

## **MEZCLAS DRENANTES**

### **Ing. Laura Ramírez Castro**

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) (hasta julio 2005),

Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,

San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.

Tels: (506) 207-4994, (506) 207-4396.

Fax: (506) 207-4442.

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

Código postal: 2060, Costa Rica

### **Ing. Mario Arce**

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME),

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

### **Ing. Fabián Elizondo**

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME),

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

### **Ing. Mónica Jiménez**

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME),

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

## Resumen

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.

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

Se han probado en laboratorio distintas granulometrías y distintos tipos de materia prima (asfalto y agregado) buscando el mejor desempeño a escala de laboratorio.

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

Hasta el momento se han obtenido buenos resultados en cuanto a resistencia al agua, sin embargo las deformaciones plásticas obtenidas han sido muy similares a las obtenidas con mezclas densas (cerca de los 3 mm), por lo que se continúa investigando cómo disminuir las deformaciones obtenidas. Para esto, se está buscando un agregado mucho más cúbico que el usado originalmente, para ver si el incremento en la trabazón interna mejora la deformación.

## **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.

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 usó 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 hizo empleando la metodología SUPERPAVE, sin embargo, alguno de los diseños también se realizaron mediante la metodología Marshall, para comparar los resultados obtenidos con ambas metodologías.

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

La primera etapa del proyecto se dividió en tres secciones. En la primera sección se seleccionó 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 siguiente sección se definió el contenido óptimo de asfalto por medio de la metodología SUPERPAVE, empleando 100 giros de diseño y se comparó con el contenido óptimo de asfalto obtenido mediante la metodología Marshall, usando 50 golpes por cara.

Una vez seleccionado el porcentaje óptimo de asfalto, se realizaron 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 cantidades 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. El agregado gruesa presenta un gbs de 2.62 y una absorción de 1.7% mientras que el agregado fino presenta un gbs de 2.64 y una absorción de 2.0%.

#### 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). El ligante sin modificar presenta una viscosidad de 4097 Poises a 60°C y de 5472 Poises el ligante modificado.

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 mejorar el desempeño de este<sup>1</sup>.

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

---

<sup>1</sup> Dynasol. Beneficio del uso de copolímeros estireno-butadieno en la modificación de asfaltos.

## 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.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.2 se presentan los resultados de los diseños de mezcla.

**Tabla No. 1: Granulometrías ensayadas**

	Malla									
	19 mm	12.7 mm	9.5 mm	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200
GRAN 1	100	100	75	25	10	8	6,5	5,4	4,6	4
GRAN 2	100	92,5	65	17,5	7,5	6	4,9	4,1	3,4	3
GRAN 3	100	85	55	10	5	4	3,3	2,7	2,3	2

**Tabla No. 2: 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	5,0
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			
Escurrecimiento	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	5,0
Vacíos	25,3	24,4	24,9	23,9
$VCA_{mix}$	37,6	37,7	38,6	38,6
$VCA_{DRC}$	43,1			
Escurrecimiento	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.3.

**Tabla No. 3: 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	<b>0,84</b>	N.A	0.16	<b>0,35</b>	0,13



**Tabla No3 (cont): 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 (%)	21,5	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
Eskurrimiento (%)	0,13	<b>0,35</b>	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
Eskurrimiento (%)	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.

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.

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

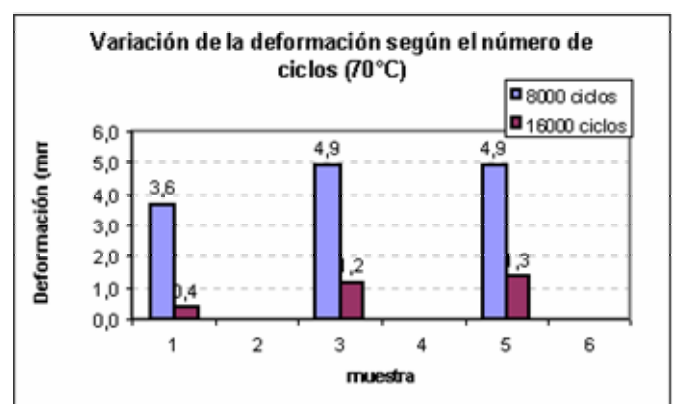
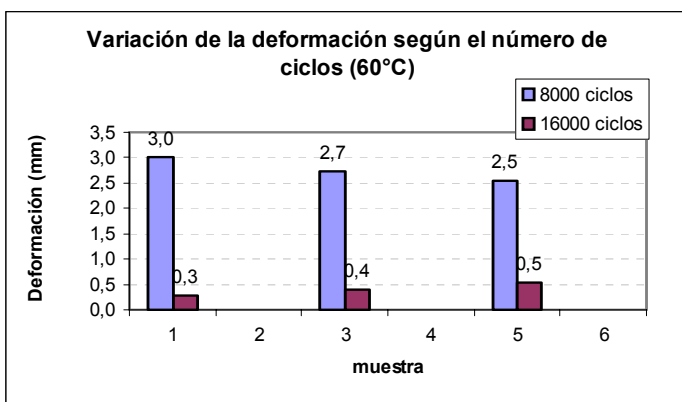
Con el fin de evaluar el desempeño de la mezcla seleccionada (granulometría C sin fibra), se realizaron ensayos de deformación permanente a 60 y 70°C variando el número de ciclos, ensayos de módulo resiliente, y ensayos de resistencia a la compresión uniaxial y resistencia a tensión diametral.

#### 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.

En el gráfico No.1 se observa la variación de la deformación según el número de ciclos de carga para las temperaturas de 60 y 70°C.

**Gráfico No. 1: 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%.

#### 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.4. Los módulos resilientes retenidos se muestran en la Tabla No.5.

**Tabla No. 4: Módulo resiliente. Granulometría C**

	% Vacíos	Módulo resiliente (MPa) Sin condicionar		Módulo resiliente (MPa) Condicionado	
		Carga 2000N	Carga 3000N	Carga 2000N	Carga 3000N
<b>Promedio</b>	22,6	1360	1251	1214	1105
<b>Desv. Est.</b>	0,6	160	154	105	90

**Tabla No. 5: Módulos resilientes retenidos. Granulometría C**

	<b>carga 2000N</b>	<b>carga 3000N</b>
<b>MRR (%)</b>	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. 6.

**Tabla No. 6: Ensayos de resistencia retenida. Gran C sin fibra**

<b>% RTD</b>	78
<b>%RCU</b>	77

#### 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.7.

**Tabla No. 7: Comparación de algunas propiedades volumétricas. Metodologías de diseño Marshall y Superpave. Granulometría C**

<b>Parámetros</b>	<b>Metodología Marshall</b>	<b>Metodología Superpave</b>
Vacios de diseño (%)	21%	21%
% asfalto (PTA)	5,7%	5,3%
VMA (%)	29,9	29,4
VFA (%)	29,1	28,6
Escurrimiento (%)	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. 8 se presentan las granulometrías D y E.

**Tabla No. 8: Granulometrías D y E**

	<b>Malla</b>									
	<b>19 mm</b>	<b>12.7 mm</b>	<b>9.5 mm</b>	<b>N°4</b>	<b>N°8</b>	<b>N°16</b>	<b>N°30</b>	<b>N°50</b>	<b>N°100</b>	<b>N°200</b>
<b>GRAN D</b>	100	85	55	15	8	6	5	4	3,5	3
<b>GRAN E</b>	100	100	92,5	47,5	30	20	12	7	6	5

En la Tabla No. 9 se presenta el resumen de los diseños de mezcla.

**Tabla No. 9: 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
Escurrecimiento (%)	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 laboratorio (APA). De aquí se seleccionó la Gran. D con fibra para evaluar el desempeño para el contenido óptimo de asfalto.

#### **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**

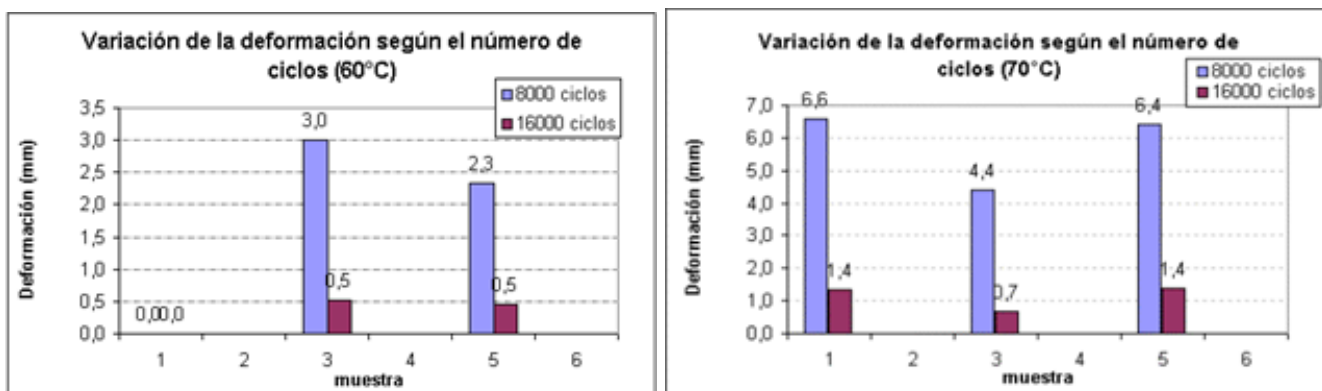
La primera corrida del ensayo se realizó a 8000 ciclos de carga. Una vez concluido el ensayo, los especímenes fueron nuevamente sometidos a otros 8000 ciclos de carga. Esto se realizó a dos distintas temperaturas: 60 y 70°C. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla No. 10

**Tabla No. 10: Deformación permanente para el contenido óptimo de asfalto.**

	60°C Primer ciclo		60°C Segundo ciclo	
	% Vacíos	Deformación (mm)	% Vacíos	Deformación (mm)
<b>Promedio</b>	24,5	2,7	24,5	0,5
<b>Desv. Est</b>	1	0,5	1	0
	70°C Primer ciclo		70°C Segundo ciclo	
	% Vacíos	Deformación (mm)	% Vacíos	Deformación (mm)
<b>Promedio</b>	24,7	5,8	24,7	1,1
<b>Desv. Est</b>	0,4	1,2	0,4	0,4

En el gráfico No.2 se observa la variación de la deformación según el número de ciclos de carga para las temperaturas de 60 y 70°C.

**Gráfico No. 2: 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%.

#### 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.11.

**Tabla No. 11: Módulos resilientes obtenidos. Gran D con fibra**

	% Vacíos	Módulo resiliente (MPa) Sin condicionar	
<b>Promedio</b>	25,3	1095	847
<b>Desv. Est.</b>	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. 12.

**Tabla No. 12: Ensayos de resistencia retenida. Gran D con fibra**

<b>% RTD</b>	83
<b>%RCU</b>	59

#### 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.13.

**Tabla No. 13: 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
Escurrecimiento (%)	0,03

### 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

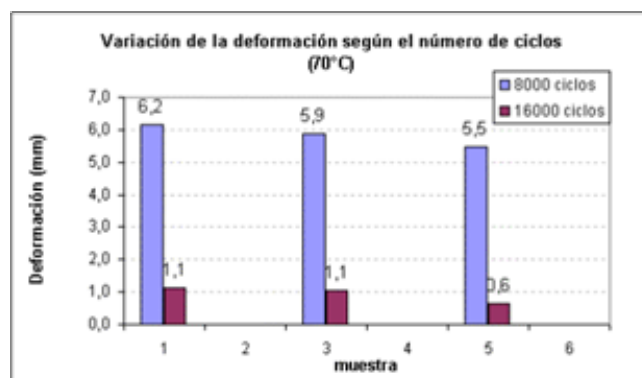
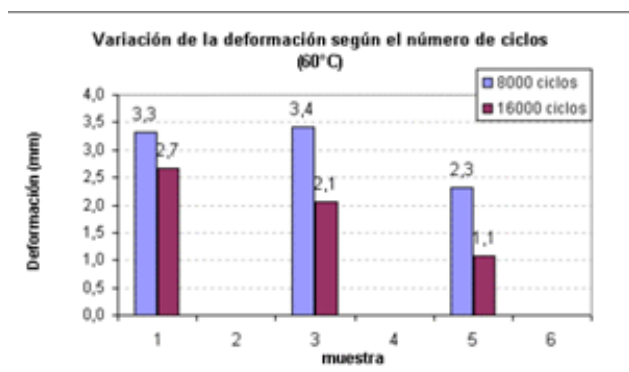
La primera corrida del ensayo se realizó a 8000 ciclos de carga. Una vez concluido el ensayo, los especímenes fueron nuevamente sometidos a otros 8000 ciclos de carga. Esto se realizó a dos distintas temperaturas: 60 y 70°C. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla No. 14

**Tabla No. 14: Deformación permanente para el contenido óptimo de asfalto.**

	60°C Primer ciclo		60°C Segundo ciclo	
	% Vacíos	Deformación (mm)	% Vacíos	Deformación (mm)
<b>Promedio</b>	24,4	3	24,4	1,9
<b>Desv. Est</b>	0,2	0,6	0,2	0,8
	70°C Primer ciclo		70°C Segundo ciclo	
	% Vacíos	Deformación (mm)	% Vacíos	Deformación (mm)
<b>Promedio</b>	24	5,8	24	0,9
<b>Desv. Est</b>	0,4	0,4	0,4	0,3

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 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%.

#### 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.15. Los módulos resilientes retenidos se muestran en la Tabla No.16.

**Tabla No. 15: 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
<b>Promedio</b>	23,8	1875	1490	1738	1451
<b>Desv. Est</b>	0,3	342	231	122	97

**Tabla No. 16: Módulo resiliente retenido. Gran C con cal**

	Carga 500N	Carga 1500N
<b>MRR (%)</b>	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. 17.

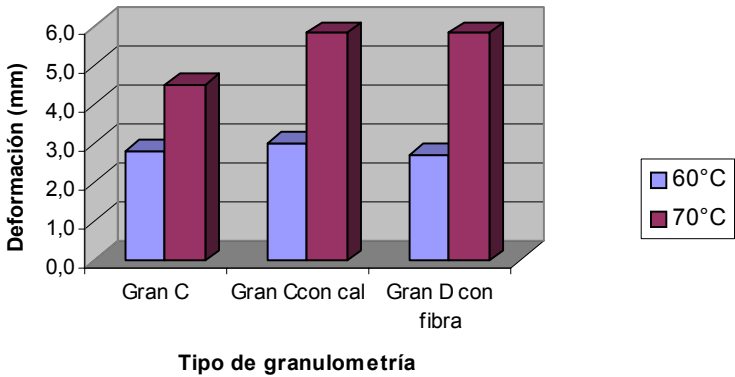
**Tabla No. 17: Ensayos de resistencia retenida. Gran C con cal**

<b>% RTD</b>	85
<b>%RCU</b>	84

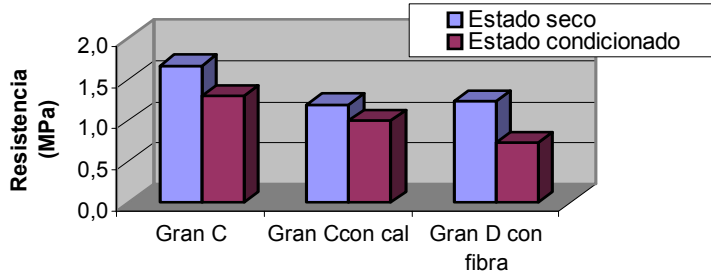
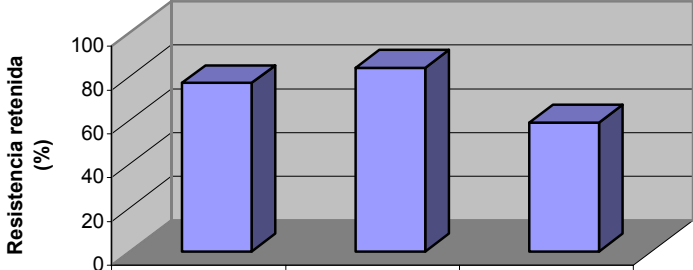
**5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

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.18.

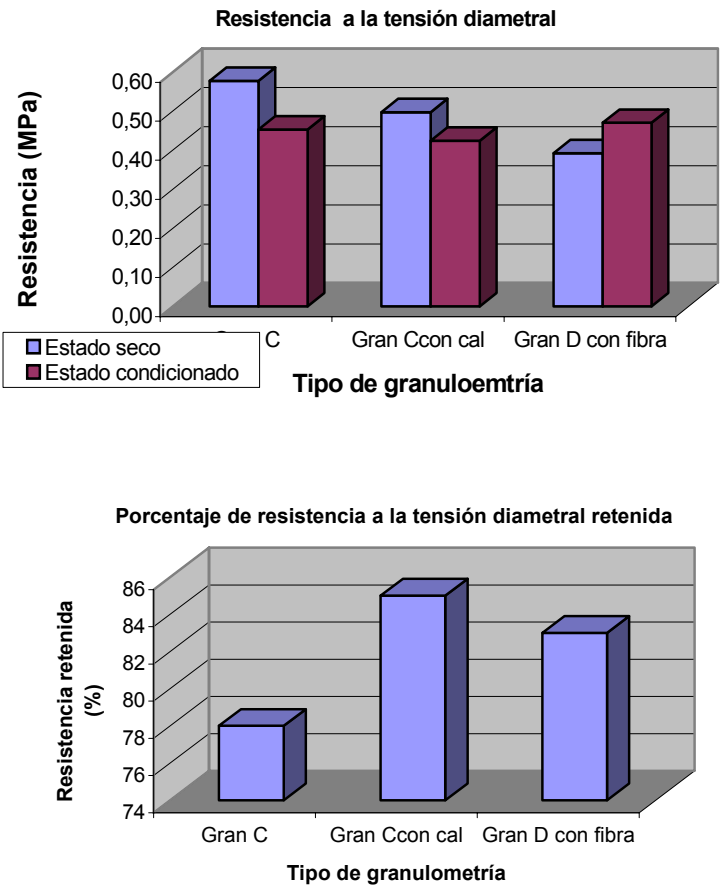
**Tabla No. 18: Resumen de los análisis realizados a las granulometrías C, C con cal y D con fibra.**

Parámetro	Resultado del análisis estadístico
<p style="text-align: center;"><b>Deformación permanente</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>Deformación permanente</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No hay evidencia estadística al 90% de confianza de que la granulometría C determine menores deformaciones permanentes que la gran C con cal.</li> </ul>

**Tabla No.18: 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="271 411 658 443">Resistencia al efecto del agua</p> <div data-bbox="414 483 1122 845"> <p data-bbox="524 483 891 507">Resistencia a la compresión uniaxial</p>  <table border="1" data-bbox="414 526 1122 798"> <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>~1.4</td> </tr> <tr> <td>Gran C con cal</td> <td>~1.3</td> <td>~1.1</td> </tr> <tr> <td>Gran D con fibra</td> <td>~1.4</td> <td>~0.9</td> </tr> </tbody> </table> </div> <div data-bbox="353 911 1043 1289"> <p data-bbox="412 911 981 935">Porcentaje de resistencia a la compresión uniaxial retenida</p>  <table border="1" data-bbox="353 949 1043 1220"> <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>~92</td> </tr> <tr> <td>Gran D con fibra</td> <td>~68</td> </tr> </tbody> </table> </div>	Tipo de granulometría	Estado seco (MPa)	Estado condicionado (MPa)	Gran C	~1.8	~1.4	Gran C con cal	~1.3	~1.1	Gran D con fibra	~1.4	~0.9	Tipo de granulometría	Resistencia retenida (%)	Gran C	~85	Gran C con cal	~92	Gran D con fibra	~68	<ul data-bbox="1144 411 1966 790" style="list-style-type: none"> <li>- Se determinó que las tres diferentes granulometrías (con sus respectivos aditivos) determinan diferencias significativas en la resistencia a la compresión uniaxial.</li> <li>- 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.</li> </ul>
Tipo de granulometría	Estado seco (MPa)	Estado condicionado (MPa)																			
Gran C	~1.8	~1.4																			
Gran C con cal	~1.3	~1.1																			
Gran D con fibra	~1.4	~0.9																			
Tipo de granulometría	Resistencia retenida (%)																				
Gran C	~85																				
Gran C con cal	~92																				
Gran D con fibra	~68																				

**Tabla No.18: 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><b>Resistencia a la tensión diametral</b></p> <table border="1"> <caption>Resistencia a la tensión diametral (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>~0,60</td> <td>~0,50</td> </tr> <tr> <td>Gran C con cal</td> <td>~0,52</td> <td>~0,46</td> </tr> <tr> <td>Gran D con fibra</td> <td>~0,42</td> <td>~0,51</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Porcentaje de resistencia a la tensión diametral retenida</b></p> <table border="1"> <caption>Porcentaje de resistencia a la tensión diametral retenida (%)</caption> <thead> <tr> <th>Tipo de granulometría</th> <th>Resistencia retenida (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gran C</td> <td>~78,5</td> </tr> <tr> <td>Gran C con cal</td> <td>~85,5</td> </tr> <tr> <td>Gran D con fibra</td> <td>~83,5</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de granulometría	Estado seco (MPa)	Estado condicionado (MPa)	Gran C	~0,60	~0,50	Gran C con cal	~0,52	~0,46	Gran D con fibra	~0,42	~0,51	Tipo de granulometría	Resistencia retenida (%)	Gran C	~78,5	Gran C con cal	~85,5	Gran D con fibra	~83,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se determinó que las tres diferentes granulometrías (con sus respectivos aditivos) determinan diferencias significativas en la resistencia a la tensión diametral</li> <li>- 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.</li> <li>- 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.</li> </ul>
Tipo de granulometría	Estado seco (MPa)	Estado condicionado (MPa)																			
Gran C	~0,60	~0,50																			
Gran C con cal	~0,52	~0,46																			
Gran D con fibra	~0,42	~0,51																			
Tipo de granulometría	Resistencia retenida (%)																				
Gran C	~78,5																				
Gran C con cal	~85,5																				
Gran D con fibra	~83,5																				

**Tabla No.18: 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="271 411 488 443">Modulo resilente</p> <div data-bbox="360 485 1122 948" style="text-align: center;"> <p><b>Módulo resilente</b></p> <table border="1" style="margin: 0 auto;"> <caption>Data for Resilient Modulus Chart</caption> <thead> <tr> <th>Tipo de granulometría</th> <th>Módulo resilente (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gran C</td> <td>~1200</td> </tr> <tr> <td>Gran C con cal</td> <td>~1600</td> </tr> <tr> <td>Gran D con fibra</td> <td>~1000</td> </tr> </tbody> </table> </div>	Tipo de granulometría	Módulo resilente (MPa)	Gran C	~1200	Gran C con cal	~1600	Gran D con fibra	~1000	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="1240 411 1966 590">– Se determinó que las tres diferentes granulometrías (con sus respectivos aditivos) determinan diferencias significativas en el parámetro de módulo resilente.</li> <li data-bbox="1240 606 1966 790">– 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</li> </ul>
Tipo de granulometría	Módulo resilente (MPa)								
Gran C	~1200								
Gran C con cal	~1600								
Gran D con fibra	~1000								

## 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.

