

# Mezclas con graduación discontinua

Ing. Laura Ramírez Castro  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales  
Universidad de Costa Rica

## Resumen

Este proyecto busca analizar el comportamiento de mezclas con graduación discontinua, usando ligantes y agregados de uso común en Costa Rica, con el fin de generar especificaciones enfocadas al diseño y construcción de mezclas más resistentes a la deformación plástica y de mayor durabilidad. Para lograr esto, se trabajó en la selección de la granulometría óptima, se realizaron diseños de mezcla Marshall, diseños de mezcla SUPERPAVE y se analizó la deformación plástica a escala de laboratorio mediante la pista de ensayo de Georgia, los módulos resilientes, obtenidos a través del ensayo de tensión indirecta y ensayos de inmersión-compresión (resistencia retenida a la tensión diametral y a la compresión uniaxial).

Se ha encontrado que la falta de cubicidad del agregado puede afectar el desempeño de este tipo de mezclas, ya que no se logra un buen contacto piedra sobre piedra. Las mezclas fabricadas con fibra de celulosa presentaron mayores deformaciones con respecto a las mezclas fabricadas sin fibra de celulosa y la resistencia (seca y condicionada) obtenida en mezclas fabricadas con fibra de celulosa es menor a la resistencia obtenida en mezclas fabricadas sin fibra de celulosa.

## 1. Introducción

Dados los problemas de deformación plástica, especialmente en condiciones de alto volumen de tránsito y climas cálidos que se han presentado en los pavimentos con superficie de ruedo asfáltica, debido a la poca resistencia al cortante y compresibilidad de las mezclas con graduación densa aplicadas, ha surgido la necesidad de implementar en nuestro medio el uso de mezclas más resistentes a la deformación permanente y al daño por humedad. Adicionalmente, las mezclas susceptibles a la deformación también provocan que los pavimentos se tornen deslizantes (pérdida de textura superficial) al poco tiempo de entrar en operación.

Como respuesta ante tal necesidad, surgió este proyecto, cuyo objetivo es analizar el comportamiento de mezclas con graduación discontinua, utilizando agregados y asfaltos nacionales, con el fin de generar especificaciones enfocadas a la aplicación de mezclas de mayor desempeño.

El estudio se ha ido desarrollando por etapas. En las primeras etapas se trabajó en la selección de la granulometría óptima y en la selección de los modificantes de asfalto (aditivos poliméricos) a emplear, tanto el tipo como la proporción a la cual serían dosificados. En la última etapa se trabajó en ensayos de desempeño a escala de laboratorio, usando para esto la granulometría y los modificantes seleccionados en las etapas anteriores. Se analizó la deformación plástica a escala de laboratorio mediante la pista de ensayo de Georgia (APA: Asphalt Pavement Analyzer); la susceptibilidad al daño por humedad mediante los ensayos de resistencia a la tensión diametral y compresión uniaxial; y el módulo resiliente obtenido a través del ensayo de tensión indirecta.

## 2. Caracterización de la materia prima

En este estudio se usó un solo tipo de agregado y tres tipos de ligante asfáltico. Se emplearon distintos aditivos: fibra de celulosa, un polímero del tipo EGA, una poliolefina modificada, y un polímero del tipo SBS, que en lo sucesivo se denominarán (P2) y (P3) respectivamente. Además, en algunos casos, se usó cal, como relleno mineral, en lugar del polvo natural del agregado.

### 2.1 Ligante asfáltico

En la Tabla No.1 se presentan algunos parámetros de los ligantes empleados. El ligante no modificado, identificado como 1 estrictamente clasifica como un AC-30, aunque su viscosidad a 60°C es de 2411 Poises (en el rango bajo de la especificación para este tipo de ligante). De igual forma el ligante no modificado, identificado como 2, clasifica como AC-30 y el tercero como AC-40.

Tabla 1. Características de los ligantes asfálticos empleados

Parámetro	Tipo de ligante				
	No modif. 1	Modif. 1 con P1	Modif. 1 con P3	No modif. 2	No modif. 3
Viscosidad a 60°C (Poise)	2411	N.1	N.1	2460	3691
Viscosidad a 125°C (Poise)	8.4	22.5	21.2	9.2	12.04
Viscosidad a 135°C (Poise)	5.1	12.8	13.0	5.4	7.2
Viscosidad a 145°C (Poise)	3.0	7.6	9.1	3.5	4.5
Temp. de mezclado (°C)	152-157	176-182	192-200	160*	169*
Temp. de compactación (°C)	143-147	164-169	177-183	149*	157*
Grado de desempeño (°C)	64-(19)	-	-	64-(19)	70-(22)

(\*) Temperatura superior del rango  
Entre paréntesis la temperatura intermedia de desempeño

Según los ensayos reológicos, los ligantes no modificados 1 y 2, clasifican, de acuerdo con la metodología SUPERPAVE para determinación del grado de desempeño, como un PG-64 (19), donde 64 representa la temperatura máxima de desempeño y 19 representa la temperatura intermedia de desempeño, mientras que el ligante no modificado 3 clasifica como un PG-70(22). En nuestro medio (clima tropical) la temperatura inferior del PG no es relevante.

## 2.1 Agregado

El agregado utilizado proviene de depósitos aluviales de origen ígneo, y es extraído del río.

En la Tabla No.2 se presenta la caracterización del agregado y los requerimientos establecidos en la AASHTO MP8-00 *Standard specification for designing stone matrix asphalt (SMA)*.

## 3. Resultados obtenidos

### 3.1 Primera etapa

En esta etapa se buscaba determinar una estructura granulométrica que cumpliera con los requisitos establecidos para mezclas discontinuas y determinar el tipo y dosificación de aditivos a usar a través del estudio.

Se trabajó con dos granulometrías, denominadas granulometría 1 y granulometría 2. En la Tabla No. 3 se observa la distribución por tamices.

En esta etapa se probaron dos diferentes porcentajes de fibra de celulosa (0.6 y 0.8% por peso total de agregado) y el polímero P2.

No se logró obtener, en ninguno de los casos el porcentaje meta de vacíos de diseño (4%), por lo tanto fue necesario probar con otras granulometrías. Sin embargo, en esta primera etapa sí se seleccionó el porcentaje de fibra a usar, el cual fue de un 0.5% por peso total de agregado, ya que con este porcentaje de fibra no se excedía el porcentaje máximo de escurrimiento permitido (0.3%).

### a3.2 Segunda etapa

Ya que en la primera etapa no se logró seleccionar una estructura granulométrica, el objetivo de la segunda etapa fue analizar otras dos granulometrías (denominadas para efectos del estudio granulometrías 3 y 4) para determinar si cumplían con los requerimientos establecidos para mezclas discontinuas.

Estas granulometrías se encuentran dentro del rango de tolerancia de las especificaciones técnicas particulares SMA, que se han utilizado en Argentina.

En la Tabla No. 4 se presentan los porcentajes pasando para cada malla y los límites granulométricos.

Con ambas granulometrías se hizo un diseño de mezcla Marshall (50 golpes por cara) usando fibra de celulosa al 0.5% por peso de agregado.

Con la granulometría 3 y usando porcentajes de ligante entre 6.5 y 7.5% por peso total de agregado (PTA), para el diseño de mezcla, no se logró obtener el 4% de vacíos. Fue por este motivo, que se planteó el uso de una nueva granulometría, la granulometría 4. A esta granulometría se le aumentó la cantidad de finos (porcentaje pasando la malla No. 4), respecto al que se usó en la granulometría 3. Esto con la finalidad de que al haber más material fino,

Tabla 2. Caracterización de los agregados

Ensayo	Norma	Valor	Requerimientos AASHTO MP8-00	
			Espec. mín	Espec. máx
<b>Agregado grueso</b>				
Gbs	AASHTO	2.62	-	-
Absorción (%)	T100	1.7	-	2.0
Abrasión tipo A (%)	AASHTO	19.1	-	30
Abrasión tipo C (%)	T-96	32.3	-	30
Caras fracturadas (1 cara)	AASHTO D5821	86	100	-
Partículas planas y elongadas	ASTM D4791	6.9	-	20%
-3 a 1				
-5 a 1				
Resistencia al pulido	AASHTO T278-279	0.64	0.50(*)	
<b>Agregado fino</b>				
Gbs	AASHTO	2.64	-	-
Absorción (%)	T85	2.0	-	-
Límites de attemberg	AASHTO T89	NP	-	-
Vacíos no compactados (%)	ASTM C1252	36.6	-	-
Equivalente de arena	AASHTO T176	96	50(*)	-
Disgregabilidad en sulfato de sodio (%)	AASHTO T104	5.65	-	15
<b>Relleno mineral calizo</b>				
Gbs		2.73	-	-

disminuyera la cantidad de vacíos en el esqueleto mineral. Además de esta modificación a la curva granulométrica, se usaron porcentajes de ligante entre 7.5 y 8.5% PTA, para el diseño de mezcla.

En este caso sí se logró obtener el 4% de vacíos, con un porcentaje de asfalto de 8.1% PTA. Este porcentaje tan elevado de ligante, hizo que la mezcla incumpliera con las especificaciones de escurrimiento, fijadas en un máximo de 0.3%.

Por estas razones, ambas granulometrías fueron rechazadas y se planteó una tercera etapa que incluye el estudio de nuevas granulometrías.

### 3.3 Tercera etapa

Ya que en las dos etapas anteriores no se logró seleccionar una granulometría, se planteó en esta tercera etapa

Malla	Porcentaje Pasando	
	Gran. 1	Gran. 2
3/4	100	100
1/2	93	100
3/8	66	90
No. 4	24	45
No. 8	22	26
No. 200	9	10

Tabla 3. Granulometrías 1 y 2

Malla	Porcentaje pasando		Límites granulométricos
	Gran. 3	Gran. 4	
1/2	100	100	100
3/8	60	60	Max. 60
No. 4	30	40	30-40
No. 8	20	20	20-27
No. 200	10	10	9-13

Tabla 4. Granulometrías 3 y 4

analizar 8 distintas granulometrías, denominadas para efectos del estudio granulometría 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12, con el fin de seleccionar una granulometría adecuada para la fabricación de mezclas con graduación discontinua. Se hicieron diseños de mezcla Marshall al 4% de vacíos, con 0.5% de fibra de celulosa en cada uno de los casos. En la Tabla No.5 se muestran los porcentajes pasando para cada malla. Los resultados de los diseños Marshall se presentan en la Tabla No.6.

De la Tabla No. 6 se observa cómo de las 8 granulometrías analizadas, sólo con cuatro de ellas se logró alcanzar el 4% de vacíos (granulometrías 7, 10, 11 y 12). De estas cuatro granulometrías, ninguna cumplió con la especificación mínima requerida para los vacíos en el agregado mineral, VMA (17%). Cabe resaltar que el bajo valor obtenido en los vacíos no compactados del agregado fino, posiblemente tiene una relación directa con estos resultados.

A pesar de que con la granulometría 7 se logró obtener el 4% de vacíos, no se consideró para futuros análisis, ya que se asemeja mucho a una granulometría densa y no a una granulometría de graduación discontinua.

De las restantes tres granulometrías, se seleccionó la granulometría 11 para realizar nuevos diseños (usando

un polímero) y evaluar la resistencia a la deformación plástica. La escogencia de esta granulometría se fundamentó en el porcentaje óptimo de asfalto y en el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

Por otro lado, para las posteriores etapas de la investigación, se consideró la aplicación de un relleno mineral calizo y nuevos cambios en la estructura granulométrica (Tabla No. 5 granulometrías 13, 14 y 15), además de la aplicación de los ligantes no modificados identificados como 2 y 3. En la Tabla No. 6 se presentan los resultados del diseño SUPERPAVE para las granulometrías 13, 14 y 15. A partir de los contenidos de ligante óptimo, bajo (-0.5% del óptimo) y alto (+0.5% del óptimo), para cada diseño se procedió a realizar ensayos de desempeño como deformación permanente en estado seco, ensayos de tensión diametral y módulo resiliente a 25°C en estados seco y condicionado (resistencia retenida); de ahí se seleccionaron 2 diseños, uno para cada tipo de ligante aplicado (2 y 3). Esta selección consideró tanto parámetros volumétricos de diseño como resultados de desempeño y por medio de un análisis estadístico de varianza y prueba por contrastes se determinó, al final, que la mezcla fabricada con la granulometría 14 y con el ligante 2 (AC-30) y la mezcla fabricada con la granulometría 15 y con el ligante 3 (PG-70), presentan un desempeño significativamente superior con respecto a las mezclas con igual tipo de ligante .

En la Tabla No. 7 se muestran los resultados de los ensayos de desempeño obtenidos para las granulometrías de la 13 a la 15.

Para analizar los cambios en los parámetros volumétricos, obtenidos del diseño SUPERPAVE, se realizó un análisis de varianza, donde se plantearon como factores experimentales el contenido de ligante asfáltico (óptimo, bajo y alto), la granulometría (13, 14 y 15) y el tipo de ligante (AC-30 y PG-70). De este análisis se determinó que existía evidencia

Malla	Porcentajes Pasando										
	Gran. 5	Gran. 6	Gran. 7	Gran. 8	Gran. 9	Gran. 10	Gran. 11	Gran. 12	Gran. 13	Gran. 14	Gran. 15
3/4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/2	100	100	100	100	100	100	100	100	95	94	92
3/8	70	55	60	79	65	65	55	50	50	45	40
No. 4	28	35	40	39	29	34	32	35	25	23	21
No. 8	20	20	27	24	23	23	23	24	23	21	20
No. 16	17	17	24	20	17	17	17	16	19	19	19
No. 30	15	15	20	18	-	-	15	15	15	18	18
No. 50	13	14	17	15	14	14	14	14	15	16	17
No. 100	11	11	13	12	-	-	11	11	14	15	16
No. 200	10	10	10	8	8	8	10	8	11	13	15

Tabla 5. Porcentajes pasando, granulometrías de la 5 a la 15

Parámetro	Resultados diseño Marshall								Resultados diseño SUPERPAVE					
	Gran. 5	Gran. 6	Gran. 7	Gran. 8	Gran. 9	Gran. 10	Gran. 11	Gran. 12	G. 13.2	G. 14.2	G. 15.2	G. 13.3	G. 14.3	G. 15.3
Vacios (%)	5.5	4.7	4	4.9	4.8	4	4	4	3.8	3.8	4.0	3.7	3.9	3.9
Asfalto (%PTA)	7.5	7.5	6.1	7.5	7.5	7	7	7.1	6.4	6.4	7.2	6.3	6.5	6.7
VMA (%)	18.8	18.0	14.7	17.8	17.8	16.4	16.8	16.5	16.0	16.0	18.0	15.5	15.9	16.8
VFA (%)	71	74.0	73.0	72.5	73.0	75.6	77.0	76.3	77.0	76.0	78.0	76.0	77.0	77.0
Densidad (kg/cm <sup>3</sup> )	2290	2317	2378	2320	2318	2350	2338	2349	-	-	-	-	-	-

Tabla 6. Resultados obtenidos de los diseños Marshall, realizados con 0.5% de fibra de celulosa por peso total de agregado

Tipo de ligante	Contenido de ligante	Deformación Plástica (mm)			TSR (%)			MRR (%)		
		Granulometría			Granulometría			Granulometría		
		13	14	15	13	14	15	13	14	15
AC-30	bajo	-	-	-	107	85	92	88	89	91
	óptimo	2.27	2.53	2.37	88	91	94	81	89	91
	alto	3.79	3.07	2.47	-	-	-	-	-	-
PG-70	bajo	-	-	-	90	93	96	95	94	87
	óptimo	2.29	2.38	1.94	92	100	79	98	84	88
	alto	2.27	2.47	2.40	-	-	-	-	-	-

Tabla 7. Resultados obtenidos de los ensayos de desempeño de todos los diseños SUPERPAVE

estadística para afirmar que un cambio en la granulometría determina cambios significativos en todos los parámetros de diseño: porcentaje de compactación inicial, vacíos en el agregado mineral, vacíos llenos con asfalto, vacíos en el agregado grueso, y porcentaje de compactación al número máximo de giros. Al mismo tiempo, se determinó que el contenido de asfalto determina cambios significativos en los mismos parámetros excepto en el porcentaje de compactación (al número máximo de giros). El tipo de ligante asfáltico no determina cambios significativos en los vacíos de aire y en los vacíos llenos con asfalto. Por otro lado la interacción granulometría\*tipo de ligante determina cambios significativos en los vacíos llenos con asfalto, vacíos en el agregado grueso y el porcentaje de compactación al número máximo de giros.

### 3.3 Cuarta etapa

Con el fin de analizar el desempeño en laboratorio de las granulometrías 11, 14 y 15, tanto en lo referente a la

deformación plástica (obtenido a través de la pista de ensayo de laboratorio, APA), ensayos de inmersión-compresión (resistencia retenida a la tensión diametral y resistencia retenida a la compresión uniaxial) y el ensayo de módulo resiliente obtenido a través del ensayo de tensión indirecta, se planteó esta cuarta etapa, que incluye:

Diseño de mezcla Marshall al 4% de vacíos utilizando fibra de celulosa al 0.5% (PTA) y el polímero P1 al 1.5% (granulometría 11)

Diseño de mezcla Marshall al 4% de vacíos utilizando fibra de celulosa al 0.5% (PTA) y el polímero P3 al 3% (granulometría 11)

Diseño de mezcla Marshall al 5% de vacíos utilizando el polímero P1 al 1.5% (granulometría 11)

Diseño de mezcla Marshall al 5% de vacíos utilizando el polímero P3 al 3% (granulometría 11)

Ensayos de deformación permanente, resistencia retenida a la tensión diametral y módulo resiliente, para cada uno de

Parámetros	Diseños con P1 al 1.5%		Diseños con P3 al 3%	
	Sin fibra	Con fibra	Sin fibra	Con fibra
Vacios (%)	5	4	5	4
Asfalto (%PTA)	5.60	6.40	5.60	6.20
VMA (%)	15.5	16.2	15.2	15.7
VFA (%)	65	75	68	74
Densidad (kg/cm <sup>3</sup> )	2346	2348	2356	2357

Tabla 8. Resultados obtenidos de los diseños Marshall utilizando P1 y P3. Granulometría 11

los contenidos óptimos de asfalto de los cuatro diseños arriba mencionados (granulometría 11).

Ensayos de deformación permanente, sin condicionamiento y condicionado (24 horas, 60°C) para los contenidos de ligante óptimo, bajo (óptimo-0.5%) y alto (óptimo +0.5%) (granulometrías 14 y 15).

Polímero P1 al 1.5 %				
	Con fibra		Sin fibra	
	Vacios (%)	Deformación (mm)	Vacios (%)	Deformación (mm)
Promedio	6.9	2.3	7.5	1.8
Desv. Est	0.0	0.5	0.1	0.1
Polímeros P3 al 1.5 %				
Promedio	8.1	2.4	7.6	2.3
Desv. Est	0.2	0.5	0.2	0.4

Tabla 9. Deformaciones plásticas medidas en laboratorio utilizando los polímeros P1 y P3 (granulometría 11)

	P1 al 1.5 %		P3 al 3 %	
	Sin fibra	Con fibra	Sin fibra	Con fibra
Vacios (%)	6.1	6.1	6.0	6.9
Resistencia sin condicionar (MPa)	1.14	0.93	1.18	0.89
Resistencia estado condicionado (MPa)	1.06	0.91	1.09	0.83
Porcentaje de resistencia retenida (%)	<b>93</b>	<b>98</b>	<b>92</b>	<b>92</b>

Tabla 10. Resistencia a la tensión diametral. Valores promedio (granulometría 11)

Módulo resiliente (MPa)	P1 al 1.5 %		P3 al 3 %	
	Con fibra	Sin fibra	Con fibra	Sin fibra
Carga 1 2000 N	3922	4091	3792	4430
Carga 2 3000 N	3629	3813	3567	4190

Tabla 11. Módulos resilientes. Valores promedio (granulometría 11)

Ensayos de tensión diametral, módulo resiliente y compresión uniaxial para los contenidos de ligante óptimo, bajo (óptimo-0.5%) y alto (óptimo +0.5%) (granulometrías 14 y 15).

Ensayos de módulo resiliente a tres temperaturas (5, 25 y 40°C) y a tres diferentes frecuencias (0.5, 1.0 y 2.0 Hz), con lo cual se obtienen las curvas maestras de rigidez de la mezcla (granulometrías 14 y 15).

En la Tabla No. 8 se presentan los resultados de los diseños de mezcla para los cuatro primeros casos arriba mencionados.

Para cada uno de los puntos de los diseños se realizó el ensayo de escurrimiento. Los porcentajes óptimos de

ligante, para cada diseño, cumplieron con el valor máximo admisible de 0.3%. Para el caso de las mezclas con relleno mineral (granulometrías 14 y 15) también se cumplió con el requisito de escurrimiento.

En la Tabla No. 9 se presentan los resultados de las deformaciones medidas en mezclas fabricadas usando el polímero P1 al 1.5%, y el polímero P3 al 3% y la granulometría 11.

En las Tablas 10 y 11 se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a la tensión diametral y módulo resiliente obtenido a través del ensayo de tensión indirecta.

Con el fin de analizar los resultados obtenidos, se plantearon pruebas de hipótesis al 90% de confianza, para determinar si el uso de la fibra de celulosa y de los polímeros P1 y P3,

Parámetro	Resultados de las pruebas de hipótesis
<b>Deformación plástica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las mezclas fabricadas con fibra de celulosa presentaron mayores deformaciones en comparación con las deformaciones obtenidas en mezclas fabricadas sin fibra de celulosa.</li> <li>- Las mezclas fabricadas sin fibra de celulosa y el polímero P3 presentaron mayores deformaciones en comparación con las deformaciones obtenidas en mezclas fabricadas sin fibra de celulosa y con el polímero P1.</li> </ul>
<b>Resistencia a la tensión diametral</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se obtienen menores resistencias a la tensión diametral (tanto en especímenes no condicionados, como condicionados 24 horas a 60°C) en mezclas fabricadas con fibra de celulosa en comparación con las resistencias obtenidas en mezclas fabricadas sin fibra de celulosa.</li> <li>- Se obtiene mayor resistencia a la tensión diametral (en especímenes condicionados 24 horas a 60°C en mezclas fabricadas con fibra de celulosa y el polímero P1 en comparación con las resistencias obtenidas en mezclas fabricadas con fibra de celulosa y el polímero P3.</li> </ul>
<b>Módulo resiliente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se encontró ninguna variación en los promedios de los módulos resilientes obtenidos en mezclas fabricadas con y sin fibra y usando los polímeros P1 y P3.</li> </ul>

Tabla 12. Resultados de las pruebas de hipótesis realizadas al 90% de confianza

determinaba cambios en la deformación plástica, en la resistencia retenida a la tensión diametral y en el módulo resiliente. Los resultados de las pruebas de hipótesis se resumen en la Tabla No.12

Con respecto a los resultados de desempeño, que incluyen ensayos de deformación permanente, ensayos de inmersión-compresión (tensión diametral y compresión uniaxial) y módulo resiliente, para las granulometrías 14 y 15, se muestra en la Tabla No. 13, los valores de deformación (valores promedio) y el procedimiento de condicionamiento es similar al seguido para especímenes ensayados por tensión diametral (24 h a 60°C). En la Tabla

No. 14 se muestran los resultados del ensayo de módulo resiliente a diversas temperaturas y frecuencias. Las fuerzas aplicadas para el ensayo de módulo resiliente corresponden al 30%, 15% y 5% de la resistencia a tensión diametral, para las temperaturas de 5, 25 y 40°C respectivamente.

Para determinar si la mezcla con granulometría 15 y ligante PG-70 presenta un mejor desempeño que la mezcla con granulometría 14 y ligante AC-30, se procedió a realizar pruebas por contrastes y pruebas de hipótesis, de donde se concluye que hay evidencia al 90% de confianza de que la primera mezcla presenta menor deformación plástica, pero no se tiene evidencia de que presente mayor resistencia al

Ligante	Contenido	Deformación Plástica (mm)		TSR (%)	MRR (%)	RR (%) Comp Uniaxial
		Condición				
		seca	condicionada			
14	bajo	2.44	2.82	85	89	85
	óptimo	2.53	2.87	91	89	91
	alto	3.07	3.78	89	89	89
15	bajo	1.61	2.05	96	87	96
	óptimo	1.94	2.89	79	88	79
	alto	2.40	2.98	85	85	85

Tabla 13. Resultados de ensayos de desempeño para las granulometrías 14 y 15

Mezcla	Cont.	Módulo a 5°C, 0.5 Hz.	Módulo a 5°C, 1.0 Hz.	Módulo a 5°C, 2.0 Hz.	Módulo a 25°C, 0.5 Hz.	Módulo a 25°C, 1.0 Hz.	Módulo a 25°C, 2.0 Hz.	Módulo a 40°C, 0.5 Hz.	Módulo a 40°C, 1.0 Hz.	Módulo a 40°C, 2.0 Hz.
G14 con AC30	bajo	11890	13558	15210	1954	2714	3643	461	627	1042
	óptimo	13624	14280	14305	1643	2280	3072	353	475	653
	alto	10951	12510	13543	1612	2242	3110	364	467	632
G15 con PG70	bajo	13937	15242	15150	2563	3477	4614	482	676	946
	óptimo	14775	15899	15764	2355	3154	4177	436	625	872
	alto	11997	13368	14290	2179	2958	3967	459	643	901

Tabla 14. Resultados de ensayos de módulo resiliente para elaboración de las curvas maestras de rigidez

daño por humedad. Por otro lado al evaluar el efecto de variar el contenido de ligante en ambas mezclas, se cuenta con evidencia al 90% de confianza para afirmar que conforme se aumenta el contenido de ligante aumenta la deformación permanente, pero no se puede afirmar que una variación en el contenido de ligante afecte la durabilidad de la mezcla.

Al evaluar el efecto de la frecuencia de cargas aplicadas sobre la rigidez de la mezcla se tiene evidencia al 90% de confianza de que conforme se aumenta la frecuencia de carga se incrementa la rigidez de la mezcla. Con esto se concluye que frecuencias bajas, es decir, que a velocidades bajas del tránsito vehicular se obtiene una reducción en la rigidez de la mezcla, y el efecto de disminución de la rigidez se incrementa al aumentar la temperatura.

#### 4. Conclusiones y Recomendaciones

Según los resultados obtenidos y para las características propias de este estudio se puede comentar lo siguiente:

La falta de cubicidad del agregado puede estar provocando la especial dificultad de alcanzar el 4% de vacíos con una granulometría. Esta falta de cubicidad afecta el desempeño de estas mezclas, debido a que no se logra un buen contacto piedra sobre piedra, principio en el cual se fundamenta el desempeño de estas mezclas.

Según los ensayos realizados en las primeras etapas, se determinó que un cambio en la curva granulométrica genera cambios considerables en los parámetros volumétricos, por lo que se considera un factor de alta sensibilidad.

Al utilizar un polímero y aumentar el porcentaje de vacíos de diseño de 4% a 5%, no se hizo necesario el uso de la fibra de celulosa, de cara a obtener alta resistencia a la deformación y cumplir con el ensayo de escurrimiento.

Las mezclas fabricadas con fibra de celulosa presentaron mayores deformaciones con respecto a las mezclas fabricadas sin fibra de celulosa, para las condiciones ensayadas en este estudio.

Comparando los polímeros P1 y P3, no se encontraron cambios en la resistencia a la tensión diametral (tanto de especímenes condicionados como no condicionados), ni el módulo resiliente. Es decir, no se puede afirmar que el polímero P1 es mejor que el polímero P3 o viceversa.

La resistencia a la tensión diametral (tanto de especímenes condicionados como no condicionados) obtenida en mezclas fabricadas con fibra de celulosa es menor a la resistencia a la tensión diametral obtenida en mezclas fabricadas sin fibra de celulosa.

Se encontró que entre mayor fuera el contenido de relleno mineral, menores eran las deformaciones plásticas y mayores las resistencias a la tensión diametral, esto debido al efecto de un masticado más rígido.

Se determinó, que a 500 ciclos del ensayo de deformación permanente (corto plazo), las deformaciones medidas en mezclas con graduación discontinua y relleno mineral calizo, eran altas y la resistencia retenida a la tensión diametral era baja. Esto se asociada con que es el masticado, el que en un principio resiste las cargas. Al largo plazo (8000 ciclos del ensayo de deformación plástica) se observa una disminución en la deformación permanente, la cual se relaciona mejor con la estructura granulométrica y esto se puede relacionar con las altas resistencias por compresión uniaxial.

#### 5. Bibliografía

- Asphalt Institute, *The Asphalt Handbook*, Asphalt Institute, 1989
- Bolzán, P, *Especificaciones Técnicas Particulares*, Argentina, 2002
- Brown, Manglorkar, *Evaluation of laboratory properties of SMA mixtures*. NCAT Report No.93-5 1993
- Kandhal, Roberts, otros, *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*, NAPA, 1996
- NAPA, *Designing and Constructing SMA Mixtures, State of the Practice*, 1992