los contenidos óptimos de asfalto necesarios.

Para la mezcla SMA según la norma alemana ZTV Asphalt se aplican 50 golpes por cara.

MEZCLA	Golpes por cara
MDC-2	75
MDC-3	75
M1	50
SMA	50

Tabla 6 Nivel de compactación de la mezcla

Los ensayos de medición de módulo de elasticidad a 7.5 ° C, deformación ante carga constante a 60 ° C (Creep sin confinar) y escurrimiento de asfalto que serán descritos a continuación, se desarrollaron sin seguir textualmente procesos estandarizados; estas pruebas fueron ideadas, para efecto de esta investigación, buscando comparar el comportamiento elástico de las mezclas ante diferentes condiciones de carga y temperatura.

2.4 ENSAYOS

2.4.1 Medición de Densidad Bulk y Contenido de Vacíos

En el caso de las mezclas SMA (SMA-CENIZA y SMA-CELULOSA) y M1 de textura superficial abierta esta densidad fue calculada considerando que su volumen se determina por la diferencia entre su peso en el aire y su peso en el agua estando parafinada; para parafinar las probetas se uso una bandeja sobre la cual se derritió parafina, creando laminillas de parafina.

Por otro lado, para las emulsiones MDC-2 y MDC-3 de textura superficial densa e impermeable, esta fue determinada en relación a su peso seco, sumergido y saturado superficie seca.

El contenido de vacíos con aire (Va), vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos llenos de asfalto (VAF) de las probetas compactadas, fue determinado de acuerdo al método Marshall para diseño de mezclas de agregados con cemento asfáltico.

Procedimiento Para El Análisis De Densidad Bulk

1 Pesar las probetas secas

2 Parafinar las probetas usando láminas de parafina para evitar la intrusión de esta dentro de los vacíos

3 Pesar las probetas secas con parafina, cuya densidad es de $2,89 \text{ g/cm}^3$

4 Pesar las probetas sumergidas en agua





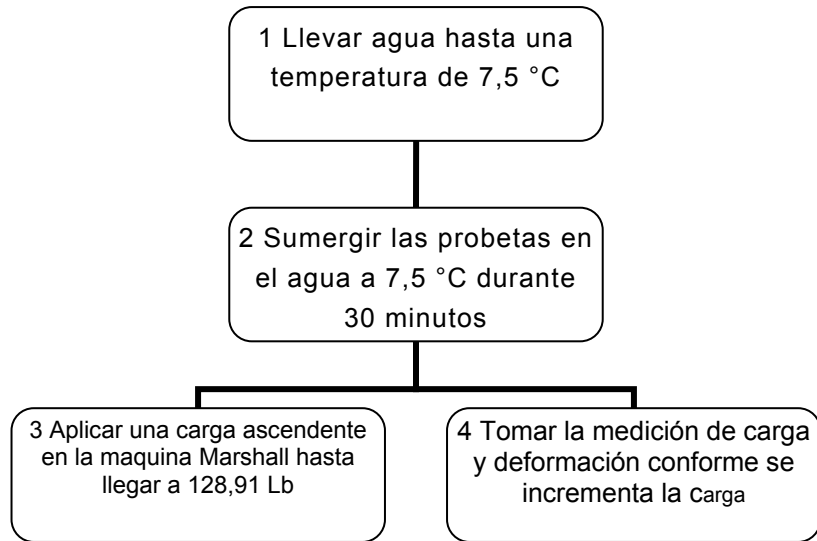


NOTA: Las “laminación” de las probetas en parafina se hace con el fin de evitar que los vacíos creados a causa del tipo de gradación sean llenados por agua y alteren el cálculo de la densidad de la probeta.

2.4.2 Determinación del Módulo Elástico a 7.5 ° C

Este ensayo pretende determinar su comportamiento a bajas temperaturas, ante la aplicación de un esfuerzo controlado que garantice que las deformaciones resultantes estén dentro del rango elástico. El límite de carga empleado en este ensayo, se determinó fallando probetas tradicionales de granulometría densa y discontinua a temperatura ambiente, fabricadas con asfalto convencional, y corresponde al 30 % de la máxima carga que resistieron.

Procedimiento para la realización del ensayo de modulo elástico



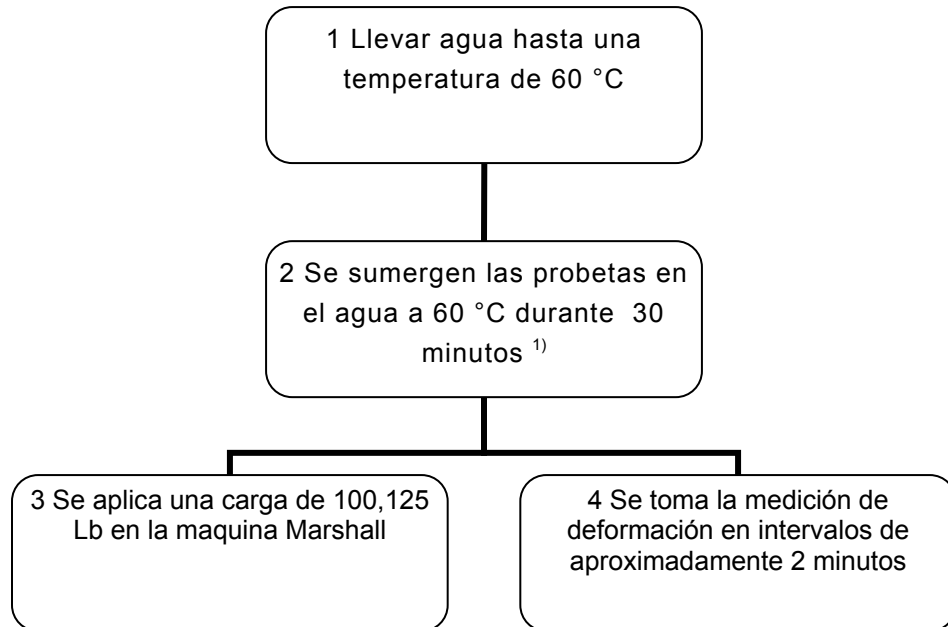


NOTA: La temperatura se debe controlar constantemente, adicionando agua o hielo según sea requerido para mantener el agua a 7,5 °C.

2.4.3 Ensayo Creep sin Confinar a 60 ° C (Carga Estática)

Inicialmente las probetas fueron sumergidas en agua a 60 ° C por 30 minutos, se mantuvo la temperatura para garantizar la repetibilidad del ensayo, para mantener la temperatura de las probetas a 60°C se sumergió en agua a 60°C y se tomaba la temperatura constantemente, cuando esta disminuía se cambiaba el agua por agua a 60°C por medio de una manguera. Sobre la probeta se aplicó, durante una hora, una carga constante de 120,125 lb, controlada manualmente en la maquina Marshall.

Procedimiento para la realización del ensayo de Creep sin confinar





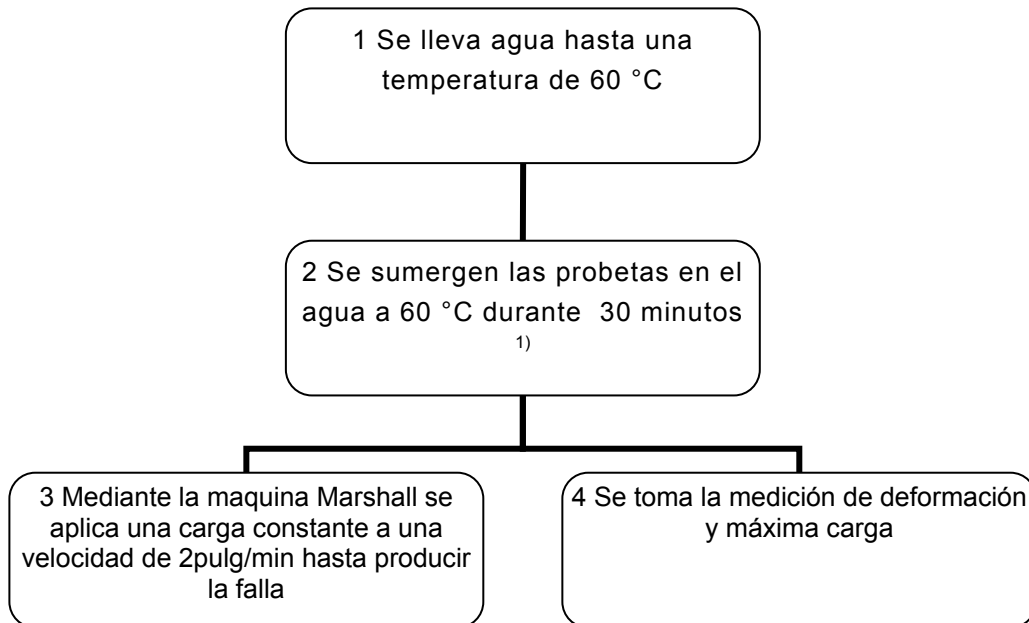


1) Para buscar repetitividad del ensayo se ingenio una forma para que la probeta no perdiera temperatura a medida que se realizaba el ensayo, se coloco la probeta dentro de un recipiente que permitiera mantener la probeta sumergida durante agua a 60°C y por medio de una manguera se sacaba agua que había perdido temperatura y se incorporaba agua a 60°C.

2.4.4 Estabilidad – Flujo

Las probetas fueron llevadas a un baño de agua a 60° C durante media hora y luego se aplicó sobre ellas, por medio de la maquina Marshall, una carga a una velocidad de 2 pulg /min hasta producir la falla. La estabilidad denota la máxima resistencia a la carga y el flujo la deformación total desde la carga 0 hasta la carga máxima.

Procedimiento para la realización del ensayo de estabilidad-flujo

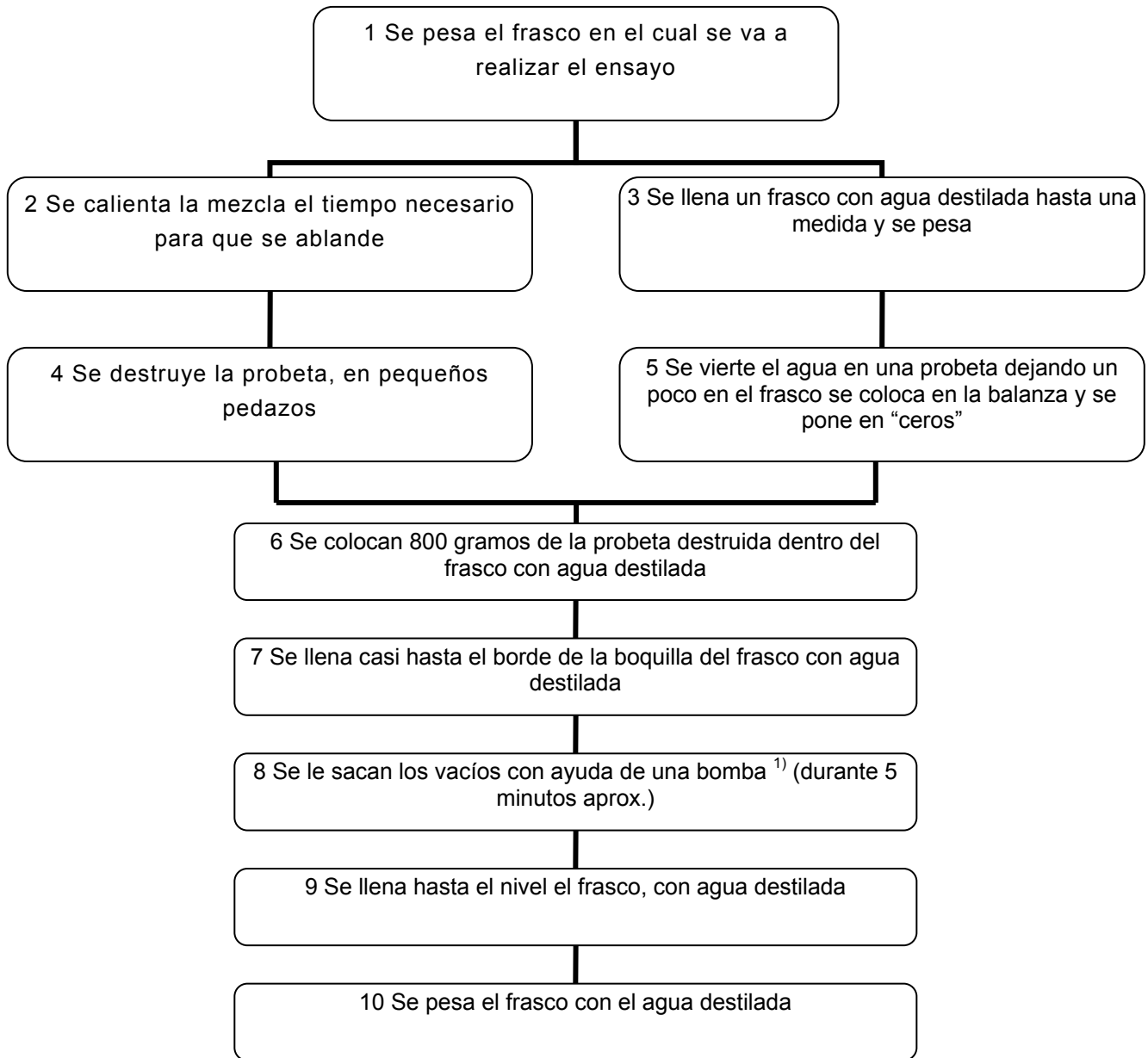


NOTA: Previamente se midieron las dimensiones de la probeta a fallar. La estabilidad denota la máxima resistencia a la carga y el flujo la deformación total desde la carga 0 hasta la carga máxima.





2.4.5 Análisis De Porcentaje De Vacios

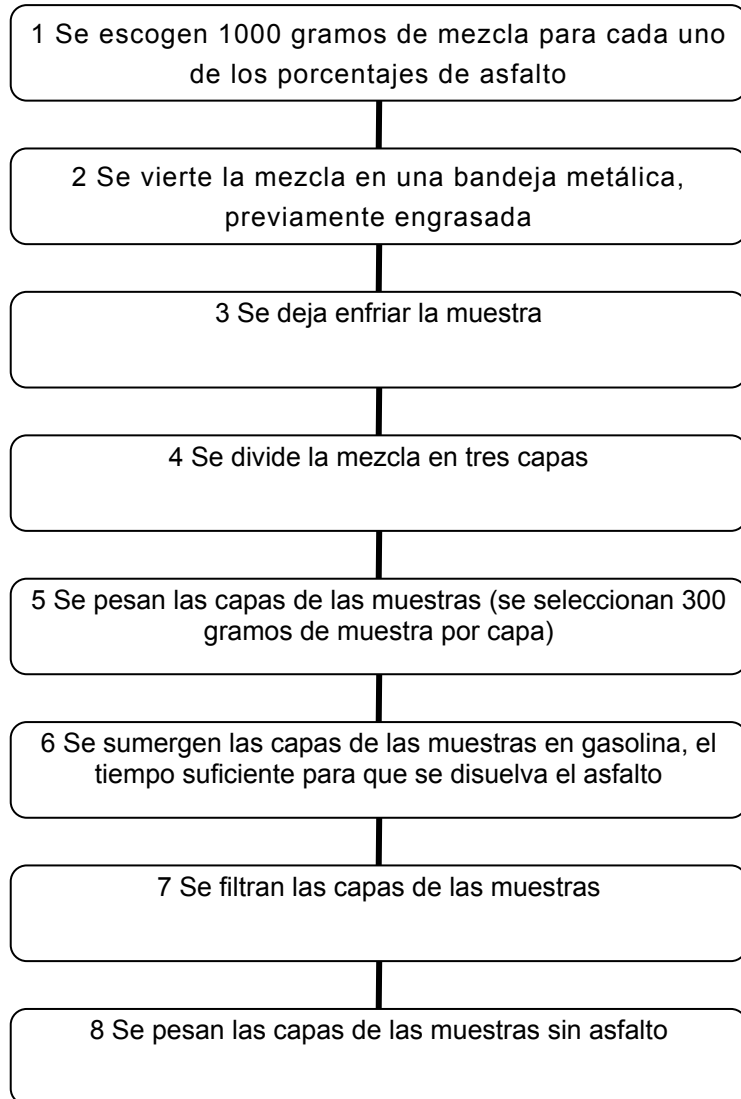


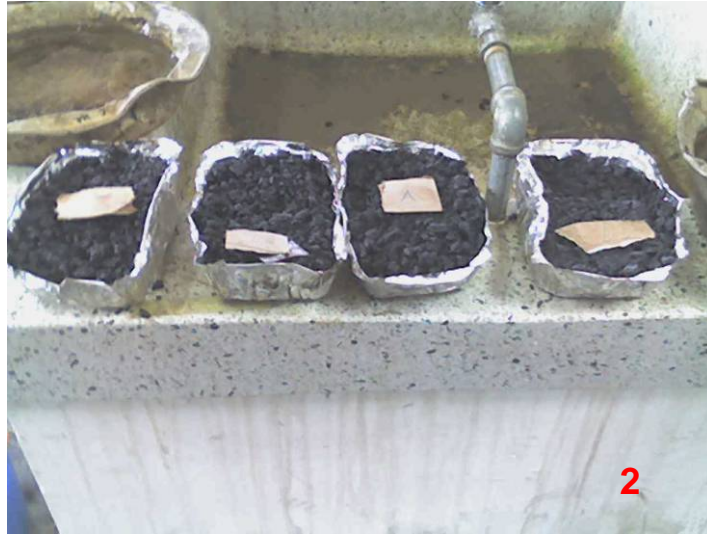
¹⁾ Se debe golpear suavemente pero constantemente el frasco para facilitar la eliminación de vacíos.



2.4.6 Análisis de escurrimiento de asfalto

Procedimiento para el análisis de escurrimiento de asfalto





3. RESULTADOS DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

En este capítulo se muestran los resultados promedio, obtenidos en los ensayos y mediciones efectuadas sobre las probetas; además, son descritos los materiales con que fueron fabricadas, junto a la composición de las mezclas.

3.1 AGREGADOS

3.1.1 Caracterización de los Agregados

Los ensayos y resultados que se mencionan a continuación establecen las características físicas y de resistencia del material empleado. El detalle de estas pruebas, está disponible en la sección de anexos de esta investigación.

ENSAYO	NORMA	ESPEC. (INV Art 400)		MÉTODO		Mezcla SMA	VALOR
		Mezcla densa	Mezcla discon.	AASHTO	ASTM		
	INV	en caliente	en caliente				
Granulometría	E - 213	-	-			-	-
Ind. Alargamiento	E - 230	30 % Máx	25 % Máx		D4791	20 % Máx	17,70%
Ind. Aplanamiento	E - 230	30 % Máx	25 % Máx		D4791	20 % Máx	24,62%
Desgaste Los Ángeles	E - 219	25 % Máx	25 % Máx	T96		30 % Máx	23,99%
% Caras Fracturadas	E - 227	75 % Mín	75 % Mín			90 % Min	90,89%
Solidez	E - 220	12 % Máx	12 % Máx	T104		15 % Máx	0,79%
Equivalente de Arena	E - 133	50 % Mín	50 % Mín			-	93,80%
Peso Específico Grueso	E - 223	-	-			-	2,70
Peso Específico Fino	E - 222	-	-			-	2,66
Peso Específico Filler	E - 222	-	-			-	2,46
% Aborción Grueso	E - 223	-	-	T85		2 % Máx	0,70%
% Aborción Fino	E - 222	-	-	T85		2 % Máx	1,83%
% Aborción Filler	E - 222	-	-	T85		2 % Máx	0,54%

Tabla 7 Caracterización de los agregados pétreos

3.1.2 Petrología Mineral de Agregados

La composición mineralógica de los agregados utilizados fue la siguiente:

TIPO DE ROCA		
ÍGNEAS	METAMÓRFICAS	MIN. SUELTOS
65%	35%	5%

Tabla 8 Composición mineralógica de agregados

3.2 ASFALTO

3.2.1 Características Reológicas del Asfalto

La caracterización reológica del asfalto modificado empleado en este proyecto, fue realizada por la planta SHELL de Mosquera, según las Normas ASTM / NLT. Los resultados fueron los siguientes:

ENSAYO	MÉTODO	ESPECIFICACIÓN		RESULTADO
		Min	Máx	
Penetración, 25 °C, 5s, 100g (mm/10)	ASTM D-5	55	70	58
Punto de ablandamiento (°C)	ASTMD-36	58		69,3
Recuperación elástica por torsión a 25 ° (%)	NLT-329/91	40		47
Punto de Chispa (°)	ASTM D-92	230		291
Peso específico a 25 °C	ASTM D-71		Reportar	1,006
Temperatura de mezcla (°C)	ASTM D-1559		Reportar	161 - 165
Temperatura de compactación (°C)	ASTM D-1559		Reportar	151 - 155
ENSAYO EN HORNO DE PELÍCULA FINA EN MOVIMIENTO, RTFOT, 85 min, 163 °C				
ASTM D-2872				
Perdida en masa (%)	ASTM D-2872		1,0	0,2153
Penetración Retenida (%)	ASTM D-5	65		71
Variación del punto de ablandamiento	ASTM D-36	-5 a 10		0,2

Tabla 9 Propiedades reológicas del asfalto

NOTA: Se realizó el ensayo de punto de ablandamiento obteniendo los siguientes valores:

Punto de ablandamiento= 70°C

Punto de ablandamiento con filler + ceniza= 74°C

La diferencia en el punto de ablandamiento hallado en el presente proyecto y el hallado por SHELL de Mosquera, se debe a la precisión del termómetro, que era de 2°C.

3.3 CONFORMACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.3.1 Granulometría Utilizada

En las mezclas M1, MDC-2, MDC-3 y SMA (SMA-CENIZA y SMA-CELULOSA) la gradación seleccionada corresponde al valor medio de los rangos señalados en la norma INVIAS (artículos 450 y 452) y ZTV Asphalt – StB 2001, respectivamente y pueden observarse en la siguiente tabla.

TAMIZ N°	Porcentaje que Pasa Empleado			
	MDC-2	MDC-3	M1	SMA
3/4"	100			
1/2"	90		100	100
3/8"	79	100	86	73,88
N° 4	57	76	21,5	34
N° 8				24,08
N° 10	37	52	16,5	
N° 30				14,04
N° 40	19,5	22,5	12	
N° 50				12,25
N° 80	12,5	14		
N° 200	6	7,5	6,5	10,9

Tabla 10 Gradaciones empleadas MDC-2, MDC-3, M1 y SMA (SMA-CENIZA y SMA-CELULOSA)

3.3.2 Porcentaje de Asfalto Utilizado

Con base en los porcentajes óptimos calculados, el porcentaje de asfalto añadido a las mezclas fue el siguiente.

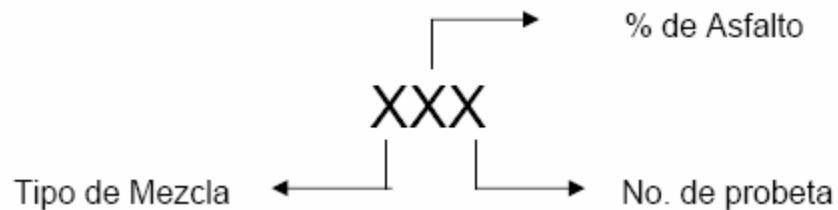
MEZCLA	% Porcentaje de Asfalto Empleado			
	MDC-2	4,5	5	5,5
MDC-3	4,8	5,3	5,8	6,3
M1	5,2	5,7	6,2	6,7
SMA	5,8	6,3	6,8	7,3

Tabla 11 Porcentajes de asfalto empleados

3.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS

3.4.1 Nomenclatura

Cada probeta ha sido identificada mediante 3 caracteres, como se explica a continuación:



El caracter No.1 establece el tipo de mezcla: A para MDC-2, B para MDC-3, C para M-1, D para SMA-CELULOSA y E para SMA-CENIZA. El caracter No. 2 varía entre 1, 2, 3 o 4 y corresponde, en orden ascendente, a los porcentajes de asfalto de cada mezcla, descritos en la tabla XXX.

El caracter No. 3 indica, para cada mezcla, el orden de probetas de un mismo contenido de asfalto; varía entre 1,2 y 3.

3.4.2 Geometría

La geometría de las probetas compactadas, que incluye su diámetro y altura, ha sido determinada realizando tres mediciones en cada una de ellas. El valor promedio de estos parámetros, puede observarse en el Anexo B.

3.5 ANÁLISIS DE DENSIDAD Y VACÍOS

3.5.1 Densidad Bulk

El peso específico “bulk” de una muestra compactada es la relación entre su peso en el aire y su volumen incluyendo vacíos permeables.

3.5.1.1 Curva de Peso Específico Vs. % Asfalto

En la siguiente gráfica se observa la variación del peso específico de todas las mezclas, de acuerdo a la cantidad de asfalto añadida.

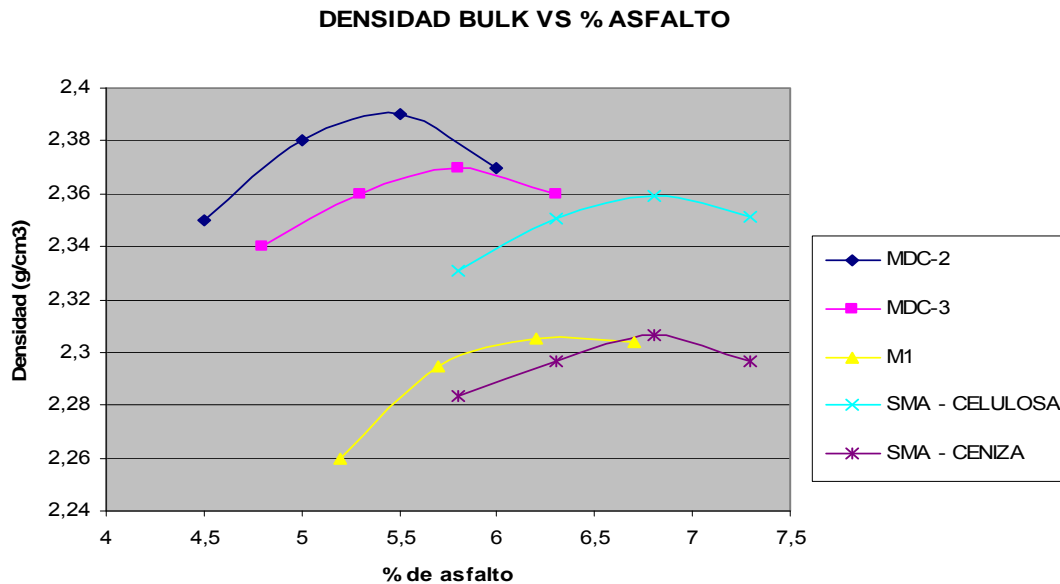


Figura 7 Peso específico compactado vs porcentaje de asfalto

3.5.2 Vacíos con Aire

Estos vacíos están definidos como el volumen total de las bolsas de aire existentes entre las partículas cubiertas del agregado, expresado como porcentaje del volumen neto de la mezcla compactada. Otorgan a la emulsión una reserva de espacio que impide exudaciones y pérdidas de estabilidad al producirse una pequeña compactación adicional por la carga de tráfico.

3.5.2.1 Curva de Vacíos con Aire Vs. % Asfalto

La siguiente gráfica muestra la cantidad de vacíos con aire presente en las mezclas, de acuerdo a la cantidad de asfalto añadida.

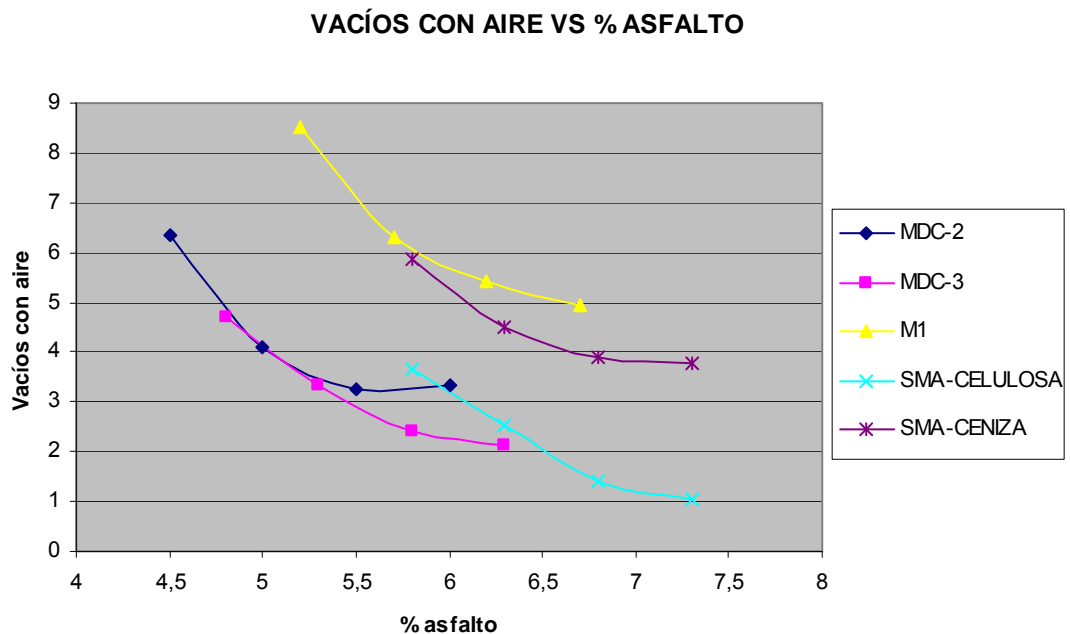


Figura 8 Vacíos con aire en las mezclas en estudio

3.5.3 Vacíos en el Agregado Mineral

Están definidos como el volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado; incluyen los vacíos con aire y el asfalto efectivo y se expresan como un porcentaje del volumen total de la muestra.

3.5.3.1 Curva VAM Vs. Porcentaje de Asfalto

Esta gráfica muestra la variación de los vacíos en el agregado mineral de las mezclas, de acuerdo a su contenido de asfalto.

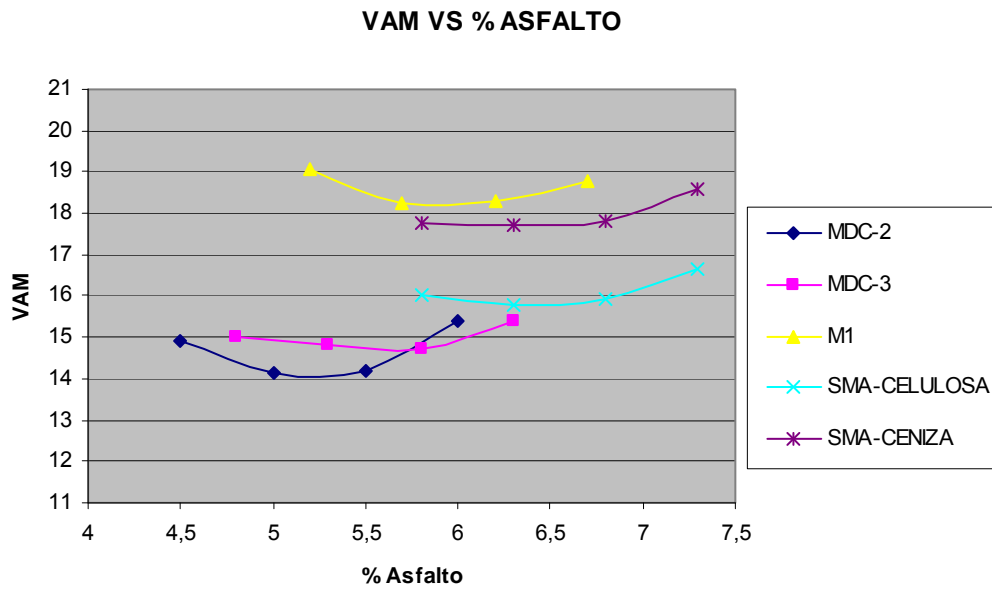


Figura 9 VAM Vs porcentaje de asfalto

3.5.4 Vacíos Llenos de Asfalto

Los vacíos llenos de asfalto se definen como la porción del VAM, que es ocupada por el ligante efectivo de la mezcla.

3.5.4.1 Curva VAF Vs. % Asfalto

En la siguiente gráfica se muestra la variación de los vacíos llenos de asfalto, de acuerdo a la cantidad de ligante añadida a cada mezcla.

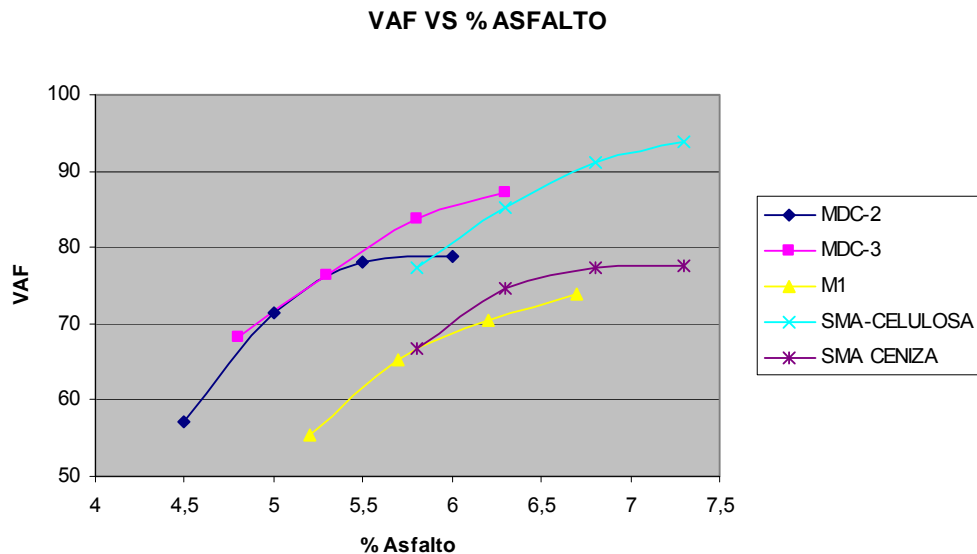


Figura 10 VAF Vs porcentaje de asfalto

3.6 EVALUACION DE MODULO ELASTICO

El módulo elástico o módulo de Young, está definido como la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria que experimenta un objeto ante la acción de una carga externa.

Aunque en este ensayo se aplicó sobre las probetas un esfuerzo máximo dentro del rango elástico, la curva Esfuerzo Vs. Deformación, trazada para cada contenido de asfalto, no presenta una tendencia lineal; Por esta razón, han sido calculados dos módulos elásticos en cada caso, con el fin de representar el comportamiento real de las mezclas.

3.6.1 Mezcla MDC-2

3.6.1.1 Curva Esfuerzo Vs. Deformación

La variación de la deformación medida respecto al incremento del esfuerzo, para cada porcentaje de asfalto añadido a las mezclas, puede observarse en la siguiente gráfica.

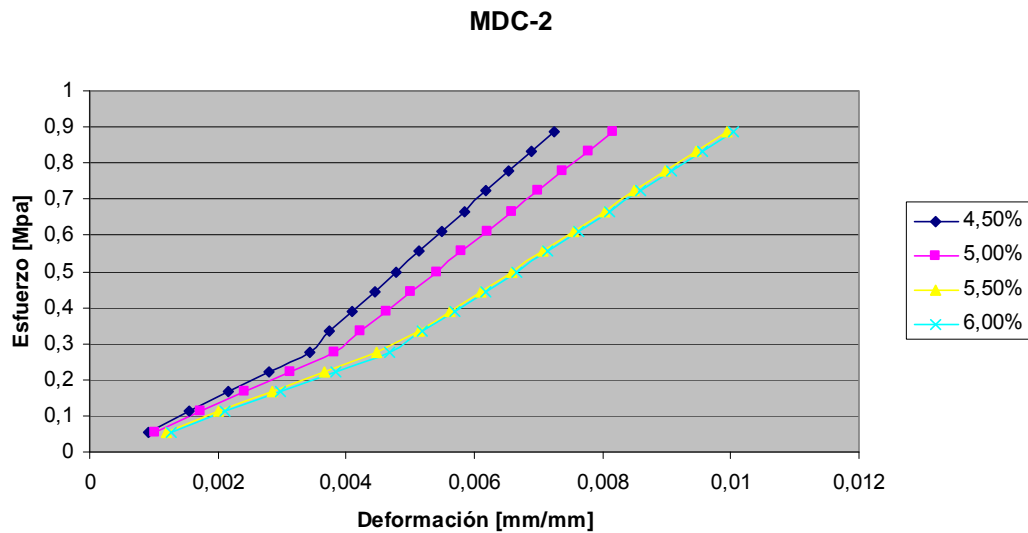


Figura 11 Esfuerzo Vs deformación MDC-2

3.6.1.2 Módulos de Elasticidad

Los módulos de elasticidad calculados con base en las curvas anteriores, de acuerdo a la magnitud de las deformaciones generadas en las muestras, se presentan en la siguiente tabla.

% Asfalto	Modulo elástico (Mpa)	
	1	2
4,5%	88,84	158,92
5,0%	79,75	140,80
5,5%	67,98	115,76
6,0%	64,91	114,52

Tabla 12 Módulos elásticos de la mezcla MDC-2

3.6.2 Mezcla MDC-3

3.6.2.1 Curva Esfuerzo Vs. Deformación

La variación de la deformación medida respecto al incremento del esfuerzo, para cada porcentaje de asfalto añadido a las mezclas, puede observarse en la siguiente gráfica.

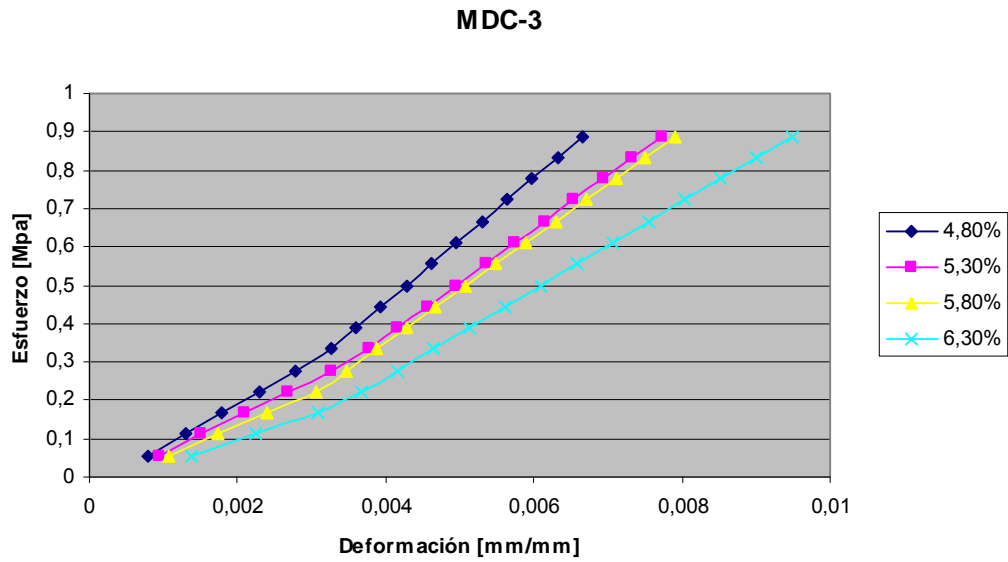


Figura 12 Esfuerzo Vs deformación MDC-3

% Asfalto	Modulo elástico (Mpa)	
	1	2
4,8%	112,10	163,31
5,3%	95,83	140,78
5,8%	83,38	137,28
6,3%	67,82	128,67

Tabla 13 Módulos elásticos de la mezcla MDC-2

3.6.3 Mezcla M1

3.6.3.1 Curva Esfuerzo Vs. Deformación

La variación de la deformación medida respecto al incremento del esfuerzo, para cada porcentaje de asfalto añadido a las mezclas, puede observarse en la siguiente gráfica.

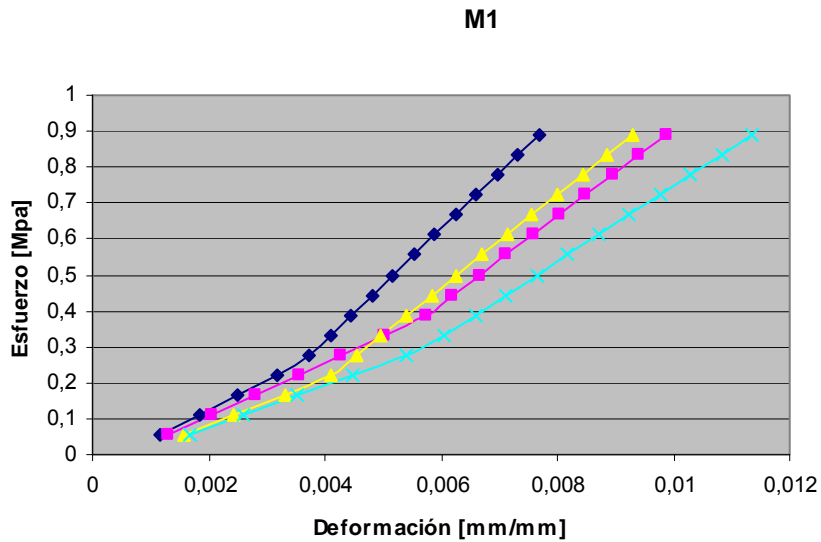


Figura 13 Esfuerzo Vs deformación M1

3.6.3.2 Módulos de Elasticidad

Los módulos de elasticidad calculados con base en las curvas anteriores, de acuerdo a la magnitud de las deformaciones generadas en las muestras, se presentan a continuación.

% Asfalto	Modulo elástico (Mpa)	
	1	2
5,2%	83,38	155,35
5,7%	74,81	120,73
6,2%	63,15	128,18
6,7%	59,25	105,02

Tabla 14 Módulos elásticos de la mezcla M1

3.6.4 Mezcla SMA - CELULOSA

3.6.4.1 Curva Esfuerzo Vs. Deformación

La variación de la deformación medida respecto al incremento del esfuerzo, para cada porcentaje de asfalto añadido a las mezclas, puede observarse en la siguiente gráfica.

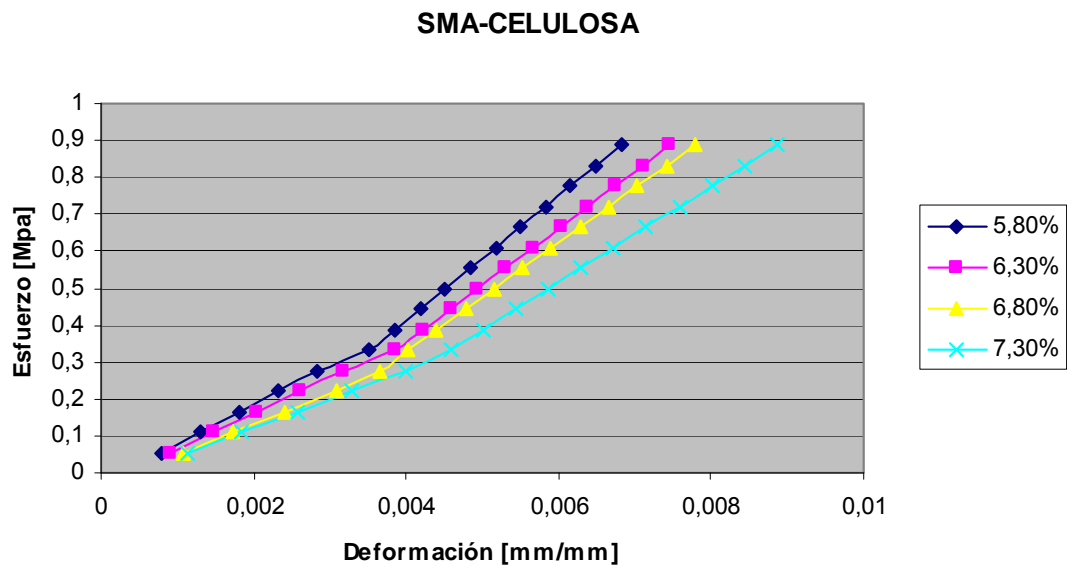


Figura 14 Esfuerzo Vs deformación SMA- CELULOSA

3.6.4.2 Módulos de Elasticidad

Los módulos de elasticidad calculados con base en las curvas anteriores, de acuerdo a la magnitud de las deformaciones generadas en las muestras, se presentan en la siguiente tabla.

% Asfalto	Modulo elástico (Mpa)	
	1	2
5,8%	109,17	168,64
6,3%	97,95	154,12
6,8%	82,68	147,72
7,3%	77,57	129,75

Tabla 15 Módulos elásticos de la mezcla SMA - CELULOSA

3.6.5 Mezcla SMA - CENIZA

3.6.5.1 Curva Esfuerzo Vs. Deformación

La variación de la deformación medida respecto al incremento del esfuerzo, para cada porcentaje de asfalto añadido a las mezclas, puede observarse en la siguiente gráfica.

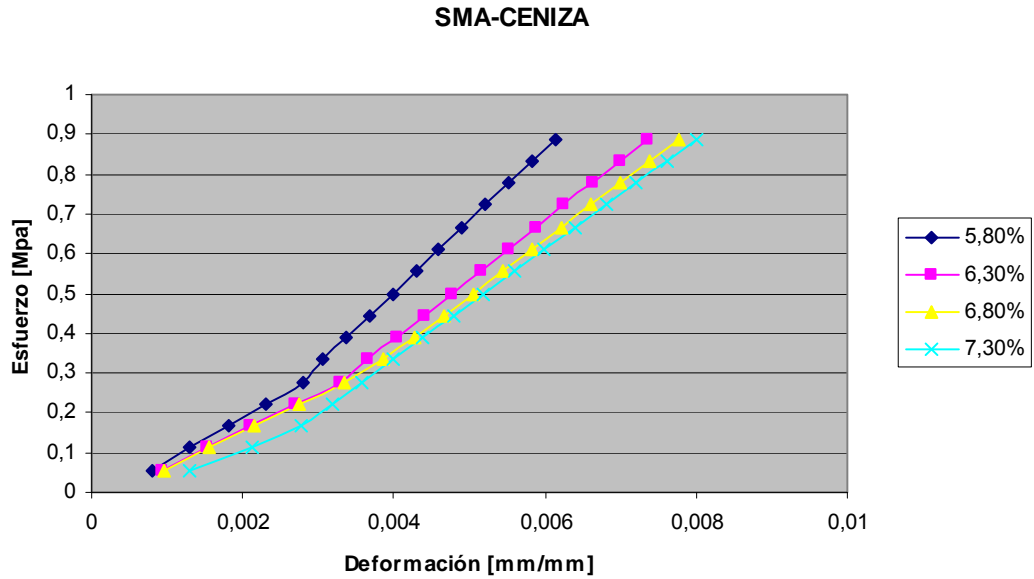


Figura 15 Esfuerzo Vs deformación SMA- CENIZA

3.6.5.2 Módulos de Elasticidad

Los módulos de elasticidad calculados con base en las curvas anteriores, de acuerdo a la magnitud de las deformaciones generadas en las muestras, se presentan en la siguiente tabla.

% Asfalto	Modulo elástico (Mpa)	
	1	2
5,8%	111,16	180,08
6,3%	94,95	150,18
6,8%	93,16	142,17
7,3%	68,09	138,09

Tabla 16 Módulos elásticos de la mezcla SMA - CENIZA

3.7 DEFORMACIÓN A 60° C (ENSAYO CREEP SIN CONFINAR)

En esta prueba fue medida la deformación de las probetas a lo largo de una hora, durante intervalos de tiempo que no superan los 2 minutos; Por esta razón, a continuación se muestran únicamente las gráficas resultantes, se trato de mostrar lo más relevante del ensayo así que se mostraron los valores de deformación de los 10 primeros minutos, así como los valores finales de deformación; se pueden ver todos los resultados en el ANEXO E.

3.7.1 Gráficos Deformación Vs. Tiempo (MDC-2)

La variación de la deformación producida en las probetas, por la aplicación de una carga constante sobre ellas durante una hora, es la siguiente.

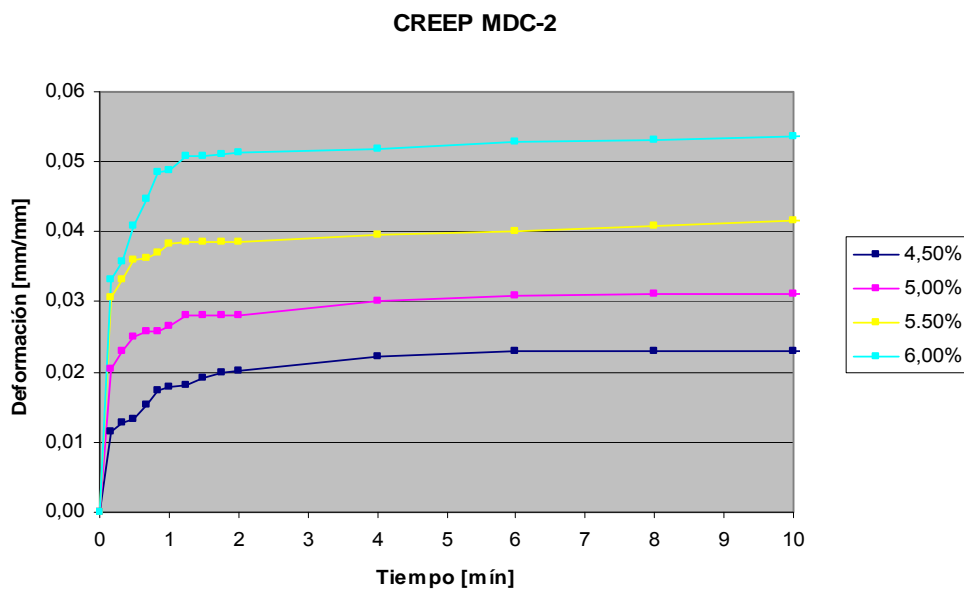


Figura 16 Deformación Vs tiempo MDC-2

% ASFALTO	DEFORMACION FINAL [mm/mm]
4,50%	0,0235
5,00%	0,0316
5,50%	0,0424
6,00%	0,0549

Tabla 17 Deformación final Creep MDC-2

3.7.2 Gráficos Deformación Vs. Tiempo (MDC-3)

La variación de la deformación producida en las probetas, por la aplicación de una carga constante sobre ellas durante una hora, es la siguiente.

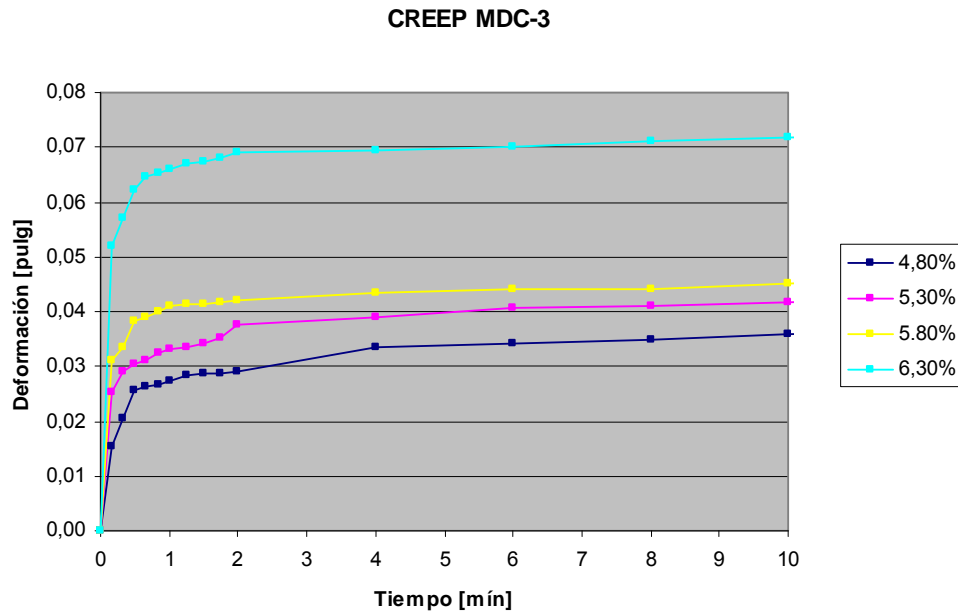


Figura 17 Deformación Vs tiempo MDC-3

% ASFALTO	DEFORMACION FINAL [mm/mm]
4,80%	0,0410
5,30%	0,0440
5,80%	0,0481
6,30%	0,0733

Tabla 18 Deformación final Creep MDC-3

3.7.3 Gráficos Deformación Vs. Tiempo (M1)

La variación de la deformación producida en las probetas, por la aplicación de una carga constante sobre ellas durante una hora, es la siguiente.

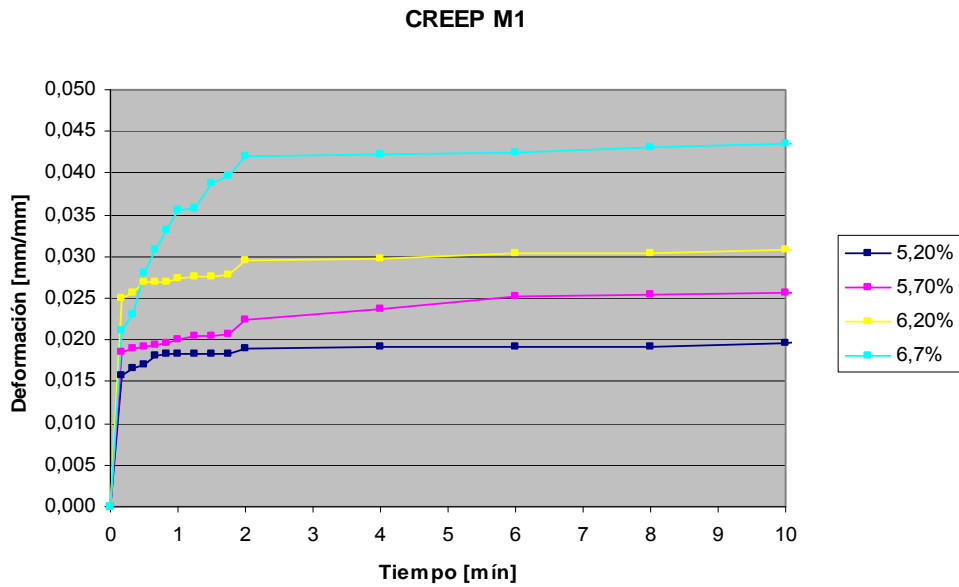


Figura 18 Deformación Vs tiempo M1

% ASFALTO	DEFORMACION FINAL [mm/mm]
4,50%	0,0220
5,00%	0,0266
5,50%	0,0327
6,00%	0,0448

Tabla 19 Deformación final Creep M1

3.7.4 Gráfico Deformación Vs. Tiempo (SMA- CELULOSA)

La variación de la deformación producida en las probetas, por la aplicación de una carga constante sobre ellas durante una hora, es la siguiente.

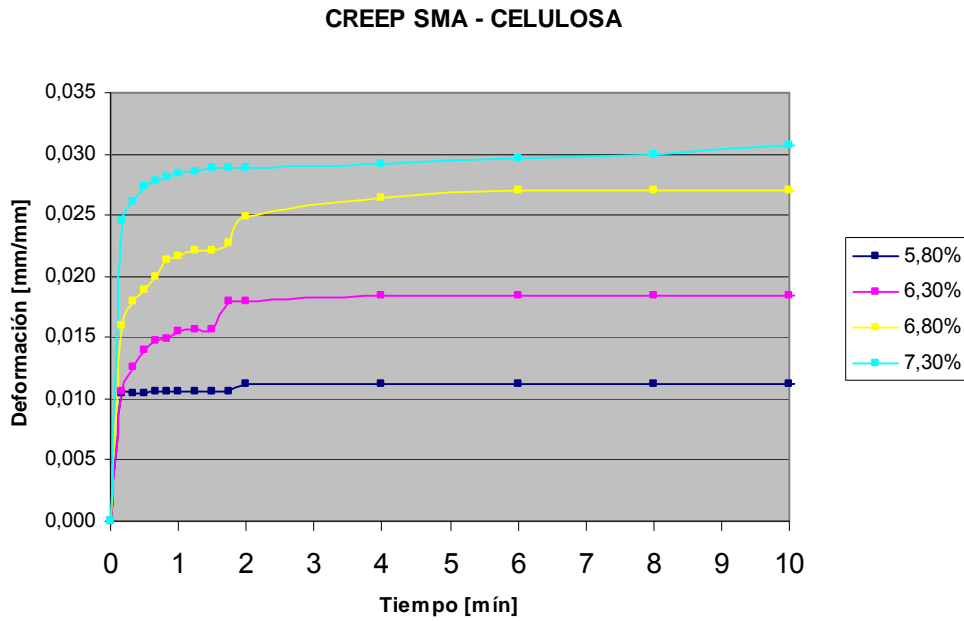


Figura 19 Deformación Vs tiempo SMA-CELULOSA

% ASFALTO	DEFORMACION FINAL [mm/mm]
4,80%	0,0126
5,30%	0,0195
5,80%	0,0286
6,30%	0,0325

Tabla 20 deformación final Creep SMA-CELULOSA

3.7.5 Gráfico Deformación Vs. Tiempo (SMA- CENIZA)

La variación de la deformación producida en las probetas, por la aplicación de una carga constante sobre ellas durante una hora, es la siguiente.

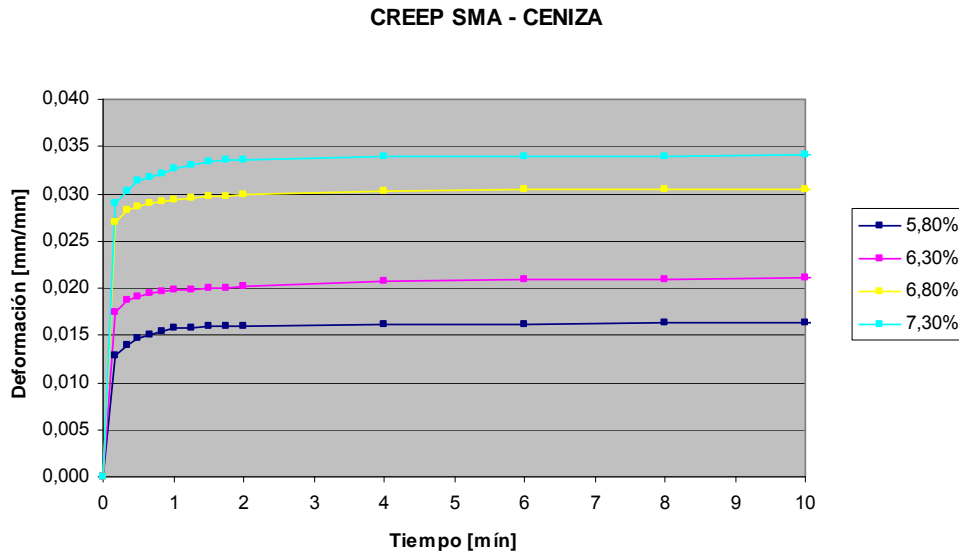


Figura 20 Deformación Vs tiempo SMA-CENIZA

Se ve una grafica con una tendencia mucho más definida, debido a la forma de realización del ensayo que impedía que se perdiera calor conforme avanzaba el mismo.

% ASFALTO	DEFORMACION FINAL [mm/mm]
4,50%	0,0171
5,00%	0,0217
5,50%	0,0306
6,00%	0,0342

Tabla 21 Deformación final SMA-CENIZA

3.8 ESTABILIDAD MARSHALL

La máxima resistencia a la carga de las mezclas en estudio, de acuerdo a su contenido de asfalto, es la siguiente.

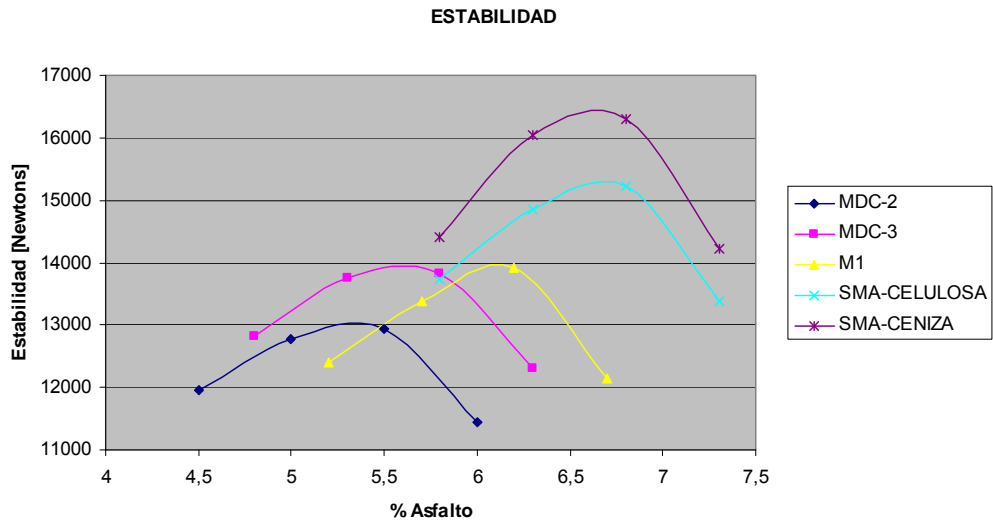


Figura 21 Resistencia a la carga

3.9 FLUJO MARSHALL

La deformación producida en las mezclas desde la carga 0 hasta la carga máxima, de acuerdo a su contenido de asfalto, es la siguiente.

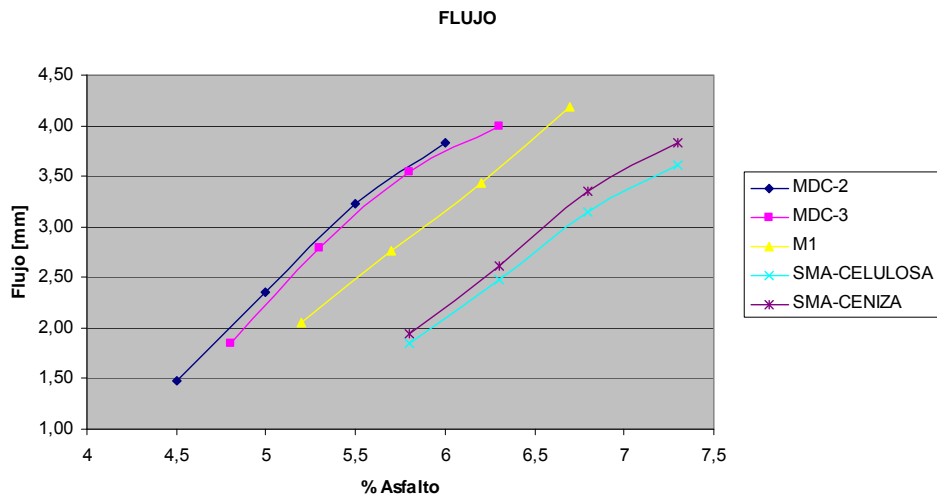


Figura 22 Resistencia a la carga

3.10 ENSAYO DE ESCURRIMIENTO

En esta prueba se halla la diferencia de asfalto entre tres capas de asfalto, de un mismo porcentaje de asfalto, la diferencia porcentual será una medida del escurrimiento del asfalto.

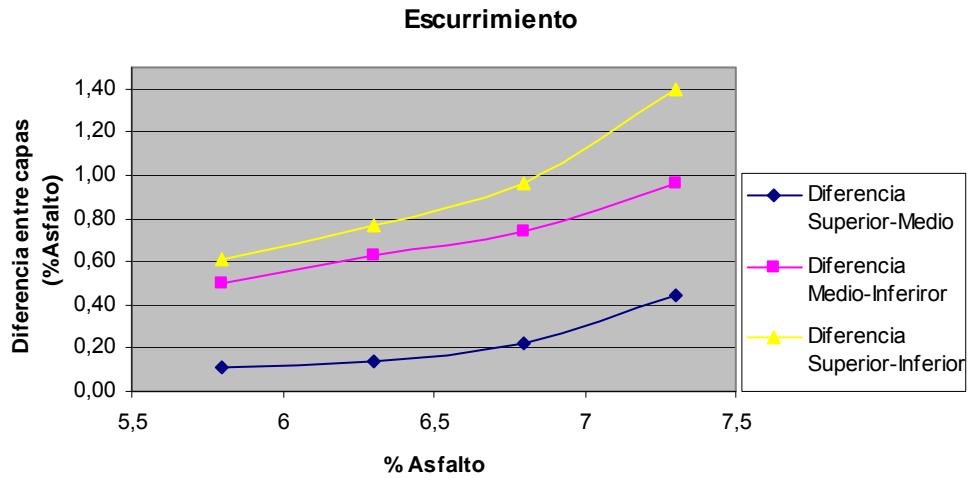


Figura 23 Ensayo de escurrimiento

3.11 TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS

Los valores que se presentan en la siguiente tabla, corresponden a los resultados numéricos de los ensayos y mediciones realizados sobre las probetas, de los diferentes tipos de mezcla.

MEZCLA	% Asf	G Bulk	%Va	%VAM	%VAF	Módulo Elástico 7,5 °C [Mpa]		CREEP Def. Máx. [mm/mm]	Estabilidad [Newtons]	Flujo [mm]
						1	2			
MDC-2	4,5	2,348	6,40	14,83	56,86	88,84	158,92	0.0235	11954.95	1.473
	5	2,382	4,03	14,05	71,31	79,75	140,80	0,0316	12782.15	2.354
	5,5	2,393	3,11	14,11	77,97	67,98	115,76	0.0424	12926.42	3.234
	6	2,372	3,27	15,31	78,62	64,91	114,52	0.0549	11445.12	3.835
MDC-3	4,8	2,337	4,79	14,92	67,90	112,10	163,31	0.0410	12815.93	1.846
	5,3	2,356	3,50	14,69	76,17	95,83	140,78	0.0440	13756.18	2.794
	5,8	2,369	2,51	14,68	82,94	83,38	137,28	0.0481	13835.45	3.548
	6,3	2,364	1,96	15,30	87,20	67,82	128,67	0.0733	12304.59	3.988
M1	5,2	2,260	8,51	18,99	55,21	83,38	155,35	0.0220	12399.93	2.057
	5,7	2,295	6,32	18,18	65,21	74,81	120,73	0,0266	13374.70	2.760
	6,2	2,305	5,42	18,22	70,27	63,15	128,18	0,0327	13926.44	3.437
	6,7	2,304	4,93	18,71	73,67	59,25	105,02	0.0448	12133.90	4.191
SMA-CELULOSA	5,8	2,331	3,64	15,87	77,04	109,17	168,64	0,0126	13727.80	1.846
	6,3	2,350	2,34	15,62	85,01	97,95	154,12	0,0195	14844.60	2.472
	6,8	2,359	1,42	15,76	90,98	82,68	147,72	0,0286	15232.40	3.141
	7,3	2,351	1,04	16,49	93,71	77,57	129,75	0,0325	13382.51	3.607
SMA-CENIZA	5,8	2,283	5,88	17,75	66,87	111,16	180,08	0,0171	14397.67	1.939
	6,3	2,297	4,51	17,71	74,56	94,95	150,18	0,0217	16037.66	2.616
	6,8	2,307	3,91	17,79	77,24	93,16	142,17	0,0306	16291.53	3.353
	7,3	2,297	4,34	18,59	76,62	68,09	138,09	0,0342	14226.07	3.827

Tabla 22 Resultados en la campaña experimental

4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE MEZCLAS

4.1 DESCRIPCIÓN

Se presenta a continuación el análisis comparativo que muestra las características físicas de las mezclas en estudio, junto a su comportamiento elástico medido mediante los ensayos enunciados con anterioridad.

4.2 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

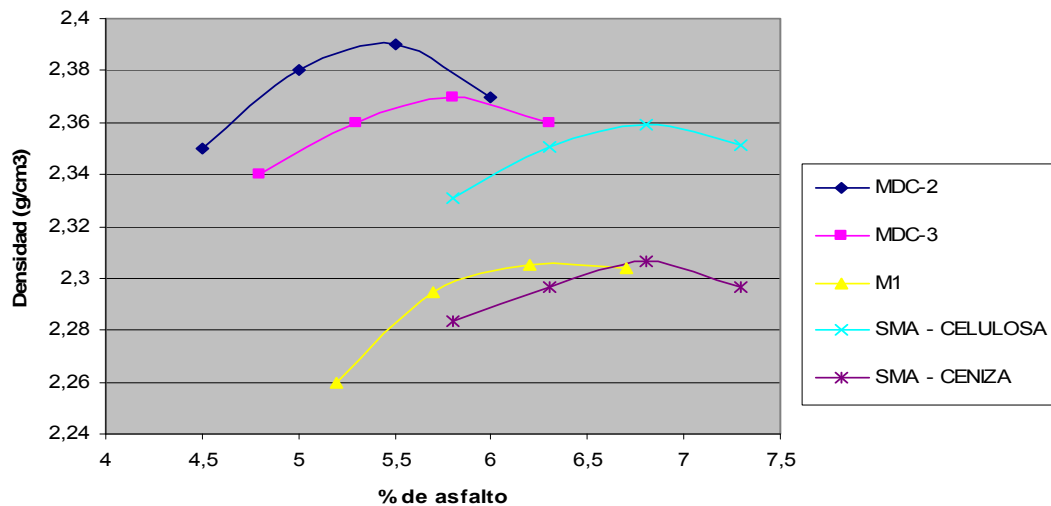
4.2.1 Densidad Bulk

La densidad de las mezclas asfálticas aumenta con el contenido de asfalto hasta alcanzar un valor máximo, para luego decrecer; a continuación se presenta la gráfica que muestra los pesos unitarios de las emulsiones en estudio, en contra del porcentaje de asfalto añadido a cada una de ellas.

Las mezclas de granulometría discontinua tienen pesos específicos menores a los de las mezclas densas, a causa del más bajo número de golpes por cara con que fueron compactadas. Por otro lado, mientras las emulsiones de gradación abierta incrementan su densidad al aumentar el contenido óptimo de asfalto, en las densas ocurre lo contrario.

Las mezclas SMA-CENIZA, SMA-CELULOSA y M1, como ya se mencionó, poseen grandes contenidos de asfalto y una gradación discontinua; aunque su esqueleto mineral y su mastic bituminoso, poseen grandes diferencias, es de esperar que tengan comportamientos similares, como sucede con la MDC-2 y MDC-3. En la gráfica se observa, curiosamente, que el peso unitario de la mezcla SMA-CENIZA se comporta de forma similar al de las emulsiones densas y difiere drásticamente de las SMA-CENIZA y M1, a las que debía en teoría asemejarse. La fibra de celulosa añadida a la mezcla SMA-CELULOSA produzca un incremento de su densidad, que hace que sus características cambien respecto a la SMA-CENIZA, que es muy similar a la M1.

DENSIDAD BULK VS % ASFALTO

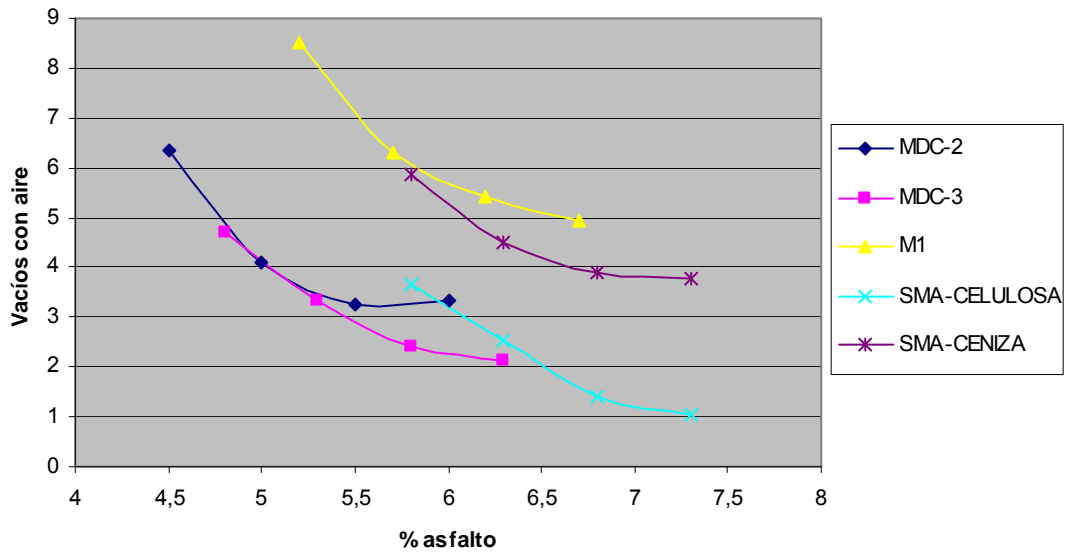


4.2.2 Vacíos Con Aire

El comportamiento de la mezcla SMA-CENIZA se parece a la MDC-2 con un inferior porcentaje de asfalto, sin embargo la SMA-CENIZA se comporta mucho mejor que la mezcla M1, lo cual se debe a la adición de cenizas, pues no existe otro factor en el diseño que las distinga. La SMA-CENIZA tiene una mayor cantidad de vacíos con aire que la SMA-CELULOSA, ya que esta última tiene incluida una fibra de celulosa que aumenta su viscosidad, sin embargo según las recomendaciones de la comisión permanente de asfalto de Argentina el Porcentaje de Vacíos en mezclas tipo SMA debe ser del 2% al 4% valor que cumplen las probetas E3 (contenido de asfalto de 6.8%)

Aunque la comisión permanente de asfalto de Argentina también recomienda para las mezclas SMA la densidad alcanzada en la obra debe ser tal que los vacíos de los testigos se encuentren comprendidos entre el 2 y el 6 %, valores a los cuales se ajustan todas las probetas de SMA-CENIZA, no así las de SMA-CELULOSA, de las cuales solo se ajustan las D1 y D2 (contenido de asfalto de 5.8% y 6.3% respectivamente). La norma AASHTO dice que la mezcla optima de SMA es la que contiene exactamente 4.0% de vacíos con aire, valores cercanos a los de las probetas E2, E3 y E4, y a los cuales no se acercan los de la mezcla SMA-CELULOSA.

VACÍOS CON AIRE VS % ASFALTO

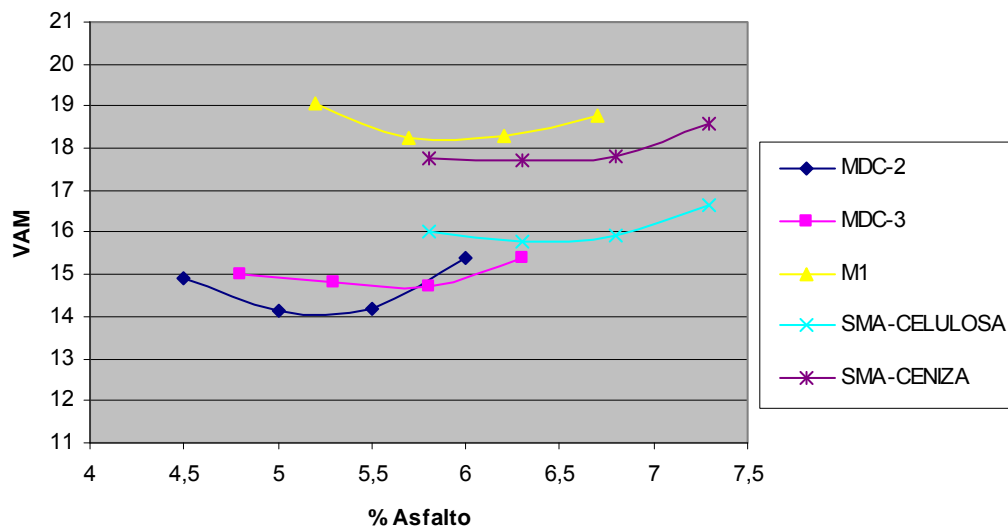


4.2.3 Vacíos en el Agregado Mineral

Los vacíos en el agregado mineral son inversamente proporcionales a la densidad de las mezclas compactadas, razón por la cual las mixturas de granulometría densa tienen un porcentaje VAM menor que el de las discontinuas.

El VAM representa la cantidad de mastic bituminoso y vacíos con aire presente en una mezcla. La MDC-2 y MDC-3 tienen cantidades de asfalto y porcentajes VAM pequeños, respecto a las mezclas M1 y SMA-CENIZA, pero se comportan de forma similar a la mezcla SMA-CELULOSA; sin embargo, la mezcla SMA-CENIZA tiene un comportamiento similar a la mezcla M1, con vacíos en agregado mineral inferiores a esta y superiores considerablemente a los de la mezcla SMA-CELULOSA, sin embargo según las recomendaciones de la comisión permanente de asfalto de Argentina el Porcentaje de Vacíos del Agregado Mineral VAM en mezclas tipo SMA debe ser >18%, valor que cumplen las probetas E4 (contenido de asfalto de 7.3%) de SMA-CENIZA y ninguna de las SMA-CELULOSA, aunque la norma AASHTO recomienda que el VMA sea como mínimo 17% valor al cual se ajustan todas las probetas de SMA-CENIZA y ninguna de SMA-CELULOSA.

VAM VS % ASFALTO



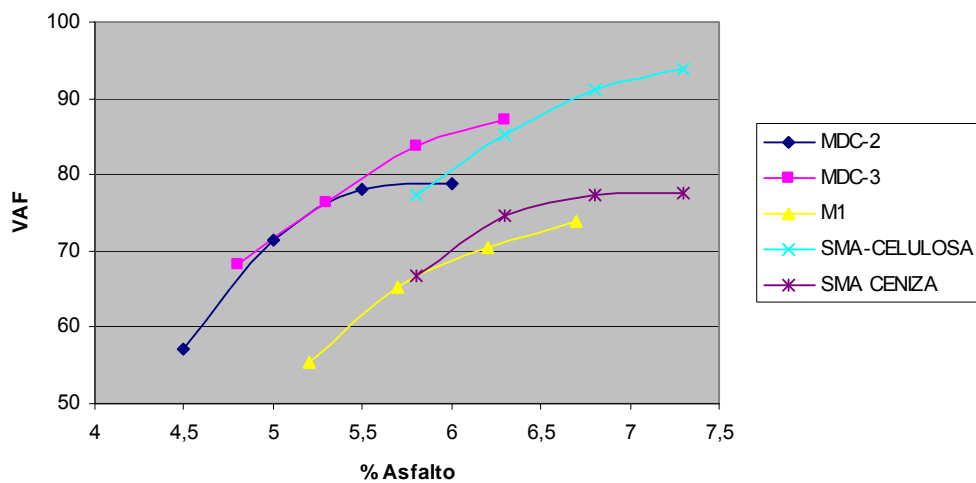
4.2.4 Vacíos Llenos de Asfalto

El porcentaje de vacíos llenos de asfalto de una mezcla, depende de su contenido de VAM y vacíos con aire. De nuevo el comportamiento de la mezcla SMA-CENIZA es similar al de la mezcla MDC-2 (una mezcla con una cantidad de asfalto inferior) y difiere de la SMA-CELULOSA.

Algo parecido sucede en la SMA: su escaso contenido de vacíos con aire genera gran cantidad de asfalto efectivo y consecuentemente el más alto VAF de todas las mezclas; esta es una diferencia fundamental entre las dos mezclas discontinuas analizadas en este estudio y justifica el más alto desempeño del SMA, puesto que el mastic bituminoso que recubre las partículas de agregado y da cohesión a la estructura, está compuesto en mayor proporción por asfalto y contiene menos vacíos de aire, lo que junto a la adición de celulosa, aumenta la adhesión ligante / árido y la impermeabilidad de la mezcla.

Según las recomendaciones de la comisión permanente de asfalto de Argentina el Porcentaje de Relación Betún-Vacíos en mezcla para mezclas tipo SMA debe ser del 75% al 85% rango al cual se ajustan las probetas E3 y E4 (contenido de asfalto de 6.8% y 7.3% respectivamente, porcentajes que cumplen con esta norma Argentina pues son mayores a 6.5%) y las probetas D1 y D2 (contenido de asfalto de 5.8% y 6.3% respectivamente) de SMA-CELULOSA, lo que demuestra que la mezcla SMA-CELULOSA es considerablemente más densa que de lo que se requiere, lo que nos hace pensar que la fibra de celulosa empleada para su fabricación no fue la adecuada.

VAF VS % ASFALTO



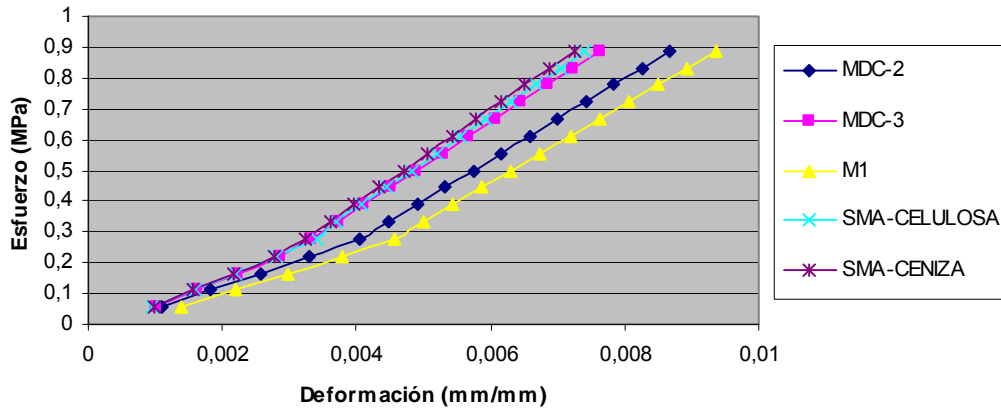
4.2.5 Módulo Elástico a 7.5 ° C

Al analizar las graficas se nota que existe una tendencia, al incrementar el contenido de asfalto aumenta su deformación (excepto en MDC-2 y M1), por ende las probetas con menor contenido de asfalto de una misma mezcla tuvieron un modulo de elasticidad más alto.

Todas las mezclas, excepto las SMA-CENIZA y SMA-CELULOSA, presentan deformaciones altas. La mezcla SMA-CENIZA presento en su gráfica un modulo de elasticidad alto para las probetas E1 (contenido de asfalto de 5.8%) y una tendencia muy pareja en las demás probetas.

La mezcla SMA-CENIZA presenta un mejor comportamiento que la SMA-CELULOSA, lo cual se le atribuye a la adición de cenizas volantes cuya cualidad rigidizante es bastante conocida y usada en el campo de mezclas de hormigón.

MODULO ELASTICO-VALORES PROMEDIO



	MODULOS ELASTICOS [Mpa]	
	1	2
MDC-2	75,37	132,5
MDC-3	89,78	142,51
M1	70,149	127,32
SMA-CELULOSA	90,97	150,06
SMA-CENIZA	91,84	152,63

4.2.6 Creep sin Confinar a 60 ° C

Al analizar las graficas se nota que existe una tendencia, al incrementar el contenido de asfalto aumenta su deformación (excepto en MDC-2 y M1), debido a la acción de una carga estática, Las mezclas SMA-CENIZA y SMA-CELULOSA demostraron un mejor comportamiento que la mezcla M1, pese a que esta última contiene menor cantidad de ligante, el hecho que estas mezclas hayan presentado una menor deformación se debe posiblemente a la adición de ceniza y celulosa respectivamente. En la mezcla SMA-CENIZA se ve una grafica mucho mejor definida, debido a la forma de realización del ensayo que impedía que se perdiera calor conforme avanzaba el mismo.

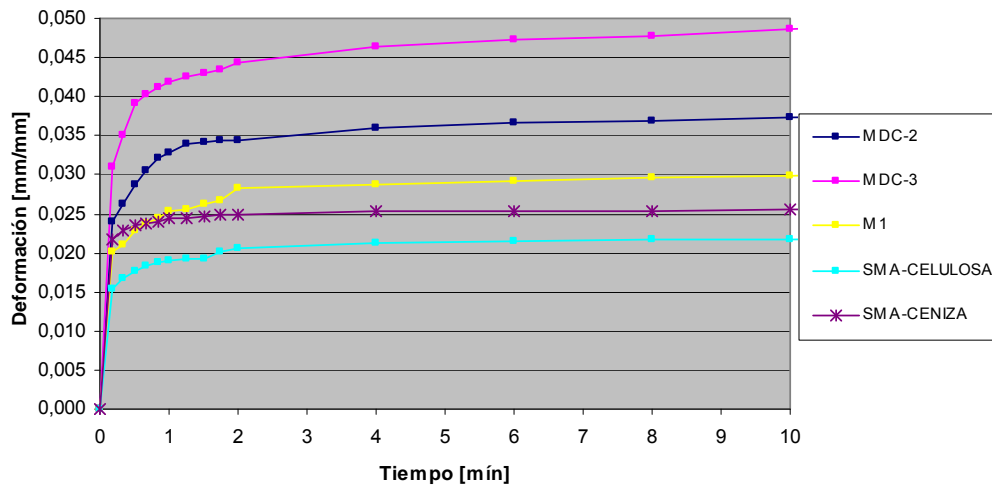
Las mezclas de gradación abierta tuvieron una menor deformación que las mezclas densas en caliente, ya que su gradación ayuda a que se distribuyan mejor los esfuerzos, transmitiéndolos mejor a lo largo de su esqueleto pétreo y reduciendo los esfuerzos directos sobre el asfalto.

Cabe mencionar que los ensayos no fueron exactamente iguales, ya que para buscar repetitividad del ensayo se ingenio una forma para que la probeta no perdiera temperatura a medida que se realizaba el ensayo, y como se sabe la temperatura es una variable crítica en la medida de deformación sobre una mezcla asfáltica. Lo cual nos hace sospechar que si las situaciones del ensayo anterior

hubieran sido las mismas que las de SMA-CENIZA las deformaciones del SMA-CELULOSA y las otras mezclas hubieran sido mayores.

Sin embargo el comportamiento de la mezcla SMA-CENIZA respecto de las mezclas MDC-2, MDC-3 y M1 fue superior, por otro lado puede decirse, según el comportamiento de las cinco mezclas, que, que en los primeros minutos del ensayo la deformación aumenta notablemente en los primeros minutos del ensayo, y a medida que transcurre el tiempo con la carga estática la deformación de las probetas tiende a estabilizarse.

CREEP VALORES PROMEDIO



% ASFALTO	DEFORMACION FINAL [mm/mm]
MDC-2	0,0381
MDC-3	0,0516
M1	0,0315
SMA-CELULOSA	0,0233
SMA-CENIZA	0,0259

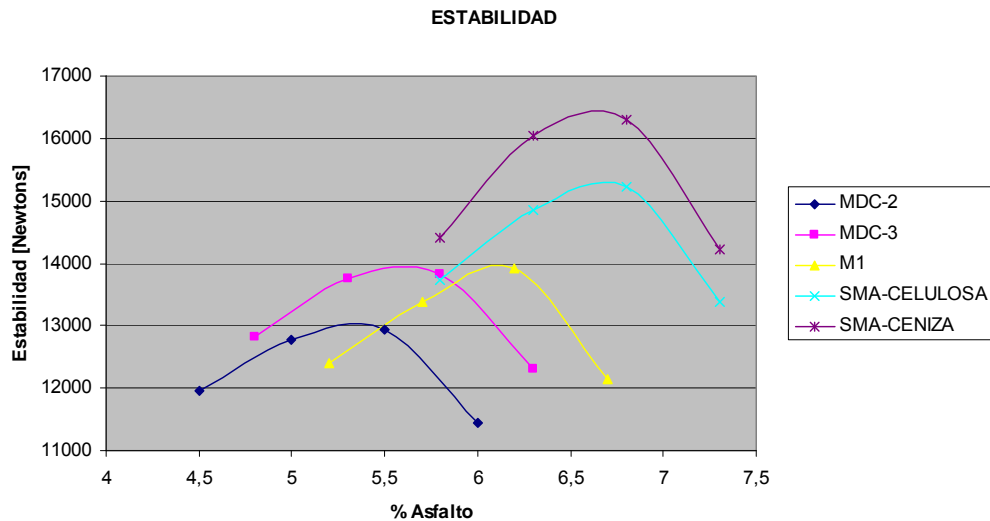
4.2.7 Estabilidad Marshall

La mezcla SMA-ceniza demostró tener la más alta estabilidad, incluso por encima de la SMA-Celulosa, lo cual se debe a la inclusión de cenizas volantes que le confieren a la mezcla mayor rigidez.

Las mezclas de gradación abierta tuvieron un mejor comportamiento que las mezclas densas en caliente.

Las mezclas de tipo SMA, como era esperado, son las de mayor estabilidad entre las analizadas en este estudio; por eso puede ser empleada normalmente en pavimentos que serán sometidos a condiciones exigentes de carga. Aunque la M1 tiene un principio de funcionamiento similar, es evidente que la ausencia de fibras de celulosa o ceniza, que no permite añadirle más asfalto, ocasiona una disminución en su resistencia a la carga.

Se observa que las cenizas volantes aumentan la resistencia de la mezcla asfáltica tipo SMA sin que esta llegue a convertirse en un mezcla que pueda llegar a presentar fisuración por dicho aumento de rigidez.

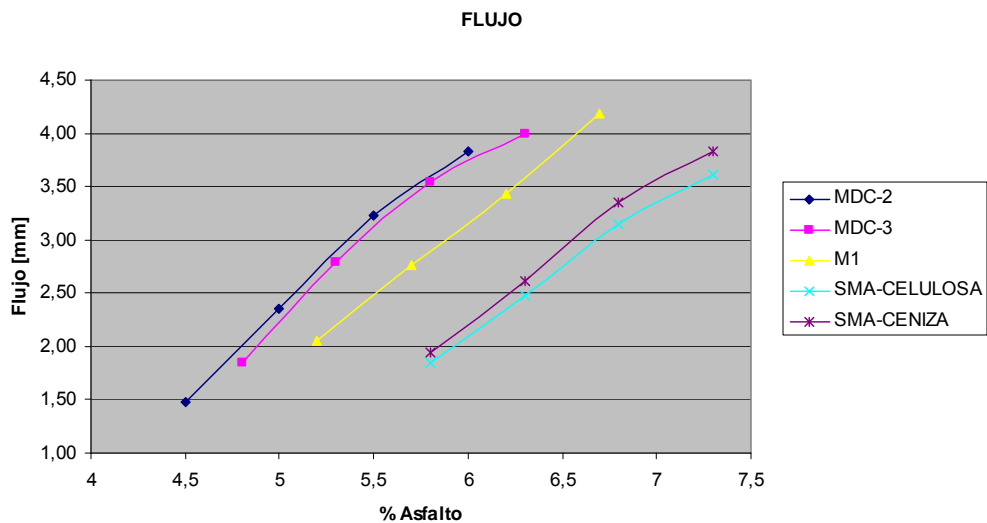


4.2.8 Flujo Marshall

Aunque la rigidez aumentó en la SMA-CENIZA, el flujo fue muy parecido al de la M1 pero inferior a este debido a que la ceniza ayuda a estabilizar el ligante en la mezcla en alguna medida, fue mayor incluso que el de la SMA-CELULOSA, se hace evidente que esta mezcla necesita de un estabilizante para mejorar sus características.

Aunque la resistencia a la carga del SMA fue superior a la de las demás mezclas y su contenido de ligante es el más alto, su deformación es menor que las de la M1 y la MDC-3; únicamente la MDC-2, que contiene la menor cantidad de asfalto entre todas las mezclas, presenta una deformación en algunos puntos, ligeramente más baja que la suya; sin embargo es precisamente ella la que tuvo menor estabilidad Marshall.

Como se anotó anteriormente, el elevado flujo es un indicador de que el aumento en la rigidez no es excesivo al punto de generar fisuras.



4.2.9 Escurrimiento

La probeta presenta mayor escurrimiento a medida que aumenta su porcentaje de asfalto. Esto demuestra que la ceniza por sí sola no es un estabilizante adecuado para este tipo de mezclas asfálticas y requieren de otro tipo de fibra para su estabilización.

Los resultados, no son los esperados ya que la mezcla SMA-CENIZA demostró tener un escurrimiento más alto del esperado.

Se ve que el escurrimiento aumenta considerablemente entre capas, es decir, el asfalto se escurre a la capa inferior lo que representa inconvenientes a la hora de ser transportada e instalada la mezcla.

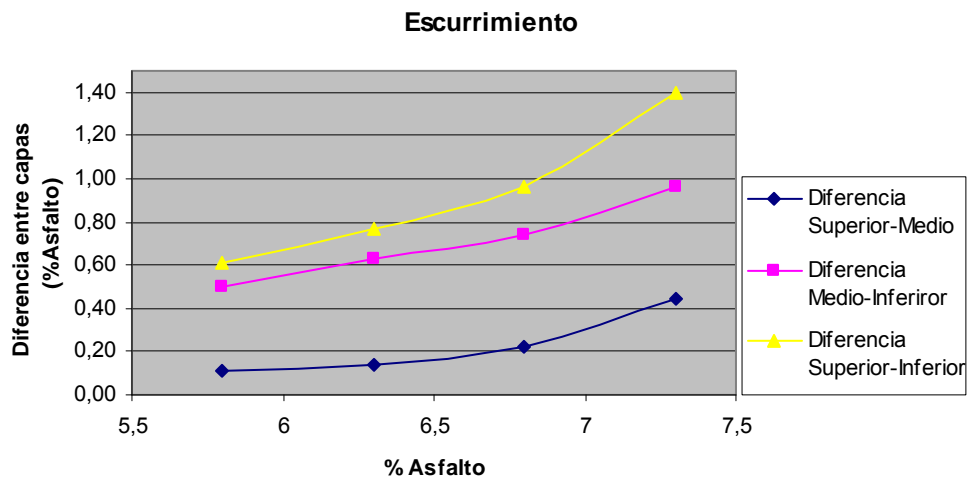


Figura 23 Ensayo de escurrimiento

5. RECOMENDACIONES

Con base en las observaciones realizadas a lo largo de este trabajo y en los resultados obtenidos en el mismo, se proponen las siguientes recomendaciones con objeto de continuar la presente investigación:

- Fabricar muestras con diferente gradación, ya que en esta investigación se ensayó únicamente la media de los rangos establecidos en las normas INVIAS y ZTV Asphalt y no se tuvieron en cuenta otros como los de la CPA (Argentina) y la AASHTO.
- Efectuar otro tipo de ensayos sobre las probetas o mejorar los empleados en este estudio, con el fin de obtener datos más exactos, que permitan evaluar las propiedades de deformación de las mezclas.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos en este estudio, respecto a los generados en otras investigaciones desarrolladas sobre el tema.
- Fabricar y ensayar muestras adicionando asfalto modificado con polímeros, únicamente al SMA, teniendo en cuenta que las mezclas MDC-2, MDC-3 y M1, son diseñadas generalmente con asfalto convencional.
- Realizar ensayos de escurrimiento estandarizados como el ensayo de escurrimiento de ligante por método Schellenberg (Se anexa la descripción del ensayo en el ANEXO G.1).
- Adicionar fibras que no reaccionen negativamente con el agua, a la mezcla tipo SMA junto con cenizas volantes.
- Ensayar diversos porcentajes de fibra de celulosa, ceniza y asfalto en el diseño de mezclas SMA, buscando encontrar la dosis óptima de fibra y ceniza que debe añadirse a la mezcla.
- Evaluar la resistencia a la fatiga de cada una de las mezclas con el fin de obtener una caracterización más completa.

6. CONCLUSIONES

- El SMA-CENIZA es la mezcla de mayor estabilidad analizada en este estudio, lo que la hace indicada para su empleo en vías sometidas a condiciones exigentes de carga.
- La SMA-CENIZA presenta la menor deformación entre todas las mezclas estudiadas, al ser sometida a diferentes condiciones de carga, a altas y bajas temperaturas.
- La SMA-CENIZA es más económica que las mezclas MDC-2, MDC-3, SMA-CELULOSA y M1, aunque su diseño contiene mayor cantidad de asfalto y ceniza. Esto se debe al bajo espesor de la carpeta compactada, que reduce su costo inicial en un 20 %, respecto al de mezclas tradicionales.
- Aunque las pruebas efectuadas sobre las muestras permitieron comparar algunas propiedades de deformación de las mezclas, es necesario aclarar que al someter cada probeta a diferentes condiciones de carga y temperatura, antes de fallarlas, son alteradas sus propiedades y de igual manera, los resultados de los ensayos.
- La adición de ceniza a la mezcla tipo SMA aumento considerablemente su resistencia a las deformaciones y la rigidez de la mezcla.
- La mezcla diseñada posee mayor escurrimiento del permitido.
- La mezcla SMA-CENIZA se ajusta mejor a los requisitos de las normas internacionales para este tipo de mezclas, que la SMA-CELULOSA.
- Las cenizas volantes no tienen un costo por sí solas. El único costo que tienen está dado por su transporte. Además es una buena forma de ayudar al medio ambiente empleando cenizas volantes que de otra manera serían utilizadas como basura y es un residuo ecológicamente problemático que debe ser eliminado por las termoeléctricas pues de otra manera son transportadas por el viento generando grandes problemas de contaminación.

7. BIBLIOGRAFIA

AASHTO -American Association of State Highway and Transportation 400-R435-Stone Matrix Asphalt (SMA) Asphalt Pavements – AASHTO: 400-R-435, United States. (2005)

AASHTO-American Association of State Highway and Transportation; European Asphalt Study Tour, United States (1990)

ARENAS, Emilio; SERRANO, Andrés; Análisis Comparativo de Propiedades de Deformación en las mezclas Mdc-2, Mdc-3, M1 y Stone Matrix Asphalt, Universidad Industrial de Santander, Colombia. (2006)

BARBOZA DA SILVA, Patrícia; Estudo em Laboratório de Misturas Asfálticas SMA 0/8S e SMA 0/16, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil. (2006)

COMISIÓN PERMANENTE DEL ASFALTO; Especificaciones Técnicas de Mezclas Asfálticas en Caliente de Bajo Espesor para Carreteras de Rodamiento, República Argentina. (2005)

COOLEY JR., L.A.; BROWN, E.R. Potential of Using Stone Matrix Asphalt (SMA) for Thin Overlays. 81th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC. (2002)

HEADWATER RESOURCES; Fly Ash for Stone Matrix Asphalt, Bulletin 18, United States. (2006)

INVIAS - Instituto Nacional de Vías; Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia. (1998)

MAGAZINE ASPHALT REVIEW; Volume 25, Number 1. (March 2006)

MOENNE, Marcelo; Estudio y Evaluación Preliminar de la Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA) Mediante un tramo de prueba, Universidad Andrés Bello, Chile. (2003)

MONTEJO ALFONSO; Ingeniería de Pavimentos en Vías Terrestres. Ediciones Universidad Católica. Bogotá, Colombia. (1999)

OBERT, Susanne; Predicting the Performance of Stone Mastic Asphalt, University of Ulster, United Kingdom. (2000)

QUINTERO, Fernando; Manual de Laboratorio de Pavimentos. Ediciones UIS. Bucaramanga, Colombia. (1983)

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE; Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas, México. (2004)

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE; Mecánica de Materiales para Pavimentos, México. (2002)

UMAÑA PEÑA, Juan Carlos; Tesis doctoral: Síntesis de Zeolitas a Partir de Cenizas Volantes de Centrales Termoeléctricas de Carbón, Universitat Politècnica de Catalunya, España. (2002)

ZTV Asphalt – StB Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen. Köln, Alemania. (2001)

ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS



ANEXO A.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS Y GRUESOS Y FINOS (INV E-213)

Fecha: Mayo de 2006
 Proyecto: SMA
 Localización: Pescader - Río Chicamoca

Peso Inicial de la Muestra (g): 3500
 Peso Después de lavado (g): 3301,1
 Porcentaje de error %: 0,04

MALLA No.	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	RETENIDO PARCIAL	% QUE PASA LA MALLA	MALLA No.	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	RETENIDO PARCIAL	% QUE PASA LA MALLA
	mm	g	%			mm	g	%	%
2"	50,8			100	10	2	364,5	10,41	28,59
1 1/2"	36,1	150	4,29	95,71	20	0,84	251,2	7,18	21,41
1"	25,4	185	5,29	90,43	40	0,42	197,8	5,65	15,76
3/4"	19,05	355	10,14	80,29	60	0,25	138	3,94	11,81
1/2"	12,7	535	15,29	65,00	100	0,149	115,6	3,30	8,51
3/8"	9,52	325	9,29	55,71	200	0,074	98,2	2,81	5,71
No.4	4,75	585	16,71	39,00	Pasa 200		198,3	5,67	0,04
Σ		2135			Σ		1363,6	100,0	
TOTAL							3498,6		



A.2 EQUIVALENTE DE ARENA (INV E-133)

Fecha: Mayo de 2006
Proyecto: SMA
Localización: Pescadero - Rio Chicamocha
Trituradora: SAENZ

MODO DE PREPARACION MUESTRA	1	2	3	Total
MATERIAL PASA NO. 4				
TEMPERATURA: 25 °C				
ALTURA DE LA ARCILLA H1	3,3	3,2	3,2	
ALTURA DE LA ARCILLA H2	3	3,1	3	
EQUIVALENTE DE ARENA % (H2/H1)	90,9	96,9	93,8	93,8



A.3 PESO ESPECÍFICO Y % DE ABSORCIÓN DE AGREGADO GRUESO (INV E-223)

Fecha: Mayo de 2006
Proyecto: SMA
Localización: Pescadero - Rio Chicamocha
Trituradora: SAENZ

DATOS

A = Peso de la muestra en condición S.S.S al aire	5000 g
Pa = Peso canasta, sumergida en agua	1800 g
Pb = Peso canasta + muestra S.S.S, sumergida en agua	4925 g
B = Peso de la muestra sumegida en agua (Pb - Pa)	3125 g
C = Peso de la muestra seca en horno	4965 g

CALCULOS

Gravedad específica real	$C / (C-B)$	2,70
Gravedad específica aparente	$C / (A-B)$	2,65
Gravedad específica aparente S.S.S	$A / (A-B)$	2,67
% de Absorción	$[(A-C)/C] * 100$	0,70%



A.4 PESO ESPECÍFICO Y % DE ABSORCIÓN DE AGREGADO FINO (INV E-222)

Fecha: Mayo de 2006
Proyecto: SMA
Localización: Pescadero - Rio Chicamocha
Trituradora: SAENZ

DATOS

A = Peso frasco + agua hasta la marca al aire	665,6 g
B = Peso de la muestra en condición S.S.S al aire	500 g
C = Peso de la muestra, frasco y agua agregada hasta la marca al aire	974 g
D = Peso de la muestra seca al horno	494,7 g

CALCULOS

Gravedad específica real	$D / (A-C+D)$	2,66
Gravedad específica aparente	$D / (A+B-C)$	2,58
Gravedad específica aparente S.S.S	$B / (A+B-C)$	2,61
% de Absorción	$[(B-D)/C] * 100$	0,54%



A.5 PESO ESPECÍFICO Y % DE ABOCIÓN DE FILLER MINERAL (E-222)

Fecha: Junio de 2006
Proyecto: SMA
Localización: Pescadero - Rio Chicamocha
Trituradora: SAENZ

DATOS

A = Peso frasco + agua hasta la marca al aire	659 g
B = Peso de la muestra en condición S.S.S al aire	200 g
C = Peso de la muestra, frasco y agua agregada hasta la marca al aire	772,3 g
D = Peso de la muestra seca al horno	185,9 g

CALCULOS

Gravedad específica real	$D / (A-C+D)$	2,56
Gravedad específica aparente	$D / (A+B-C)$	2,14
Gravedad específica aparente S.S.S	$B / (A+B-C)$	2,31
% de Absorción	$[(B-D)/C] * 100$	1,83%



A.6 RESISTENCIA AL DESGASTE POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (INV E - 219)

Fecha: 4 de Mayo de 2006
 Proyecto: SMA
 Localización: Pescadero - Rio Chicamocha
 Trituradora: SAENZ

DATOS SOBRE GRADACIÓN, CARGA ABRASIVA Y REVOLUCIONES

TAMANO		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. de esferas		12	11	8	6	12	12	12

PRUEBAS	R. Igneas	R. Metamórficas
Gradación usada	F	F
No. De esferas	12	12
No. De revoluciones	1000	1000
Pa = Muestra seca antes del ensayo (g)	10000	10000
Pb = Peso muestra seca después de ensayo después de lavar sobre tamiz No.12 (g)	7720	7325
Perdida de material (Pa - Pb) (g)	2280	2675
% Desgaste [(Pa - Pb) / Pa] *100	22,8	26,75
Especificación	INV E-219	INV E-219
% Desgaste Total	23,985	



A.7 ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO (INV E-230)

Fecha: Mayo de 2006
 Proyecto: SMA
 Localización: Pescadero - Rio Chicamocha
 Trituradora: SAENZ

ÍNDICE DE ALARGAMIENTO

TAMAÑO DE TAMICES		PESO MUESTRA (g)	PESO MATERIAL RETENIDO EN EL CALIBRADOR (g)	% RETENIDO EN EL CALIBRADOR	% RETENIDO GRADACIÓN ORIGINAL	[% RET. CALIB.] x [% RET GRAD. ORIG.]
PASANTE	RETENIDO					
1"	3/4"	1395	102,86	7,37	13,95	1,03
3/4"	1/2"	1188,27	193,37	16,27	34,1	5,55
1/2"	3/8"	413,57	69,17	16,73	21,55	3,60
3/8"	1/4"	268,03	73,8	27,53	21,75	5,99
Σ =		3264,87	439,2	67,91	91,35	16,17

ÍNDICE DE APLANAMIENTO

TAMAÑO DE TAMICES		PESO MUESTRA (g)	PESO MATERIAL RETENIDO EN EL CALIBRADOR (g)	% RETENIDO EN EL CALIBRADOR	% RETENIDO GRADACIÓN ORIGINAL	[% RET. CALIB.] x [% RET GRAD. ORIG.]
PASANTE	RETENIDO					
1"	3/4"	1395	312,5	22,40	13,95	3,13
3/4"	1/2"	1188,27	282,7	23,79	34,1	8,11
1/2"	3/8"	413,57	106,1	25,65	21,55	5,53
3/8"	1/4"	268,03	70,49	26,30	21,75	5,72
Σ =		3264,87	771,79	98,15	91,35	22,49

Índice de Alargamiento = 17,70 %
 Índice de Aplanamiento = 24,62 %



A.8 PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS (INV E-227)

Fecha: Mayo de 2006
Proyecto: SMA
Localización: Pescadero - Río Chicamocha
Trituradora: SAENZ

Tamaño	A	B	C	D	E
(1½" a 1")	2000	1967,48	98,37	2580	2538,0
(1" a ¾")	1500	1300,49	86,7	3190	2765,7
(¾" a ½")	1200	1083,47	90,29	2495	2252,7
(½" a ⅜")	300	257,82	85,94	900	773,5
Σ =	5000	4609,26	361,3025	9165	8329,93264

% Caras Fracturadas [E / D] = 90,89%

A = Peso de la muestra (g)
B = Peso caras fracturadas (g)
C = % Caras fracturadas
D = Granulometría de la gradación original
E = C x D



A,9 SANIDAD DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCIÓN DE SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO (INV E-220)

Fecha: Mayo de 2006
 Proyecto: SMA
 Localización: Pescadero - Rio Chicamocha
 Trituradora: SAENZ

MATERIAL			PESO (g)
DE	A		
No. 4	3/8"		300 ± 5
3/8"	3/4"		1000 ± 10
3/8"	1/2"	33%	330 ± 5
1/2"	3/4"	67%	670 ± 10
3/4"	1 1/2"		1500 ± 50
3/4"	1"	33%	500 ± 30
1"	1 1/2"	67%	1000 ± 50
1 1/2"	2 1/2"		5000 ± 300

Tamices	3/8"	1/2"	3/4"
Peso Inicial (Wi) [g]	333	673,4	1512,7
Peso Final (Wf) [g]	326,9	670,1	1511,9
Diferencia (Wi - Wf) [g]	6,1	3,3	0,8
% Solidez en Sulfato de sodio	1,83	0,49	0,05
% Promedio de Solidez en Sulfato de Sodio	0,79		

Perdida por ensayo de solidez = 0,79

ANEXO B. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS



B.1. GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS FABRICADAS EN LABORATORIO

PROBETA	DIAMETRO [cm]	ALTURA [cm]
C11	10,18	6,63
C12	10,28	6,60
C13	10,22	6,80
C21	10,37	6,55
C22	10,26	6,87
C23	10,25	6,25
C31	10,18	6,74
C32	10,27	6,51
C33	10,20	6,70
C41	10,22	6,60
C42	10,18	6,55
C43	10,42	6,31
D11	10,12	6,38
D12	10,15	6,54
D13	10,34	6,10
D21	10,46	6,19
D22	10,18	6,40
D23	10,19	6,43
D31	10,39	6,16
D32	10,27	6,31
D33	10,26	5,57
D41	10,17	6,26
D42	10,17	6,23
D43	10,18	6,19
E11	10,23	6,57
E12	10,23	6,60
E13	10,17	6,40
E21	10,27	6,27
E22	10,47	6,23
E23	10,30	6,60
E31	10,13	6,27
E32	10,67	6,63
E33	10,20	6,50
E41	10,53	6,30
E42	10,27	6,13
E43	10,20	6,20



B.2. PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS (INV E-735)

Gmm Peso específico máximo de una mezcla asfáltica

A Peso de la muestra en el aire (gr)

D Peso del picnómetro + agua a 25°C

E Peso de la muestra sin vacíos + picnómetro + agua

MEZCLA	% asfalto	W picnómetro	A	D	E	Gmm
MDC-2	4,5	915,2	800	2000,5	2481,6	2,509
	5		800	2000,5	2478,2	2,482
	5,5		800	2000,5	2476,6	2,470
	6		800	2000,5	2474,3	2,452

MEZCLA	% asfalto	W picnómetro	A	D	E	Gmm
MDC-3	4,8	915,2	800	2000,5	2474,6	2,455
	5,3		800	2000,5	2472,8	2,441
	5,8		800	2000,5	2471,2	2,429
	6,3		800	2000,5	2468,7	2,411

MEZCLA	% asfalto	W picnómetro	A	D	E	Gmm
M1	5,2	915,2	800	2000,5	2476,6	2,470
	5,7		800	2000,5	2473,9	2,449
	6,2		800	2000,5	2472,3	2,438
	6,7		800	2000,5	2470,4	2,424

MEZCLA	% asfalto	W picnómetro	A	D	E	Gmm
SMA CELULOSA	5,8	915,2	800	2000,5	2469,8	2,419
	6,3		800	2000,5	2468,1	2,407
	6,8		800	2000,5	2466,2	2,393
	7,3		800	2000,5	2463,8	2,376

MEZCLA	% asfalto	W picnómetro	A	D	E	Gmm
SMA CENIZA	5,8	914,0	800	2018,4	2488,6	2,426
	6,3		800	2018,4	2485,8	2,405
	6,8		800	2018,4	2485,6	2,404
	7,3		800	2018,4	2485,2	2,401

NOTA: Los valores de SMA corresponden al SMA-CELULOSA y SMA-CENIZA



B.3 PESO ESPECÍFICO APARENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS (INV E-733)

Gb Peso específico aparente de una mezcla asfáltica

Wa Peso de la probeta en el aire (gr)

Ws Peso de la probeta saturada en el aire (gr)

Ww Peso de la probeta en el agua (gr)

Probeta	Wa	Ws	Ww	Gb
A11	1116,9	1120,6	635,2	2,30
A12	1191,3	1193,7	683,3	2,33
A13	1184,6	1185,9	684,4	2,36
A21	1180,7	1185,2	690,1	2,38
A22	1180,9	1185,2	688,9	2,38
A23	1184,0	1185,9	678,0	2,33
A31	1176,3	1176,6	686,1	2,40
A32	1179,5	1179,9	686,0	2,39
A33	1187,4	1187,8	709,0	2,48
A41	1176,0	1176,8	681,8	2,38
A42	1188,6	1188,4	686,6	2,37
A43	1187,4	1187,6	692,8	2,40

B11	1180,7	1182,4	676,4	2,33
B12	1187,8	1189,1	681,7	2,34
B13	1182,5	1184,6	675,5	2,32
B21	1177,2	1177,1	678,4	2,36
B22	1187,7	1188,2	685,1	2,36
B23	1193,0	1195,1	686,6	2,35
B31	1177,3	1178,0	679,9	2,36
B32	1185,1	1185,6	686,5	2,37
B33	1179,5	1180,1	681,9	2,37
B41	1186,6	1186,9	688,1	2,38
B42	1186,3	1186,4	684,4	2,36
B43	1181,8	1181,8	682,0	2,36

MEZCLA MDC-2	% asfalto	Gb prom
	4,5	2,35
	5	2,38
	5,5	2,39
	6	2,37

MEZCLA MDC-3	% asfalto	Gb prom
	4,8	2,34
	5,3	2,36
	5,8	2,37
	6,3	2,36



B.4 PESO ESPECÍFICO APARENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

PROBETA	C12	C13	C22	C23	C32	C33	C42
W muestra al aire (g)	1180,4	1182,4	1185,3	1195,4	1185,5	1171,6	1201,2
W muestra + parafina (g)	1190,3	1192,9	1197,3	1204,2	1194,6	1184,2	1210,6
Densidad Parafina (g/cm ³)	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
W parafina (g)	9,9	10,5	12	8,8	9,1	12,6	9,4
V parafina (cm ³)	11,12	11,8	13,48	9,89	10,22	14,16	10,56
W muestra + parafina en agua (g)	655	659,7	665,8	674,8	668,9	663,1	682,9
V muestra + parafina (cm ³)	535,3	533,2	531,5	529,4	525,7	521,1	527,7
V muestra (cm ³)	524,18	521,4	518,02	519,51	515,48	506,94	517,14
Densidad (g/cm ³)	2,25	2,27	2,29	2,3	2,3	2,31	2,32

PROBETA	C43	D11	D12	D21	D22	D31	D32
W muestra al aire (g)	1181,9	1180,5	1197,3	1168,8	1182,8	1177,5	1183,8
W muestra + parafina (g)	1192,1	1191,4	1208,4	1168,8	1194,4	1186,3	1192,2
Densidad Parafina (g/cm ³)	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
W parafina (g)	10,2	10,9	11,1	13,3	11,6	8,8	8,4
V parafina (cm ³)	11,46	12,25	12,47	14,94	13,03	9,89	9,44
W muestra + parafina en agua (g)	663,5	671,1	683,9	670,4	677,6	674,5	683,7
V muestra + parafina (cm ³)	528,6	520,3	524,5	498,4	516,8	511,8	508,5
V muestra (cm ³)	517,14	508,05	512,03	498,4	503,77	501,91	499,06
Densidad (g/cm ³)	2,29	2,32	2,34	2,35	2,35	2,35	2,37

PROBETA	D41	D42	E11	E12	E13	E21	E22
W muestra al aire (g)	1171,6	1177,3	1138,4	1139,2	1127,6	1095,9	1141,1
W muestra + parafina (g)	1193,1	1200,7	1173,3	1200,5	1186,9	1139,3	1188,7
Densidad Parafina (g/cm ³)	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
W parafina (g)	21,5	23,4	34,9	61,3	59,3	43,4	47,6
V parafina (cm ³)	24,16	26,29	39,21	68,88	66,63	48,76	53,48
W muestra + parafina en agua (g)	670,4	674	631,2	633	633	605	643,5
V muestra + parafina (cm ³)	522,7	526,7	542,1	567,5	553,9	534,3	545,2
V muestra (cm ³)	498,54	500,41	502,89	498,62	487,27	485,54	491,72
Densidad (g/cm ³)	2,35	2,35	2,26	2,28	2,31	2,26	2,32

PROBETA	E23	E31	E32	E33	E41	E42	E43
W muestra al aire (g)	1138,1	1128,3	1123	1127,4	1112,4	1107,5	989,9
W muestra + parafina (g)	1189,1	1213,4	1172,1	1187,4	1178,3	1196,6	1078,8
Densidad Parafina (g/cm ³)	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
W parafina (g)	51	85,1	49,1	60	65,9	89,1	88,9
V parafina (cm ³)	57,3	95,62	55,17	67,42	74,04	100,11	99,89
W muestra + parafina en agua (g)	638,9	622,5	630	636	618	612,5	550,4
V muestra + parafina (cm ³)	550,2	590,9	542,1	551,4	560,3	584,1	528,4
V muestra (cm ³)	492,9	495,28	486,93	483,98	486,26	483,99	428,51
Densidad (g/cm ³)	2,31	2,28	2,31	2,33	2,29	2,29	2,31



B.5. PESO ESPECÍFICO TOTAL DEL AGREGADO DE LA MEZCLA

$$G_{agr} = \frac{100}{\left[\frac{\% \text{ peso Ag. grueso}}{\text{Peso esp Ag. gru}} \right] + \left[\frac{\% \text{ peso Ag. fino}}{\text{Peso esp Ag. fino}} \right] + \left[\frac{\% \text{ peso Filler}}{\text{Peso esp Filler}} \right]}$$

Mezcla MDC-2	
Tamiz N°	% Pasa
4	57
N° 200	6

MDC-2	% en peso por material Total de la mezcla	Peso especifico [g/cm3]
Agr. Grueso	43	2,694
Agr. Fino	51	2,655
Filler	6	2,144
G agr		2,636

Mezcla MDC-3	
Tamiz N°	% Pasa
4	76
N° 200	7,5

MDC-3	% en peso por material Total de la mezcla	Peso especifico [g/cm3]
Agr. Grueso	24	2,698
Agr. Fino	68,5	2,655
Filler	7,5	2,144
G agr		2,619

Mezcla M1	
Tamiz N°	% Pasa
4	21,5
N° 200	6,5

M1	% en peso por material Total de la mezcla	Peso especifico [g/cm3]
Agr. Grueso	78,5	2,698
Agr. Fino	15	2,655
Filler	6,5	2,144
G agr		2,647

Mezcla SMA	
Tamiz N°	% Pasa
4	34
N° 200	10,9

SMA	% en peso por material Total de la mezcla	Peso especifico [g/cm3]
Agr. Grueso	66	2,698
Agr. Fino	23,1	2,655
Filler	10,9	2,144
G agr		2,615

ANEXO C. DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR MARSHALL



C.1 DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR EL MÉTODO MARSHALL

Procedencia de los agregados: Chicamocha

Peso específico del asfalto: 1,006

Hoja: 1 de 4

Probeta Numero	Espesor (pulg)	Peso Especifico		% Asfalto Absorbido	Volumen % total de la probeta			% vacios agregados	%asfalto efectivo	% vacios llenos asfalto	Peso Unitario lb/pulg2	
		Bulk	Max teorico		Max medido	Agregados	Vacios aire					Asfalto
A12	2,45	2,334										
A13	2,51	2,362										
Prom		2,348	2,457	2,509	0,833	85,078	6,400	8,523	14,922	3,656	57,114	146,520
A22	2,41	2,385										
A23	2,41	2,379										
Prom		2,382	2,438	2,482	0,764	85,858	4,032	10,110	14,142	4,274	71,492	148,642
A31	2,43	2,398										
A32	2,50	2,388										
Prom		2,393	2,420	2,470	0,882	85,803	3,107	11,090	14,197	4,667	78,113	149,333
A41	2,38	2,376										
A42	2,44	2,369										
Prom		2,372	2,402	2,452	0,907	84,602	3,273	12,125	15,398	5,147	78,744	148,026
B11	2,44	2,333										
B12	2,43	2,341										
Prom		2,337	2,431	2,455	0,409	84,970	4,789	10,241	15,030	4,410	68,135	145,840



C.1 DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR EL MÉTODO MARSHALL

Procedencia de los agregados: Chicamocha

Peso específico del asfalto: 1,006

Hoja: 2 de 4

Probeta Numero	Espesor (pulg)	Peso Especifico		% Asfalto Absorbido	Volumen % total de la probeta			% vacios agregados	%asfalto efectivo	% vacios llenos asfalto	Peso Unitario lb/pulg2	
		Max teorico	Max medido		Agregados	Vacios aire	Asfalto					
B21	2,42	2,361										
B22	2,48	2,361										
B23	2,55	2,346										
Prom		2,356	2,414	2,441	0,497	85,198	3,500	11,302	14,802	4,829	76,353	147,002
B32	2,39	2,374										
B33	2,47	2,368										
Prom		2,371	2,396	2,429	0,612	85,294	2,404	12,302	14,706	5,223	83,654	147,950
B42	2,41	2,363										
B43	2,50	2,365										
Prom		2,364	2,378	2,411	0,609	84,586	1,959	13,455	15,414	5,730	87,288	147,504
C12	2,60	2,252										
C13	2,68	2,268										
Prom		2,260	2,440	2,470	0,516	80,920	8,505	10,575	19,080	5,147	55,422	141,013
C22	2,70	2,288										
C23	2,46	2,301										
Prom		2,295	2,422	2,449	0,488	81,731	6,324	11,945	18,269	4,410	65,384	143,182



C.1 DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR EL MÉTODO MARSHALL

Procedencia de los agregados: Chicamocha

Peso específico del asfalto: 1,006

Hoja: 3 de 4

Probeta Numero	Espesor (pulg)	Peso Especifico		% Asfalto Absorbido	Volumen % total de la probeta			% vacios agregados	%asfalto efectivo	% vacios lentos asfalto	Peso Unitario lb/pulg2	
		Bulk	Max teorico		Max medido	Agregados	Vacios aire					Asfalto
C32	2,56	2,300										
C33	2,64	2,311										
Prom		2,305	2,404	2,438	0,606	81,683	5,418	12,898	18,317	5,632	70,418	143,861
C42	2,58	2,323										
C43	2,48	2,285										
Prom		2,304	2,387	2,424	0,685	81,201	4,926	13,873	18,799	6,061	73,796	143,777
D11	2,51	2,324										
D12	2,57	2,338										
Prom		2,305	2,393	2,419	0,480	83,971	3,644	12,385	16,029	5,348	77,267	145,452
D21	2,44	2,353										
D22	2,52	2,348										
Prom		2,304	2,376	2,407	0,582	84,222	2,341	13,437	15,778	5,754	85,161	146,664
D31	2,43	2,346										
D32	2,48	2,372										
Prom		2,359	2,358	2,393	0,659	84,081	1,422	14,498	15,919	6,186	91,070	147,204
D41	2,46	2,350										
D42	2,45	2,353										
Prom		2,351	2,342	2,376	0,669	83,358	1,037	15,605	16,642	6,680	93,769	146,725



C.1 DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR EL MÉTODO MARSHALL

Procedencia de los agregados: Chicamocha

Peso específico del asfalto: 1,006

Hoja: 4 de 4

Probeta Numero	Espesor (pulg)	Peso Especifico		% Asfalto Absorbido	Volumen % total de la probeta			% vacios agregados	%asfalto efectivo	% vacios llenos asfalto	Peso Unitario lb/pulg2	
		Bulk	Max teorico		Max medido	Agregados	Vacios aire					Asfalto
E11	2,59	2,26										
E12	2,60	2,28										
E13	2,52	2,31										
Prom		2,283	2,393	2,426	0,607	82,252	5,881	11,867	17,748	5,193	66,865	142,485
E21	2,47	2,26										
E22	2,45	2,32										
E23	2,60	2,31										
Prom		2,297	2,376	2,405	0,552	82,294	4,505	13,202	17,706	5,748	74,560	143,317
E31	2,47	2,28										
E32	2,61	2,31										
E33	2,56	2,33										
Prom		2,307	2,358	2,404	0,866	82,211	3,910	13,879	17,789	5,934	77,240	143,941
E41	2,48	2,29										
E42	2,41	2,29										
E43	2,44	2,31										
Prom		2,297	2,342	2,401	1,146	81,415	4,345	14,239	18,585	6,154	76,618	143,317

ANEXO D. ENSAYOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD



D.1. ENSAYO DE MÓDULO ELÁSTICO

Hoja 1 de 2

Constante del anillo= 10.125

MEZCLA TIPO MDC-2				
Esfuerzo lb/pulg ²	Deformación [pulg]			
	4,50%	5,00%	5,50%	6,00%
8,057	0,0033	0,0017	0,002	0,0028
16,114	0,0049	0,0037	0,0041	0,0056
24,172	0,0066	0,0054	0,0061	0,0076
32,229	0,0082	0,0071	0,0082	0,0092
40,286	0,0095	0,0087	0,0098	0,0104
48,343	0,0111	0,0095	0,0111	0,0116
56,4	0,0119	0,0108	0,0119	0,0131
64,458	0,0132	0,012	0,0135	0,0139
72,515	0,014	0,0133	0,0143	0,0151
80,572	0,0152	0,0141	0,0156	0,0163
88,629	0,016	0,0149	0,0168	0,0175
96,686	0,0169	0,0158	0,0176	0,0187
104,744	0,0177	0,017	0,0189	0,0195
112,801	0,0185	0,0178	0,0201	0,0203
120,858	0,0193	0,0187	0,0209	0,0211
128,915	0,0202	0,0195	0,0213	0,0219

MEZCLA TIPO MDC-3				
Esfuerzo lb/pulg ²	Deformación [pulg]			
	4,80%	5,30%	5,80%	6,30%
8,0572	0,0008	0,0017	0,0017	0,0033
16,1144	0,0021	0,0033	0,0033	0,0053
24,1716	0,0033	0,0045	0,0050	0,0074
32,2288	0,0041	0,0054	0,0063	0,0095
40,286	0,0050	0,0062	0,0075	0,0115
48,3432	0,0066	0,0070	0,0088	0,0128
56,4004	0,0075	0,0079	0,0096	0,0144
64,4576	0,0083	0,0087	0,0109	0,0156
72,5148	0,0095	0,0099	0,0117	0,0169
80,572	0,0104	0,0112	0,0126	0,0185
88,6292	0,0112	0,0120	0,0134	0,0193
96,6864	0,0120	0,0128	0,0142	0,0206
104,7436	0,0129	0,0140	0,0151	0,0214
112,8008	0,0137	0,0149	0,0159	0,0222
120,858	0,0145	0,0157	0,0167	0,0235
128,9152	0,0149	0,0169	0,0176	0,0243

MEZCLA TIPO M1				
Esfuerzo lb/pulg ²	Deformación [pulg]			
	5,20%	5,70%	6,20%	6,70%
8,057	0,0034	0,0028	0,0028	0,0034
16,114	0,0060	0,0053	0,0053	0,0058
24,172	0,0076	0,0075	0,0072	0,0081
32,229	0,0090	0,0091	0,0091	0,0101
40,286	0,0103	0,0106	0,0104	0,0119
48,343	0,0112	0,0118	0,0117	0,0137
56,4	0,0119	0,0130	0,0129	0,0153
64,458	0,0129	0,0142	0,0138	0,0169
72,515	0,0138	0,0154	0,0152	0,0177
80,572	0,0147	0,0169	0,0161	0,0192
88,629	0,0155	0,0179	0,0170	0,0204
96,686	0,0166	0,0191	0,0180	0,0218
104,744	0,0174	0,0199	0,0191	0,0230
112,801	0,0179	0,0207	0,0199	0,0242
120,858	0,0187	0,0215	0,0210	0,0250
128,915	0,0194	0,0224	0,0220	0,0262

MEZCLA TIPO SMA-CELULOSA				
Esfuerzo lb/pulg ²	Deformación [pulg]			
	5,80%	6,30%	6,80%	7,30%
8,0572	0,0017	0,0012	0,0017	0,0021
16,1144	0,0029	0,0033	0,0029	0,0045
24,1716	0,0041	0,0041	0,0050	0,0058
32,2288	0,0054	0,0054	0,0067	0,0078
40,286	0,0066	0,0070	0,0079	0,0091
48,3432	0,0075	0,0079	0,0092	0,0103
56,4004	0,0083	0,0091	0,0100	0,0115
64,4576	0,0091	0,0099	0,0113	0,0128
72,5148	0,0100	0,0107	0,0121	0,0136
80,572	0,0108	0,0120	0,0134	0,0152
88,6292	0,0116	0,0128	0,0142	0,0160
96,6864	0,0124	0,0136	0,0151	0,0173
104,7436	0,0133	0,0145	0,0159	0,0181
112,8008	0,0141	0,0153	0,0167	0,0189
120,858	0,0149	0,0161	0,0176	0,0198
128,9152	0,0158	0,0169	0,0184	0,0210



D.2. ENSAYO DE MÓDULO ELÁSTICO

Hoja 2 de 2

Constante del anillo= 10.125

MEZCLA TIPO SMA-CENIZA				
Esfuerzo lb/pulg ²	Deformación [pulg]			
	5,80%	6,30%	6,80%	7,30%
8,057	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
16,114	0,0019	0,0018	0,0019	0,0025
24,172	0,0030	0,0027	0,0029	0,0041
32,229	0,0039	0,0035	0,0038	0,0054
40,286	0,0050	0,0048	0,0050	0,0070
48,343	0,0065	0,0063	0,0065	0,0093
56,400	0,0076	0,0078	0,0081	0,0111
64,458	0,0082	0,0093	0,0095	0,0124
72,515	0,0086	0,0106	0,0107	0,0132
80,572	0,0090	0,0118	0,0117	0,0144
88,629	0,0098	0,0132	0,0125	0,0153
96,686	0,0105	0,0143	0,0140	0,0163
104,744	0,0113	0,0154	0,0155	0,0175
112,801	0,0121	0,0166	0,0166	0,0186
120,858	0,0129	0,0173	0,0174	0,0194
128,915	0,0137	0,0181	0,0186	0,0206

ANEXO E. ENSAYO CREEP



E.1. ENSAYO CREEP

Unidad de carga constante= 100.125 Lb
 Constante del anillo= 10.125

Hoja 1 de 3

Tiempo	MDC-2			
	DEFORMACION [mm/mm]			
	4,50%	5,00%	5,50%	6,00%
0 seg	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10 seg	0,0115	0,0203	0,0306	0,0331
20 seg	0,0127	0,0229	0,0331	0,0357
30 seg	0,0133	0,0250	0,0359	0,0408
40 seg	0,0153	0,0258	0,0362	0,0447
50 seg	0,0173	0,0258	0,0370	0,0485
60 seg	0,0179	0,0265	0,0383	0,0487
75 seg	0,0181	0,0281	0,0385	0,0508
90 seg	0,0191	0,0281	0,0385	0,0508
105 seg	0,0199	0,0281	0,0385	0,0510
2 min	0,0202	0,0281	0,0385	0,0513
4 min	0,0222	0,0301	0,0395	0,0518
6 min	0,0229	0,0308	0,0400	0,0528
8 min	0,0229	0,0311	0,0408	0,0531
10 min	0,0229	0,0311	0,0416	0,0535
12 min	0,0229	0,0314	0,0416	0,0543
14 min	0,0229	0,0314	0,0418	0,0543
16 min	0,0229	0,0314	0,0418	0,0543
18 min	0,0232	0,0314	0,0418	0,0543
20 min	0,0232	0,0314	0,0418	0,0543
22 min	0,0232	0,0314	0,0418	0,0543
24 min	0,0232	0,0314	0,0418	0,0543
26 min	0,0232	0,0314	0,0418	0,0546
28 min	0,0232	0,0314	0,0418	0,0546
30 min	0,0232	0,0316	0,0418	0,0546
32 min	0,0232	0,0316	0,0418	0,0546
34 min	0,0232	0,0316	0,0418	0,0546
36 min	0,0235	0,0316	0,0418	0,0546
38 min	0,0235	0,0316	0,0424	0,0546
40 min	0,0235	0,0316	0,0424	0,0546
42 min	0,0235	0,0316	0,0424	0,0549
44 min	0,0235	0,0316	0,0424	0,0549
46 min	0,0235	0,0316	0,0424	0,0549
48 min	0,0235	0,0316	0,0424	0,0549
50 min	0,0235	0,0316	0,0424	0,0549
52 min	0,0235	0,0316	0,0424	0,0549
54 min	0,0235	0,0316	0,0424	0,0549
56 min	0,0235	0,0316	0,0424	0,0549
58 min	0,0235	0,0316	0,0424	0,0549
60 min	0,0235	0,0316	0,0424	0,0549

Tiempo	MDC-3			
	DEFORMACION [mm/mm]			
	4,80%	5,30%	5,80%	6,30%
0 seg	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10 seg	0,0155	0,0255	0,0311	0,0518
20 seg	0,0206	0,0292	0,0336	0,0570
30 seg	0,0258	0,0306	0,0383	0,0622
40 seg	0,0263	0,0310	0,0388	0,0647
50 seg	0,0267	0,0326	0,0401	0,0653
60 seg	0,0273	0,0331	0,0410	0,0661
75 seg	0,0284	0,0336	0,0414	0,0671
90 seg	0,0286	0,0341	0,0414	0,0674
105 seg	0,0289	0,0351	0,0417	0,0679
2 min	0,0291	0,0377	0,0419	0,0689
4 min	0,0335	0,0390	0,0435	0,0694
6 min	0,0341	0,0407	0,0440	0,0700
8 min	0,0348	0,0410	0,0442	0,0710
10 min	0,0359	0,0417	0,0450	0,0718
12 min	0,0361	0,0425	0,0460	0,0723
14 min	0,0365	0,0430	0,0460	0,0725
16 min	0,0369	0,0431	0,0463	0,0725
18 min	0,0371	0,0431	0,0468	0,0728
20 min	0,0384	0,0431	0,0468	0,0728
22 min	0,0387	0,0431	0,0473	0,0728
24 min	0,0388	0,0431	0,0473	0,0731
26 min	0,0408	0,0431	0,0476	0,0731
28 min	0,0408	0,0431	0,0476	0,0731
30 min	0,0408	0,0438	0,0476	0,0731
32 min	0,0408	0,0438	0,0476	0,0731
34 min	0,0408	0,0438	0,0476	0,0731
36 min	0,0408	0,0438	0,0476	0,0731
38 min	0,0408	0,0438	0,0476	0,0731
40 min	0,0408	0,0438	0,0476	0,0733
42 min	0,0408	0,0438	0,0476	0,0733
44 min	0,0408	0,0438	0,0476	0,0733
46 min	0,0408	0,0438	0,0476	0,0733
48 min	0,0408	0,0438	0,0476	0,0733
50 min	0,0410	0,0440	0,0481	0,0733
52 min	0,0410	0,0440	0,0481	0,0733
54 min	0,0410	0,0440	0,0481	0,0733
56 min	0,0410	0,0440	0,0481	0,0733
58 min	0,0410	0,0440	0,0481	0,0733
60 min	0,0410	0,0440	0,0481	0,0733



E.2. ENSAYO CREEP

Unidad de carga constante= 100.125 Lb
 Constante del anillo= 10.125

Hoja 2 de 3

Tiempo	M1			
	DEFORMACION [mm/mm]			
	5,20%	5,70%	6,20%	6,70%
0 seg	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10 seg	0,0158	0,0186	0,0251	0,0212
20 seg	0,0165	0,0189	0,0257	0,0231
30 seg	0,0169	0,0191	0,0269	0,0280
40 seg	0,0181	0,0193	0,0269	0,0309
50 seg	0,0183	0,0196	0,0269	0,0332
60 seg	0,0183	0,0200	0,0274	0,0356
75 seg	0,0183	0,0205	0,0276	0,0358
90 seg	0,0183	0,0205	0,0276	0,0389
105 seg	0,0183	0,0207	0,0278	0,0396
2 min	0,0190	0,0224	0,0294	0,0419
4 min	0,0192	0,0238	0,0297	0,0422
6 min	0,0192	0,0252	0,0303	0,0424
8 min	0,0192	0,0254	0,0303	0,0431
10 min	0,0197	0,0257	0,0308	0,0436
12 min	0,0213	0,0257	0,0308	0,0436
14 min	0,0215	0,0259	0,0308	0,0443
16 min	0,0215	0,0259	0,0308	0,0443
18 min	0,0215	0,0259	0,0308	0,0443
20 min	0,0215	0,0261	0,0317	0,0443
22 min	0,0215	0,0261	0,0317	0,0443
24 min	0,0215	0,0261	0,0317	0,0443
26 min	0,0215	0,0261	0,0317	0,0443
28 min	0,0215	0,0261	0,0317	0,0443
30 min	0,0215	0,0261	0,0317	0,0445
32 min	0,0217	0,0261	0,0322	0,0445
34 min	0,0217	0,0261	0,0322	0,0445
36 min	0,0217	0,0261	0,0322	0,0445
38 min	0,0217	0,0264	0,0322	0,0445
40 min	0,0217	0,0264	0,0322	0,0445
42 min	0,0217	0,0264	0,0322	0,0445
44 min	0,0220	0,0264	0,0324	0,0445
46 min	0,0220	0,0264	0,0324	0,0445
48 min	0,0220	0,0264	0,0324	0,0448
50 min	0,0220	0,0266	0,0324	0,0448
52 min	0,0220	0,0266	0,0324	0,0448
54 min	0,0220	0,0266	0,0324	0,0448
56 min	0,0220	0,0266	0,0327	0,0448
58 min	0,0220	0,0266	0,0327	0,0448
60 min	0,0220	0,0266	0,0327	0,0448

Tiempo	SMA - CELULOSA			
	DEFORMACION [mm/mm]			
	4,80%	5,30%	5,80%	6,30%
0 seg	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10 seg	0,0104	0,0106	0,0160	0,0245
20 seg	0,0104	0,0126	0,0179	0,0261
30 seg	0,0104	0,0139	0,0190	0,0273
40 seg	0,0106	0,0147	0,0200	0,0278
50 seg	0,0106	0,0149	0,0214	0,0281
60 seg	0,0106	0,0155	0,0216	0,0284
75 seg	0,0106	0,0157	0,0221	0,0286
90 seg	0,0106	0,0157	0,0221	0,0289
105 seg	0,0106	0,0180	0,0227	0,0289
2 min	0,0111	0,0180	0,0248	0,0289
4 min	0,0111	0,0185	0,0264	0,0291
6 min	0,0111	0,0185	0,0269	0,0296
8 min	0,0111	0,0185	0,0269	0,0299
10 min	0,0111	0,0185	0,0269	0,0307
12 min	0,0114	0,0188	0,0269	0,0307
14 min	0,0114	0,0188	0,0269	0,0309
16 min	0,0114	0,0188	0,0269	0,0309
18 min	0,0114	0,0188	0,0275	0,0309
20 min	0,0114	0,0188	0,0275	0,0314
22 min	0,0114	0,0188	0,0275	0,0314
24 min	0,0114	0,0190	0,0275	0,0314
26 min	0,0119	0,0190	0,0275	0,0314
28 min	0,0119	0,0190	0,0280	0,0314
30 min	0,0119	0,0190	0,0280	0,0314
32 min	0,0119	0,0190	0,0280	0,0320
34 min	0,0119	0,0190	0,0280	0,0320
36 min	0,0119	0,0190	0,0280	0,0320
38 min	0,0121	0,0192	0,0283	0,0320
40 min	0,0121	0,0192	0,0283	0,0322
42 min	0,0121	0,0192	0,0283	0,0322
44 min	0,0121	0,0192	0,0283	0,0322
46 min	0,0121	0,0192	0,0283	0,0322
48 min	0,0121	0,0192	0,0286	0,0322
50 min	0,0126	0,0192	0,0286	0,0325
52 min	0,0126	0,0192	0,0286	0,0325
54 min	0,0126	0,0195	0,0286	0,0325
56 min	0,0126	0,0195	0,0286	0,0325
58 min	0,0126	0,0195	0,0286	0,0325
60 min	0,0126	0,0195	0,0286	0,0325



E.3. ENSAYO CREEP

Unidad de carga constante= 100.125 Lb
Constante del anillo= 10.125

Hoja 3 de 3

Tiempo	SMA - CENIZA			
	DEFORMACION [mm/mm]			
	5,80%	6,30%	6,80%	7,30%
0 seg	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10 seg	0,0129	0,0175	0,0270	0,0290
20 seg	0,0139	0,0187	0,0282	0,0302
30 seg	0,0147	0,0191	0,0286	0,0314
40 seg	0,0151	0,0195	0,0289	0,0318
50 seg	0,0153	0,0197	0,0291	0,0322
60 seg	0,0157	0,0198	0,0293	0,0326
75 seg	0,0159	0,0198	0,0295	0,0330
90 seg	0,0159	0,0201	0,0297	0,0334
105 seg	0,0159	0,0201	0,0298	0,0335
2 min	0,0160	0,0202	0,0299	0,0336
4 min	0,0161	0,0207	0,0302	0,0340
6 min	0,0161	0,0209	0,0304	0,0340
8 min	0,0163	0,0209	0,0304	0,0340
10 min	0,0163	0,0211	0,0304	0,0342
12 min	0,0163	0,0213	0,0304	0,0342
14 min	0,0163	0,0213	0,0304	0,0342
16 min	0,0163	0,0214	0,0304	0,0342
18 min	0,0163	0,0215	0,0305	0,0342
20 min	0,0163	0,0215	0,0306	0,0342
22 min	0,0164	0,0215	0,0306	0,0342
24 min	0,0164	0,0215	0,0306	0,0342
26 min	0,0166	0,0215	0,0306	0,0342
28 min	0,0167	0,0216	0,0306	0,0342
30 min	0,0167	0,0216	0,0306	0,0342
32 min	0,0167	0,0216	0,0306	0,0342
34 min	0,0169	0,0216	0,0306	0,0342
36 min	0,0169	0,0216	0,0306	0,0342
38 min	0,0170	0,0216	0,0306	0,0342
40 min	0,0170	0,0216	0,0306	0,0342
42 min	0,0170	0,0216	0,0306	0,0342
44 min	0,0170	0,0216	0,0306	0,0342
46 min	0,0171	0,0216	0,0306	0,0342
48 min	0,0171	0,0216	0,0306	0,0342
50 min	0,0171	0,0216	0,0306	0,0342
52 min	0,0171	0,0217	0,0306	0,0342
54 min	0,0171	0,0217	0,0306	0,0342
56 min	0,0171	0,0217	0,0306	0,0342
58 min	0,0171	0,0217	0,0306	0,0342
60 min	0,0171	0,0217	0,0306	0,0342

ANEXO F. ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO



F.1. ESTABILIDAD - FLUJO Hoja 1 de 3

MDC-2						
Probeta	Estabilidad medida	h prom	F.C.	Estabilidad (Newtons)	Flujo (0,001")	Flujo (mm)
A11	262	6,37	1,00	11800,02	58	1,473
A12	258	6,22	1,04	12084,66	62	1,575
A13	266	6,38	1,00	11980,17	54	1,372
Promedio				11954,95		1,473
A21	265	6,13	1,09	13009,31	88	2,235
A22	269	6,12	1,09	13205,65	94	2,388
A23	259	6,34	1,04	12131,50	96	2,438
Promedio				12782,15		2,354
A31	275	6,16	1,09	13500,21	126	3,200
A32	282	6,35	1,04	13208,81	132	3,353
A33	268	6,36	1,00	12070,24	124	3,150
Promedio				12926,42		3,234
A41	238	6,04	1,14	12219,79	152	3,861
A42	232	6,19	1,09	11389,27	153	3,886
A43	229	6,31	1,04	10726,30	148	3,759
Promedio				11445,12		3,835

MDC-3						
Probeta	Estabilidad medida	h prom	F.C.	Estabilidad (Newtons)	Flujo (0,001")	Flujo (mm)
B11	262	6,21	1,04	12272,02	68	1,727
B12	267	6,18	1,09	13107,48	78	1,981
B13	279	6,29	1,04	13068,29	72	1,829
Promedio				12815,93		1,846
B21	294	6,14	1,09	14432,96	106	2,692
B22	296	6,31	1,04	13864,57	114	2,896
B23	288	6,48	1,00	12971,01	110	2,794
Promedio				13756,18		2,794
B31	292	6,29	1,04	13677,21	136	3,454
B32	294	6,06	1,09	14432,96	144	3,658
B33	286	6,28	1,04	13396,17	139	3,531
Promedio				13835,45		3,548
B41	245	6,14	1,09	12027,45	158	4,013
B42	256	6,12	1,09	12567,47	162	4,115
B43	263	6,34	1,04	12318,86	151	3,835
Promedio				12304,59		3,988



F.2. ESTABILIDAD - FLUJO Hoja 2 de 3

M1						
Probeta	Estabilidad medida	h prom	F.C.	Estabilidad (Newtons)	Flujo (0,001")	Flujo (mm)
C11	287	6,63	0,93	12021,14	78	1,981
C12	294	6,6	1,00	13241,26	86	2,184
C13	285	6,8	0,93	11937,39	79	2,007
Promedio				12399,93		2,057
C21	302	6,55	0,96	13057,48	99	2,515
C22	313	6,87	0,89	12546,29	115	2,921
C23	310	6,25	1,04	14520,32	112	2,845
Promedio				13374,70		2,760
C31	316	6,74	0,93	13235,86	136	3,454
C32	325	6,51	1,00	14637,45	145	3,683
C33	332	6,7	0,93	13906,03	125	3,175
Promedio				13926,44		3,437
C41	268	6,6	0,96	11587,44	156	3,962
C42	276	6,55	0,96	11933,33	167	4,242
C43	275	6,31	1,04	12880,93	172	4,369
Promedio				12133,90		4,191

SMA - CELULOSA						
Probeta	Estabilidad medida	h prom	F.C.	Estabilidad (Newtons)	Flujo (0,001")	Flujo (mm)
D11	306	6,38	1,00	13781,70	75	1,905
D12	292	6,54	0,96	12625,12	71	1,803
D13	285	6,10	1,09	14776,59	72	1,829
Promedio				13727,80		1,846
D21	320	6,19	1,09	15709,33	102	2,591
D22	320	6,40	1,00	14412,23	96	2,438
D23	320	6,43	1,00	14412,23	94	2,388
Promedio				14844,60		2,472
D31	296	6,16	1,09	14531,13	122	3,099
D32	306	6,31	1,04	14332,97	118	2,997
D33	299	5,57	1,25	16833,75	131	3,327
Promedio				15232,40		3,141
D41	282	6,26	1,04	13208,81	155	3,937
D42	289	6,23	1,04	13536,69	135	3,429
D43	273	6,19	1,09	13402,04	136	3,454
Promedio				13382,51		3,607



F.3. ESTABILIDAD - FLUJO Hoja 3 de 3

SMA - CENIZA						
Probeta	Estabilidad medida	h prom	F.C.	Estabilidad (Newtons)	Flujo (0,001")	Flujo (mm)
E11	3,430	6,57	0,96	14830,19	77	1,956
E12	3,250	6,60	0,93	13612,80	79	2,007
E13	3,275	6,40	1,00	14750,03	73	1,854
Promedio				14397,67		1,939
E21	3,550	6,27	1,04	16628,11	107	2,718
E22	3,440	6,23	1,04	16112,88	99	2,515
E23	3,670	6,60	0,93	15371,98	103	2,616
Promedio				16037,66		2,616
E31	3,890	6,27	1,00	17519,89	132	3,353
E32	3,780	6,63	0,93	15832,73	127	3,226
E33	3,590	6,50	0,96	15521,97	137	3,480
Promedio				16291,53		3,353
E41	3,080	6,30	1,00	13871,77	146	3,708
E42	3,040	6,13	1,04	14239,29	157	3,988
E43	3,110	6,20	1,04	14567,16	149	3,785
Promedio				14226,07		3,827

ANEXO G. ESCURRIMIENTO



G. ESCURRIMIENTO SMA CENIZA

% Asfalto	Capa	Peso capa con asfalto [g]	Peso capa sin asfalto [g]	Diferencia [g]	Diferencia % en peso	Diferencia ajustada	Diferencias entre capas	
5,80%	Superior	300,0	279,0	21,0	7,00	5,79	Dif sup-med	0,11
	Intermedia	300,0	278,6	21,4	7,13	5,90	Dif med-inf	0,50
	Inferior	300,0	276,8	23,2	7,73	6,39	Dif sup-inf	0,61
6,30%	Superior	300,0	277,1	22,9	7,63	6,31	Dif sup-med	0,14
	Intermedia	300,0	276,6	23,4	7,80	6,45	Dif med-inf	0,63
	Inferior	300,0	274,3	25,7	8,57	7,08	Dif sup-inf	0,77
6,80%	Superior	300,0	276,4	23,6	7,87	6,50	Dif sup-med	0,22
	Intermedia	300,0	275,6	24,4	8,13	6,72	Dif med-inf	0,74
	Inferior	300,0	272,9	27,1	9,03	7,47	Dif sup-inf	0,96
7,30%	Superior	300,0	275,3	24,7	8,23	6,80	Dif sup-med	0,44
	Intermedia	300,0	273,7	26,3	8,77	7,25	Dif med-inf	0,96
	Inferior	300,0	270,2	29,8	9,93	8,21	Dif sup-inf	1,40

NOTA: En promedio las muestras tenían un exceso de 21% (aproximadamente) más de volumen del que en teoría deberían tener, el hecho se debe a que con la gasolina se filtraron algunos finos, así que se ajustaron los valores tomando el valor intermedio como el teórico.



G.1. ENSAYO DE ESCURRIMIENTO DE LIGANTE. MÉTODO SCHELLENBERG

La preparación de las mezclas en laboratorio se realiza de la siguiente manera:

1. Pesar materiales para formar al menos un pastón de 5 kg de mezcla SMA
2. Secar los materiales pétreos y el filler en estufa a 110 C hasta peso constante
3. Pesar todos los materiales según la cantidad en que intervienen
4. Mezclar las fibras manualmente con la fracción arena –retenido tamiz 200 y pasa tamiz 4
5. Colocar los ingredientes en un recipiente en el siguiente orden: agregados gruesos en el fondo, fracciones arena y fibras, y el filler en la parte superior
6. Colocar en estufa con ventilación forzada a la temperatura de mezclado establecida (en general a 150 C cuando se usan ligantes convencionales de penetración 50-60 y 170 C cuando se emplean ligantes modificados, pero esto varía según las recomendaciones que deben ser dadas por el fabricante). Se dejan en estufa al menos un par de horas a dicha temperatura
7. Al mismo tiempo se calienta en la misma estufa a dicha temperatura el ligante asfáltico
8. Retirar de la estufa y colocar en un mezclador mecánico automático y mezclar los ingredientes secos durante unos 10 segundos, para luego incorporar el ligante y continuar mezclando durante 3 minutos o hasta que la mezcla sea homogénea. Lo mismo vale para cuando se hace un mezclado manual
9. Verificar siempre que las fibras se han mezclado en forma homogénea en la mezcla
10. Para el ensayo de escurrimiento se preparan 1000 gramos de mezcla, para probetas Marshall se preparan 1200 gramos

Método del Dr. Schellenberg

Se colocan 1000 grs de mezcla SMA pesada a la décima de gramo a la temperatura de mezclado requerida en un vaso de precipitado de 850 ml (98 mm de diámetro x 136 mm de alto) durante 1 hora □ 1 minuto en un horno. Se debe tapar el vaso conteniendo la mezcla durante el ensayo. Al cabo de esa hora, se retira el vaso y se vuelca completamente sobre una bandeja para pesar la mezcla que no ha escurrido.

Se debe tener la precaución de no aplicar ningún elemento mecánico para remover la mezcla del vaso, ni agitación alguna durante el volcado. Al mismo tiempo se debe descartar todo aquel material que pese menos del 0,2% y haya quedado pegado en las paredes del vaso. Eso no se considera escurrimiento. **El escurrimiento de ligante admisible es del 0,3% en peso del material colocado en el vaso de vidrio a la temperatura de mezclado en planta asfáltica establecida.**

