

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

INFORME FINAL

Preparado por
Subprograma de investigación aplicada en Infraestructura vial

Nombre de los investigadores

Ing. Wendy Sequeira

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)2074251

E-mail: wsequeira@lanamme.ucr.ac.cr

Código Postal: 2060, Costa Rica

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

San José, Costa Rica

Marzo 2007

TABLA DE CONTENIDOS

LISTA DE FIGURA	III
LISTA DE TABLA.....	IV
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
<i>Antecedentes</i>	1
<i>Justificación e Importancia</i>	2
<i>Objetivo General</i>	3
<i>Objetivos Específicos</i>	3
CAPÍTULO 2.....	4
ETAPAS Y ACTIVIDADES DEL PROYECTO	4
<i>Primera Etapa</i>	4
<i>Segunda Etapa</i>	8
CAPÍTULO 3.....	9
CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	9
<i>Ligante asfáltico</i>	9
<i>Agregado</i>	11
<i>Aditivos</i>	12
<i>Polímero EGA (Elvaloy)</i>	12
<i>Fibra de celulosa</i>	13
CAPÍTULO 4.....	14
DRENAJE DE MEZCLAS SMA.....	14
<i>Influencia de la granulometría en el drenaje de las mezclas SMA</i>	14
<i>Influencia de la Temperatura en el drenaje de las mezclas SMA</i>	17
CAPÍTULO 5.....	19
VOLUMETRÍA DE LAS MEZCLAS SMA.....	19
<i>Influencia de la granulometría en la volumetría de las mezclas SMA</i>	19
<i>Influencia de la temperatura en la volumetría de las mezclas SMA</i>	32
CAPÍTULO 6.....	34
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	34
<i>Conclusiones específicas</i>	34
Asfalto Efectivo:	35

Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (%VMA).....	35
Porcentaje de Vacíos llenados con asfalto	36
Porcentaje de Asfalto Óptimo	36
<i>Conclusiones Generales</i>	37
<i>Recomendaciones</i>	38
REFERENCIAS	39
BIBLIOGRAFÍA.....	39
APÉNDICES.....	39
APÉNDICE A.....	A-1
APÉNDICE B.....	B-1
APÉNDICE C.....	C-1
APÉNDICE D.....	D-1
APÉNDICE E.....	E-1
APÉNDICE F.....	F-1

LISTA DE FIGURA

Figura 1 Especificaciones de granulometrías para mezclas SMA	4
Figura 2 Granulometrías escogidas en el proyecto	6
Figura 3 Escurrimientos de la primera etapa	14
Figura 4 Drenajes para el contenido óptimo de asfalto	15
Figura 5 Comparación de temperaturas de mezclado en el escurrimiento	17
Figura 6 Ajuste del Modelo y límites de confianza para el porcentaje de asfalto efectivo.....	16
Figura 7 Gráfico de Residuos contra valores predichos por el modelo	18
Figura 8 Gráfico de Contornos para “% de asfalto efectivo”	19
Figura 9 Ajuste del Modelo y límites de confianza para el porcentaje de vacíos en el agregado mineral .	20
Figura 10 Gráfico de Residuos contra valores predichos por el modelo	22
Figura 11 Gráfico de Contornos para “%VMA”	23
Figura 12 Ajuste del Modelo y límites de confianza para el porcentaje de vacíos llenados con asfalto. ...	24
Figura 13 Gráfico de Residuos contra valores predichos por el modelo	26
Figura 14 Gráfico de Contornos para “%VFA”	27
Figura 15 Ajuste del Modelo y límites de confianza para el porcentaje de asfalto óptimo.	28
Figura 16 Gráfico de Residuos contra valores predichos por el modelo	30
Figura 17 Gráfico de Contornos para “% Asfalto óptimo”	31
Figura 18 Porcentaje de asfalto óptimo para el diseño de mezcla a dos temperaturas	32
Figura 19 Porcentaje VMA para el diseño de mezcla a dos temperaturas.....	33
Figura 20 Porcentaje VFA para el diseño de mezcla a dos temperaturas.....	33

LISTA DE TABLA

Tabla 1 Especificaciones de granulometrías para mezclas SMA.....	5
Tabla 2 Granulometrías seleccionadas para el estudio de mezclas SMA.....	7
Tabla 3 Porcentajes retenidos de agregado grueso, intermedio y fino de las granulometrías estudiadas. .	7
Tabla 4 Caracterización físico-química del ligante asfáltico original	9
Tabla 5 Caracterización físico-química del ligante asfáltico modificado con 1,5% de Elvaloy	10
Tabla 6 Grado de desempeño superior del asfalto original	10
Tabla 7 Grado de desempeño superior del asfalto modificado.....	10
Tabla 8 Grado de desempeño intermedio del asfalto original.....	11
Tabla 9 Grado de desempeño intermedio del asfalto modificado	11
Tabla 10 Caracterización de los agregados.....	12
Tabla 11 Resumen de análisis ANOVA. Efecto de la granulometría en la volumetría de mezclas SMA. Primera Etapa	20
Tabla 12 Resultados de los diseños de mezcla a temperaturas altas y bajas.....	15
Tabla 13 Resumen de ajuste para la variable respuesta “% de asfalto efectivo”	16
Tabla 14 Análisis de Variancia para la variable respuesta “% de asfalto efectivo”	16
Tabla 15 Falta de ajuste para la variable respuesta “% de asfalto efectivo”	17
Tabla 16 Estimadores de los parámetros para la variable respuesta “% de asfalto efectivo”	17
Tabla 17 Resumen de ajuste para la variable respuesta “%VMA”	21
Tabla 18 Análisis de Variancia para la variable respuesta “%VMA”	21
Tabla 19 Falta de ajuste para la variable respuesta “%VMA”	21
Tabla 20 Estimadores de los parámetros para la variable respuesta “%VMA”	22
Tabla 21 Resumen de ajuste para la variable respuesta “%VFA”.....	25
Tabla 22 Análisis de Variancia para la variable respuesta “%VFA”	25
Tabla 23 Falta de ajuste para la variable respuesta “%VFA”	25
Tabla 24 Estimadores de los parámetros para la variable respuesta “%VFA”	26
Tabla 25 Resumen de ajuste para la variable respuesta “% asfalto óptimo”.....	29
Tabla 26 Análisis de Variancia para la variable respuesta “% asfalto óptimo”	29
Tabla 27 Falta de ajuste para la variable respuesta “% asfalto óptimo”	29
Tabla 28 Estimadores de los parámetros para la variable respuesta “% asfalto óptimo”	30

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

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 nivel 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, con 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 mastique 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), la 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.

Justificación e Importancia

Los crecientes volúmenes de tránsito a los que están sometidos algunos pavimentos, el aumento en la magnitud de las cargas máximas permisibles, los climas adversos y las necesidad de brindarle al usuario pavimentos más seguros han hecho que en nuestro país como en muchos otros las mezclas tradicionales no cumplan con las nuevas exigencias a las que los pavimentos son sometidas, presentando problemas de deformación permanente, superficies deslizantes y daño por humedad.

Como respuesta ante tal necesidad, surgió un proyecto de investigación en el Lanamme, 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 con la elaboración 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.

Esto motivó el inicio de esta investigación, enfocada a analizar este factor de alta sensibilidad como lo es la curva granulométrica y su influencia específicamente en la volumetría de las mezclas SMA.

Objetivo General

Estudiar la influencia de la granulometría en la volumetría de las mezclas SMA

Objetivos Específicos

Generar especificaciones granulométricas para mezclas SMA.

Generar especificaciones volumétricas para mezclas SMA.

Estudiar la influencia de la temperatura de mezclado y compactación en la volumetría de la mezcla.

Estudiar la influencia de la granulometría en el drenaje de las mezclas SMA

CAPÍTULO 2

ETAPAS Y ACTIVIDADES DEL PROYECTO

Primera Etapa

Se procedió con la caracterización de la materia prima: agregado, asfalto, modificador de asfalto y fibra celulosa.

Seguidamente, la primera etapa consistió en escoger 15 granulometrías. Para ello se tomó en consideración los rangos propuestos en las especificaciones alemanas, en el National Cooperative Research Program (NCHRP 9-8), en el Federal Highway Administration (FHWA) y en las especificaciones argentinas. Las mismas se muestran en la **Figura 1** y en la **Tabla 1**.

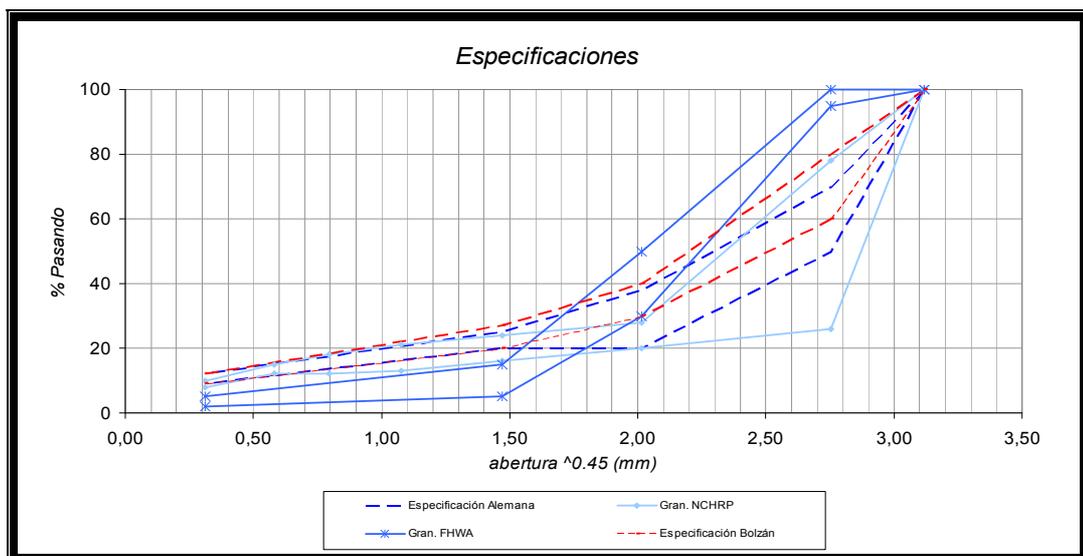


Figura 1 Especificaciones de granulometrías para mezclas SMA

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 1 Especificaciones de granulometrías para mezclas SMA

A partir de estos rangos, se escogieron diversas curvas granulométricas que permitieran estudiar de manera adecuada su influencia sobre la volumetría de las mezclas SMA.

Se tomaron seis puntos de variación para el agregado grueso (70%, 53% y 35% en la malla 9,5 mm (N°3/8) y 28%, 24% y 20% en la malla 4,75 mm (N°4)). Para la parte fina se definieron dos tendencias: curva superior (que retiene menos agregado intermedio) y curva inferior (que retiene más agregado intermedio). 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**).

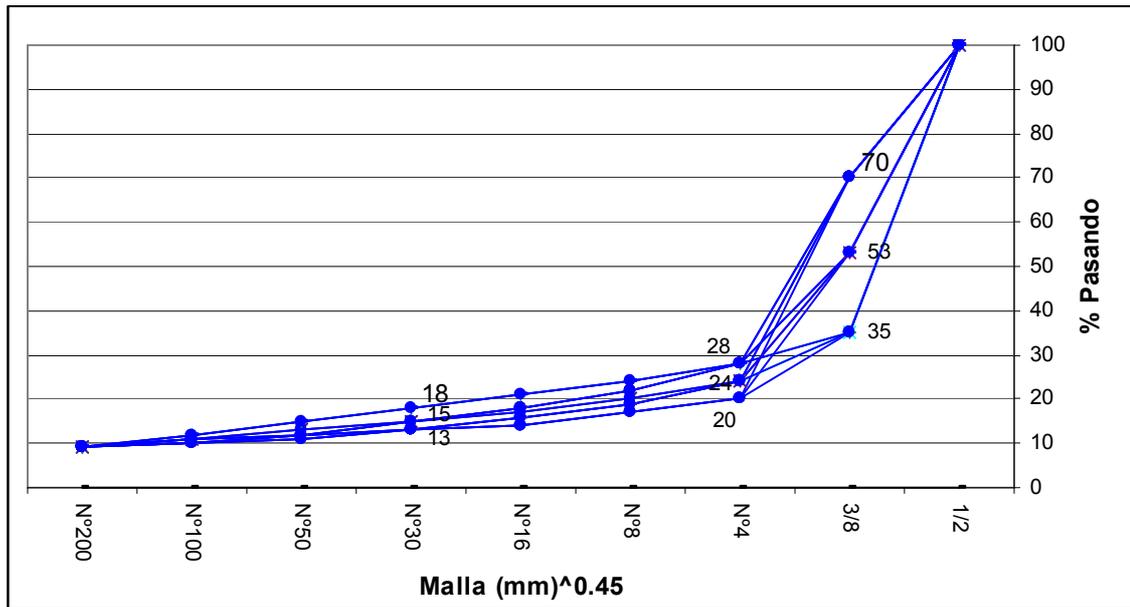


Figura 2 Granulometrías escogidas en el proyecto

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)

A partir de la malla 2,35 mm (N°8): Curva superior (int.) – Curva Inferior (fin.)

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 2,36 mm (N°8) solo hay una curva.

En la **Tabla 2** se muestra las granulometrías usadas en el proyecto y en la **Tabla 3** se muestra las proporciones de agregado grueso, intermedio y fino de cada una.

Malla		% Pasando														
pulg	mm	Gg	Ig	Fg	Gi-int	li-int	Fi-int	Gf-int	lf-int	Ff-int	Gf-fin	lf-fin	Ff-fin	Gi-fin	li-fin	Fi-fin
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
Nº4	4,75	20	20	20	24	24	24	28	28	28	28	28	28	24	24	24
Nº8	2,36	17	17	17	20	20	20	24	24	24	22	22	22	19	19	19
Nº16	1,18	14	14	14	17	17	17	21	21	21	18	18	18	16	16	16
Nº30	0,6	13	13	13	15	15	15	18	18	18	15	15	15	13	13	13
Nº50	0,3	12	12	12	13	13	13	15	15	15	12	12	12	11	11	11
Nº100	0,15	10	10	10	11	11	11	12	12	12	11	11	11	10	10	10
Nº200	0,075	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

Tabla 2 Granulometrías seleccionadas para el estudio de mezclas SMA

Porcentaje Retenidos	Gg	Ig	Fg	Gi-int	li-int	Fi-int	Gf-int	lf-int	Ff-int	Gf-fin	lf-fin	Ff-fin	Gi-fin	li-fin	Fi-fin
% Gruesos	80	80	80	74	76	76	72	70	72	70	70	72	76	76	76
% Intermedios	6	6	6	7	7	7	7	7	7	10	10	10	8	8	8
% Finos	14	14	14	19	17	17	21	23	21	20	20	18	16	16	16

Tabla 3 Porcentajes retenidos de agregado grueso, intermedio y fino de las granulometrías estudiadas.

Una vez escogidas las granulometrías, se procedió a realizar pruebas de escurrimiento a dos temperaturas: 1) temperatura de compactación obtenida mediante la metodología de equiviscosidad y 2) temperatura de compactación obtenida mediante el procedimiento de viscosidad de corte cero. Esto porque se notó en estudios anteriores diferencias significativas en las temperaturas de mezclado y compactación obtenidas por ambos métodos. Este primer estudio se realizó a un único contenido de asfalto (PTA= 6,5%). Esto se hizo con el fin de analizar la influencia de esta variación de temperatura en el escurrimiento y poder excluir aquellas granulometrías que no cumplieran con las especificaciones. Los resultados de esta etapa se detallan en el capítulo 3.

Segunda Etapa

En la **segunda etapa** de las granulometrías planteadas se descartaron, ya que en ambos casos se proyectó que no alcanzarían el porcentaje de vacíos recomendado para estas granulometrías o que harían con el porcentaje de asfalto considerablemente altos, convirtiéndolas en granulometrías poco viables.

Con las 13 granulometrías restantes se efectuaron los diseños de mezcla: primero utilizando temperaturas de mezclado y compactación obtenidas mediante el método de viscosidad de corte cero y (mezclado 144-147 y compactación 133°C-136°C) y posteriormente utilizando las temperaturas de mezclado y compactación obtenidas mediante el método de equiviscosidad (mezclado 163 °C y compactación 149 °C). Sin embargo, estas temperaturas variaron de las calculadas inicialmente según la metodología de la equiviscosidad, ya que en un principio el rango se encontraba entre 176 °C y 182 °C. Pero según un estudio realizado por la NCHRP (1), las temperaturas máximas no deben de sobrepasar los 163 °C, aunque se utilicen asfaltos modificados. Por este motivo se prefirió cambiar las temperaturas de mezclado y compactación basados en este documento.

Los resultados de esta etapa se detallan en el capítulo 3.

CAPÍTULO 3

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 y un solo tipo de fibra de celulosa.

Ligante asfáltico

En la **Tabla 4** 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 4 Caracterización físico-química del ligante asfáltico original

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

ENSAYO	AASHTO	Asfalto Modificado con 1,5 % de Elvaloy	Unid.	Especificaciones AASHTO M226-80	Normativa RTCA 75.01.22.04
Parámetros de pureza y seguridad					
Punto de inflamación	T 48	304 ±1	°C	min. 232	min. 232
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	%	max. 0,50	max 1,0
Pérdida en película delgada TFO	T 179	0,51 ±0,01	%	max. 0,50	max 1,0
Parámetros de consistencia					
Penetración a 25°C	T 49	52,0 ± 1,0	(1/10 mm)	min. 50	min 50
Viscosidad cinemática a 125°C	T 201	2672 ± 10	cSt	-	-
Viscosidad cinemática a 135°C	T 201	1299 ± 4	cSt	min. 350	min. 350
Viscosidad Cinemática a 145 °C	T 201	871 ± 1	cSt	-	-
Viscosidad Absoluta a 60°C (original)	T 201	5472 ± 4	Poise	2400-3600	2400-3600
Viscosidad Absoluta a 60°C (envejecido en TFO)	T 201	9893 ±10	Poise	máx.12000	max. 15000
Viscosidad Absoluta a 60°C (envejecido en RTFO)	T 201	14550 ±17	Poise	-	-
Parámetros de susceptibilidad al envejecimiento y susceptibilidad térmica					
Indice de susceptibilidad térmica (VTS)	-	3,01	-	-	3,30-3,90
Razón de viscosidades	-	1,8	-	-	máx.3,0

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

En la **Tabla 6** y la **Tabla 7** 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 6 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 7 Grado de desempeño superior del asfalto modificado

En la **Tabla 8** y la **Tabla 9** se presentan los resultados de la determinación del grado de desempeño intermedio del ligante original y el ligante asfáltico modificado.

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 8 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 9 Grado de desempeño intermedio del asfalto modificado

En resumen, según los ensayos reológicos, el ligante asfáltico modificado clasifica, de acuerdo con la metodología SUPERPAVE 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.

Agregado

El agregado utilizado proviene de la región de Guápiles. Para poder ser utilizado en la producción de mezclas de matriz de agregado grueso debe cumplir con los requerimientos establecidos en la AASHTO MP8-00 Standard specification for designing stone matrix asphalt (SMA).

En la **Tabla 10** 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
Vacíos no compactados	TP 33	37,2	%	-
Gbs	T 20	2,549		-
Absorción	T 20	3,283	%	-

¹ Especificación de acuerdo a la normativa argentina

Tabla 10 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 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 el cual se incorpora el polímero 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 de Elvaloy. En la **Tabla 5**, **Tabla 7** y **Tabla 9** 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 por la naturaleza. 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, el cual funciona como un agente separador y ayudante de granulación. 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.

CAPÍTULO 4

DRENAJE DE MEZCLAS SMA

Influencia de la granulometría en el drenaje de las mezclas SMA

En la **primera etapa** se realizó la prueba de drenaje a las 15 granulometrías con 6,5 % de asfalto a la temperatura de mezclado de 147 °C. Los resultados mostraron que todas cumplieron con un escurrimiento menor a 0,3 según se indica en la **Figura 3**.

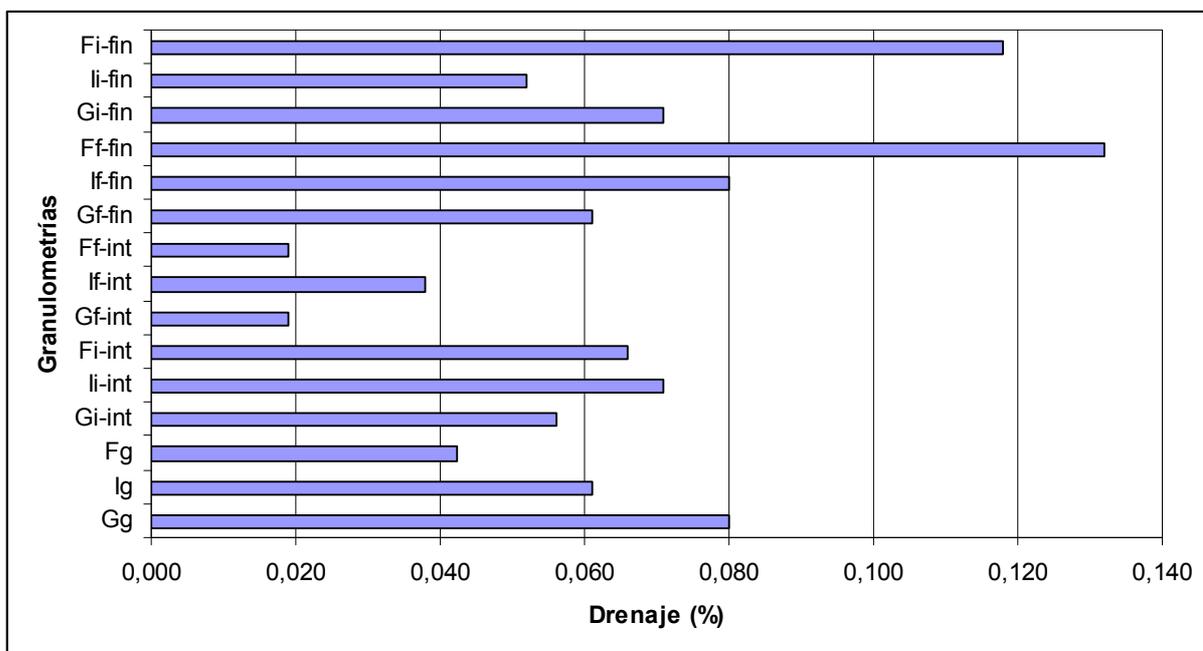


Figura 3 Escurrimientos de la primera etapa

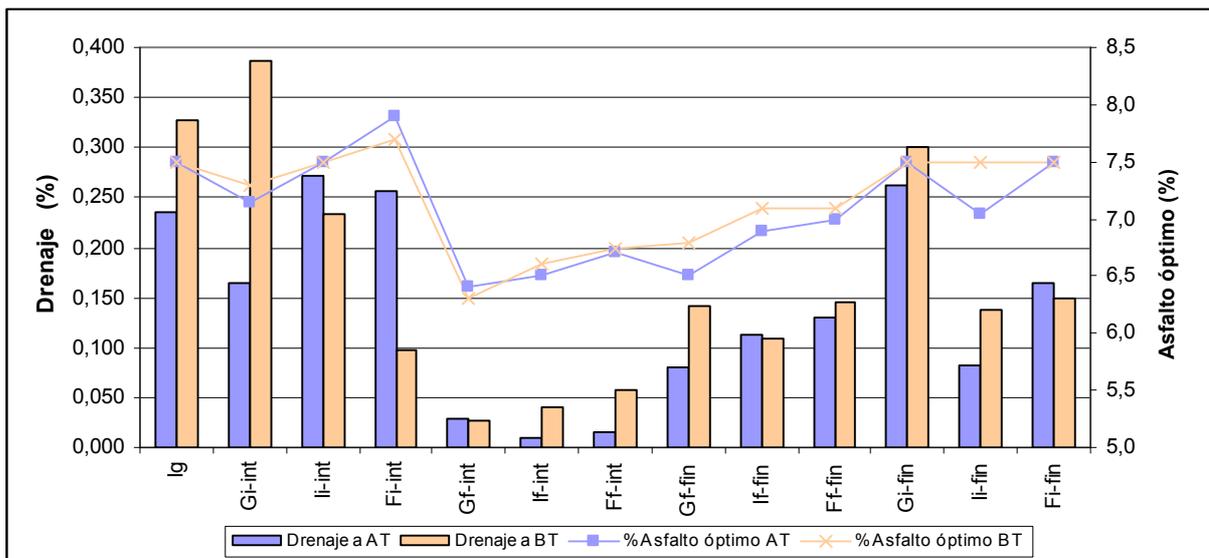
De la **Figura 3** se pueden deducir varias tendencias de las mezclas discontinuas analizadas. En primer lugar, las granulometrías que presentan menores porcentajes de escurrimiento son aquellas que poseen mayor cantidad de material fino (entre 21% y 26% retenido en las mallas inferiores a 1,18 mm – N°16). Al poseer mayores proporciones de agregado fino, existen mayores superficies de contacto que permiten

absorber más asfalto y por tanto se justifica el hecho que de este tipo de mezclas presenten los menores drenajes. De igual manera, las granulometrías con los mayores porcentajes de material retenido en las mallas intermedias (2,36 mm y 1,18 mm) obtuvieron los drenajes más altos. Con respecto a la relación entre el escurrimiento y el porcentaje de agregado grueso en la granulometría, no se encontró que el mismo influyera de manera evidente.

En la **segunda etapa** se determinaron los escurrimientos para cada porcentaje de asfalto con que se trabajó en los diseño de mezcla. Los resultados se pueden observar en el **APÉNDICES**

Apéndice . Adicionalmente, en la **AT: Altas Temperaturas** **BT: Bajas Temperaturas**

Figura 4 se muestran los drenajes para el contenido óptimo de asfalto, tanto para altas como para bajas temperaturas.



AT: Altas Temperaturas BT: Bajas Temperaturas

Figura 4 Drenajes para el contenido óptimo de asfalto

En la **Figura 4** se puede observar que al aumentar el contenido de asfalto óptimo, incrementa también el porcentaje de escurrimiento. Sin embargo, se puede deducir del gráfico que para contenidos de asfalto óptimo iguales, el drenaje varía, y por lo tanto las variaciones pueden relacionarse más directamente con la granulometría que con el contenido de asfalto en sí. Tal es el caso de las granulometrías Gi-fin y Fi-fin, en donde

ambas tienen un 7,5% de asfalto óptimo, pero drenajes diferentes. La granulometría Gi-fin difiere únicamente de la granulometría Fi-fin en el porcentaje que pasa la malla 9,5 mm (3/8). Gi-fin retiene un 65% del material en esta malla, mientras que Fi-fin sólo retiene un 30%. Esto quiere decir que Fi-fin está conformado por mayor cantidad de material intermedio y fino que le permite absorber más asfalto, reduciendo así el drenaje. En general se puede afirmar que los drenajes más altos se dan en aquellas granulometrías que poseen poco material intermedio y fino, siguiendo un comportamiento similar al observado en la primera etapa de estudio.

De la figura anterior también se puede observar que los escurrimientos obtenidos con el porcentaje óptimo de asfalto incrementaron con respecto a los de la primera etapa, incluso en una granulometría se incumplió con el máximo especificado de 0,3 % (granulometría Gi-int a baja temperatura). Sin embargo, se debe considerar que en la primera etapa se utilizó un porcentaje de asfalto de 6,5%, mientras que en esta etapa los contenidos óptimos se encuentran en un rango de 6,5% a 8,0%, lo cual hace que algunas granulometrías presenten mayores porcentajes de escurrimientos.

Un factor importante de esta investigación es que durante la elaboración de los especímenes, se enfatizó en la incorporación de la fibra de celulosa mediante una agitación vigorosa que permitiera distribuir homogéneamente la fibra en la mezcla. Esto trajo efectos muy positivos, ya que se logró mantener en la mayoría de los casos escurrimientos dentro de la especificación, situación que no se había logrado alcanzar en investigaciones anteriores donde se trabajaba con este mismo tipo de mezcla y fibra de celulosa.

Para determinar si la granulometría produce algún efecto en el porcentaje de drenaje de las mezclas SMA, se realizó un análisis ANOVA (2). El análisis completo se muestra en el **Apéndice B**. Lo que se puede observar del análisis es que el modelo explica un porcentaje muy pequeño de la variancia (R^2 ajustado= 0,17), aunque el modelo sí resultó ser significativo. Esto significa que a pesar de que aparentemente los gráficos muestran algunas tendencias en cuanto a la relación entre granulometrías y

escurrimiento, no existe evidencia al 95% de confianza que permita aceptar esta hipótesis.

Influencia de la Temperatura en el drenaje de las mezclas SMA

Para analizar el comportamiento del drenaje ante los cambios en las temperaturas de compactación, se seleccionaron en la **primera etapa**, algunas de las 15 granulometrías (aquellas con un 53% pasando la malla 9,5 mm) y se realizó la prueba de escurrimiento a la temperatura de 170 °C y 136 °C, con 6,5% de asfalto (PTA). En todos los casos se obtuvieron escurrimientos menores de 0,3, lo cual indica que cumplieron con los valores requeridos para mezclas SMA. En la **Figura 5** se muestran estos resultados.

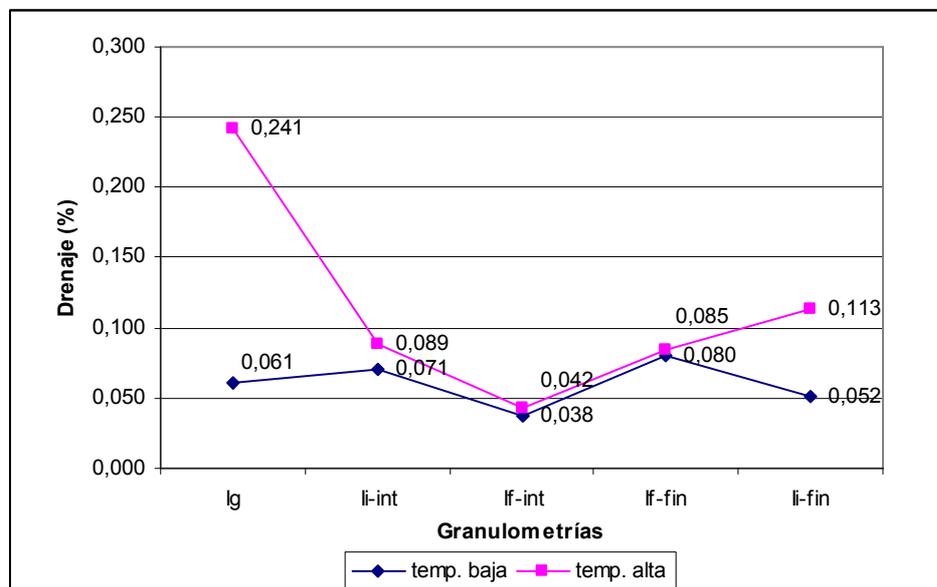


Figura 5 Comparación de temperaturas de mezclado en el escurrimiento

Según se observa, el escurrimiento a altas temperaturas fue mayor, como era de esperar, pero solo se dieron aumentos considerables en la granulometría lg y li-fin; las demás mostraron comportamiento muy similares. Comparando estas dos granulometrías con el resto que se consideraron en este caso, ambas poseen menores porcentajes de material fino que las demás. Esta condición produce mayores escurrimientos, según se analizó en el inciso anterior, pero además la **Figura 5** muestra que esta condición hace que las granulometrías con estas características sean más sensibles a los cambios de temperatura.

En la **segunda etapa** se tomaron las 13 granulometrías para realizar el escurrimiento en cuatro puntos (establecidos por el diseño de mezcla). Se trabajó con temperaturas bajas y altas (136 °C y 163 °C) y se compararon los resultados. Para casi todas las granulometrías los resultados fueron satisfactorios ($<0,3$) y los escurrimientos incrementaban con el aumento del porcentaje de asfalto.

En la **Figura 4**, mostrada en el inciso anterior, se puede observar adicionalmente la tendencia que se genera en el drenaje para cada temperatura estudiada considerando el porcentaje óptimo de asfalto.

El cambio en las temperaturas de mezclado no afectó significativamente el escurrimiento de las granulometrías estudiadas. En algunos casos se dio un incremento mayor a bajas temperaturas y en otros casos el incremento se dio a altas temperaturas.

La prueba de hipótesis planteada fue la siguiente:

Ho: No existen diferencias significativas entre los escurrimientos ensayados a baja temperatura y los escurrimientos ensayados a alta temperatura.

H1: Existen diferencias significativas entre los escurrimientos ensayados a baja temperatura y los escurrimientos ensayados a alta temperatura.

Se realizó la prueba de hipótesis para cada contenido de asfalto, incluyendo el porcentaje de asfalto óptimo (Ver **Apéndice C**). Sólo para 6,5% y 7% se rechazó la hipótesis nula, en los demás casos no hay evidencia estadística al 90 % de confianza que indique que hay diferencias significativas entre los escurrimientos ensayados a bajas temperaturas y los escurrimientos ensayados a altas temperaturas.

CAPÍTULO 5

VOLUMETRÍA DE LAS MEZCLAS SMA

Influencia de la granulometría en la volumetría de las mezclas SMA

En la **primera etapa** se estudiaron 15 granulometrías. Para cada una de ellas se realizaron los siguientes ensayos volumétricos: gravedad específica bruta (Gbs), gravedad específica máxima teórica (Gmt), porcentaje de vacíos (% vacíos), porcentaje de absorción de agua (% absorción), porcentaje de vacíos del agregado mineral (% VMA), porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA) y porcentaje de asfalto absorbido, utilizando temperatura de mezclado igual a 147 °C y de compactación de 136 °C, y con un contenido de asfalto igual en todos los especímenes (6,5 % PTA). Los resultados se encuentran en el **Apéndice D**.

Se realizó un análisis de variancia (ANOVA), el cual permite evaluar el cambio de una variable respuesta debido a fuentes de variación entre unidades de observación.

Los modelos factoriales del análisis de variancia planteados en este apartado permiten evaluar el efecto individual y conjunto de variables independientes (tamaños de agregado – granulometría) sobre cada uno de los parámetros de volumetría (porcentaje de vacíos, porcentaje de vacíos en el agregado mineral y porcentaje de vacíos llenos con asfalto).

Se efectuó un análisis integral donde se evalúa el efecto de cada tamaño de partícula sobre los parámetros volumétricos.

Los factores que intervienen en el presente análisis están conformados de la siguiente manera:

- Variables independientes: Tamaño de partícula:
 - i. % pasando la malla 9,5 mm (3/8)

- ii. % pasando la malla 4,75 mm (N°4)
- iii. % pasando la malla 2,36 mm (N°8)
- iv. % pasando la malla 1,18 mm (N°16)
- v. % pasando la malla 0,6 mm (N°30)
- vi. % pasando la malla 0,3 mm (N°50)
- vii. % pasando la malla 0,15 mm (N°100)
- viii. % pasando la malla 0,075 mm (N°200)

- Variables respuesta:
 - i. porcentaje de vacíos (%Va)
 - ii. porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%VMA)
 - iii. porcentaje de vacíos llenos con asfalto (%VFA)

Bajo esta premisa, se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: Los tamaños de las partículas que forman parte de la granulometría no son significativos para explicar diferencias en la variable respuesta (% de vacíos, % VMA, %VFA).

H1: Los tamaños de las partículas que forman parte de la granulometría son significativos para explicar diferencias en la variable respuesta (% de vacíos, % VMA, %VFA).

En el **Apéndice E** se muestra el análisis completo obtenido a partir de los ensayos de volumetría realizados con ayuda del programa estadístico Jumper. En la **Tabla 11** se muestra un resumen de los principales resultados del análisis.

Variable Respuesta	R ² ajustado	Análisis de Variancia	Falta de ajuste
% VMA	0,93	Significativo	No significativo
% VFA	0,94	Significativo	No significativo
% Vacíos	0,93	Significativo	No significativo

Tabla 11 Resumen de análisis ANOVA. Efecto de la granulometría en la volumetría de mezclas SMA.

Primera Etapa

El coeficiente de correlación (R^2) ajustado indica el porcentaje de variancia total que es explicada por el modelo, haciendo un ajuste según el número de variables que se utilicen. Entre mayor sea este coeficiente, el modelo será mejor, ya que esto indicaría que un alto porcentaje es explicado por las variables escogidas. En nuestro caso, los coeficientes de correlación para todas las variables respuesta dieron valores superiores a 0,90, lo cual indica que el modelo es muy bueno. Con respecto al análisis de variancia, la probabilidad menor a 0,0001 asociada a la F muestral indica que el modelo es significativo para los casos estudiados en esta etapa. También el programa estadístico presenta una prueba que permite comparar el error experimental puro y el error producido por la falta de ajuste con el modelo (Ver **Apéndice E**, *Falta de Ajuste*). Si esta prueba resulta significativa, esto determina que el modelo debería redefinirse ya que posiblemente la relación entre las variables no es lineal. En nuestro caso, para las tres variables respuesta analizadas, la prueba de falta de ajuste resultó ser no significativa, lo cual permite afirmar que es adecuado considerar que las variables independientes se correlacionan de manera lineal dentro del modelo.

Finalmente, dentro del análisis ANOVA se incluye los estimadores de los parámetros en el modelo. Se toman en cuenta todas las variables y combinaciones de las mismas que aporten significancia al modelo y a partir de allí se puede obtener una ecuación que correlacione de manera óptima los parámetros significativos. Los estimadores de parámetros y las ecuaciones resultantes se muestran también en el **Apéndice E**.

Para los casos estudiados en esta **primera etapa**, se rechazó la hipótesis nula, por lo que no hay evidencia estadística al 95% de confianza de que los tamaños de las partículas que forman parte de la granulometría no son significativos para explicar diferencias en la variable respuesta (% de vacíos, % VMA, %VFA).

La influencia directa que puede tener cada tamiz dentro de la volumetría se analizó más profundamente en la segunda etapa, ya que el objetivo en esta fase era escoger granulometrías que cumplieran con las especificaciones mínimas y no detallar en los efectos individuales de las mismas. Por esta razón se trabajó con más especímenes en la segunda etapa, pero descartando aquellas granulometrías que se salían de los

requerimientos volumétricos establecidos en un inicio (cantidades de asfalto superiores al 8% PTA para alcanzar vacíos de diseño de 4%-5%).

En la **segunda etapa** se realizaron diseños de mezcla con todas las granulometrías excepto la Gg y la Fg, ya que éstas presentaban altos porcentajes de vacíos y de asfalto, lo cual vuelve a la mezcla poco trabajable y se decidió descartarlas del análisis. En la **Tabla 12** se muestra el resultado de todos los diseños realizados.

Con base en los resultados de estos diseños, se realizó nuevamente un análisis ANOVA que permitiera evaluar si existe alguna influencia de la granulometría dentro de la volumetría, de manera similar a como se estructuró en la primera etapa. En las siguientes secciones se expone individualmente los resultados obtenidos para cada variable respuesta.

Análisis Integral para Porcentaje de Asfalto Efectivo

El objetivo del análisis es determinar si los efectos individuales así como las interacciones entre los tamices afectan de manera significativa el porcentaje de asfalto efectivo en las mezclas SMA. Para ello, se plantea la siguiente hipótesis:

H_0 : Las variaciones dentro de la granulometría no son significativas para explicar diferencias en el porcentaje de asfalto efectivo.

H_1 : Las variaciones dentro de la granulometría son significativas para explicar diferencias en el porcentaje de asfalto efectivo.

Para aceptar o rechazar esta hipótesis se procedió a analizar los siguientes resultados obtenidos del análisis de variancia.

En primer lugar, en la **Figura 6** se muestra el gráfico con el ajuste del modelo y los límites de confianza correspondiente al efecto de la granulometría sobre el porcentaje de asfalto efectivo. El modelo es significativo cuando los límites de confianza cortan la línea discontinua azul que corresponde al promedio de la variable “% asfalto efectivo”.

Granulometría	% Vacíos de Diseño (4-6%)		% Asfalto óptimo (>6%)		Proyección % asfalto óptimo %vacíos		Densidad		Flujo (1/100 mm)		Estabilidad (kg)		VMA % (>16%)		VFA %	
	AT	BT	AT	BT	AT	BT	AT	BT	AT	BT	AT	BT	AT	BT	AT	BT
Ig	7,0	6,5	7,5	7,5	12,7	13,1	2243	2262	76	63	840	750	19,6	19,2	64	67
Gi-int	4,0	4,0	7,15	7,3	-	-	2314	2311	79	81	900	910	16,9	17,2	74	75
li-int	4,2	4,0	7,5	7,5	-	-	2302	2319	67	80	875	900	17,6	17,1	76,5	74
Fi-int	4,0	5,0	7,9	7,7	-	na	2306	2288	61	86	860	950	17,8	18,4	78	71
Gf-int	4,0	4,0	6,4	6,3	-	-	2367	2350	70	50	1050	945	14,5	15	75	74
lf-int	4,0	4,0	6,5	6,6	-	-	2352	2354	94	44	1280	970	15,1	15	74	76
Ff-int	4,0	4,0	6,7	6,8	-	-	2345	2332	72	70	1060	1040	15,5	15,9	74	75
Gf-fin	4,0	4,0	6,5	6,8	-	-	2338	2320	73	80	1000	950	15,6	16,5	74	75
lf-fin	4,0	4,0	6,9	7,1	-	-	2324	2320	90	75	1020	915	16,4	16,7	74,5	76
Ff-fin	4,0	4,0	7	7,1	-	-	2319	2316	62	77	960	955	16,7	16,8	74	76,5
Gi-fin	4,7	4,8	7,5	7,5	8,1	8,1	2292	2292	85	77	940	810	17,9	18	74,5	74
li-fin	5,0	5,3	7,05	7,5	7,8	8,8	2300	2278	80	67	980	785	17,3	18,5	72	71
Fi-fin	5,1	5,7	7,5	7,5	8,5	9,3	2280	2268	82	70	980	865	18,45	18,95	71,5	69

Tabla 12 Resultados de los diseños de mezcla a temperaturas altas y bajas

Notas:

- Cada variable consta de dos columnas: Altas Temperaturas (AT) y Bajas Temperaturas (BT)
- La proyección del porcentaje de asfalto óptimo solo se calculó en los casos donde no se llegaba a cumplir con el 4% de vacíos

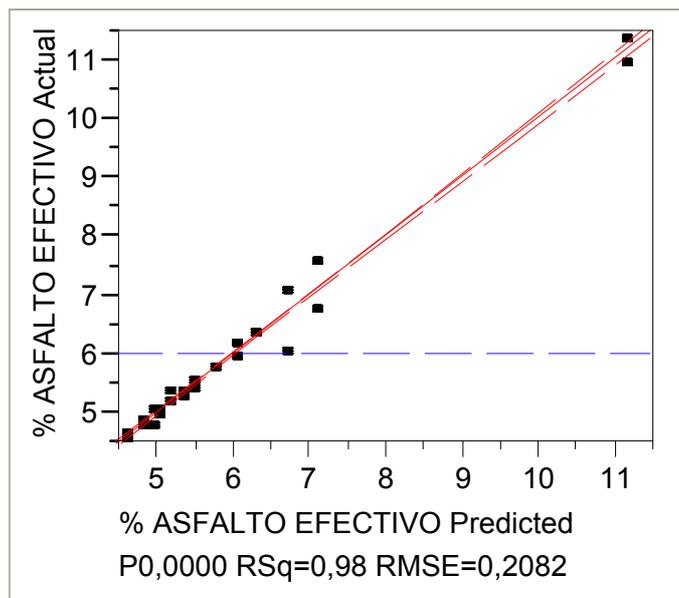


Figura 6 Ajuste del Modelo y límites de confianza para el porcentaje de asfalto efectivo

En el resumen del ajuste mostrado en la **Tabla 13** se puede observar la alta correlación del modelo (R^2 ajust. = 0,98), lo cual permite afirmar que el modelo es muy bueno. Adicionalmente, la **Tabla 14** indica que el modelo es altamente significativo al 95% de confianza (según el $\alpha = 0,005$ seleccionado para esta investigación), y según la **Tabla 15** el modelo podría ajustarse de mejor manera, ya que la prueba de falta de ajuste resultó significativo. Sin embargo, se considera que se puede aceptar el modelo planteado porque la variancia total es explicada en gran medida.

R^2	0,983883
R^2 ajustado	0,983605
Raíz Media del Error ²	0,208191
Promedio de la variable respuesta	6,027664
Número de observaciones	414

Tabla 13 Resumen de ajuste para la variable respuesta “% de asfalto efectivo”

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Media Cuadrada	F _{cal}
Modelo	7	1074,2775	153,468	3540,743
Error	406	17,5975	0,043	Prob > F
C. Total	413	1091,8750		0,0000

Tabla 14 Análisis de Variancia para la variable respuesta “% de asfalto efectivo”

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	F _{cal}
Falta de ajuste	5	1,417466	0,283493	7,0260
Error Puro	401	16,180000	0,040349	Prob > F
Error Total	406	17,597466		<.0001
				Max R ²
				0,9852

Tabla 15 Falta de ajuste para la variable respuesta “% de asfalto efectivo”

De la **Tabla 16** se puede obtener una ecuación que permita predecir el porcentaje de asfalto efectivo en una mezcla asfáltica a partir de ciertas combinaciones de tamaños de partícula. Se puede observar también que las mallas 9,5 mm (3/8) y la 4,75 mm (N°4) resultaron ser significativos dentro del modelo, no así la interacción entre ellas. De igual manera es significativo el porcentaje pasando la malla 2,36 mm (N°8) y la interacción de la misma con las mallas 9,5 mm y 4,75 mm. Esto muestra que el contenido de asfalto efectivo dentro de las mezclas SMA se ve influenciado principalmente por las partículas más gruesas de la granulometría. Al poseer la mezcla más partículas gruesas, tendrá menor área de contacto que una mezcla que esté compuesta por altos porcentajes de material fino, esto producirá una absorción menor de asfalto y por ende el contenido de asfalto efectivo se incrementará.

Término	Estimado	Error Estándar	t _{cal}	Prob> t
Intercepto	14,939057	0,165124	90,47	<.0001
% Pasando la 3/8	0,0108649	0,002168	5,01	<.0001
% Pasando la N°4	0,1140813	0,013708	8,32	<.0001
(% Pasando la 3/8-52,6908)*(% Pasando la N°4-25,5652)	0,0002761	0,001003	0,28	0,7832
% Pasando la N°8	-0,637521	0,014877	-42,85	<.0001
(% Pasando la 3/8-52,6908)*(% Pasando la N°8-20,942)	-0,003875	0,001344	-2,88	0,0041
(% Pasando la N°4-25,5652)*(% Pasando la N°8-20,942)	0,191445	0,002422	79,03	<.0001
(% Pasando la 3/8-52,6908)*(% Pasando la N°4-25,5652)*(% Pasando la N°8-20,942)	0,0015774	0,000588	2,68	0,0076

Tabla 16 Estimadores de los parámetros para la variable respuesta “% de asfalto efectivo”

Lo anterior se puede expresar por medio de la

$$\begin{aligned} \%Asf.efectivo = & 14,939 + 0,011 \cdot \%Pasando3/8 + 0,114 \cdot \%PasandoN^{\circ}4 - \\ & 0,637 \cdot (\%PasandoN^{\circ}8) - 0,004 \cdot (\%Pasando3/8 - 52,691) \cdot (\%PasandoN^{\circ}8 - 20,942) \\ & + 0,191 \cdot (\%PasandoN^{\circ}4 - 25,565) \cdot (\%PasandoN^{\circ}8 - 20,942) + 0,001 \cdot (\%Pasando3/8 - 52,691) \cdot \\ & (\%PasandoN^{\circ}4 - 25,565) \cdot (\%PasandoN^{\circ}8 - 20,942) \end{aligned}$$

- **Ecuación 1**, la cual se construye por medio de los estimadores de parámetros obtenidos del análisis ANOVA.

$$\begin{aligned} \%Asf.efectivo = & 14,939 + 0,011 \cdot \%Pasando3/8 + 0,114 \cdot \%PasandoN^{\circ}4 - \\ & 0,637 \cdot (\%PasandoN^{\circ}8) - 0,004 \cdot (\%Pasando3/8 - 52,691) \cdot (\%PasandoN^{\circ}8 - 20,942) \\ & + 0,191 \cdot (\%PasandoN^{\circ}4 - 25,565) \cdot (\%PasandoN^{\circ}8 - 20,942) + 0,001 \cdot (\%Pasando3/8 - 52,691) \cdot \\ & (\%PasandoN^{\circ}4 - 25,565) \cdot (\%PasandoN^{\circ}8 - 20,942) \end{aligned}$$

Ecuación 1

En la **Figura 7** se muestra el gráfico de residuos contra valores predichos por el modelo. Este gráfico proporciona información para evaluar el cumplimiento de los supuestos básicos del modelo tales como independencia en los valores de “y”, homocedasticidad y distribución normal de “y”. En este caso se presenta un sesgo hacia la izquierda del gráfico debido a que algunos puntos tienen valores mucho más altos de asfalto efectivo, sin embargo, al analizarlos individualmente no resultaron ser valores extremos (outliers) por lo que no se eliminaron del modelo. Esto no provocó decremento en la significancia del modelo.

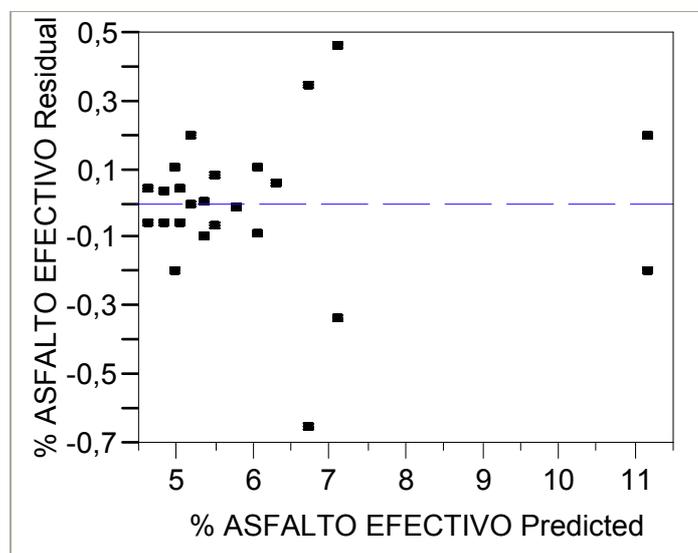


Figura 7 Gráfico de Residuos contra valores predichos por el modelo

Finalmente en la **Figura 8** se muestra del lado izquierdo el gráfico de contornos que da las combinaciones de “% Pasando la 3/8” y “% Pasando N°4” que producen cada uno de los niveles dados de “% Asfalto Efectivo”. En el lado derecho se muestra la superficie de respuesta que muestra que es posible aumentar el porcentaje de asfalto efectivo de la mezcla aumentando el porcentaje de agregado pasando la malla 9,5 mm (3/8) y disminuyendo el porcentaje pasando la malla 4,75 mm (N°4).

La utilidad de los gráficos mostrados en la **Figura 8** es que a partir de un porcentaje pasando dado, se puede predecir cuánto será el asfalto efectivo. En este caso las variables más significativas son el porcentaje pasando la malla 3/8, la malla N°4 y la malla N°8. Del gráfico se puede interpretar que para valores bajos de ambas variables, se obtendrán porcentajes superiores de asfalto efectivo.

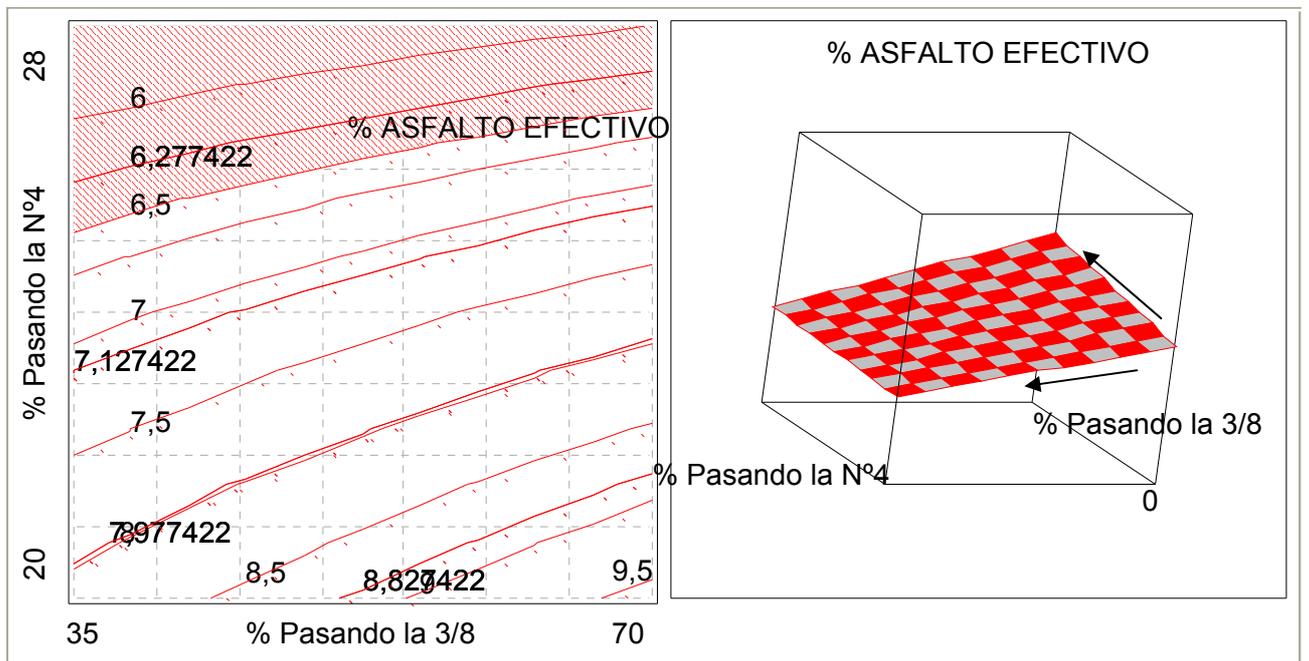


Figura 8 Gráfico de Contornos para “% de asfalto efectivo”

Análisis Integral para Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (%VMA)

El objetivo del análisis es determinar si los efectos individuales así como las interacciones entre los tamices afectan de manera significativa el porcentaje de vacíos en el agregado mineral en las mezclas SMA. Para ello, se define la siguiente hipótesis:

H₀: Las variaciones dentro de la granulometría no son significativas para explicar diferencias en el porcentaje de vacíos del agregado mineral.

H₁: Las variaciones dentro de la granulometría son significativas para explicar diferencias en el porcentaje de vacíos del agregado mineral.

A continuación se detalla el análisis de variancia efectuado para aceptar o rechazar esta hipótesis.

En la **Figura 9** se muestra el gráfico con el ajuste del modelo y los límites de confianza correspondiente al efecto de la granulometría sobre el porcentaje de vacíos en el agregado mineral. Los valores actuales de %VMA y los predichos por el modelo denotan una alta correlación.

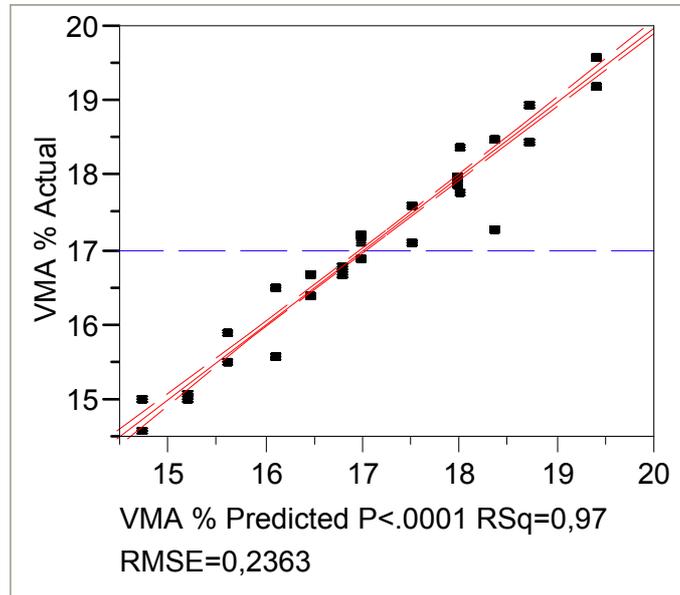


Figura 9 Ajuste del Modelo y límites de confianza para el porcentaje de vacíos en el agregado mineral

En la

R ²	0,971345
R ² ajustado	0,970831

Raíz Media del Error ²	0,236254
Promedio de la variable respuesta	17,00452
Número de observaciones	398

Tabla 17 se puede observar un coeficiente de correlación ajustado de 0,97, lo cual indica que el modelo es en gran medida explicado por las variables independientes que se consideraron. De igual manera, el análisis muestra que el modelo es significativo al 95% de confianza ($\alpha = 0,005$) (

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Media Cuadrada	F Ratio
Modelo	7	737,90362	105,415	1888,613
Error	390	21,76824	0,056	Prob > F
C. Total	397	759,67186		<.0001

Tabla 18) y aunque el modelo se explica en un 97%, éste podría mejorarse, ya que resultó significativa la prueba de falta de ajuste (

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	F _{cal}
Falta de ajuste	5	2,989489	0,597898	12,2580
Error Puro	385	18,778750	0,048776	Prob > F
Error Total	390	21,768239		<.0001
				Max RSq
				0,9753

Tabla 19).

R ²	0,971345
R ² ajustado	0,970831
Raíz Media del Error ²	0,236254
Promedio de la variable respuesta	17,00452
Número de observaciones	398

Tabla 17 Resumen de ajuste para la variable respuesta "%VMA"

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Media Cuadrada	F Ratio
Modelo	7	737,90362	105,415	1888,613
Error	390	21,76824	0,056	Prob > F
C. Total	397	759,67186		<.0001

Tabla 18 Análisis de Variancia para la variable respuesta "%VMA"

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	F _{cal}
Falta de ajuste	5	2,989489	0,597898	12,2580
Error Puro	385	18,778750	0,048776	Prob > F
Error Total	390	21,768239		<.0001
				Max RSq
				0,9753

Tabla 19 Falta de ajuste para la variable respuesta "%VMA"

De la

Intercepto	28,848881	0,144091	200,21	0,0000
% Pasando la 3/8	0,02584	0,001148	22,51	<.0001
% Pasando la N°8	-0,57008	0,008365	-68,15	<.0001
(% Pasando la 3/8-52,6784)*(% Pasando la N°8-21,0201)	-0,002607	0,000757	-3,44	0,0006
% Pasando la N°50	-0,100041	0,014064	-7,11	<.0001
(% Pasando la 3/8-52,6784)*(% Pasando la N°50-12,7638)	0,0046116	0,001036	4,45	<.0001
(% Pasando la N°8-21,0201)*(% Pasando la N°50-12,7638)	0,0234214	0,004774	4,91	<.0001
(% Pasando la 3/8-52,6784)*(% Pasando la N°8-21,0201)*(% Pasando la N°50-12,7638)	-0,000418	0,000327	-1,28	0,2022

Tabla 20 se puede obtener una ecuación que permita predecir el porcentaje de vacíos en el agregado mineral dentro de una mezcla asfáltica a partir de ciertas combinaciones de tamaños de partícula. Este es uno de los parámetros más importantes que se incluyen dentro de las especificaciones internacionales para el diseño de las mezclas SMA y por lo tanto puede ser útil emplear una ecuación que permita predecir valores de VMA para cierta granulometría dada. En este estudio, los tamices 9,5 mm (3/8) y 2,36 mm (N°8) resultaron ser las variables más significativas dentro del modelo. Esto indica que el aporte que hace la parte gruesa del agregado influye más sobre el porcentaje de vacíos en el agregado mineral. Sin embargo, el % pasando 0,3 mm (N°50) resultó ser significativo, lo cual indica que esta última malla también produce un efecto sobre la variable respuesta estudiada. Las partículas de mayor tamaño producen vacíos interparticulares grandes, que son llenados parcialmente por partículas de menor tamaño y la **Ecuación 2** refleja este comportamiento. Al aumentar el porcentaje pasando la malla 9,5 mm (3/8) y reducir el porcentaje pasando el tamiz 2,36 mm (N°8), el %VMA se incrementará. También algunas interacciones dieron significativos.

Término	Estimado	Error Estándar	t _{cal}	Prob> t
Intercepto	28,848881	0,144091	200,21	0,0000
% Pasando la 3/8	0,02584	0,001148	22,51	<.0001
% Pasando la N°8	-0,57008	0,008365	-68,15	<.0001
(% Pasando la 3/8-52,6784)*(% Pasando la N°8-21,0201)	-0,002607	0,000757	-3,44	0,0006
% Pasando la N°50	-0,100041	0,014064	-7,11	<.0001
(% Pasando la 3/8-52,6784)*(% Pasando la N°50-12,7638)	0,0046116	0,001036	4,45	<.0001
(% Pasando la N°8-21,0201)*(% Pasando la N°50-12,7638)	0,0234214	0,004774	4,91	<.0001

(% Pasando la 3/8-52,6784)*(% Pasando la N°8-21,0201)*(% Pasando la N°50-12,7638)	-0,000418	0,000327	-1,28	0,2022
---	-----------	----------	-------	--------

Tabla 20 Estimadores de los parámetros para la variable respuesta “%VMA”

$$\begin{aligned} \%VMA = & 28,849 + 0,026 \cdot \%Pasando3/8 - 0,570 \cdot \%PasandoN^{\circ}8 - 0,003 \cdot (\%Pasando3/8 - 52,678) \\ & \cdot (\%PasandoN^{\circ}8 - 21,020) - 0,100 \cdot \%PasandoN^{\circ}50 + 0,005 \cdot (\%Pasando3/8 - 52,678) \\ & \cdot (\%PasandoN^{\circ}50 - 12,764) + 0,023 \cdot (\%PasandoN^{\circ}8 - 21,020) \cdot (\%PasandoN^{\circ}50 - 12,764) \end{aligned}$$

Ecuación 2

El gráfico mostrado en la **Figura 10** indica que todos los supuestos del modelo se han cumplido ya que los puntos se encuentran distribuidos uniformemente. Por medio del gráfico se logró determinar un valor extremo (outlier) que al eliminarlo del análisis, mejoró el modelo. Este valor extremo fue el valor obtenido del diseño de mezcla a alta temperatura para la granulometría li-fin.

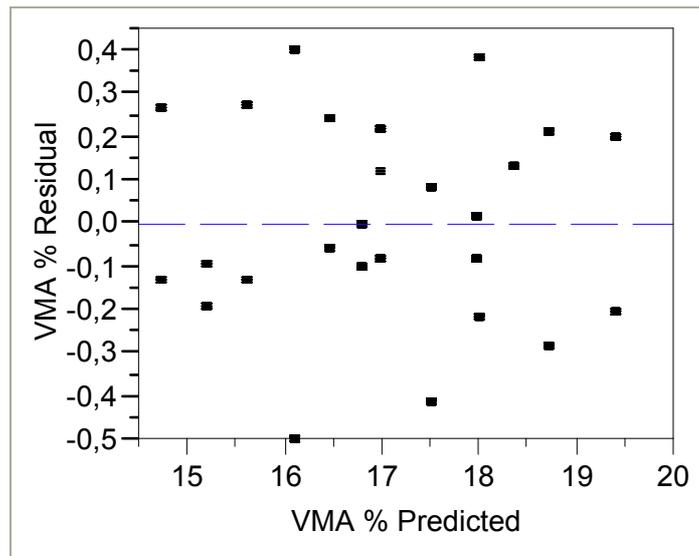


Figura 10 Gráfico de Residuos contra valores predichos por el modelo

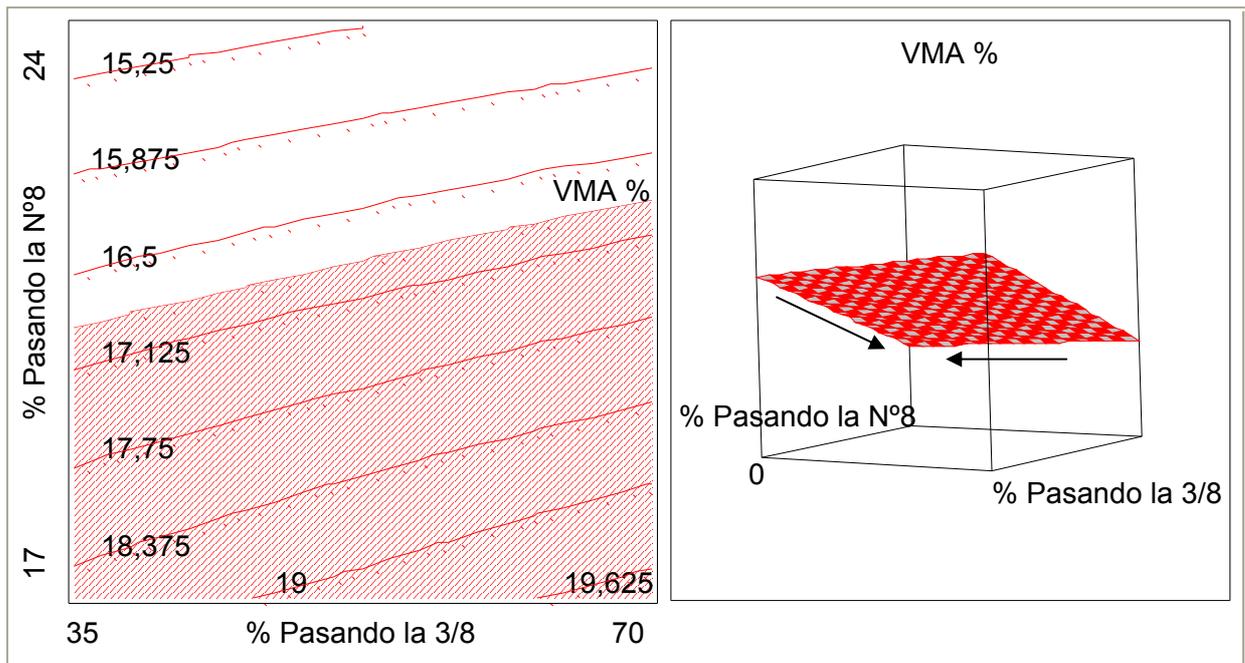


Figura 11 Gráfico de Contornos para “%VMA”

De la **Figura 11** se puede observar básicamente que para incrementar el porcentaje de VMA, se debe disminuir el porcentaje de material pasando la malla 2,36 mm (N°8) y aumentar el porcentaje de agregado pasando la malla 9,5 mm (3/8). En este caso particular también permite establecer un rango de porcentajes pasando para el cual el VMA será superior a 17%, el cual es el límite inferior fijado por la mayoría de las normas internacionales (**Apéndice F**). Para el caso de la malla 2,36 mm (N°8), se observa que para cumplir con el %VMA se debe utilizar un porcentaje inferior a 20, ya que si se aumenta este porcentaje, el porcentaje de vacíos en el agregado mineral incumplirá, no importa que porcentaje pasando la malla 3/8 se utilice. Es importante saber que se deben tener en cuenta otras variables significativas que pueden ser críticas como el escurrimiento o el porcentaje de vacíos de diseño.

Análisis Integral para Porcentaje de Vacíos Llenados con asfalto (%VFA)

El objetivo del análisis es determinar si los efectos individuales así como las interacciones entre los tamices afectan de manera significativa el porcentaje de

vacíos llenados con asfalto en las mezclas SMA. Para ello, se define la siguiente hipótesis:

H_0 : Las variantes dentro de la granulometría no son significativas para explicar diferencias en el porcentaje de vacíos llenados con asfalto.

H_1 : Las variantes dentro de la granulometría son significativas para explicar diferencias en el porcentaje de vacíos llenados con asfalto.

Del análisis de variancia, se pueden observar los resultados que a continuación se detallan.

La **Figura 12** corresponde con al efecto de la granulometría sobre el porcentaje de vacíos llenados con asfalto, así como el ajuste del modelo y los límites de confianza. Los valores reales de %VFA y los predichos por el modelo denotan una correlación del 79 %.

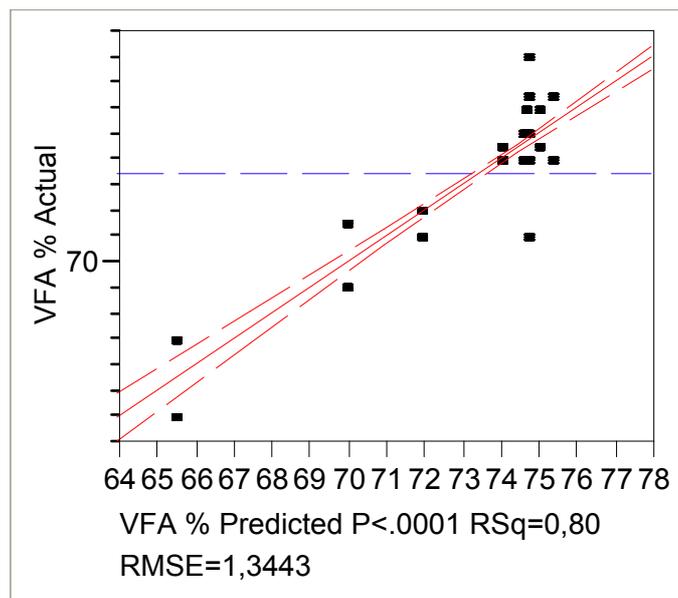


Figura 12 Ajuste del Modelo y límites de confianza para el porcentaje de vacíos llenados con asfalto.

En la **Tabla 21** se puede observar que el modelo es explicado en un 79% (coeficiente de correlación ajustado = 0,79), y aunque este valor es menor que el obtenido en otros modelos de este estudio, sigue siendo un modelo aceptable. En la **Tabla 22** se deduce que el modelo es significativo, pero

puede mejorarse probando relaciones cuadráticas en lugar de relaciones lineales según la prueba de ajuste que se detalla en la **Tabla 23**.

R ²	0,79845
R ² ajustado	0,794469
Raíz Media del Error ²	1,344304
Promedio de la variable respuesta	73,48068
Número de observaciones	414

Tabla 21 Resumen de ajuste para la variable respuesta “%VFA”

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Media Cuadrada	F Ratio
Modelo	8	2899,4482	362,431	200,5535
Error	405	731,8972	1,807	Prob > F
C. Total	413	3631,3454		<.0001

Tabla 22 Análisis de Variancia para la variable respuesta “%VFA”

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	F _{cal}
Falta de ajuste	4	30,39717	7,59929	4,3440
Error Puro	401	701,50000	1,74938	Prob > F
Error Total	405	731,89717		0,0019
				Max RSq
				0,8068

Tabla 23 Falta de ajuste para la variable respuesta “%VFA”

En la **Tabla 24** se puede observar los estimadores de los parámetros que son significativos y los que no lo son dentro del modelo analizado. En este caso el único término que resultó ser no significativo después de realizar una escogencia previa de variables¹, es la interacción entre el porcentaje pasando la malla 3/8 y el porcentaje pasando la malla N°8; quedando el modelo de predicción del porcentaje de vacíos llenados con asfalto como se muestra en la

$$\%VFA = 52,251 + 0,045 \cdot \%Pasando3/8 - 0,669 \cdot \%PasandoN^{\circ}8 - 1,434 \cdot (\%PasandoN^{\circ}16) + 0,095 \cdot (\%Pasando3/8 - 52,691) \cdot (\%PasandoN^{\circ}16 - 17,710) - 0,426 \cdot (\%PasandoN^{\circ}8 - 20,942) \cdot (\%PasandoN^{\circ}16 - 17,710) - 0,023 \cdot (\%Pasando3/8 - 52,691) \cdot (\%PasandoN^{\circ}8 - 20,942) \cdot (\%PasandoN^{\circ}16 - 17,710) + 0,857 \cdot (\%PasandoN^{\circ}100)$$

Ecuación 3.

¹ Por medio de una regresión por pasos (Stepwise) en el programa Jumper

Término	Estimado	Error Estándar	t _{cal}	Prob> t
Intercepto	52,25072	1,702957	30,68	<.0001
% Pasando la 3/8	0,044628	0,011065	4,03	<.0001
% Pasando la N°8	-0,66924	0,182462	-3,67	0,0003
(% Pasando la 3/8-52,6908)*(% Pasando la N°8-20,942)	-0,041137	0,017559	-2,34	0,0196
% Pasando la N°16	1,4345948	0,215474	6,66	<.0001
(% Pasando la 3/8-52,6908)*(% Pasando la N°16-17,7101)	0,0951526	0,021889	4,35	<.0001
(% Pasando la N°8-20,942)*(% Pasando la N°16-17,7101)	-0,426138	0,016714	-25,50	<.0001
(% Pasando la 3/8-52,6908)*(% Pasando la N°8-20,942)*(% Pasando la N°16-17,7101)	-0,023021	0,003111	-7,40	<.0001
% Pasando la N°100	0,8572333	0,272589	3,14	0,0018

Tabla 24 Estimadores de los parámetros para la variable respuesta “%VFA”

$$\begin{aligned} \%VFA = & 52,251 + 0,045 \cdot \%Pasando3/8 - 0,669 \cdot \%PasandoN^{\circ}8 - 1,434 \cdot (\%PasandoN^{\circ}16) + \\ & 0,095 \cdot (\%Pasando3/8 - 52,691) \cdot (\%PasandoN^{\circ}16 - 17,710) - 0,426 \cdot (\%PasandoN^{\circ}8 - 20,942) \\ & \cdot (\%PasandoN^{\circ}16 - 17,710) - 0,023 \cdot (\%Pasando3/8 - 52,691) \cdot (\%PasandoN^{\circ}8 - 20,942) \cdot \\ & (\%PasandoN^{\circ}16 - 17,710) + 0,857 \cdot (\%PasandoN^{\circ}100) \end{aligned}$$

Ecuación 3

En la **Figura 13** se observa una concentración de datos al lado derecho del gráfico, lo que puede evidenciar que existan algunos valores extremos u outliers hacia la izquierda del gráfico. Sin embargo, después de proceder a una revisión de los mismos, no se encontró que exista ninguna razón para eliminarlos, por lo que se consideraron todos los resultados dentro del análisis.

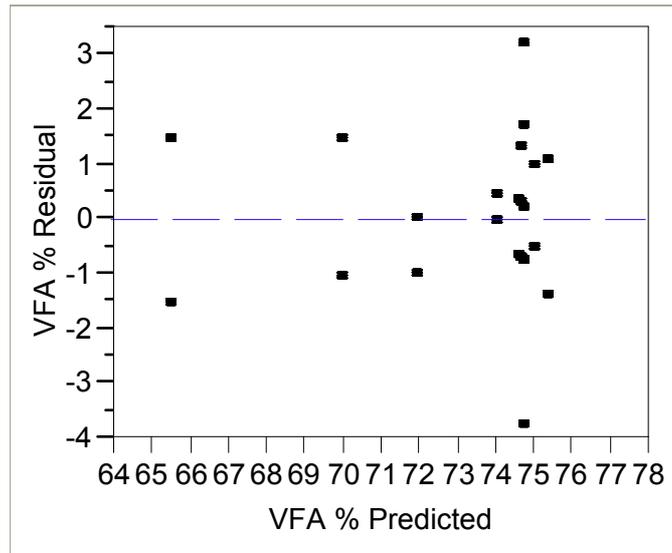


Figura 13 Gráfico de Residuos contra valores predichos por el modelo

Finalmente, en la **Figura 14** se observa la superficie de contornos para la variable “Vacíos llenados con asfalto”. Las variables independientes más significativas del modelo resultaron ser 4: % pasando las mallas N°3/8, N°8, N°16 y N° 100. Sin embargo, en los gráficos solo se muestra la interacción entre dos de ellas (% pasando la N°16 y % Pasando la N°8). Para esta interacción se tiene que al aumentar ambos porcentajes, también se incrementa el volumen de los vacíos interparticulares llenados con asfalto. Aunque las normas internacionales no establecen ningún valor mínimo o máximo para esta variable, se considera entre 70% y 80% como un rango aceptable. Teniendo en cuenta esto, se puede observar en el gráfico izquierdo de la **Figura 14** que para cualquier combinación de estas dos mallas el %VFA se mantendrá dentro de un rango admisible. Sin embargo, las curvas dibujadas en un extremo del gráfico de contornos muestran que para porcentajes elevados pasando la malla N°16 y la malla N°8, el porcentaje de VFA mantendrá un comportamiento asintótico.

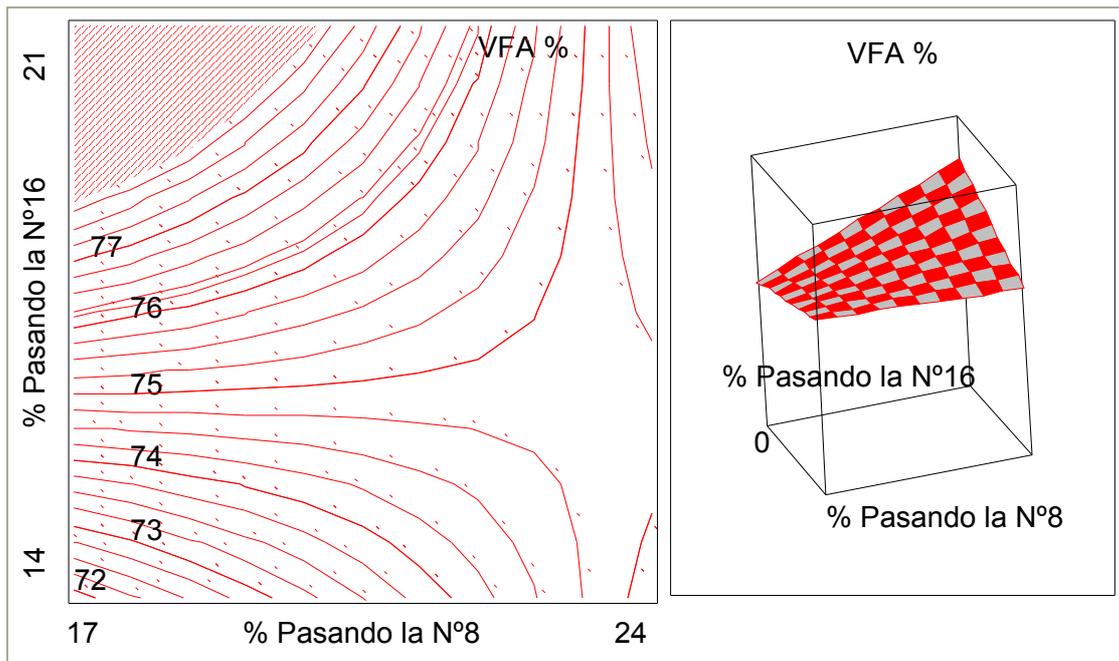


Figura 14 Gráfico de Contornos para “%VFA”

Análisis Integral para Porcentaje de Asfalto Óptimo

El objetivo del análisis es determinar si los efectos individuales así como las interacciones entre los tamices afectan de manera significativa el porcentaje de asfalto óptimo en las mezclas SMA. Para ello, se define la siguiente hipótesis:

H_0 : Las variantes dentro de la granulometría no son significativas para explicar diferencias en el porcentaje de asfalto óptimo.

H_1 : Las variantes dentro de la granulometría son significativas para explicar diferencias en el porcentaje de asfalto óptimo.

A continuación se describen los resultados obtenidos del análisis de variancia.

Los valores reales de asfalto óptimo y los predichos por el modelo mostrados en la **Figura 15** denotan una correlación bastante alta (98%). También se muestra dentro de este gráfico los límites de confianza correspondiente al efecto de la granulometría sobre el porcentaje óptimo de asfalto

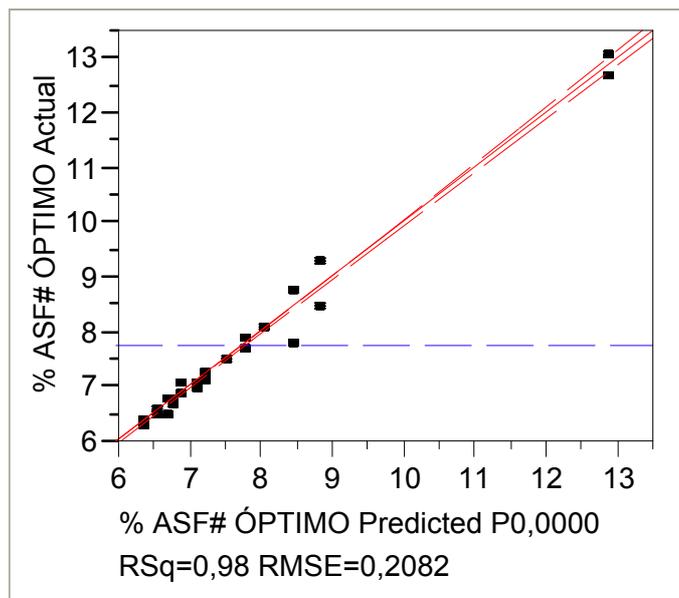


Figura 15 Ajuste del Modelo y límites de confianza para el porcentaje de asfalto óptimo.

La **Tabla 25** muestra que el promedio de las 414 observaciones es 7,75% de asfalto óptimo, lo cual indica que este tipo de mezclas abiertas necesita grandes cantidades de asfalto para poder cumplir con los vacíos de diseño (estimados para esta investigación en 4%).

R^2	0,983883
R^2 ajustado	0,983605
Raíz Media del Error ²	0,208191
Promedio de la variable respuesta	7,750242
Número de observaciones	414

Tabla 25 Resumen de ajuste para la variable respuesta “% asfalto óptimo”

De igual manera como se observó en los análisis ANOVA anteriores, el modelo propuesto es significativo (**Tabla 26**), pero podrían considerarse efectos cuadráticos si se desea obtener un modelo que explique más del 98%. (**Tabla 27**).

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Media Cuadrada	F Ratio
Modelo	7	1074,2775	153,468	3540,743
Error	406	17,5975	0,043	Prob > F
C. Total	413	1091,8750		0,0000

Tabla 26 Análisis de Variancia para la variable respuesta “% asfalto óptimo”

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	F _{cal}
Falta de ajuste	5	1,417466	0,283493	7,0260
Error Puro	401	16,180000	0,040349	Prob > F
Error Total	406	17,597466		<.0001
				Max RSq

				0,9852
--	--	--	--	--------

Tabla 27 Falta de ajuste para la variable respuesta “% asfalto óptimo”

Se tiene que las partículas de agregado que más influyen en la determinación del asfalto óptimo son las partículas gruesas, tal como se muestra en la **Tabla 28**. En la misma se puede observar que el porcentaje pasando la malla 3/8, la N°4 y la N°8 resultaron ser estimadores de parámetros significativos, es decir, que contribuyen a predecir el valor de la variable respuesta a partir de la

$$\begin{aligned} \% \text{Asfalto óptimo} = & 16,662 + 0,011 \cdot \% \text{Pasando } 3/8 + 0,114 \cdot \% \text{Pasando } N^{\circ}4 - 0,637 \cdot \\ & \% \text{Pasando } N^{\circ}8 - 0,004 \cdot (\% \text{Pasando } 3/8 - 52,691) \cdot (\% \text{Pasando } N^{\circ}8 - 20,942) - 0,191 \cdot \\ & (\% \text{Pasando } N^{\circ}4 - 25,5652) \cdot (\% \text{Pasando } N^{\circ}8 - 20,942) + 0,001 \cdot (\% \text{Pasando } N^{\circ}3/8 - 52,6908) \cdot \\ & (\% \text{Pasando } N^{\circ}4 - 25,5652) \cdot (\% \text{Pasando } N^{\circ}8 - 20,942) \end{aligned}$$

Ecuación 4 que muestra el modelo final determinado a través del análisis ANOVA.

Término	Estimado	Error Estándar	t _{cal}	Prob> t
Intercepto	16,661635	0,165124	100,90	<.0001
% Pasando la 3/8	0,0108649	0,002168	5,01	<.0001
% Pasando la N°4	0,1140813	0,013708	8,32	<.0001
(% Pasando la 3/8-52,6908)*(% Pasando la N°4-25,5652)	0,0002761	0,001003	0,28	0,7832
% Pasando la N°8	-0,637521	0,014877	-42,85	<.0001
(% Pasando la 3/8-52,6908)*(% Pasando la N°8-20,942)	-0,003875	0,001344	-2,88	0,0041
(% Pasando la N°4-25,5652)*(% Pasando la N°8-20,942)	0,191445	0,002422	79,03	<.0001
(% Pasando la 3/8-52,6908)*(% Pasando la N°4-25,5652)*(% Pasando la N°8-20,942)	0,0015774	0,000588	2,68	0,0076

Tabla 28 Estimadores de los parámetros para la variable respuesta “% asfalto óptimo”

$$\begin{aligned} \% \text{Asfalto óptimo} = & 16,662 + 0,011 \cdot \% \text{Pasando } 3/8 + 0,114 \cdot \% \text{Pasando } N^{\circ}4 - 0,637 \cdot \\ & \% \text{Pasando } N^{\circ}8 - 0,004 \cdot (\% \text{Pasando } 3/8 - 52,691) \cdot (\% \text{Pasando } N^{\circ}8 - 20,942) - 0,191 \cdot \\ & (\% \text{Pasando } N^{\circ}4 - 25,5652) \cdot (\% \text{Pasando } N^{\circ}8 - 20,942) + 0,001 \cdot (\% \text{Pasando } N^{\circ}3/8 - 52,6908) \cdot \\ & (\% \text{Pasando } N^{\circ}4 - 25,5652) \cdot (\% \text{Pasando } N^{\circ}8 - 20,942) \end{aligned}$$

Ecuación 4

En el gráfico de residuos (**Figura 16**) muestran algunos valores que podrían considerarse extremos, sin embargo, después de analizarlos individualmente no se encontró ninguna evidencia para considerarlos resultados erróneos por lo que se mantuvieron dentro de la base de datos utilizada para el análisis.

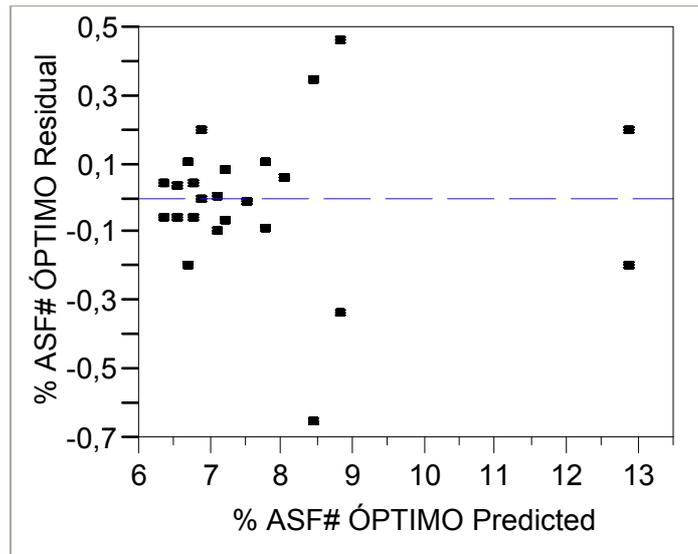


Figura 16 Gráfico de Residuos contra valores predichos por el modelo

Para concluir con el análisis de la influencia de la granulometría sobre el porcentaje óptimo de asfalto, se realizó el gráfico de contornos y el gráfico con la superficie de respuesta (**Figura 17**), los cuales muestran el efecto de la interacción entre dos de las variables más significativas del modelo. Con el gráfico de contornos se puede observar, por ejemplo, que para porcentajes mayores de 25% pasando la malla N°4, no se podrán obtener porcentajes de asfalto óptimo inferiores a 6,5%. De igual manera, el área sombreada muestra la gama de combinaciones posibles entre los porcentajes pasando las mallas N°4 y 3/8 que permitirán obtener porcentajes de asfalto óptimo inferiores a 6,5%.

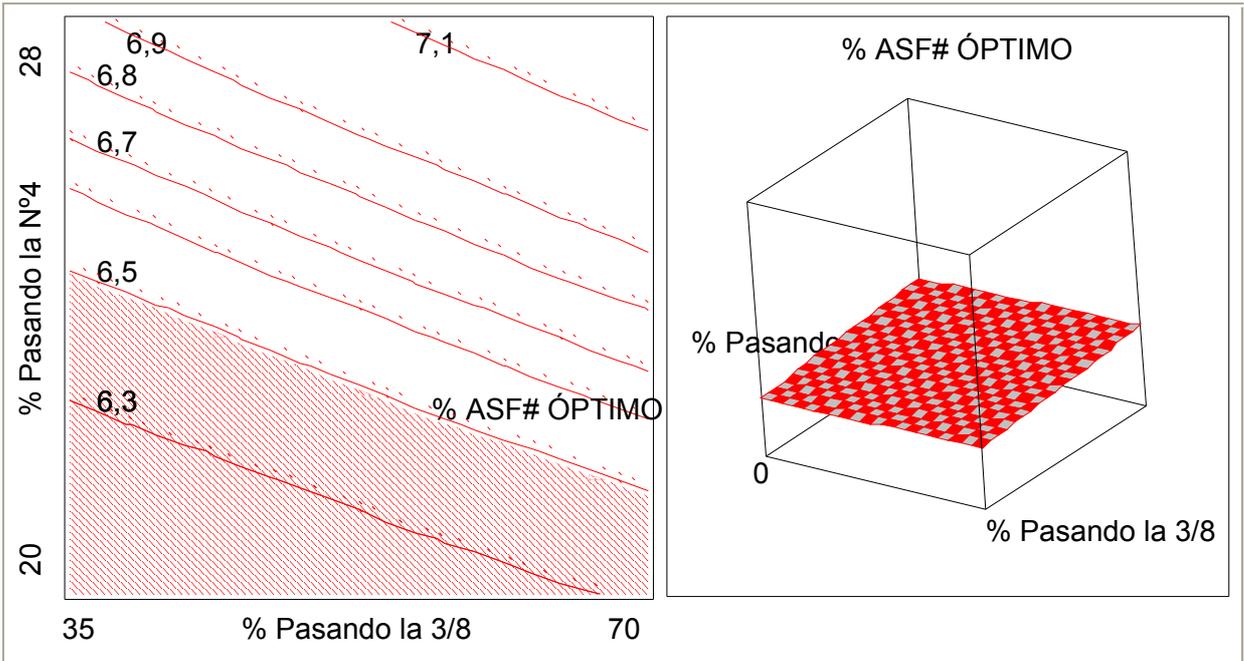


Figura 17 Gráfico de Contornos para “% Asfalto óptimo”

Influencia de la temperatura en la volumetría de las mezclas SMA

En la **primera etapa**, el efecto de la temperatura sólo se evaluó a nivel de pruebas de drenaje, y los resultados ya fueron discutidos en el capítulo 4 de este informe.

En la **segunda etapa** se realizaron diseños de mezcla tanto a bajas como a altas temperaturas, considerando las trece granulometrías escogidas. Los resultados de estos diseños se pueden observar en la **Tabla 12**, mostrada en el capítulo anterior.

En general, y observando los gráficos comparativos (**Figura 18**, **Figura 19** y **Figura 20**), las tendencias son similares tanto a bajas temperaturas como a altas temperaturas.

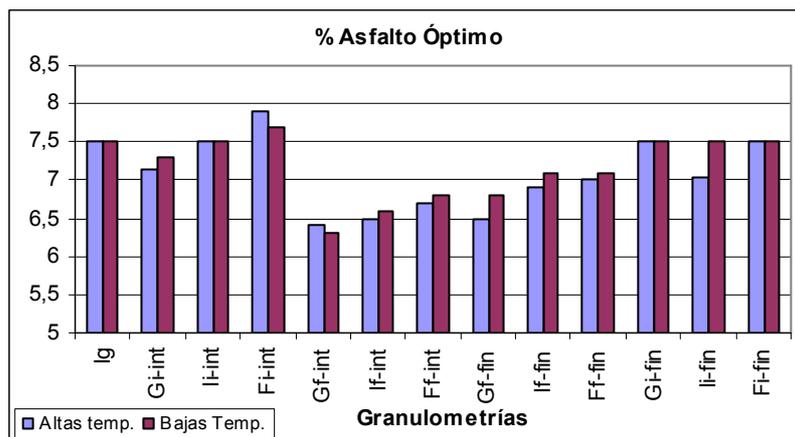


Figura 18 Porcentaje de asfalto óptimo para el diseño de mezcla a dos temperaturas

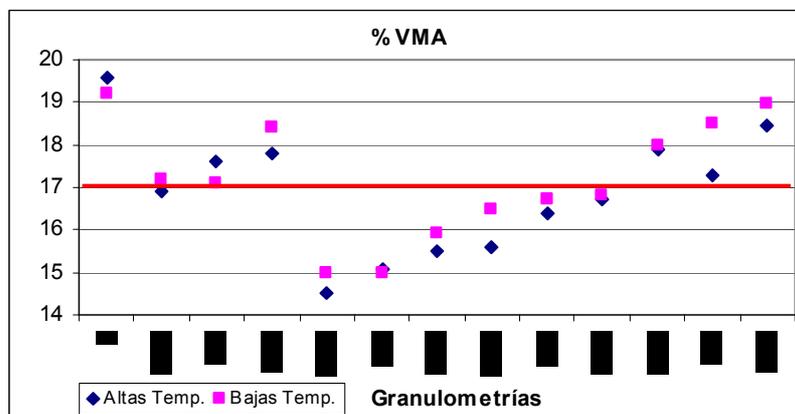


Figura 19 Porcentaje VMA para el diseño de mezcla a dos temperaturas

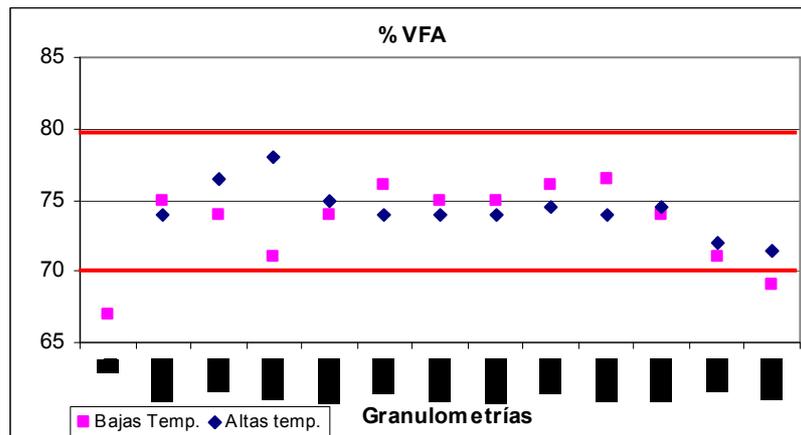


Figura 20 Porcentaje VFA para el diseño de mezcla a dos temperaturas

Se planteó la siguiente hipótesis para cada variable respuesta que compone el diseño de mezcla:

Ho: No hay diferencias significativas en la temperatura al evaluar la variable respuesta (% de asfalto óptimo, % VMA, %VFA).

H1: Hay diferencias significativas en la temperatura al evaluar la variable respuesta (% de asfalto óptimo, % VMA, %VFA).

En todos los casos se aceptó la hipótesis nula, por lo que no hay evidencia estadística al 95% de confianza de que el factor de la temperatura determine diferencias significativas en la variable respuesta.

Este análisis muestra que las temperaturas de mezclado y compactación no son factores relevantes que pueda afectar significativamente la volumetría en las mezclas abiertas SMA. Sin embargo, es importante considerar que esto puede cambiar considerablemente al estudiar el desempeño de la mezcla, ya que entran en juego otros factores como el envejecimiento.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones específicas

Influencia de la granulometría en el drenaje de las mezclas SMA

Las mezclas que presentaron menor porcentaje de drenaje son aquellas que poseen cantidades mayores de agregado intermedio y fino. Este comportamiento es esperado, ya que estas partículas absorben asfalto en mayor grado que las partículas gruesas, y por ende se inhibirá el escurrimiento en grado mayor.

También se puede concluir que las granulometrías Ff-int, If-int y Gf-int son las que mostraron los menores drenajes, por lo que es importante tener en cuenta que al utilizar estas combinaciones de agregado, se obtendrán ventajas como menores cantidades de asfalto y mezclas más trabajable.

Influencia de la temperatura en el drenaje de las mezclas SMA

Se pudo observar en los gráficos analizados cierta tendencia que permite deducir que los drenajes aumentarán en las mezclas SMA en la medida en que la temperatura de compactación aumente, lo cual es lógico, ya que el asfalto irá perdiendo su viscosidad y le permitirá fluir con mayor facilidad. Sin embargo, la prueba de hipótesis realizada determinó que no hay evidencia significativa que respalde este comportamiento.

Esto permite afirmar que cuando las diferencias entre temperaturas de mezclado y compactación no superan los 40 °C (como en este caso que se usaron temperaturas de compactación entre 136 °C y 176 °C), los drenajes en las mezclas SMA no cambiarán significativamente.

Influencia de la granulometría en la volumetría de las mezclas SMA

Asfalto Efectivo:

Este factor de la volumetría se ve influenciado por los porcentajes que pasan las mallas 9,5 mm (3/8), 4,75 mm (Nº4) y 2,36 mm (Nº8). Esto quiere decir que tanto los agregados gruesos como los intermedios son los que producirán el efecto más evidente dentro de esta variable respuesta.

Se determinó que al disminuir los porcentajes de agregado que pasan la malla 4,75 mm (Nº4) y la malla 9,5 mm (3/8), el porcentaje de asfalto efectivo se incrementará. También por medio del gráfico de contornos se pueden obtener diversas combinaciones que permitan predecir aproximadamente la cantidad de asfalto efectivo que consumirá la mezcla empleada.

Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (%VMA)

Los tamices que tuvieron mayor influencia sobre este factor volumétrico fueron 9,5 mm (3/8) y 2,36 mm (Nº8). Nuevamente la parte gruesa e intermedia del agregado es la que ejerce mayor influencia sobre la mezcla SMA.

Para obtener porcentajes de vacíos en el agregado mineral que cumplan con el mínimo de 17% solicitado por las normas internacionales es importante considerar que no se deben utilizar porcentajes pasando la malla 2,36 mm (Nº8) superior a 20%. Sin embargo, del gráfico de contornos se pueden obtener otras combinaciones que permitan optimizar el %VMA sin tener que afectar otras variables, por ejemplo, el contenido de vacíos, el cual por experiencias anteriores, ha sido difícil de alcanzar cuando se logran porcentajes de VMA altos.

La granulometría que presentó el mayor %VMA es Ig con un valor de 19,6% (a altas temperaturas) y 19,2% (a bajas temperaturas). Mientras que la granulometría Gf-int presentó los menores valores de VMA (14,5%-altas temperaturas y 15% a bajas temperaturas). Estas granulometrías contienen mayor cantidad de partículas gruesas en el primer caso (Ig) y en el otro caso tienen mayor porcentaje de finos, lo cual evidencia también que la manera en

que se utilicen estas proporciones de material favorecerá o no esta variable volumétrica.

Porcentaje de Vacíos llenados con asfalto

Esta variable respuesta en particular se determinó que está influenciada por cuatro mallas que resultan ser significativas según el análisis ANOVA, las cuales son 9,5 mm (3/8), 2,36 mm (N°8), 1,18 mm (N°16) y 0,15 mm (N°100). Por primera vez dentro del estudio se observa que los porcentajes que pasan por los tamices 1,18 mm y 0,15 mm influyen dentro del comportamiento de una variable volumétrica.

Se logró delimitar para un cierto rango de VFA los posibles valores dentro de los cuales deben estar los porcentajes pasando de las mallas mencionadas. Aunque el gráfico de contornos permite crear múltiples combinaciones, se tiene que por ejemplo, para mantener el porcentaje de VFA entre 70% y 80%, se deben considerar porcentajes pasando de 14% a 21% para la malla 1,18 mm (N°16) y 17% a 24% para la malla 2,36 mm (N°8).

Las granulometrías con mayores porcentajes de VFA fueron la Fi-int con 78% y la Ff-fin con 76,5%. Mientras que la granulometría con el menor valor fue la Ig con un 64% a altas temperaturas y un 67% a bajas temperaturas.

Porcentaje de Asfalto Óptimo

El porcentaje de asfalto óptimo está influenciado principalmente por las partículas que pasan los tamices 9,5 mm (3/8), 4,75 mm (N°4) y 2,36 mm (N°8). Tanto la parte gruesa como la parte intermedia de las granulometrías definen el comportamiento de esta variable obtenida de los diseños de mezcla realizados.

Según los resultados obtenidos, si se disminuye el porcentaje de material que pasa la malla 4,75 mm, se puede suponer que esto producirá una disminución en el porcentaje de asfalto óptimo de la mezcla. Es decir, que con menos cantidad de asfalto se logrará llegar al porcentaje de vacíos de diseño, que para este estudio se estableció como 4%.

La granulometría Ig produjo el valor más alto de esta variable con un 12,7% de asfalto óptimo a temperaturas altas y un 13,1% a temperaturas bajas². Mientras que el porcentaje menor se dio en la granulometría Gf-int con 6,4% y un 6,3% para altas y bajas temperaturas respectivamente.

Influencia de la temperatura en la volumetría de las mezclas SMA

De igual manera como se pudo observar con el drenaje, la temperatura no influyó significativamente en las variables volumétricas estudiadas en este proyecto.

Según los diseños de mezcla realizados, las tendencias en las granulometrías se mostraron similares tanto a altas temperaturas (mezclado 163 °C y compactación 149 °C) como a bajas temperaturas (mezclado 144-147 y compactación 133°C-136°C).

Conclusiones Generales

1. Los resultados obtenidos en esta investigación permiten establecer un marco de referencia para escoger granulometrías que cumplan con ciertas características de volumetría y emplearlas en profundizar en el desempeño de las mezclas SMA.
2. Este estudio permitió determinar que sí existe una influencia significativa de la granulometría en la volumetría de las mezclas SMA. La tendencia general fue que la cantidad de partículas gruesas e intermedias que conforma la granulometría producen los efectos más importantes, y más específicamente el porcentaje que pasa por los tamices 9,5 mm (3/8), 4,75 mm (Nº4) y 2,36 mm (Nº8).

² Este porcentaje se calculó mediante una proyección lineal, ya que con el porcentaje mayor de asfalto utilizado en el diseño de mezcla no se alcanzó el 4% e incluso 5% de vacíos de diseño.

3. El efecto de la granulometría en el drenaje de las mezclas SMA no fue estadísticamente significativo, sin embargo se evidenciaron algunas tendencias que permiten reconocer que las granulometrías con mayores porcentajes de partículas intermedias y finas producirán menores escurrimientos.
4. Las temperaturas de mezclado y compactación utilizadas según los métodos de equiviscosidad y viscosidad de corte cero, para elaborar las mezclas SMA, permitieron evaluar que los efectos que producen sus variaciones dentro de la prueba de drenaje no son significativos. De igual manera, en el caso de la volumetría, los diferentes rangos de temperaturas evaluados no produjeron cambios significativos en las variables estudiadas (% asfalto efectivo, % VMA, % VFA y % asfalto óptimo).

Recomendaciones

1. Las granulometrías que dieron mejores resultados, en cuanto a cumplimiento de los requerimientos establecidos en las normas internacionales son la Ff-int, If-int y la Gf-int. Estas granulometrías requirieron de bajos contenidos de asfalto para cumplir con el 4% de vacíos de diseño, además que sus escurrimientos fueron los menores de todas las granulometrías analizadas. Por tanto, estas granulometrías se pueden considerar dentro de una futura investigación para evaluar el desempeño de las mezclas SMA.
2. Es conveniente incluir otras variables de estudio tales como fuente de agregado, tipo de asfalto, tipo de aditivo; ya que en esta investigación solo se enfocó en un tipo de cada uno de ellos, pero para poder generar especificaciones de granulometrías y volumetría de las mezclas SMA es necesario ampliar el estudio en este sentido.

Referencias

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.

Bibliografía

1. AASHTO (2004). "Designing Stone Matrix Asphalt (SMA)" Designation MP 8-04. American Association of State Highway and Transportation Officials.
2. AASHTO (2002). "Designing Stone Matrix Asphalt (SMA)" Designation PP 41-02. American Association of State Highway and Transportation Officials.
3. AASHTO (1997). "Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures". Designation T 305-97 (2001). American Association of State Highway and Transportation Officials.
4. E. Ray Brown et.al. "Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) mixtures in the United States" NCAT Report N° 97-1, 1997.
5. Hongbin Xie et.al "4,75 mm NMA Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixtures"., NCAT Report 03-05, 2003.