

**INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA
EN LA VOLUMETRÍA DE LAS MEZCLAS SMA**

Preparado por

Unidad de Investigación Aplicada en Infraestructura Vial

Ing. Wendy Sequeira Rojas

Asistente de investigación en Pavimentos y Materiales.

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Universidad de Reno, Nevada

Tel: (775)322-26-41

e-mail: sequei12@unr.nevada.edu

Ing. Fabián Elizondo

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,

San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica

Tel: (506)2074382

e-mail: felizondo@lanamme.ucr.ac.cr

Denia Sibaja

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,

San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica

Tel: (506)2074994

e-mail: dsibaja@lanamme.ucr.ac.cr

San José, Costa Rica

Setiembre 2007

Resumen

Los crecientes volúmenes de tránsito a los que están sometidos algunos pavimentos en Costa Rica, así como el aumento en la magnitud de las cargas máximas permisibles, los climas adversos y la necesidad de pavimentos más seguros, hacen que en nuestro país, como en muchos otros, las mezclas tradicionales no cumplan con las nuevas exigencias ya que se presentan problemas de deformación permanente, superficies deslizantes y daño por humedad. Como respuesta ante tal necesidad, surgió un proyecto de investigación en el LanammeUCR, cuyo objetivo fue analizar el comportamiento de mezclas con graduación discontinua utilizando agregados y asfaltos nacionales, con el fin de generar especificaciones enfocadas a la utilización de mezclas más resistentes a la deformación plástica. La investigación evidenció problemas en una gran cantidad de granulometrías para mezclas SMA, entre ellos, el incumplimiento con diversas especificaciones internacionales, en lo referente a volumetría y drenaje de la mezcla. De igual manera, se observaron diferencias significativas entre las granulometrías utilizadas y las recomendadas por diferentes países y departamentos de transportes. Parte de las conclusiones de ese informe fueron que hasta ese momento, según los ensayos realizados, un cambio en la curva granulométrica generaba cambios considerables en los resultados obtenidos, por lo que se consideraba un factor de alta sensibilidad. Por estas razones se inició esta investigación, enfocada en analizar este factor de alta sensibilidad: la curva granulométrica y su influencia específicamente en la volumetría de las mezclas SMA.

1. INTRODUCCIÓN

A principios de la década de los años 60 la industria europea del asfalto reconoció la necesidad de desarrollar pavimentos que fueran resistentes a la deformación plástica, más resistentes al desplazamiento, al pulimento, al desgaste superficial y a diversos factores asociados con tráfico pesado y altos volúmenes de tránsito. Como respuesta ante tal necesidad surgieron las mezclas de graduación discontinua, conocidas como mezclas de matriz de agregado grueso (SMA). En Europa el uso de estas mezclas se ha popularizado para carreteras de alto volumen de tránsito, pistas de aeropuertos y

zonas portuarias, y su uso se ha extendido por todo el mundo. Las mezclas discontinuas proporcionan superficies de ruedo muy homogéneas, y una buena resistencia al deslizamiento, además de un nivel de ruido relativamente bajo. Son mezclas resistentes a la deformación plástica, gracias al alto contenido de agregado grueso; además, la gran cantidad de masticque asfáltico las convierte en mezclas más resistentes al agua. Dado el alto contenido de ligante asfáltico de estas mezclas, es posible que se produzca escurrimiento del mismo, por lo que es necesario el uso de un inhibidor de escurrimiento, tal como lo es la fibra de celulosa. También se han usado ligantes asfálticos modificados con polímeros para mejorar las propiedades mecánicas de estas mezclas y ayudar a evitar el escurrimiento. Son varios los países que han optado por el uso de mezclas discontinuas del tipo SMA, tal es el caso de Alemania (donde fueron creadas), República Checa, Dinamarca, Hungría, los Países Bajos, Estados Unidos y Argentina, entre otros. Los resultados obtenidos fueron buenos, con altos valores de resistencia retenida, una adecuada textura y adecuadas propiedades volumétricas.

2. ETAPAS Y ACTIVIDADES DEL PROYECTO

Lo que buscamos entonces, con este proyecto es estudiar la influencia de la granulometría en la volumetría de las mezclas SMA, es decir, estudiar la relación que se da entre las curvas granulométricas y el porcentaje de asfalto óptimo para la mezcla y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%VAM). Además de valorar el potencial de escurrimiento en relación con la granulometría y el contenido de asfalto.

a. Caracterización de la materia prima

En esta investigación se utilizó un solo tipo de agregado, un solo tipo de ligante asfáltico modificado con un polímero del tipo EGA (específicamente se utilizó Elvaloy) y un solo tipo de fibra de celulosa.

Ligante asfáltico

En la **Tabla 1** se presenta la caracterización físico-química del **asfalto original**, el cual se modificó para ser utilizado en este proyecto.

ENSAYO	AASHTO	Asfalto Original	Unid.	Especificaciones AASHTO M226-80	Normativa RTCA 75.01.22.04
Parámetros de pureza y seguridad					
Punto de inflamación	T 48	277 ±1	°C	min. 232	min. 232
Densidad del asfalto a 25°C	T 228	1,033 ± 0,003	gr/cm ³	-	-
Pérdida en película delgada (RTFO)	T 240	0,81 ±0,02	%	max. 0,50	max 1,0
Pérdida en película delgada TFO	T 179	0,52 ±0,02	%	max. 0,50	max 1,0
Parámetros de consistencia					
Penetración a 25°C	T 49	53,0 ± 1,0	(1/10 mm)	min. 50	min 50
Viscosidad cinemática a 125°C	T 201	1083 ± 21	cSt	-	-
Viscosidad cinemática a 135°C	T 201	566 ± 2	cSt	min. 350	min. 350
Viscosidad Cinemática a 145 °C	T 201	411 ± 1	cSt	-	-
Viscosidad Absoluta a 60°C (original)	T 201	4097 ± 11	Poise	2400-3600	2400-3600
Viscosidad Absoluta a 60°C (envejecido en TFO)	T 201	7885 ±5	Poise	máx.12000	max. 15000
Parámetros de susceptibilidad al envejecimiento y susceptibilidad térmica					
Índice de susceptibilidad térmica (VTS)	-	3,51	-	-	3,30-3,90
Razón de viscosidades (TFO)	-	1,9	-	-	máx.3,0

Tabla 1 Caracterización físico-química del ligante asfáltico original

En la **Tabla 2** se muestra la caracterización físico-química del **asfalto modificado** con 1,5% de EGA (Elvaloy), el cual se empleó para la realización de los especímenes de este proyecto.

ENSAYO	AASHTO	Asfalto Modificado con 1,5 % de Elvaloy	Unid.
Parámetros de pureza y seguridad			
Punto de inflamación	T 48	304 ±1	°C
Densidad del asfalto a 25°C	T 228	1,029 ± 0,004	gr/cm ³
Pérdida en película delgada (RTFO)	T 240	0,71 ±0,03	%
Pérdida en película delgada TFO	T 179	0,51 ±0,01	%
Parámetros de consistencia			
Penetración a 25°C	T 49	52,0 ± 1,0	(1/10 mm)
Viscosidad cinemática a 125°C	T 201	2672 ± 10	cSt
Viscosidad cinemática a 135°C	T 201	1299 ± 4	cSt
Viscosidad Cinemática a 145 °C	T 201	871 ± 1	cSt
Viscosidad Absoluta a 60°C (original)	T 201	5472 ± 4	Poise
Viscosidad Absoluta a 60°C (envejecido en TFO)	T 201	9893 ±10	Poise
Viscosidad Absoluta a 60°C (envejecido en RTFO)	T 201	14550 ±17	Poise
Parámetros de susceptibilidad al envejecimiento y susceptibilidad térmica			
Índice de susceptibilidad térmica (VTS)	-	3,01	-
Razón de viscosidades	-	1,8	-

Tabla 2 Caracterización físico-química del ligante asfáltico modificado con 1,5% de EGA

En la **Tabla 3** y la **Tabla 4** se presentan los resultados de la determinación del grado de desempeño superior del ligante original y el ligante asfáltico modificado, respectivamente.

TEMPERATURA	CONDICION ORIGINAL ASFALTO SIN ADITIVO		CONDICION ENVEJECIDA EN RTFO ASFALTO SIN ADITIVO	
	Módulo de deformabilidad G* / sen δ (kPa)	ANGULO DE FASE	Módulo de deformabilidad G* / sen δ (kPa)	ANGULO DE FASE
58°C	5,720	79,8	13,290	73,8
70°C	1,310	84	3,130	79,5
82°C	0,370	86,6	0,86	83,1
Grado de desempeño	70 (72,52°C)		70(72,74°C)	

Tabla 3 Grado de desempeño superior del asfalto original

TEMPERATURA	CONDICION ORIGINAL ASFALTO CON ADITIVO		CONDICION ENVEJECIDA EN RTFO ASFALTO CON ADITIVO	
	Módulo de deformabilidad G* / sen δ (kPa)	ANGULO DE FASE	Módulo de deformabilidad G* / sen δ (kPa)	ANGULO DE FASE
58°C	7,610	70,5	21,110	64,6
70°C	2,050	73,2	5,750	67
82°C	0,670	76,3	1,860	69,9
Grado de desempeño	76 (77,67°C)		76 (80,015°C)	

Tabla 4 Grado de desempeño superior del asfalto modificado

En la **Tabla 5** y la **Tabla 6** se presentan los resultados de la determinación del grado de desempeño intermedio del ligante asfáltico original y el ligante asfáltico modificado respectivamente.

TEMPERATURA	CONDICION ENVEJECIDA EN RTFO + PAV ASFALTO SIN ADITIVOS	
	Módulo de fatiga G* sen δ (MPa)	ANGULO DE FASE
16°C	3,555	41,8
22°C	1,925	45,1
28°C	1,065	49,6
Grado de desempeño	13 (12,088°C)	

Tabla 5 Grado de desempeño intermedio del asfalto original

TEMPERATURA	CONDICION ENVEJECIDA EN RTFO + PAV ASFALTO CON ADITIVOS	
	Módulo de fatiga G* sen δ (MPa)	ANGULO DE FASE
16°C	2,757	41,8
22°C	1,541	44,6
28°C	0,878	48,2
Grado de desempeño	10 (9,415°C)	

Tabla 6 Grado de desempeño intermedio del asfalto modificado

En resumen, según los ensayos reológicos, el ligante asfáltico modificado clasifica, de acuerdo con la metodología SHRP para determinación del grado de desempeño, como un PG-76 (10), donde 76 representa la temperatura máxima de desempeño y 10 representa la temperatura intermedia de desempeño, originalmente este asfalto se especificaba con un PG 70 – (13).

Agregado

El agregado utilizado proviene de la región este de Costa Rica, específicamente de Guápiles, en la provincia de Limón. Para poder ser utilizado en la producción de mezclas de matriz de agregado grueso, debe cumplir con los requerimientos establecidos en la AASHTO MP8-04 *Standard specification for designing stone matrix asphalt (SMA)*.

En la **Tabla 7** se presenta la caracterización del agregado.

ENSAYO	AASHTO	AGREGADO DE GUÁPILES	UNID.	ESPECIFICACIONES AASHTO MP8-04
Agregado Grueso				
Abrasión Los Angeles	T 96	21,21	%	max. 30
Partículas planas y elongadas	D 4791			
3 a 1		-	%	max. 20
5 a 1		0,0	%	max. 5
Gbs	T 85	2,652		-
Absorción	T 85	1,69	%	max. 2
Caras fracturadas	D 5821			
1 cara		100	%	min. 100
2 caras		99,8	%	min. 90
Agregado Fino				
Índice Plástico	T 90	NP		No plástico
Equivalente de arena	T 176	78		min. 50 ¹
Vacios no compactados	TP 33	37,2	%	-
Gbs	T 20	2,549		-
Absorción	T 20	3,283	%	-

¹ Especificación de acuerdo a la normativa de Argentina

Tabla 7 Caracterización de los agregados

Tanto el agregado grueso como el agregado fino cumplen con las especificaciones establecidas por AASHTO para el diseño de las mezclas SMA.

Aditivos

Se utilizó el polímero EGA (Elvaloy) para modificar el asfalto y fibra de celulosa para modificar la mezcla asfáltica.

• Polímero EGA (Elvaloy)

El asfalto es modificado con polímeros mediante un proceso de mezclado a alta temperatura y esfuerzo cortante. En este proceso el polímero se incorpora para formar una “red” tridimensional que atrapa dentro de sus espacios a las moléculas de asfalto. Esta red absorberá gran parte de los esfuerzos a los que se ve sometido el asfalto y es el factor clave que mejora el desempeño de este. En este proyecto, el asfalto fue modificado con un porcentaje de 1,5% por peso de asfalto con Etilen Glicidil Acrilato EGA (Elvaloy). En la Tabla 2, Tabla 4 y Tabla 6 se muestran los resultados del asfalto modificado, los cuales se pueden comparar con los resultados del asfalto original.

• Fibra de celulosa

La celulosa es un material de origen natural y renovable. Debido al alto porcentaje de asfalto que utilizan las mezclas con graduación discontinua, la fibra de celulosa es

utilizada como un agente estabilizador que evita el escurrimiento del ligante. Para este estudio se utilizó la fibra en su presentación granular, la cual tiene un recubrimiento de ligante AC-40 del 28% de su peso, y funciona como un agente separador. Es necesario tomar en cuenta la cantidad de asfalto que aporta la fibra a la hora de dosificar el ligante. En este caso se incorporó 0,5% de fibra celulosa por peso total de agregado.

b. Selección de las granulometrías

Con el fin de abarcar, en la medida de lo posible, los rangos granulométricos para mezclas SMA, se escogieron 15 granulometrías, tomando en consideración los rangos propuestos en las especificaciones alemanas, en el Nacional Cooperative Research Program (NCHRP 9-8), en la Federal Highway Administration (FHWA) y en las especificaciones argentinas, para estudiar su influencia sobre la volumetría de las mezclas SMA. Los rangos propuestos por dichas especificaciones se muestran en la **Figura 1** y en la **Tabla 8**.

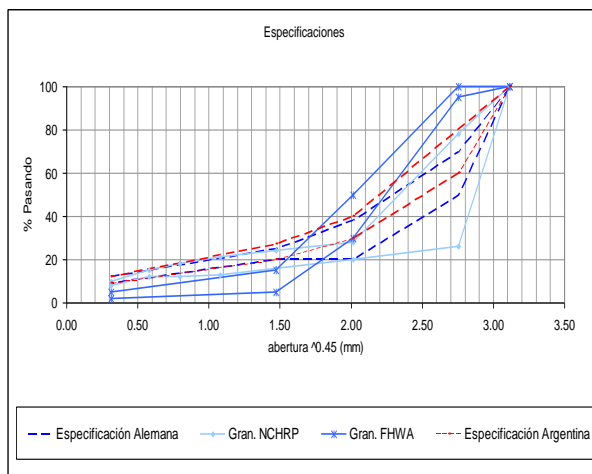


Figura 1 Especificaciones de granulometrías para mezclas SMA

Malla	NCHRP	FHWA	Especificación Alemana	Especificación Argentina
12,5 (1/2)	90-100	100	100	100
9,5 (3/8)	26-78	95-100	50-70	60
4,75 (No.4)	20-28	30-50	28-38	30-40
2,36 (No.8)	16-24	5-15	20-25	20-27
1,18 (No.16)	13-21	-	-	-
0,6 (No.30)	12-18	-	-	-
0,3 (No.50)	12-15	-	-	-
0,15 (No.100)	-	-	-	-
0,075 (No.200)	8-10	2-5	9-12	9-12

Tabla 8 Especificaciones de granulometrías para mezclas SMA

Se tomaron seis puntos de variación para el agregado grueso; para la malla 9.5mm (Nº3/8): 70%, 53% y 35%, en la malla 4,75 mm (Nº4): 28%, 24% y 20%. Para la parte fina se definieron dos tendencias: curva superior (que retiene menos agregado intermedio) y curva inferior (que retiene más agregado intermedio). Además tres puntos

de variación para la malla 0.6mm (N°30); 13%, 15% y 18%. De esta manera se cubrían los rangos granulométricos mostrados en la **Figura 1**.

A continuación se muestran las granulometrías escogidas para la investigación, según el procedimiento anteriormente descrito (Ver **Figura 2**)

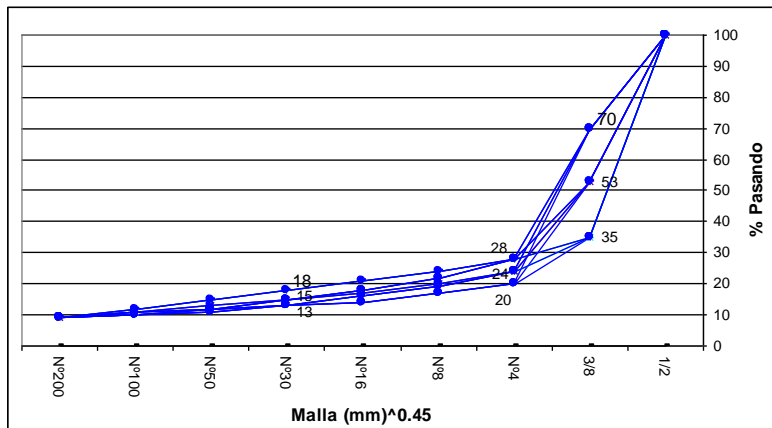


Figura 2 Granulometrías escogidas en el proyecto

Se utilizó la siguiente nomenclatura para denominar las granulometrías:

En la malla 9,5 mm (3/8): 70% (F) - 53% (I) - 35% (G).

En la malla 4,75 mm (N°4): 28% (f) - 24% (i) - 20% (g)

En la malla 2,35 mm (N°8): Curva superior (fin) – Curva inferior (int)

Cada granulometría está denominada con tres letras según el tamaño de la malla, y en los casos en que solo se denomina con dos letras es porque a partir de la malla 2.36mm (N°8) solo hay una curva. En la **Tabla 9** se muestran las granulometrías propuestas para el proyecto.

Malla		% Pasando														
pulg	mm	Gg	Ig	Fg	Gi-fin	Ii-fin	Fi-fin	Gf-fin	If-fin	Ff-fin	Gf-int	If-int	Ff-int	Gi-int	Ii-int	Fi-int
1/2	12.7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3/8	9.5	35	53	70	35	53	70	35	53	70	35	53	70	35	53	70
N°4	4.75	20	20	20	24	24	24	28	28	28	28	28	28	24	24	24
N°8	2.36	17	17	17	20	20	20	24	24	24	22	22	22	19	19	19
N°16	1.18	14	14	14	17	17	17	21	21	21	18	18	18	16	16	16
N°30	0.6	13	13	13	15	15	15	18	18	18	15	15	15	13	13	13
N°50	0.3	12	12	12	13	13	13	15	15	15	12	12	12	11	11	11
N°100	0.15	10	10	10	11	11	11	12	12	12	11	11	11	10	10	10
N°200	0.075	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

Tabla 9 Granulometrías propuestas para el estudio de mezclas SMA

De estas 15 granulometrías propuestas se descartaron dos (Gg y Fg), ya que en ambos casos se proyectó que no alcanzarían el porcentaje de vacíos de diseño (4%) que harían que el porcentaje de asfalto fuera considerablemente alto, convirtiéndolas en granulometrías poco viables. Las granulometrías seleccionadas se muestran en la **Tabla 10**.

Número	Nombre	1/2	3/8	Nº4	Nº8	Nº16	Nº30	Nº50	Nº100	Nº200
2	Ig	100	53	20	17	14	13	12	10	9
4	Gi-fin	100	35	24	20	17	15	13	11	9
5	li-fin	100	53	24	20	17	15	13	11	9
6	Fi-fin	100	70	24	20	17	15	13	11	9
7	Gf-fin	100	35	28	24	21	18	15	12	9
8	lf-fin	100	53	28	24	21	18	15	12	9
9	Ff-fin	100	70	28	24	21	18	15	12	9
10	Gf-int	100	35	28	22	18	15	12	11	9
11	lf-int	100	53	28	22	18	15	12	11	9
12	Ff-int	100	70	28	22	18	15	12	11	9
13	Gi-int	100	35	24	19	16	13	11	10	9
14	li-int	100	53	24	19	16	13	11	10	9
15	Fi-int	100	70	24	19	16	13	11	10	9

Tabla 10 Granulometrías seleccionadas para el estudio de mezclas SMA.

3. RESULTADOS

El objetivo planteado para el presente trabajo fue analizar la influencia de la granulometría en la volumetría de las mezclas SMA con el fin de definir, por un lado aquellos tamaños de partículas críticos, que tuvieran influencia directa en las variables volumétricas, y segundo, definir una especificación granulométrica para este tipo de mezclas con la cual se garantice al máximo el cumplimiento de especificaciones volumétricas. Estas especificaciones volumétricas se definen en la **Tabla 11**.

Propiedad	Lugar						
	Colorado DOT	Oklahoma	Ohio	FHWA	AASHTO MP 8-04	NCHRP	Argentina
% Vacíos	3 – 4	4	3.5	03-Abr	4	4	4
Tamaño agregado	3/8" – 1/2" – 3/4"			1/2"		25 mm – 4.75 mm	
%VMA (mínimo)	17	17	16 – 19	17	17	17	17
% Escurrimiento (máximo) ²	0.3	0.2	0.33	0.3	0.3	0.3	0.3
% As PTM		6	5.8 – 7.5	6 mín	6 mín		6.5mín
Superpave PG	76 – 28	76 – 28	76 – 22				
% Fibra	0.2 – 0.4	0.3 – 0.4					0.3
VCA _{MX} /VCA _{DRC}			<1.0		<1.0	<1.0	<1.0
Esfuerzo de Compactación				50 golpes	75 giros		50 golpes
% RR Tensión Diametral (mínimo)			80			70	

¹2% corresponde a climas fríos y 4% a climas cálidos

²Según Prueba de Schellenberg

³AASHTO T305

Tabla 11: Resumen de Normas Internacionales para SMA

a. Resultados de volumetría para las mezclas diseñadas a partir de las granulometrías seleccionadas:

Para las condiciones planteadas y que se definieron en apartados anteriores, se realizaron los diseños de mezcla para las 13 granulometrías características, las cuales como se menciona son representativas de las diferentes especificaciones granulométricas internacionales, garantizando que este esquema experimental abarcaría en la medida de lo posible las diferentes alternativas o granulometrías para este tipo de mezclas.

Es importante recalcar que, de las 15 granulometrías propuestas, 2 de ellas tuvieron que ser eliminadas por proyectarse que no lograrían el porcentaje de vacíos de diseño (4%) o que harían que el porcentaje de asfalto fuera considerablemente alto, convirtiéndolas en granulometrías poco viables y con problemas de escurrimiento. El reconocer estas granulometrías es de suma importancia pues definen rangos granulométricos con los cuales no es posible lograr el cumplimiento de especificaciones y que mas adelante serán tomados en cuenta para la definición de las especificaciones granulométricas

Los datos para las diferentes granulometrías diseñadas correspondientes al % Asfalto óptimo, %VAM, %VFA y escurrimiento de asfalto se muestran en la **Tabla 12**

Gran.	Nom.	Porcentaje Pasando									Parámetros volumétricos				% Esc.
		½	3/8	Nº4	Nº8	Nº16	Nº30	Nº50	Nº100	Nº200	% Va	% As op	% VAM	% VFA	
2	Ig	100	53	20	17	14	13	12	10	9	4.0	13.1	25.1	-	1.37
4	Gi-fin	100	35	24	20	17	15	13	11	9	4.0	7.3	17.1	76.6	0.39
5	Ii-fin	100	53	24	20	17	15	13	11	9	4.0	7.6	16.9	80.6	0.25
6	Fi-fin	100	70	24	20	17	15	13	11	9	4.0	8.7	22.1	67.0	0.12
7	Gf-fin	100	35	28	24	21	18	15	12	9	4.0	6.4	15.0	75.1	0.01
8	If-fin	100	53	28	24	21	18	15	12	9	4.0	6.6	15.0	75.7	0.04
9	Ff-fin	100	70	28	24	21	18	15	12	9	4.0	6.8	16.0	75.0	0.06
10	Gf-int	100	35	28	22	18	15	12	11	9	4.0	6.8	16.5	75.0	0.19
11	If-int	100	53	28	22	18	15	12	11	9	4.0	7.2	16.7	76.4	0.11
12	Ff-int	100	70	28	22	18	15	12	11	9	4.0	7.1	16.8	76.5	0.15
13	Gi-int	100	35	24	19	16	13	11	10	9	4.0	8.1	18.3	85.1	0.43
14	Ii-int	100	53	24	19	16	13	11	10	9	4.0	8.8	20.2	75.7	0.11
15	Fi-int	100	70	24	19	16	13	11	10	9	4.0	9.3	24.3	76.2	0.36

Tabla 12 Resumen de resultados de volumetría para cada granulometría

b. Resultados del análisis estadístico para el análisis de variancia y correlaciones de los modelos planteados:

Con base en las variables independientes (granulométricas: % pasando cada malla) y las variables respuesta (volumétricas) se planteó inicialmente un análisis para identificar cuales de aquellas variables independientes eran significativas en la definición de las variables respuesta.

Este análisis evidenció que las mallas No.3/8, No.4, No.8 y la interacción de las mallas No4 con No8, explicaban mayormente el comportamiento de las variables volumétricas. En la **Tabla 13** se muestra cada variable y el valor de Prob < |t| asociado a la significancia de cada una de estas variables independientes respecto a las variables respuesta

Variables respuesta	Malla 3/8	Malla No.4	Malla No.8	Mallas No4*No.8
%Asf. Óptimo	0.4921	0.5300	0.0314	<.0001
% VAM	0.0251	0.9279	0.0877	0.2083
% Escurrimiento	0.3713	0.6393	0.0459	0.0008

Tabla 13 Resumen de significancia de variables independientes

Una vez definidas las variables granulométricas que influían sobre los parámetros volumétricos, se establecieron modelos para cada una de ellas, con el fin de contabilizar su peso o influencia sobre la variable respuesta, y utilizar dicho modelo para aproximar las variables de interés, previo a la realización de ensayos de laboratorio.

Las ecuaciones características para cada uno de los parámetros volumétricos se presentan a continuación

Ecuaciones características

$$\%As \text{ óptimo} = 17.88 + 0.023 \%Pasando \ 3/8 + 0.058 \%Pasando \ N4 - 0.644 \%Pasando \ N8 + 0.173 (\%PasandoN4 - 25.538) (N8 - 20.923)$$

Ecuación 1

$$\%VAM = 37.553 + 0.087 \%Pasando \ 3/8 + 0.054 \%Pasando \ N4 - 1.231 \%Pasando \ N8 + 0.138 (\%PasandoN4 - 25.538) (N8 - 20.923)$$

Ecuación 2

$$\%VFA = 114.475 - 0.121 \%Pasando \ 3/8 + 1.771 \%Pasando \ N4 - 3.966 \%Pasando \ N8 + 1.769 (\%PasandoN4 - 25.538) (N8 - 20.923)$$

Ecuación 3

$$\%Escurrecimiento = 2.114 - 0.002 \%Pasando \ 3/8 + 0.023 \%Pasando \ N4 - 0.119 \%Pasando \ N8 + 0.042 (\%PasandoN4 - 25.538) (N8 - 20.923)$$

Ecuación 4

La correlación entre el valor obtenido para la variable respuesta en el diseño de mezcla, con el valor predicho por el modelo se puede observar de manera gráfica en la **Figura 3**. Se evidencia en dicha figura un ajuste importante de los modelos propuestos con los valores reales obtenidos mediante el diseño en laboratorio, lo anterior se refuerza mediante las correlaciones encontradas para cada uno de los modelos y que se presentan en la **Tabla 14**.

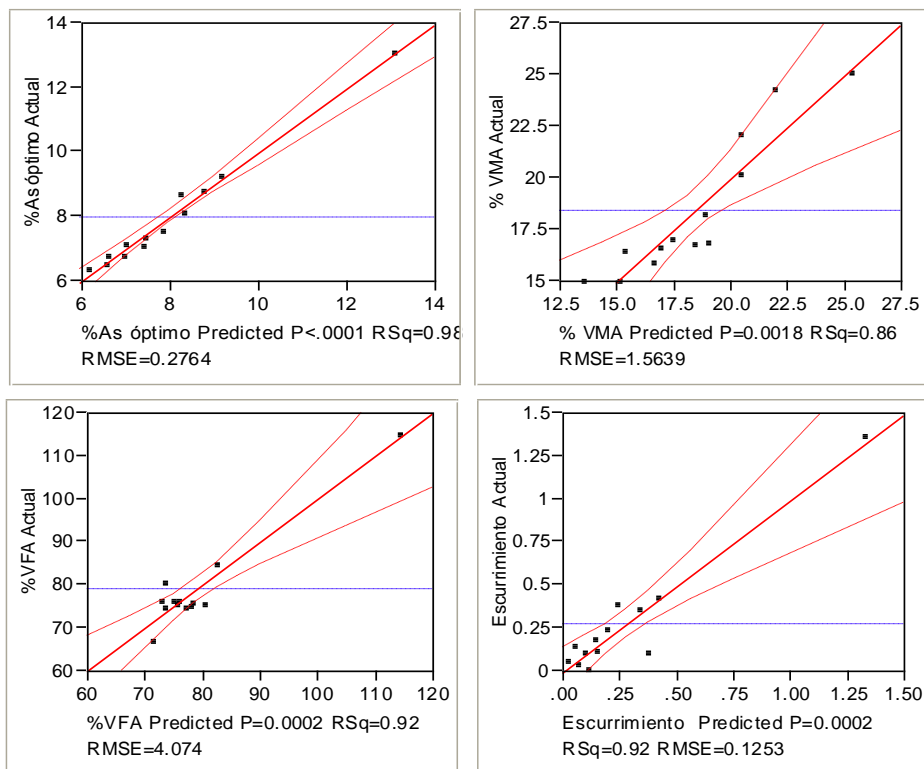


Figura 3: Relación entre los datos obtenidos en el laboratorio con los predichos por el modelo

Variabes Respuesta	R ²	R ² ajustado	Raíz media del Error ²	Promedio de la variable respuesta
%As óptimo	0.984	0.976	0.276	7.981
% VAM	0.858	0.787	1.564	18.462
%VFA	0.916	0.875	4.074	79.243
% Ecurrimiento	0.92	0.875	0.12	0.276

Tabla 14 Valores de ajuste del modelo

Como información complementaria para el análisis y definición de las especificaciones granulométricas para las mezclas asfálticas del tipo SMA se definieron las correlaciones por separado entre las variables dependientes y las variables respuesta y así delimitar los rangos granulométricos con los que se pudiera cumplir con las especificaciones volumétricas. Estas correlaciones aparecen en las **Figuras 4, 5 y 6**.

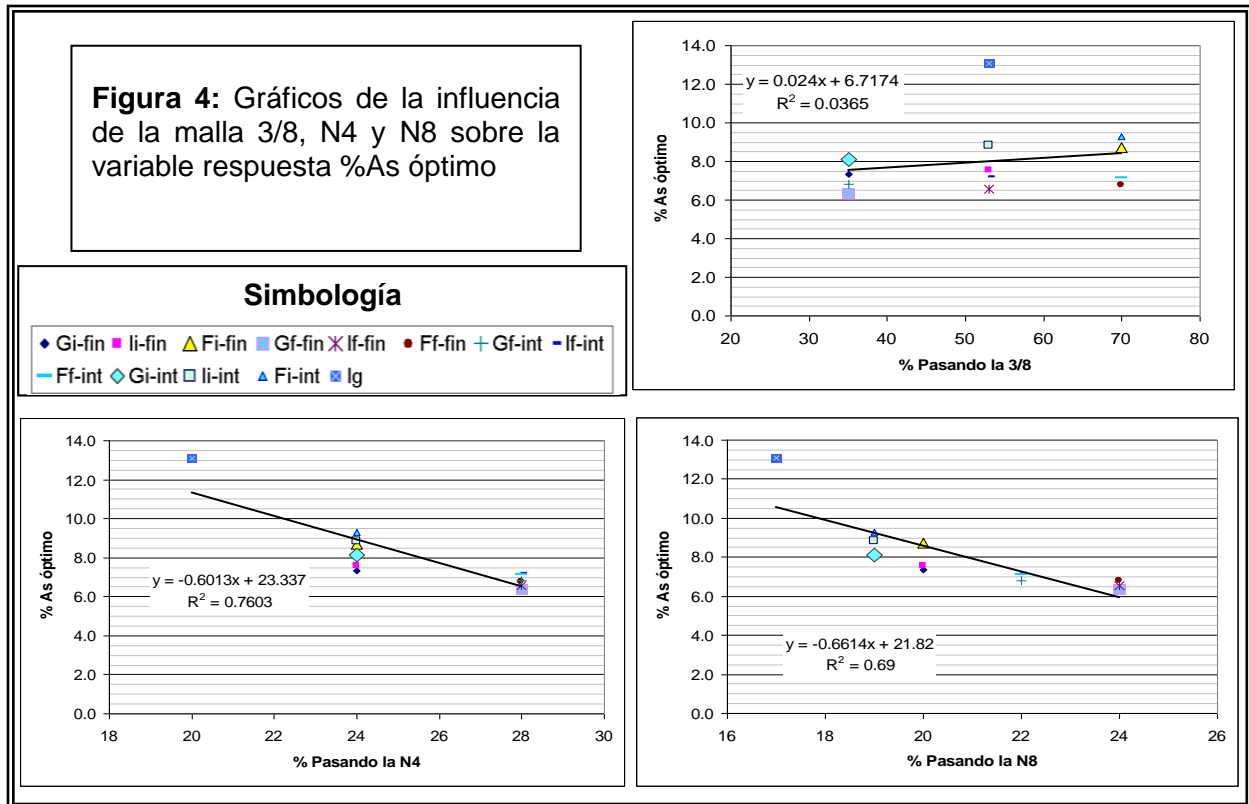


Figura 5: Gráficos de la influencia de la malla 3/8, N4 y N8 sobre la variable respuesta %VAM

Simbología

- ◆ Gi-fin ■ li-fin ▲ Fi-fin □ Gf-fin ✖ lf-fin ● Ff-fin + Gf-int - lf-int
- Ff-int ◇ Gi-int □ li-int ▲ Fi-int ✖ lg

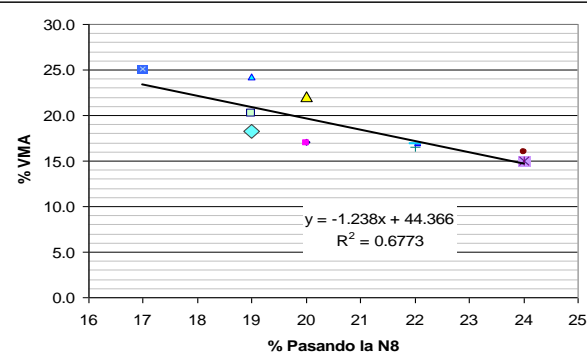
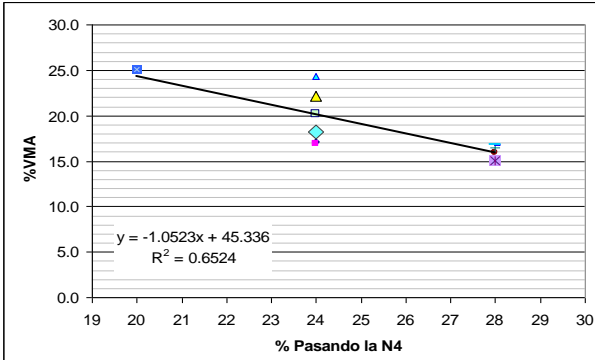
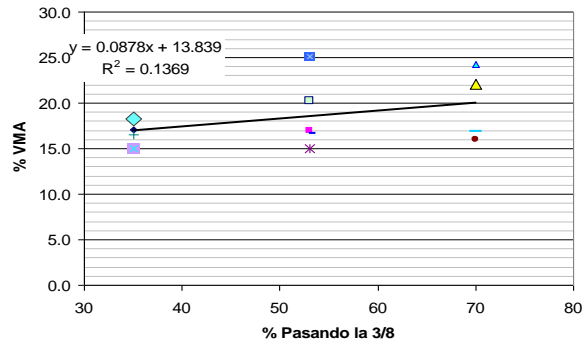
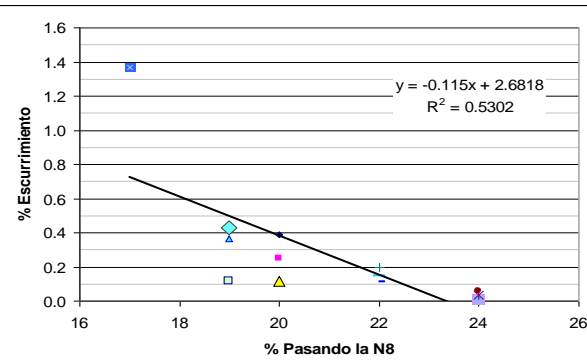
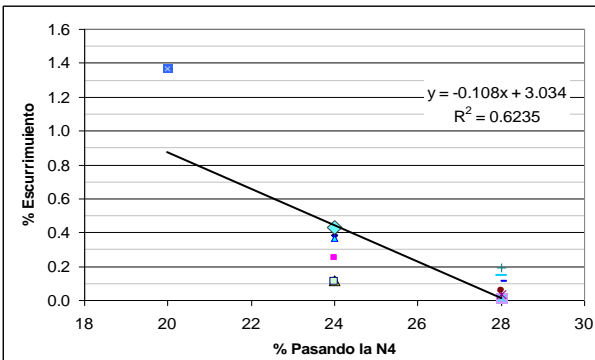
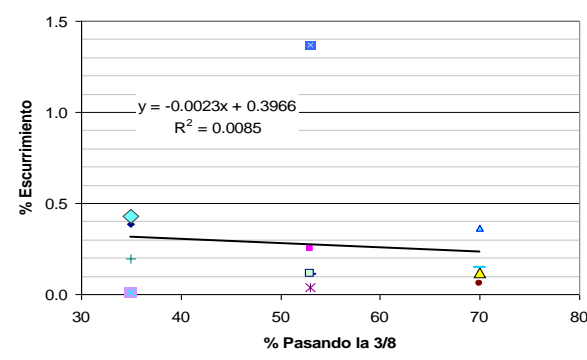


Figura 6: Gráficos de la influencia de la malla 3/8, N4 y N8 sobre la variable respuesta %Escorrimento

Simbología

- ◆ Gi-fin ■ li-fin ▲ Fi-fin □ Gf-fin ✖ lf-fin ● Ff-fin + Gf-int - lf-int
- Ff-int ◇ Gi-int □ li-int ▲ Fi-int ✖ lg



4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base en los resultados estadísticos y modelos que definen la relación e influencia de la granulometría en los parámetros volumétricos (desarrollados en el apartado anterior), se definirán rangos granulométricos que logren en la medida de lo posible el cumplimiento de especificaciones volumétricas para las mezclas SMA.

Con base en el análisis estadístico realizado, se logró determinar un modelo para cada una de las variables volumétricas, el cuál se resume en la Ecuación 1, 2, 3 y 4, teniendo como punto de partida la cantidad de material pasando las mallas N3/8, N4 y N8. Las otras mallas se consideraron inicialmente en el análisis, sin embargo como se mencionó, estas mallas no resultaban significativas por lo que se descartan a la hora de generar el modelo.

Este primer análisis nos define un comportamiento de los parámetros volumétricos ante una variación en los porcentajes pasando de las mallas representativas. Este efecto se establece de manera cualitativa en la **Tabla 14**.

Variables respuesta	Malla 3/8	No.4	No.8
%Asf. Óptimo	Aumenta	Disminuye	Disminuye
% VAM	Aumenta	Disminuye	Disminuye
% Escurrimiento	Disminuye	Disminuye	Disminuye

Tabla 14: Resumen de la influencia de cada malla sobre la variable respuesta

Como se puede observar los resultados obtenidos son congruentes con la teoría, donde para un aumento en los materiales más gruesos (por encima de la malla No.8) es de esperar que el %VAM aumente, y por consiguiente el asfalto óptimo y el porcentaje de escurrimiento también.

Además mediante el análisis estadístico, se logró determinar que la malla con mayor influencia sobre los parámetros volumétricos especificados para muestras SMA, es la malla No. 8. Por lo que esta variable tendrá especial importancia en la definición de las especificaciones granulométricas.

Una vez definido el comportamiento de los parámetros volumétricos en función de la granulometría (específicamente las mallas No.3/8, No.4 y No.8) se debían plantear las restricciones, que fueron definidas por las especificaciones para los parámetros volumétricos de las mezclas SMA mostradas en la **Tabla 11**. A continuación se presenta el análisis para la definición de la especificación granulométrica de mezclas SMA en Costa Rica.

Porcentaje de asfalto óptimo:

En cuanto al porcentaje de asfalto óptimo (%As óptimo) se buscó fijar una banda que además de adecuarse a las especificaciones internacionales, involucrara contenidos de asfalto óptimo viables; en este sentido se definió limitarla inferiormente por 6% (% mínimo de asfalto para mezclas SMA) y en la parte superior por 8% (% de asfalto máximo para ser considerado como factible de producir) y encontrar, para dicha banda, los respectivos porcentajes pasando cada malla.

Con base en los criterios anteriores y reconociendo estadísticamente que el porcentaje pasando la malla No. 8 define significativamente el contenido de asfalto, se utilizaron los gráficos de correlación entre esta malla y el contenido de asfalto para especificar un porcentaje entre el 20% y 26% pasando este tamiz, con el fin de cumplir el 8% máximo y el 6% mínimo de asfalto respectivamente. Se debe tener presente que entre mayor sea el porcentaje pasando la malla No.8 dentro de este rango el contenido de asfalto óptimo se reduce drásticamente.

Para definir los valores de especificación para la malla No.4, dado que estadísticamente esta malla no tenía una influencia significativa en los parámetros volumétricos, el estudio se basó en dos consideraciones, la primera relacionada con que, los porcentajes pasando esta malla debían de ser tales que permitieran el cumplimiento de los rangos especificados para la malla No.8; y la segunda que este rango debía de proveer las características de discontinuidad características de las mezclas SMA.

En este sentido se definió como mínimo el porcentaje de 24% pasando la malla No.4 como aquel porcentaje comprobado, que permitiría cumplir la especificación para la malla No.8 de 20% mínimo.

Es importante mencionar, que las granulometrías eliminadas al inicio del estudio (Granulometrías 1 y 3), por no cumplir con los parámetros volumétricos, (además) fueron granulometrías que incumplían esta condición presentando porcentajes pasando menores al 24% la malla No. 4 (específicamente 20%).

Como se mencionó, el porcentaje máximo definido para el porcentaje pasando la malla No. 4 se estableció tratando de proveer las características de discontinuidad de las mezclas SMA, siendo el máximo definido para el porcentaje pasando la malla No. 4 de 30%; además como lo veremos más adelante, el aumento de este valor tendría repercusiones negativas en el %VAM ya que lo disminuye a valores por debajo del 17%, especificado para mezclas SMA.

Para la especificación de la malla No.3/8, se reconoció que esta tenía una influencia importante en el porcentaje de asfalto óptimo, ya que este parámetro aumenta conforme aumenta el porcentaje pasando esta malla. Sin embargo de acuerdo con los análisis estadísticos y las tendencias analizadas, el cumplimiento del rango para el contenido de asfalto especificado, se presentó para todos los casos analizados de porcentajes pasando la malla 3/8, siempre y cuando existiera cumplimiento de los rangos definidos en la malla No.8 y No.4. Basado en los alcances de este estudio y de acuerdo a lo mencionado se especificó un porcentaje de 35% o mayor (hasta 70% según los casos estudiados) como el rango definido para la malla No.3/8

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%VAM)

En cuanto al porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%VAM) se estableció como especificación por cumplir, un valor mínimo para adecuarse a las especificaciones internacionales, el cual se define en la mayoría de ellas como % VAM min = 17%. Esta restricción definiría el límite superior del rango granulométrico, en conjunto con el porcentaje mínimo de 6% de asfalto definido en el análisis anterior

Al igual que en el caso del contenido de asfalto, el porcentaje pasando la malla No.8 es la variable con mayor peso y significancia para definir el %VAM, de la misma manera mediante los gráficos de correlación entre esta malla y el %VAM, se especificó un porcentaje máximo de 22% el cual garantiza el cumplimiento del %VAM min. Se debe de tener presente que entre mayor sea el porcentaje pasando la malla No.8 el porcentaje de vacíos en el agregado mineral se reduce drásticamente.

Para definir los valores de especificación en la malla No.4, dado que estadísticamente esta malla no tenía una influencia significativa en los parámetros volumétricos, su definición se basó en la especificación de un porcentaje máximo que permitiera el cumplimiento de las especificaciones definidas para la malla No.8. Además mediante el análisis de la correlación entre el porcentaje pasando la malla No.4 y el %VAM para el marco experimental propuesto, se definió un valor máximo comprobado que garantizaba el cumplimiento del %VAM.

En este sentido se definió como máximo el porcentaje de 27% pasando la malla No.4 como aquel porcentaje comprobado, que permitiría cumplir la especificación para el %VAM min de 17%. Se debe aclarar que este porcentaje es posible que pueda aumentar un poco (hasta 30%), sin embargo dado el marco experimental inicial no se pudo verificar esta condición por lo que se prefiere ser conservador y definir el valor de 27%

Al igual que para caso del contenido de asfalto, en la especificación de la malla No.3/8, se reconoció que esta tenía una influencia importante en el %VAM, aumentándolo conforme aumenta el porcentaje pasando esta malla, sin embargo de acuerdo con los análisis estadísticos y las tendencias analizadas, el cumplimiento del rango para el contenido de vacíos en el agregado mineral, se presentó para todos los casos analizados de porcentajes pasando la malla 3/8, siempre y cuando existiera cumplimiento de los rangos definidos en la malla No.8 y No.4. Basado en los alcances de este estudio y de acuerdo a lo mencionado se especificó un porcentaje de 35% o mayor (70% según los casos estudiados) como el rango definido para la malla No.3/8

Porcentaje de escurrimiento del ligante asfáltico

En cuanto al porcentaje de escurrimiento y con base en los resultados obtenidos, para los cuales la mayoría de los valores se encuentran dentro de especificación (% Escurrimiento < 0.3%), se pudo concluir que restringiendo los porcentajes pasando la malla No.8 a valores por encima de 20% y No.4 a valores por encima del 24% se evitaba el incumplimiento de especificación. Es importante aclarar que estos mismos valores fueron definidos como valores mínimos para evitar contenidos de asfalto óptimos excesivos y/o no factibles.

Como resumen de los análisis anteriores se presenta la **Tabla 15** la cual sintetiza las restricciones granulométricas, con base en el cumplimiento de los parámetros volumétricos

Variables respuesta	Porcentaje pasando Malla 3/8		Porcentaje pasando No.4		Porcentaje pasando No.8	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
%Asf. Óptimo	35%	70%	24%	30%	20%	26%
% VAM	35%	70%	-	27%	-	22%
% Escurrimiento	-	-	24%	-	20%	-

Tabla 15: Restricciones granulométricas según los parámetros volumétricos estudiados

5. CONCLUSIONES

La principal conclusión a la que se llega con el presente estudio se presenta en el gráfico de la **Figura 7** que muestra la banda de granulometrías para mezclas SMA. Los datos se observan en la **Tabla 16**.

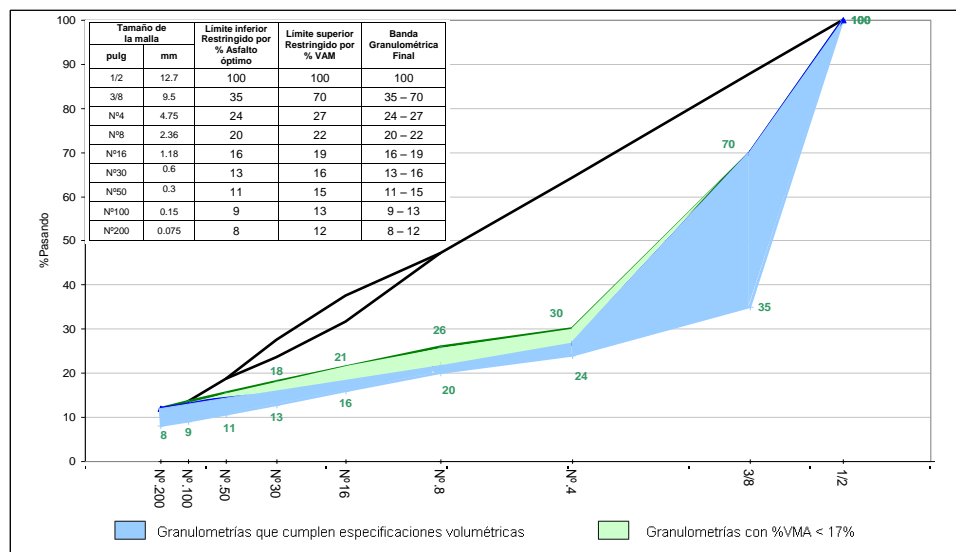


Figura 7: Bandas granulométricas finales para cumplimiento de especificaciones volumétricas de mezclas SMA

En estas especificaciones se incluyen dos bandas granulométricas la primera corresponde a aquella para la cual todas las especificaciones volumétricas son cubiertas. Sin embargo por lo restrictiva que es esta banda para las mallas No. 8 y No.4 se propone una segunda especificación en donde se amplía la especificación para las mallas citadas, sin embargo se aclara que estas granulometrías tendrán como efecto una disminución en el %VMA con el cual se incumpliría el valor mínimo de 17%.

Los parámetros volumétricos son altamente sensibles a los porcentajes pasando la malla No. 8, para la cual el rango permisible para cumplir con las especificaciones volumétricas se encuentra entre 20% y 22%.

De acuerdo con los modelos desarrollados el porcentaje de asfalto óptimo (%Asf opt) aumenta al incrementar el porcentaje pasando la malla 3/8 y disminuye al aumentar los porcentajes pasando las mallas No.4 y No.8.

De acuerdo con los modelos desarrollados los vacíos en el agregado mineral (%VAM) aumentan al aumentar el porcentaje pasando la malla 3/8 y disminuyen al aumentar los porcentajes pasando las mallas No.4 y No.8.

De acuerdo con los modelos desarrollados el escurrimiento aumenta al aumentar el porcentaje pasando la malla 3/8 y disminuyen al aumentar los porcentajes pasando las mallas No.4 y No.8

Se reconoce que el alcance del estudio estuvo limitado por la utilización de una única fuente de agregado y un único ligante asfáltico, sin embargo estas condiciones son bastante representativas de las existentes en Costa Rica, donde se dispone únicamente de un tipo de ligante asfáltico AC-30, que en caso de requerirse debe ser modificado en planta. Por otra parte el agregado utilizado ha sido considerado como un agregado con muy buenas características y estándares en cuanto a cubicidad, absorción, resistencia, etc; requisitos necesarios para su utilización en mezclas SMA.

Se recomienda mejorar la cubrición del agregado, mediante la producción utilizando impactores, aunque este agregado cumple con las especificaciones en cuanto a caras fracturadas y partículas planas y elongados, por comparación visual con agregados utilizados para este tipo de mezclas en otros países, se deben mejorar algunas características en este sentido. Esta mejoría permitiría aumentar la especificación superior de la banda granulométrica al aumentar los vacíos en el agregado mineral

Se recomienda evaluar el desempeño, en cuanto a deformación permanente, resistencia al daño por humedad y fricción para las granulometrías dentro de las bandas especificadas, con el fin de evaluar la influencia de la granulométrica en el desempeño y basar los rangos granulométricos no solo en parámetros volumétricos sino también en su comportamiento mecánico o funcional.

Referencias bibliográficas:

1. "Procedure for Determining Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot Mix Asphalt" Tabla 2A del Informe NCHRP 9-39.
2. María Isabel González. *"Análisis Estadístico con JMP. Una Introducción"*. Editorial Universidad Estatal a Distancia. Primera Edición, 2004.
3. AASHTO (2004). "Designing Stone Matrix Asphalt (SMA)" Designation MP 8-04. American Association of State Highway and Transportation Officials.
4. AASHTO (2002). "Designing Stone Matrix Asphalt (SMA)" Designation PP 41-02. American Association of State Highway and Transportation Officials.
5. AASHTO (1997). "Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures". Designation T 305-97 (2001). American Association of State Highway and Transportation Officials.
6. E. Ray Brown et.al. "Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) mixtures in the United States" NCAT Report N° 97-1, 1997.
7. Hongbin Xie et.al "4,75 mm NMA Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixtures", NCAT Report 03-05, 2003.