

**VALORACIÓN DE RESISTENCIA AL DAÑO POR HUMEDAD Y A LA  
DEFORMACIÓN PERMANENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS CON  
MATRIZ DE AGREGADO GRUESO DE ORIGEN VOLCÁNICO.**

**Ing. José Pablo Aguiar Moya**

**Investigador / docente**

**Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) y**

**Escuela de Ingeniería Civil,**

**Universidad de Costa Rica (UCR)**

**MSc. MBA. Pedro Castro Fernández,**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Universidad de Costa Rica (UCR)**

**Escuela de Ingeniería Civil,**

**Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,**

**Universidad de Costa Rica,**

**San Pedro de Montes de Oca,**

**San José,**

**Costa Rica.**

**Tel: (506) 207 – 4994 / (506) 207 – 5423**

**Fax: (506) 207 – 4440 / (506) 207 – 4442**

**E-mail: [jpaguiar@lanamme.ucr.ac.cr](mailto:jpaguiar@lanamme.ucr.ac.cr)  
[jpaguiar@racsa.co.cr](mailto:jpaguiar@racsa.co.cr)**

## **RESUMEN**

En este estudio se buscó determinar la significancia estadística de un cambio en granulometría y rigidez de ligante sobre las propiedades de producto terminado para mezcla de concreto asfáltico, con el fin de establecer los beneficios relativos del uso de granulometrías con mayor contenido de gruesos y mayor contenido de polvo mineral (mezcla asfáltica con matriz de agregado grueso – SMA) y ligantes asfálticos más rígidos, sobre la vida útil de dichas capas asfálticas (resistencia a la deformación, agrietamiento y daño por humedad).

Para esto se desarrollaron 3 etapas experimentales: la primera, consistió en una caracterización de la materia prima empleada para producir la mezcla asfáltica (ligante asfáltico, agregado grueso y fino, relleno mineral y fibra de celulosa); en la segunda etapa se diseñó, según la metodología volumétrica Superpave, los contenidos óptimos de ligante asfáltico para los 6 tratamientos experimentales evaluados (3 granulometrías y 2 ligantes asfálticos) generándose información volumétrica (relacionada con el desempeño desde toda perspectiva); en la tercera etapa, se evaluó el desempeño de la mezcla asfáltica, en cuanto a resistencia a la deformación permanente y al daño por humedad.

Con los datos experimentales se realizó un análisis estadístico en el cual se determinó qué factores (granulometría, tipo y contenido de ligante asfáltico y estado de la mezcla) producen un efecto significativo sobre el desempeño de la mezcla asfáltica, y a la vez, qué combinación de parámetros producen la mezcla con mayor resistencia a la deformación permanente y al daño por humedad.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Actualmente, la tecnología de pavimentos, tanto en lo concerniente al uso, al análisis, así como el diseño de distintos tipos de mezclas asfálticas se ha desarrollado considerablemente. Este estudio viene a complementar una línea de investigación en la aplicación de nuevos tipos de mezclas asfálticas, con materiales nacionales, bajo las condiciones de cargas y ambientales a las que están sometidos los pavimentos en Costa Rica.

En este estudio se busca analizar el desempeño de mezclas asfálticas con matriz de agregado grueso (SMA, por sus siglas en inglés), que aún no son de aplicación nacional. Sin embargo, han demostrado ser una muy buena opción, a nivel internacional, en los lugares donde se han utilizado, presentando un alto grado de resistencia a la deformación plástica (esqueleto de agregado grueso de elevada estabilidad) y a la fatiga (espesores de película de ligante recubriendo al agregado mucho mayores que los convencionales en mezclas densas), además de ser una opción muy atractiva ya que es mucho más duradera que las mezclas asfálticas densas.

En el estudio se compara el efecto de cambios en la granulometría (variando tanto el contenido de agregado grueso como del relleno mineral de aportación), el tipo (se usó un ligante AC-30 y un PG-70(22)-XX) y el contenido de ligante asfáltico (tanto el contenido óptimo como el óptimo +/- 0,5 % PTM), sobre el desempeño y la durabilidad de la mezcla asfáltica. Variando dichos parámetros se estudio que tratamientos presentan mejor comportamiento.

El objetivo del estudio es el de analizar que parámetros, o combinación de los mismos, mencionados previamente, permiten obtener mezclas asfálticas que se desempeñen adecuadamente y que sean durables. El estudio se limita a una única fuente de agregado.

## 2. MATERIA PRIMA

### 2.1. CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO

En la Tabla 1, se muestran tanto las propiedades físicas de los ligantes asfálticos usados en la mezcla, así como la susceptibilidad térmica y al envejecimiento de dichos ligantes. Como se puede observar de dicha tabla, el ligante PG-70(22) presenta una mayor densidad, menores penetraciones a distintas temperaturas y es más viscoso. A pesar de esto, dicho ligante va a presentar mayores pérdidas de masa al ser envejecido y es ligeramente más susceptible a cambios en la temperatura que el ligante AC-30.

**Tabla 1. Propiedades físicas de los ligantes asfálticos utilizados.**

Condición de envejecimiento	Propiedad	Unidades	Ligante Asfáltico	
			AC - 30	PG - 70 (22)
Original	Densidad a 25°C	g/cm <sup>3</sup>	1.024	1.031
	Penetración a 15°C	1/100 mm	28.0	21.8
	Penetración a 25°C	1/100 mm	84.0	62.0
	Penetración a 35°C	1/100 mm	234.0	164.0
	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	2460	3691
	Viscosidad cinemática a 125°C	centiPoise	920	1204
	Viscosidad cinemática a 135°C	centiPoise	541	716
	Viscosidad cinemática a 145°C	centiPoise	346	447
RTFO	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	5807	10300
	Razón de viscosidades	-	2,36	2,79
	Pérdida de masa RTFO	%	0,475	0,978
	Índice de penetración	-	-1,14	-0,82
	Índice VTS	-	3,04	3,07

En la Tabla 2, se presentan algunos ensayos reológicos, según la metodología Superpave, realizados a los ligantes asfálticos; así como las clasificaciones PG de ambos ligantes

asfálticos. Se puede observar como el ligante PG-70(22) presenta menores ángulos de fase, lo que se relacionan con una mayor componente elástica del módulo de rigidez, con respecto a la componente plástica.

**Tabla 2. Grado de desempeño de ligantes asfálticos utilizados.**

Condición de envejecimiento	Temperatura	Parámetro	Unidades	Ligante Asfáltico	
				AC - 30	PG - 70 (22)
Original	58°C	G*/sen(δ)	KPa	3,156	4,710
		δ	°	82,1	80,3
	70°C	G*/sen(δ)	KPa	0,732	1,036
		δ	°	85,4	84,5
	82°C	G*/sen(δ)	KPa	0,243	0,306
		δ	°	88,4	86,6
RTFO	58°C	G*/sen(δ)	KPa	7,907	13,335
		δ	°	76,5	74,4
	70°C	G*/sen(δ)	KPa	1,793	3,033
		δ	°	81,4	79,0
	82°C	G*/sen(δ)	KPa	0,521	0,888
		δ	°	85,2	83,6
PAV	16°C	G* sen(δ)	KPa	5177	7133
		δ	°	45,5	44,5
	22°C	G* sen(δ)	KPa	2796	4452
		δ	°	49,3	47,5
	28°C	G* sen(δ)	KPa	1312	2176
		δ	°	53,3	51,8
Grado de desempeño	Temperatura máxima para condición original (°C)			68,19	71,13
	Temperatura máxima para condición RTFO (°C)			68,95	73,63
	Temperatura intermedia PAV (°C)			16,50	21,57
	PG			64 (19)	70 (22)

## 2.2. CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO VOLCÁNICO

Para este informe se ha evaluado material de origen volcánico (ígneo) de la zona de Santa Ana. En la Tabla 3, se puede observar las granulometrías empleadas para el estudio. Como se puede observar, todas las granulometrías presentan un tamaño máximo de 19,0 mm y un tamaño máximo nominal de 12,5 mm. Como se puede observar, la granulometría SMA 1 es la más cerrada (menor contenido de agregado grueso y relleno mineral, 70% y 11%

respectivamente) y la granulometría SMA 3 es la más abierta (mayor contenido de agregado grueso y relleno mineral, 74% y 15% respectivamente).

**Tabla 3. Granulometrías empleadas en el estudio.**

Tamiz		% Pasando Acumulado (%)			% Retenido (%)		
		SMA 1	SMA 2	SMA 3	SMA 1	SMA 2	SMA 3
19,0 mm	3/4"	100	100	100	0	0	0
12,5 mm	1/2"	95	94	92	5	6	8
9,5 mm	3/8"	50	45	40	45	49	52
4,76 mm	N° 4	30	28	26	20	17	14
2,38 mm	N° 8	24	22	21	6	6	5
1,19 mm	N° 16	21	21	20	3	1	1
0,60 mm	N° 30	19	19	19	2	2	1
0,30 mm	N° 50	18	17	18	1	2	1
0,15 mm	N° 100	16	16	16	2	1	2
0,075 mm	N° 200	11	13	15	5	3	1
Charola		-	-	-	11	13	15

En la Tabla 4 y en la Tabla 5 se presenta un resumen de las propiedades físicas, tanto del agregado fino como del agregado grueso, para las tres granulometrías evaluadas.

Adicionalmente al agregado volcánico y al ligante asfáltico, se le introdujo a la mezcla asfáltica fibras de celulosa, dosificadas a un 0,5 por ciento por peso total de mezcla. Además, puesto que dichas fibras consisten en una parte de fibra de celulosa y otra de ligante asfáltico, se consideró un aporte del 28 por ciento del peso de fibra de celulosa como parte de la dosificación requerida de ligante asfáltico en la mezcla.

**Tabla 4. Resumen de propiedades del agregado fino.**

Propiedad	Granulometría			Requisitos SMA
	SMA 1	SMA 2	SMA 3	
Gravedad esp. bruta ( $G_{mb}$ )	2,57	2,55	2,56	-
Gravedad esp. aparente ( $G_{sa}$ )	2,71	2,71	2,71	-
Absorción (%)	2,10	2,30	2,10	-
Angularidad (%)	48,67	52,35	56,44	45 min.

**Tabla 5. Resumen de propiedades del agregado grueso.**

Propiedad	Granulometría			Requisitos
	SMA 1	SMA 2	SMA 3	SMA
Gravedad esp. bruta ( $G_{mb}$ )	2,59	2,59	2,60	-
Gravedad esp. aparente ( $G_{sa}$ )	2,73	2,73	2,73	-
Abrasión en la máquina L.A. (%)	16,5	16,5	16,5	30 max.
Partículas planas y elongadas				
3 : 1	5,56	6,51	6,39	20 max.
5 : 1	0,00	0,00	0,00	5 max.
Absorción (%)	2,05	1,95	1,95	2 max.
Caras fracturadas (%)				
Una cara	100	100	100	100 min.
Dos caras	100	100	100	90 min.

### 3. DISEÑO DE MEZCLA

Las mezclas se diseñaron según la metodología Superpave. En la Tabla 6, se presentan las propiedades volumétricas de los distintos tratamientos experimentales.

Como se puede observar de la Tabla 6, para 4 de los seis tratamientos experimentales se obtuvo vacíos de aire superiores al 4%, esto se debe a que se buscó utilizar el mínimo contenido de ligante asfáltico posible para evitar los problemas de escurrimiento a los que es muy susceptible la mezcla asfáltica evaluada (observación hecha durante el proceso de mezclado y compactación). Para las mezclas asfálticas con matriz de agregado grueso, el requisito para VAM es de 17%, y como se puede observar de la Tabla 6, cuatro de los seis tratamientos experimentales no cumplen con el requisito, a pesar de que se acercan bastante (se verificó, de manera alternativa, el desempeño de la mezcla asfáltica). En lo que se refiere a VFA, las mezclas SMA requieren un porcentaje entre el 75 y 85%, el cual lo incumplen cuatro de los seis tratamientos experimentales, a pesar de que se acercan bastante (igualmente se considera que dicho incumplimiento sería irrelevante de verificarse un desempeño apropiado por resistencia a la deformación plástica). Todos los demás parámetros:  $\%G_{mm} @ N_{ini} < 89\%$ ,  $\%G_{mm} @ N_{max} < 98\%$  y  $VCA_{DRC} > VCA_{MIX}$  son cumplidos por todos los tratamientos experimentales.

**Tabla 6. Diseños de mezcla según metodología Superpave.**

Ligante asfáltico	Granulometría	Vacíos (%)	Contenido óptimo de ligante (%PTM)	VAM (%)	VFA (%)	%G <sub>mm</sub> @ N <sub>ini</sub>	%G <sub>mm</sub> @ N <sub>max</sub>	VCA <sub>DRC</sub> (%)	VCA <sub>MIX</sub> (%)
AC – 30	SMA 1	3,61	6,00	15,80	77,14	86,82	98,31	42,73	40,82
	SMA 2	4,06	6,30	16,85	75,91	85,92	96,79	42,40	39,87
	SMA 3	4,84	6,25	17,79	72,79	85,62	97,10	42,23	38,83
PG – 70 (22)	SMA 1	3,91	5,70	15,57	74,89	86,02	97,59	42,73	40,65
	SMA 2	4,61	5,95	16,72	72,42	85,45	96,81	42,40	39,78
	SMA 3	5,23	5,85	17,43	69,97	85,06	96,21	42,23	38,57
Requerimientos SMA (NAPA)		3,0 – 5,0	≥ 6,0	≥ 17,0	75,0 – 85,0	-	-	-	≤ VCA <sub>DRC</sub>
Requerimientos Superpave		3,0 – 5,0	-	≥ 14,0	65,0 – 75,0	≤ 89,0	≤ 98,0	-	-

Con el fin de determinar la susceptibilidad de los parámetros volumétricos a cambios en el tipo de ligante (AC-30 ó PG-70(22)), cambios en el tipo de granulometría (SMA 1, SMA 2 ó SMA 3), y a variaciones en el contenido de ligante asfáltico (óptimo – 0,5%, óptimo ú óptimo + 0,5% de asfalto PTM), sobre los parámetros volumétricos de importancia en el diseño de mezcla, se planteó un análisis de varianza de tres factores con en fin de poder determinar si dichas diferencias son significativas.

Para este fin, se consideraron los siguientes parámetros volumétricos: porcentaje de vacíos de aire (Va), VAM, VFA, %G<sub>mm</sub> @ N<sub>ini</sub>, %G<sub>mm</sub> @ N<sub>max</sub> (evaluado únicamente para el contenido de ligante óptimo), VCA de la mezcla.

En la Tabla 7 se presenta el análisis de significancia de los factores tipo de ligante, granulometría y contenido de ligante asfáltico, y sus respectivas interacciones (análisis realizado al 90% de confianza) con respecto a los parámetros volumétricos establecidos por la metodología Superpave. Del análisis, se puede concluir, al 90% de confianza, que el factor de mayor atribución sobre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica es la granulometría, seguido por el contenido de ligante asfáltico. También es importante resaltar que las interacciones entre los factores son muy significativas sobre las propiedades volumétricas.

**Tabla 7. Significancia de factores independientes y sus interacciones sobre parámetros volumétricos.**

Factor	Parámetros (*)					
	V <sub>a</sub>		VAM		VFA	
	P	Significancia	P	Significancia	P	Significancia
Ligante	0.083542	Significativo	0.000031	Significativo	0.597593	No significativo
Granulometría	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo
Contenido de ligante	0.213197	No significativo	0.000097	Significativo	0.002943	Significativo
Ligante - Granulometría	0.126658	No significativo	0.031362	Significativo	0.149726	No significativo
Ligante - Contenido	0.001866	Significativo	0.076194	Significativo	0.000790	Significativo
Granulometría - Contenido	0.019466	Significativo	0.018848	Significativo	0.019480	Significativo
Ligante - Granulometría - Contenido	0.054378	Significativo	0.046343	Significativo	0.067282	Significativo

Factor	Parámetros (*)					
	%G <sub>mm</sub> @ N <sub>ini</sub>		%G <sub>mm</sub> @ N <sub>max</sub>		VCA <sub>MIX</sub>	
	P	Significancia	P	Significancia	P	Significancia
Ligante	0.600064	No significativo	0.018572	Significativo	0.000005	Significativo
Granulometría	0.000002	Significativo	0.001300	Significativo	0.000000	Significativo
Contenido de ligante	0.021826	Significativo	-	-	0.000014	Significativo
Ligante - Granulometría	0.381719	No significativo	0.127620	No significativo	0.011869	Significativo
Ligante - Contenido	0.013825	Significativo	-	-	0.035140	Significativo
Granulometría - Contenido	0.148078	No significativo	-	-	0.004953	Significativo
Ligante - Granulometría - Contenido	0.978841	No significativo	-	-	0.014705	Significativo

(\*) Significancia al 90% de confianza.

## 4. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO

### 4.1. RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA

En la Tabla 8 se presentan las deformaciones plásticas (mm) a las 8000 repeticiones de carga en el APA, tanto en estado seco como en estado condicionado (solamente para dos tratamientos experimentales), de los 6 tratamientos experimentales, tanto para el contenido óptimo, como para el contenido óptimo  $\pm$  0,5 % de ligante asfáltico (el contenido bajo de ligantes se usó solamente para dos tratamientos experimentales).

En la tabla indicada, se puede observar como la deformación en la mezcla incrementa conforme disminuye la rigidez del ligante asfáltico (la mezcla asfáltica con ligante AC-30 presenta mayor deformación que la mezcla asfáltica con ligante PG-70(22)). También, se observa como la deformación plástica disminuye conforme la granulometría presenta mayor contenido de partículas gruesas y relleno mineral (menor contenido de partículas intermedias), por lo que la granulometría SMA 3 es la que presenta la menor deformación.



**Tabla 8. Determinación de deformación permanente promedio en el APA. (\*)**

Ligante	Granulometría	Contenido de ligante asfáltico PTM (%)		V <sub>a</sub> (%)				Deformación plástica a 8000 ciclos (mm)			
		Valor	Referencia	Seco		Condicionado		Seco		Condicionado (**)	
				x	s	x	s	x	s	x	s
AC - 30	SMA 1	5.50%	Óptimo - 0,50%	-	-	-	-	-	-	-	-
		6.00%	Óptimo	6.91	0.04	-	-	3.857	0.050	-	-
		6.50%	Óptimo + 0,50%	6.84	0.21	-	-	5.231	0.025	-	-
	SMA 2	5.80%	Óptimo - 0,50%	-	-	-	-	-	-	-	-
		6.30%	Óptimo	6.74	0.05	-	-	4.130	0.336	-	-
		6.80%	Óptimo + 0,50%	7.41	0.13	-	-	4.226	0.238	-	-
	SMA 3	5.75%	Óptimo - 0,50%	7.08	0.21	7.33	0.02	2.926	0.754	2.763	0.444
		6.25%	Óptimo	6.44	0.12	7.12	0.24	3.853	1.607	2.425	0.614
		6.75%	Óptimo + 0,50%	7.19	0.28	7.72	0.13	2.905	1.201	2.799	0.719
PG - 70 (22)	SMA 1	5.20%	Óptimo - 0,50%	-	-	-	-	-	-	-	-
		5.70%	Óptimo	6.72	0.17	-	-	4.094	0.685	-	-
		6.20%	Óptimo + 0,50%	7.07	0.23	-	-	4.129	0.804	-	-
	SMA 2	5.45%	Óptimo - 0,50%	-	-	-	-	-	-	-	-
		5.95%	Óptimo	6.91	0.23	-	-	3.969	0.343	-	-
		6.45%	Óptimo + 0,50%	6.79	0.18	-	-	3.659	0.125	-	-
	SMA 3	5.35%	Óptimo - 0,50%	6.64	0.35	7.18	0.19	2.922	1.039	3.290	0.723
		5.85%	Óptimo	6.55	0.11	6.61	0.23	2.883	0.367	1.992	0.579
		6.35%	Óptimo + 0,50%	6.57	0.30	7.32	0.10	3.020	0.818	2.777	0.719

(\*) Las muestras se condicionaron a una temperatura de 25°C previo al ensayo, durante 24 horas.

(\*\*) Las muestras se condicionaron con humedad por 24 horas a 60°C.

Es importante aclarar que la deformación plástica en la mezcla en muchos de los casos se considera alta, pues la deformación en una mezcla adecuada debería no exceder los 3 mm (observación de resultados generales disponibles en Costa Rica de este ensayo).

Se analizó el efecto de la granulometría, el tipo y el contenido de ligante asfáltico, así como las interacciones entre dichos factores sobre la deformación plástica de la mezcla asfáltica sometida al ensayo del APA.

En la Tabla 9 se presenta el análisis de significancia de los factores granulometría, tipo y contenido de ligante asfáltico; y sus respectivas interacciones (análisis realizado al 90% de

confianza) sobre la deformación plástica medida a los siguientes ciclos de carga: 100, 1000, y 8000.

Del análisis, se puede concluir al 90% de confianza que el factor de mayor peso sobre la deformación plástica de la mezcla asfáltica es el tipo de ligante asfáltico, por lo que el uso de un ligante asfáltico de mayor rigidez (PG-70(22) vs. AC-30) produce mezclas menos susceptibles a la deformación plástica. Además, se puede observar que el contenido de ligante asfáltico produce un efecto significativo sobre la deformación plástica a los 100 ciclos de carga, y como se observó durante los ensayos, es durante los primeros 100 ciclos de carga que se produce la mayor deformación permanente en la mezcla.

**Tabla 9. Significancia de factores independientes y sus interacciones sobre la deformación permanente en estado seco.**

Factor	Parámetros (*)							
	V <sub>a</sub>		Deformación permanente					
	P	Significancia	100 ciclos		1000 ciclos		8000 ciclos	
P			Significancia	P	Significancia	P	Significancia	
Ligante	0.005329	Significativo	0.004475	Significativo	0.047005	Significativo	0.062455	Significativo
Granulometría	0.008274	Significativo	0.147791	No significativo	0.550636	No significativo	0.571185	No significativo
Contenido de ligante	0.000869	Significativo	0.084393	Significativo	0.150522	No significativo	0.209333	No significativo
Ligante - Granulometría	0.226906	No Significativo	0.687378	No significativo	0.679745	No significativo	0.789213	No significativo
Ligante - Contenido	0.027963	Significativo	0.213548	No significativo	0.717726	No significativo	0.507548	No significativo
Granulometría - Contenido	0.358968	No Significativo	0.965972	No significativo	0.849207	No significativo	0.625172	No significativo
Ligante - Granulometría - Contenido	0.001475	Significativo	0.398005	No significativo	0.428558	No significativo	0.259728	No significativo

(\*) Significancia al 90% de confianza.

## 4.2. RESISTENCIA AL DAÑO POR HUMEDAD

En la Tabla 10, se presenta la resistencia a la tensión diametral, tanto en estado seco como en estado condicionado (por 24 horas a 60°C, después de saturarse al 55 – 80 %), de los 6 tratamientos experimentales, tanto para el contenido óptimo – 0,5%, como para el contenido óptimo de ligante asfáltico. Además, se presenta la resistencia a la tensión diametral, tanto en estado seco como en estado condicionado (por 24 horas a 60°C, después de saturarse al 55 – 80 %) para el contenido alto de ligante asfáltico (óptimo + 0,5 %), para las mezclas asfálticas que manifestaron un mejor desempeño (mezclas con granulometría SMA 3).

**Tabla 10. Resistencia promedio a la tensión diametral de la mezcla. (\*)**

Ligante	Granulometría	Contenido de ligante asfáltico PTM (%)		V <sub>a</sub> (%)				Resistencia a la tensión diametral (kPa)				Resistencia retenida (%)
		Valor	Referencia	Seco		Condicionado		Seco		Condicionado (**)		
				x	s	x	s	x	s	x	s	
AC - 30	SMA 1	5.50%	Óptimo - 0,50%	7.06	0.40	6.52	0.17	569	32	513	26	90.16
		6.00%	Óptimo	6.74	0.04	6.48	0.14	502	25	472	20	94.02
		6.50%	Óptimo + 0,50%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SMA 2	5.80%	Óptimo - 0,50%	7.36	0.03	7.11	0.13	573	41	503	43	87.82
		6.30%	Óptimo	7.40	0.13	7.00	0.09	472	53	443	26	94.00
		6.80%	Óptimo + 0,50%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SMA 3	5.75%	Óptimo - 0,50%	7.30	0.18	6.89	0.10	626	55	534	11	85.22
		6.25%	Óptimo	7.20	0.54	6.65	0.02	543	46	508	11	93.45
		6.75%	Óptimo + 0,50%	8.38	0.20	7.16	0.23	463	11	428	43	92.30
PG - 70 (22)	SMA 1	5.20%	Óptimo - 0,50%	7.50	0.11	7.49	0.17	790	68	761	18	96.38
		5.70%	Óptimo	7.23	0.17	7.05	0.01	782	41	708	15	90.52
		6.20%	Óptimo + 0,50%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SMA 2	5.45%	Óptimo - 0,50%	7.24	0.39	7.34	0.12	836	83	749	38	89.65
		5.95%	Óptimo	7.26	0.16	7.31	0.11	703	20	632	38	89.79
		6.45%	Óptimo + 0,50%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SMA 3	5.35%	Óptimo - 0,50%	6.56	0.40	6.58	0.38	876	42	667	9	76.15
		5.85%	Óptimo	6.44	0.63	6.26	0.34	787	47	706	6	89.73
		6.35%	Óptimo + 0,50%	6.95	0.19	6.75	0.47	698	28	591	62	84.63

(\*) Las muestras se condicionaron a una temperatura de 25°C previo al ensayo, durante 24 horas.

(\*\*) Las muestras se condicionaron con humedad por 24 horas a 60°C.

De la tabla, se puede observar como la resistencia a la tensión diametral en la mezcla se incrementa conforme aumenta la rigidez del ligante asfáltico (la mezcla asfáltica con ligante AC-30 presenta menor resistencia a la tensión diametral que la mezcla asfáltica con ligante PG-70(22)). También, se observa como la resistencia a la tensión diametral tiende a incrementar conforme la granulometría se abre (presenta mayor contenido de partículas gruesas y relleno mineral, y menor contenido de partículas intermedias), por lo que la granulometría SMA 3 es la que presenta la mayor resistencia a la tensión diametral.

Se analizó el efecto de la granulometría, el tipo y el contenido de ligante asfáltico y, la condición de la mezcla asfáltica (seca o condicionada), así como las interacciones entre los factores, sobre la resistencia a la tensión diametral de la mezcla asfáltica.

En la Tabla 11 se presenta el análisis de significancia de los factores granulometría, tipo y contenido de ligante asfáltico, y condición de la mezcla asfáltica; y sus respectivas interacciones (análisis realizado al 90% y al 99% de confianza); sobre la resistencia a la tensión diametral.

**Tabla 11. Significancia de factores independientes y sus interacciones sobre la tensión diametral.**

Factor	Parámetros					
	P	V <sub>a</sub> (***)		P	T.D.	
		Significancia			Significancia	
		(*)	(**)		(*)	(**)
Ligante	0.280432	No Significativo	No Significativo	0.000000	Significativo	Significativo
Granulometría	0.000008	Significativo	Significativo	0.010388	Significativo	No Significativo
Contenido de ligante	0.000011	Significativo	Significativo	0.000000	Significativo	Significativo
Condición de la muestra	-	-	-	0.000000	Significativo	Significativo
Ligante - Granulometría	0.000001	Significativo	Significativo	0.082180	Significativo	No Significativo
Ligante - Contenido	0.293093	No Significativo	No Significativo	0.990088	No Significativo	No Significativo
Granulometría - Contenido	0.453505	No Significativo	No Significativo	0.016261	Significativo	No Significativo
Ligante - Granulometría - Contenido	0.857947	No Significativo	No Significativo	0.256027	No Significativo	No Significativo
Ligante - Condición	-	-	-	0.021562	Significativo	No Significativo
Granulometría - Condición	-	-	-	0.013179	Significativo	No Significativo
Ligante - Granulometría - Condición	-	-	-	0.110345	No Significativo	No Significativo
Contenido - Condición	-	-	-	0.062251	Significativo	No Significativo
Ligante - Contenido - Condición	-	-	-	0.814384	No Significativo	No Significativo
Granulometría - Contenido - Condición	-	-	-	0.120350	No Significativo	No Significativo
Ligante - Granulometría - Contenido - Condición	-	-	-	0.369056	No Significativo	No Significativo

(\*) Significancia al 90% de confianza.

(\*\*) Significancia al 99% de confianza.

(\*\*\*) El factor condición no participó en la determinación de la significancia del parámetro.

Del análisis, se puede concluir al 90% de confianza que los cuatro factores: granulometría, tipo y contenido de ligante asfáltico, y condición de la mezcla asfáltica tienen un efecto significativo sobre la resistencia a la tensión diametral. También se aprecia que las interacciones del tipo de ligante con los demás factores son significativas, así como la interacción entre el contenido de ligante asfáltico y la condición de la mezcla asfáltica. De aquí se recalca la importancia del tipo de ligante asfáltico, pues incrementos en la rigidez del mismo producen mezclas con mayor resistencia a la tensión diametral. A pesar de esto, se observa de la tabla que al incrementar el nivel de confianza al 99%, individualmente, el tipo y el contenido de ligante asfáltico y la condición de la mezcla asfáltica siguen siendo significativos, pero sus respectivas interacciones lo dejan de ser, de manera que se confirma la mayor importancia relativa de los efectos principales.

Adicionalmente a las pruebas de tensión diametral, se realizó el ensayo de compresión uniaxial a los dos tratamientos que se determinó presentaron mejores desempeños. Dichos tratamientos

fueron las mezclas con granulometría SMA 3 (la más abierta, esto es, la que tiene mayor contenido de partículas gruesas y mayor contenido de relleno mineral).

En la Tabla 12 se presenta la resistencia a la compresión uniaxial, tanto en estado seco como en estado condicionado (por 24 horas a 60°C, sin saturación de poros), de los 2 tratamientos experimentales, para los tres contenidos evaluados de ligante asfáltico (óptimo – 0,5 %, óptimo y óptimo + 0,5 %).

Granulometría	Ligante	Contenido de ligante asfáltico PTM (%)		V <sub>a</sub> (%)				Resistencia a la compresión uniaxial (N)				
		Valor	Referencia	Seco		Condicionado		Seco		Condicionado (*)		Resistencia retenida (%)
				x	s	x	s	x	s	x	s	
SMA 3	AC - 30	5.75%	Óptimo - 0,50%	7.02	0.44	7.07	0.29	3179	289	1814	203	57.06
		6.25%	Óptimo	6.93	0.29	7.12	0.72	2646	81	1397	139	52.80
		6.75%	Óptimo + 0,50%	7.47	0.34	7.16	0.56	2549	63	1508	226	59.17
	PG - 70 (22)	5.35%	Óptimo - 0,50%	7.88	0.25	7.67	0.31	4150	121	2503	205	60.31
		5.85%	Óptimo	7.70	0.42	7.94	0.28	4090	177	2651	42	64.82
		6.35%	Óptimo + 0,50%	7.54	0.24	7.37	0.60	3923	198	2355	125	60.02

**Tabla 12. Resistencia promedio a la compresión uniaxial de la mezcla.**

(\*) Las muestras se condicionaron con humedad a una temperatura de 60°C por 24 horas previo al ensayo.

De la tabla, se puede observar como la resistencia a la compresión uniaxial en la mezcla se incrementa conforme aumenta la rigidez del ligante asfáltico (la mezcla asfáltica con ligante AC-30 presenta menor resistencia a la compresión uniaxial que la mezcla asfáltica con ligante PG-70(22)).

Se analizó el efecto del tipo y el contenido de ligante asfáltico, y la condición de la mezcla asfáltica (seca o condicionada con humedad), así como las interacciones entre los factores, sobre la resistencia a la compresión uniaxial de la mezcla asfáltica.

En la Tabla 13 se presenta el análisis de significancia de los factores tipo y contenido de ligante asfáltico, y condición de la mezcla asfáltica; y sus respectivas interacciones (análisis realizado al 85% y al 99% de confianza); sobre la resistencia a la compresión uniaxial.

Del análisis, se puede concluir al 85% de confianza que los factores: tipo y contenido de ligante asfáltico, y condición de la mezcla asfáltica, tienen un efecto significativo sobre la resistencia a la compresión uniaxial. También se aprecia que las interacciones del tipo de ligante con los demás factores son significativas. Además, se observa de la tabla que al incrementar el nivel de confianza al 99%, la importancia de los factores y sus interacciones sigue siendo la misma. En este caso las interacciones son altamente significativas, como no ocurrió en la resistencia a la tensión diametral.

**Tabla 13. Significancia de factores independientes y sus interacciones sobre la compresión uniaxial.**

Factor	Parámetros					
	V <sub>a</sub> (***)			C.U.		
	P	Significancia		P	Significancia	
		(*)	(**)		(*)	(**)
Ligante	0.000207	Significativo	Significativo	0.000000	Significativa	Significativo
Contenido de ligante	0.968229	No Significativo	No Significativo	0.000338	Significativa	Significativo
Condición de la muestra	-	-	-	0.000000	Significativa	Significativo
Ligante - Contenido	0.102995	Significativo	No Significativo	0.004287	Significativa	Significativo
Ligante - Condición	-	-	-	0.007448	Significativa	Significativo
Contenido - Condición	-	-	-	0.327334	No Significativo	No Significativo
Ligante - Contenido - Condición	-	-	-	0.469166	No Significativo	No Significativo

(\*) Significancia al 85% de confianza.

(\*\*) Significancia al 99% de confianza.

(\*\*\*) El factor condición no participó en la determinación de la significancia del parámetro.

### 4.3. MODULOS DE RIGIDEZ

La determinación del módulo resiliente se realizó a dos cargas diametrales: una carga haversiana, la cual corresponde al 15 por ciento de la resistencia a la tensión diametral de los especímenes de muestra en estado seco (carga diametral 1) y para una carga diametral 1000 N inferior a la primera, tomando como límite inferior los 500 N (carga diametral 2).

En la Tabla 14 se presenta el módulo resiliente, tanto en estado seco como en estado condicionado (por 24 horas a 60°C, después de saturarse al 55 – 80 %) y para ambas cargas diametrales, de los 6 tratamientos experimentales, tanto para el contenido óptimo – 0,5%, como para el contenido óptimo de ligante asfáltico. Además, se presenta el módulo resiliente, tanto en estado seco como en estado condicionado (por 24 horas a 60°C, después de saturarse al 55 – 80 %), y sometido a ambas cargas diametrales, para el contenido alto de ligante asfáltico (óptimo + 0,5 %), para los casos de experimentación detallada para las mezclas de mejor desempeño.

**Tabla 14. Módulo resiliente promedio a 25°C con frecuencia de carga de 1 Hz. (\*)**

Ligante	Granulometría	Contenido de ligante asfáltico PTM (%)		V <sub>a</sub> (%)		Módulo resiliente con carga diametral 1 (MPa)					Módulo resiliente con carga diametral 2 (MPa)				
		Valor	Referencia			Seco		Condicionado (**)		MRR (%)	Seco		Condicionado (**)		MRR (%)
				x	s	x	s	x	s		x	s	x	s	
AC - 30	SMA 1	5.50%	Óptimo - 0.50%	6.52	0.17	3844	593	3095	213	80.52	-	-	3515	361	-
		6.00%	Óptimo	6.48	0.14	3130	262	2800	78	89.47	-	-	3055	135	-
		6.50%	Óptimo + 0.50%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SMA 2	5.80%	Óptimo - 0.50%	7.11	0.13	3603	214	2955	283	82.02	3961	92	3261	149	82.33
		6.30%	Óptimo	7.00	0.09	3176	169	2647	277	83.36	3433	195	2915	301	84.90
		6.80%	Óptimo + 0.50%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SMA 3	5.75%	Óptimo - 0.50%	6.89	0.10	3419	322	3261	228	95.38	3698	492	3371	200	91.17
		6.25%	Óptimo	6.65	0.02	3023	269	2934	400	97.06	3265	284	2988	341	91.52
		6.75%	Óptimo + 0.50%	7.16	0.23	3136	378	3022	276	96.36	3576	441	3270	225	91.46
PG - 70 (22)	SMA 1	5.20%	Óptimo - 0.50%	7.49	0.17	5850	306	4819	599	82.38	5931	228	5117	845	86.27
		5.70%	Óptimo	7.05	0.01	5135	589	3874	186	75.44	5481	790	4202	316	76.66
		6.20%	Óptimo + 0.50%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SMA 2	5.45%	Óptimo - 0.50%	7.34	0.12	5057	313	3568	232	70.56	5255	236	3981	294	75.77
		5.95%	Óptimo	7.31	0.11	4708	455	3436	200	72.99	4764	317	3722	224	78.12
		6.45%	Óptimo + 0.50%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SMA 3	5.35%	Óptimo - 0.50%	6.58	0.38	4873	123	3294	93	67.60	5037	42	3552	49	70.53
		5.85%	Óptimo	6.26	0.34	4530	97	3483	132	76.87	4788	234	3767	99	78.67
		6.35%	Óptimo + 0.50%	6.75	0.47	3817	504	3803	324	99.62	4066	534	3975	328	97.76

(\*) Las muestras se condicionaron a una temperatura de 25°C previo al ensayo, durante 24 horas.

(\*\*) Las muestras se condicionaron con humedad por 24 horas a 60°C.

De la tabla, se puede observar cómo el módulo resiliente de la mezcla, en general, aumenta conforme aumenta la rigidez del ligante asfáltico (la mezcla asfáltica con ligante AC-30 presenta menor módulo resiliente que la mezcla asfáltica con ligante PG-70(22)). También, se observa como el módulo resiliente tiende a disminuir conforme la granulometría se abre (presenta mayor contenido de partículas gruesas y relleno mineral, y menor contenido de partículas intermedias), a pesar de que en algunos de los casos, hay un incremento de rigidez en lo referente la granulometría SMA 3 con respecto a las granulometría SMA 1 y SMA 2.

Se analizó el efecto de la granulometría, el tipo y el contenido de ligante asfáltico, y la condición de la mezcla asfáltica, así como las interacciones entre los factores, sobre la rigidez de la mezcla asfáltica.

En la Tabla 15 se presenta el análisis de significancia de los factores granulometría, tipo y contenido de ligante asfáltico, y condición de la mezcla asfáltica; y sus respectivas interacciones (análisis realizado al 90% y al 99% de confianza); sobre la rigidez de la mezcla asfáltica.

**Tabla 15. Significancia de factores independientes y sus interacciones sobre el módulo resiliente.**

Factor	M.R.					
	Carga diametral 1			Carga diametral 2		
	P	Significancia		P	Significancia	
		(*)	(**)		(*)	(**)
Ligante	0.000000	Significativo	Significativo	0.000000	Significativo	Significativo
Granulometría	0.000005	Significativo	Significativo	0.000027	Significativo	Significativo
Contenido de ligante	0.000027	Significativo	Significativo	0.000551	Significativo	Significativo
Condición de la muestra	0.000000	Significativo	Significativo	0.000000	Significativo	Significativo
Ligante - Granulometría	0.000131	Significativo	Significativo	0.010682	Significativo	No Significativo
Ligante - Contenido	0.833095	No Significativo	No Significativo	0.411705	No Significativo	No Significativo
Granulometría - Contenido	0.037651	Significativo	No Significativo	0.318457	No Significativo	No Significativo
Ligante - Granulometría - Contenido	0.200501	No Significativo	No Significativo	0.164334	No Significativo	No Significativo
Ligante - Condición	0.000193	Significativo	Significativo	0.011128	Significativo	No Significativo
Granulometría - Condición	0.567422	No Significativo	No Significativo	0.672293	No Significativo	No Significativo
Ligante - Granulometría - Condición	0.161410	No Significativo	No Significativo	0.209296	No Significativo	No Significativo
Contenido - Condición	0.005040	Significativo	Significativo	0.047030	Significativo	No Significativo
Ligante - Contenido - Condición	0.013937	Significativo	No Significativo	0.034813	Significativo	No Significativo
Granulometría - Contenido - Condición	0.650420	No Significativo	No Significativo	0.177864	No Significativo	No Significativo
Ligante - Granulometría - Contenido - Condición	0.206619	No Significativo	No Significativo	0.461086	No Significativo	No Significativo

(\*) Significancia al 90% de confianza.

(\*\*) Significancia al 99 % de confianza.

Del análisis, se puede concluir al 90% de confianza que los factores: granulometría, tipo y contenido de ligante asfáltico, y condición de la mezcla asfáltica, tienen un efecto significativo sobre la rigidez de la mezcla asfáltica. También se aprecia que la interacción del tipo de ligante con la granulometría y la condición de la mezcla asfáltica, así como la relación entre el contenido de ligante asfáltico y la condición de la mezcla asfáltica son significativas. Además, se observa de la tabla que al incrementar el nivel de confianza al 99%, la importancia de los factores y sus interacciones sigue siendo la misma (con excepción del contenido de ligante asfáltico y de la interacción entre los factores para la carga diametral 2, la cual en la mayoría de los casos es baja).

## 5. CONCLUSIONES

### 5.1. DISEÑO DE MEZCLA

Se observó que conforme se reduce el porcentaje de material fino de la mezcla asfáltica, se dan altos grados de escurrimiento, así como la imposibilidad de alcanzar vacíos de aire de  $4,0 \pm 1,0$  por ciento; obteniendo valores de VAM excesivamente altos y de VFA muy bajos. Además, se pierde contacto interparticular entre los agregados. Inversamente, al incrementar la fracción fina de la mezcla asfáltica, se reduce el escurrimiento de la mezcla, y se observa una reducción



en el VAM y un incremento en el VFA. Experimentalmente se ha comprobado que es difícil llegar a VAM de 17,0% o más y cumplir con los requisitos de escurrimiento, sin embargo si es un hecho el incremento de 3% a 4% de VAM respecto a mezclas de granulometría densa con agregado de la misma fuente.

También se observó que las mezclas SMA son muy dadas al escurrimiento, esto debido al alto contenido de ligante asfáltico que se dosifica, para poder garantizar la durabilidad de la mezcla asfáltica. La fibra de celulosa empleada, por tanto, tiene como fin retener el exceso de ligante, para que el agregado pueda estar recubierto de una película de ligante asfáltico de mayor espesor. Se encontró que el problema de escurrimiento es uno de los tópicos críticos, no sólo para el diseño de mezcla, sino que también durante la producción de mezcla asfáltica, dada la gran energía necesaria para distribuir la fibra.

Del análisis estadístico se pudo observar que el ligante asfáltico tiene un efecto significativo sobre los vacíos de aire en la mezcla, los vacíos en el agregado mineral (VAM) y los vacíos en el agregado grueso ( $VCA_{MIX}$ ). El contenido de ligante asfáltico tiene un efecto significativo sobre los vacíos en el agregado mineral (VAM), los vacíos llenos de asfalto (VFA) y los vacíos en el agregado grueso ( $VCA_{MIX}$ ). A pesar de esto, se determinó que el factor de mayor importancia es la granulometría, pues produce un efecto significativo sobre todos los parámetros evaluados durante el diseño de mezcla, y por lo tanto una granulometría adecuada debería ser la primera prioridad a la hora de diseñar mezcla asfáltica SMA.

A pesar de que la granulometría es el factor de mayor importancia, se observó que conforme aumenta la rigidez del ligante asfáltico, la mezcla asfáltica es mucho más trabajable (aún en contenidos altos de ligante asfáltico) y presenta menores porcentajes de escurrimiento. Es por esto que se considera conveniente aplicar ligantes asfálticos modificados (agregar polímeros al ligante asfáltico) de mayor rigidez, que produzcan un mastique asfáltico más rígido y se recomienda incrementar el porcentaje de fibra de celulosa (ya que el fabricante recomienda hasta un 1,5% por peso total de mezcla).

## **5.2. RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA**

Se encontró, en el análisis estadístico, que el único parámetro que tiene un efecto significativo sobre la deformación permanente en estado seco, de la mezcla asfáltica, es el tipo de ligante

asfáltico. Al corto plazo, se encontró que el contenido de ligante asfáltico es también significativo.

Una observación importante es que, en promedio, a los 100 ciclos de carga del APA, la mezcla asfáltica ya se ha deformado más del 25 por ciento de la deformación total experimentada a los 8000 ciclos de carga; y a los 1000 ciclos de carga, la mezcla asfáltica ya se ha deformado más del 56 por ciento de la deformación a los 8000 ciclos de carga, por lo que se puede esperar que la mayoría de la deformación permanente de la mezcla asfáltica ocurra al corto plazo (situación que es además complementada por rigidez del ligante cuando no ha sido sujeto a interperismo). Por tanto, puesto que al corto plazo el contenido de ligante asfáltico tiene un efecto significativo, se podría buscar reducir el contenido de ligante asfáltico con el fin de minimizar la deformación permanente.

En cuanto al tipo de ligante asfáltico, que estadísticamente es el único factor que produce un efecto significativo sobre la deformación permanente a largo plazo, se observó que la deformación permanente baja conforme aumenta la rigidez del ligante asfáltico. Esto se debe a que al utilizar un ligante asfáltico de mayor rigidez se genera mayor resistencia mecánica de la mezcla, por un mastique asfáltico más rígido. De aquí que se recomiende el uso de ligantes asfálticos modificados, los cuales son más rígidos y deberían presentar una mejor resistencia a la deformación permanente.

Se observó también que conforme se abre la granulometría (se incrementa el porcentaje de gruesos y relleno mineral y, se reduce el porcentaje de partículas de tamaño intermedio) disminuye la deformación permanente de la mezcla asfáltica, a pesar de que las diferencias no sean significativas estadísticamente (efecto marginal aparente que requiere de investigación adicional).

En lo concerniente al estado de la mezcla asfáltica, se apreció, al 90 por ciento de confianza, que no hay evidencia estadística de variación en la deformación permanente. De hecho, se puede observar de los resultados de los ensayos, que la deformación permanente en estado condicionado es igual o levemente inferior a la deformación permanente en estado seco en especímenes de muestra con características volumétricas muy similares. Esto permite concluir que la deformación permanente en la mezcla asfáltica SMA es poco o no es susceptible a la humedad, al menos para esta fuente de agregado.

### **5.3. RESISTENCIA AL DAÑO POR HUMEDAD**

Como resultado del análisis estadístico se encontró que la granulometría, el tipo y el contenido de ligante asfáltico, y el estado de la mezcla asfáltica, producen un efecto significativo en la durabilidad de la muestra (resistencia al daño de agua), evaluada mediante ensayos de tensión diametral y compresión uniaxial retenida.

En cuanto a la granulometría, se observó que conforme se abre (se incrementa el porcentaje de gruesos y relleno mineral y, se reduce el porcentaje de partículas de tamaño intermedio) se produce un incremento en la resistencia a la tensión diametral (tanto en estado seco como en estado condicionado), debido a la mayor resistencia mecánica de la mezcla (pues el mayor contenido de partículas gruesas incrementan la resistencia de la mezcla asfáltica). Se produce un efecto análogo al incrementar la rigidez del ligante asfáltico, ya que se obtienen mayores resistencias a la tensión diametral y a la compresión uniaxial con el ligante asfáltico PG-70(22) que con el AC-30.

A pesar de esto, la resistencia retenida a la tensión diametral se reduce conforme aumenta la rigidez del ligante asfáltico, esto debido a que los esfuerzos de tensión los toma en su mayoría el ligante asfáltico, por lo que el ligante de menor rigidez permite una mayor deformación previo a la falla (asociado con el método de falla). Caso contrario se da con el ensayo de compresión uniaxial, pues al aumentar la rigidez del ligante asfáltico, aumenta la resistencia retenida a la compresión uniaxial.

Como es de esperarse, al incrementarse el contenido de ligante asfáltico decrece la resistencia a la tensión diametral y a la compresión uniaxial. Esto debido a que conforme aumenta el contenido de ligante asfáltico se reduce el contacto interparticular del agregado, por lo que el ligante asfáltico tiene que soportar mayores esfuerzos.

Es importante resaltar que el condicionamiento de la mezcla asfáltica tiene un efecto significativo sobre el desempeño de la misma, medido a través de la resistencia retenida a la tensión diametral y a la compresión uniaxial. No obstante, la resistencia retenida a la tensión diametral es satisfactoria, cumpliendo siempre con las especificaciones. Sin embargo, la resistencia retenida a la compresión uniaxial es baja (del orden de 60 por ciento), indicando que la humedad produce un efecto adverso sobre la resistencia de la mezcla asfáltica a cargas

axiales (en este caso es de cuestionar la adhesividad ligante-agregado que podría mejorarse con aditivos).

#### **5.4. MÓDULOS DE RIGIDEZ**

Con el análisis estadístico se encontró que la granulometría, el tipo y el contenido de ligante asfáltico, y el estado de la mezcla asfáltica producen un efecto significativo sobre el módulo resiliente de la mezcla asfáltica.

En lo que respecta a al tipo de ligante asfáltico, se produce un incremento en la rigidez de la mezcla asfáltica conforme se incrementa la rigidez del ligante asfáltico, pues se obtienen mezclas más rígidas con el ligante asfáltico PG-70(22) que con el AC-30, lo que lleva a pensar la importancia de poder utilizar ligantes asfálticos modificados de mayor rigidez. A pesar de esto, el módulo resiliente retenido se reduce conforme aumenta la rigidez del ligante asfáltico.

Como es de esperarse, al incrementarse el contenido de ligante asfáltico decrece la rigidez de la mezcla asfáltica, ya que como se mencionó en la sección anterior, el aumento en el contenido de ligante asfáltico reduce el contacto interparticular del agregado.

También hay que recalcar que el condicionamiento de la mezcla asfáltica tiene un efecto significativo sobre el módulo resiliente. No obstante, la rigidez retenida, medida a través del módulo resiliente retenido, es aceptable, cumpliendo siempre con las especificaciones.

#### **6. BIBLIOGRAFÍA**

1. Aguiar Moya, José Pablo. “Valoración de resistencia al daño por humedad y a la deformación permanente en mezclas asfálticas con matriz de agregado grueso de origen volcánico”. Trabajo Final de Graduación, UCR. 2004.
2. National Asphalt Pavement Association. “Designing and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice”. Quality Improvement Series 122. NAPA. 1998.
3. European Asphalt Pavement Association. “Heavy Duty Surfaces – The Arguments for SMA”. EAPA, The Netherlands. 1998.