



Reporte de Investigación LM- PI - PV- IN- 15c - 04

MEZCLAS DRENANTES

INFORME DE AVANCE

Investigador principal

Ing. Laura Ramírez

Investigadores asociados

Ing. Mario Arce

Diciembre 2004

MEZCLAS DRENANTES

1. INTRODUCCIÓN

Al ser Costa Rica un país lluvioso, se presentan problemas por la falta de adherencia entre el neumático y el pavimento y la disminución de la visibilidad, ambos causados por la película de agua que queda sobre la superficie del pavimento. Esta película de agua puede dar lugar al deslizamiento o al vuelco de los vehículos que circulan a altas velocidades.

Para buscar solución a estos problemas, el LANAMME, según lo establece la Ley No. 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributaria, deberá desarrollar proyectos de investigación.

De aquí surge este proyecto, el cual, analiza el comportamiento de las mezclas drenantes en nuestro medio y generar un marco de especificaciones para su diseño y construcción.

En la primera etapa del proyecto se usará agregado patrón, proveniente de la región de Guápiles, asfalto tipo AC-30 modificado con 1.5% de EGA y 0.5% de fibra de celulosa. El diseño de la mezcla se hará empleando la metodología SUPERPAVE, sin embargo, alguno de los diseños también se realizarán mediante la metodología Marshall, para comparar los resultados obtenidos con ambas metodologías.

Para analizar el desempeño de estas mezclas en laboratorio, se efectuarán ensayos de deformación permanente a 60°C y 70°C en la pista de ensayo de Gergia (APA), ensayos de módulo resiliente y ensayos de resistencia a la acción del agua, tal como resistencia retenida a la tensión diametral y a la compresión uniaxial.

La primera etapa del proyecto se dividirá en tres secciones. En la primera sección se seleccionará la granulometría óptima de entre tres granulometrías propuestas, considerando los parámetros de vacíos en el agregado grueso (VCA_{RDC}), vacíos en el agregado grueso de la mezcla (VCA_{mix}), y los vacíos totales en la mezcla. En la figura 1 se presenta el esquema experimental empleado.

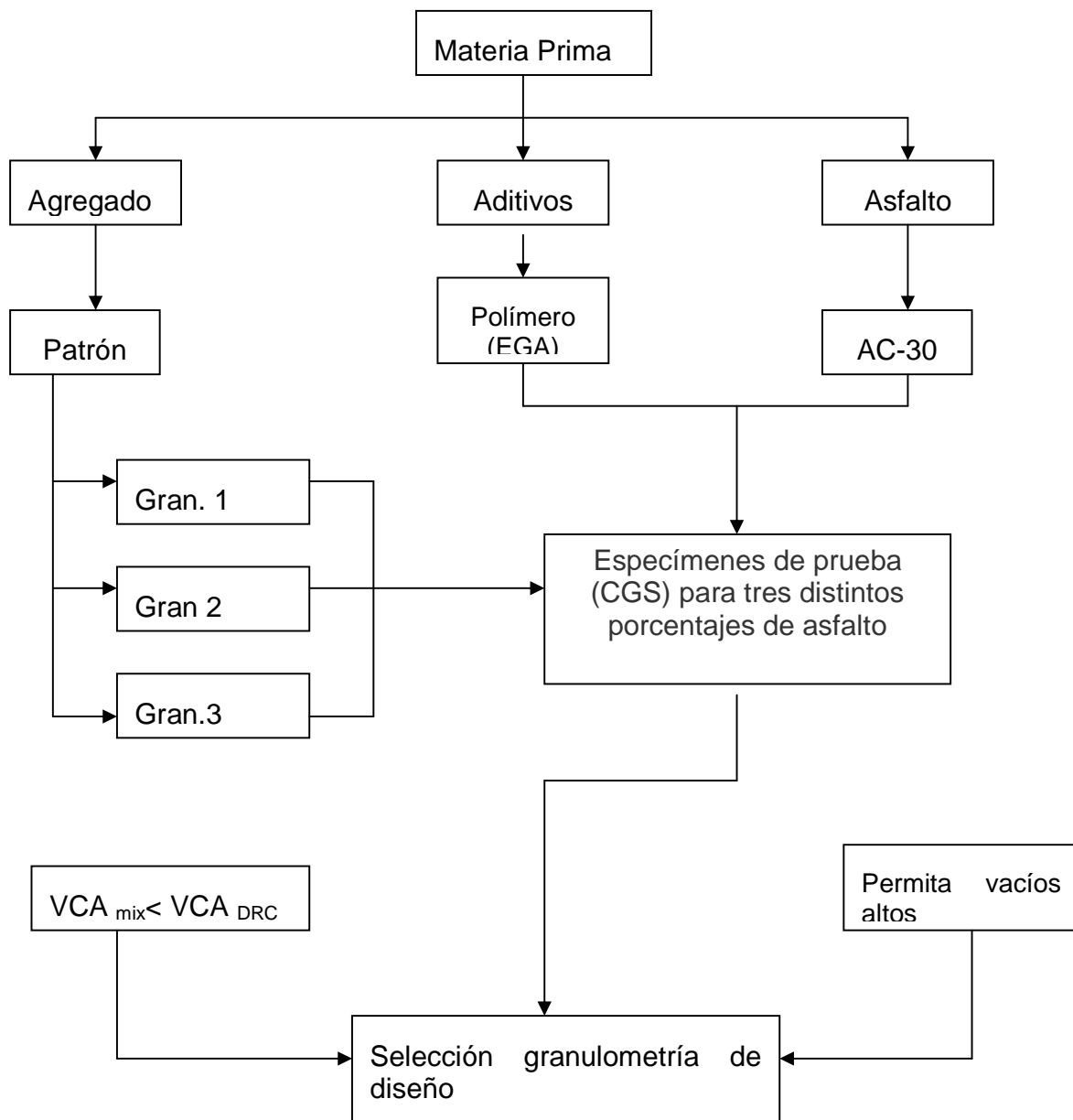


Figura No. 1: Esquema experimental para selección de la granulometría óptima

En la siguiente sección se definirá el contenido óptimo de asfalto por medio de la metodología SUPERPAVE, empleando 100 giros de diseño y se comparará con el contenido óptimo de asfalto obtenido mediante la metodología Marshall, usando 50 golpes por cara. En la figura 2 se presenta el esquema experimental.

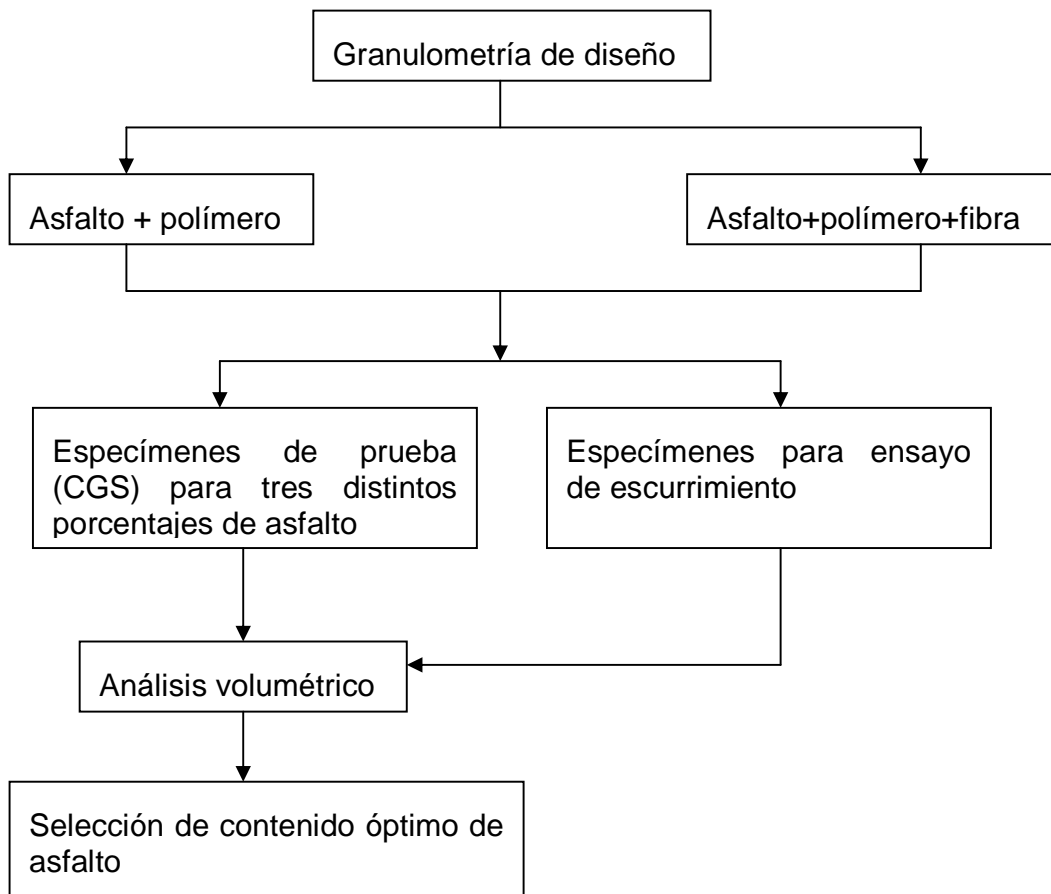


Figura No. 2: Esquema experimental para selección del contenido óptimo de asfalto.

En esta segunda sección, se realizarán ensayos de deformación permanente y módulo resiliente para cada contenido de asfalto del diseño de mezcla

Una vez seleccionado el porcentaje óptimo de asfalto, se realizarán ensayos de desempeño, los cuales se detallan en la figura 3.

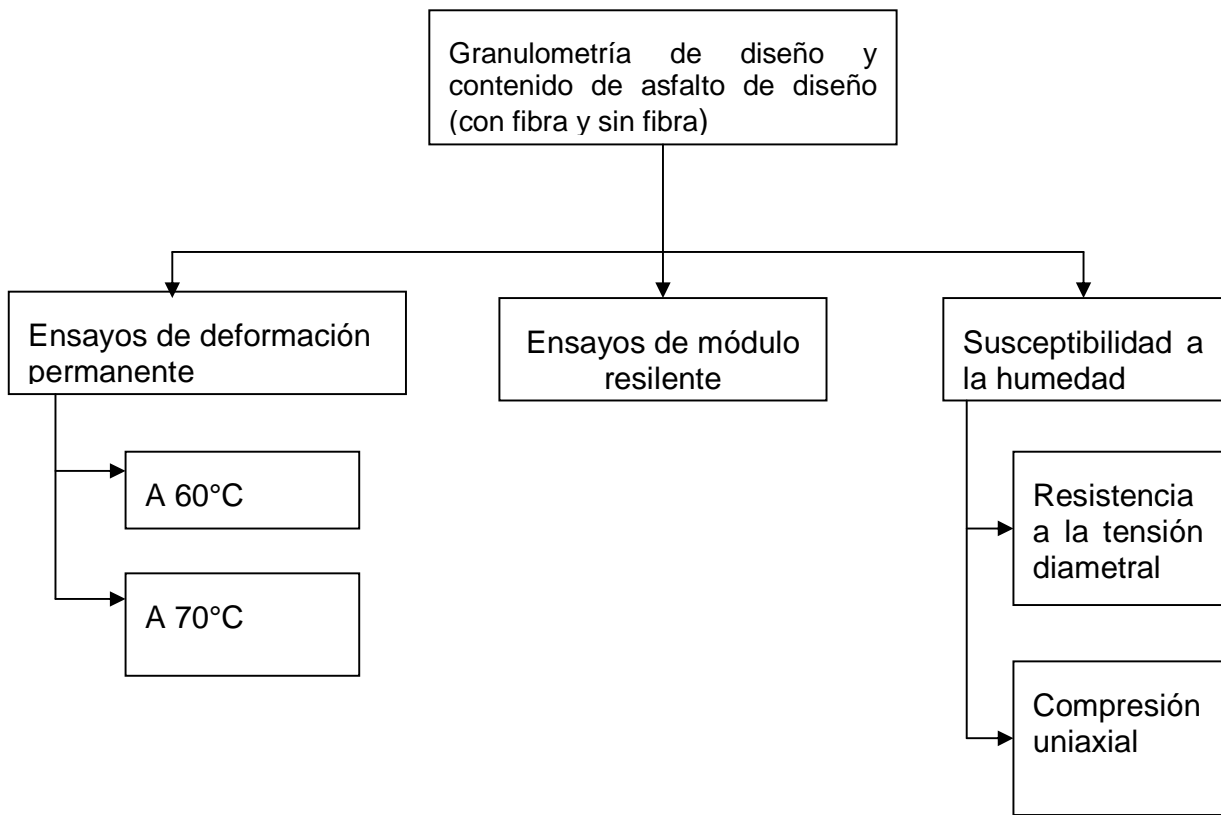


Figura No. 3: Esquema experimental para ensayos de desempeño.

2. MARCO TEÓRICO

Las mezclas drenantes son mezclas bituminosas utilizadas en capas de rodadura, que se dosifican con el objetivo principal de conseguir un gran número de vacíos interconectados entre sí (18 a 25%) que permitan el drenaje del agua superficial y su evacuación hacia las zonas laterales fuera de la calzada, como solución a los problemas de seguridad vial que se generan en los pavimentos mojados.

Este tipo de mezclas combinan el concepto tradicional de impermeabilizar la superficie de la carretera, trasladando esta función a la capa inferior o a la interfase entre ambas.

Para conseguir elevados niveles de vacíos es necesario reducir drásticamente el contenido de mortero y deben ser mezclas con altos porcentajes de agregado grueso (alrededor del 85%). En mezclas convencionales, hay entre un 35 y un 50% de agregados de tamaño inferior a 2-2.5 mm, mientras que en mezclas drenantes se reduce a un 10-15%, o incluso a porcentajes menores si se desea conseguir vacíos mayores al 25%.

La gran cantidad de agregado grueso les otorga a estas mezclas las siguientes ventajas:

- Eliminación del hidroplaneo: la capa de rodadura drenante o porosa, absorbe y elimina el agua de la superficie del pavimento conduciéndola hacia las zonas laterales. De esta manera se consigue eliminar el problema de hidroplaneo.
- Mayor resistencia al deslizamiento sobre pavimentos mojados: las capas de rodadura drenantes presentan una superficie lisa, sin resaltos, pero con gran cantidad de vacíos interconectados entre sí, lo que le confiere una alta macrotextura, del orden de 1,5 a 2,5 mm de profundidad, medida con el ensayo de la mancha de arena. Esta macrotextura hace que estos pavimentos mantengan una elevada adherencia neumático-pavimento a altas velocidades.
- Reducción de las proyecciones de agua al paso de los vehículos, evitando el levantamiento y pulverización del agua: el agua se introduce en el interior de la capa y es drenada hasta el espaldón a través de la red interconectada de vacíos, con lo que se consigue mantener la superficie de rueda libre de agua y eliminar por completo su proyección y salpicadura por el paso de los vehículos, repercutiendo de manera beneficiosa sobre la visibilidad y seguridad del conductor.
- Menor deslumbramiento por las luces de los vehículos: cuando llueve, se produce con facilidad la reflexión de la luz sobre los pavimentos lisos e impermeables. Las capas de rodadura drenantes, al eliminar el agua de la superficie del pavimento, eliminan también los fenómenos de reflexión de la luz y mejoran notablemente las condiciones de visibilidad del conductor.

- Reducción del ruido del tráfico: este tipo de pavimento ofrece una rodadura silenciosa. En los pavimentos densos un aumento de macrotextura supone un aumento del nivel sonoro, mientras que en las mezclas drenantes, a igual textura, son más silenciosos e incluso absorben el ruido del motor. La reducción de ruido producida por una capa de rodadura drenante respecto a una capa densa del mismo espesor, depende del espesor y del porcentaje de vacíos.

Estas ventajas conllevan a una notable mejora en la visibilidad, el confort y la seguridad del usuario.

En contraposición con las ventajas antes mencionadas, este tipo de pavimento presenta una serie de limitaciones e inconvenientes que hacen referencia a su durabilidad y colmatación.

- Durabilidad: El mayor porcentaje de vacíos de estas mezclas puede favorecer la acción oxidante y de envejecimiento por acción de los agentes atmosféricos. No obstante, este proceso de deterioro se ve contrarrestado por la mayor riqueza de ligante de estas mezclas, con una espesa película de asfalto recubriendo los agregados. El alto porcentaje de vacíos también puede favorecer el daño por la acción del agua, como el desprendimiento de agregados en el caso de existir una mala adhesividad entre el agregado y el ligante.
- Colmatación: uno de los principales problemas que presentan este tipo de mezclas es la colmatación de sus vacíos. Esta colmatación es tanto más lenta cuanto mayor sea el porcentaje inicial de vacíos. Para conseguir una buena drenabilidad y que esta se mantenga en el transcurso del tiempo es necesario emplear mezclas con un mínimo de 20% de vacíos. La colmatación también es retardada empleando granulometrías de tamaño máximo igual o superior a 11 mm. Sin embargo al aumentar el tamaño máximo del agregado empleado de 8 a 11 mm o de 11 a 16 mm, se produce un incremento de ruido de 2 dB. Los esfuerzos de succión del tráfico tienen un efecto descolmatador, manteniendo alta la permeabilidad del pavimento cuando la polución no es muy alta. El efecto de la mezcla drenante para aminorar el ruido, depende también de su grado de limpieza. A medida que va produciéndose su colmatación disminuye su efecto, llegando a comportarse como una capa densa cuando está colmatada.
- Adherencia: Debido a la menor superficie real de contacto que se establece entre el neumático y la superficie porosa y a que en su puesta en servicio los agregados están cubiertos por una gruesa capa de ligante asfáltico, lo que genera una superficie de ruedo con una textura lisa, ha surgido la inquietud de la adherencia entre el neumático y el pavimento en tiempo seco. Sin embargo, la película de ligante asfáltico que recubre los agregados desaparece en los primeros 3 a 6 meses, y entonces se incrementa la desaceleración de frenado.

FASE I

3. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

3.1 Agregado

En este estudio se contempla el uso de una sola fuente de agregado, denominado agregado patrón, proveniente de la Región de Guápiles, de depósitos aluviales de origen ígneo, y extraído de río. En la Tabla No.1 se presenta la caracterización física del agregado.

Tabla No. 1: Caracterización del agregado

Ensayo	Norma	Valor
Agregado grueso		
Gbs	AASHTO	2.62
Absorción (%)	T100	1.7
Abrasión tipo A (%)	AASHTO	19.1
Abrasión tipo C (%)	T-96	32.3
Caras fracturadas (1 cara)	AASHTO D5821	86
Partículas planas y elongadas	ASTM	
-3 a 1	D4791	6.9
-5 a 1		0.9
Resistencia al pulido	AASHTO T278-279	0.64
Agregado fino		
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
Disgregabilidad en sulfato de sodio (%)	AASHTO T104	5.65
Propiedades combinadas		
Gbs	-	2.63
Absorción	-	1.75

3.2 Ligante asfáltico

Se empleó para el estudio un ligante asfáltico de uso común en Costa Rica para obras de pavimentación, modificado con 1.5% de polímero tipo EGA (Etilen glicidil acrilato).

En la Tabla No.2 se presenta la caracterización físico-química del ligante asfáltico sin modificar y modificado y en la Tabla No.3 se presenta su caracterización reológica.

Tabla No. 2: Caracterización físico-química del ligante asfáltico.

Propiedad	Ligante sin modificar	Ligante modificado (1.5% EGA)	Normativa NCR 248:1997	Especificación AASHTO M226-80
Parámetros de pureza y seguridad				
Punto de chispa (°C)	277	304	Mín. 232	Mín. 232
Solubilidad en/tricloroetileno (%)	99.93	-	Mín. 99.00	Mín. 99.00
Pérdida de masa en RTFO (%)	0.81	0.71	-	-
Pérdida de masa en TFO (%)	0.52	0.51	Máx. 0.5	Máx. 0.5
Gravedad específica a 25°C	1.033	1.029	-	-
Parámetros de consistencia				
Penetración a 25°C (1/10 mm)	53	52	Mín. 50	Mín. 50
Viscosidad absoluta a 60°C (Poise)	4097	5472	2400-3600	2400-3600
Viscosidad absoluta a 125°C (cSt)	1083	2672	-	-
Viscosidad cinemática a 135°C (cSt)	566	1299	Mín. 350	Mín. 350
Viscosidad cinemática a 145°C (cSt)	411	871	-	-
Viscosidad absoluta a 60°C TFO (Poise)	7885	9893	-	Máx. 12000
Parámetros de susceptibilidad al envejecimiento y susceptibilidad térmica				
Índice de susceptibilidad térmica VTS	3.51	3.01	3.30-3.90	-
Razón de viscosidades (TFO/RTFO)	1.9/2.4	1.8/2.7	Máx. 3.0	-

Tabla No. 3: Caracterización reológica del ligante asfáltico.

Ensayo	Unid.	Temp.	Ligante sin modificar	Ligante modificado (1.5% EGA)
Parámetro de resistencia a la deformación plástica				
G*/senδ (original)	KPa	82°C	0.370	0.670
		70°C	1.310	2.050
		58°C	5.720	7.610
Angulo de fase (original)	°	82°C	86.6	76.3
		70°C	84.0	73.2
		58°C	79.8	70.5
PG superior	°C	-	72.52	77.67
G*/senδ (RTFO)	KPa	82°C	0.860	1.860
		70°C	3.130	5.750
		58°C	13.290	21.110
Angulo de fase (RTFO)	°	82°C	83.1	69.9
		70°C	79.5	67.0
		58°C	73.8	64.6
PG superior	°C	-	72.74	80.02
Parámetro de tendencia al agrietamiento por fatiga				
G*senδ (PAV)	KPa	28°C	1.065	0.878
		22°C	1.925	1.541
		16°C	3.555	2.757
Angulo de fase (PAV)	°	28°C	49.6	48.2
		22°C	45.1	44.6
		16°C	41.8	41.8
PG intermedio	°C	-	12.95	10.3
Grado de desempeño	°C	-	70 (13)	76 (13)

Según los ensayos reológicos, el ligante sin modificar clasifica, de acuerdo con la metodología SUPERPAVE para determinación del grado de desempeño, como un PG-70 (13), donde 70 representa la temperatura máxima de desempeño y 13 representa la temperatura intermedia de desempeño. Para el caso del ligante modificado con 1.5% de EGA, clasifica como un PG 76 (13).

3.3 Aditivos

El asfalto es modificado con polímeros mediante un proceso de mezclado a alta temperatura y esfuerzo cortante, en el cual se incorpora el polímero para formar una “red” tridimensional que atrapa, dentro de sus espacios, a las moléculas de asfalto. Esta red absorbe gran parte de los esfuerzos a los que se ve sometido el asfalto y es el factor clave que mejora el desempeño de este¹.

Para este proyecto se utilizarán como modificantes la fibra de celulosa, y un polímero del tipo EGA

3.3.1 Fibra de celulosa

La celulosa es un material de origen natural y renovable por la naturaleza. Es utilizada como un agente estabilizador que evita el escurrimiento del ligante.

Para este estudio se utilizó la fibra en su presentación granular (ver figura 4), la cual tiene un recubrimiento de ligante AC-40 del 28% de su peso, el cual funciona como un agente separador y ayudante de granulación. Es necesario tomar en cuenta esta cantidad de asfalto, que aporta la fibra, a la hora de dosificar el ligante.



Figura No. 4: Fibra de celulosa en presentación granular

Se dosificó al 0.5% por peso de agregado y se incorporó junto con la fracción fina del agregado antes de ser llevado a la temperatura de mezclado

¹ Dynasol. Beneficio del uso de copolímeros estireno-butadieno en la modificación de asfaltos.

3.3.2 Polímero EGA

Es un polímero compuesto por etilen, glicidil y acrilato (EGA), el cual se incorporó directamente al asfalto y se dosificó al 1.5% por peso total de asfalto.



Figura No. 5: Polímero EGA (P1)

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Primera etapa

4.1.1 Selección de granulometría óptima

Para seleccionar la granulometría óptima se ensayaron tres distintas granulometrías, mostradas en la Tabla No.4 y en el gráfico No.1.

Se analizaron cuatro distintos porcentajes de asfalto, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0% por peso total de agregado (PTA). Los principios que prevalecieron en la selección de la granulometría fueron, que los vacíos en el agregado grueso de la mezcla (VCA_{mix}) fueran menores a los vacíos en el agregado grueso (VCA_{DRC}), que se alcanzaran vacíos de aire en la mezcla altos, entre 20 y 22% y que el porcentaje de escurrimiento fuera menor a 0.3%.

En la Tabla No.5 se presentan los resultados de los diseños de mezcla.

Tabla No. 4: Granulometrías ensayadas

Malla (mm)	% Pasando		
	Gran.1	Gran.2	Gran.3
19 mm	100,0	100,0	100,0
12.7 mm	100,0	92,5	85,0
9.5 mm	75,0	65,0	55,0
N°4	25,0	17,5	10,0
N°8	10,0	7,5	5,0
N°16	8,0	6,0	4,0
N°30	6,5	4,9	3,3
N°50	5,4	4,1	2,7
N°100	4,6	3,4	2,3
N°200	4,0	3,0	2,0

Gráfico No. 1: Curvas granulométricas

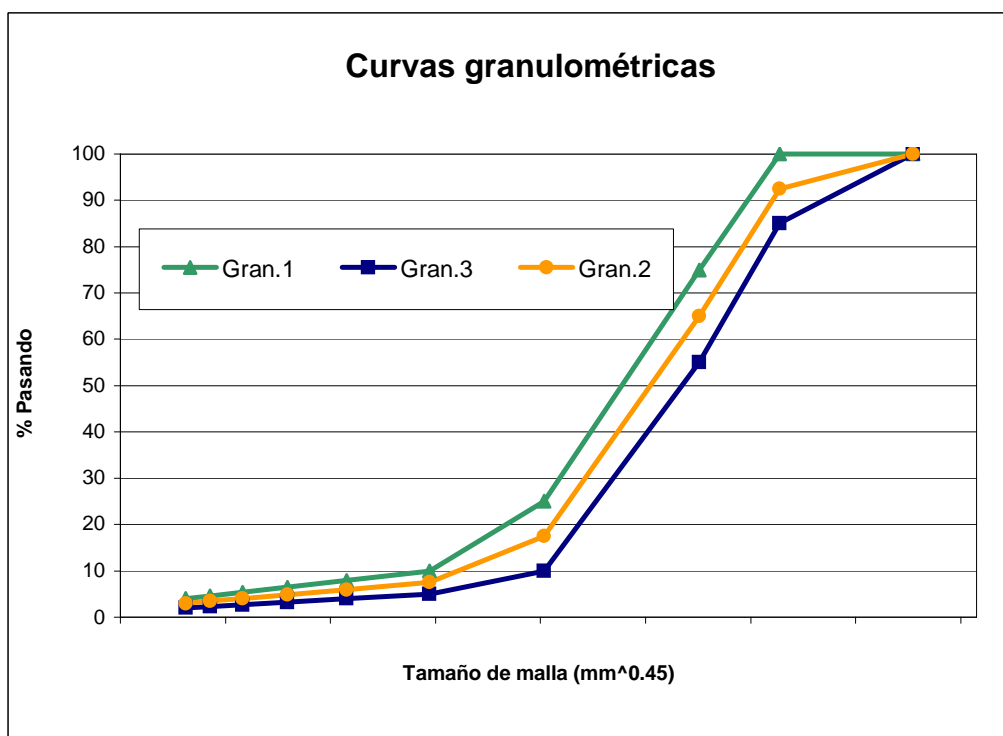


Tabla No. 5: Diseños de mezcla realizados para la selección de la granulometría óptima.

Propiedad	Granulometría 1				Granulometría 2			
	% asfalto	3,5	4,0	4,5	5,0	3,5	4,0	4,5
Vacíos	23,6	22,2	20,0	20,8	23	23,5	22,4	21,8
VCA _{mix}	46,1	46,0	45,1	46,3	40,4	41,5	41,5	42,0
VCA _{DRC}	43,4				43,1			
Escurrimiento	0,049	0,068	0,107	0,325	0,029	0,029	0,056	0,058

Propiedad	Granulometría 3			
	% asfalto	3,5	4,0	4,5
Vacíos	25,3	24,4	24,9	23,9
VCA _{mix}	37,6	37,7	38,6	38,6
VCA _{DRC}	43,1			
Escurrimiento	0,039	0,087	0,092	0,197

De los diseños realizados se determinó que la granulometría 1 no cumplía con el criterio de $VCA_{mix} < VCA_{DRC}$, y en 5.0% de asfalto por peso total de agregado ya se presentaban problemas de escurrimiento. Las granulometrías 2 y 3 cumplen con el criterio de $VCA_{mix} < VCA_{DRC}$, y no evidencian problemas de escurrimiento para ninguno de los porcentajes de asfalto analizados. Sin embargo se seleccionó la granulometría 2 ya que fue la granulometría que presentó vacíos más cercanos a 20-22%, con los porcentajes de escurrimiento menores.

4.1.2 Diseño de mezcla Superpave

Con la granulometría seleccionada, denominada para efectos del informe como granulometría A, se realizaron dos diseños de mezcla usando la metodología Superpave, con 100 giros de diseño. Ambos diseños incluyen 1.5% del polímero tipo EGA y en uno se incorporó fibra de celulosa al 0.5% por peso total de agregado.

Para analizar el cambio en la volumetría de la mezcla, se modificó el porcentaje pasando la malla No.4 de 17.5% (granulometría A) a 20% (Granulometría B) en un caso y a 22,5% (Granulometría C) en otro caso. Con estas dos nuevas granulometrías se hicieron diseños de mezcla con y sin fibra. Los resultados se presentan en la Tabla No.6.

Tabla No. 6: Resultados de los diseños de mezcla Superpave.

Parámetros	Gran. A (No.4= 17,5%)		Gran. B (No.4=20%)		Gran. C (No.4=22,5%)	
	Con fibra	Sin fibra	Con fibra	Sin fibra	Con fibra	Sin fibra
Vacíos de diseño (%)	21,0	21,0	N.A	21,0	21,0	21,0
% asfalto (PTA)	5,96	6,00	N.A	5,36	5,89	5,25
VMA (%)	31	30	N.A	29	30	29,4
VFA (%)	31	30	N.A	30	31	28,6
Escurrecimiento (%)	0,16	0,84	N.A	0,16	0,35	0,13

Parámetros	Gran. A (No.4= 17,5%)		Gran. B (No.4=20%)		Gran. C (No.4=22,5%)	
	Con fibra	Sin fibra	Con fibra	Sin fibra	Con fibra	Sin fibra
Vacíos de diseño (%)	21,5	21,5	N.A	21,5	21,5	N.A
% asfalto (PTA)	5,52	5,67	N.A	5,06	5,42	N.A
VMA (%)	33	30	N.A	30	30	N.A
VFA (%)	28	29	N.A	26	29	N.A
Escurrecimiento (%)	0,13	0,35	N.A	0,09	0,22	N.A

Parámetros	Gran. A (No.4= 17,5%)		Gran. B (No.4=20%)		Gran. C (No.4=22,5%)	
	Con fibra	Sin fibra	Con fibra	Sin fibra	Con fibra	Sin fibra
Vacíos de diseño (%)	22,0	22,0	22,0	N.A	22,0	N.A
% asfalto (PTA)	5,09	5,30	5,36	N.A	5,00	N.A
VMA (%)	32	30	30,4	N.A	30	N.A
VFA (%)	27	27	27,3	N.A	26	N.A
Escurrecimiento (%)	0,09	0,13	0,14	N.A	0,12	N.A

Con los especímenes fabricados para cada uno de los puntos de los seis diseños de mezcla, se realizaron ensayos de módulo resiliente y deformación permanente. El ensayo de módulo resiliente se hizo tanto condicionado a 60°C por 24 horas como sin condicionar. Los resultados obtenidos se presentan en las siguientes tablas.

Tabla No. 7: Resultados de módulo resiliente sin fibra. Granulometría A.

Sin fibra (Granulometría A)					
% Asfalto (PTA)	% Vacíos	Módulo resiliente (MPa) Sin condicionar		Módulo resiliente (MPa) Condicionado	
		Carga 500N	Carga1000N	Carga 500N	Carga1000N
5,0	22,1	1577	1214	1359	999
	21,9	1695	1325	-	-
	22,9	1235	939	-	-
Promedio	22,3	1502	1159	1359	999
Desv. Est.	0,5	239	199	-	-
5,5	21,7	1365	1030	1293	944
	22,0	1340	999	-	-
	22,1	1276	1045	-	-
Promedio	21,9	1327	1025	1293	944
Desv. Est.	0,2	46	23	-	-
6,0	21,4	1237	964	1026	769
	20,9	1516	1183	-	-
	20,6	1526	1188	-	-
Promedio	21,0	1426	1111	1026	769
Desv. Est.	0,4	164	128	-	-

Tabla No. 8: Resultados de módulo resiliente con fibra. Granulometría A.

% Asfalto (PTA)	Con fibra (Granulometría A)				
	% Vacíos	Módulo resiliente (MPa) Sin condicionar		Módulo resiliente (MPa) Condicionado	
		Carga 500N	Carga1000N	Carga 500N	Carga1000N
5,0	22,2	1375	1035	-	-
	22,1	1395	951	-	-
	22,2	1352	1000	1347	897
Promedio	22,2	1374	995	1347	897
Desv. Est.	0,1	22	42	-	-
5,5	23,1	1005	727		
	21,4	1710	1220	-	-
	21,4	1312	946	1185	874
Promedio	22,0	1342	964	1185	874
Desv. Est.	1,0	353	247	-	-
6,0	20,8	1209	976		
	21,4	857	693	-	-
	20,8	1293	880	1194	846
Promedio	21,0	1120	850	1194	846
Desv. Est.	0,3	231	144	-	-

Tabla No. 9: Resultados de módulo resiliente retenido. Granulometría A

% Asfalto (PTA)	MRR (%)			
	Sin fibra		Con fibra	
	Carga 500N	Carga 1000N	Carga 500N	Carga 1000N
5,0	90	86	98	90
5,5	97	92	88	91
6,0	72	69	107	100

Tabla No. 10: Resultados de módulo resiliente sin fibra. Granulometría B.

Sin fibra (Granulometría B)					
% Asfalto (PTA)	% Vacíos	Módulo resiliente (MPa) Sin condicionar		Módulo resiliente (MPa) Condicionado	
		Carga 500N	Carga1000N	Carga 500N	Carga1000N
5,0	21,6	1599	1211	-	-
	22,5	1256	1006	-	-
	21,5	1627	1289	1369	1119
Promedio	21,9	1494	1169	1369	1119
Desv. Est.	0,6	207	146	-	-
5,5	20,6	1719	1309	-	-
	20,0	2127	1622	-	-
	20,2	1539	1257	1465	1196
Promedio	20,3	1795	1396	1465	1196
Desv. Est.	0,3	301	197	-	-
6,0	20,6	1675	1338	-	-
	21,2	1048	790	-	-
	19,1	1781	1309	1600	1391
Promedio	20,3	1501	1146	1600	1391
Desv. Est.	1,1	396	308	-	-

Tabla No. 11: Resultados de módulo resiliente con fibra. Granulometría B.

% Asfalto (PTA)	Con fibra				
	% Vacíos	Módulo resiliente (MPa) Sin condicionar		Módulo resiliente (MPa) Condicionado	
5,0	22,4	1415	1151	-	-
	22,3	1952	1636	-	-
	21,2	1896	1460	1507	1085
Promedio	22,0	1754	1416	1507	1085
Desv. Est.	0,7	295	246	-	-
5,5	20,2	2059	1657	-	-
	22,3	1411	1134	-	-
	22,1	1285	988	979	804
Promedio	21,5	1585	1260	979	804
Desv. Est.	1,2	415	352	-	-
6,0	21,2	1381	1108	-	-
	22,5	1058	867	-	-
	21,8	1197	962	936	749
Promedio	21,8	1212	979	936	749
Desv. Est.	0,7	162	121	-	-

Tabla No. 12: Resultados de módulo resiliente retenido. Granulometría B.

% Asfalto (PTA)	MRR (%)			
	Sin fibra		Con fibra	
	Carga 500N	Carga 1000N	Carga 500N	Carga 1000N
5,0	92	96	86	77
5,5	82	86	62	64
6,0	107	121	77	77

Tabla No. 13: Resultados de módulo resiliente sin fibra. Granulometría C.

% Asfalto (PTA)	Sin fibra (Granulometría C)				
	% Vacíos	Módulo resiliente (MPa) Sin condicionar		Módulo resiliente (MPa) Condicionado	
		Carga 500N	Carga1000N	Carga 500N	Carga1000N
5,0	20,9	1703	1389	-	-
	21,7	1275	1040	-	-
	21,3	1604	1299	1363	1101
Promedio	21,3	1527	1243	1363	1101
Desv. Est.	0,4	224	181	-	-
5,5	20,4	1435	1141	-	-
	20,6	1405	1086	-	-
	21,0	1222	954	1150	903
Promedio	20,7	1354	1060	1150	903
Desv. Est.	0,3	115	96	-	-
6,0	19,9	1347	1058	-	-
	20,5	903	712	-	-
	-	-	-	-	-
Promedio	20,2	1125	885	-	-
Desv. Est.	0,4	314	245	-	-

Tabla No. 14: Resultados de módulo resiliente con fibra. Granulometría C.

% Asfalto (PTA)	Con fibra (Granulometría C)				
	% Vacíos	Módulo resiliente (MPa) Sin condicionar		Módulo resiliente (MPa) Condicionado(*)	
		Carga 500N	Carga1000N	Carga 500N	Carga1000N
5,0	22,1	1685	1252	-	-
	22,3	1559	1218	-	-
	22,3	1147	925	1048	764
Promedio	22,2	1464	1132	1048	764
Desv. Est.	0,1	281	180	-	-
5,5	20,5	1890	1528	-	-
	21,3	1559	1183	-	-
	21,0	1610	1199	1140	880
Promedio	20,9	1686	1303	1140	880
Desv. Est.	0,4	178	195	-	-
6,0	22	1396	1051	-	-
	20,7	1489	1154	-	-
	20,6	1486	1119	975	699
Promedio	21,1	1457	1108	975	699
Desv. Est.	0,8	53	52	-	-

(*) Resultados pendientes

Tabla No. 15: Resultados de módulo resiliente retenido. Granulometría C.

% Asfalto (PTA)	MRR (%)			
	Sin fibra		Con fibra	
	Carga 500N	Carga 1000N	Carga 500N	Carga 1000N
5,0	89	89	72	68
5,5	85	85	68	68
6,0	-	-	67	63

Planteando el modelo $Módulo = f(\text{contenido de asfalto, aditivo, granulometría})$ se realizó un análisis de varianza para los resultados de módulo resiliente sin condicionar, obtenidos para la carga de 500 N. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla No. 16

Tabla No. 16 : Análisis de varianza realizado al 90% de confianza, para módulo resiliente sin condicionar.

Parámetro	Factores experimentales		
	Contenido de asfalto	Aditivo	Granulometría
Módulo resiliente	Sí	No	Sí

En las Tablas No.17, 18 y 19 se presentan los resultados obtenidos de deformación permanente, usando la pista de ensayo de Georgia (APA).

Tabla No. 17 : Deformaciones permanentes. Granulometría A

% Asfalto (PTA)	Sin fibra			Con fibra		
	% Vacíos	Prom. vacíos (%)	Deform. (mm)	% Vacíos	Prom. vacíos (%)	Deform. (mm)
5,0	21,9	22,4	4,0	22,2	22,2	2,6
	22,9			22,1		
5,5	22	22,1	4,3	23,1	22,3	3,1
	22,1			21,4		
6,0	20,9	20,8	4,6	20,8	21,1	3,7
	20,6			21,4		

Tabla No. 18: Deformaciones permanentes. Granulometría B

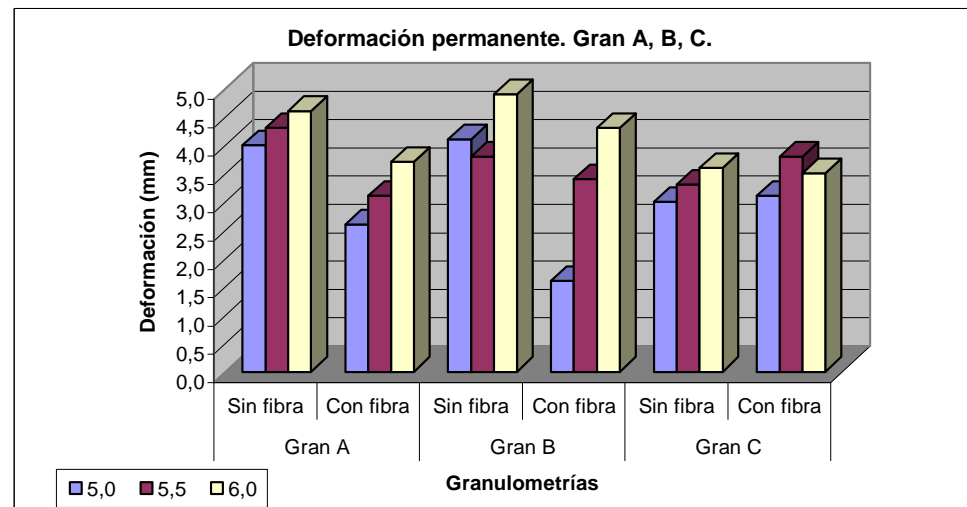
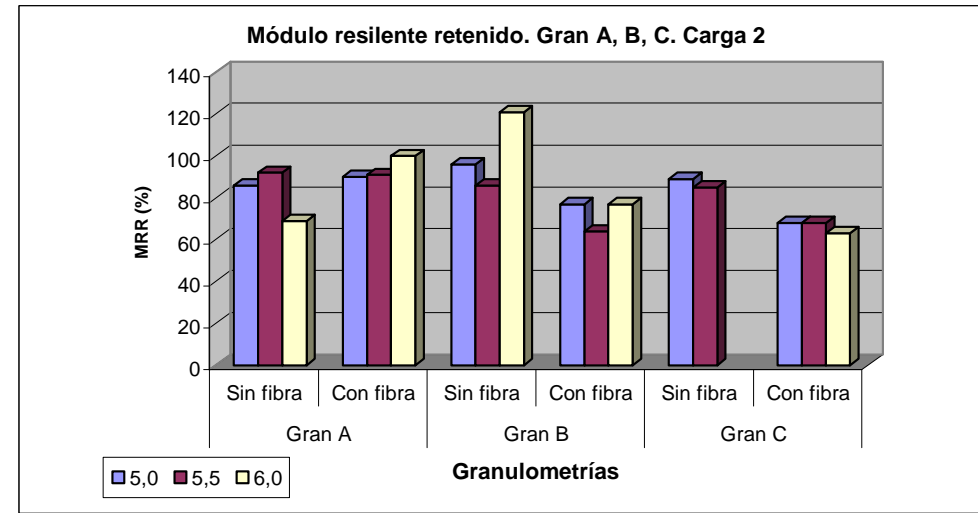
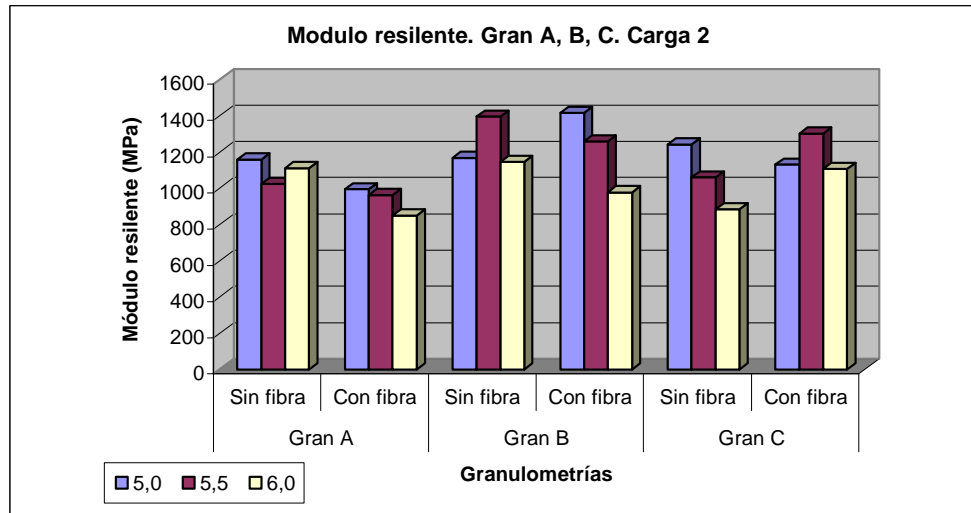
% Asfalto (PTA)	Sin fibra			Con fibra		
	% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deform. (mm)	% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deform. (mm)
5,0	21,6	22,1	4,1	22,4	22,4	1,6
	22,5			22,3		
5,5	20,6	20,3	3,8	20,2	21,3	3,4
	20			22,3		
6,0	20,6	20,9	4,9	21,2	21,9	4,3
	21,2			22,5		

Tabla No. 19: Deformaciones permanentes. Granulometría C

% Asfalto (PTA)	Sin fibra			Con fibra		
	% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deform. (mm)	% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deform. (mm)
5,0	20,9	21,3	3,0	22,1	22,2	3,1
	21,7			22,3		
5,5	20,4	20,5	3,3	20,5	20,9	3,8
	20,6			21,3		
6,0	19,9	20,2	3,6	22,0	21,4	3,5
	20,5			20,7		

A partir de estos resultados, se fijó en 21% el porcentaje de vacíos de diseño y se seleccionó la granulometría C, sin fibra, para continuar con el estudio, ya que era la que presentaba menores deformaciones plásticas. En el gráfico No.2 se presentan los valores obtenidos de módulo, módulo retenido y deformación permanente para las granulometrías A, B y C.

Gráfico No. 2: Ensayos de desempeño para las granulometrías A, B y C. Para cada punto de asfalto del diseño.



4.1.3 Ensayos de desempeño para el contenido óptimo de asfalto. Gran C sin fibra

Con el fin de evaluar el desempeño de la mezcla seleccionada (granulometría C sin fibra), se realizaron ensayos de deformación permanente a 60 y 70°C variando el número de ciclos, ensayos de módulo resiliente, con el fin de obtener el porcentaje de módulo retenido luego de condicionar los especímenes 24 horas a 60° C y ensayos de resistencia a la compresión uniaxial y resistencia a tensión diametral.

4.1.3.1 Deformación permanente

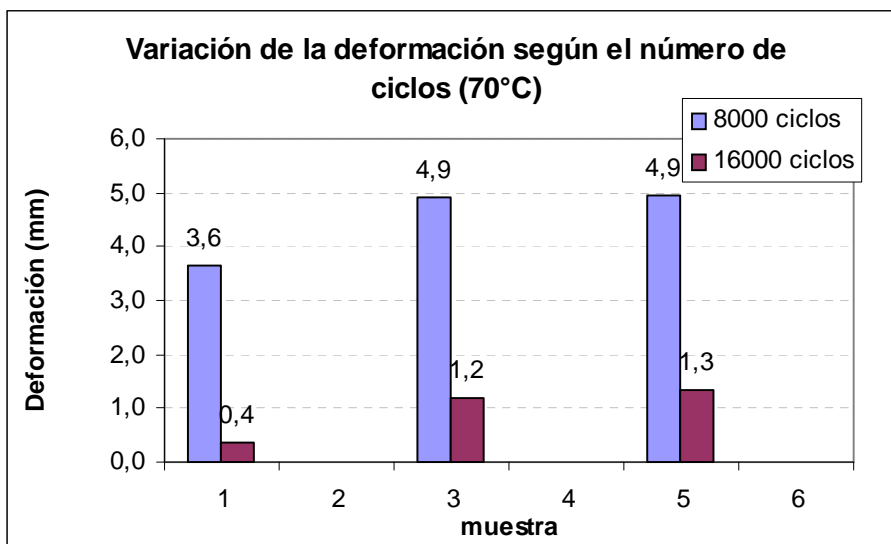
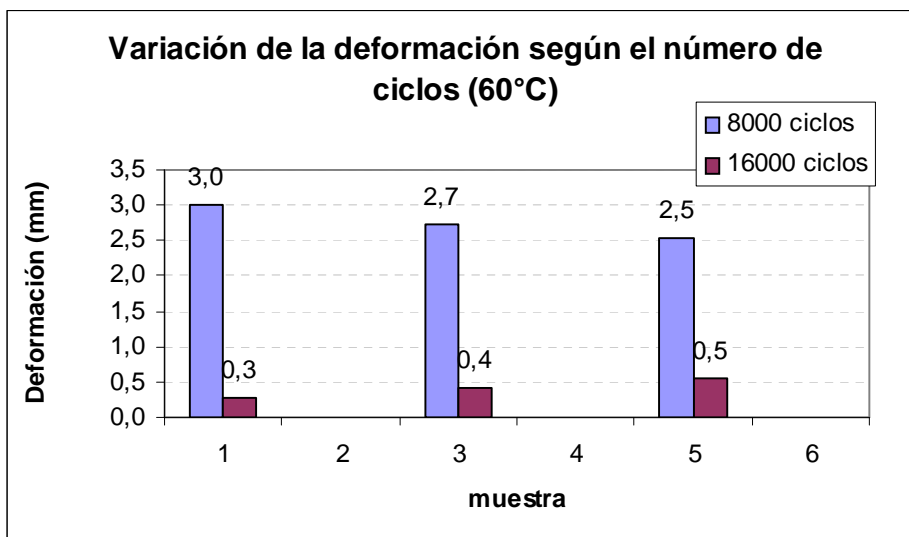
La primera corrida del ensayo se realizó a 8000 ciclos de carga. Una vez concluido el ensayo, los especímenes fueron nuevamente sometidos a otros 8000 ciclos de carga. Esto se realizó a dos distintas temperaturas: 60 y 70°C. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla No. 20.

Tabla No. 20. Resultados de deformación permanente. Granulometría C.

60°C Primer ciclo			60°C Segundo ciclo		
% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deformación (mm)	% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deformación (mm)
22,3	22,9	3,0	22,3	22,9	0,3
23,5			23,5		
23,3	23,8	2,7	23,3	23,8	0,4
24,3			24,3		
22,6	23,2	2,5	22,6	23,2	0,5
23,8			23,8		
23,3	-	2,8	23,3	-	0,4
0,7	-	0,2	0,7	-	0,1
70°C Primer ciclo			70°C Segundo ciclo		
% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deformación (mm)	% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deformación (mm)
23,1	22,8	3,6	23,1	22,8	0,4
22,4			22,4		
23,3	23,4	4,9	23,3	23,4	1,2
23,4			23,4		
23,4	23,4	4,9	23,4	23,4	1,3
23,4			23,4		
23,2	-	4,5	23,2	-	1,0
0,4	-	0,7	0,4	-	0,5

En el gráfico No.3 se observa la variación de la deformación según el número de ciclos de carga para las temperaturas de 60 y 70°C.

Gráfico No. 3: Variación de la deformación según el número de ciclos. Gran C sin fibra

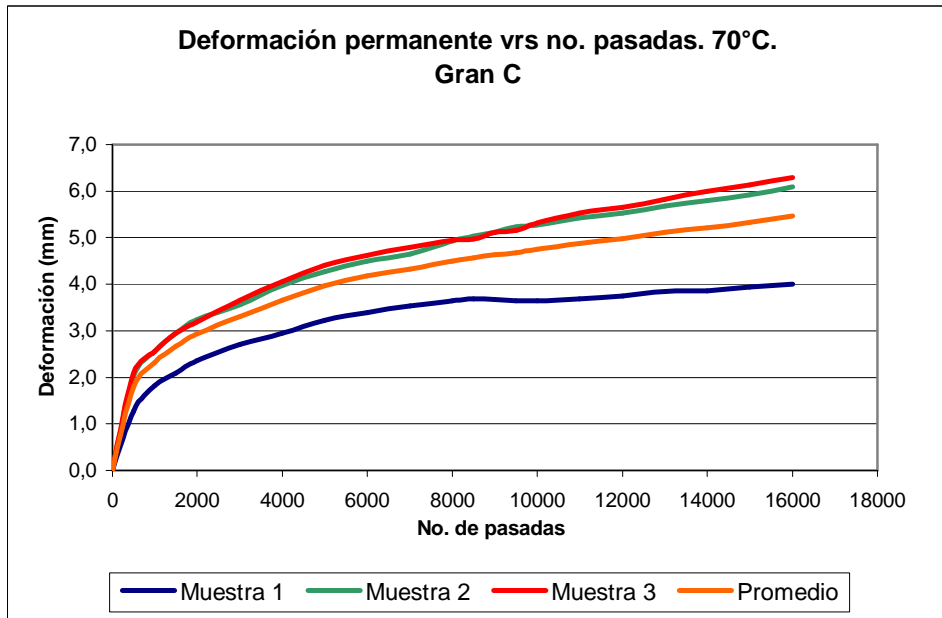
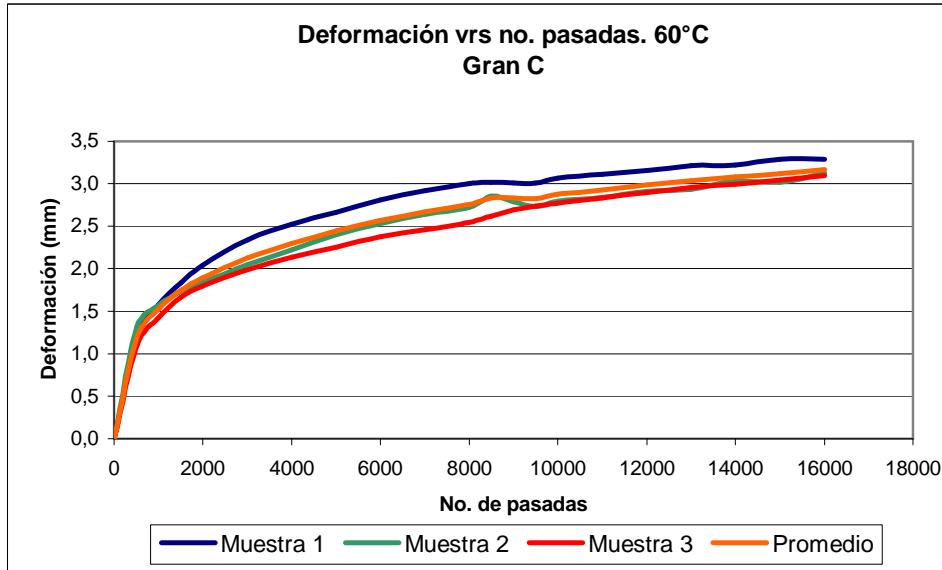


De estos resultados se puede comentar que a la temperatura de 60°C, del primer ciclo al segundo ciclo, se produce un aumento de deformación entre un 10 y un 20%, mientras que para la temperatura de 70°C el aumento varía entre un 11 y un 27%.

Comparando ambas temperaturas, se observa que para el primer ciclo, la deformación a 60°C varía entre un 51 y un 83% de la deformación medida a 70°C, mientras que para el segundo ciclo, el porcentaje varía entre un 39 y un 75%.

En el gráfico No. 4 se observa la variación de la deformación versus el número de pasadas.

Gráfico No. 4: Deformación permanente vrs número de pasadas. Gran C



4.1.3.2 Módulo resiliente

Se realizaron ensayos de módulo resiliente, obtenido mediante la tensión indirecta, para especímenes secos y especímenes condicionados a 60°C por 24 horas. Con estos resultados se obtuvo el porcentaje de módulo resiliente retenido, un indicador para analizar la resistencia de la mezcla al efecto del agua.

Los resultados obtenidos para la mezcla fabricada con la granulometría C y sin fibra de celulosa, se muestran en la Tabla No.21. Los módulos resilientes retenidos se muestran en la Tabla No.22.

Tabla No. 21: Módulo resiliente. Granulometría C

	% Vacíos	Módulo resiliente (MPa) Sin condicionar		Módulo resiliente (MPa) Condicionado	
		Carga 2000N	Carga 3000N	Carga 2000N	Carga 3000N
	22,3	1216	1075	-	-
	23,5	1104	992	-	-
	23,3	960	902	-	-
	24,3	893	773	-	-
	22,6	1066	981	-	-
	23,8	804	779	-	-
	22,0	1668	1465	1027	1085
	22,7	1387	1175	1199	1129
	23,2	1146	1088	983	908
	22,1	1510	1377	1325	1206
	22,5	1379	1296	1202	1077
	23,2	1192	1079	1116	1032
Promedio	22,6	1360	1251	1214	1105
Desv. Est.	0,6	160	154	105	90

Tabla No. 22: Módulos resilientes retenidos. Granulometría C

	carga 2000N	carga 3000N
MRR (%)	89	88

4.1.3.3 Resistencia al efecto del agua

Con el fin de medir la resistencia al efecto del agua de la granulometría C sin fibra, se realizaron los ensayos de compresión uniaxial y resistencia retenida a la tensión diametral. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla No. 23.

Tabla No. 23: Ensayos de resistencia retenida. Gran C sin fibra

Reistencia a la tensión diametral indirecta				
Vacíos	Resistencia seca (MPa)	Vacíos	Resistencia cond. (MPa)	% RTD
21,5	0,57	21,7	0,44	78
21,3	0,55	21,5	0,45	
21,1	0,60	20,5	0,43	
20,1	0,59	20,4	0,49	
Resistencia a la compresión uniaxial retenida				
Vacíos	Resistencia seca (MPa)	Vacíos	Resistencia cond. (MPa)	%RCU
24,5	1,60	21,7	1,30	77
23,2	1,60	21,5	1,30	
23	1,70	20,5	1,30	
23,2	1,80	20,4	1,30	

4.1.4 **Diseño de mezcla Marshall**

Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos del diseño Superpave, se realizó un diseño de mezcla Marshall con la granulometría C sin fibra, con el fin de comparar las principales propiedades volumétricas de la mezcla. Los resultados se muestran en la Tabla No.24.

Tabla No. 24: Comparación de algunas propiedades volumétricas. Metodologías de diseño Marshall y Superpave. Granulometría C

Parámetros	Metodología Marshall	Metodología Superpave
Vacíos de diseño (%)	21%	21%
% asfalto (PTA)	5,7%	5,3%
VMA (%)	29,9	29,4
VFA (%)	29,1	28,6
Escurrecimiento (%)	0,18	0,13

Como se observa en la tabla, las variaciones no son muy grandes entre uno y otro diseño, por lo que se decidió seguir trabajando con los diseños Superpave.

4.2 Segunda etapa

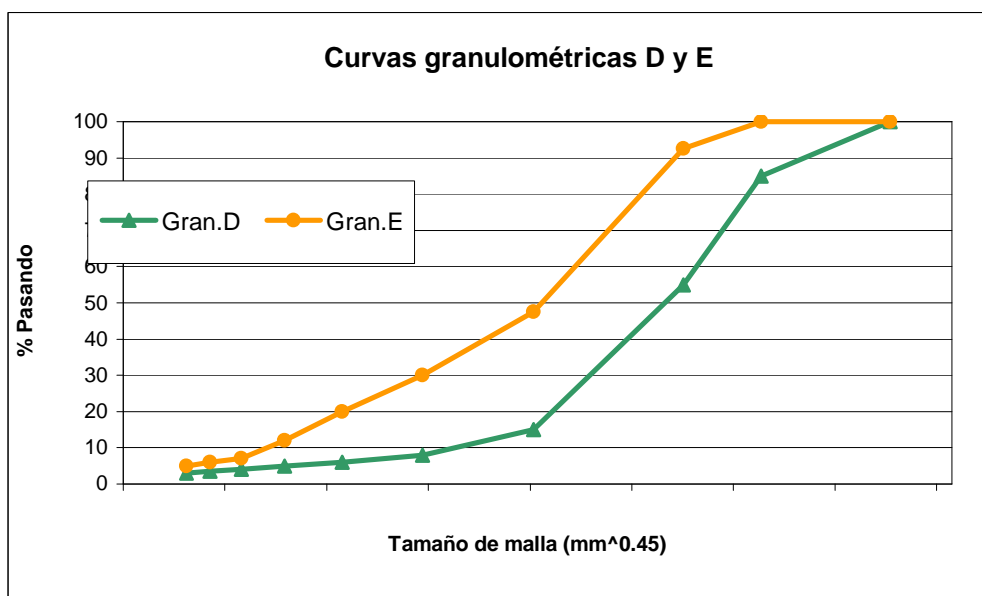
En la segunda etapa se plantearon dos nuevas granulometrías, denominadas para efectos del informe como granulometrías D y E, para hacer los respectivos diseños de mezcla, los cuales incluyen un diseño con fibra de celulosa y otro sin fibra.

En la Tabla No. 25 y en el gráfico No. 5 se presentan las granulometrías D y E.

Tabla No. 25: Granulometrías D y E

Malla #	% Pasando	
	D	E
19 mm	100,0	100,0
12.7 mm	85,0	100,0
9.5 mm	55,0	92,5
N°4	15,0	47,5
N°8	8,0	30,0
N°16	6,0	20,0
N°30	5,0	12,0
N°50	4,0	7,0
N°100	3,5	6,0
N°200	3,0	5,0

Gráfico No. 5: Curvas granulométricas D y E.



En la Tabla No. 26 se presenta el resumen de los diseños de mezcla.

Tabla No. 26: Resumen de los diseños de mezcla realizados con las granulometrías D y E.

Parámetros	D		E	
	Con fibra	Sin fibra	Con fibra	Sin fibra
Vacíos de diseño (%)	21	21	15	13.5
% asfalto (PTA)	5,6	5,1	5,1	5.1
VMA (%)	29,6	28,2	23,0	21.8
VFA (%)	29	28	36	39
Eskurrimiento (%)	0,15	0,20	0.04	0.02

Con la granulometría E no se logró alcanzar los vacíos de diseño, por lo que no se consideró para futuros análisis.

Con el fin de seleccionar entre la granulometría D, con fibra y sin fibra, se hicieron ensayos de desempeño para cada uno de los contenidos de asfalto del diseño, tanto para módulo resiliente como para deformación permanente, medida en laboratorio con la pista de ensayo de Georgia (APA). Los resultados se presentan en las siguientes tablas y gráficos.

De aquí se seleccionó la Gran. D con fibra para evaluar el desempeño para el contenido óptimo de asfalto.

Tabla No. 27: Resultados del ensayo de módulo resiliente para cada punto del diseño de mezcla. Granulometría D sin fibra.

Sin fibra (Granulometría D)					
% Asfalto (PTA)	% Vacíos	Módulo resiliente (MPa) Sin condicionar		Módulo resiliente (MPa) Condicionado	
5,0	19,5	1633	1519	-	-
	21,3	1505	1381	-	-
	21,8	1221	1088	934	879
Promedio	20,9	1453	1329	934	879
Desv. Est.	1,2	211	220	-	-
5,5	20,4	1438	1375	-	-
	20,3	1621	1437	-	-
	22,3	1238	1136	1028	965
Promedio	21,0	1432	1316	1028	965
Desv. Est.	1,1	192	159	-	-
6,0	22,5	1419	1354	-	-
	18,6	1489	1374	-	-
	17,7	1679	1487	1286	1236
Promedio	19,6	1529	1405	1286	1236
Desv. Est.	2,6	135	72	-	-

Tabla No. 28: Resultados del ensayo de módulo resiliente para cada punto del diseño de mezcla. Granulometría D con fibra.

% Asfalto (PTA)	Con fibra				
	% Vacíos	Módulo resiliente (MPa) Sin condicionar		Módulo resiliente (MPa) Condicionado	
5,0	23,5	1131	1064	-	-
	22,6	1367	1247	-	-
	22,6	1505	1400	1103	994
Promedio	22,9	1334	1237	1103	994
Desv. Est.	0,5	189	168	-	-
5,5	20,9	1581	1456	-	-
	20,8	1265	1132	-	-
	20,9	1654	1427	1094	985
Promedio	20,9	1500	1338	1094	985
Desv. Est.	0,1	207	179	-	-
6,0	19,2	1280	1189	-	-
	19,7	1491	1372	-	-
	21,5	1234	1142	865	768
Promedio	20,1	1335	1234	865	768
Desv. Est.	1,2	137	122	-	-

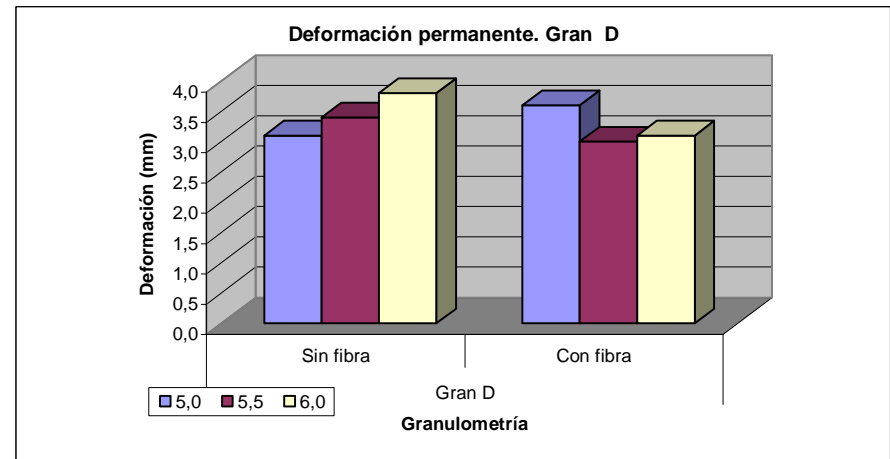
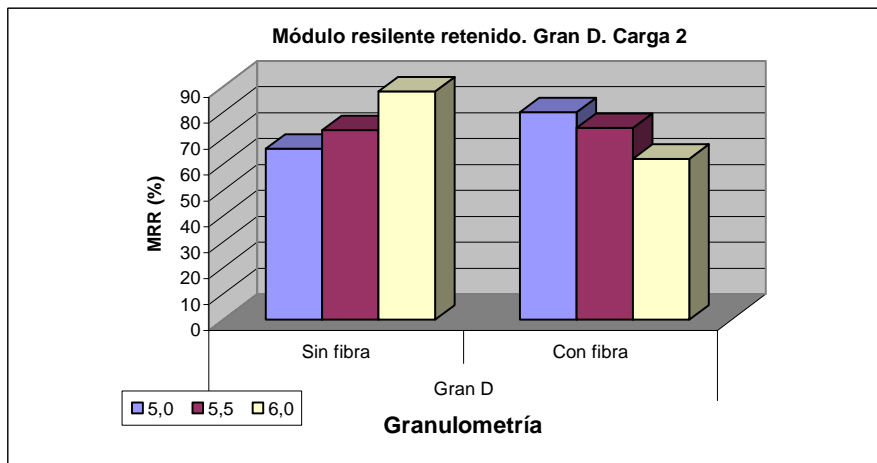
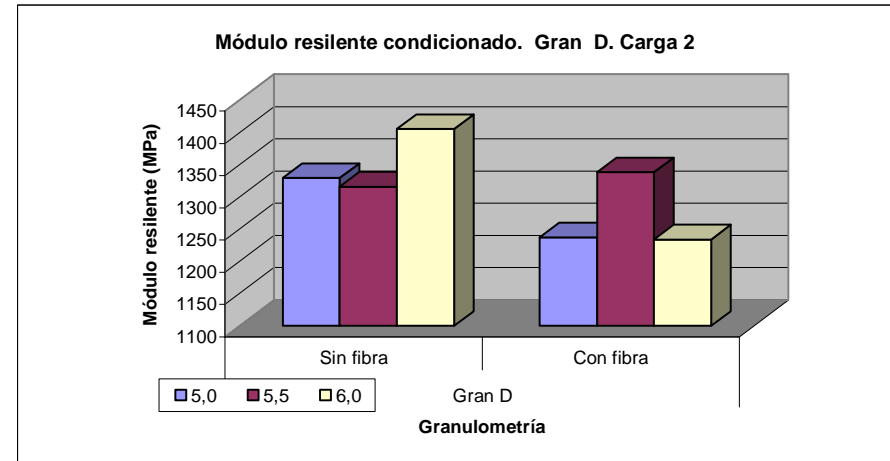
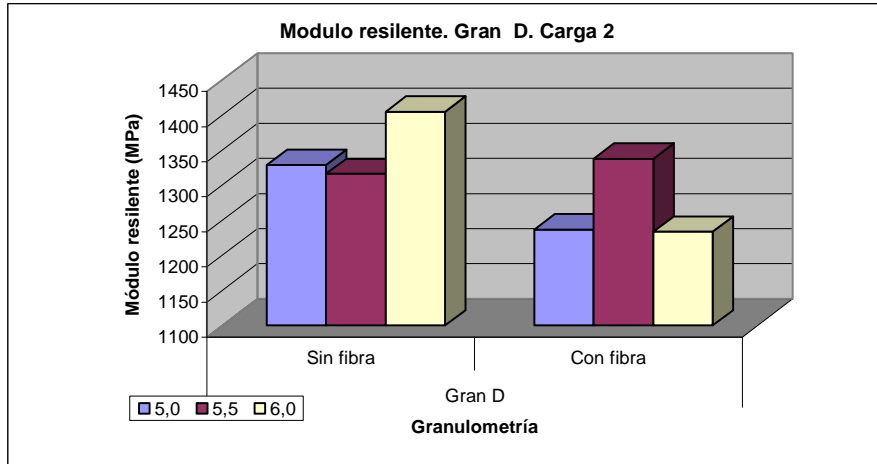
Tabla No. 29: Módulo resiliente retenido, según porcentaje de asfalto. Granulometría D.

% Asfalto (PTA)	MRR (%)			
	Sin fibra		Con fibra	
	Carga 500N	Carga 1000N	Carga 500N	Carga 1000N
5,0	64	66	83	80
5,5	72	73	73	74
6,0	84	88	65	62

Tabla No. 30: Deformación permanente para cada punto del diseño de mezcla. Granulometría D.

% Asfalto (PTA)	Sin fibra (SP-011-04)			Con fibra (SP-012-04)		
	% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Def. (mm)	% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Def.(mm)
5,0	19,5	20,4	3,1	23,5	23,1	3,6
	21,3			22,6		
5,5	20,4	20,4	3,4	20,9	20,9	3,0
	20,3			20,8		
6,0	22,5	20,6	3,8	19,2	19,5	3,1
	18,6			19,7		

Gráfico No. 6: Variación de módulo resiliente y la deformación permanente según el contenido de asfalto. Gran D



4.2.1 Ensayos de desempeño para el contenido óptimo de asfalto. Gran D con fibra

Con el fin de evaluar el desempeño de la gran D con fibra, se realizaron ensayos de deformación permanente a 60 y 70°C para el contenido óptimo de asfalto (5.6% PTA), variando el número de ciclos, ensayos de módulo resiliente y ensayos de resistencia al efecto del agua.

4.2.1.1 Deformación permanente

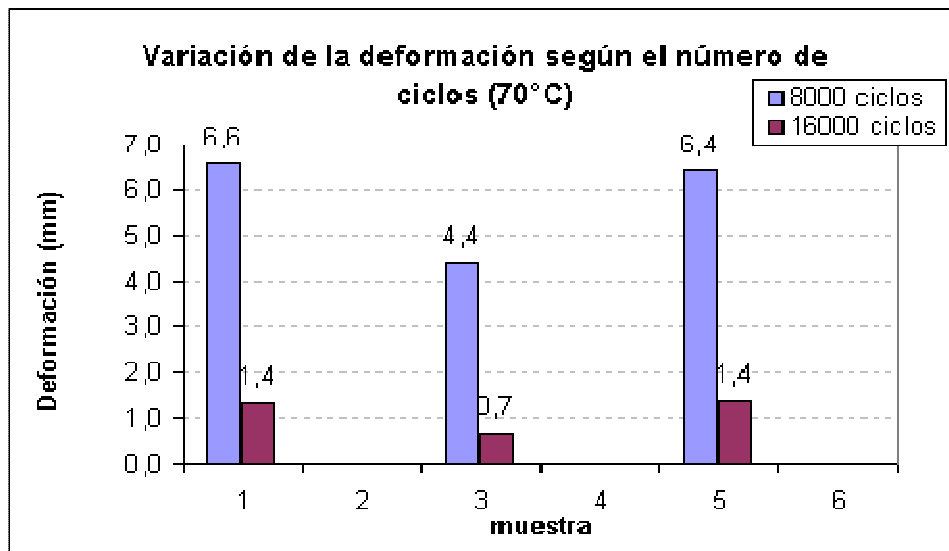
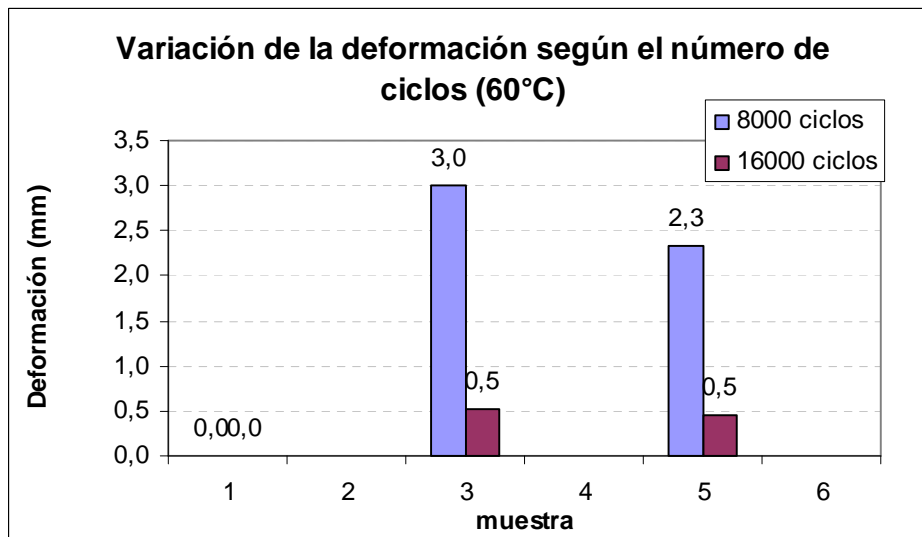
La primera corrida del ensayo se realizó a 8000 ciclos de carga. Una vez concluido el ensayo, los especímenes fueron nuevamente sometidos a otros 8000 ciclos de carga. Esto se realizó a dos distintas temperaturas: 60 y 70°C. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla No. 31 (están pendientes los resultados para 60°C).

Tabla No. 31: Deformación permanente para el contenido óptimo de asfalto.

60°C (Gran D con fibra) Primer ciclo			60°C (Gran D con fibra) Segundo ciclo		
% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deformación (mm)	% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deformación (mm)
26,1	24,8	-	26,1	24,8	-
23,5			23,5		
24,9	24,8	3,0	24,9	24,8	0,5
24,7			24,7		
23,8	23,8	2,3	23,8	23,8	0,5
23,8			23,8		
24,5	-	2,7	24,5	-	0,5
1,0	-	0,5	1,0	-	0,0
70°C (Gran D con fibra) Primer ciclo			70°C (Gran D con fibra) Segundo ciclo		
% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deformación (mm)	% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deformación (mm)
25,1	24,7	6,6	25,1	24,7	1,4
24,3			24,3		
25,1	24,8	4,4	25,1	24,8	0,7
24,4			24,4		
24,6	24,6	6,4	24,6	24,6	1,4
24,5			24,5		
24,7	-	5,8	24,7	-	1,1
0,4	-	1,2	0,4	-	0,4

En el gráfico No.6 se observa la variación de la deformación según el número de ciclos de carga para las temperaturas de 60 y 70°C.

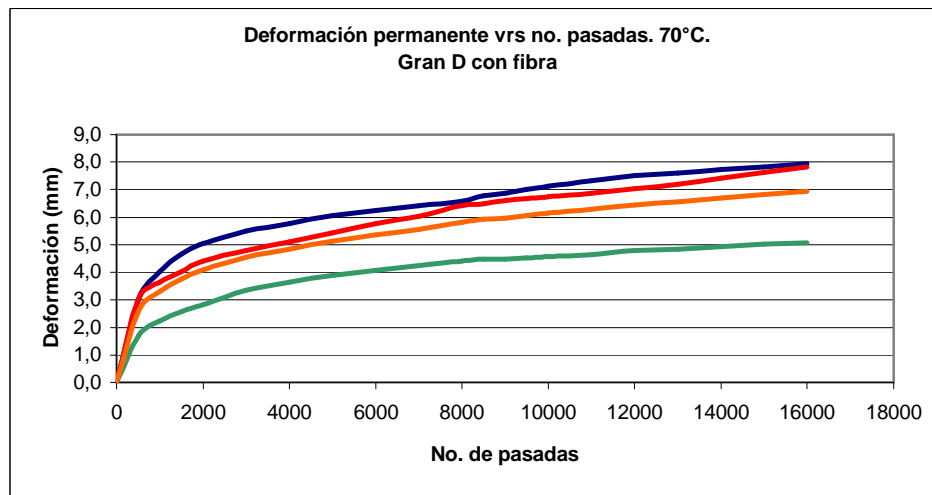
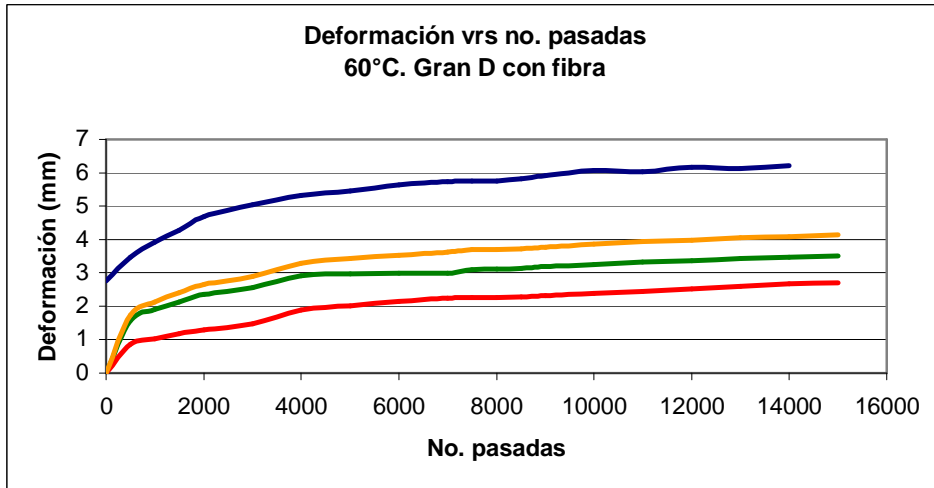
Gráfico No. 7: Variación de la deformación según el número de ciclos. Gran D con fibra.



De estos resultados se puede comentar que para ambas temperatura, del primer ciclo al segundo ciclo, se produce un aumento de deformación entre un 16 y un 22%.

En el gráfico No.8 se observa la variación de la deformación vrs el número de pasadas.

Gráfico No. 8: Deformación permanente vrs número de pasadas. Gran D con fibra.



4.2.1.2 Módulo resiliente

Se realizaron ensayos de módulo resiliente, obtenido mediante la tensión indirecta, para especímenes secos. Los especímenes condicionados no se pudieron ensayar debido a que durante el condicionamiento se deformaron.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla No.32.

Tabla No. 32: Módulos resilientes obtenidos. Gran D con fibra

	% Vacíos	Módulo resiliente (MPa)	
		Sin condicionar	
	25,3	948	705
	24,8	1290	947
	27,1	1023	723
	25,2	1160	916
	24,1	1134	860
	24,6	1010	811
	25,5	1135	921
	24,5	1079	854
	24,2	1030	845
	24,4	1150	888
	24,9	1037	806
	26,5	1139	886
Promedio	25,3	1095	847
Desv. Est.	1,1	92	75

4.2.1.3 Resistencia al efecto del agua

Con el fin de medir la resistencia al efecto del agua de la granulometría D con fibra, se realizaron los ensayos de compresión uniaxial y resistencia retenida a la tensión diametral. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla No. 33.

Tabla No. 33: Ensayos de resistencia retenida. Gran D con fibra

Resistencia a la tensión diametral indirecta*				
Vacíos	Resistencia seca (MPa)	Vacíos	Resistencia cond. (MPa)	% RTD
24,7	0,46	24,3	0,47	83
24,9	0,40	23,7	0,44	
26,4	0,35	23,8	0,53	
25,6	0,36	30,0	0,44	
Resistencia a la compresión uniaxial retenida				
Vacíos	Resistencia seca (MPa)	Vacíos	Resistencia cond. (MPa)	% RCU
24,8	1,2	25,1	0,6	59
25,2	1,2	24,3	0,8	
23,1	1,3	23,7	0,8	
24,4	1,2	24,4	0,7	

4.3 Tercera etapa

En la tercera etapa del proyecto, se incluyó la cal como aditivo. La primera granulometría analizada fue la granulometría C, sin fibra de celulosa.

Los resultados del diseño de mezcla se presentan en la Tabla No.34.

Tabla No. 34: Resultados del diseño de mezcla con cal. Gran. C sin fibra

Vacíos (%)	21,0%
Asfalto (%PTA)	5,0%
VMA (%)	29,3
VFA (%)	28
Densidad (kg/m3)	1955
Escurrimiento (%)	0,03

Se analizó, para cada contenido del asfalto de diseño de mezcla, el módulo resiliente y la deformación permanente a 60°C. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas.

Tabla No. 35: Resultados del ensayo de módulo resiliente para cada punto del diseño de mezcla. Granulometría C + cal.

% Asfalto (PTA)	% Vacíos	Sin fibra (Gran C+cal)			
		Módulo resiliente (MPa) Sin condicionar		Módulo resiliente (MPa) Condicionado	
		Carga 500N	Carga 1000N	Carga 500N	Carga 1000N
5,0	21	2092	1847	-	-
	21,6	1385	1229	-	-
	20,6	2281	1975	2187	1926
Promedio	21,1	1919	1684	2187	1926
Desv. Est.	0,5	472	399	-	-
5,5	20,4	1696	1438	-	-
	19,8	2205	1885	-	-
	20,4	1859	1665	2081	1941
Promedio	20,2	1920	1663	2081	1941
Desv. Est.	0,3	260	224	-	-
6,0	19,4	2013	1649	-	-
	19,8	1836	1499	-	-
	18,9	1808	1581	2206	1830
Promedio	19,4	1886	1576	2206	1830
Desv. Est.	0,5	111	75	-	-

Tabla No. 36: Módulo resiliente retenido, según porcentaje de asfalto. Granulometría C+cal.

% Asfalto (PTA)	MRR (%) Sin fibra	
	Carga 500N	Carga 1000N
	500 N	1500 N
5,0	114	114
5,5	108	117
6,0	117	116

Tabla No. 37: Deformación permanente para cada punto del diseño de mezcla. Granulometría C+cal.

% Asfalto (PTA)	Sin fibra (Gran C+cal)		
	% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deformación (mm)
5,0	21	21,3	3,0
	21,6		
5,5	20,4	20,1	2,8
	19,8		
6,0	19,4	19,6	3,6
	19,8		
Promedio	20,3	-	3,1
Desv. Est	0,8	-	0,4

4.3.1 Ensayos de desempeño para el contenido óptimo de asfalto. Gran C+cal

Con el fin de evaluar el desempeño de la gran C con cal, se realizaron ensayos de deformación permanente a 60 y 70°C para el contenido óptimo de asfalto (5.0% PTA), variando el número de ciclos, ensayos de módulo resiliente, con el fin de obtener el porcentaje de módulo retenido luego de condicionar los especímenes 24 horas a 60° C y ensayos para medir la resistencia al efecto del agua.

4.3.1.1 Deformación permanente

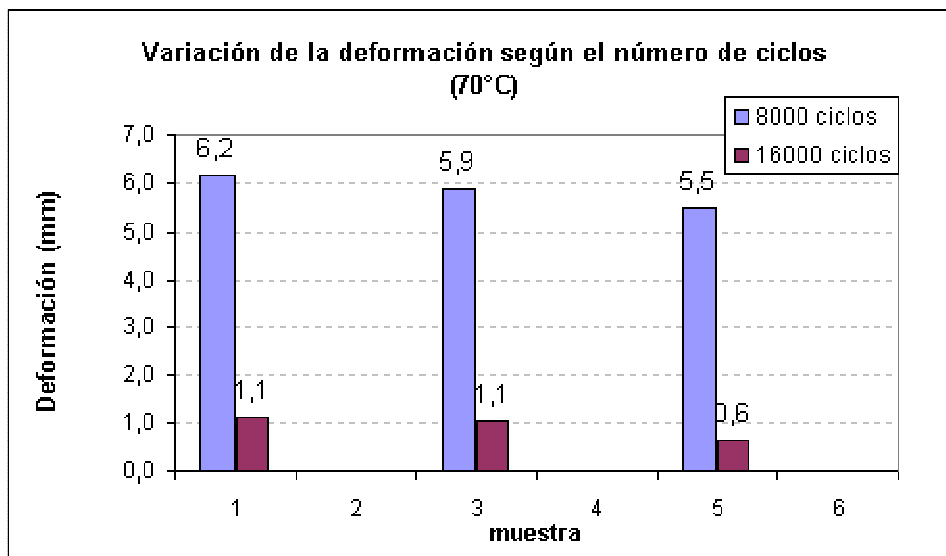
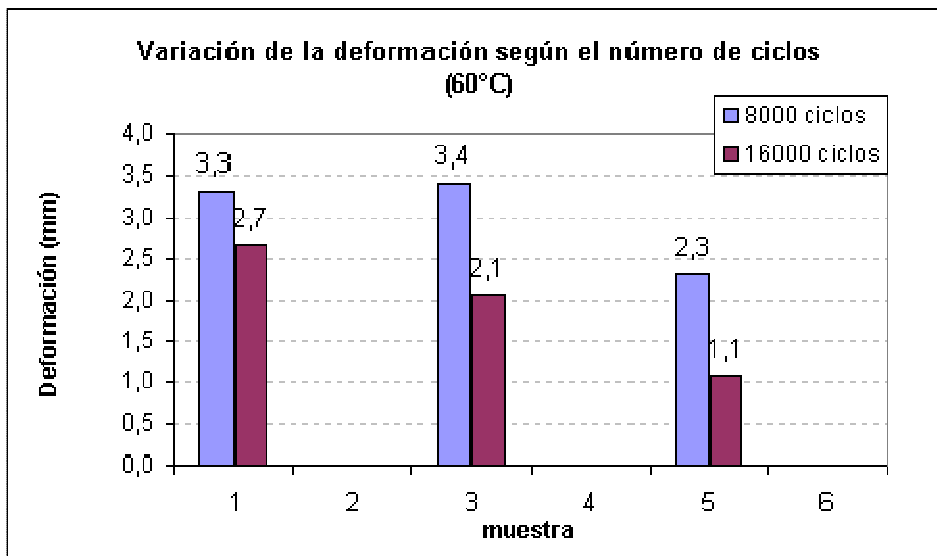
La primera corrida del ensayo se realizó a 8000 ciclos de carga. Una vez concluido el ensayo, los especímenes fueron nuevamente sometidos a otros 8000 ciclos de carga. Esto se realizó a dos distintas temperaturas: 60 y 70°C. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla No. 38 (están pendientes los resultados para 60°C).

Tabla No. 38: Deformación permanente para el contenido óptimo de asfalto.

60°C Primer ciclo			60°C Segundo ciclo		
% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deformación (mm)	% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deformación (mm)
24,6	24,7	3,3	24,6	24,7	2,7
24,7			24,7		
24,3	24,3	3,4	24,3	24,3	2,1
24,3			24,3		
24,2	24,2	2,3	24,2	24,2	1,1
24,2			24,2		
24,4	-	3,0	24,4	-	1,9
0,2	-	0,6	0,2	-	0,8
70°C (SP-0030-04) Primer ciclo			70°C (SP-030-04) Segundo ciclo		
% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deformación (mm)	% Vacíos	Prom. Vacíos (%)	Deformación (mm)
23,6	23,8	6,2	23,6	23,8	1,1
24,0			24,0		
24,6	24,4	5,9	24,6	24,4	1,1
24,1			24,1		
23,9	23,7	5,5	23,9	23,7	0,6
23,5			23,5		
24,0	-	5,8	24,0	-	0,9
0,4	-	0,4	0,4	-	0,3

En el gráfico No 9. se observa la variación de la deformación según el número de ciclos de carga para las temperaturas de 60 y 70°C.

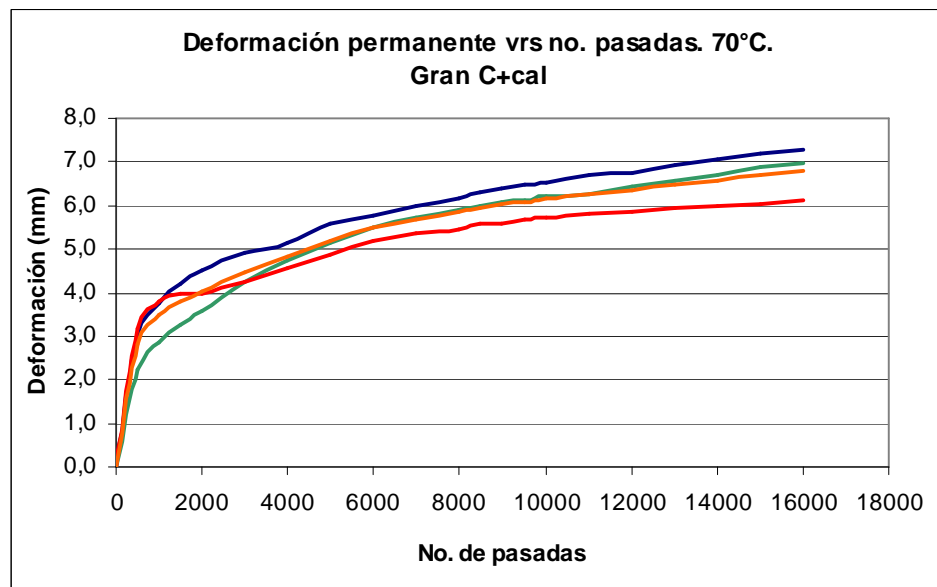
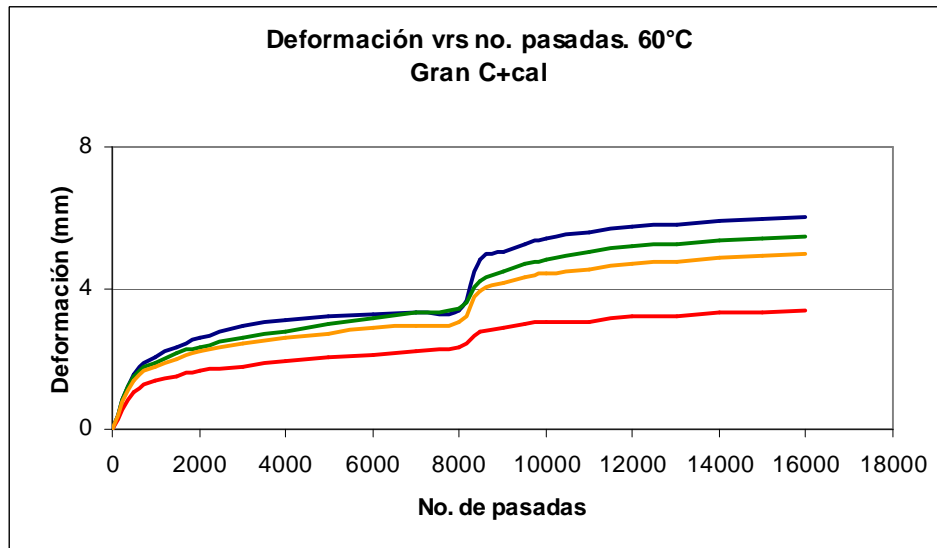
Gráfico No. 9: Variación de la deformación según el número de ciclos. Gran D con fibra.



De estos resultados se puede comentar que a la temperatura de 60°C, del primer ciclo al segundo ciclo, se produce un aumento de deformación entre un 50 y un 80%, mientras que para la temperatura de 70°C el aumento varía entre un 11 y un 19%.

En el gráfico No.10 se observa la variación de la deformación vrs el número de pasadas.

Gráfico No. 10: Deformación permanente vrs número de pasadas. Gran C +cal.



4.3.1.2 Módulo resiliente

Se realizaron ensayos de módulo resiliente, obtenido mediante la tensión indirecta, para especímenes secos y especímenes condicionados a 60°C por 24 horas. Con estos resultados se obtuvo el porcentaje de módulo resiliente retenido, un indicador para analizar la resistencia de la mezcla al efecto del agua.

Los resultados obtenidos para la mezcla fabricada con la granulometría C con cal, se muestran en la Tabla No.39. Los módulos resilientes retenidos se muestran en la Tabla No.40.

Tabla No. 39: Módulo resiliente. Granulometría C con cal

% Vacíos	Módulo resiliente (MPa) Sin condicionar		Módulo resiliente (MPa) Condicionado	
	Carga 500 N	Carga 1500N	Carga 500 N	Carga 1500N
23,6	2104	1568	-	-
24,0	2181	1694	-	-
24,6	1357	1115	-	-
24,1	1592	1351	-	-
23,9	2174	1735	-	-
23,5	1842	1479	-	-
24,1	-	-	1873	1558
24,3	-	-	1742	1464
23,6	-	-	1575	1341
23,7	-	-	1845	1572
23,6	-	-	1782	1398
24,1	-	-	1613	1375
Promedio	23,8	1875	1490	1738
Desv. Est	0,3	342	231	122

Tabla No. 40: Módulo resiliente retenido. Gran C con cal

	carga 500N	carga 1500N
MRR (%)	93	97

4.3.1.3 Resistencia al efecto del agua

Con el fin de medir la resistencia al efecto del agua de la granulometría C con cal, se realizaron los ensayos de compresión uniaxial y resistencia retenida a la tensión diametral. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla No. 41.

Tabla No. 41: Ensayos de resistencia retenida. Gran C con cal

Resistencia a la tensión diametral indirecta*				
Vacíos	Resistencia seca (MPa)	Vacíos	Resistencia cond. (MPa)	% RTD
22,9	0,51	22,4	0,436	85
22,5	0,49	22,7	0,453	
22,4	0,47	22,9	0,366	
22,4	0,52	22,3	0,441	
Resistencia a la compresión uniaxial retenida				
Vacíos	Resistencia seca (MPa)	Vacíos	Resistencia cond. (MPa)	% RCU
25,1	1,1	24,8	1,0	84
24,3	1,1	25,0	1,0	
25,2	1,3	24,3	1,0	
24,9	1,3	25,4	1,0	

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de comparar las granulometrías seleccionadas en cada una de las tres distintas etapas, se realizaron análisis estadísticos al 90% de confianza, para los parámetros de deformación permanente, módulo resiliente y resistencia al efecto del agua. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla No.42.

Tabla No. 42: Resumen de los análisis realizados a las granulometrías C, C con cal y D con fibra.

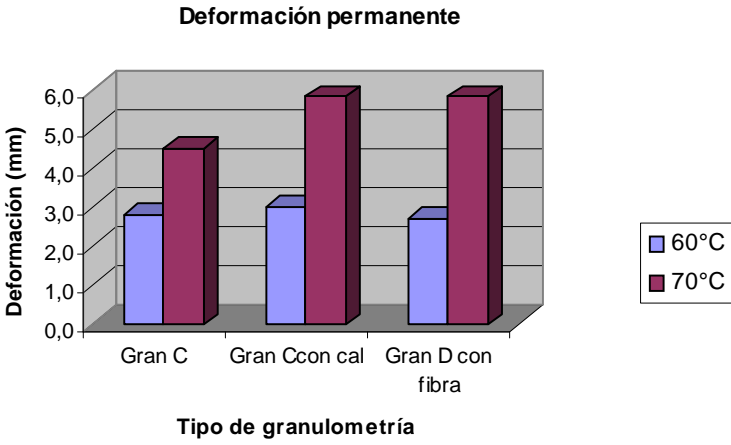
Parámetro	Resultado del análisis estadístico												
<p>Deformación permanente</p>  <table border="1" data-bbox="392 486 1120 933"> <caption>Deformación permanente (mm)</caption> <thead> <tr> <th>Tipo de granulometría</th> <th>60°C</th> <th>70°C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gran C</td> <td>3.0</td> <td>4.8</td> </tr> <tr> <td>Gran C con cal</td> <td>3.3</td> <td>6.1</td> </tr> <tr> <td>Gran D con fibra</td> <td>2.9</td> <td>6.1</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de granulometría	60°C	70°C	Gran C	3.0	4.8	Gran C con cal	3.3	6.1	Gran D con fibra	2.9	6.1	<ul style="list-style-type: none"> - No hay evidencia estadística al 90% de confianza de que la granulometría C determine menores deformaciones permanentes que la gran C con cal.
Tipo de granulometría	60°C	70°C											
Gran C	3.0	4.8											
Gran C con cal	3.3	6.1											
Gran D con fibra	2.9	6.1											

Tabla No.42: Resumen de los análisis realizados a las granulometrías C, C con cal y D con fibra (continuación).

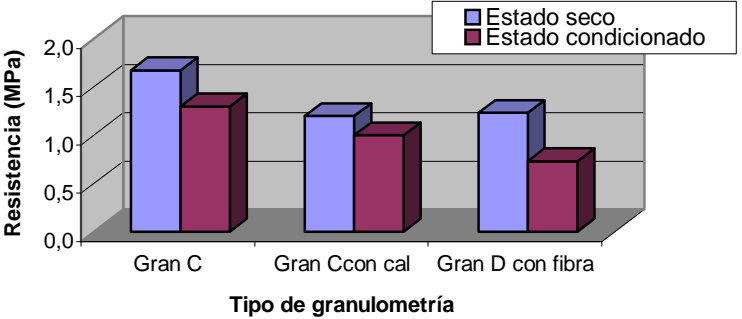
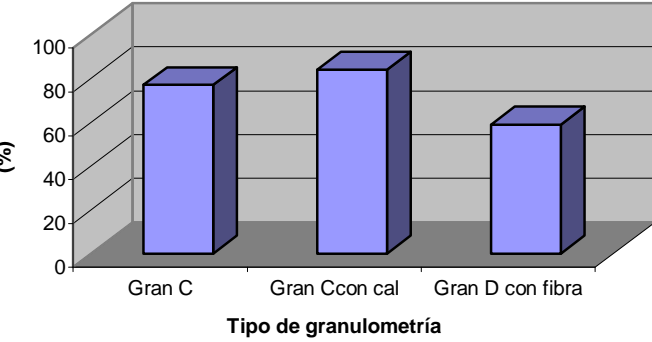
Parámetro	Resultado del análisis estadístico																				
<p>Resistencia al efecto del agua</p> <p style="text-align: center;">Resistencia a la compresión uniaxial</p>  <table border="1" data-bbox="392 534 1131 853"> <caption>Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)</caption> <thead> <tr> <th>Tipo de granulometría</th> <th>Estado seco (MPa)</th> <th>Estado condicionado (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gran C</td> <td>~1.8</td> <td>~1.5</td> </tr> <tr> <td>Gran C con cal</td> <td>~1.4</td> <td>~1.2</td> </tr> <tr> <td>Gran D con fibra</td> <td>~1.4</td> <td>~0.9</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Porcentaje de resistencia a la compresión uniaxial retenida</p>  <table border="1" data-bbox="392 957 1041 1300"> <caption>Porcentaje de resistencia a la compresión uniaxial retenida (%)</caption> <thead> <tr> <th>Tipo de granulometría</th> <th>Resistencia retenida (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gran C</td> <td>~85</td> </tr> <tr> <td>Gran C con cal</td> <td>~95</td> </tr> <tr> <td>Gran D con fibra</td> <td>~70</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de granulometría	Estado seco (MPa)	Estado condicionado (MPa)	Gran C	~1.8	~1.5	Gran C con cal	~1.4	~1.2	Gran D con fibra	~1.4	~0.9	Tipo de granulometría	Resistencia retenida (%)	Gran C	~85	Gran C con cal	~95	Gran D con fibra	~70	<ul style="list-style-type: none"> - Se determinó que las tres diferentes granulometrías (con sus respectivos aditivos) determinan diferencias significativas en la resistencia a la compresión uniaxial. - Al 90% de confianza hay evidencia estadística para afirmar que la granulometría C determina mayores resistencias (secas y condicionadas) que la granulometría C con cal y la gran D con fibra.
Tipo de granulometría	Estado seco (MPa)	Estado condicionado (MPa)																			
Gran C	~1.8	~1.5																			
Gran C con cal	~1.4	~1.2																			
Gran D con fibra	~1.4	~0.9																			
Tipo de granulometría	Resistencia retenida (%)																				
Gran C	~85																				
Gran C con cal	~95																				
Gran D con fibra	~70																				

Tabla No.42: Resumen de los análisis realizados a las granulometrías C, C con cal y D con fibra (continuación).

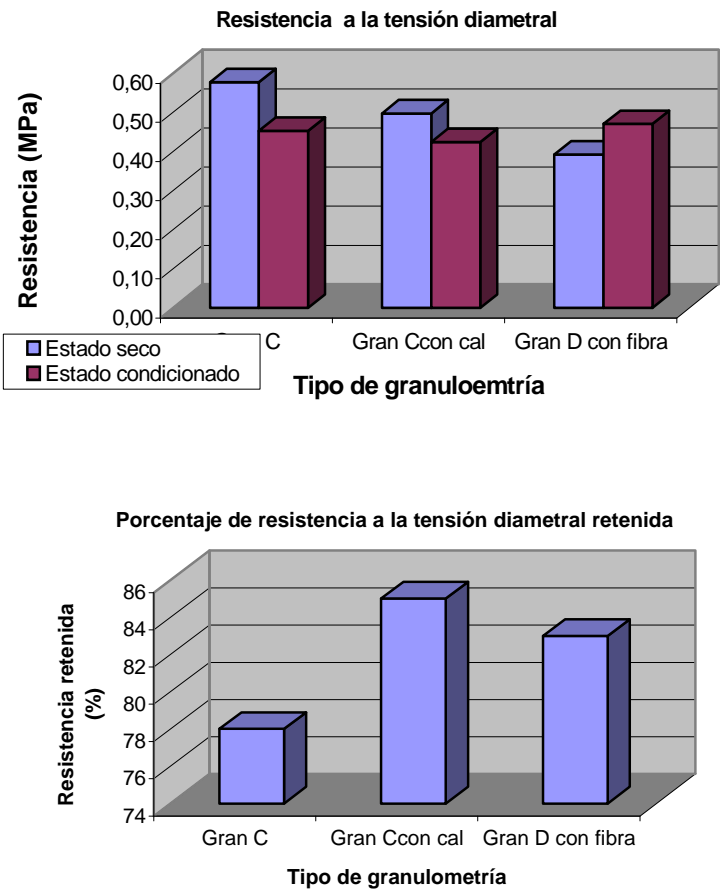
Parámetro	Resultado del análisis estadístico
<p>Resistencia al efecto del agua</p>  <p>Resistencia a la tensión diametral</p> <p>Resistencia (MPa)</p> <p>Estado seco (azul) / Estado condicionado (rojo)</p> <p>Tipo de granulometría: C, Gran C con cal, Gran D con fibra</p> <p>Porcentaje de resistencia a la tensión diametral retenida</p> <p>Resistencia retenida (%)</p> <p>Tipo de granulometría: Gran C, Gran C con cal, Gran D con fibra</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se determinó que las tres diferentes granulometrías (con sus respectivos aditivos) determinan diferencias significativas en la resistencia a la tensión diametral - Al 90% de confianza hay evidencia estadística para afirmar que la granulometría C determina mayores resistencias secas que la granulometría C con cal y la gran D con fibra. - Al 90% de confianza hay evidencia estadística para afirmar que la granulometría D determina mayores resistencias condicionadas que la granulometría C con cal y la gran C.

Tabla No.42: Resumen de los análisis realizados a las granulometrías C, C con cal y D con fibra (continuación).

Parámetro	Resultado del análisis estadístico								
<p data-bbox="271 427 510 459">Modulo resiliente</p> <div data-bbox="360 507 1122 965" style="text-align: center;"> <p>Módulo resiliente</p> <table border="1" style="margin: auto;"> <caption>Data for Módulo resiliente chart</caption> <thead> <tr> <th>Tipo de granulometría</th> <th>Módulo resiliente (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gran C</td> <td>~1150</td> </tr> <tr> <td>Gran C con cal</td> <td>~1550</td> </tr> <tr> <td>Gran D con fibra</td> <td>~950</td> </tr> </tbody> </table> </div>	Tipo de granulometría	Módulo resiliente (MPa)	Gran C	~1150	Gran C con cal	~1550	Gran D con fibra	~950	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="1240 427 1966 571">- Se determinó que las tres diferentes granulometrías (con sus respectivos aditivos) determinan diferencias significativas en el parámetro de módulo resiliente. <li data-bbox="1240 587 1966 730">- Al 90% de confianza hay evidencia estadística para afirmar que la gran C con cal determina mayores módulos que la granulometría C y la granulometría D con fibra
Tipo de granulometría	Módulo resiliente (MPa)								
Gran C	~1150								
Gran C con cal	~1550								
Gran D con fibra	~950								

6. CONCLUSIONES DE LA I FASE

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

- Las granulometrías A y B presentaron mayores deformaciones que la granulometría C. Conforme se aumentaba el porcentaje de asfalto, el aumento en la deformación se hizo más notorio, sobretodo en la granulometría B.
- La Granulometría C presentó una resistencia al efecto del agua algo mayor a lo que establece la normativa nacional para mezclas convencionales (mayor a 75%).
- No se encontró una diferencia significativa en las propiedades volumétricas obtenidas mediante el diseño Superpave y las obtenidas mediante el diseño Marshall.
- Al utilizar mezclas muy finas, no se logra alcanzar el nivel de vacíos de diseño. Mezclas con porcentajes pasando la malla No.4 mayores a 22.5 no dieron buenos resultados.
- La granulometría C con cal ha sido, hasta el momento, la que presentó una mayor resistencia al efecto del agua (84%).

7. BIBLIOGRAFÍA

- Miró R, Pérez, F. Capas de rodadura: Mezclas porosas y microaglomerados en caliente. Universidad politécnica de Cataluña.
- Kandhal P, Mallick R. Open graded asphalt friction course: State of the practice. NCAT Report No.98-7. 1998. USA
- Kandhal P, Mallick R. Design, construction and performance of new generation open graded friction courses. NCAT Report 2000-01. Abril 2000. USA
- Rogge D, Jackson M. Compactation and measurement of field density for Oregon open graded asphalt pavement. Oregon State University. 1999

Índice General

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
FASE I.....	7
3. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	7
3.1 Agregado.....	7
3.2 Ligante asfáltico.....	8
3.3 Aditivos.....	10
3.3.1Fibra de celulosa	10
3.3.2Polímero EGA	11
4. RESULTADOS OBTENIDOS.....	11
4.1 Primera etapa	11
4.1.1Selección de granulometría óptima	11
4.1.2Diseño de mezcla Superpave.....	13
4.1.3Ensayos de desempeño para el contenido óptimo de asfalto. Gran C sin fibra	24
4.1.4Diseño de mezcla Marshall	28
4.2 Segunda etapa	29
4.2.1Ensayos de desempeño para el contenido óptimo de asfalto. Gran D con fibra	35
4.3 Tercera etapa	39
4.3.1Ensayos de desempeño para el contenido óptimo de asfalto. Gran C+cal.....	41
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
6. CONCLUSIONES DE LA I FASE.....	51

Índice de Tablas

Tabla No. 1: Caracterización del agregado	7
Tabla No. 2: Caracterización físico-química del ligante asfáltico.....	8
Tabla No. 3: Caracterización reológica del ligante asfáltico.....	9
Tabla No. 4: Granulometrías ensayadas	12

Tabla No.5:Diseños de mezcla realizados para la selección de la granulometría óptima.....	13
Tabla No. 6: Resultados de los diseños de mezcla Superpave.....	14
Tabla No. 7: Resultados de módulo resiliente sin fibra. Granulometría A.....	15
Tabla No. 8: Resultados de módulo resiliente con fibra. Granulometría A....	16
Tabla No. 9: Resultados de módulo resiliente retenido. Granulometría A.....	16
Tabla No. 10: Resultados de módulo resiliente sin fibra. Granulometría B....	17
Tabla No. 11: Resultados de módulo resiliente con fibra. Granulometría B....	18
Tabla No. 12: Resultados de módulo resiliente retenido. Granulometría B.....	18
Tabla No. 13: Resultados de módulo resiliente sin fibra. Granulometría C....	19
Tabla No. 14: Resultados de módulo resiliente con fibra. Granulometría C...	20
Tabla No. 15: Resultados de módulo resiliente retenido. Granulometría C. ...	20
Tabla No. 16 : Análisis de varianza realizado al 90% de confianza, para módulo resiliente sin condicionar.....	21
Tabla No. 17 : Deformaciones permanentes. Granulometría A.....	21
Tabla No. 18: Deformaciones permanentes. Granulometría B.....	22
Tabla No. 19: Deformaciones permanentes. Granulometría C.....	22
Tabla No. 20. Resultados de deformación permanente. Granulometría C....	24
Tabla No. 21: Módulo resiliente. Granulometría C	27
Tabla No. 22: Módulos resilientes retenidos. Granulometría C	27
Tabla No. 23: Ensayos de resistencia retenida. Gran C sin fibra	28
Tabla No. 24: Comparación de algunas propiedades volumétricas. Metodologías de diseño Marshall y Superpave. Granulometría C	29
Tabla No. 25: Granulometrías D y E	29

Tabla No. 26: Resumen de los diseños de mezcla realizados con las granulometrías D y E.	30
Tabla No. 27: Resultados del ensayo de módulo resiliente para cada punto del diseño de mezcla. Granulometría D sin fibra.	31
Tabla No. 28: Resultados del ensayo de módulo resiliente para cada punto del diseño de mezcla. Granulometría D con fibra.	32
Tabla No. 29: Módulo resiliente retenido, según porcentaje de asfalto. Granulometría D.	32
Tabla No. 30: Deformación permanente para cada punto del diseño de mezcla. Granulometría D.	33
Tabla No. 31: Deformación permanente para el contenido óptimo de asfalto.	35
Tabla No. 32: Módulos resilientes obtenidos. Gran D con fibra	38
Tabla No. 33: Ensayos de resistencia retenida. Gran D con fibra	39
Tabla No. 34: Resultados del diseño de mezcla con cal. Gran. C sin fibra	39
Tabla No. 35: Resultados del ensayo de módulo resiliente para cada punto del diseño de mezcla. Granulometría C + cal.	40
Tabla No. 36: Módulo resiliente retenido, según porcentaje de asfalto. Granulometría C+cal.	40
Tabla No. 37: Deformación permanente para cada punto del diseño de mezcla. Granulometría C+cal.	41
Tabla No. 38: Deformación permanente para el contenido óptimo de asfalto.	42
Tabla No. 39: Módulo resiliente. Granulometría C con cal	45
Tabla No. 40: Módulo resiliente retenido. Gran C con cal	45
Tabla No. 41: Ensayos de resistencia retenida. Gran C con cal	46
Tabla No. 42: Resumen de los análisis realizados a las granulometrías C, C con cal y D con fibra.	47

Índice de gráficos

Gráfico No. 1: Curvas granulométricas	12
Gráfico No. 2: Ensayos de desempeño para las granulometrías A, B y C. Para cada punto de asfalto del diseño.	23
Gráfico No. 3: Variación de la deformación según el número de ciclos. Gran C sin fibra	25
Gráfico No. 4: Deformación permanente vrs número de pasadas. Gran C	26
Gráfico No. 5: Curvas granulométricas D y E.....	30
Gráfico No. 6: Variación de módulo resiliente y la deformación permanente según el contenido de asfalto. Gran D	34
Gráfico No. 7: Variación de la deformación según el número de ciclos. Gran D con fibra.....	36
Gráfico No. 8: Deformación permanente vrs número de pasadas. Gran D con fibra.	37
Gráfico No. 9: Variación de la deformación según el número de ciclos. Gran D con fibra.....	43
Gráfico No. 10: Deformación permanente vrs número de pasadas. Gran C +cal.	44