

EFFECTO DE LA GRANULOMETRÍA Y FIBRA EN EL DESEMPEÑO DE LAS MEZCLAS DRENANTES EN COSTA RICA

INFORME FINAL

Preparado por

Programa de Investigación en Infraestructura Vial

Ing. Mónica Jiménez Acuña

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.

Tel: (506) 207-4965.

Fax: (506) 207-4440.

E-mail: mjimenez@lanamme.ucr.ac.cr

Código postal: 2060, Costa Rica

Ing. Donath Mrawira, Phd

Profesor asociado y Director de DC Campbell for Highway Construction and Pavement Research
Universidad de New Brunswick, Fredericton, NB, Canada. E3B 5A3.

Tel: (506) 453-4976

Fax : (506) 453-3568.

E-mail: donath@unb.ca

San José, Costa Rica

Agosto 2007

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABLAS	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT.....	vi
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes.....	3
Objetivos.....	6
Alcance	6
Metodología de investigación	7
CAPÍTULO 2.....	10
CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	10
Ligante asfáltico	10
Agregado.....	14
Aditivos	15
Polímero EGA	15
Fibra de celulosa	16
Cal.....	17
CAPÍTULO 3	18
DISEÑOS DE MEZCLA PARA LAS MEZCLAS DRENANTES.....	18
Escogencia de la granulometría óptima.....	18
Escogencia del asfalto óptimo, Diseño Superpave.....	19
Fase 1: Tres granulometrías sin fibra y con 0.5% de fibra de celulosa	19
Fase 2: Una granulometría adicional y la modificación de las mezclas con 2% de cal...21	
CAPÍTULO 4	24
DESEMPEÑO DE LAS MEZCLAS DRENANTES PARA EL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO	24
Comparación de la deformación permanente para las cuatro granulometrías24	
Comparación del módulo resiliente a tensión diametral para las cuatro granulometrías y establecer el Índice de Rigidez Retenida (IRR).....	28

CAPÍTULO 5	33
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	33
Conclusiones	34
Recomendaciones	35
REFERENCIAS	37
BIBLIOGRAFÍA	38
APÉNDICE A	A-1
APÉNDICE B	B-1
APÉNDICE C	C-1
APÉNDICE D	D-1

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del plan de ensayos.	9
Figura 2. Presentación del polímero utilizado para modificar el ligante asfáltico.....	15
Figura 3. Presentación de la fibra de celulosa utilizada para estabilizar la mezcla.	16
Figura 4. Presentación de la cal utilizada pasada por el tamiz 0.075 μm (N ^o 200).	17
Figura 5. Distribución granulométrica de GA, GB y GC.	20
Figura 6. Distribución granulométrica de GD de la segunda fase.	22
Figura 7. Promedio de la deformación permanente para todas las combinaciones experimentales.	25
Figura 8. Deformación permanente para las cuatro granulometrías, tres aditivos, dos temperaturas y dos ciclos.....	27
Figura 9. Módulo resiliente a tensión diametral para las cuatro granulometrías, tres aditivos, dos estados y dos cargas.	29
Figura 10. Módulo resiliente para las cuatro granulometrías, tres aditivos, dos acondicionamientos y dos cargas.	31
Figura 11. Índice de Rigidez Retenida (IRR) para todas las mezclas y la especificación mínima.	32

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización físico-química del ligante asfáltico original.	11
Tabla 2. Caracterización físico-química del ligante asfáltico modificado con 1.5% de EGA.....	12
Tabla 3. Caracterización por grado de desempeño Superpave para el ligante original.	13
Tabla 4. Caracterización por grado de desempeño Superpave para el ligante modificado.....	13
Tabla 5. Caracterización física del agregado utilizado.....	14
Tabla 6. Resumen de las propiedades volumétricas para las granulometrías de prueba.	18
Tabla 7. Resumen de las propiedades volumétricas para las granulometrías A, B y C.	20
Tabla 8. Resumen de las propiedades volumétricas para las granulometrías A, B, C y D.	22
Tabla 9. ANOVA de 4 factores para los datos de deformación permanente ($\alpha = 5\%$)...	26
Tabla 10. ANOVA de 4 factores para los datos de módulo resiliente ($a = 5\%$).	30

RESUMEN

En Costa Rica, la estación lluviosa dura aproximadamente 8 meses, esto causa grandes problemas de seguridad vial para el tránsito en las carreteras principales, produciéndose una baja resistencia a la fricción, pérdida de visibilidad incluso en el día debido a que el tráfico pesado produce mucho spray. Debido al éxito en el desempeño de las mezclas drenantes en otros países, este tipo de mezclas fueron evaluadas en el laboratorio para determinar las propiedades ingenieriles adecuadas, con el objetivo de introducir el uso de este tipo de mezclas en la tecnología de pavimentos costarricense. Se realizó un diseño experimental factorial completo que consistió en la evaluación de 4 granulometrías con una fuente de agregado típico y tres niveles de fibra (sin fibra, 0.5% fibra y 2% de cal). Todas las mezclas se diseñaron con el método Superpave y con el compactador giratorio con 100 giros, utilizando el asfalto AC-30 modificado con 1.5% de un polímero.

El desempeño de la mezcla se evaluó con ensayos en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) a dos temperaturas y con ensayos de módulo resiliente a tensión diametral en especímenes sin acondicionar y también en especímenes acondicionados con un ciclo de humedecido.

Basados en los resultados, se demostró que el agregado, 0.5% de fibra y 2% de cal presentaron la menor deformación permanente y el mayor Índice de Rigidez Retenido, el cual es un buen indicador de la durabilidad de las mezclas drenantes. Los resultados demostraron que el uso de 2% de cal fue estadísticamente significativo en el módulo resiliente y en la resistencia a la deformación permanente de las mezclas drenantes. En general, 2% de cal fue más beneficioso para la mezcla comparado con el 0.5% de fibra de celulosa. Los cambios pequeños en la granulometría, aún tan pequeños como $\pm 2.5\%$ en el porcentaje retenido en el tamiz 4.75 mm (Nº 4), tuvieron un efecto significativo estadísticamente sobre la resistencia a la deformación permanente y en el módulo resiliente de las mezclas drenantes.

ABSTRACT

In Costa Rica the rainy season lasts approximately 8 months. This causes a serious safety problem in the principal highways due to hydroplaning and loss of visibility resulting from excessive water splash from heavy traffic. Open graded friction course (OGFC) mixes have been proposed in other countries to deal with this safety problem. This paper conducts laboratory evaluation of OGFC mixes to determine their suitability and assess engineering properties required to introduce these type mixes in Costa Rican pavement technology. The paper outlines Phase I of a larger investigation aimed at understanding performance of OGFC mixes in Costa Rica. In this phase, a full factorial experiment consisting of four gradations of a typical aggregate source, and three levels of fiber (no fiber, 0.5% of pellet cellulose fiber and 2% of lime) were evaluated. The mix designed was carried out according to SUPERPAVE at 100 gyrations using a typical Costa Rican asphalt binder (AC-30) modified with 1.5% of polymer. The mix performance was evaluated using the Asphalt Pavement Analyzer (APA) at two temperatures, and by the resilient modulus indirect tension test on conditioned/unconditioned specimens. The results obtained showed that the aggregate source, 0.5% fiber and 2% lime presented the lower permanent deformation and the highest Index of Retained Stiffness, which is a good indicator of the durability of the wearing course. The paper demonstrated that the use of 2% lime had statistically significant effect on both resilient modulus and resistance to permanent deformation of the OGFC mixes. Generally speaking, 2% lime was more beneficial to the mix compared to the use of 0.5% cellulose fiber. Small changes in the aggregate gradation, even as small as $\pm 2.5\%$ retained on the 4.75 mm sieve, were found to have statistically significant effects on both rut resistance and resilient modulus of OGFC mixes.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Varios departamentos de transporte de estado (DOT) de los Estados Unidos han utilizado las mezclas drenantes desde los años 50 (1).

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 (rango de 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 filler entre 2 y 5% y deben ser mezclas con altos porcentajes de agregado grueso (alrededor del 85%) (2). En mezclas convencionales, hay entre un 35 y un 50% de agregados de tamaño inferior a 2 ó 2.5 mm, mientras que en mezclas drenantes se reduce a un 10 ó 15%, o incluso a porcentajes menores si se desea conseguir vacíos mayores al 25%.

La combinación granulométrica de los agregados les otorga a estas mezclas las siguientes ventajas (3):

- *Eliminación del hidropilaje:* 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 hidropilaje.
- *Mayor resistencia al deslizamiento sobre pavimentos húmedos:* las capas de rodadura drenantes presentan una superficie lisa, sin ondulaciones, 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 del “splash” 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 la 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.

- *Poca durabilidad por pérdida de partículas:* El alto porcentaje de vacíos de estas mezclas puede favorecer la acción 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 baja adhesividad entre el agregado y el ligante.

- *Rápida 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 18% 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.

Antecedentes

Se realizó una investigación bibliográfica, con el fin de establecer cómo ha sido la experiencia internacional con respecto a la aplicación de las mezclas drenantes como tecnología de pavimentación, desde el punto de vista de diseño de mezcla y de desempeño. Luego de revisar varias fuentes de información, se encontró que dos artículos resumen de una manera muy práctica este objetivo. En el **Apéndice A** se han traducido ciertas partes de dos referencias importante para esta investigación.

Históricamente, el uso de pavimentos con mezclas drenantes se inició por la necesidad de evitar el deslizamiento en pavimentos húmedos, seguido de los beneficios

en el confort de los conductores y luego por la reducción del ruido. Las buenas experiencias llevaron a un aumento en el uso de estas mezclas durante los años ochentas, hubo un receso en los años noventas en algunos países, cuando los problemas con el mantenimiento durante el invierno y la durabilidad se convirtieron en un problema práctico (4).

Resumiendo acerca de la experiencia internacional, para evitar la pérdida de partículas de las mezclas drenantes, se debe evitar el uso de agregados gruesos en países con condiciones húmedas como el Reino Unido (mezclas tipo 0/20 mm mezclas) y algunas partes de Holanda (mezclas tipo 0/16 mm mezclas). El desarrollo en general es hacia mezclas más finas con contenidos de asfalto mayores (mezclas 0/8 mm y 0/6 mm) con contenidos de vacíos entre 22-30%. En general, todos los países exponen que la pérdida de partículas es un serio problema, pero por ejemplo, Francia manifiesta que la durabilidad de mezclas drenantes bien diseñadas es igual que la de una mezcla convencional (mezclas densas) (4).

Otro problema declarado por el Reino Unido es lo costoso de usar agregados de tan alta calidad debido al espesor aplicado de las capas de mezclas drenantes. Esto apunta hacia el uso de mezclas más finas en capas más delgadas así como capas dobles de mezclas drenantes o como capas individuales (4).

La mayoría de países recomiendan el uso de asfaltos modificados desde el punto de vista de diseño de mezcla y declaran el posible efecto en el espesor de la capa de recubrimiento sobre los agregados en un mayor contenido de asfalto y en una mejor resistencia al envejecimiento. Francia y Holanda, considerando el desempeño real en el campo, encuentran una falta de datos que prueben una mejor durabilidad de las mezclas drenantes con asfaltos modificados con polímeros, pero se puede reconocer que la alta rigidez inicial del asfalto puede reducir el daño en los primeros meses, que puede ser de importancia vital para evitar el inicio de la pérdida de partículas. Las mezclas muy finas (tipo 0/6 mm) como las de Francia, son modificadas en altas cantidades pues son extremadamente sensibles a los esfuerzos horizontales (y por consiguiente a la pérdida de partículas). La experiencia japonesa demuestra que es

posible utilizar contenidos de SBS de hasta 9-12%, pero es muy importante que el polímero esté bien homogenizado. A estas concentraciones tan altas de polímero el asfalto se puede considerar como un asfalto sintético (4).

Un efecto importante del uso del asfalto modificado es el alto contenido de asfalto posible que se puede obtener. En Holanda se reconoció que al aumentar el contenido de asfalto de 4.5% a 5.5% la durabilidad aumentó de 2-3 años. En Alemania está especificado utilizar 6.2%-6.8% de asfalto modificado en las mezclas de tipo 0/8 mm. También es posible utilizar otros aditivos estabilizadores para obtener mayores contenidos de asfalto, si esto produce un mayor costo-beneficio. Al utilizar asfaltos modificados, se pueden obtener mayores contenidos de asfalto y una mayor rigidez inicial (4).

El criterio más simple, para explicar el inicio de la pérdida de partículas al largo plazo, es la penetración del asfalto y algunas referencias indican que da la misma respuesta que los parámetros reológicos más avanzados. Se observa generalmente, que la fractura por fragilidad ocurre cuando la penetración del asfalto es menor que 15-20. Una vez que se inicia el daño (pérdida de partículas) ocurre una rápida declinación de la serviciabilidad. Esto se explica por el efecto dominó del aumento de las aberturas; luego de que las primeras piedras se desprenden, más piedras seguirán este patrón a una mayor velocidad (4).

El ensayo de Cántabro, que también se observó que correlacionó con la penetración del asfalto, es todavía el ensayo más utilizado para determinar la resistencia de las mezclas drenantes, relacionado con la pérdida de partículas aunque algunas referencias declaran que no hay una correlación directa con el desempeño en campo, especialmente si se usan asfaltos modificados con polímeros. El problema es que no hay todavía ensayos como alternativas probadas y simples. Algunas alternativas sugeridas son los ensayos de tensión cíclica, pista de Nynäs con inmersión, la abrasión de superficie por rotación y el ensayo de cortante cíclico. La ventaja del ensayo de tensión cíclico que está relacionado con un modelo sugerido del daño mecánico de las mezclas drenantes (4).

Luego de este análisis del desarrollo internacional de las mezclas drenantes, este estudio se enfocó en los siguientes objetivos.

Objetivos

El objetivo principal de este estudio es encontrar la mejor combinación de materiales para producir mezclas asfálticas de tipo drenante, y así introducir su uso en la tecnología de pavimentación de Costa Rica.

Con el fin de alcanzar este objetivo, se realizaron las siguientes actividades:

1. Determinar la composición de la mezcla con la combinación de: 4 granulometrías para una fuente de agregado, un asfalto tipo AC-30 modificado con 1.5% de polímero tipo EGA (Elvaloy[®] Dupont[®] casa comercial), un porcentaje de 0.5% de fibra de celulosa (Viatop[®] casa comercial) y un porcentaje de 2.0% de cal.
2. Evaluar el desempeño con el equipo APA (pista de ensayo de Georgia) para deformación permanente a dos temperaturas y dos ciclos.
3. Evaluar el desempeño para módulo resiliente a tensión indirecta para especímenes sin acondicionar y para especímenes acondicionados con un ciclo de inmersión en agua a 60 °C durante 24 horas, para la creación de un índice llamado Índice de Módulo Resiliente Retenido (IMRR).
4. Recomendar la mejor mezcla para las condiciones costarricenses que se podría utilizar para la producción y construcción de un tramo experimental en una de las cuatro autopistas principales.

Alcance

Se realizó una investigación bibliográfica para averiguar acerca de investigaciones anteriores con el siguiente enfoque: procedimientos de diseño de mezcla, especificaciones de calidad para los materiales para la producción y

construcción de mezclas drenantes. En la sección anterior se resumieron los hallazgos de este estudio y además la parte más completa está en el Apéndice A.

Se realizó un estudio a nivel de laboratorio, para contestar preguntas como: ¿Serán adecuados los agregados producidos para mezclas densas para la fabricación de mezclas drenantes con una calidad aceptable?, ¿Cumplirán con las especificaciones internacionales?, ¿Irá a ser el contenido de asfalto óptimo mucho mayor comparado al utilizado para las mezclas densas?, ¿Será la mezcla resistente al daño por humedad (desnudamiento)? y ¿La mezcla tendrá un desempeño aceptable y bueno en términos de estabilidad/deformación?

Se realizó un análisis estadístico de tipo ANOVA de varios factores (4 y 3) y además una prueba de Tukey para determinar las diferencias significativas en el desempeño y propiedades volumétricas de 12 tipos de mezcla. Para más detalles de este análisis estadístico referirse a los **Apéndices C y D**.

Metodología de investigación

El diagrama de flujo presentado en la **Figura 1** resume el plan de ensayos para el estudio de laboratorio. En la primera fase de la investigación, se prepararon 3 granulometrías para escoger una granulometría óptima basados en los criterios: $VCA_{mezcla} < VCA_{envarillado\ seco}$, el contenido de vacíos en la mezcla entre 20% y 22% y un escurrimiento menor a 0.3%.

Luego de escoger la granulometría que cumpliera con los requisitos anteriores, se añadieron dos granulometrías más, basados en la granulometría óptima, se cambiaron los porcentajes pasando en el tamiz 4.75 mm (Nº 4), una con +2.5% y otra con +5.0%. Estas granulometrías se muestran en la **Figura 5**, estas granulometrías son muy similares a las utilizadas por el NCAT (siglas en inglés), la #3 del documento de referencia (1) o a la especificación australiana OGA 12 (5). Las mezclas se prepararon con un asfalto clasificado por grado de desempeño como PG 76 (10) —la especificación para bajas temperaturas no se utiliza en Costa Rica, pero la especificación para temperaturas intermedias se presenta en el paréntesis— además se añadió 0.5% de

fibra de celulosa que viene en presentación de pellets (como rollitos, “cerullos”), dosificada por peso total de agregado restando el porcentaje de asfalto que tienen por sí mismas. Los procedimientos de diseño de mezcla fueron realizados de acuerdo con el procedimiento de la FHWA (siglas en inglés) (6), los especímenes se compactaron en el compactador giratorio Superpave con 100 giros.

En la segunda fase, se añadió otra granulometría con características más finas y las muestras se ensayaron para deformación permanente (rutting) a dos temperaturas y dos ciclos en el equipo APA, también para módulo resiliente a tensión indirecta en especímenes sin acondicionar y en especímenes acondicionados un ciclo de inmersión en agua y se creó un índice llamado Índice de Módulo Resiliente Retenido (IMRR), además, a todas las mezclas se les adicionó 2.0% de cal con el objetivo de evaluar el mejoramiento relativo en las propiedades de la mezcla obtenidas en la primera fase de este estudio, para alcanzar la mejor mezcla.

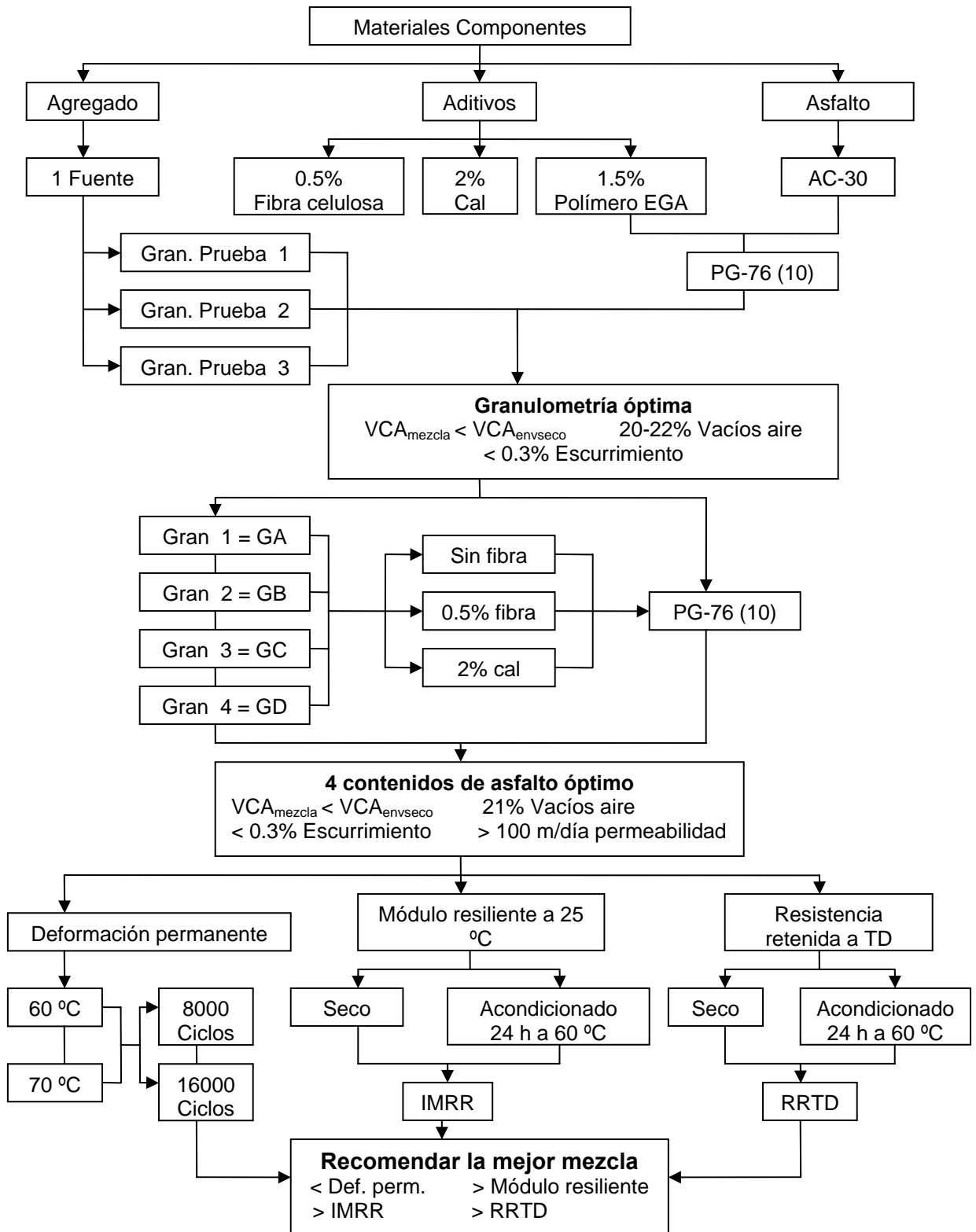


Figura 1. Diagrama de flujo del plan de ensayos.

CAPÍTULO 2

CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

En esta investigación se utilizó la siguiente materia prima: una fuente de agregado, un asfalto AC-30 modificado con 1.5% de polímero tipo EGA, un solo tipo de fibra de celulosa dosificada al 0.5% y finalmente cal dosificada por sustitución del filler en un 2%.

Ligante asfáltico

En Costa Rica solo se produce un tipo de asfalto, cuya clasificación por viscosidad es AC-30 sin modificar. El asfalto se modificó con un polímero de tipo EGA (**Figura 2**) en un porcentaje de adición del 1.5%, que dio como resultado un PG 76 (10).

En la **Tabla 1** se presenta la caracterización físico-química del asfalto original, el cual se modificó luego para desarrollar este proyecto. A continuación en la **Tabla 2** se muestra la caracterización físico-química del asfalto modificado con el polímero.

Propiedad	Método ensayo	Resultado	Unidad	Especificación AASHTO M226-80	Normativa RTCA 75.01.22:04
Pureza y seguridad					
Punto de inflamación	AASHTO T 48	277 ± 1	°C	min. 232	min. 232
Densidad del asfalto a 25 °C	AASHTO T 228	1.033 ± 0.003	g/cm ³	-	-
Pérdida en película delgada (RTFO)	AASHTO T 240	0.81 ± 0.02	%	max. 0.50	max. 1.0
Pérdida en película delgada (TFO)	AASHTO T 179	0.52 ± 0.02	%	max. 0.50	max. 1.0
Consistencia					
Penetración a 25 °C	AASHTO T 49	53.0 ± 1.0	(1/10 mm)	min. 50	min 50
Viscosidad cinemática a 125 °C	AASHTO T 201	1083 ± 21	cSt	-	-
Viscosidad cinemática a 135 °C	AASHTO T 201	566 ± 2	cSt	min. 350	min. 350
Viscosidad cinemática a 145 °C	AASHTO T 201	411 ± 1	cSt	-	-
Viscosidad absoluta a 60°C (original)	AASHTO T 201	4097 ± 11	Poise	2400-3600	2400-3600
Viscosidad absoluta a 60 °C (envejecido en TFO)	AASHTO T 201	7885 ± 5	Poise	máx.12000	máx.15000
Viscosidad absoluta a 60 °C (envejecido en RTFO)	AASHTO T 201	9815 ± 144	Poise	-	-
Ductilidad a 25 °C (original)	AASHTO T 51	ND ¹	cm	mín. 40	mín. 40
Solubilidad en tricloroetileno	AASHTO T 44	99.93 ± 0.01	%	min. 99.00	min. 99.00
Susceptibilidad al envejecimiento y térmica					
Índice de susceptibilidad térmica (VTS)	RTCR 248:97	3.51	-	-	3.30-3.90
Razón de viscosidades (TFO)	RTCR 248:98	1,9	-	-	máx.3.0
Índice de inestabilidad coloidal (IC)	RTCR 248:97	ND	-	-	máx 0.60
Porcentaje de ceras	RTCR 248:97	ND	%	-	máx 3.0

Fuente: Sequeira, W. y Elizondo, F. Influencia de la granulometría en la volumetría de mezclas SMA. Informe Final. 2007 (7).

¹ Dato no disponible

Tabla 1. Caracterización físico-química del ligante asfáltico original.

Propiedad	Método ensayo	Resultado	Unidad	Especificación AASHTO M226-80	Normativa RTCA 75.01.22:04
Pureza y seguridad					
Punto de inflamación	AASHTO T 48	304 ± 1	°C	min. 232	min. 232
Densidad del asfalto a 25 °C	AASHTO T 228	1.029 ± 0.004	g/cm ³	-	-
Pérdida en película delgada (RTFO)	AASHTO T 240	0.71 ± 0.03	%	max. 0.50	max. 1.0
Pérdida en película delgada (TFO)	AASHTO T 179	0.51 ± 0.01	%	max. 0.50	max. 1.0
Consistencia					
Penetración a 25 °C	AASHTO T 49	52,0 ± 1,0	(1/10 mm)	min. 50	min 50
Viscosidad cinemática a 125 °C	AASHTO T 201	2672 ± 10	cSt	-	-
Viscosidad cinemática a 135 °C	AASHTO T 201	1299 ± 4	cSt	min. 350	min. 350
Viscosidad cinemática a 145 °C	AASHTO T 201	871 ± 1	cSt	-	-
Viscosidad absoluta a 60°C (original)	AASHTO T 201	5472 ± 4	Poise	2400-3600	2400-3600
Viscosidad absoluta a 60 °C (envejecido en TFO)	AASHTO T 201	9893 ± 10	Poise	máx.12000	máx.15000
Viscosidad absoluta a 60 °C (envejecido en RTFO)	AASHTO T 201	14550 ± 17	Poise	-	-
Ductilidad a 25 °C (original)	AASHTO T 51	ND ¹	cm	mín. 40	mín. 40
Solubilidad en tricloroetileno	AASHTO T 44	ND	%	min. 99.00	min. 99.00
Susceptibilidad al envejecimiento y térmica					
Índice de susceptibilidad térmica (VTS)	RTCR 248:97	3.01	-	-	3.30-3.90
Razón de viscosidades (TFO)	RTCR 248:98	1.8	-	-	máx.3.0
Índice de inestabilidad coloidal (IC)	RTCR 248:97	ND	-	-	máx 0.60
Porcentaje de ceras	RTCR 248:97	ND	%	-	máx 3.0

Fuente: Sequeira, W. y Elizondo, F. Influencia de la granulometría en la volumetría de mezclas SMA. Informe Final. 2007 (7).

¹ Dato no disponible

Tabla 2. Caracterización físico-química del ligante asfáltico modificado con 1.5% de EGA.

Los resultados de la determinación del grado de desempeño superior e intermedio del ligante original y el ligante asfáltico modificado, se presentan en la **Tabla 3** y **Tabla 4**, respectivamente.

Propiedades Alta temperatura					Propiedades Temperatura intermedia		
Temperatura (°C)	Condición original G*/sin δ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	Condición RTFO G*/sin δ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	Temperatura (°C)	Condición RTFO + PAV G*×sin δ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)
58	5.720	79.8	13.290	73.8	16	3555	41.8
70	1.310	84.0	3.130	79.5	22	1925	45.1
82	0.370	86.6	0.860	83.1	28	1065	49.6
PG	70		70		PG	13	
	(72.52 °C) ¹		(72.74 °C) ¹			(12.09 °C) ¹	

¹Dato de temperatura real no redondeado al grado de desempeño.

Tabla 3. Caracterización por grado de desempeño Superpave para el ligante original.

Propiedades Alta temperatura					Propiedades Temperatura intermedia		
Temperatura (°C)	Condición original G*/sin δ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	Condición RTFO G*/sin δ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	Temperatura (°C)	Condición RTFO + PAV G*×sin δ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)
58	7.610	70.5	21.110	64.6	16	2757	41.8
70	2.050	73.2	5.750	67.0	22	1541	44.6
82	0.670	76.3	1.860	69.9	28	878	48.2
PG	76		76		PG	10	
	(77.67 °C) ¹		(80.02 °C) ¹			(9.42 °C) ¹	

¹Dato de temperatura real no redondeado al grado de desempeño.

Tabla 4. Caracterización por grado de desempeño Superpave para el ligante modificado.

Según la clasificación por Grado de Desempeño Superpave, el ligante asfáltico original es un PG 70 (13). La especificación para bajas temperaturas no se usa, por ser un país tropical, pero sí se obtiene una especificación para la temperatura intermedia y

es el dato que se presenta en el paréntesis. Una vez modificado el asfalto con 1.5% de EGA el grado de desempeño cambió a 76 (10), lo que permitió ampliar el rango de trabajo del ligante.

Agregado

El estudio solo involucró una fuente de agregado que proviene de la región noroeste del país, Guápiles. El agregado se produce de la extracción de los depósitos de roca ígnea del río Guápiles. Las características físicas de este agregado se resumen en la **Tabla 5**.

Propiedad	Método de ensayo	Resultado	Especificación
Agregado grueso			
Abrasión L.A.	AASHTO T 96	21%	37% max. ¹
Gravedad específica	AASHTO T 85	2.65	2.85 max. ¹
Absorción	AASHTO T 85	1.7%	4% max. ¹
1 o más caras fracturadas	ASTM D 5821	100%	90% min. ²
2 o más caras fracturadas	ASTM D 5821	99.8%	75% min. ²
Agregado fino			
Índice de plasticidad	AASHTO T 90	No plástico	10 max. ¹
Equivalente arena	AASHTO T 176	78%	-
Angularidad	AASHTO TP 33	37.2%	-
Gravedad específica	AASHTO T 20	2.55	2.85 max. ¹
Absorción	AASHTO T 20	3.3%	-

¹ Nevada DOT Especificaciones estándar para la construcción de caminos y puentes, 2001.

² Especificación estándar para la construcción de caminos y puentes proyectos federales, FP-03.

Tabla 5. Caracterización física del agregado utilizado.

En Costa Rica, esta fuente de agregado se utiliza para la producción de mezclas asfálticas en caliente de graduación densa. Como las mezclas drenantes no se han utilizado, se compararon las características de este agregado con las especificaciones internacionales, observando la Tabla 5 se puede concluir que el agregado a pesar de que no está pensado para su uso en mezclas abiertas, sí cumple con los requisitos, lo cual lo hace apto para la producción de este nuevo tipo de mezcla asfáltica.

Aditivos

Los aditivos utilizados durante la realización de esta investigación fueron: un polímero tipo EGA, una fibra de celulosa y cal.

Polímero EGA

El polímero utilizado para modificar el asfalto es de marca comercial Elvaloy[®]TER producido por la empresa DuPont[™] en Estados Unidos. Se usó un porcentaje de modificación de 1.5% por peso de asfalto. Este polímero reacciona químicamente con el asfalto, además está compuesto por tres polímeros, etileno, glicidil y acrilato (EGA según siglas en inglés). Viene en presentación granular (**Figura 2**). La forma de adicionarlo al asfalto es a través de un mezclado a alta temperatura y a esfuerzo cortante que lo provee un equipo de agitación con propela.

Para obtener más información acerca de este producto, se puede referir a la página de internet: <http://www.dupont.com/asphalt/link1.html>



Figura 2. Presentación del polímero utilizado para modificar el ligante asfáltico.

Fibra de celulosa

La celulosa es un material de origen natural y renovable por la naturaleza. Debido al alto porcentaje de asfalto que utilizan las mezclas con graduación discontinua, la fibra de celulosa es utilizada como un agente estabilizador que evita el escurrimiento del ligante (7).

La fibra utilizada para modificar la mezcla drenante es de marca comercial Viatop[®] producido por la empresa JRS RETTENMAIER & SOEHNE GmbH+Co, en Alemania.

Para este estudio se utilizó la fibra en su presentación granular (**Figura 3**), 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 la cantidad de asfalto que aporta la fibra a la hora de dosificar el ligante. En este caso se incorporó 0.5% de fibra celulosa por peso total de agregado (7). Esta adición se hizo a la parte fina de la granulometría antes de someterla a la temperatura de mezclado.

Para obtener más información acerca de este producto, se puede referir a la página de internet:

<http://www.jrs.de/wEnglisch/anwend/strassenbau/produkte.shtml?navid=144>



Figura 3. Presentación de la fibra de celulosa utilizada para estabilizar la mezcla.

Cal

Es una cal hidratada cuya presentación es en polvo (**Figura 4**), constituida por hidróxido de calcio y compuestos de óxido de calcio y cierta cantidad de óxido e hidróxido de magnesio. Se adicionó al agregado en un 2%, pasada por el tamiz 0.075 μm (Nº200), por sustitución del filler del agregado y antes de producir la mezcla drenante se hidrató con la adición de agua con un periodo de curado de 22 horas y luego se calentó 2 h antes del proceso de mezclado para eliminar el agua del agregado.

La presentación de este producto es en sacos de 25 kg y se obtuvo de la empresa El Guadalupano Inc. Para más información de este producto: <http://www.grupoguadalupano.com/home.htm>



Figura 4. Presentación de la cal utilizada pasada por el tamiz 0.075 μm (Nº200).

CAPÍTULO 3

DISEÑOS DE MEZCLA PARA LAS MEZCLAS DRENANTES

Escogencia de la granulometría óptima

Para la escogencia de la granulometría óptima, se escogieron tres granulometrías de prueba. A estas granulometrías se les añadió 4 contenidos de asfalto 3.5%, 4.0%, 4.5% y 5.0% por peso total de agregado.

Los criterios para escoger la granulometría óptima fueron que el porcentaje de vacíos en la mezcla (VCA_{mezcla}) sea menor que los vacíos en el agregado grueso ($VAC_{agregrueso}$) en el ensayo de envarillado seco, lograr un porcentaje de vacíos de aire en la mezcla entre 20% y 22%, y finalmente, un porcentaje de escurrimiento menor a 0.3%. En la **Tabla 6** se resumen las granulometrías y los resultados de la volumetría.

	% Pasando por tamiz											
	25.0 mm	19.0 mm	12.7 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	600 μ m	300 μ m	150 μ m	75 μ m	
GP 1	100	100	100	75	25	10	8	6.5	5.4	4.6	4	
GP 2	100	100	92.5	65	17.5	7.5	6	4.9	4.1	3.4	3	
GP 3	100	100	85	55	10	5	4	3.3	2.7	2.3	2	
Propiedades	GP 1				GP 2				GP 3			
% Asfalto	3.5	4.0	4.5	5.0	3.5	4.0	4.5	5.0	3.5	4.0	4.5	5.0
Vacios de aire	23.6	22.2	20.0	20.8	23	23.5	22.4	21.8	25.3	24.4	24.9	23.9
VCA_{mezcla}	46.1	46.0	45.1	46.3	40.4	41.5	41.5	42	37.6	37.7	38.6	38.6
$VCA_{agregrueso}$	43.4				43.1				43.1			
Escurrimiento	0.049	0.068	0.107	0.325	0.029	0.029	0.056	0.058	0.039	0.087	0.092	0.197

Tabla 6. Resumen de las propiedades volumétricas para las granulometrías de prueba.

La granulometría de prueba 1 no cumplió con $VCA_{mezcla} < VAC_{agregrueso}$ y además para el contenido de asfalto más alto no se cumple con el criterio de escurrimiento. Las otras dos granulometrías de prueba no presentaron problemas de escurrimiento ni con el criterio de $VCA_{mezcla} < VAC_{agregrueso}$, sin embargo, se escogió la granulometría de

prueba 2 como la granulometría óptima porque presentó los porcentajes de vacíos de aire cercano al rango de 20-22% con los porcentajes de escurrimiento menores.

Escogencia del asfalto óptimo, Diseño Superpave

Fase 1: Tres granulometrías sin fibra y con 0.5% de fibra de celulosa

Con el objetivo de encontrar el contenido de asfalto óptimo para la granulometría óptima, designada de ahora en adelante como GA (17.5% pasando el tamiz de 4.75 mm, N° 4), se compactaron los especímenes a 100 giros en el Compactador Giratorio. Además, se incorporaron dos granulometrías más con el propósito de estudiar la influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de las mezclas drenantes.

Las dos granulometrías adicionales se escogieron basadas en la granulometría A, es decir, con un solo cambio en el porcentaje pasando en el tamiz de 4.75 mm (N° 4), una de ellas con un cambio de +2.5% que se designó como GB y la otra con un cambio de +5.0% que se designó como GC. La distribución granulométrica de estas tres granulometrías se muestra en la **Figura 5**.

Adicionalmente, se incluyeron los diseños de mezcla con la inclusión de la fibra de celulosa para ver el efecto de la misma sobre las propiedades volumétricas de las mezclas.

El contenido de vacíos de aire de diseño se fijó en un 21.0%. El contenido de asfalto por peso total de agregado (PTA), los vacíos en el agregado mineral (VMA), los vacíos llenos con asfalto (VFA), la densidad y el porcentaje de escurrimiento se presentan en la **Tabla 7**, incluyendo las dos condiciones de sin fibra y con 0.5% de fibra.

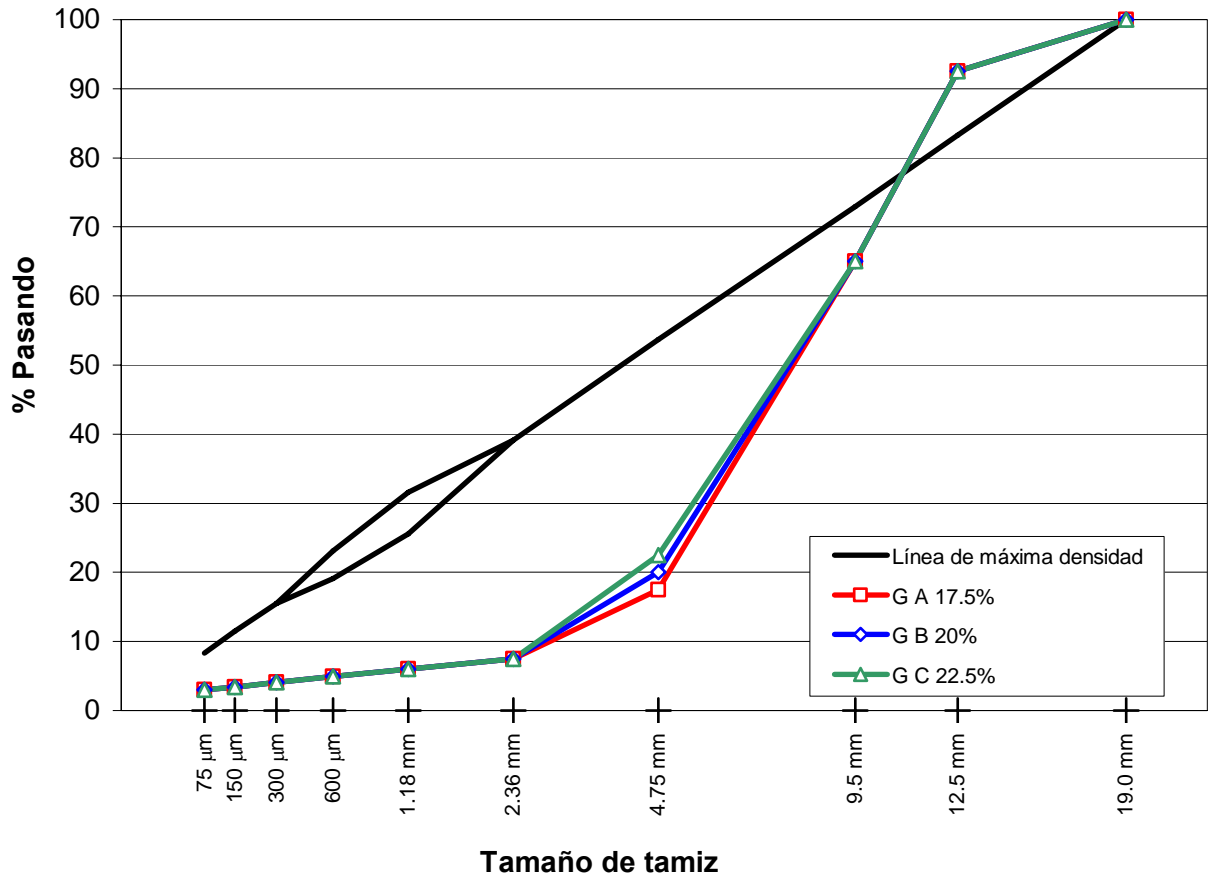


Figura 5. Distribución granulométrica de GA, GB y GC.

	G A		G B		G C	
	Sin Fibra	0.5% Fibra	Sin Fibra	0.5% Fibra	Sin Fibra	0.5% Fibra
Contenido de asfalto (PTA)	6.0	6.0	5.4	5.5	5.3	5.8
Vacíos de aire (%)	21.0	21.0	21.0	21.5	21.0	21.0
VMA (%)	30.0	30.7	29.1	30.2	29.4	30.0
VFA (%)	30.3	31.5	29.5	28.7	28.6	30.5
Densidad (kg/m ³)	1946	1928	1958	1935	1950	1935
Escurrecimiento (%)	0.83	0.18	0.16	0.17	0.13	0.33

Tabla 7. Resumen de las propiedades volumétricas para las granulometrías A, B y C.

La tabla resumen anterior muestra que hay una pequeña diferencia (un máximo de 0.7%) entre los contenidos de asfalto óptimo para las tres granulometrías, el VMA se mantiene casi constante al igual que el VFA. El porcentaje de 0.5% de fibra afecta la densidad reduciéndola en un promedio de 19 kg/m³. El ensayo de drenaje de Schellenberg se realizó en la mezcla suelta a una temperatura de 175 °C, como se esperaba, la granulometría A presentó el mayor porcentaje de escurrimiento pero la adición de la fibra mejoró en un gran porcentaje el potencial de escurrimiento de esta mezcla.

Por el contrario, la granulometría C presentó un dato de escurrimiento mayor para la mezcla con fibra lo cual es contradictorio con respecto al efecto positivo de la adición de fibra para disminuir el potencial de escurrimiento, una posible explicación es que al haber un pequeño aumento en el porcentaje de asfalto óptimo de 0.5% hay más posibilidad de escurrimiento, por lo que se podría pensar es que habría que aumentar el porcentaje de fibra para esta granulometría. Finalmente, para la granulometría B, la adición de fibra no mejora de manera significativa el escurrimiento, que de por sí ya es lo suficiente bajo, lo que hace a esta granulometría poco susceptible al escurrimiento si se produjera en planta.

Fase 2: Una granulometría adicional y la modificación de las mezclas con 2% de cal

Luego de realizar los diseños de mezcla anteriores, se decidió hacer una segunda fase de diseños, es decir, se incluyó una nueva granulometría y además se introdujo el uso de cal con el propósito de observar si hay mejoras en las propiedades de las mezclas, para encontrar la mejor mezcla. La nueva granulometría tiene características más finas, se designó como GD. El porcentaje de dosificación de la cal fue de 2% por sustitución en el filler del agregado.

En la **Figura 6** se muestra la granulometría D comparada con las anteriores. En la **Tabla 8** se muestra el resumen de las propiedades volumétricas para todas las granulometrías.

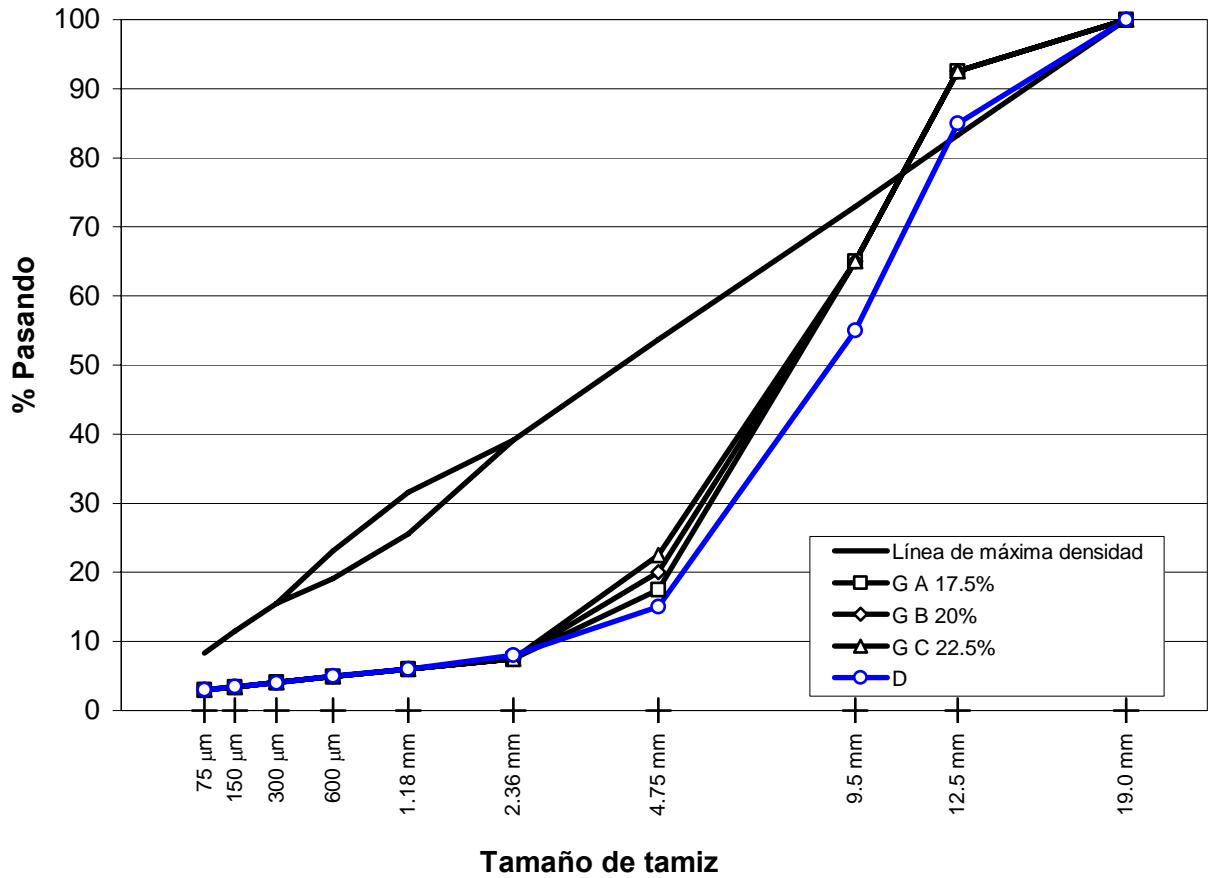


Figura 6. Distribución granulométrica de GD de la segunda fase.

	G A			G B			G C			G D		
	Sin Fibra	0.5% Fibra	2% Cal	Sin Fibra	0.5% Fibra	2% Cal	Sin Fibra	0.5% Fibra	2% Cal	Sin Fibra	0.5% Fibra	2% Cal
Contenido de asfalto (PTA)	6.0	6.0	5.4	5.4	5.5	5.3	5.3	5.8	5.0	5.1	5.6	4.8
Vacíos de aire (%)	21.0	21.0	21.0	21.0	21.5	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
VMA (%)	30.0	30.7	29.2	29.1	30.2	28.7	29.4	30.0	29.3	28.2	29.6	28.2
VFA (%)	30.3	31.5	27.3	29.5	28.7	27.1	28.6	30.5	28.0	28.0	29.0	25.8
Densidad (kg/m ³)	1946	1928	1951	1958	1935	1962	1950	1935	1955	1962	1953	1969
Escurrecimiento (%)	0.83	0.18	0.06	0.16	0.17	0.04	0.13	0.33	0.03	0.20	0.15	0.06

Tabla 8. Resumen de las propiedades volumétricas para las granulometrías A, B, C y D.

La tabla resumen anterior muestra que hay una disminución del porcentaje de asfalto óptimo para las cuatro granulometrías con la adición de 2% de cal, el VMA se

mantiene casi constante, mientras que el VFA también se vio disminuido. El efecto de reducción de la densidad por la adición de fibra también se observó en la granulometría D.

Finalmente, la adición de un 2% de cal hizo a las mezclas menos susceptibles al escurrimiento, prácticamente sin escurrimiento, por lo que comparando con la adición de fibra, fue mejor el efecto de la cal comparativamente, y al final más beneficioso económicamente pues el uso de fibra encarece la mezcla sustancialmente.

En el **Apéndice B** se muestran todos los datos y gráficos para la realización de los diseños de mezcla para las cuatro granulometrías y las distintas combinaciones de aditivos.

CAPÍTULO 4

DESEMPEÑO DE LAS MEZCLAS DRENANTES PARA EL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

Comparación de la deformación permanente para las cuatro granulometrías

Con el objetivo de evaluar la deformación permanente para las cuatro granulometrías se prepararon los especímenes con un porcentaje de vacíos de aire de aproximadamente 23% para simular las condiciones de compactación en sitio.

Como los especímenes son para ensayar en el equipo APA, se hicieron especímenes de prueba para alcanzar los vacíos y la altura requeridos.

Una vez que se controlaron los vacíos y la altura, se prepararon especímenes para realizar el ensayo a dos temperaturas: 60 °C y 70 °C, aún cuando el método de ensayo dice que la temperatura de acondicionamiento debe ser la temperatura alta de la clasificación del grado de desempeño del asfalto. En este caso, la temperatura debió ser 76 °C pero no se utilizó este criterio.

Adicionalmente, los especímenes se sometieron a dos ciclos de carga, es decir, un primer ciclo de 8000 pasadas y luego otro de 8000 para sumar un total de 16000 pasadas sobre los mismos especímenes. El equipo una vez terminados los primeros 8000 ciclos pone en cero la lectura de deformación para la siguiente corrida de 8000 pasadas, por lo que los datos de 16000 ciclos es la suma de la lectura de 8000 más la deformación de los siguientes 8000 ciclos.

En la **Figura 7** se presenta un resumen de los promedios de deformación permanente para las cuatro granulometrías, los tres aditivos: SF, CF, CAL, las dos temperaturas: 60 °C, 70 °C y los dos ciclos de carga: 8000 ciclos y 16000 ciclos. Los datos presentados son los promedios de 6 mediciones.

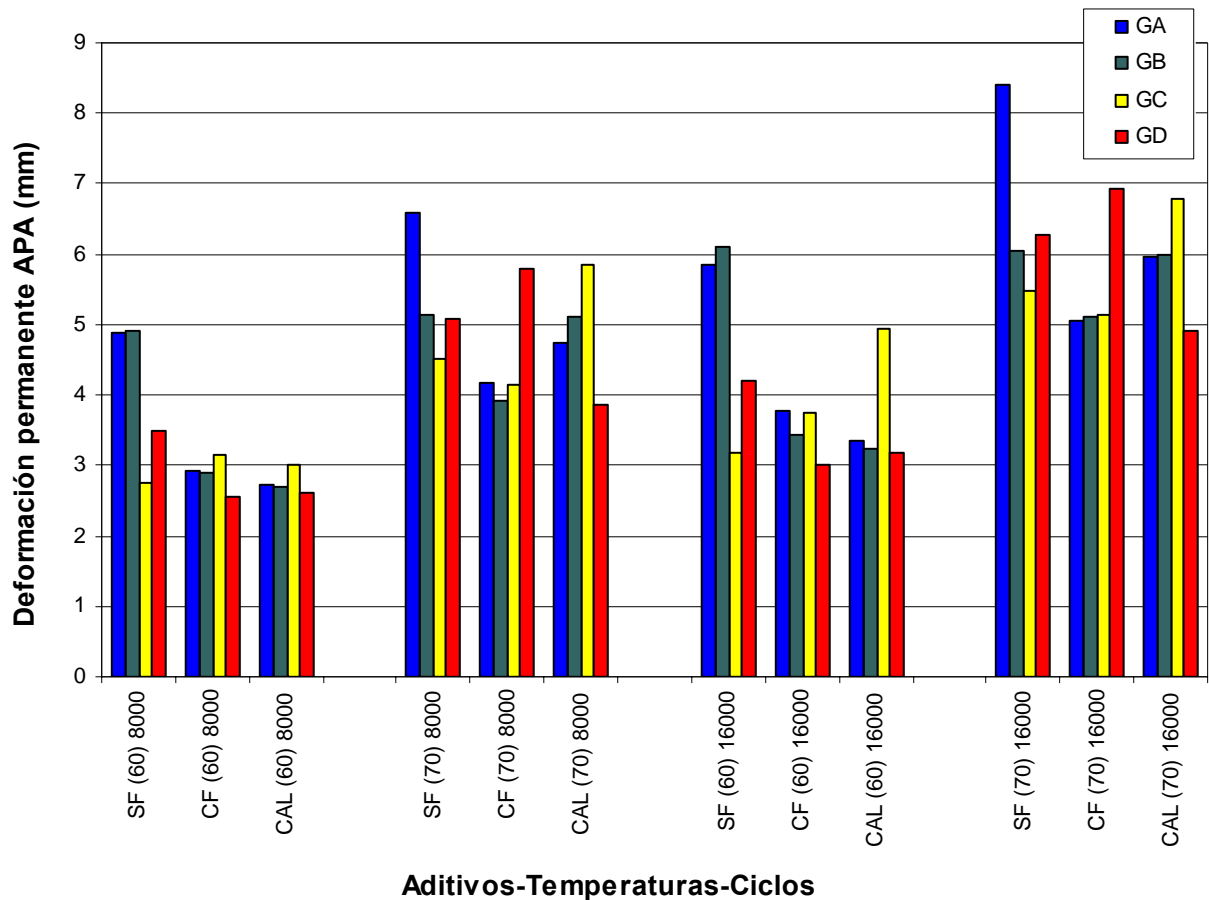


Figura 7. Promedio de la deformación permanente para todas las combinaciones experimentales.

Observando la figura anterior, para todas las granulometrías la deformación permanente aumenta con el aumento de la temperatura para ambos ciclos de carga. El aumento de la deformación por el cambio de los ciclos de carga no es tan marcado como el cambio por temperatura.

Luego, se realizó un análisis de varianza estadístico a los datos con la técnica de ANOVA de 4 factores. En donde, se estableció como variable respuesta la deformación permanente, como primer factor la granulometría en 4 niveles: GA, GB, GC y GD, el segundo factor los aditivos en 3 niveles: SF, CF y CAL, el tercer factor la temperatura en 2 niveles: 60 °C y 70 °C y el cuarto factor los ciclos de carga en 2 niveles: 8000 ciclos y 16000 ciclos.

Dentro del análisis estadístico se estudió la interacción entre los 4 factores para probar que no hay interacción. Después de este análisis se observó que los factores principales afectan directamente la deformación permanente, pero no hay suficiente evidencia que indique que la interacción entre los factores afecta la deformación permanente. Sin embargo, al parecer la interacción triple podría ser significativa. Estos resultados se resumen en la **Tabla 9**.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Valor F	P	Significancia
GRANULOMETRÍA	3	12.83144	7.2915	0.0001	SI
ADITIVOS	2	62.44188	53.224	<.0001	SI
GRANULOMETRÍA*ADITIVOS	6	102.69658	29.1787	<.0001	SI
TEMPERATURA	1	245.69164	418.8433	<.0001	SI
GRANULOMETRÍA*TEMPERATURA	3	8.34828	4.7439	0.0031	NO
ADITIVOS*TEMPERATURA	2	5.26706	4.4895	0.0122	NO
GRANULOMETRÍA*ADITIVOS*TEMPERATURA	6	36.66238	10.4167	<.0001	SI
CICLOS	1	63.73017	108.6441	<.0001	SI
GRANULOMETRÍA*CICLOS	3	0.48173	0.2737	0.8443	NO
ADITIVOS*CICLOS	2	0.4754	0.4052	0.6673	NO
GRANULOMETRÍA*ADITIVOS*CICLOS	6	2.96027	0.8411	0.5393	NO
TEMPERATURA*CICLOS	1	1.80073	3.0698	0.081	NO
GRANULOMETRÍA*TEMPERATURA*CICLOS	3	0.90576	0.5147	0.6725	NO
ADITIVOS*TEMPERATURA*CICLOS	2	0.42307	0.3606	0.6976	NO
GRANULOMETRÍA*ADITIVOS*TEMPERATURA*CICLOS	6	2.93378	0.8336	0.545	NO
Error	240	140.78293			
C. Total	287	688.43308			

Tabla 9. ANOVA de 4 factores para los datos de deformación permanente ($\alpha = 5\%$).

Basados en estos resultados, para ahondar en el análisis, se decidió separar los datos en dos grupos como base los ciclos, y de esta forma determinar si la interacción triple de factores principales se mantiene significativa.

Para ambos grupos, 8000 y 16000 ciclos, la interacción triple entre granulometría, aditivos y temperatura se mantuvo significativa. Lo que nos lleva a realizar un análisis adicional para establecer los grupos de promedios iguales y

promedios diferentes. Para esto se utilizó la técnica estadística de rangos múltiples de Tukey, fijando la temperatura.

Para más detalles del análisis estadístico referirse al **Apéndice C**.

Los resultados para ambos grupos de ciclos y todos los demás factores se presentan resumidos en la **Figura 8**.

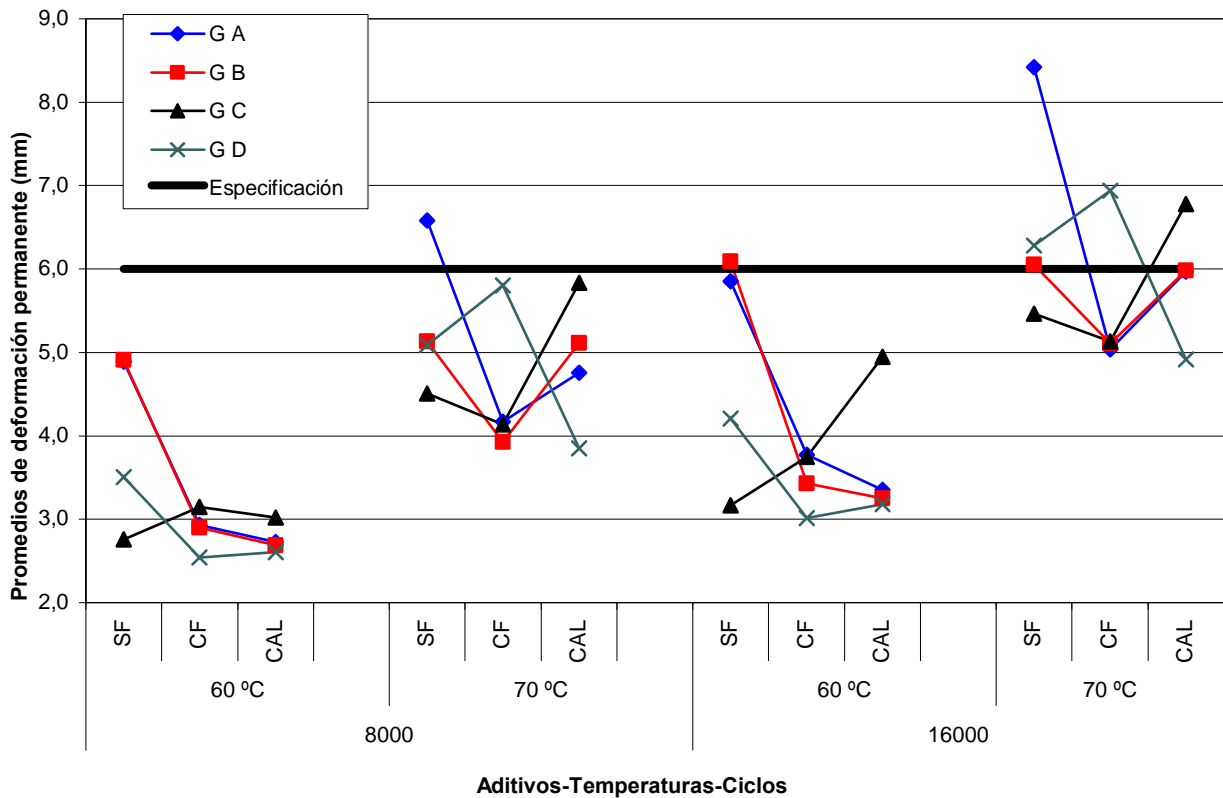


Figura 8. Deformación permanente para las cuatro granulometrías, tres aditivos, dos temperaturas y dos ciclos.

Las deformaciones permanentes de la GA y GB sin fibra fueron significativamente distintas al resto de combinaciones, haciendo a estas mezclas muy susceptibles a la deformación permanente para la temperatura de 60 °C. Sin embargo, para la temperatura de 70 °C, la GB presentó una similar susceptibilidad con GC y GD.

Para la mayoría de las mezclas drenantes, la adición de fibra de celulosa redujo la susceptibilidad a la deformación permanente excepto para GD a 70 °C. Finalmente la adición de cal a las mezclas presentó una variación amplia haciendo difícil establecer si hubo mejoras a las mezclas drenantes.

Se puede establecer una especificación de calidad, con un máximo permisible de 6 mm para este tipo de mezclas. Las siguientes mezclas no cumplen con este criterio: GA SF a 70 °C 8000 ciclos, GB SF t 60 °C 16000 ciclos, GA SF, GB SF, GC Cal, GD SF, GD CF a 70 °C 16000 ciclos.

Comparación del módulo resiliente a tensión diametral para las cuatro granulometrías y establecer el Índice de Rigidez Retenida (IRR).

Con el objetivo de evaluar el módulo resiliente a tensión diametral para las cuatro granulometrías se prepararon los especímenes con un porcentaje de vacíos de aire de aproximadamente 23% para simular las condiciones de compactación en sitio.

El ensayo de módulo se hizo a 25 °C, condición de entrada para los programas computacionales para el diseño de pavimentos.

Adicionalmente, se evaluaron las mezclas drenantes para dos condiciones: especímenes sin acondicionar y especímenes acondicionados durante 24 horas en agua a 60 °C, con el objetivo de establecer un índice de rigidez retenida, que permita distinguir si las mezclas son sensibles al daño por acción del agua que se puede presentar durante la vida útil de la mezcla colocada en el pavimento.

Para asegurar que se realizó el ensayo de módulo en el rango elástico de las mezclas, a los especímenes se les sometió a dos niveles de carga: 500N y 1500 N.

En la **Figura 9** se presenta un resumen de los promedios de módulo resiliente para las cuatro granulometrías, los tres aditivos: SF, CF, CAL, los dos niveles de carga:

500 N y 1500 N y los dos estados de acondicionamiento: secos y acondicionados. Los datos presentados son los promedios de 6 mediciones.

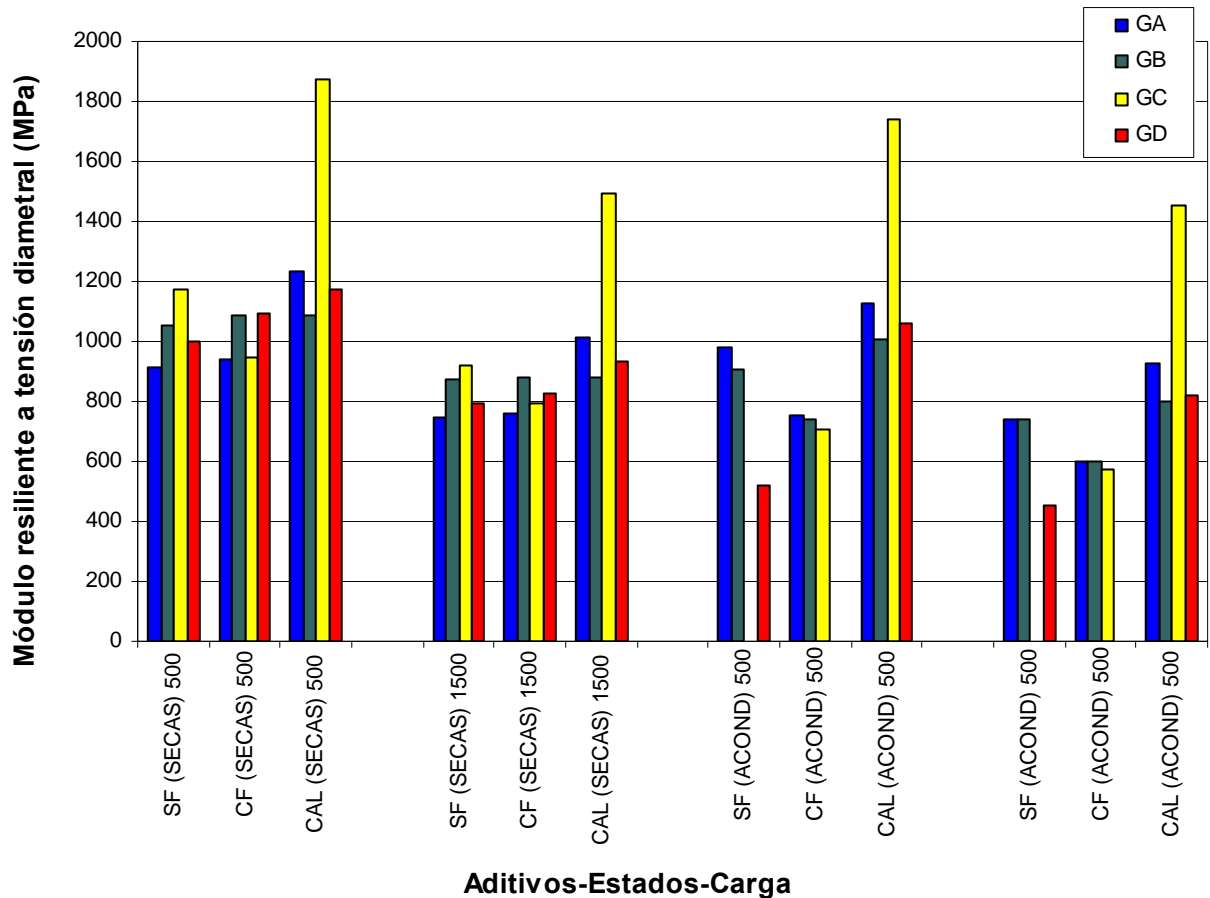


Figura 9. Módulo resiliente a tensión diametral para las cuatro granulometrías, tres aditivos, dos estados y dos cargas.

Observando la figura anterior, para la granulometría C, el módulo resiliente aumenta con la adición de cal para ambas cargas. El cambio de módulo en las otras mezclas es difícil de establecer con solo observar la **Figura 9**.

Luego, se realizó un análisis de varianza estadístico a los datos con la técnica de ANOVA de 4 factores. En donde, se estableció como variable respuesta el módulo resiliente, como primer factor la granulometría en 4 niveles: GA, GB, GC y GD, el segundo factor los aditivos en 3 niveles: SF, CF y CAL, el tercer factor el estado de

acondicionamiento en 2 niveles: secas y acondicionadas (24 h/60 °C) y el cuarto factor la carga en 2 niveles: 500 N y 1500 ciclos.

Dentro del análisis estadístico se estudió la interacción entre los 4 factores para probar que no hay interacción. Después de este análisis se observó que los factores principales afectan directamente el módulo resiliente, pero no hay suficiente evidencia que indique que la interacción entre los factores afecta el módulo. Sin embargo, al parecer la interacción triple podría ser significativa. Estos resultados se resumen en la **Tabla 10**.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Valor F	P	Significancia
GRANULOMETRÍA	3	2378992	21.6271	<.0001	SI
ADITIVOS	2	12515591	170.6664	<.0001	SI
GRANULOMETRÍA*ADITIVOS	6	8801494	40.0066	<.0001	SI
ACONDICIONAMIENTO	1	6542550	178.4324	<.0001	SI
GRANULOMETRÍA*ACONDICIONAMIENTO	3	2249072	20.446	<.0001	SI
ADITIVOS*ACONDICIONAMIENTO	2	1551922	21.1625	<.0001	SI
GRANULOMETRÍA*ADITIVOS*ACONDICIONAMIENTO	6	4152168	18.8734	<.0001	SI
CARGA	1	2550035	69.5461	<.0001	SI
GRANULOMETRÍA*CARGA	3	11071	0.1006	0.9596	NO
ADITIVOS*CARGA	2	133412	1.8192	0.1644	NO
GRANULOMETRÍA*ADITIVOS*CARGA	6	83220	0.3783	0.8925	NO
ACONDICIONAMIENTO*CARGA	1	86251	2.3523	0.1264	NO
GRANULOMETRÍA*ACONDICIONAMIENTO*CARGA	3	71978	0.6543	0.5809	NO
ADITIVOS*ACONDICIONAMIENTO*CARGA	2	14263	0.1945	0.8234	NO
GRANULOMETRÍA*ADITIVOS*ACONDICIONAMIENTO*CARGA	6	92814	0.4219	0.8641	NO
Error	240	8800037			
C. Total	287	50034869			

Tabla 10. ANOVA de 4 factores para los datos de módulo resiliente ($\alpha = 5\%$).

Basados en estos resultados, para ahondar en el análisis, se decidió separar los datos en dos grupos como base el estado de acondicionamiento, y de esta forma determinar si la interacción triple de factores principales se mantiene significativa. Para ambos grupos, sin acondicionamiento y acondicionadas, la interacción triple entre

granulometría, aditivos y carga no es significativa, y la interacción doble entre granulometría y aditivos sí es significativa. Lo que nos lleva a realizar un análisis adicional para establecer los grupos de promedios iguales y promedios diferentes. Para esto se utilizó la técnica estadística de rangos múltiples de Tukey, fijando la carga. Para más detalles del análisis estadístico referirse al **Apéndice D**.

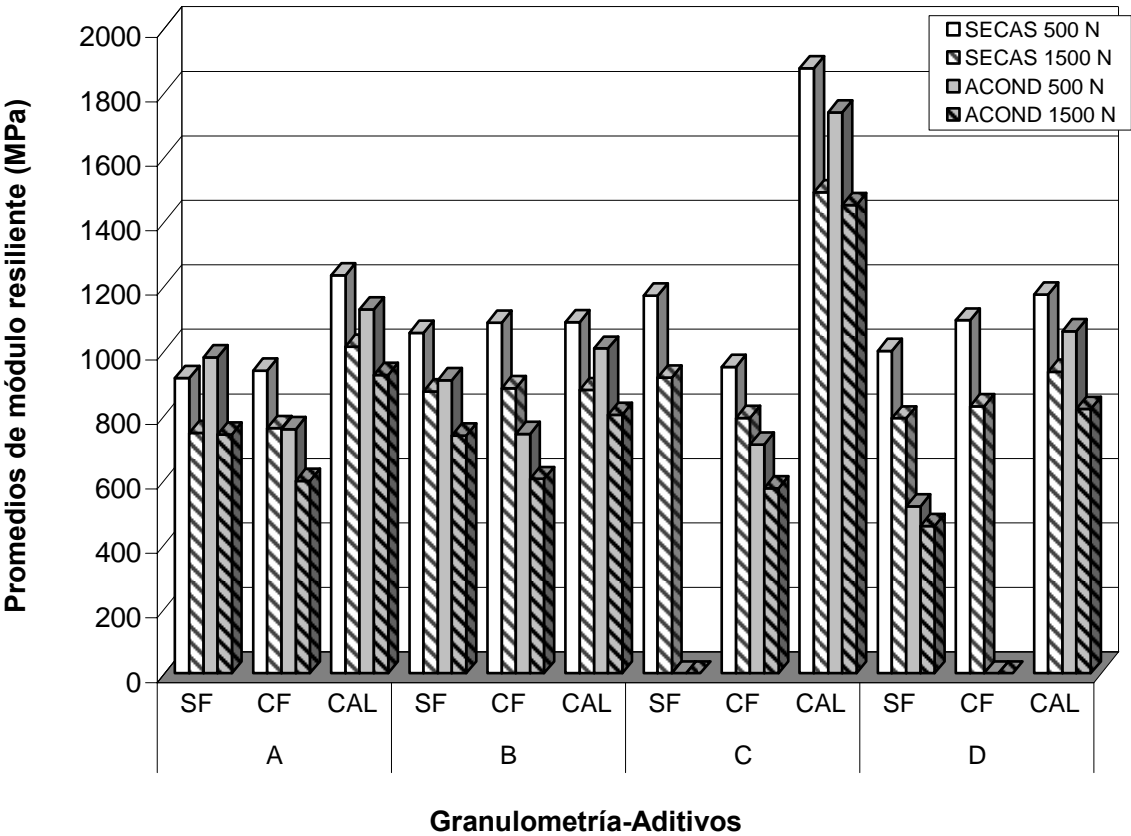


Figura 10. Módulo resiliente para las cuatro granulometrías, tres aditivos, dos acondicionamientos y dos cargas.

El módulo resiliente de la mezcla GC con 2% de cal fue diferente significativamente comparada con las otras combinaciones, haciendo a esta mezcla no susceptible al daño por acción del agua. Es importante mencionar que, GC sin fibra y GD con fibra no soportaron el acondicionamiento en agua, por lo que estos datos no están disponibles para el análisis estadístico y demostró que estas dos mezclas son muy susceptibles al daño por acción del agua. Estos resultados están resumidos en la **Figura 10**.

Luego de este análisis, se puede establecer el nuevo parámetro llamado Índice de Rigidez Retenida (IRR) para caracterizar la susceptibilidad de las mezclas al daño por acción del agua, que se calcula con la siguiente fórmula:

$$IRR(\%) = \frac{Mr_{acond}}{Mr_{seco}} \times 100$$

En resumen, el mejor IRR se dio en la mezcla GA sin fibra, lo cual es contradictorio con el comportamiento esperado de este tipo de mezclas. Además, las mezclas GC sin fibra y GD con fibra fueron inmediatamente descartadas para su uso en Costa Rica. Finalmente, con los datos obtenidos se puede establecer un IRR mínimo de 80% para estas mezclas como una especificación de calidad. Estos resultados se presentan en la **Figura 11**.

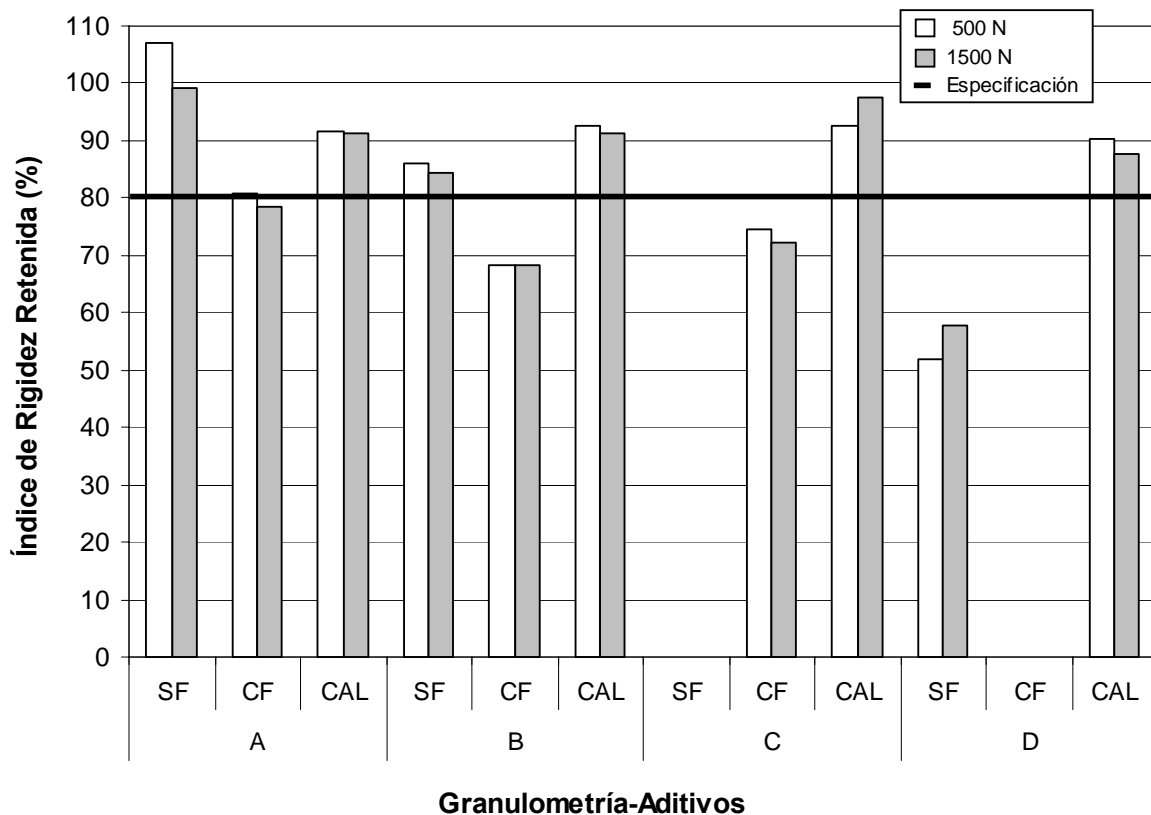


Figura 11. Índice de Rigidez Retenida (IRR) para todas las mezclas y la especificación mínima.

Ojo faltan los resultados de TD y permeabilidad

	G A			G B			G C			G D		
	Sin Fibra	0.5% Fibra	2% Cal	Sin Fibra	0.5% Fibra	2% Cal	Sin Fibra	0.5% Fibra	2% Cal	Sin Fibra	0.5% Fibra	2% Cal
Vacíos de aire (%)	22.6	22.1	22.4	21.6	22.2	24.3	21.0	21.4	22.6	22.0	25.5	22.8
Esfuerzo a tensión seco (kPa)	391	487	441	521	533	423	578	548	498	502	469	440
Esfuerzo a tensión acond (kPa)	384	395	483	433	439	429	451	407	424	419	389	444
Resistencia retenida (%)	98	81	109	83	82	101	78	74	85	84	83	101

Resultados de tensión diametral

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Las conclusiones obtenidas de este estudio son las siguientes:

1. La fuente de agregados producidos en Costa Rica utilizados para la fabricación de mezclas densas se puede utilizar para la producción de mezclas drenantes porque cumple con los criterios de las especificaciones internacionales.
2. Existe una pequeña diferencia (máximo de 1.2%) en el contenido de asfalto óptimo para las cuatro granulometrías, el VMA se mantuvo constante como también el VFA. El 0.5% de fibra de celulosa afectó la densidad, reduciéndola en 16 kg/m³. Los contenidos de asfalto de las mezclas drenantes son similares a los contenidos de asfalto utilizados en la producción de las mezclas densas. La única mezcla susceptible al escurrimiento es la GA sin fibra pero con la adición de la fibra se mejoró este porcentaje de escurrimiento.
3. La susceptibilidad a la deformación permanente de las mezclas parece ser influenciada significativamente demostrado estadísticamente por la composición de la mezcla y las condiciones ambientales como la temperatura y las repeticiones de carga. La mezcla con la mayor deformación permanente fue la GA sin fibra, que está directamente relacionado con la mayor presencia de asfalto “suelto”, reflejado en el ensayo de escurrimiento.
4. Se puede establecer una especificación de calidad para la deformación permanente de un máximo de 6 mm para un percentil de 82%, luego del análisis estadístico. Las mezclas presentan mayores deformaciones para el mayor número de ciclos de carga con la consecuente pérdida de la vida útil, el aumento

de las cargas de tránsito trae además un aumento en los costos de mantenimiento de estas capas.

5. La adición de la fibra de celulosa a las mezclas sí mejoró la susceptibilidad a la deformación permanente de la mayoría de las mezclas estudiadas, que se refleja en la menor variabilidad de los datos, con la excepción de GD a 70 °C.
6. Se observó una diferencia significativa en la mezcla GC con 2% de cal en el módulo resiliente comparada con las otras mezclas, aunque este efecto no fue significativo en las otras mezclas.
7. La adición de la fibra de celulosa afectó significativamente la rigidez de las mezclas reflejado directamente en el índice de Rigidez Retenida (IRR) donde las mezclas que soportaron el periodo de acondicionamiento tuvieron los menores IRR. Estos efectos se dan por la afinidad de la fibra de celulosa al agua que aumenta la susceptibilidad de las mezclas drenantes a los efectos climáticos.
8. La fase de acondicionamiento de las mezclas fue estadísticamente significativa en el módulo resiliente; estos resultados son buenos indicadores de la susceptibilidad al daño por acción del agua sobre las mezclas drenantes, que se refleja en el IRR y que permite establecer este como una especificación de calidad con un mínimo de 80%.

Recomendaciones

Basados en los resultados de esta investigación, las recomendaciones son las siguientes:

1. Añadir más fuentes de agregados a este estudio para asegurar el uso de las mezclas drenantes en las distintas autopistas del país, como ejemplo, Interamericana Norte o la Costanera Sur, con el objetivo de mejorar la seguridad al transitar por estas carreteras. También con el objetivo de establecer las

especificaciones de calidad para los agregados para la producción de las mezclas drenantes.

2. El uso del asfalto modificado en este tipo de mezclas es importante para obtener buenos módulos, por lo que es muy importante que en Costa Rica se considere expandir el mercado de asfaltos y empezar a producir asfaltos modificados.
3. Realizar un estudio de campo, para establecer una correlación entre la deformación permanente medida con el APA y la colmatación de los vacíos que se presenta en las mezclas drenantes, con el fin de predecir la vida útil y establecer el programa de mantenimiento.
4. Finalmente, se recomiendan las mezclas GB – GC sin fibra, pues presentaron una deformación permanente aceptable, y las mejores mezcla GA – GB – GC – GD con el 2% de cal pero la mejor de este grupo es la GC pues presentó el mayor módulo.

REFERENCIAS

- (1) Mallick. R. B., P. S. Kandhal., L. A. Cooley Jr. y D. E. Watson. Design, construction and performance of new generation open graded friction courses. En el *Reporte N° 2000-01 NCAT*. Auburn. 2000.
- (2) Cooley Jr., L.A., E. R. Brown and D. E. Watson. Evaluation of OGFC mixtures containing cellulose fibers. En el *Reporte N° 2000-05 NCAT*. Auburn. 2000.
- (3) Ramírez L., Arce M., Elizondo F. y Jiménez M. Mezclas drenantes. En el *13° Congreso Ibero-latinoamericano del Asfalto*. Costa Rica. 2005.
- (4) Carsten Bredahl Nielsen. Durability of porous asphalt Internacional Experience. *Nota Técnica 41 Instituto Danés de Caminos*. Dinamarca. 2006.
- (5) Asociación Australiana de Pavimentos Asfálticos. *National asphalt specification*. Australia. 2004. p. 22.
- (6) Smith. R. W., J. M. Rice and S. R. Spelman. Design of open-graded asphalt friction courses. *Reporte FHWA-RD-74-2*. Federal Highway Administration. Estados Unidos. 1974.
- (7) Sequeira W. y Elizondo F. Influencia de la granulometría en la volumetría de mezclas SMA. *Informe Final*. LanammeUCR, Costa Rica. 2007.
- (8) Kuennen Tom. A new era for permeable pavements. Artículo Revista Better Roads. Estados Unidos. 2003.
- (9) Kandhal. P. S. y R. B. Mallick. Open-Graded friction course: State of the Practice. En la circular de Research Transportation número E-C005. TRB. Washington D. C. 1998.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM (2004). "Standard Practice for Open-Graded Friction Course (OGFC) Mix Design. Designation: D 7064-04. American Society for Testing and Materials. USA. 2004.
2. María Isabel González. "Análisis Estadístico con JMP. Una Introducción". Editorial Universidad Estatal a Distancia. Primera Edición. 2004.