

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE DEFORMACIÓN EN LAS  
MEZCLAS MDC-2, MDC-3, M1 Y STONE MATRIX ASPHALT**

**EMILIO ARENAS ROMERO  
ANDRÉS JULIÁN SERRANO CORZO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS**



**BUCARAMANGA**

**2006**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE DEFORMACIÓN EN LAS  
MEZCLAS MDC-2, MDC-3, M1 Y STONE MATRIX ASPHALT**

**EMILIO ARENAS ROMERO  
ANDRÉS JULIÁN SERRANO CORZO**

**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 FISICOMECHANICAS  
BUCARAMANGA**

**2006**

A ti, mi vieja linda, por años y años de compañía, que hoy solo viven en el recuerdo; a mamá y papá por su inmenso amor; a mi tía Libia por su apoyo incondicional; a toda mi familia, a mi hermano y mi novia Gina.

Emilio Arenas R.

A mis padres que me han dado todo en la vida, a mi hermano un amigo incondicional y a todas las personas que contribuyeron de una u otra forma para que este sueño se hiciera realidad.

Andrés Julián Serrano C.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los Autores expresan sus agradecimientos a:

Ing. Eduardo Castañeda Pinzón.

Ing. Hernando Acevedo Ferrín.

Ing. Jorge Serrano

Germán Hernández y Jairo Hernández.

Trituradora SAENZ.

Shell Colombia.

A nuestros amigos y familiares.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pag
INTRODUCCION .....	20
1. CAPAS DE RODAMIENTO.....	22
1.1 Stone matrix asphalt.....	22
1.1.1 Reseña histórica.....	22
1.1.2 Generalidades .....	23
1.1.3 Composición de la mezcla .....	24
1.1.3.1 Agregado grueso .....	24
1.1.3.2 Agregado grueso .....	24
1.1.3.3 Agregado fino.....	24
1.1.3.4 Filler mineral .....	24
1.1.3.5 Cemento asfáltico .....	24
1.1.3.6 Fibras espesantes.....	25
1.1.3.7 Granulometría .....	25
1.1.4 Principios del stone matrix asphalt .....	25
1.1.5 Aplicación.....	27
1.2 MEZCLAS MDC-2 Y MDC-3 .....	27
1.2.1 Generalidades.....	27
1.2.2 Composición de la mezcla .....	28
1.2.2.1 Agregado mineral.....	28
1.2.2.2 Cemento asfáltico .....	28
1.3 MEZCLA M1 .....	29
1.3.1 Generalidades.....	29
1.3.2 Composición de la mezcla .....	29

1.4	COMPARACIÓN DE GRADACIÓN Densa Y DISCONTINUA.....	30
1.5	RELACIÓN BENEFICIO – COSTO (SMA – MEZCLA CONVENCIONAL) .....	31
2.	METODOLOGIA DEL ESTUDIO .....	33
2.1	descripcion .....	33
2.2	MATERIALES EMPLEADOS .....	33
2.2.1	Agregado mineral .....	33
2.2.1.1	Procedencia .....	33
2.2.1.2	Tamaño Máximo Nominal .....	33
2.2.1.3	Ensayos Realizados al Agregado .....	33
2.2.2	Cemento Asfáltico Modificado .....	34
2.2.3	Fibra de Celulosa .....	35
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 .....	37
2.3.4	Metodología usada para la fabricación de probetas.....	37
2.3.4.1	Número de probetas fabricadas.....	37
2.3.4.2	Temperatura de mezcla y compactación .....	37
2.3.4.3	Nivel de compactación de probetas .....	38
2.4	PRUEBAS EFECTUADAS SOBRE LAS MUESTRAS .....	38
2.4.1	Medición de Densidad Bulk y Contenido de Vacíos .....	38

2.4.2	Determinación del Módulo Elástico a 7.5 ° C .....	38
2.4.3	Ensayo Creep sin Confinar a 60 ° C (Carga Estática).....	39
2.4.4	Estabilidad – Flujo .....	39
3.	.RESULTADOS DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL .....	40
3.1	AGREGADOS .....	40
3.1.1	Caracterización de los Agregados.....	40
3.1.2	Petrología Mineral de Agregados .....	40
3.2	ASFALTO .....	41
3.2.1	Características Reológicas del Asfalto .....	41
3.3	CELULOSA .....	41
3.4	CONFORMACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	41
3.4.1	Porcentaje de Asfalto Utilizado .....	42
3.5	CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS .....	42
3.5.1	Nomenclatura .....	42
3.5.2	Geometría .....	43
3.6	ANÁLISIS DE DENSIDAD Y VACÍOS .....	43
3.6.1	Densidad Bula .....	43
3.6.1.1	Curva de Peso Específico Vs. % Asfalto.....	43
3.6.2	Vacíos con Aire .....	43
3.6.2.1	Curva de Vacíos con Aire Vs. % Asfalto .....	44
3.6.3	Vacíos en el Agregado Mineral .....	44
3.6.3.1	Curva VAM Vs. Porcentaje de Asfalto .....	44
3.6.4	Vacíos Llenos de Asfalto.....	45

3.7	EVALUACION DE MODULO ELASTICO .....	46
3.7.1	Mezcla MDC-2.....	46
3.7.1.1	Curva Esfuerzo Vs. Deformación.....	46
3.7.1.2	Módulos de Elasticidad .....	47
3.7.2	Mezcla MDC-3.....	47
3.7.2.1	Curva Esfuerzo Vs. Deformación.....	47
3.7.2.2	Módulos de Elasticidad .....	48
3.7.3	Mezcla M1 .....	48
3.7.3.1	Curva Esfuerzo Vs. Deformación.....	48
3.7.3.2	Módulos de Elasticidad .....	49
3.7.4	Mezcla SMA .....	49
3.7.4.1	Curva Esfuerzo Vs. Deformación.....	49
3.7.4.2	Módulos de Elasticidad .....	50
3.8	DEFORMACIÓN A 60° C (ENSAYO CREEP SIN CONFINAR) .....	50
3.8.1	Gráficos Deformación Vs. Tiempo (MDC-2).....	50
3.8.2	Gráficos Deformación Vs. Tiempo (MDC-3).....	51
3.8.3	Gráficos Deformación Vs. Tiempo (M1) .....	51
3.8.4	Gráfico Deformación Vs. Tiempo (SMA) .....	52
3.9	ESTABILIDAD MARSHALL.....	52
3.10	FLUJO MARSHALL.....	53
3.11	TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS.....	53
4.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE MEZCLAS .....	55
4.1	DESCRIPCIÓN.....	55
4.2	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	55
4.2.1	Densidad Bulk .....	55

4.2.2	Vacíos Con Aire .....	55
4.2.3	Vacíos en el Agregado Mineral .....	56
4.2.4	Vacíos Llenos de Asfalto.....	56
4.2.5	Módulo Elástico a 7.5 ° C .....	56
4.2.6	Creep sin Confinar a 60 ° C .....	57
4.2.7	Estabilidad Marshall .....	57
4.2.8	Flujo Marshall .....	57
5.	RECOMENDACIONES .....	58
	BIBLIOGRAFIA .....	60

## LISTA DE TABLAS

Pag

Tabla 1-1 Rangos granulométricos del SMA .....	25
Tabla 2-1 Porcentaje optimo de asfalto .....	37
Tabla 2-2 Nivel de compactación de la mezclas .....	38
Tabla 3-1 Caracterización de los agregados pétreos.....	40
Tabla 3-2 Composición mineralógica de agregados .....	40
Tabla 3-3 Propiedades reologicas del asfalto .....	41
Tabla 3-4 Propiedades de la celulosa utilizada.....	41
Tabla 3-5 Gradaciones empleadas MDC-2, MDC-3, M1 y SMA .....	42
Tabla 3-6 Porcentajes de asfalto empleados .....	42
Tabla 3-7 Módulos elásticos de la mezcla MDC-2 .....	47
Tabla 3-8 Módulos elásticos de la mezcla MDC-3 .....	48
Tabla 3-9 Módulos elásticos de la mezcla M1 .....	49
Tabla 3-10 Módulos elásticos de la mezcla SMA.....	50
Tabla 3-11 Resultados en la campaña experimental .....	54

## LISTA DE FIGURAS

Pag.

Figura 1-1 Sección transversal de mezclas densas y SMA .....	26
Figura 1-2 Transmisión de los esfuerzos en el SMA.....	27
Figura 1-3 Mezcla densa y discontinua en caliente .....	30
Figura 1-4 Estudio comparativo económico y técnico de una mezcla tipo SMA y una mezcla convencional.....	31
Figura 1-5 Relación costo-beneficio entre un pavimento tipo SMA y una mezcla convencional .....	32
Figura 2-1 Gradaciones típicas de la mezcla .....	36
Figura 3-1 Peso específico compactado vs porcentaje de asfalto .....	43
Figura 3-2 Vacíos con aire en las mezclas en estudio.....	44
Figura 3-3 VAM Vs porcentaje de asfalto .....	45
Figura 3-4 VAF Vs porcentaje de asfalto .....	46
Figura 3-5 Esfuerzo Vs deformación MDC-2 .....	47
Figura 3-6 Esfuerzo Vs deformación MDC-3 .....	48
Figura 3-7 Esfuerzo Vs deformación M1 .....	49
Figura 3-8 Esfuerzo Vs deformación SMA.....	50
Figura 3-9 deformación Vs tiempo MDC-2.....	51
Figura 3-10 Deformación Vs tiempo MDC-3 .....	51
Figura 3-11 Deformación Vs tiempo M1 .....	52
Figura 3-12 Deformación Vs tiempo SMA.....	52
Figura 3-13 Resistencia a la carga .....	53
Figura 3-14 Resistencia a la carga .....	53

## **LISTA DE ANEXOS**

	Pag.
ANEXO A: CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS.....	62
ANEXO B:: CARACTERIZACION DE LAS PROBETAS.....	56
ANEXO C:: DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR MARSHAL.....	62
ANEXO D:: ENSAYOS DE MODULO DE ELASTICIDAD.....	76
ANEXO E:: ENSAYO CREEP .....	78
ANEXO F:: ENSAYO ESTABILIDAD DE FLUJO .....	81

## RESUMEN

### TÍTULO:

ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE DEFORMACIÓN EN LAS MEZCLAS MDC-2, MDC-3, M1 Y STONE MATRIX ASPHALT\*

### AUTORES:

ARENAS ROMERO, Emilio  
SERRANO CORZO, Andrés Julián\*\*

### PALABRAS CLAVES:

STONE MATRIX ASPHALT  
CAPA DE RODADURA  
MEZCLA DENSA EN CALIENTE  
MEZCLA DISCONTINUA EN CALIENTE  
RESISTENCIA

### DESCRIPCIÓN

Ante la escasa resistencia a la deformación permanente de las mezclas empleadas tradicionalmente como capa de rodadura en Colombia, surge la necesidad de evaluar el desempeño de otras tecnologías, que soporten la carga de tráfico sin deformarse en exceso; garanticen la seguridad y el confort del usuario, tengan vida útil prolongada y viabilidad económica.

Por esta razón, en este proyecto se analiza el comportamiento del Stone Matrix Asphalt (SMA) mezcla de granulometría discontinua con gran cantidad de agregado grueso de alta calidad, elevado contenido de asfalto y fibras de celulosa, en comparación con el de las mezclas densas en caliente MDC-2 y MDC-3 y la mezcla de gradación abierta M1.

Para ello, se fabricaron probetas de cada mezcla de acuerdo a los requerimientos normativos de su diseño, según el método Marshall, empleando agregado de la cantera de Pescadero (Santander) asfalto modificado tipo II y fibra de celulosa granular fina. Las briquetas se sometieron a dos ensayos diferentes, antes de ser falladas para determinar su estabilidad y flujo.

La primera prueba consistió en aplicarle a las muestras puestas a 7.5 ° C, una carga ascendente dentro del rango elástico, para conocer la tendencia de la curva esfuerzo-deformación de las mezclas; mientras que en la segunda, las probetas se sometieron a la acción de una carga constante durante una hora, a una temperatura inicial de 60° C.

El SMA tuvo la mayor resistencia a la carga y las menores deformaciones entre todas las mezclas en estudio; además resulta más económica a corto y largo plazo, debido a su poco espesor. Se recomienda analizar nuevas granulometrías, contenidos y tipos de asfalto y otras clases de celulosa, que permitan optimizar el comportamiento de la mezcla, y evaluar en ella, mediante diversos ensayos, la complejidad de sus propiedades de deformación.

---

\* Tesis de Grado

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

## ABSTRACT

**TITLE:**

COMPARATIVE ANALYSIS OF DEFORMATION PROPERTIES IN M1, MDC-2 AND MDC-3 MIXES AND STONE MATRIX ASPHALT\*

**AUTHOR:**

ARENAS ROMERO, Emilio  
SERRANO CORZO, Andrés Julián\*\*

**KEYWORDS:**

STONE MATRIX ASPHALT  
TRAFFIC LAYER  
DENSE HOT MIXTURE  
DISCONTINUOS HOT MIXTURE  
RESISTANCE

**DESCRIPTION:**

Because of the low permanent deformation resistance of the traditional mixtures used as Traffic Layer in Colombia, it opens the need to analyze the efficiency of other technologies which can support the traffic load without a great deformation, certify the security and comfort of the driver, have a large useful life and offer a great economic facility.

For this reason, this project analyzes the behavior of the Stone Matrix Asphalt (SMA) mixture of discontinuous granulometry with great amount of thick aggregate of high quality, a high quantity of asphalt and cellulose fibers, in comparison with the dense hot mixtures MDC-2 and MDC-3 and the mixture of open gradation M-1.

To complete the research, tests tubes were made of each mixture taking into account the requirements of their design, according to the Marshall method, using aggregate from the quarry from Pescadero (Santander) Type II Modified Asphalt and fine granite cellulose fibers. These test tubes were tested twice, before being failed to determine their stability and flow.

The first test consisted in the application of an ascendant load over the elastic range to the sample on 7.5°C. This was made to know the tendency of the stress/deformation curve of the mixtures. On the other hand, in the second test the test tubes were loaded constantly for one hour, at a first temperature of 60°C.

The SMA had a higher load resistance and lower deformations between all the mixtures studied. Also, it results more economic in a short and long period of time because of its low thickness. The recommendation is to analyze new granulometries, amount and types of asphalt and other classes of cellulose, which can optimize the behavior of the mixture and can be able to evaluate, among different test, the complexity of their deformation properties.

---

\* Degree Thesis

\* \*\*Physical-Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering. ING. EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN

## INTRODUCCION

El desempeño de un pavimento depende de su condición estructural y funcional. La condición estructural se basa en su capacidad de soporte desde el punto de vista de las solicitaciones de carga, mientras que la funcional describe que tan bueno es el camino según la percepción del usuario respecto a la seguridad y el confort.

Actualmente, con base en la experiencia de países como Alemania, Francia, Inglaterra y Estados Unidos, los microaglomerados discontinuos en caliente son considerados la mezcla de mayor desempeño del mercado, presentando rendimientos superiores al de emulsiones tradicionales de granulometría densa, a costos menores. Esta tecnología se caracteriza por su gradación abierta y el empleo de agregados de alta calidad, grandes cantidades de asfalto y fibras espesantes (en algunos casos) que confieren a la mezcla una reología especial, reflejada en un incremento de su resistencia, durabilidad, estabilidad y cohesión, y además, en un aumento del nivel de seguridad y confort del usuario.

Entre este tipo de mezclas la más reconocida mundialmente es el Stone Matrix Asphalt (SMA) ideada en Alemania a finales de la década de los sesenta. Su uso se ha extendido a diversos países de Europa y América, donde su excelente comportamiento ante condiciones exigentes de carga, ha generado su normalización y fomentado su empleo.

En Colombia han sido incluidas en la norma del INVIAS, junto a las mezclas densas tradicionales, las discontinuas tipo F y M; sin embargo, aún con los beneficios enunciados anteriormente y la necesidad de reparar y ampliar la red vial nacional de forma eficaz y económica, la SMA apenas empieza a evaluarse. 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, mediante un proceso de diseño, fabricación y análisis similar, usando 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.

Es necesario aclarar que esta es la primera investigación desarrollada en la UIS acerca de la tecnología SMA. Espera constituirse en una base sólida de estudios futuros que han de contribuir para que esta mezcla sea empleada en diseños de pavimentos en Colombia.

## **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**

El auge económico que vivió Alemania después de la segunda guerra mundial, produjo la expansión del sector industrial. Pero, tras años de bombardeo aliado, la infraestructura germana había sido dañada casi por completo y la necesidad de repararla crecía vertiginosamente.

De igual manera, el desarrollo de la industria automotriz, incrementó la capacidad de carga en vehículos pesados y dio origen a los neumáticos de clavo (especiales para el clima de la Europa nórdica) aumentando respectivamente las cargas por eje y el desgaste producido por una mayor presión en la llanta.

Resultaba entonces indispensable, crear una carpeta asfáltica de alta durabilidad, que resistiera las nuevas solicitaciones de carga y soportara el incremento del volumen de tráfico, ofreciendo comodidad y seguridad al conductor; no fue necesario esperar mucho por ello. A mediados de la década de los 60, se dio a conocer el prototipo original de la mezcla SMA llamado "mastimac", que reemplazaba a la tradicional "guss", cara y propensa a deslizamientos. Consistía en revestir y aglutinar, con un mortero rico en ligante, una cantidad elevada de gravilla triturada, de bajo desgaste y a prueba de

impacto, en la que los vacíos eran llenados, casi en su totalidad, por un mastico compuesto por betún, filler y fibra.

Esta mezcla se empezó a usar en Alemania en 1968. Debido a su excelente funcionamiento, las autoridades viales de este país le incorporaron en sus especificaciones Standard en 1984. Para entonces, muchos países Europeos, entre los que destacaban Inglaterra y Francia, habían acogido también el SMA, en parte, porque disminuía la abrasión producida por los neumáticos claveteados (que constituyen un verdadero inconveniente sobre todo en los países escandinavos) y durante el resto de la década de los 80 fueron incluyéndole en sus normativas. En 1990, una delegación norteamericana realizó sondeos sobre pavimentos construidos con SMA en diversos países de Europa; tras esto, se decidió implementar tramos de ensayo en 23 estados americanos, principalmente en Maryland y Georgia; los óptimos resultados, impulsaron la adopción de esta tecnología en USA y su inclusión en las normas AASHTO. A partir de entonces, el uso del Stone Matrix Asphalt se ha extendido por todo el planeta: En Latinoamérica, han sido utilizados en Brasil, Argentina, México y Chile, al igual que en Asia, Australia y Nueva Zelanda.

Su durabilidad ha sido comprobada, ya que muchos de los SMA ejecutados en Alemania en la década de los 70, entre los que resalta la Vía Dortmund, aún están en servicio y en buenas condiciones. Esta es una de las carreteras más transitadas del mundo: cerca de 100000 camiones de carga pasan anualmente por ella, desde que fue construida, en 1980; hasta el momento no ha presentado baches, grietas ni ningún otro tipo de falla, aspecto sorprendente, considerando que en Europa la carga permitida por eje es de 11000 Kg, dos mil más que en Estados Unidos.

### **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 m<sup>2</sup> (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 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Generalmente se dosifica en cantidades cercanas al 70 % del peso total de la mezcla.

#### **1.1.3.2 Agregado grueso**

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 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.

#### **1.1.3.4 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.

#### **1.1.3.5 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 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.

### 1.1.3.6 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.

### 1.1.3.7 Granulometría

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.

Tabla 1-1 Rangos granulométricos del SMA

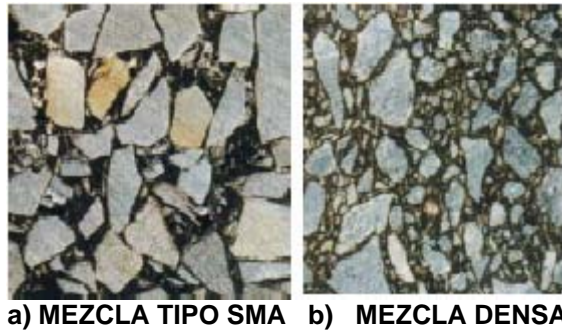
TAMIZ N °	% QUE PASA
$\frac{3}{4}$	100
$\frac{1}{2}$	85-95
$\frac{3}{8}$	75 máx.
N ° 4	20-28
N ° 8	16-24
N ° 30	12-16
N ° 50	12-15
N ° 200	8-10

### 1.1.4 Principios del stone matrix asphalt

La estructura de soporte del SMA es un esqueleto mineral de agregado, relleno de un mastic de gran viscosidad, que da lugar a un aglomerado asfáltico de larga duración.

Su elevada resistencia a la deformación permanente se debe en gran parte a que la carga transmitida por el tráfico es soportada por una alta cantidad de agregado grueso de calidad superior y gran angulosidad, que favorece el contacto entre piedras y disminuye la presión sobre el mástico (Ver figura 1.1) aumentando la estabilidad y resistencia al corte del pavimento.

Figura 1-1 Sección transversal de mezclas densas y SMA

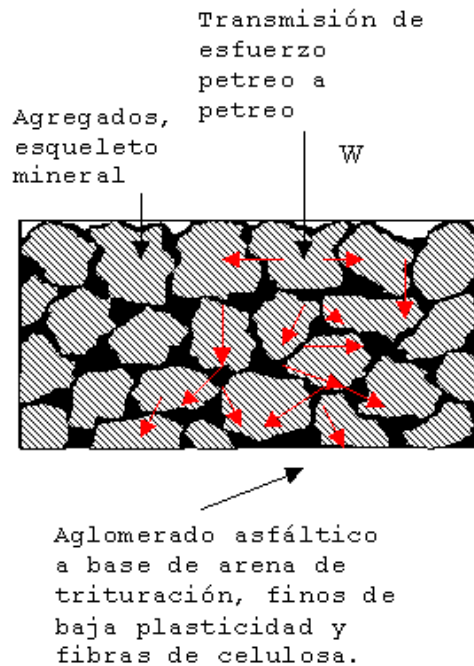


Su alta durabilidad es producto del alto contenido de asfalto con que es diseñada, que aumenta el espesor de la película bituminosa que cubre los áridos, mejorando la estabilidad de la mezcla. Asimismo, la granulometría discontinua permite que el mastic penetre casi totalmente en los espacios dejados entre piedras, disminuyendo el porcentaje de vacíos de aire total; esto hace al SMA prácticamente impermeable, evitando el envejecimiento y agrietamiento producido por la infiltración de agua en la carpeta asfáltica compactada.

La adición de celulosa junto con la rugosidad de la gravilla triturada, mejora su adherencia con el asfalto, evitando la segregación del material grueso; controla el drenaje del betún antes de la compactación, confiriéndole a la mezcla una estabilidad superior que le protege del efecto de las fuerzas provocadas por aceleración y frenado.

Por otro lado, su gradación abierta genera un perfil de superficie de alta rugosidad, que aumenta el agarre del neumático al pavimento, disminuyendo el riesgo de deslizamiento; minimiza el hidropilano, mejora la visibilidad de las demarcaciones del camino y reduce el ruido. El esquema de la Figura 1.2. muestra la distribución de la carga de tráfico en una mezcla SMA

Figura 1-2 Transmisión de los esfuerzos en el SMA



### 1.1.5 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 renivelada, donde los baches hayan sido tapados con mezclas en caliente o en frío.

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 Pórtland 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.

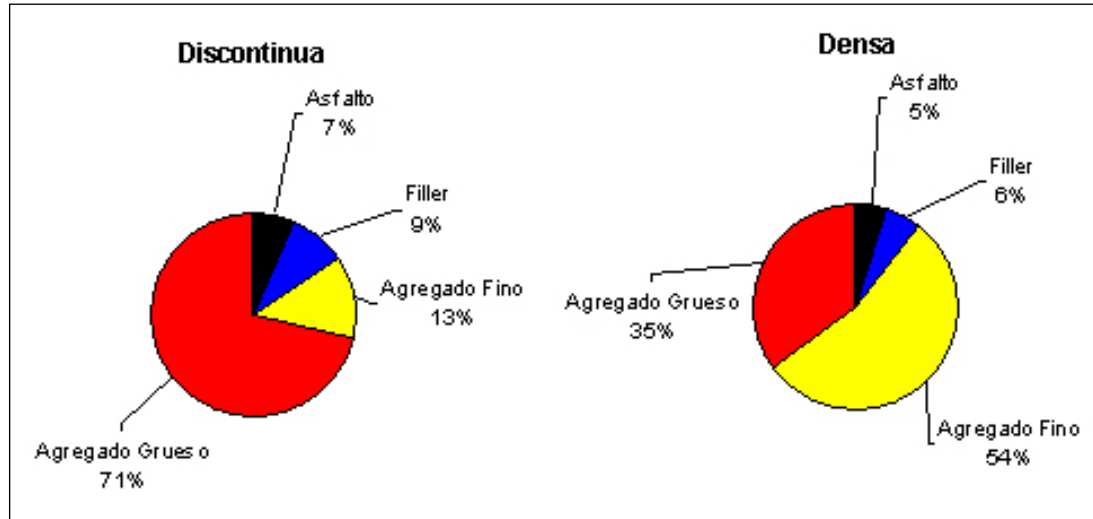
#### **1.3.2 Composición de la mezcla**

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

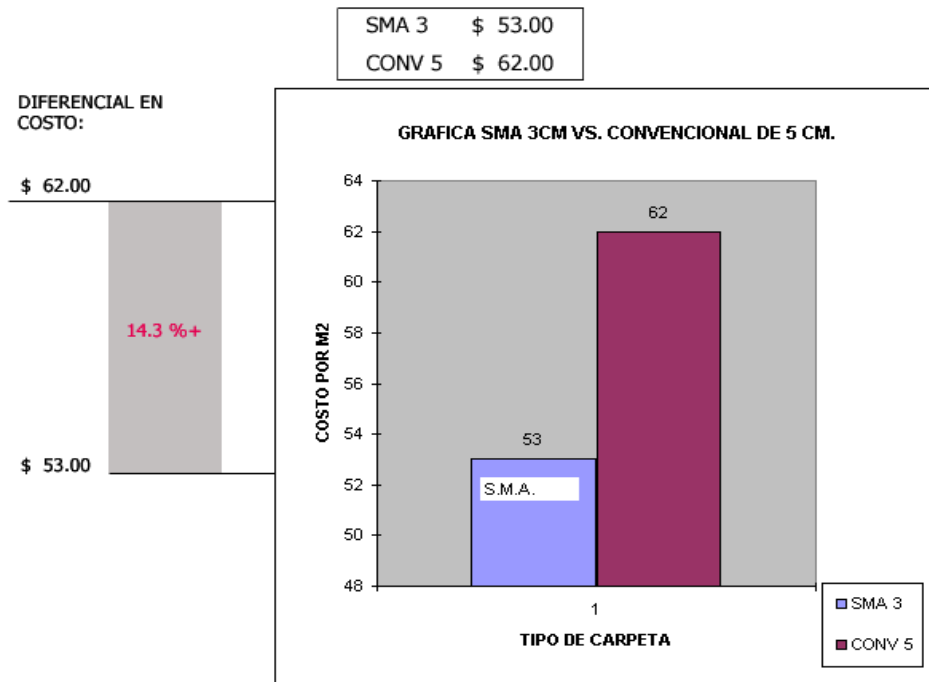
En las gráficas que se muestran a continuación, se aprecian las granulometrías de una mezcla densa típica, de las que hacen parte la MDC-2 y la MDC-3, y de una discontinua, como la M1 y el SMA.

Figura 1-3 Mezcla densa y discontinua en caliente



## 1.5 RELACIÓN BENEFICIO – COSTO (SMA – MEZCLA CONVENCIONAL)

Figura 1-4 Estudio comparativo económico y técnico de una mezcla tipo SMA y una mezcla convencional



### INVERSIÓN INICIAL: Mezcla SMA 0/8 (3 cm de espesor) Vs. Mezcla Convencional (5 cm de espesor)

- 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 m<sup>2</sup> de pavimento que se haga con SMA en vez del asfalto convencional, tendrá un ahorro suficiente para hacer otros 3,600 m<sup>2</sup> más con pavimento SMA.
- El costo inicial [por m<sup>2</sup>] 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.

Figura 1-5 Relación costo-beneficio entre un pavimento tipo SMA y una mezcla convencional

ASFALTO CONVENCIONAL							TOTAL
MANTENIMIENTO (25% @ AÑO*)							
INVERSION INICIAL	1ER. AÑO	2DO. AÑO	3ER. AÑO	4TO. AÑO	5TO. AÑO	6TO. AÑO	
\$ 62.00	\$ 15.50	\$ 15.50	\$ 15.50	\$ 15.50	\$ 15.50	\$ 15.50	\$155.00
*según datos de S.C.T.							
ASFALTO TIPO S.M.A.							TOTAL
MANTENIMIENTO (0% HASTA 8 AÑOS*)							
INVERSION INICIAL	1ER. AÑO	2DO. AÑO	3ER. AÑO	4TO. AÑO	5TO. AÑO	6TO. AÑO	
\$ 53.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$53.00
*8 años al 2003 tiene el primer pavimento S.M.A. en México.							
DIFERENCIAL							\$102.00
PORCENTAJE DE AHORRA							<b>65.80%</b>

## **2. METODOLOGIA DEL ESTUDIO**

### **2.1 DESCRIPCION**

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

- Consulta bibliográfica
- Caracterización de materiales
- 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 ½”.

##### **2.2.1.3 Ensayos 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).

### **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 temperatura 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 este proyecto a la mezcla SMA, fue la CELLOSIZE QP 52000H; esta, aunque 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, ha demostrado ser eficiente al emplearse en otro tipo de construcciones. 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.

## **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.

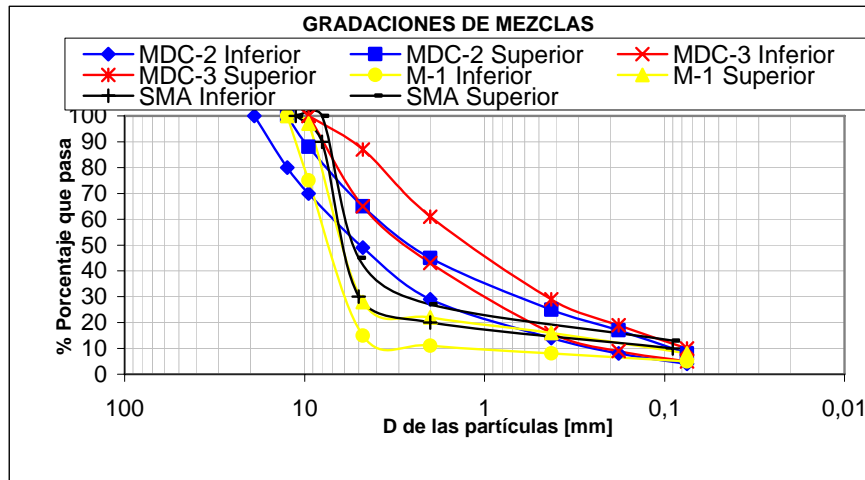
#### **2.3.1.3 Gradación M1**

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 2-1 Gradaciones típicas 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:

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

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  $\alpha$  su factor de corrección.

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

Donde,

G = % Pasa tamiz ¼"

g = % Pasa tamiz ¼" - % 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.

Tabla 2-1 Porcentaje optimo de asfalto

TIPO DE MEZCLA	k	$\alpha$	% 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

### 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".

#### 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 48 muestras, distribuidas en igual proporción entre los cuatro tipos de emulsión.

#### 2.3.4.2 Temperatura de mezcla y compactación

Las probetas fueron fabricadas garantizando una temperatura de mezcla y compactación de 163 y 153 ° C respectivamente, de acuerdo a las recomendaciones del productor del asfalto empleado.

### 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.

Tabla 2-2 Nivel de compactación de la mezclas

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

## 2.4 PRUEBAS EFECTUADAS SOBRE LAS MUESTRAS

Los ensayos de medición de módulo de elasticidad a 7.5 ° C y deformación ante carga constante a 60 ° C (Creep sin confinar) 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.

### 2.4.1 Medición de Densidad Bulk y Contenido de Vacíos

En el caso de las mezclas SMA 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; 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 ( $V_a$ ), vacíos en el agregado mineral ( $V_{AM}$ ) y vacíos llenos de asfalto ( $V_{AF}$ ) de las probetas compactadas, fue determinado de acuerdo al método Marshall para diseño de mezclas de agregados con cemento asfáltico.

### 2.4.2 Determinación del Módulo Elástico a 7.5 ° C

Las probetas fueron sumergidas durante media hora en agua a 7.5 ° C e inmediatamente después, se aplicó sobre ellas, mediante la maquina Marshall, una carga ascendente hasta alcanzar el valor de 1620 lb. Esto 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.

#### **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 y luego se aplicó sobre ellas, durante una hora, una carga constante de 125 lb, controlada manualmente en la maquina Marshall; esta magnitud se determinó de forma similar a la del ensayo del módulo elástico, pero es considerablemente inferior a ella, a causa de la alta temperatura de la prueba, que somete al pavimento a una condición más crítica.

#### **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.

### 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.

Tabla 3-1 Caracterización de los agregados pétreos

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

##### 3.1.2 Petrología Mineral de Agregados

La composición mineralógica de los agregados utilizados fue la siguiente:

Tabla 3-2 Composición mineralógica de agregados

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

## 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:

Tabla 3-3 Propiedades reológicas del asfalto

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

## 3.3 CELULOSA

Las principales características de la fibra de celulosa empleada, son las siguientes:

Tabla 3-4 Propiedades de la celulosa utilizada

Tipo de Celulosa:	CELLOSIZ QP 52000H
Características	Rango
Solubilidad en Agua	1,0 % Max
Volatilidad	5,0 % Max
Solución pH (2%)	6-7
Tiempo de hidratación	5 a 15 minutos
Partículas que pasan el tamiz No. 20	98 % Max

## 3.4 CONFORMACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

### 3.4.1 Granulometría Utilizada

En las mezclas M1, MDC-2, MDC-3 y SMA 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.

Tabla 3-5 Gradaciones empleadas MDC-2, MDC-3, M1 y SMA

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

### 3.4.1 Porcentaje de Asfalto Utilizado

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

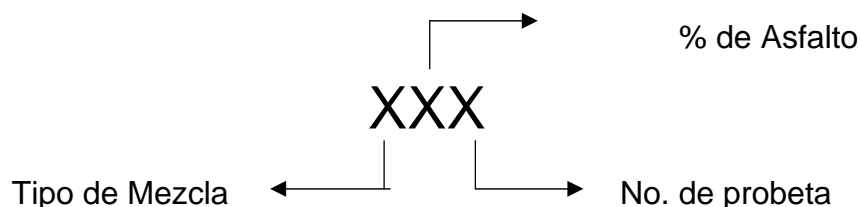
Tabla 3-6 Porcentajes de asfalto empleados

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

## 3.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS

### 3.5.1 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 y D para SMA.

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.

### 3.5.2 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.

## 3.6 ANÁLISIS DE DENSIDAD Y VACÍOS

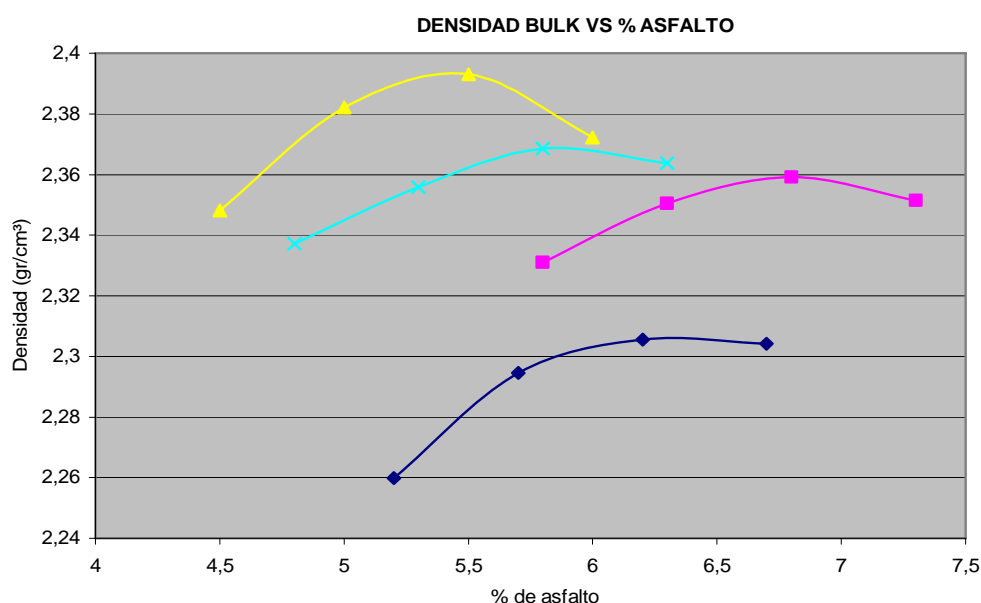
### 3.6.1 Densidad Bula

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

#### 3.6.1.1 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 3-1 Peso específico compactado vs porcentaje de asfalto



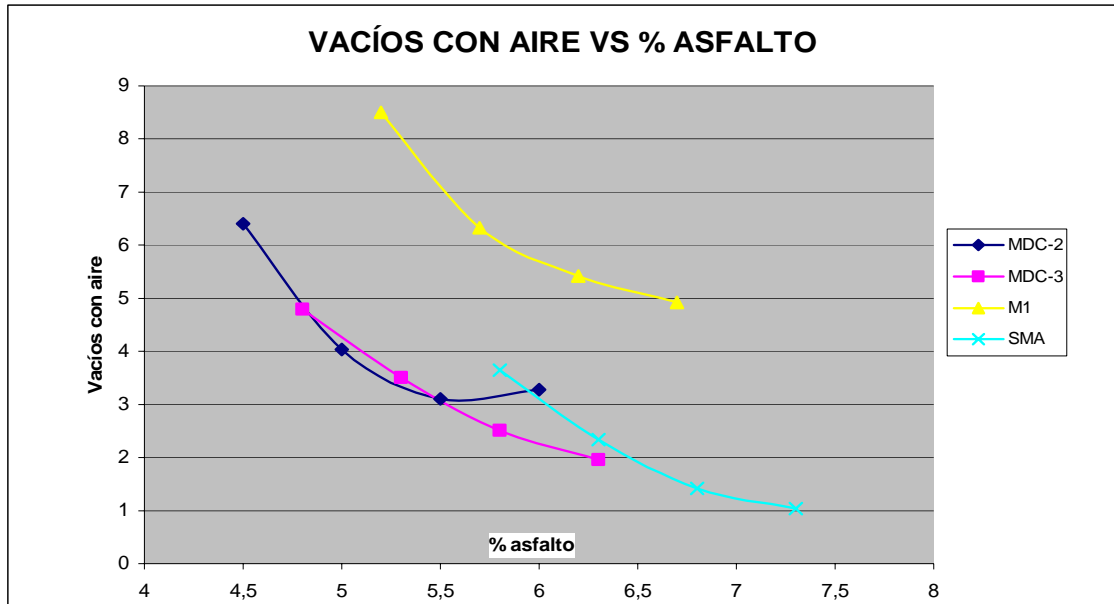
### 3.6.2 Vacíos con Aire

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.

### 3.6.2.1 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 3-2 Vacíos con aire en las mezclas en estudio



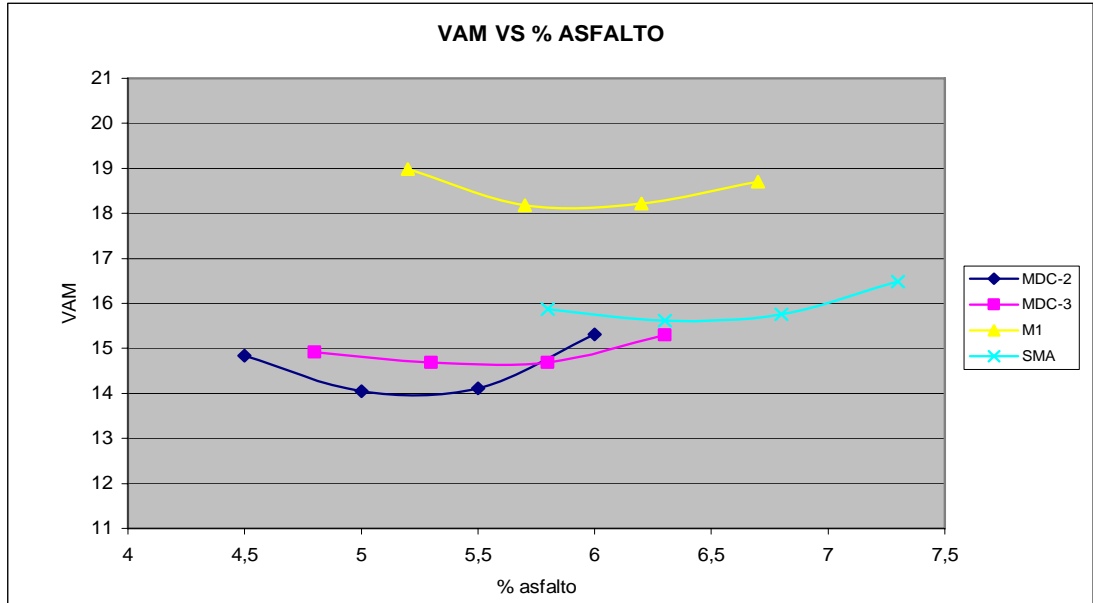
### 3.6.3 Vacíos en el Agregado Mineral

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.

#### 3.6.3.1 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 3-3 VAM Vs porcentaje de asfalto



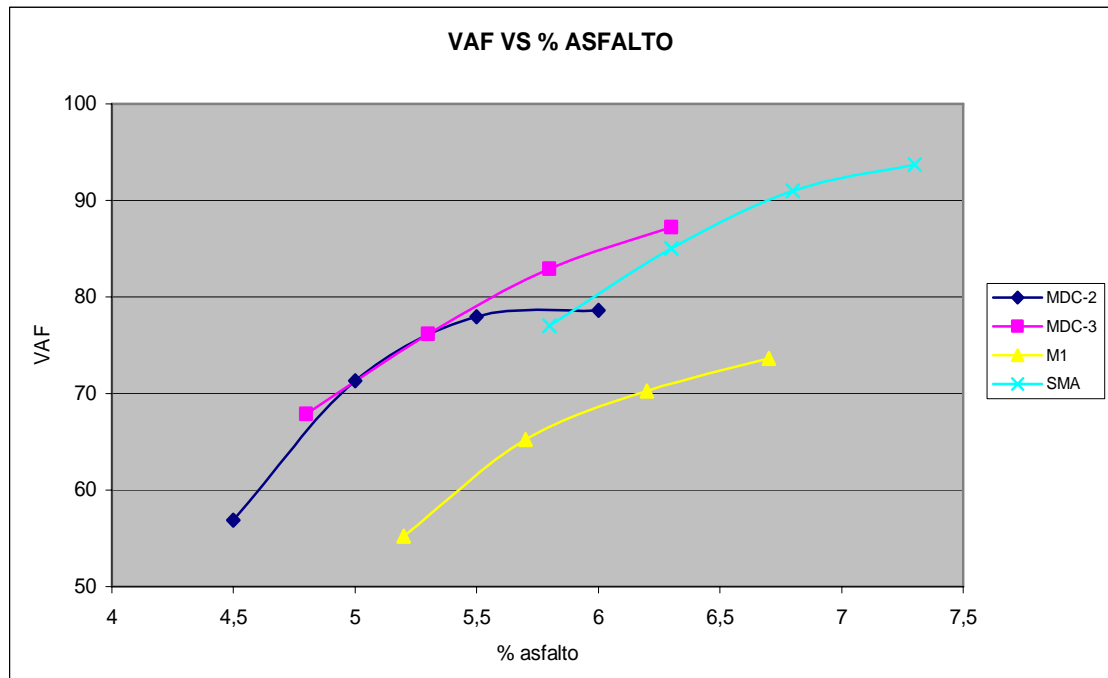
### 3.6.4 Vacíos Llenos de Asfalto

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

#### 3.6.4.1 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 3-4 VAF Vs porcentaje de asfalto



### 3.7 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.

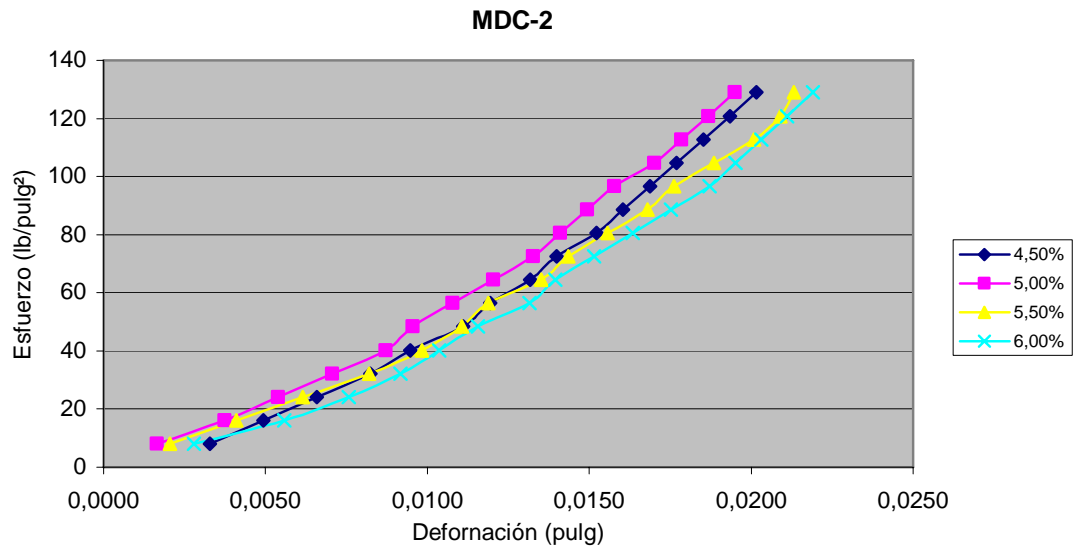
Aunque en este ensayo se aplicó sobre las probetas un esfuerzo máximo dentro del rango elástico, la curva Esfuerzo Vs. Deformación, trazada para cada contenido de asfalto, no presenta una tendencia lineal; Por esta razón, han sido calculados dos módulos elásticos en cada caso, con el fin de representar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

#### 3.7.1 Mezcla MDC-2

##### 3.7.1.1 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 3-5 Esfuerzo Vs deformación MDC-2



### 3.7.1.2 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.

Tabla 3-7 Módulos elásticos de la mezcla MDC-2

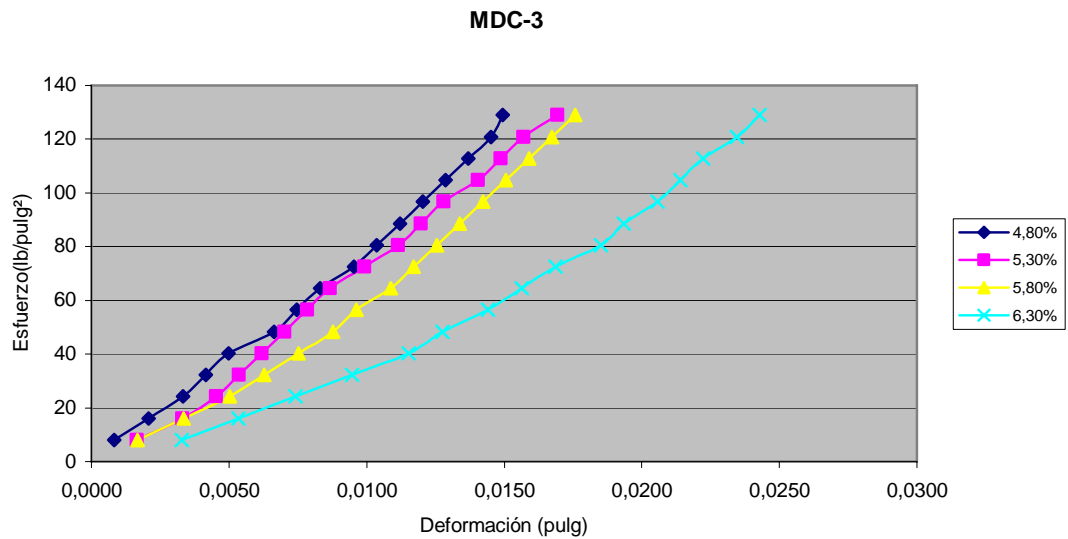
% Asfalto	Módulo elástico (lb / pulg <sup>3</sup> )	
	1	2
4,5%	5138,15	9789,52
5,0%	4612,85	8673,33
5,5%	3931,92	7131,05
6,0%	3754,30	7054,75

### 3.7.2 Mezcla MDC-3

#### 3.7.2.1 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 3-6 Esfuerzo Vs deformación MDC-3



### 3.7.2.2 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.

Tabla 3-8 Módulos elásticos de la mezcla MDC-3

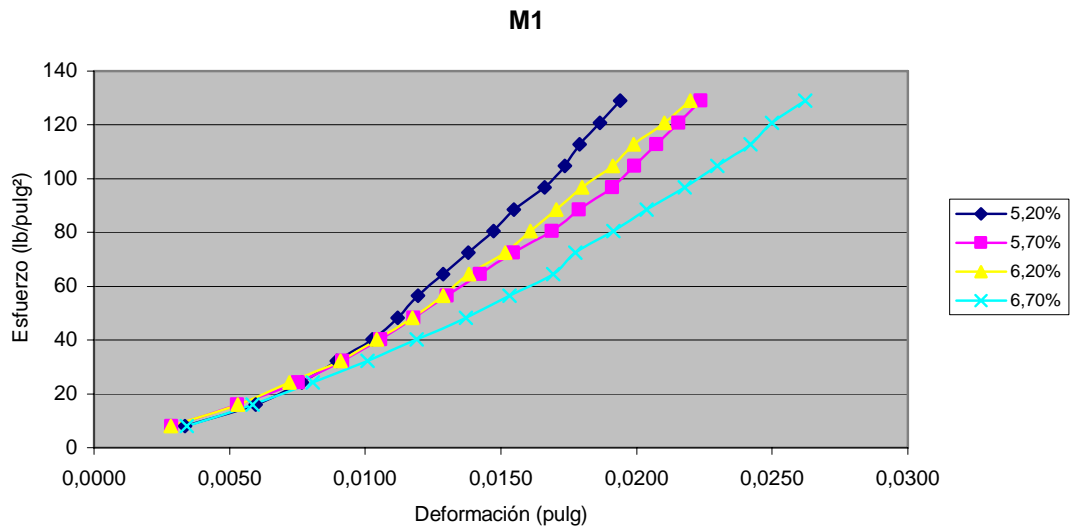
% Asfalto	Módulo elástico (lb/pulg³)	
	1	2
4,8%	6472,63	9708,95
5,3%	5533,35	8369,63
5,8%	4814,19	8161,59
6,3%	3915,81	7649,99

### 3.7.3 Mezcla M1

#### 3.7.3.1 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 3-7 Esfuerzo Vs deformación M1



### 3.7.3.2 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.

Tabla 3-9 Módulos elásticos de la mezcla M1

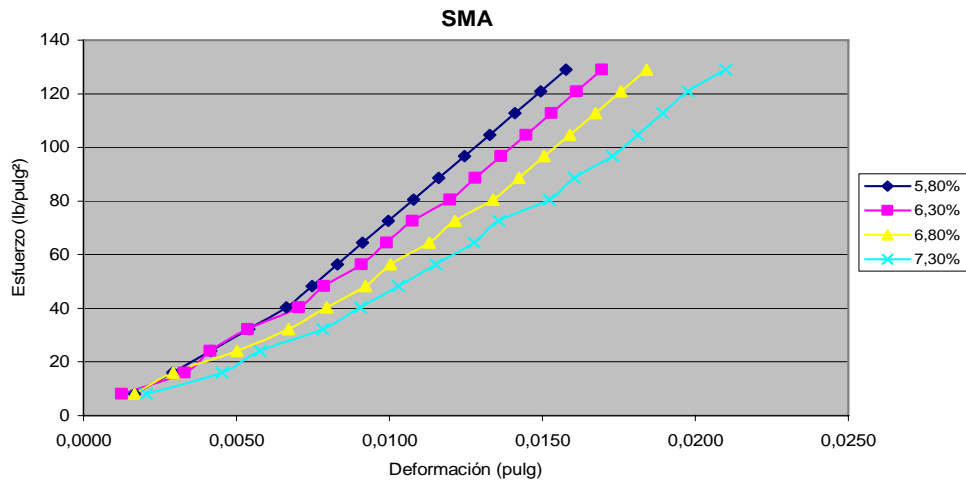
% Asfalto	Módulo elástico (lb/pulg³)	
	1	2
5,2%	3697,12	9600,78
5,7%	3444,92	7461,34
6,2%	3678,45	7921,57
6,7%	3472,93	6490,47

### 3.7.4 Mezcla SMA

#### 3.7.4.1 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 3-8 Esfuerzo Vs deformación SMA



### 3.7.4.2 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.

Tabla 3-10 Módulos elásticos de la mezcla SMA

% Asfalto	Módulo elástico (lb/pulg³)	
	1	2
5,8%	6472,63	9708,95
6,3%	5807,31	8873,02
6,8%	4902,18	8504,35
7,3%	4599,10	7469,81

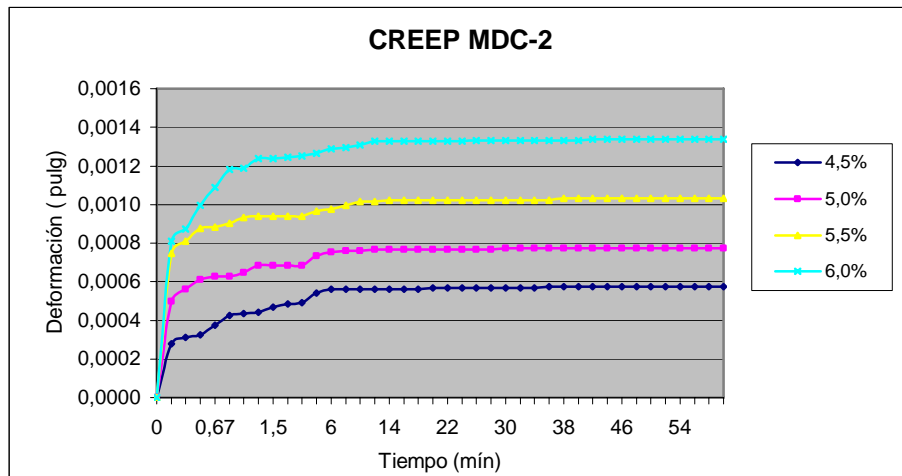
## 3.8 DEFORMACIÓN A 60° C (ENSAYO CREEP SIN CONFINAR)

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, aunque los resultados numéricos pueden verse en el ANEXO E.

### 3.8.1 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.

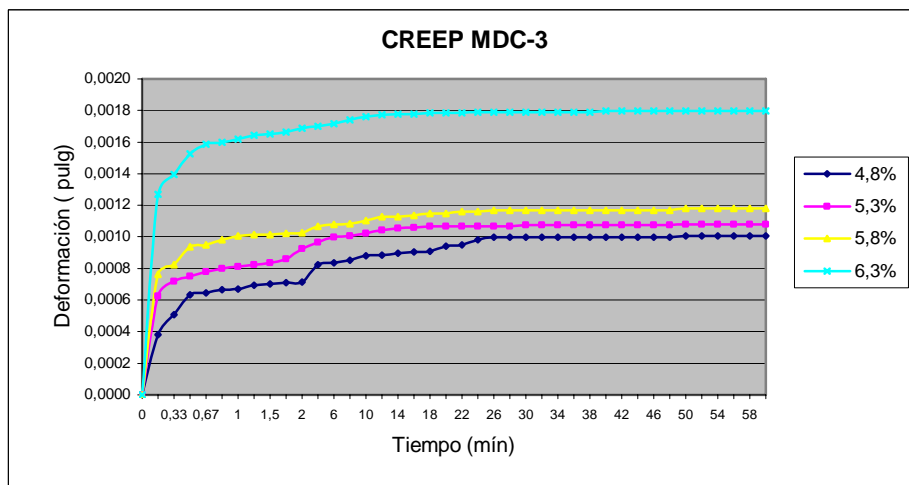
Figura 3-9 deformación Vs tiempo MDC-2



### 3.8.2 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.

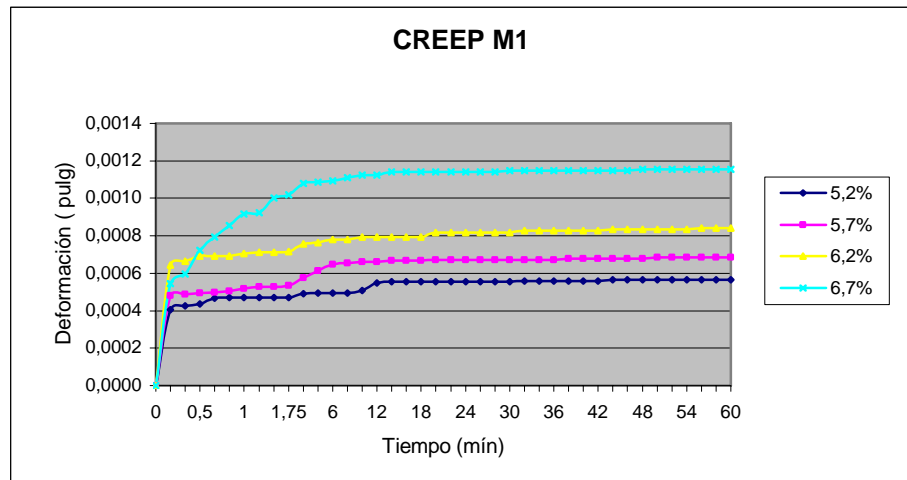
Figura 3-10 Deformación Vs tiempo MDC-3



### 3.8.3 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.

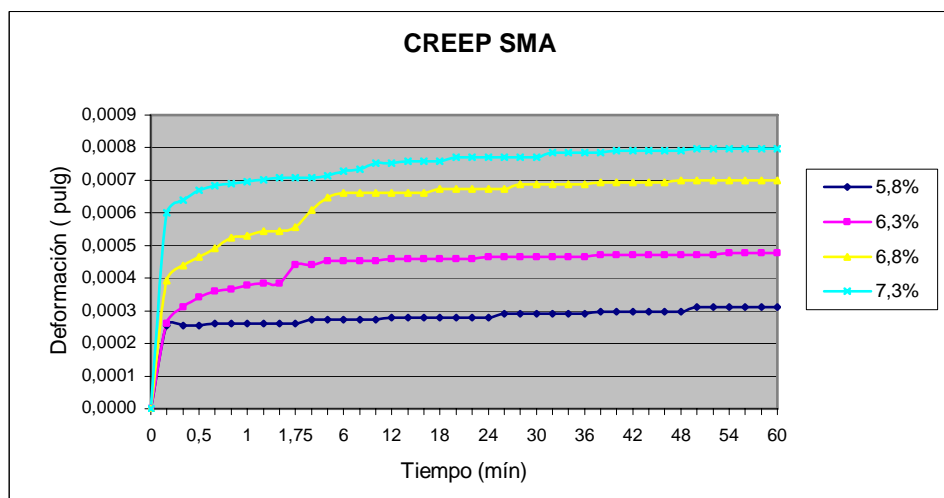
Figura 3-11 Deformación Vs tiempo M1



### 3.8.4 Gráfico Deformación Vs. Tiempo (SMA)

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

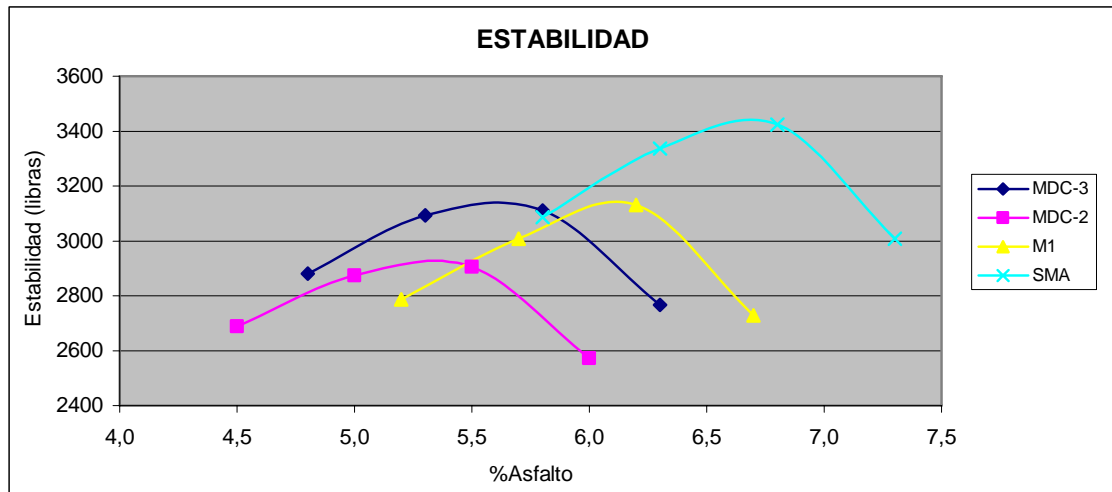
Figura 3-12 Deformación Vs tiempo SMA



### 3.9 ESTABILIDAD MARSHALL

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

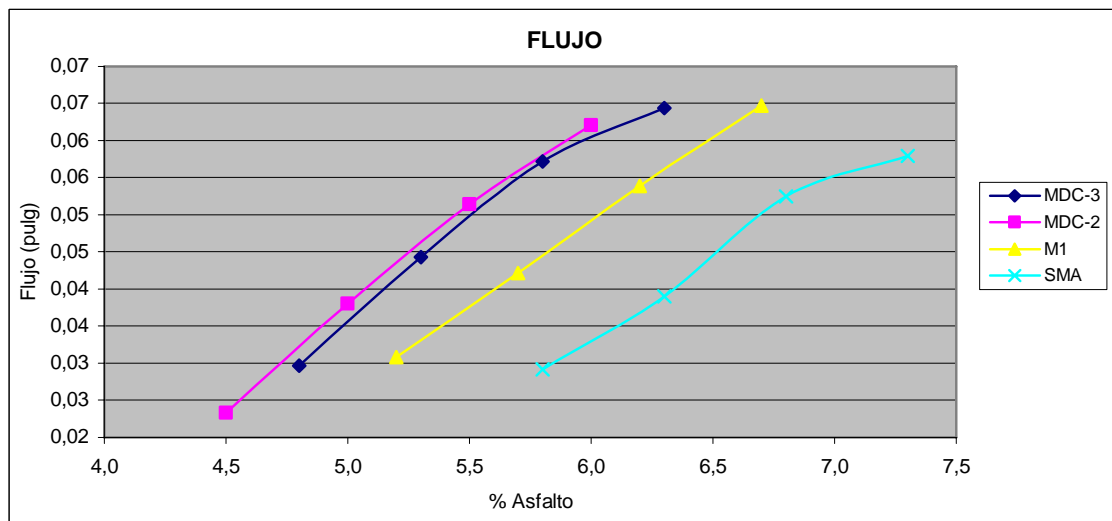
Figura 3-13 Resistencia a la carga



### 3.10 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 3-14 Resistencia a la carga



### 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.

Tabla 3-11 Resultados en la campaña experimental

MEZCLA	% Asf	G Bulk	% Va	% VAM	%	Módulo Elástico 7,5° C [lb/pulg³]		CREEP Def. Máx (0,001 pulg)	Estabilidad (lb)	Flujo (pulg)
						1	2			
MDC-2	4,5	2,348	6,40	14,83	56,86	5138,15	9789,52	0,573	2687,58	0,023
	5	2,382	4,03	14,05	71,31	4612,85	8673,33	0,772	2873,54	0,038
	5,5	2,393	3,11	14,11	77,97	3931,92	7131,05	1,034	2905,98	0,051
	6,5	2,372	3,27	15,31	78,62	3754,30	7054,75	1,339	2572,97	0,062
MDC-3	4,8	2,337	4,79	14,92	67,90	6472,63	9708,95	1,005	2881,14	0,030
	5,3	2,356	3,50	14,69	76,17	5533,35	8369,63	1,079	3092,51	0,044
	5,8	2,369	2,51	14,68	82,94	4814,19	8161,59	1,179	3110,33	0,057
	6,3	2,364	1,96	15,30	87,20	3915,81	7649,99	1,797	2766,18	0,064
M-1	5,2	2,260	8,51	18,99	55,21	3697,12	9600,78	0,566	2787,62	0,031
	5,7	2,295	6,32	18,18	65,21	3444,92	7461,34	0,685	3006,75	0,042
	6,2	2,305	5,42	18,22	70,27	3678,45	7921,57	0,841	3130,79	0,054
	6,7	2,304	4,93	18,71	73,67	3472,93	6490,47	1,153	2727,81	0,065
SMA	5,8	2,331	3,64	15,87	77,04	6472,63	9708,95	0,310	3086,13	0,029
	6,3	2,350	2,34	15,62	85,01	5807,31	8873,02	0,478	3327,20	0,039
	6,8	2,359	1,42	15,76	90,98	4902,18	8504,35	0,701	3424,38	0,053
	7,3	2,351	1,04	16,49	93,71	4599,10	7469,81	0,797	3008,51	0,058

## 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 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 se comporta de forma similar al de las emulsiones densas y difiere drásticamente de la M1, a la que debía en teoría asemejarse. Es muy temprano para enunciar conclusiones definitivas, pero es posible que la fibra de celulosa añadida a la mezcla SMA produzca un incremento de su densidad, que hace que sus características cambien respecto a otros microaglomerados discontinuos en caliente.

#### 4.2.2 Vacíos Con Aire

Analizando por separado las mezclas de gradación abierta y densa es evidente que poseen la misma tendencia, es decir que el contenido total de vacíos con aire disminuye en aquellas con mayor cantidad de asfalto (SMA y MDC-3 respectivamente).

Las mezclas densas MDC-2 y MDC-3 se comportan de forma similar y nuevamente sorprende la gran diferencia existente entre las de granulometría discontinua, pues la SMA es la de menor contenido de vacíos con aire, mientras la M1 es la que más tiene; es probable que la adición de celulosa sea

la causante de este fenómeno, pues no existe otro factor en el diseño que las distinga totalmente. Esta fibra aumenta la viscosidad del mastic y permite incrementar el contenido de asfalto óptimo, disminuyendo el volumen de vacíos totales y dándole a la emulsión una impermeabilidad envidiable que la hace resistente al envejecimiento y aumenta su durabilidad.

#### **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 la mezcla M1, pero se comportan de forma similar al SMA; sin embargo, la escasa cantidad de vacíos con aire de esta mezcla y su elevada cantidad de asfalto, ocasiona que su comportamiento sea diferente y que su resistencia al envejecimiento y la carga sean mayores.

#### **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. La curva de la M1 se comporta en forma similar a la de las mezclas densas en caliente, que tienen pequeña cantidad de asfalto, y difiere de la SMA; esto se debe a que la mayor parte del VAM de la M1 está compuesta por bolsas de aire, lo que genera que la cantidad efectiva de asfalto disminuya.

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.

#### **4.2.5 Módulo Elástico a 7.5 ° C**

La tendencia general es que al incrementarse el contenido de asfalto en las mezclas, aumente su deformación; sin embargo, para el caso de la MDC-2 y la M1, existen deformaciones que no se acoplan a esta directriz; en este momento no es posible determinar la causa de este fenómeno, pues no se da ni siquiera en mezclas del mismo tipo. Lo que sí es evidente es que todas las mezclas, excepto el SMA, presentan deformaciones superiores y consecuentemente menores módulos elásticos, entre más alto sea su porcentaje óptimo de asfalto.

#### **4.2.6 Creep sin Confinar a 60 ° C**

Estudiando por separado el comportamiento de los cuatro tipos de mezcla, se visualiza que a medida que se incrementa el contenido de asfalto en ellas, aumenta la magnitud de la deformación producida por la acción de una carga constante. Esta tendencia se extiende al análisis comparativo de las mezclas densas, pues la MDC-3, que contiene más asfalto que la MDC-2, también sufre mayores deformaciones. Sin embargo, en el caso de las mezclas discontinuas ocurre lo contrario: aunque la SMA posee mayor cantidad de ligante, sus deformaciones son menores que las de la M1, a causa posiblemente de la adición de celulosa. Además, los microaglomerados discontinuos se deforman menos que las mezclas densas en caliente, aunque poseen mayor cantidad de asfalto; esto se debe a su gradación, pues ella permite que los esfuerzos se distribuyan uniformemente entre piedra y piedra y que la carga soportada por el mastic sea menor, disminuyendo las deformaciones.

Por otro lado puede decirse, según el comportamiento de las cuatro mezclas, que a medida que se enfrían las probetas su deformación tiende a estabilizarse, contrario a como ocurría en los primeros minutos, cuando esta aumentaba considerablemente en intervalos cortos de tiempo.

#### **4.2.7 Estabilidad Marshall**

La curva de estabilidad es similar a la de densidad, salvo que la máxima estabilidad ocurre normalmente a un contenido de asfalto ligeramente inferior al de la máxima densidad.

La tendencia general es que a medida que aumenta la cantidad de asfalto empleado, aumenta la resistencia a la carga. Por esta razón, los microaglomerados discontinuos tienen estabilidad superior que las mezclas densas en caliente, aunque en el caso del M1 la diferencia es mínima.

La SMA es la mezcla de mayor estabilidad analizada en este estudio; por eso es 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, que no permite añadirle más asfalto, ocasiona una disminución en su resistencia a la carga.

#### **4.2.8 Flujo Marshall**

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.

## 5. RECOMENDACIONES

- Ensayar diversos tipos de celulosa y asfalto en el diseño de mezclas SMA, buscando mejorar su comportamiento y encontrar la dosis óptima de fibra que debe añadirse a la mezcla.
- 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.
- 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.

## 6. CONCLUSIONES

- El SMA 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 presenta la menor deformación entre todas las mezclas estudiadas, al ser sometida a diferentes condiciones de carga, a altas y bajas temperaturas.
- El escaso porcentaje de vacíos del SMA, garantiza su impermeabilidad y consecuentemente, le hace menos vulnerable al envejecimiento y a la pérdida de estabilidad producida en la mezcla por la acción del agua.
- La SMA es más económica que las mezclas MDC-2, MDC-3, y M1, aunque su diseño contiene mayor cantidad de asfalto y fibras de celulosa. 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.

## BIBLIOGRAFIA

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation MP8 – Standard Specification for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA). (2001)

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation PP-41 – Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA). (2001)

BELIGNI, M; D. F. VILLIBOR E J. R. CINCERRE. Mistura Asfáltica do Tipo SMA (Stone Matrix Asphalt): Solução para Revestimentos de Pavimentos de Rodovias e Vias Urbanas de Tráfego Intenso. Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico. São Paulo, SP. (2000)

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

ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, Instituto Nacional de Vías, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Santafé de Bogotá, D,C, 1998.

MDOT. Construction and Performance of Stone Matrix Asphalt Pavements in Maryland: an Update. Departement of Transpotation – Office of Materials and Research Western Regional Laboratory. Hancock, Maryland, USA. (2002),

MONTEJO ALFONSO. Ingeniería de Pavimentos en Vías Terrestres. Ediciones Universidad Católica. Bogotá, 1999.

NORMAS DE ENSAYO DE MATERIALES PARA CARRETERAS, Instituto Nacional de Vías, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Santafé de Bogotá, D,C,1998.

NOSETTI, R. A. , BIANCHETTO, H. : “Estudios Comparativos de Microaglomerados Discontinuos y Stone Mastic Asphalt (sma). 1ª Parte: Resistencia al Ahuellamiento”

XIII CILA, Costa Rica, 2005.

NUNES, F. P. : “Avaliação Laboratorial de Revestimento Asfáltico Delgado Usinado a Quente do Tipo SMA 0/4 (Stone Matrix Asphalt)” XIII CILA, Costa Rica, 2005.

VASCONCELOS, L. K. : “Efeito do Tamanho Máximo Nominal dos Agregados no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Tipo SMA” XIII CILA, Costa Rica, 2005.

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

**ANEXO A: CARACTERIZACION 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 PREPARACIÓN 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	<b>93,8</b>



### 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 sumergida 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	<b>23,985</b>	



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 - Rio 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: CARACTERIZACION DE LAS PROBETAS**



B.1 GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS FABRICADAS EN LABORATORIO

Hoja: 2 de 2

PROBETA	ALTURA [cm]	DIAMETRO [cm]
C11	10,18	6,63
C12	10,28	6,6
C13	10,22	6,8
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	10,2	6,7
C41	10,22	6,6
C42	10,18	6,55
C43	10,42	6,31
D11	10,12	6,38
D12	10,15	6,54
D13	10,34	6,1
D21	10,46	6,19
D22	10,18	6,4
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



## 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 vacios + picnómetro + agua

Mezcla	% asfalto	W picnómetro	A	D	E	Gmm
	MDC-2	4,5	915,2	800	2000,5	2481,6
	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
	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
	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	5,8	915,2	800	2000,5	2469,8
	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



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

$$G_b = \frac{W_a}{W_s - W_w}$$

- G<sub>b</sub> Peso específico aparente de una mezcla asfáltica  
W<sub>a</sub> Peso de la probeta en el aire [g]  
W<sub>s</sub> Peso de la probeta saturada en el aire [g]  
W<sub>w</sub> Peso de la probeta en el agua [g]

Probeta	W <sub>a</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>w</sub>	G <sub>b</sub>
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	1185,9	678	2,33
A31	1176,3	1176,6	686,1	2,40
A32	1179,5	1179,9	686	2,39
A33	1187,4	1187,8	709	2,48
A41	1176	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	1195,1	686,6	2,35
B31	1177,3	1178	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	2,36

Mezcla	% Asfalto	G <sub>b</sub> prom
MDC-2	4,5	2,35
	5	2,38
	5,5	2,39
	6	2,37

Mezcla	% Asfalto	G <sub>b</sub> prom
MDC-3	4,8	2,34
	5,3	2,36
	5,8	2,37
	6,3	2,36

Observación: No se tuvieron en cuenta valores alejados del promedio.



#### B.4 PESO ESPECÍFICO APARENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

(1) Probeta	C12	C13	C22	C23	C32	C33
(3) Espesor de muestra (cm)	6,6	6,8	6,87	6,25	6,51	6,7
(4) W muestra al aire (g)	1180,4	1182,4	1185,3	1195,4	1185,5	1171,6
(5) W muestra + parafina (g)	1190,3	1192,9	1197,3	1204,2	1194,6	1184,2
(6) W parafina (g)	9,9	10,5	12	8,8	9,1	12,6
(7) Vol de parafina (cm <sup>3</sup> )	11,12	11,80	13,48	9,89	10,22	14,16
(8) W muestra + parafina en agua (g)	655	659,7	665,8	674,8	668,9	663,1
(9) Vol muestra + parafina (cm <sup>3</sup> )	535,3	533,2	531,5	529,4	525,7	521,1
(10) Vol de muestra (cm <sup>3</sup> )	524,18	521,40	518,02	519,51	515,48	506,94
(11) DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	2,25	2,27	2,29	2,30	2,30	2,31

(1) Probeta	C42	C43	D11	D12	D21	D22
(3) Espesor de muestra (cm)	6,55	6,31	6,38	6,54	6,19	6,4
(4) W muestra al aire (g)	1201,2	1181,9	1180,5	1197,3	1168,8	1182,8
(5) W muestra + parafina (g)	1210,6	1192,1	1191,4	1208,4	1182,1	1194,4
(6) W parafina (g)	9,4	10,2	10,9	11,1	13,3	11,6
(7) Vol de parafina (cm <sup>3</sup> )	10,56	11,46	12,25	12,47	14,94	13,03
(8) W muestra + parafina en agua (g)	682,9	663,5	671,1	683,9	670,4	677,6
(9) Vol muestra + parafina (cm <sup>3</sup> )	527,7	528,6	520,3	524,5	511,7	516,8
(10) Vol de muestra (cm <sup>3</sup> )	517,14	517,14	508,05	512,03	496,76	503,77
(11) DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	2,32	2,29	2,32	2,34	2,35	2,35

(1) Probeta	D31	D32	D41	D42
(3) Espesor de muestra (cm)	6,16	6,31	6,26	6,23
(4) W muestra al aire (g)	1177,5	1183,8	1171,6	1177,3
(5) W muestra + parafina (g)	1186,3	1192,2	1193,1	1200,7
(6) W parafina (g)	8,8	8,4	21,5	23,4
(7) Vol de parafina (cm <sup>3</sup> )	9,89	9,44	24,16	26,29
(8) W muestra + parafina en agua (g)	674,5	683,7	670,4	674
(9) Vol muestra + parafina (cm <sup>3</sup> )	511,8	508,5	522,7	526,7
(10) Vol de muestra (cm <sup>3</sup> )	501,91	499,06	498,54	500,41
(11) DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	2,35	2,37	2,35	2,35

Observación: No se tuvieron en cuenta valores alejados del promedio.



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

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

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

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

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

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

MDC-2	% en peso por material Total de mezcla	Peso específico (g/cm³)
Agr. grueso	43	2,698
Agr. Fino	51	2,655
Filler	6	2,144
<b>G agr</b>		<b>2,636</b>

MDC-3	% en peso por material Total de mezcla	Peso específico (g/cm³)
Agr. grueso	24	2,698
Agr. Fino	68,5	2,655
Filler	7,5	2,144
<b>G agr</b>		<b>2,619</b>

M1	% en peso por material Total de mezcla	Peso específico (g/cm³)
Agr. grueso	78,5	2,698
Agr. Fino	15	2,655
Filler	6,5	2,144
<b>G agr</b>		<b>2,647</b>

SMA	% en peso por material Total de mezcla	Peso específico (g/cm³)
Agr. grueso	66	2,698
Agr. Fino	23,1	2,655
Filler	10,9	2,144
<b>G agr</b>		<b>2,615</b>

**ANEXO C: DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR MARSHAL**



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



C.1 DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR EL MÉTODO MARSHALL

Proyecto: SMA

Procedencia de los agregados: Chicamocho

Peso específico del asfalto: 1,006

Hoja: 1 de 3

Mezcla N°	% de Asfalto	Espesor ( pulg)	Peso específico			% Asfalto absorbido	Volumen % total de la probeta			% vacios agregados minerales	% de asfalto efectivo	% Vacios llenos de asfalto	Peso Unitario (lb/ pulg²)
			Bulk	Máximo teórico	Máximo medido		Agregados	Vacios con aire	Asfalto				
A12	4,5	2,45	2,334										
A13	4,5	2,51	2,362										
prom			<b>2,348</b>	2,457	2,509	0,883	85,078	6,400	8,523	14,922	3,656	57,114	146,520
A22	5	2,41	2,385										
A23	5	2,41	2,379										
prom			<b>2,382</b>	2,438	2,482	0,764	85,858	4,032	10,110	14,142	4,274	71,492	148,642
A31	5,5	2,43	2,398										
A32	5,5	2,50	2,388										
prom			<b>2,393</b>	2,420	2,470	0,882	85,803	3,107	11,090	14,197	4,667	78,113	149,333
A41	6	2,38	2,376										
A42	6	2,44	2,369										
prom			<b>2,372</b>	2,402	2,452	0,907	84,602	3,273	12,125	15,398	5,147	78,744	148,026
B11	4,8	2,44	2,333										
B12	4,8	2,43	2,341										
prom			<b>2,337</b>	2,431	2,455	0,409	84,970	4,789	10,241	15,030	4,410	68,135	145,840



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



C.1 DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR EL MÉTODO MARSHALL

Proyecto: SMA      Procedencia de los agregados: Chicamocha      Peso específico del asfalto: 1,006      Hoja: 2 de 3

Mezcla N°	% de Asfalto	Espesor ( pulg)	Peso específico			% Asfalto absorbido	Volumen % total de la probeta			% vacios agregados minerales	% de asfalto efectivo	%Vacios llenos de asfalto	Peso Unitario (lb/ pulg <sup>2</sup> )
			Bulk	Máximo teórico	Máximo medido		Agregados	Vacios con aire	Asfalto				
B21	5,3	2,42	2,361										
B22	5,3	2,48	2,361										
B23	5,3	2,55	2,346										
prom			<b>2,356</b>	2,414	2,441	0,497	85,198	3,500	11,302	14,802	4,829	76,353	147,002
B32	5,8	2,39	2,374										
B33	5,8	2,47	2,368										
prom			<b>2,371</b>	2,396	2,429	0,612	85,294	2,404	12,302	14,706	5,223	83,654	147,950
B42	6,3	2,41	2,363										
B43	6,3	2,50	2,365										
prom			<b>2,364</b>	2,378	2,411	0,609	84,586	1,959	13,455	15,414	5,730	87,288	147,504
C12	5,2	2,60	2,252										
C13	5,2	2,68	2,268										
prom			<b>2,260</b>	2,440	2,470	0,516	80,920	8,505	10,575	19,080	4,710	55,422	141,013
C22	5,7	2,70	2,288										
C23	5,7	2,46	2,301										
prom			<b>2,295</b>	2,422	2,449	0,488	81,731	6,324	11,945	18,269	5,240	65,384	143,182



C.1 DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR EL MÉTODO MARSHALL

Proyecto: SMA

Procedencia de los agregados: Chicamocha

Peso específico del asfalto: 1,006

Hoja: 3 de 3

Mezcla N°	% de Asfalto	Espesor ( pulg)	Peso específico			% Asfalto absorbido	Volumen % total de la probeta			% vacios agregados minerales	% de asfalto efectivo	% Vacios llenos de asfalto	Peso Unitario (lb/ pulg <sup>2</sup> )
			Bulk	Máximo teórico	Máximo medido		Agregados	Vacios con aire	Asfalto				
C32	6,2	2,56	2,300										
C33	6,2	2,64	2,311										
prom			<b>2,305</b>	2,404	2,438	0,606	81,683	5,418	12,898	18,317	5,632	70,418	143,861
C42	6,7	2,58	2,323										
C43	6,7	2,48	2,285										
prom			<b>2,304</b>	2,387	2,424	0,685	81,201	4,926	13,873	18,799	6,061	73,796	143,777
D11	5,8	2,51	2,324										
D12	5,8	2,57	2,338										
prom			<b>2,331</b>	2,393	2,419	0,480	83,971	3,644	12,385	16,029	5,348	77,267	145,452
D21	6,3	2,44	2,353										
D22	6,3	2,52	2,348										
prom			<b>2,350</b>	2,376	2,407	0,582	84,222	2,341	13,437	15,778	5,754	85,161	146,664
D31	6,8	2,43	2,346										
D32	6,8	2,48	2,372										
prom			<b>2,359</b>	2,358	2,393	0,659	84,081	1,422	14,498	15,919	6,186	91,070	147,204
D41	7,3	2,46	2,350										
D42	7,3	2,45	2,353										
prom			<b>2,351</b>	2,342	2,376	0,669	83,358	1,037	15,605	16,642	6,680	93,769	146,725

**ANEXO D: ENSAYOS DE MODULO DE ELASTICIDAD**



D.1 ENSAYO DE MÓDULO ELÁSTICO

Constante del anillo = 10,125

Máxima Carga = 128,9155 Lb

MEZCLA TIPO MDC-2				
Esfuerzo [lb/pulg <sup>2</sup> ]	Prom de las deformaciones [pulg]			
	4,5% asfalto	5,0% asfalto	5,5% asfalto	6,0% asfalto
8,0572	0,0033	0,0017	0,0020	0,0028
16,1144	0,0049	0,0037	0,0041	0,0056
24,1717	0,0066	0,0054	0,0061	0,0076
32,2289	0,0082	0,0071	0,0082	0,0092
40,2861	0,0095	0,0087	0,0098	0,0104
48,3433	0,0111	0,0095	0,0111	0,0116
56,4005	0,0119	0,0108	0,0119	0,0131
64,4578	0,0132	0,0120	0,0135	0,0139
72,5150	0,0140	0,0133	0,0143	0,0151
80,5722	0,0152	0,0141	0,0156	0,0163
88,6294	0,0160	0,0149	0,0168	0,0175
96,6866	0,0169	0,0158	0,0176	0,0187
104,7438	0,0177	0,0170	0,0189	0,0195
112,8011	0,0185	0,0178	0,0201	0,0203
120,8583	0,0193	0,0187	0,0209	0,0211
128,9155	0,0202	0,0195	0,0213	0,0219

MEZCLA TIPO MDC-3				
Esfuerzo [lb/pulg <sup>2</sup> ]	Prom de las deformaciones [pulg]			
	4,8% asfalto	5,3% asfalto	5,8% asfalto	6,3% asfalto
8,0572	0,0008	0,0017	0,0017	0,0033
16,1144	0,0021	0,0033	0,0033	0,0053
24,1717	0,0033	0,0045	0,0050	0,0074
32,2289	0,0041	0,0054	0,0063	0,0095
40,2861	0,0050	0,0062	0,0075	0,0115
48,3433	0,0066	0,0070	0,0088	0,0128
56,4005	0,0075	0,0079	0,0096	0,0144
64,4578	0,0083	0,0087	0,0109	0,0156
72,5150	0,0095	0,0099	0,0117	0,0169
80,5722	0,0104	0,0112	0,0126	0,0185
88,6294	0,0112	0,0120	0,0134	0,0193
96,6866	0,0120	0,0128	0,0142	0,0206
104,7438	0,0129	0,0140	0,0151	0,0214
112,8011	0,0137	0,0149	0,0159	0,0222
120,8583	0,0145	0,0157	0,0167	0,0235
128,9155	0,0149	0,0169	0,0176	0,0243

MEZCLA TIPO M-1				
Esfuerzo [lb/pulg <sup>2</sup> ]	Prom de las deformaciones [pulg]			
	5,2% asfalto	5,7% asfalto	6,2% asfalto	6,7% asfalto
8,0572	0,0034	0,0028	0,0028	0,0034
16,1144	0,0060	0,0053	0,0053	0,0058
24,1717	0,0076	0,0075	0,0072	0,0081
32,2289	0,0090	0,0091	0,0091	0,0101
40,2861	0,0103	0,0106	0,0104	0,0119
48,3433	0,0112	0,0118	0,0117	0,0137
56,4005	0,0119	0,0130	0,0129	0,0153
64,4578	0,0129	0,0142	0,0138	0,0169
72,5150	0,0138	0,0154	0,0152	0,0177
80,5722	0,0147	0,0169	0,0161	0,0192
88,6294	0,0155	0,0179	0,0170	0,0204
96,6866	0,0166	0,0191	0,0180	0,0218
104,7438	0,0174	0,0199	0,0191	0,0230
112,8011	0,0179	0,0207	0,0199	0,0242
120,8583	0,0187	0,0215	0,0210	0,0250
128,9155	0,0194	0,0224	0,0220	0,0262

MEZCLA TIPO SMA				
Esfuerzo [lb/pulg <sup>2</sup> ]	Prom de las deformaciones [pulg]			
	5,8% asfalto	6,3% asfalto	6,8% asfalto	7,3% asfalto
8,0572	0,0017	0,0012	0,0017	0,0021
16,1144	0,0029	0,0033	0,0029	0,0045
24,1717	0,0041	0,0041	0,0050	0,0058
32,2289	0,0054	0,0054	0,0067	0,0078
40,2861	0,0066	0,0070	0,0079	0,0091
48,3433	0,0075	0,0079	0,0092	0,0103
56,4005	0,0083	0,0091	0,0100	0,0115
64,4578	0,0091	0,0099	0,0113	0,0128
72,5150	0,0100	0,0107	0,0121	0,0136
80,5722	0,0108	0,0120	0,0134	0,0152
88,6294	0,0116	0,0128	0,0142	0,0160
96,6866	0,0124	0,0136	0,0151	0,0173
104,7438	0,0133	0,0145	0,0159	0,0181
112,8011	0,0141	0,0153	0,0167	0,0189
120,8583	0,0149	0,0161	0,0176	0,0198
128,9155	0,0158	0,0169	0,0184	0,0210

**ANEXO E: ENSAYO CREEP**



E.1 ENSAYO CREEP

Unidad de carga Cte = 100,125 Lb  
 Cte anillo = 10,125

Hoja: 1 de 2

t	DEF Prom pulg.			
	MDC-2 4.5%	MDC-2 5.0%	MDC-2 5.5%	MDC-2 6.0%
0 seg	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
10 seg	0,000280	0,000498	0,000747	0,000809
20 seg	0,000311	0,000560	0,000809	0,000872
30 seg	0,000324	0,000610	0,000878	0,000996
40 seg	0,000374	0,000629	0,000884	0,001090
50 seg	0,000423	0,000629	0,000903	0,001183
60 seg	0,000436	0,000648	0,000934	0,001189
75 seg	0,000442	0,000685	0,000940	0,001239
90 seg	0,000467	0,000685	0,000940	0,001239
105 seg	0,000486	0,000685	0,000940	0,001245
2 min	0,000492	0,000685	0,000940	0,001251
4 min	0,000542	0,000735	0,000965	0,001264
6 min	0,000560	0,000753	0,000978	0,001289
8 min	0,000560	0,000760	0,000996	0,001295
10 min	0,000560	0,000760	0,001015	0,001307
12 min	0,000560	0,000766	0,001015	0,001326
14 min	0,000560	0,000766	0,001021	0,001326
16 min	0,000560	0,000766	0,001021	0,001326
18 min	0,000560	0,000766	0,001021	0,001326
20 min	0,000567	0,000766	0,001021	0,001326
22 min	0,000567	0,000766	0,001021	0,001326
24 min	0,000567	0,000766	0,001021	0,001326
26 min	0,000567	0,000766	0,001021	0,001332
28 min	0,000567	0,000766	0,001021	0,001332
30 min	0,000567	0,000772	0,001021	0,001332
32 min	0,000567	0,000772	0,001021	0,001332
34 min	0,000567	0,000772	0,001021	0,001332
36 min	0,000573	0,000772	0,001021	0,001332
38 min	0,000573	0,000772	0,001034	0,001332
40 min	0,000573	0,000772	0,001034	0,001332
42 min	0,000573	0,000772	0,001034	0,001339
44 min	0,000573	0,000772	0,001034	0,001339
46 min	0,000573	0,000772	0,001034	0,001339
48 min	0,000573	0,000772	0,001034	0,001339
50 min	0,000573	0,000772	0,001034	0,001339
52 min	0,000573	0,000772	0,001034	0,001339
54 min	0,000573	0,000772	0,001034	0,001339
56 min	0,000573	0,000772	0,001034	0,001339
58 min	0,000573	0,000772	0,001034	0,001339
60 min	0,000573	0,000772	0,001034	0,001339

t	DEF Prom pulg.			
	MDC-3 4.8%	MDC-3 5.3%	MDC-3 5.8%	MDC-3 6.3%
0 seg	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
10 seg	0,000379	0,000624	0,000761	0,001270
20 seg	0,000506	0,000718	0,000824	0,001397
30 seg	0,000632	0,000749	0,000938	0,001524
40 seg	0,000645	0,000780	0,000951	0,001588
50 seg	0,000664	0,000799	0,000983	0,001600
60 seg	0,000670	0,000811	0,001008	0,001619
75 seg	0,000696	0,000824	0,001014	0,001645
90 seg	0,000702	0,000836	0,001014	0,001651
105 seg	0,000708	0,000861	0,001021	0,001664
2 min	0,000714	0,000923	0,001027	0,001689
4 min	0,000822	0,000967	0,001065	0,001702
6 min	0,000835	0,000998	0,001078	0,001715
8 min	0,000854	0,001005	0,001084	0,001740
10 min	0,000879	0,001023	0,001103	0,001759
12 min	0,000885	0,001042	0,001128	0,001772
14 min	0,000898	0,001054	0,001128	0,001778
16 min	0,000904	0,001061	0,001135	0,001778
18 min	0,000910	0,001067	0,001148	0,001784
20 min	0,000942	0,001067	0,001148	0,001784
22 min	0,000948	0,001067	0,001160	0,001784
24 min	0,000980	0,001067	0,001160	0,001791
26 min	0,000999	0,001067	0,001167	0,001791
28 min	0,000999	0,001067	0,001167	0,001791
30 min	0,000999	0,001073	0,001167	0,001791
32 min	0,000999	0,001073	0,001167	0,001791
34 min	0,000999	0,001073	0,001167	0,001791
36 min	0,000999	0,001073	0,001167	0,001791
38 min	0,000999	0,001073	0,001167	0,001791
40 min	0,000999	0,001073	0,001167	0,001797
42 min	0,000999	0,001073	0,001167	0,001797
44 min	0,000999	0,001073	0,001167	0,001797
46 min	0,000999	0,001073	0,001167	0,001797
48 min	0,000999	0,001073	0,001167	0,001797
50 min	0,001005	0,001079	0,001179	0,001797
52 min	0,001005	0,001079	0,001179	0,001797
54 min	0,001005	0,001079	0,001179	0,001797
56 min	0,001005	0,001079	0,001179	0,001797
58 min	0,001005	0,001079	0,001179	0,001797
60 min	0,001005	0,001079	0,001179	0,001797

**D.1 ENSAYO CREEP**

Unidad de carga Cte = 100,125 Lb  
 Cte anillo = 10,125

Hoja: 2 de 2

t	DEF Prom pulg.			
	M-1 5,2%	M-1 5,7%	M-1 6,2%	M-1 6,7%
0 seg	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
10 seg	0,000407	0,000480	0,000645	0,000546
20 seg	0,000425	0,000486	0,000663	0,000595
30 seg	0,000436	0,000492	0,000693	0,000722
40 seg	0,000466	0,000498	0,000693	0,000795
50 seg	0,000472	0,000504	0,000693	0,000856
60 seg	0,000472	0,000516	0,000705	0,000916
75 seg	0,000472	0,000528	0,000710	0,000923
90 seg	0,000472	0,000528	0,000710	0,001001
105 seg	0,000472	0,000534	0,000716	0,001020
2 min	0,000489	0,000576	0,000758	0,001080
4 min	0,000495	0,000612	0,000764	0,001086
6 min	0,000495	0,000648	0,000781	0,001092
8 min	0,000495	0,000655	0,000781	0,001111
10 min	0,000507	0,000661	0,000793	0,001123
12 min	0,000548	0,000661	0,000793	0,001123
14 min	0,000554	0,000667	0,000793	0,001141
16 min	0,000554	0,000667	0,000793	0,001141
18 min	0,000554	0,000667	0,000793	0,001141
20 min	0,000554	0,000673	0,000817	0,001141
22 min	0,000554	0,000673	0,000817	0,001141
24 min	0,000554	0,000673	0,000817	0,001141
26 min	0,000554	0,000673	0,000817	0,001141
28 min	0,000554	0,000673	0,000817	0,001141
30 min	0,000554	0,000673	0,000817	0,001147
32 min	0,000560	0,000673	0,000829	0,001147
34 min	0,000560	0,000673	0,000829	0,001147
36 min	0,000560	0,000673	0,000829	0,001147
38 min	0,000560	0,000679	0,000829	0,001147
40 min	0,000560	0,000679	0,000829	0,001147
42 min	0,000560	0,000679	0,000829	0,001147
44 min	0,000566	0,000679	0,000835	0,001147
46 min	0,000566	0,000679	0,000835	0,001147
48 min	0,000566	0,000679	0,000835	0,001153
50 min	0,000566	0,000685	0,000835	0,001153
52 min	0,000566	0,000685	0,000835	0,001153
54 min	0,000566	0,000685	0,000835	0,001153
56 min	0,000566	0,000685	0,000841	0,001153
58 min	0,000566	0,000685	0,000841	0,001153
60 min	0,000566	0,000685	0,000841	0,001153

t	DEF Prom pulg.			
	SMA 5,8%	SMA 6,3%	SMA 6,8%	SMA 7,3%
0 seg	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
10 seg	0,000255	0,000261	0,000393	0,000601
20 seg	0,000255	0,000310	0,000439	0,000639
30 seg	0,000255	0,000342	0,000465	0,000670
40 seg	0,000261	0,000360	0,000491	0,000683
50 seg	0,000261	0,000366	0,000524	0,000689
60 seg	0,000261	0,000379	0,000530	0,000696
75 seg	0,000261	0,000385	0,000543	0,000702
90 seg	0,000261	0,000385	0,000543	0,000708
105 seg	0,000261	0,000441	0,000557	0,000708
2 min	0,000273	0,000441	0,000609	0,000708
4 min	0,000273	0,000453	0,000648	0,000714
6 min	0,000273	0,000453	0,000661	0,000727
8 min	0,000273	0,000453	0,000661	0,000733
10 min	0,000273	0,000453	0,000661	0,000752
12 min	0,000279	0,000460	0,000661	0,000752
14 min	0,000279	0,000460	0,000661	0,000759
16 min	0,000279	0,000460	0,000661	0,000759
18 min	0,000279	0,000460	0,000674	0,000759
20 min	0,000279	0,000460	0,000674	0,000771
22 min	0,000279	0,000460	0,000674	0,000771
24 min	0,000279	0,000466	0,000674	0,000771
26 min	0,000292	0,000466	0,000674	0,000771
28 min	0,000292	0,000466	0,000687	0,000771
30 min	0,000292	0,000466	0,000687	0,000771
32 min	0,000292	0,000466	0,000687	0,000784
34 min	0,000292	0,000466	0,000687	0,000784
36 min	0,000292	0,000466	0,000687	0,000784
38 min	0,000298	0,000472	0,000694	0,000784
40 min	0,000298	0,000472	0,000694	0,000790
42 min	0,000298	0,000472	0,000694	0,000790
44 min	0,000298	0,000472	0,000694	0,000790
46 min	0,000298	0,000472	0,000694	0,000790
48 min	0,000298	0,000472	0,000701	0,000790
50 min	0,000310	0,000472	0,000701	0,000797
52 min	0,000310	0,000472	0,000701	0,000797
54 min	0,000310	0,000478	0,000701	0,000797
56 min	0,000310	0,000478	0,000701	0,000797
58 min	0,000310	0,000478	0,000701	0,000797
60 min	0,000310	0,000478	0,000701	0,000797

**ANEXO F: ENSAYO ESTABILIDAD DE FLUJO**



F.1 ESTABILIDAD - FLUJO

Hoja: 1 de 2

**MDC-2**

% Asfalto	#	Estabilidad medida	H prom.	F.C	Estabilidad (libras)	Flujo (0,001")	Flujo (pulg)
4,5	1	262	6,37	1	2652,75	58	0,0231
	2	258	6,22	1,04	2716,74	62	0,0253
	3	266	6,38	1	2693,25	54	0,0215
	Prom				<b>2687,58</b>		<b>0,0233</b>
5	4	265	6,13	1,09	2924,60625	88	0,0365
	5	269	6,12	1,09	2968,75125	94	0,0390
	6	259	6,34	1,04	2727,27	96	0,0385
	Prom				<b>2873,54</b>		<b>0,0380</b>
5,5	7	275	6,16	1,09	3034,96875	126	0,0520
	8	282	6,35	1,04	2969,46	132	0,0528
	9	268	6,36	1	2713,5	124	0,0495
	Prom				<b>2905,98</b>		<b>0,0514</b>
6	10	238	6,04	1,14	2747,115	152	0,0639
	11	232	6,19	1,09	2560,41	153	0,0628
	12	229	6,31	1,04	2411,37	148	0,0596
	Prom				<b>2572,97</b>		<b>0,0621</b>

**MDC-3**

% Asfalto	#	Estabilidad medida	H prom.	F.C	Estabilidad (libras)	Flujo (0,001")	Flujo (pulg)
4,8	1	262	6,21	1,04	2758,86	68	0,0278
	2	267	6,18	1,09	2946,68	78	0,0321
	3	279	6,29	1,04	2937,87	72	0,0291
	Prom				<b>2881,14</b>		<b>0,0296</b>
5,3	4	294	6,14	1,09	3244,66	106	0,0439
	5	296	6,31	1,04	3116,88	114	0,0459
	6	288	6,48	1	2916,00	110	0,0431
	Prom				<b>3092,51</b>		<b>0,0443</b>
5,8	7	292	6,29	1,04	3074,76	136	0,0549
	8	294	6,06	1,09	3244,66	144	0,0604
	9	286	6,28	1,04	3011,58	139	0,0562
	Prom				<b>3110,33</b>		<b>0,0572</b>
6,3	10	245	6,14	1,09	2703,88	158	0,0654
	11	256	6,12	1,09	2825,28	162	0,0672
	12	263	6,34	1,04	2769,39	151	0,0605
	Prom				<b>2766,18</b>		<b>0,0644</b>



F.1 ESTABILIDAD - FLUJO

Hoja: 2 de 2

**M-1**

% Asfalto	#	Estabilidad medida	H prom.	F.C	Estabilidad (libras)	Flujo (0,001")	Flujo (pulg)
5,2	1	287	6,63	0,93	2702,46	78	0,0299
	2	294	6,6	1	2976,75	86	0,0331
	3	285	6,8	0,93	2683,63	79	0,0295
	Prom				<b>2787,62</b>		<b>0,0308</b>
5,7	4	302	6,55	0,96	2935,44	99	0,0384
	5	313	6,87	0,89	2820,52	115	0,0425
	6	310	6,25	1,04	3264,30	112	0,0455
	Prom				<b>3006,75</b>		<b>0,0421</b>
6,2	7	316	6,74	0,93	2975,54	136	0,0513
	8	325	6,51	1	3290,63	145	0,0566
	9	332	6,7	0,93	3126,20	125	0,0474
	Prom				<b>3130,79</b>		<b>0,0539</b>
6,7	10	268	6,6	0,96	2604,96	156	0,0600
	11	276	6,55	0,96	2682,72	167	0,0648
	12	275	6,31	1,04	2895,75	172	0,0692
	Prom				<b>2727,81</b>		<b>0,0647</b>

**SMA**

% Asfalto	#	Estabilidad medida	H prom.	F.C	Estabilidad (libras)	Flujo (0,001")	Flujo (pulg)
5,8	1	306	6,38	1	3098,25	75	0,0299
	2	292	6,54	0,96	2838,24	71	0,0276
	3	301	6,1	1,09	3321,91	72	0,0300
	Prom				<b>3086,13</b>		<b>0,0291</b>
6,3	4	320	6,19	1,09	3531,60	102	0,0419
	5	320	6,4	1	3240,00	96	0,0381
	6	320	6,43	1	3240,00	94	0,0371
	Prom				<b>3337,20</b>		<b>0,0390</b>
6,8	7	296	6,16	1,09	3266,73	122	0,0503
	8	306	6,31	1,04	3222,18	118	0,0475
	9	299	5,57	1,25	3784,22	131	0,0597
	Prom				<b>3424,38</b>		<b>0,0525</b>
7,3	10	282	6,26	1,04	2969,46	155	0,0629
	11	289	6,23	1,04	3043,17	135	0,0550
	12	273	6,19	1,09	3012,90	136	0,0558
	Prom				<b>3008,51</b>		<b>0,0579</b>

