

**COMPARACIÓN DE RESISTENCIA AL AGUA Y A LA  
DEFORMACIÓN PERMANENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS  
DENSAS Y SMA CON AGREGADO DE ORIGEN VOLCÁNICO.**

Ing. José Pablo Aguiar Moya

Investigador / docente

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) y  
Escuela de Ingeniería Civil,

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

Ing. Jaime Allen Monge

Investigador

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME),

E-mail: [jallen@lanamme.ucr.ac.cr](mailto:jallen@lanamme.ucr.ac.cr)

Universidad de Costa Rica (UCR)

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

Fax: (506) 207 – 4442

MSc. MBA. Pedro Castro Fernández,

Escuela de Ingeniería Civil

Universidad de Costa Rica (UCR)

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,

Universidad de Costa Rica,

San Pedro de Montes de Oca,

San José, Costa Rica.

## **RESUMEN**

En los últimos años, el incremento en el flujo vehicular, así como la magnitud de las cargas por eje a las que se ven sometidos los pavimentos se ha incrementado. Adicionalmente, y además considerando otros factores como durabilidad y confort del usuario, se han desarrollado, a nivel mundial, una gran variedad de mezclas asfálticas, con distintas graduaciones, ya sean cerradas o abiertas, para hacer frente a las distintas condiciones de tránsito y ambientales que se presentan. En este estudio se compararon distintas granulometrías, tanto de graduación densa, como de matriz de agregado grueso (SMA, por sus siglas en inglés) para una fuente de agregado de origen volcánico, con el fin de comparar el efecto de dicha variable, así como el de contenido de ligante asfáltico, tipo de ligante asfáltico, granulometría y adición de modificantes, sobre el desempeño de la mezcla asfáltica.

En total, se evaluaron 18 tratamientos experimentales. A todos los tratamientos se les realizó una evaluación de la resistencia a la deformación permanente. Adicionalmente, se midió la rigidez de la mezcla a través del módulo resiliente. También, se evaluó la resistencia al efecto del agua mediante el ensayo a la tensión diametral.

Finalmente, se realizó un análisis estadístico en el que se determinaron que factores tienen mayor efecto sobre el desempeño de la mezcla asfáltica, y que factores o combinación de factores produjeron las mejores mezclas, desde un punto de vista de desempeño (resistencia a la deformación permanente, así como desde su resistencia al efecto del agua), a escala de laboratorio.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Este proyecto viene a complementar una línea de investigación que se ha venido dando en los últimos años en Costa Rica, con el fin de encontrar mezclas asfálticas que se desempeñen adecuadamente en nuestro medio, y que presenten además una adecuada durabilidad. Esto con el fin de adecuar nuestras especificaciones en cuanto a diseño de mezclas puesto que las mismas son en la mayoría de los casos obsoletas, o no están diseñadas ni adaptadas para nuestras condiciones, tanto climáticas, ni de carga.

Es por esto, que con este reporte se busca evaluar, comparativamente, las ventajas que brindan distintos tipos de mezclas asfálticas; a saber, mezclas tradicionales de graduación densa, así como mezclas asfálticas con matriz de agregado grueso (SMA por sus siglas en inglés), las cuales presentan un mayor contenido de ligante asfáltico (lo cual tradicionalmente ha correlacionado con una adecuada resistencia al efecto del agua), así como un mayor contenido de agregado grueso (el cual aporta mayor resistencia estructural a la mezcla).

De dichas mezclas se evaluaron, tanto las propiedades volumétricas de la mezcla, así como la durabilidad de la mezcla asfáltica (resistencia al efecto del agua, que es un problema muy severo en Costa Rica el cual se encuentra ubicado en una zona tropical y está sometido al efecto de constantes e intensas lluvias) y la resistencia de la mezcla a la deformación permanente, que se ve empeorada en nuestro país por las condiciones ambientales y climáticas.

## 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), tanto en estado original, como en estado modificado, 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	AC-30 + 2,5% SBS	PG - 70 (22)	PG-70(22) + 1,5% SBS
Original	Densidad a 25°C	g/cm <sup>3</sup>	1.024	1.028	1.031	1.033
	Penetración a 15°C	1/100 mm	28.0	25.6	21.8	12.0
	Penetración a 25°C	1/100 mm	84.0	65.0	62.0	42.0
	Penetración a 35°C	1/100 mm	234.0	158.0	164.0	98.0
	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	2460	6053	3691	5617
	Viscosidad cinemática a 125°C	centiPoise	920	1970	1204	1700
	Viscosidad cinemática a 135°C	centiPoise	541	1160	716	940
	Viscosidad cinemática a 145°C	centiPoise	346	740	447	552
RTFO	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	5807	11470	10300	16200
	Razón de viscosidades	-	2.36	1.89	2.79	2.88
	Pérdida de masa en RTFO	%	0.475	0.312	0.978	0.883
	Índice de penetración	-	-1.14	-0.08	-0.82	-1.94
	Índice VTS	-	3.04	2.72	3.07	3.34

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), tanto en estado original, como en estado modificado, 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	AC-30 + 2,5% SBS	PG - 70 (22)	PG-70(22) + 1,5% SBS
Original	58°C	G*/sen(δ)	KPa	3.156	8.275	4.710	6.686
		δ	°	82.1	60.4	80.3	79.0
	70°C	G*/sen(δ)	KPa	0.732	4.246	1.036	1.664
		δ	°	85.4	73.0	84.5	83.4
	82°C	G*/sen(δ)	KPa	0.243	0.502	0.306	0.528
		δ	°	88.4	85.3	86.6	86.6
RTFO	58°C	G*/sen(δ)	KPa	7.907	15.293	13.335	21.675
		δ	°	76.5	68.6	74.4	69.1
	70°C	G*/sen(δ)	KPa	1.793	3.886	3.033	4.916
		δ	°	81.4	76.9	79.0	76.2
	82°C	G*/sen(δ)	KPa	0.521	1.310	0.888	1.437
		δ	°	85.2	81.9	83.6	81.2
PAV	16°C	G* sen(δ)	KPa	5177	6193	7133	8791
		δ	°	45.5	43.5	44.5	40.2
	22°C	G* sen(δ)	KPa	2796	3422	4452	4873
		δ	°	49.3	47.1	47.5	44.3
	28°C	G* sen(δ)	KPa	1312	1718	2176	2566
		δ	°	53.3	50.7	51.8	48.4
Grado de desempeño	Temperatura máxima para condición original (°C)			68.19	79.87	71.13	75.64
	Temperatura máxima para condición RTFO (°C)			68.95	76.42	73.63	77.87
	Temperatura intermedia PAV (°C)			16.50	18.15	21.57	21.57
	PG			64 (19)	76 (19)	70 (22)	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.

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

		SMA 1	SMA 2	SMA 3	DGM 1	DGM 2	DGM 3
19,0 mm	3/4"	100	100	100	100	100	100
12,5 mm	1/2"	95	94	92	95	95	95
9,5 mm	3/8"	50	45	40	80	71	63
4,76 mm	N° 4	30	28	26	60	48	50
2,38 mm	N° 8	24	22	21	35	30	50
1,19 mm	N° 16	21	21	20	20	26	40
0,60 mm	N° 30	19	19	19	17	22	31
0,30 mm	N° 50	18	17	18	15	10	26
0,15 mm	N° 100	16	16	16	9	7	19
0,075 mm	N° 200	11	13	15	6	6	6

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.

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

Propiedad	Granulometría					
	SMA 1	SMA 2	SMA 3	DGM 1	DGM 2	DGM 3
Gravedad esp. bruta ( $G_{mb}$ )	2,57	2,55	2,56	2,45	2,48	2,49
Gravedad esp. aparente ( $G_{sa}$ )	2,71	2,71	2,71	2,72	2,73	2,73
Absorción (%)	2,10	2,30	2,10	4,12	3,63	3,60
Angularidad (%)	48,67	52,35	56,44	41,00	47,00	40,00

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

Propiedad	Granulometría					
	SMA 1	SMA 2	SMA 3	DGM 1	DGM 2	DGM 3
Gravedad esp. bruta ( $G_{mb}$ )	2,59	2,59	2,60	2,58	2,59	2,59
Gravedad esp. aparente ( $G_{sa}$ )	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73
Abrasión en la máquina L.A. (%)	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5
Partículas planas y elongadas						
3 : 1	5,56	6,51	6,39	5,80	6,20	6,40
5 : 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Absorción (%)	2,05	1,95	1,95	2,10	2,00	2,00
Caras fracturadas (%)						
Una cara	100	100	100	100	100	100
Dos caras	100	100	100	100	100	100

### **3. ANÁLISIS DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS (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. Adicionalmente, en la Figura 1 se presenta un resumen de las propiedades volumétricas para los contenidos óptimos de ligante asfáltico, para los 6 tratamientos experimentales.

Como se puede observar de la Tabla 6, algunas de las mezclas SMA presentan un contenido óptimo de ligante asfáltico superior al 6% (con el fin de brindarle a la mezcla la durabilidad adicional que genera la presencia mayor contenido de ligante asfáltico). A pesar de esto, y

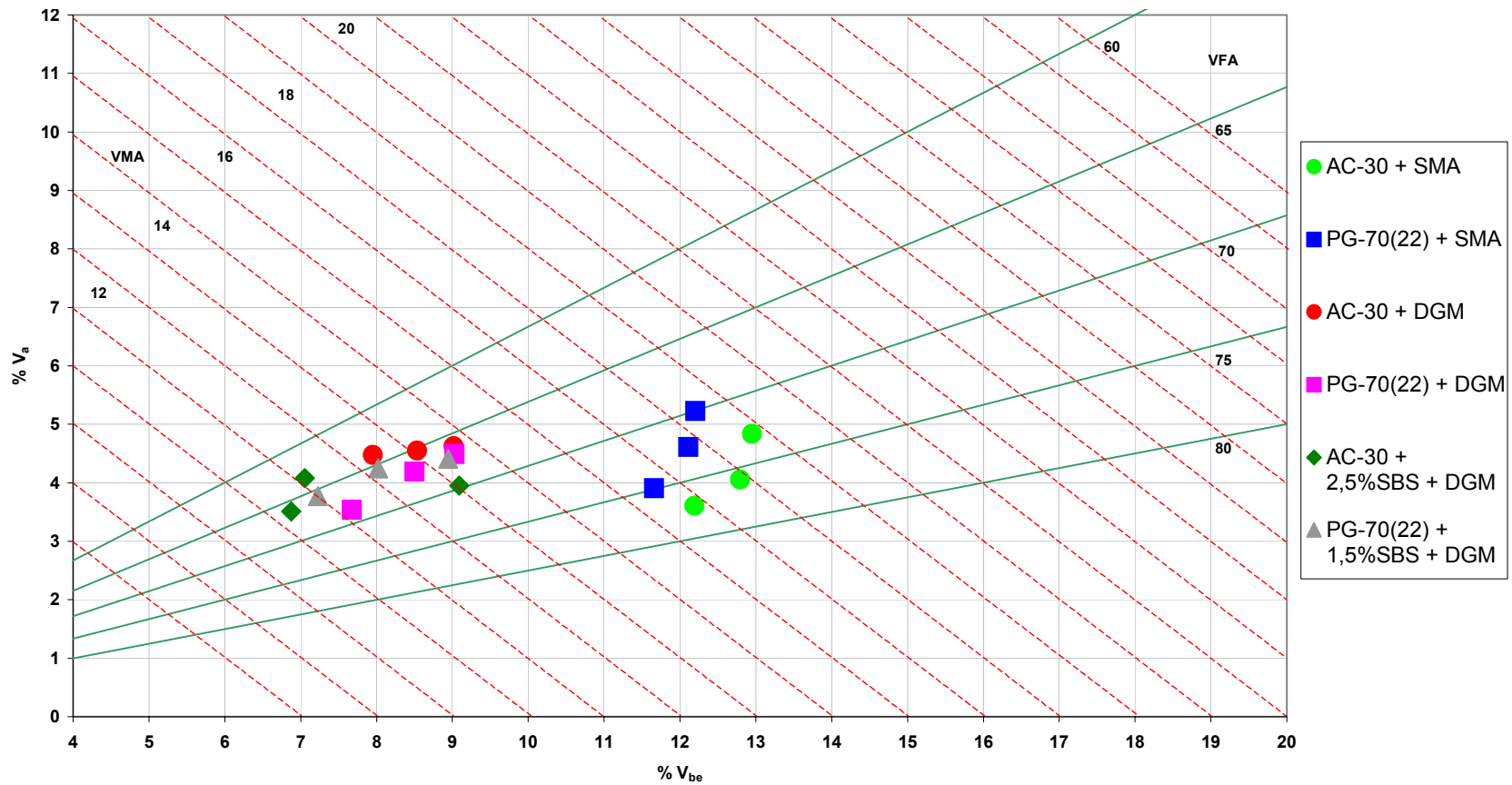


Figura 1. Propiedades volumétricas para contenidos óptimos de ligante asfáltico según metodología Superpave.

dadas las propiedades de los agregados usado, al incrementar el contenido de ligante, las mezclas asfálticas empezaron a evidenciar escurrimientos superiores al 0,30%.

En cuanto a las mezclas SMA, la granulometría SMA 3 (la más abierta: mayor contenido de partículas gruesas y relleno mineral), fue la que se adecuó de mejor manera a las especificaciones en cuanto a VAM y VFA. Con respecto a las mezclas densas, la granulometría DGM 1 fue la que cumplió más favorablemente las especificaciones.

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

Ligante asfáltico	Granulometría	Vacios (%)	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
	DGM 1	4,60	6,37	13,60	66,20	86,50	96,80	-	-
	DGM 2	4,50	5,30	12,40	64,00	86,60	98,00	-	-
	DGM 3	4,60	5,53	13,10	65,30	89,70	97,60	-	-
AC – 30 + 2,5% SBS	DGM 1	3,90	6,32	13,00	69,70	86,90	97,70	-	-
	DGM 2	4,10	5,44	11,10	63,60	87,10	97,60	-	-
	DGM 3	3,50	5,39	10,40	66,50	89,70	97,60	-	-
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
	DGM 1	4,50	6,32	13,50	67,20	86,70	96,20	-	-
	DGM 2	3,50	5,21	11,20	68,40	87,10	97,60	-	-
	DGM 3	4,20	5,75	12,70	67,00	89,30	97,50	-	-
PG – 70 (22) + 1,5% SBS	DGM 1	4,40	6,32	13,40	67,10	86,50	97,40	-	-
	DGM 2	4,20	5,35	12,30	65,30	87,30	97,60	-	-
	DGM 3	3,80	4,99	11,00	65,80	89,60	96,70	-	-

Con el fin de determinar la susceptibilidad de los parámetros volumétricos a cambios en el tipo de ligante (AC-30, PG-70(22) y sus modificaciones), cambios en el tipo de granulometría (SMA 1, 2 y 3 ó DGM 1, 2 y 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 ( $V_a$ ), VAM, VFA,  $\%G_{mm} @ N_{ini}$  y  $\%G_{mm} @ N_{max}$  (evaluado únicamente para el contenido de ligante óptimo).

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 99% de confianza) con respecto a los parámetros volumétricos establecidos por la metodología Superpave. Del análisis, se puede concluir, al 99% de confianza, que los tres factores (tipo y contenido de ligante, así como granulometría) son significativos sobre las propiedades volumétricas de la mezcla. También es importante resaltar que las interacciones entre los factores son muy significativas sobre las propiedades volumétricas, al 99% de confianza.

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

Factor	Parámetros (*)									
	$V_a$		VAM		VFA		$\%G_{mm} @ N_{ini}$		$\%G_{mm} @ N_{max}$	
	P	Significancia	P	Significancia	P	Significancia	P	Significancia	P	Significancia
Ligante	0.000002	Significativo	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo	0.000219	Significativo	0.001773	Significativo
Granulometría	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo
Contenido de ligante	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo	.	-
Ligante - Granulometría	0.000062	Significativo	0.000000	Significativo	0.000003	Significativo	0.007164	Significativo	0.003058	Significativo
Ligante - Contenido	0.004003	Significativo	0.000000	Significativo	0.000353	Significativo	0.001179	Significativo	.	-
Granulometría - Contenido	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo	.	-
Ligante - Granulometría - Contenido	0.008429	Significativo	0.000000	Significativo	0.000744	Significativo	0.074575	No Significativo	.	-

(\*) Significancia al 99% de confianza.

#### 4. ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA

En la Tabla 8 se presentan las deformaciones plásticas (mm) a las 8000 repeticiones de carga en el APA para los 18 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, la mezcla asfáltica con ligante AC-30, en otras palabras, el ligante de menor rigidez, es el que presenta mayores deformaciones plásticas. A pesar de esto, es el ligante AC-30, en estado modificado con 2,5% SBS el que va a presentar mejores resistencias a la deformación permanente.



**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%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6.00%	Óptimo	6.91	0.04	-	-	3.857	0.050	-	-	
		6.50%	Alto	6.84	0.21	-	-	5.231	0.025	-	-	
	SMA 2	5.80%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	
		6.30%	Óptimo	6.74	0.05	-	-	4.130	0.336	-	-	
		6.80%	Alto	7.41	0.13	-	-	4.226	0.238	-	-	
	SMA 3	5.75%	Bajo	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%	Alto	7.19	0.28	7.72	0.13	2.905	1.201	2.799	0.719	
	DGM 1	5.93%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	
		6.37%	Óptimo	6.71	0.45	-	-	4.436	0.776	-	-	
		6.80%	Alto	6.44	0.30	-	-	5.343	0.688	-	-	
	DGM 2	4.85%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	
		5.30%	Óptimo	6.77	0.23	-	-	3.541	2.117	-	-	
		5.75%	Alto	6.42	0.50	-	-	2.899	0.259	-	-	
	DGM 3	5.08%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	
		5.53%	Óptimo	6.39	0.06	-	-	2.619	0.916	-	-	
		5.97%	Alto	6.31	0.65	-	-	4.077	1.170	-	-	
PG - 70 (22)	SMA 1	5.20%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	
		5.70%	Óptimo	6.72	0.17	-	-	4.094	0.685	-	-	
		6.20%	Alto	7.07	0.23	-	-	4.129	0.804	-	-	
	SMA 2	5.45%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	
		5.95%	Óptimo	6.91	0.23	-	-	3.969	0.343	-	-	
		6.45%	Alto	6.79	0.18	-	-	3.659	0.125	-	-	
	SMA 3	5.35%	Bajo	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%	Alto	6.57	0.30	7.32	0.10	3.020	0.818	2.777	0.719	
	DGM 1	5.88%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	
		6.32%	Óptimo	6.67	0.35	-	-	3.647	0.409	-	-	
		6.76%	Alto	6.85	0.27	-	-	3.657	0.952	-	-	
	DGM 2	4.76%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	
		5.21%	Óptimo	7.39	0.17	-	-	1.333	0.188	-	-	
		5.66%	Alto	7.45	0.41	-	-	1.167	0.080	-	-	
	DGM 3	5.30%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	
		5.75%	Óptimo	7.83	0.25	-	-	1.367	0.436	-	-	
		6.19%	Alto	7.80	0.32	-	-	1.132	0.247	-	-	
AC - 30 + 2.5% SBS	DGM 1	5.88%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	
		6.32%	Óptimo	6.28	0.22	-	-	1.099	0.175	-	-	
		6.76%	Alto	6.28	0.38	-	-	1.876	0.478	-	-	
	DGM 2	4.99%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	
		5.44%	Óptimo	6.69	0.16	-	-	1.210	0.166	-	-	
		5.88%	Alto	6.65	0.56	-	-	1.336	0.993	-	-	
	DGM 3	4.94%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	
		5.39%	Óptimo	8.63	0.53	-	-	0.825	0.257	-	-	
		5.84%	Alto	8.85	0.36	-	-	1.040	0.435	-	-	
PG - 70 (22) + 1.5% SBS	DGM 1	5.88%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	
		6.32%	Óptimo	6.58	0.15	-	-	2.108	0.285	-	-	
		6.76%	Alto	6.57	0.33	-	-	2.199	0.514	-	-	
	DGM 2	4.90%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	
		5.35%	Óptimo	6.90	0.06	-	-	1.299	0.126	-	-	
		5.79%	Alto	6.70	0.40	-	-	1.295	0.295	-	-	
	DGM 3	4.53%	Bajo	-	-	-	-	-	-	-	-	
		4.99%	Óptimo	8.55	0.31	-	-	1.325	0.279	-	-	
		5.44%	Alto	8.48	0.38	-	-	0.868	0.132	-	-	

(\*) 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.

Se puede observar que para varios de los casos en que se usó mezclas SMA, las deformaciones permanentes son superiores a los 3 mm, lo cual, en la experiencia costarricense, se considera alta.

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 tipo y el contenido de ligante, así como la granulometría son significativos en la deformación permanente de la mezcla. Sin embargo, el factor contenido de ligante asfáltico es el que tiene menor peso en la deformación permanente que preseta 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					
			100 ciclos		1000 ciclos		8000 ciclos	
	P	Significancia	P	Significancia	P	Significancia	P	Significancia
Ligante	0.000004	Significativo	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo
Granulometría	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo	0.000000	Significativo
Contenido de ligante	0.185540	No Significativo	0.009382	Significativo	0.011356	Significativo	0.024528	Significativo
Ligante - Granulometría	0.000000	Significativo	0.114169	No significativo	0.355947	No significativo	0.100913	No significativo
Ligante - Contenido	0.883720	No Significativo	0.260356	No significativo	0.632265	No significativo	0.164011	No significativo
Granulometría - Contenido	0.207668	No Significativo	0.595887	No significativo	0.843425	No significativo	0.570083	No significativo
Ligante - Granulometría - Contenido	0.157020	No Significativo	0.518974	No significativo	0.784086	No significativo	0.233130	No significativo

(\*) Significancia al 90% de confianza.

## 5. ANÁLISIS DE 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 18 tratamientos experimentales, tanto para el contenido óptimo – 0,5% (bajo), como para el contenido óptimo de ligante asfáltico. Además, se presenta la misma información para el contenido alto de ligante asfáltico (óptimo + 0,5%) para las mezclas realizadas con la granulometría SMA 3.

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

Ligante	Granulometría	Contenido de ligante		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%	Bajo	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%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SMA 2	5.80%	Bajo	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%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SMA 3	5.75%	Bajo	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%	Alto	8.38	0.20	7.16	0.23	463	11	428	43	92.30
	DGM 1	5.93%	Bajo	6.26	0.03	6.41	0.08	1085	47	909	56	83.79
		6.37%	Óptimo	6.10	0.11	6.32	0.03	951	20	839	46	88.20
		6.80%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DGM 2	4.85%	Bajo	6.63	0.55	6.40	0.28	1280	15	1283	54	100.27
		5.30%	Óptimo	6.68	0.67	6.72	0.05	1164	69	1109	33	95.25
		5.75%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DGM 3	5.08%	Bajo	7.02	0.47	7.15	0.18	1472	48	1340	49	90.99
		5.53%	Óptimo	6.58	0.64	6.07	0.38	1348	122	1120	83	83.07
		5.97%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PG - 70 (22)	SMA 1	5.20%	Bajo	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%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SMA 2	5.45%	Bajo	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%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SMA 3	5.35%	Bajo	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%	Alto	6.95	0.19	6.75	0.47	698	28	591	62	84.63
	DGM 1	5.88%	Bajo	6.47	0.18	6.50	0.16	1672	73	1537	40	91.94
		6.32%	Óptimo	6.50	0.59	6.70	0.05	1496	109	1615	85	107.94
		6.76%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DGM 2	4.76%	Bajo	6.94	0.58	6.80	0.25	1893	271	1581	135	83.54
		5.21%	Óptimo	7.26	0.66	7.23	0.50	1729	176	1468	69	84.90
		5.66%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DGM 3	5.30%	Bajo	8.29	0.98	8.07	0.32	1806	86	1721	51	95.27
		5.75%	Óptimo	8.40	0.61	8.18	0.44	1350	36	1292	268	95.72
		6.19%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AC - 30 + 2,5% SBS	DGM 1	5.88%	Bajo	6.58	0.39	6.47	0.05	1561	35	1432	103	91.71
		6.32%	Óptimo	6.64	0.60	6.48	0.15	1410	27	1318	11	93.47
		6.76%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DGM 2	4.99%	Bajo	7.45	0.80	7.09	0.00	1768	112	1429	93	80.80
		5.44%	Óptimo	7.45	0.95	7.16	0.07	1739	99	1410	117	81.05
		5.88%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DGM 3	4.94%	Bajo	9.28	1.34	8.36	0.05	1455	297	1077	99	74.02
		5.39%	Óptimo	11.82	0.60	9.54	1.02	1240	102	876	82	70.68
		5.84%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PG - 70 (22) + 1,5% SBS	DGM 1	5.88%	Bajo	6.37	0.42	6.42	0.14	1804	9	1368	30	75.79
		6.32%	Óptimo	6.52	0.56	6.60	0.28	1583	460	1536	23	97.04
		6.76%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DGM 2	4.90%	Bajo	6.85	0.33	6.72	0.02	1812	153	1771	71	97.69
		5.35%	Óptimo	7.11	0.45	6.45	0.04	1737	105	1682	131	96.82
		5.79%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DGM 3	4.53%	Bajo	9.94	0.92	8.59	0.22	1323	42	1363	217	103.01
		4.99%	Óptimo	8.11	0.69	8.01	0.07	1819	50	1489	62	81.86
		5.44%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(\*) 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)). Adicionalmente, las mezclas producidas con los ligantes en estado modificado

presentan mejores resistencias a la tensión diametral, pero es la mezcla con ligante PG-70(22) + 1,5% SBS la que presenta mejores resistencias retenidas 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	0.000000	Significativo	Significativo	0.000000	Significativo	Significativo
Granulometría	0.000000	Significativo	Significativo	0.000000	Significativo	Significativo
Contenido de ligante	0.005201	Significativo	Significativo	0.000070	Significativo	Significativo
Condición de la muestra	-	-	-	0.000000	Significativo	Significativo
Ligante - Granulometría	0.000000	Significativo	Significativo	0.000000	Significativo	Significativo
Ligante - Contenido	0.000419	Significativo	Significativo	0.000068	Significativo	Significativo
Granulometría - Contenido	0.837777	No Significativo	No Significativo	0.063420	Significativo	No Significativo
Ligante - Granulometría - Contenido	0.000001	Significativo	Significativo	0.000027	Significativo	Significativo
Ligante - Condición	-	-	-	0.012817	Significativo	No Significativo
Granulometría - Condición	-	-	-	0.518123	No Significativo	No Significativo
Ligante - Granulometría - Condición	-	-	-	0.005232	Significativo	Significativo
Contenido - Condición	-	-	-	0.623603	No Significativo	No Significativo
Ligante - Contenido - Condición	-	-	-	0.924458	No Significativo	No Significativo
Granulometría - Contenido - Condición	-	-	-	0.091067	Significativo	No Significativo
Ligante - Granulometría - Contenido - Condición	-	-	-	0.383259	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 99% 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 varias de las interacciones entre los factores anteriormente mencionados son significativas al 90% de confianza. Sin embargo, al incrementar el nivel de confianza al 99%, únicamente la interacción triples entre los factores: tipo de ligante – granulometría – contenido de ligante y tipo de ligante – granulometría – condición de la mezcla asfáltica son significativos.

## 6. ANÁLISIS DE 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).

**Tabla 12. Módulo resiliente promedio a 25°C con frecuencia de carga de 1 Hz. (\*)**

Ligante	Granulometría	Contenido de ligante asfáltico PTM (%)		V <sub>s</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%	Bajo	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%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	SMA 2	5.80%	Bajo	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%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	SMA 3	5.75%	Bajo	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%	Alto	7.16	0.23	3136	378	3022	276	96.36	3576	441	3270	225	91.46	
	DGM 1	5.93%	Bajo	6.41	0.08	4138	260	1926	215	46.46	4316	322	2078	218	48.09	
		6.37%	Óptimo	6.32	0.03	3654	236	1926	215	52.59	3972	369	2361	331	59.32	
		6.80%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	DGM 2	4.85%	Bajo	6.40	0.28	7210	460	5447	150	75.77	7504	499	6025	327	80.52	
		5.30%	Óptimo	6.72	0.05	5975	216	5541	455	92.66	6338	103	5511	400	86.94	
		5.75%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	DGM 3	5.08%	Bajo	7.15	0.18	10795	998	6147	650	56.91	11402	1220	6648	643	58.34	
		5.53%	Óptimo	6.07	0.38	7108	357	7137	334	100.62	7429	313	7659	323	103.22	
		5.97%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	PG - 70 (22)	SMA 1	5.20%	Bajo	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%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		SMA 2	5.45%	Bajo	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%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SMA 3		5.35%	Bajo	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%	Alto	6.75	0.47	3817	504	3803	324	99.62	4066	534	3975	328	97.76	
DGM 1		5.88%	Bajo	6.50	0.16	6071	477	7079	562	116.61	6440	584	7406	679	115.02	
		6.32%	Óptimo	6.70	0.05	6709	474	7372	893	109.63	7111	417	7717	912	108.27	
		6.76%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DGM 2		4.76%	Bajo	6.80	0.25	9551	701	8392	805	87.82	9796	649	8604	785	87.76	
		5.21%	Óptimo	7.23	0.50	8722	620	7538	634	86.41	9010	557	7752	658	85.96	
		5.66%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DGM 3		5.30%	Bajo	8.07	0.32	12386	502	9118	1495	73.53	12690	407	9506	1454	74.95	
		5.75%	Óptimo	8.18	0.44	7918	1455	6468	1272	81.59	8210	1382	6594	1385	79.93	
		6.19%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
AC - 30 + 2,5% SBS		DGM 1	5.88%	Bajo	6.47	0.05	7079	697	6318	577	89.31	7132	655	6524	573	91.49
			6.32%	Óptimo	6.48	0.15	6226	475	6102	807	97.74	6370	389	6304	869	98.67
			6.76%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		DGM 2	4.99%	Bajo	7.09	0.00	10489	592	8185	272	78.10	10743	445	8600	350	80.08
			5.44%	Óptimo	7.16	0.07	9619	321	7842	218	81.55	9888	367	8035	185	81.30
			5.88%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DGM 3	4.94%	Bajo	8.36	0.05	7958	3954	3531	1793	44.01	8386	4217	3777	1924	44.77	
		5.39%	Óptimo	9.54	1.02	9619	321	7842	218	81.55	9888	367	8035	185	81.30	
		5.84%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
PG - 70 (22) + 1,5% SBS	DGM 1	5.88%	Bajo	6.42	0.14	5967	101	5616	171	94.16	6177	59	5891	258	95.39	
		6.32%	Óptimo	6.60	0.28	5885	1553	5845	1584	99.16	5978	1590	6061	1714	101.02	
		6.76%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	DGM 2	4.90%	Bajo	6.72	0.02	8792	910	8676	805	98.77	8967	981	8839	855	98.66	
		5.35%	Óptimo	6.45	0.04	7170	507	7825	1129	108.78	7353	516	7977	1126	108.17	
		5.79%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	DGM 3	4.53%	Bajo	8.59	0.22	11645	2250	7798	1532	66.93	12040	2432	8334	1663	69.50	
		4.99%	Óptimo	8.01	0.07	8901	665	7135	759	80.03	9046	679	7325	760	80.85	
		5.44%	Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

(\*) 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.

En la Tabla 12 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 18 tratamientos experimentales, tanto para el contenido bajo, como para el contenido óptimo de ligante asfáltico. Adicionalmente, 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 tratamientos experimentales con la granulometría SMA 3.

De la tabla, se puede observar cómo el módulo resiliente de la mezcla, en general, aumenta conforme aumenta la rigidez del ligante asfáltico. De esta forma, la mezcla asfáltica con ligante AC-30 presenta menores módulos resilientes que la mezcla asfáltica con ligante PG-70(22), y las mezclas preparadas con ligantes modificados presentan los mayores módulos resilientes. Adicionalmente se observa que, en general, las mezclas que presentan los mayores módulos resilientes retenidos son las preparadas con la granulometría DGM 1 y con la SMA 3 (a pesar que para estos casos, la mezcla asfáltica presenta menores módulos resilientes).

**Tabla 13. 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	0.000000	Significativo	Significativo	0.000000	Significativo	Significativo
Contenido de ligante	0.012767	Significativo	No Significativo	0.006339	Significativo	Significativo
Condición de la muestra	0.000000	Significativo	Significativo	0.000000	Significativo	Significativo
Ligante - Granulometría	0.000000	Significativo	Significativo	0.000000	Significativo	Significativo
Ligante - Contenido	0.000083	Significativo	Significativo	0.000207	Significativo	Significativo
Granulometría - Contenido	0.028716	Significativo	No Significativo	0.013345	Significativo	No Significativo
Ligante - Granulometría - Contenido	0.000000	Significativo	Significativo	0.000000	Significativo	Significativo
Ligante - Condición	0.107154	No Significativo	No Significativo	0.084461	Significativo	No Significativo
Granulometría - Condición	0.000000	Significativo	Significativo	0.000001	Significativo	Significativo
Ligante - Granulometría - Condición	0.000784	Significativo	Significativo	0.004837	Significativo	Significativo
Contenido - Condición	0.004037	Significativo	Significativo	0.014651	Significativo	No Significativo
Ligante - Contenido - Condición	0.467697	No Significativo	No Significativo	0.571203	No Significativo	No Significativo
Granulometría - Contenido - Condición	0.003110	Significativo	Significativo	0.005507	Significativo	Significativo
Ligante - Granulometría - Contenido - Condición	0.851501	No Significativo	No Significativo	0.722513	No Significativo	No Significativo

(\*) Significancia al 90% de confianza.

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

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 13, 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.

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. A pesar de esto, se observa como el contenido de ligante asfáltico deja de ser significativo al 99% de confianza. También se aprecia que, al 90% de confianza, todas las interacciones simples entre los factores son significativas; sin embargo, las interacciones de tercer y cuarto grado entre los factores no lo son. Además, al incrementar el nivel de confianza al 99%, la interacción entre la granulometría y el contenido de ligante asfáltico, deja de ser significativa.

## **7. CONCLUSIONES**

### **7.1. ANÁLISIS DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS**

En general, se observó que en general, se da un incumplimiento de especificaciones, principalmente en cuanto a VAM. A pesar de esto, y como se demostró posteriormente, las mezclas presentaron un adecuado desempeño, tanto en lo concerniente a la deformación permanente, así como en lo que respecta a durabilidad. Se nota adicionalmente que a pesar de que los requerimientos si se cumplieron para algunas de las mezclas SMA, se observó que al buscar incrementar dicho parámetro, se presentaron porcentajes de escurrimientos superiores al 0,3%.

Del análisis estadístico se pudo observar que tanto el tipo y el contenido de ligante asfáltico tienen un efecto muy significativo sobre los vacíos de aire en la mezcla, los vacíos en el agregado mineral (VAM), los vacíos llenos de asfalto (VFA), y los porcentajes de compactación. Adicionalmente, se demostró que las interacciones entre los factores analizados, de segundo, tercer y cuarto grado, son también significativas sobre las propiedades volumétricas de la mezcla, con un alto grado de confianza.

## **7.2. ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA**

Se encontró, con el análisis de varianza, que tanto el tipo de ligante asfáltico, el contenido de ligante asfáltico y la granulometría, tienen un efecto significativo sobre la mezcla. Adicionalmente, se observó que el contenido de ligante asfáltico es menos significativo conforme se incrementa el número de ciclos de carga, por lo que mezclas con menores contenidos de ligante, y un buen desempeño inicial (al corto plazo), pueden presentar resistencias a la deformación permanente adecuadas.

Una observación importante es que, en promedio, durante los 100 ciclos de carga iniciales en el APA, la mezcla asfáltica va a presentar las mayores pendientes de la curva deformación y por tanto las mayores deformaciones; y durante los primeros 1000 ciclos de carga, se dan grandes pendientes de la curva deformación, y por tanto grandes deformaciones acumuladas. De esta forma, se podría esperar que las principales deformaciones de la mezcla asfáltica se produzcan al corto plazo. 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 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 masticado 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.

## **7.3. ANÁLISIS DE 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 resistencia a la tensión diametral.



Se observó que conforme se incrementa el contenido de ligante asfáltico, disminuye la resistencia a la tensión diametral, tanto en estado seco como en estado condicionado. A pesar de esto, y como es de esperarse, en la mayoría de los casos se dio un incremento en la resistencia retenida a la tensión diametral, al incrementar el contenido de ligante asfáltico, esto debido a que el mayor contenido de ligante asfáltico brinda mayor durabilidad y resistencia al daño por el agua.

Adicionalmente, se observó que incrementos en la rigidez del ligante asfáltico producen incrementos en la resistencia a la tensión diametral de la mezcla, y como variaciones en la granulometría de la mezcla asfáltica produce variaciones en las resistencias a la tensión diametral.

Además, se observó que a pesar de que las mezclas con granulometrías SMA presentaron resistencias retenidas inferiores a las mezclas con granulometrías DGM, las resistencias retenidas a la tensión diametral de dichas mezclas fueron, en general, superiores a las de las mezclas de graduación DGM (producto del mayor contenido de ligante asfáltico que usan las mezclas SMA).

#### **7.4. ANÁLISIS DE 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 el módulo resiliente, y por tanto en la rigidez de la mezcla asfáltica conforme se incrementa la rigidez del ligante asfáltico.

Adicionalmente, y como es de esperarse, al incrementarse el contenido de ligante asfáltico en la mezcla, se reduce la rigidez de la mezcla; sin embargo, y en general, al aumentar el contenido de ligante asfáltico, se incrementa la resistencia retenida de la mezcla (efecto del mayor contenido de ligante asfáltico).

## **8. 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. Allen Monge, Jaime. “Efecto del uso de agregado ígneo sobre las propiedades de diseño para concreto asfáltico de graduación densa”. Trabajo Final de Graduación, UCR. 2004.
3. National Asphalt Pavement Association. “Designing and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice”. Quality Improvement Series 122. NAPA. 1998.
4. European Asphalt Pavement Association. “Heavy Duty Surfaces – The Arguments for SMA”. EAPA, The Netherlands. 1998.