Reporte de Investigación LM- PI - PV- IN- 03d - 04

Mezclas de matriz de agregado grueso

INFORME DE AVANCE

Investigador principal

Ing. Laura Ramírez

Investigadores asociados

Ing. Mario Arce
Ing. Fabián Elizondo

Agosto 2004

MEZCLAS CON GRADUACIÓN DISCONTINUA

1. MARCO TEÓRICO[1]

A principios de la década de los 60's la industria europea del asfalto reconoció la necesidad de desarrollar pavimentos que fueran resistentes a la deformación plástica, más resistentes al desplazamiento, a la resistencia al pulimento, al desgaste superficial y a diversos factores asociados con tráfico pesado y altos volúmenes de tránsito. Como respuesta ante tal necesidad surgieron las mezclas de graduación discontinua, conocidas como mezclas de matriz de agregado grueso (SMA). En Europa el uso de estas mezclas se ha popularizado para carreteras de alto nivel de tránsito, pistas de aeropuertos y zonas portuarias, y su uso se está extendiendo por todo el mundo.

Las mezclas discontinuas proporcionan superficies de ruedo muy homogéneas, y una buena resistencia al deslizamiento, con un nivel de ruido relativamente bajo. Son mezclas resistentes a la deformación plástica, gracias al alto contenido de agregado grueso (al menos un 70%); además, la gran cantidad de mastique asfáltico las convierte en mezclas más resistentes al agua. Dado el alto contenido de ligante asfáltico de estas mezclas, es posible que se produzca escurrimiento del mismo, por lo que es necesario el uso de un inhibidor de escurrimiento, tal como lo es la fibra de celulosa. También se han usado ligantes asfálticos modificados con polímeros para mejorar las propiedades mecánicas de estas mezclas y ayudar a evitar el escurrimiento.

Son varios los países que han optado por el uso de mezclas discontinuas del tipo SMA, tal es el caso de la República Checa, que desde 1991 empezó a popularizar el uso de estas mezclas y ya para 1995 se producían 230.000 toneladas por año. Aplican relleno mineral calizo y, como inhibidor del escurrimiento de asfalto, usan la fibra de celulosa. La experiencia checa ha encontrado que un adecuado procedimiento de diseño, producción y compactación de las mezclas SMA produce pavimentos con alta resistencia al deslizamiento, durables y con una gran resistencia a la deformación.

En Dinamarca, desde 1982 se han usado estas mezclas en vías de alto volumen y con un alto porcentaje de vehículos pesados, en áreas industriales y otras áreas sometidas a altas cargas. Aquí se diseña con un bajo contenido de vacíos y se espera obtener al menos un aumento del 30% en la vida de servicio del pavimento, en comparación con las mezclas densas convencionales. Problemas de desprendimiento de agregados y deformaciones plásticas (roderas) han sido solamente observados en pocos casos. Si los vacíos de aire son muy altos, puede existir riesgo de desprendimiento prematuro de agregados , y si la proporción de agregado fino es muy alta, se pueden presentar problemas de deformación plástica (roderas).

[1] European Asphalt Pavement Association, Heavy duty surfaces: The argument for SMA, 1998

En Alemania, su uso se ha popularizado desde 1965-1970. Se establece el uso de un inhibidor de escurrimiento y el diseño se realiza mediante la metodología Marshall. Para su compactación en campo se prohíbe el uso de compactadores neumáticos y el uso de compactadores vibratorios requiere de un especial cuidado.

En Hungría se han usado estas mezclas desde 1983; en el año de 1992 se tenían aproximadamente 120 km de carreteras con este tipo de capas de rodamiento. Se especifica el uso de un relleno mineral calizo y de la fibra de celulosa como inhibidor de escurrimiento.

En los Países Bajos se ha aplicado desde 1987. Se estima que anualmente se producen 0.6 millones de toneladas, lo que equivale al 8% de la producción total. Se usa un relleno mineral calizo y se establece el uso de un inhibidor de escurrimiento, tal como la fibra de celulosa o cualquier otro que demuestre su efectividad. Disponen de cuatro distintos tipos de mezclas SMA, que difieren unos de otros en la graduación granulométrica, su aplicación depende de las condiciones de tránsito y carga. El nivel de ruido disminuye aproximadamente de 1 a 3 dB con respecto al concreto asfáltico convencional (granulometría densa).

En Estados Unidos se empezó a usar desde 1991 y su uso es cada día más común. En algunos estados como Georgia y Maryland es el tipo de mezcla asfáltica comúnmente usada como superficie de ruedo. Las recomendaciones preliminares de diseño de mezcla se derivaron de la experiencia europea. Basados en esta experiencia y en las evaluaciones hechas a aproximadamente 100 proyectos de SMA, el NCAT (The National Center for Asphalt Technology) ha desarrollado recientemente algunas recomendaciones, entre las que figuran el uso de un inhibidor de escurrimiento, ya sea fibras o modificantes poliméricos. Se propone el uso del compactador giratorio para la preparación de especímenes (método volumétrico Superpave). En cuanto al contenido de vacíos, se establece un 4% para diseño, el cual puede incrementarse a un 5 ó 6% para vías con alto volumen de camiones.

Más recientemente se han empezado a aplicar mezclas SMA en Argentina, donde en el año 2000 se empezó la repavimentación de la Autopista Ricchieri. En este proyecto se usó ligante asfáltico modificado con un polímero SBS, fibra de celulosa y relleno mineral de origen calcáreo. Los resultados obtenidos fueron buenos, con altos valores de resistencia retenida, una adecuada textura y adecuadas propiedades volumétricas.

2. INTRODUCCIÓN

Dado los problemas que se han presentado en las calles de nuestro país, debido a la poca resistencia a la deformación plástica, de las mezclas utilizadas en las capas de rodamiento, ha surgido la necesidad de implementar en nuestro medio el uso de mezclas más resistentes a la deformación.

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

Dentro de este proyecto se analizará la influencia de ciertos parámetros de los agregados y del asfalto, en el desempeño de estas mezclas, como por ejemplo la viscosidad, caras fracturadas, partículas planas y elongadas, coeficiente de pulimentos de los agregados y se analizarán diferentes tipos de aditivos tales como: fibras de celulosa, cal y polímeros.

Los diseños de mezcla se harán utilizando la metodología Marshall y se utilizará la pista de ensayo de laboratorio (APA) para determinar la deformación permanente a escala de laboratorio, se analizará la resistencia al efecto del agua mediante el ensayo de resistencia retenida a la tensión diametral y se detrminarán los módulos resilentes a la tensión diametral.

El estudio consta de 3 fases. Cada fase se ha ido desarrollando por etapas. La primera y la segunda fase ya se han concluido y la tercera fase está en su etapa inicial.

La primera fase contó con cuatro etapas. En la primera etapa, se trabajó con dos granulometrías y distintos porcentajes de fibra y de polímero. Se utilizó fibra de celulosa y un polímero del tipo plastómero, definido como una poliolefina modificada. En esta primera etapa se seleccionó el porcentaje óptimo de fibra a utilizar.

En la segunda etapa se trabajó con otras dos granulometrías las cuales no dieron un buen desempeño.

Para la tercera etapa se plantearon 8 nuevas granulometrías de las cuales se seleccionó una. Con la granulometría seleccionada, se moldearon especímenes de 15.0 cm de diámetro y 7.5 cm de espesar para ser ensayadas en la pista de ensayo de Georgia (APA).

En la cuarta etapa se realizaron cuatro nuevos diseños Marshall, utilizando la granulometría seleccionada en la tercera etapa. Los nuevos diseños incluyen:

- Diseño Marshall para el 4% de vacíos utilizando fibra de celulosa al 0.5% y dos distintos polímeros: EGA y SBS, dosificados al 1.5% y 3% por peso de asfalto respectivamente.
- Diseño Marshall para el 5% de vacíos sin fibra de celulosa y los polímeros EGA y SBS, dosificados al 1.5% y 3% por peso de asfalto respectivamente.

Además incluye ensayos de desempeño de la mezcla asfáltica tales como deformación plástica medida en la pista de laboratorio de Georgia, resistencia a la tensión diametral y la obtención del módulo resilente mediante el ensayo de tensión indirecta. Luego de analizar los resultados de desempeño, se selecciona el polímero P1 para la siguiente fase.

La segunda fase contempla variaciones con respecto a la primera fase en lo que a materia prima se refiere, específicamente en la fuente de agregado y el tipo de asfalto.

En la figura 1 se muestra el esquema experimental general del proyecto.

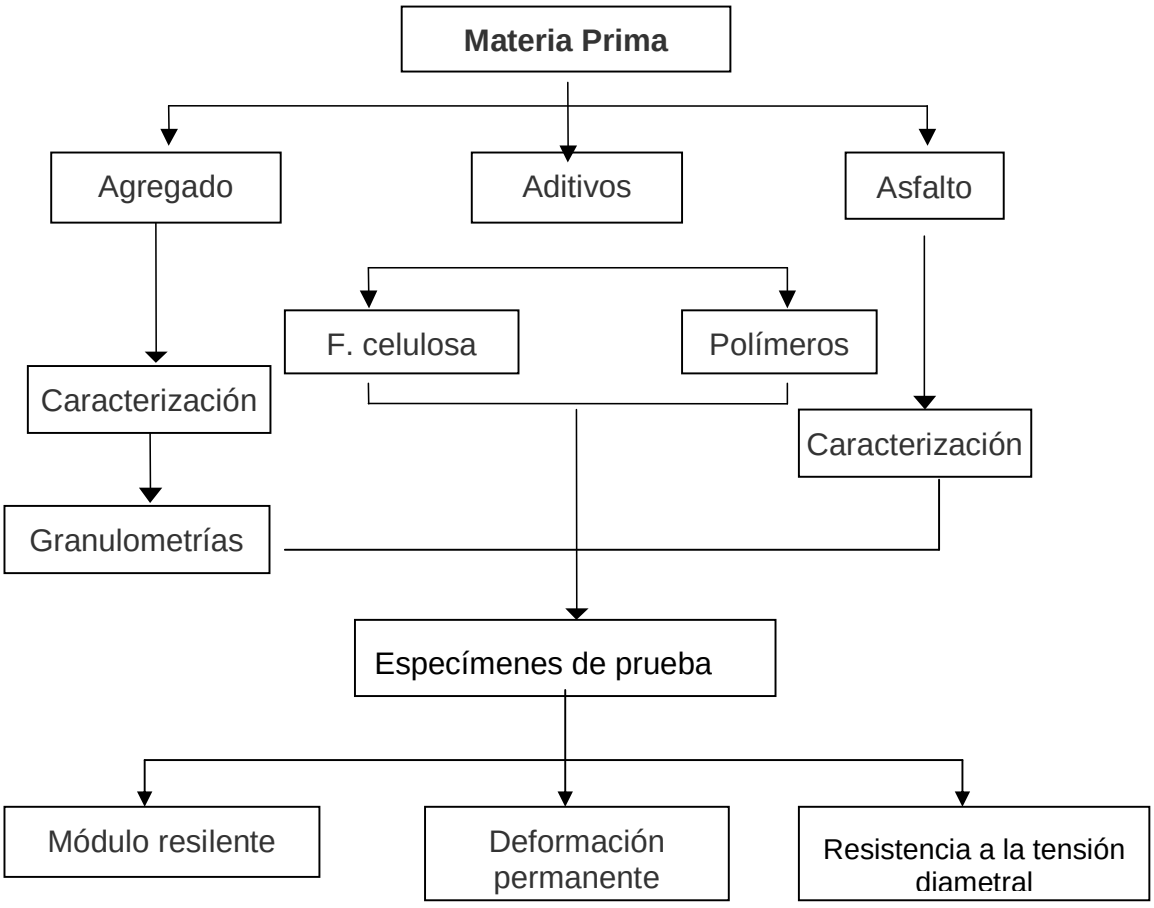


Figura No. 1: Esquema experimental

I FASE DEL PROYECTO

3. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

En esta fase se utilizó un solo tipo de agregado, un solo tipo de ligante asfáltico y tres distintos aditivos: fibra de celulosa, un polímero del tipo EGA y una poliolefina modificada.

3.1 Ligante asfáltico

En la Tabla No.1 se presenta la caracterización físico-química del asfalto utilizado.

Tabla No. 1: Caracterización físico-química del ligante asfáltico

Propiedad	Unidad	Ligante	Normativa NCR 248:1997	Especificación AASHTO M226-80
Parámetros de pureza y seguridad				
Punto de chispa	°C	255	Mín. 232	Mín. 232
Solubilidad en tricloroetileno	%	99.97	Mín. 99.00	Mín. 99.00
Pérdida de masa en RTFO	%	0.69	-	-
Pérdida de masa en TFO	%	0.55	Máx. 0.5	Máx. 0.5
Gravedad específica a 25°C	-	1.037	-	-
Parámetros de consistencia				
Penetración a 25°C	1/10 mm	80	Mín. 50	Mín. 50
Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	2411	2400-3600	2400-3600
Viscosidad absoluta a 125°C	cSt	844	-	-
Viscosidad cinemática a 135°C	cSt	488	Mín. 350	Mín. 350
Viscosidad cinemática a 145°C	cSt	308	-	-
Viscosidad absoluta a 60°C TFO	Poise	5952	-	Máx. 12000
Parámetros de susceptibilidad al envejecimiento y susceptibilidad térmica				
Indice de susceptibilidad térmica VTS	-	3.37	3.30-3.90	-
Razón de viscosidades	-	2.5	Máx. 3.0	-

El ligante utilizado clasifica, según el criterio de viscosidades, como un AC-30, y se encuentra en el rango bajo de la especificación.

En cuanto a los parámetros de pureza, seguridad, susceptibilidad al envejecimiento y susceptibilidad térmica, el único parámetro que incumple la especificación, es el de pérdida de masa por calentamiento en el horno rotatorio de película delgada (TFO).

En la Tabla No. 2 se presenta la caracterización reológica del ligante.

Tabla No. 2: Caracterización reológica

Ensayo	**Unidad**	**Temperatura**	**Ligante**
Parámetro de resistencia a la deformación plástica			
G*/senδ (original)	KPa	82°C	0.227
		70°C	0.708
		58°C	3.054
Angulo de fase (original)	°	82°C	87.7
		70°C	86.3
		58°C	81.7
G*/senδ (RTFO)	KPa	82°C	0.532
		70°C	1.883
		58°C	7.985
Angulo de fase (RTFO)	°	82°C	84.2
		70°C	80.9
		58°C	75.8
Parámetro de tendencia al agrietamiento por fatiga			
G*senδ (PAV)	KPa	28°C	1270
		22°C	2497
		16°C	5152
Angulo de fase (PAV)	°	28°C	52.3
		22°C	48.0
		16°C	44.5

Según los ensayos reológicos, el ligante clasifica, de acuerdo con la metodología SUPERPAVE para determinación del grado de desempeño, como un PG-64 (19), donde 64 representa la temperatura máxima de desempeño y 19 representa la temperatura intermedia de desempeño.

En la Tabla No.3 se presentan algunas propiedades de los ligantes modificados con los polímero P1 y P3.

Tabla No. 3: Algunas propiedades de los ligantes modificados con los polímeros P1 y P3.

Parámetro	**Modificado con P1**	**Modificado con P3**
Viscosidad a 60°C (Poise)	N.I	N.I
Viscosidad a 125°C (Poise)	22.5	21.2
Viscosidad a 135°C (Poise)	12.8	13.0
Viscosidad a 145°C (Poise)	7.6	9.1
Temp.de mezclado (°C)	176-182	192-200
Temp.de compactación (°C)	164-169	177-183

3.2 Agregado

El agregado utilizado proviene de la región de Guápiles. Para poder ser utilizado en la producción de mezclas de matriz de agregado grueso debe cumplir con los requerimientos establecidos en la AASHTO MP8-00 *Standard specification for designing stone matrix asphalt (SMA).*

En la Tabla No.4 se presenta la caracterización del agregado.

Tabla No. 4: Caracterización de los agregados

		Requerimientos AASHTO MP8-00	
Ensayo	**Valor**	**Espec. mín**	**Espec. máx.**
Agregado grueso			
Gbs	2.62	-	-
Absorción (%)	1.7	-	2.0
Abrasión tipo A (%)	19.1	-	30
Abrasión tipo C (%)	32.3	-	30
Caras fracturadas (1 cara)	86	100	-
Partículas planas y elongadas -3 a 1 -5 a 1	 6.9 0.9	 - -	 20% 5%
Agregado fino			
Gbs	2.64	-	-
Absorción (%)	2.0	-	-
Límites de attemberg	NP	-	-
Vacíos no compactados (%)	36.6	-	-
Equivalente de arena	96	50 (*)	-
Disgregabilidad en sulfato de sodio (%)	5.65	-	15

(*) Especificación de acuerdo a la normativa Argentina

3.2.1 Coeficientes de pulimento acelerado

Basados en las normas NLT 174-93 *Pulimeto acelerado de los áridos*, NLT-175-88 *Coeficiente de resistencia al deslizamiento con el péndulo del TRRL*, AASHTO T279-91 *Accelerated polishing of aggregates using the British wheel* y la AASHTO T278-90 *Surface frictional properties using the British Pendulum tester*, se determinó para la fuente utilizada en este estudio el coeficiente de pulimento.

En la Tabla No.5 se muestran la ubicación en Coordenadas Lambert, la fuente y el tipo de tajo del cual se obtiene el material utilizado en el estudio.

Tabla No. 5: Ubicación y características generales de la fuente

Región	Fuente	Ubicación	Tipo de tajo
Guápiles	Río Costa Rica	5521 E 2459 N	Depósito aluvial de origen ígneo

En la Tabla No.6 se presentan los resultados de pulimento obtenidos para esta fuente.

Tabla No. 6: Coeficiente de pulimento acelerado

		Fricción inicial		Fricción final (PSV)	
Fuente	**N**	**Promedio**	**Desv. Est**	**Promedio**	**Desv. Est**
Río Costa Rica	6	0.71	0.06	0.64	0.05

3.3 Aditivos

Se utilizarán como modificantes la fibra de celulosa, y dos distintos polímeros.

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 absorberá gran parte de los esfuerzos a los que se ve sometido el asfalto y es el factor clave que mejora el desempeño de este[2].

3.3.1 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.

Para este estudio se utilizó la fibra en su presentación granular (ver figura 2), 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.

[2] Dynasol. Beneficio del uso de copolímeros estireno-butadieno en la modificación de asfaltos.

Figura No. 2: Fibra de celulosa en presentación granular

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

3.3.2 Polímero

3.3.2.1 Polímero EGA

Se denominará para efectos del estudio como P1 al polímero del tipo EGA, Etilen Glicidil Acrilato, el cual se incorporó directamente al asfalto y se mezcló durante 2 horas a 150°C. Luego de esto, se dejó en el horno a 150°C por 24 horas.

Será dosificado al 1.5% por peso total de asfalto.

Figura No. 3: Polímero EGA (P1)

3.3.2.2 Plastómero

El plastómero utilizado es una poliolefina modificada, el cual para efectos del estudio se denominará P2. Se dosificó en dos porcentajes 2 y 4% por peso total de asfalto y se mezcla durante un tiempo determinado, según el asfalto, con agitador mecánico a una temperatura de 150°C. Para determinar el tiempo de mezclado asfalto-polímero es necesario darle seguimiento a alguna propiedad reológica (puede ser la viscosidad) y determinar en qué momento la curva sigue un comportamiento asintótico.

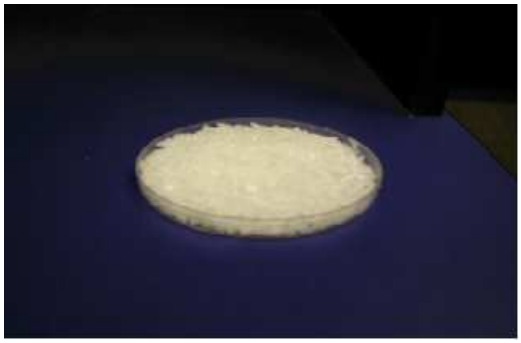


Figura No. 4: Plastómero (P2)

3.3.2.3 Elastómero

Se utilizó un elastómero del tipo SBS (estireno, butadieno, estireno), el cual para efectos del estudio se denominará P3. Este polímero se dosificó al 3% por peso de asfalto. El fabricante recomienda que la temperatura normal de operación deber ser entre 157 y 163°C y debe tenerse agitación ya sea mecánica o con bombas de recirculación. No se debe permitir que la temperatura de almacenaje exceda los 204°C y no debe exceder de 193°C por más de dos horas.

El SBS se incorporó directamente al asfalto y se mezcló durante 2 horas a 150°C. Luego de esto, se dejó en el horno a 150°C por 24 horas.

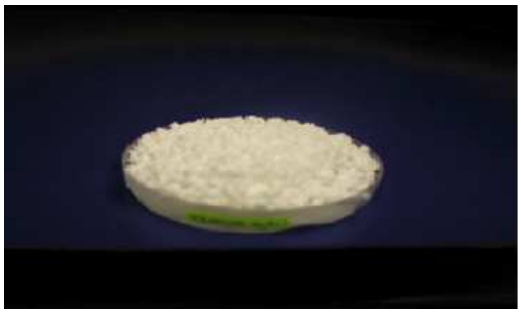


Figura No. 5: Elastómero (P3)

3.4 Especificaciones

De acuerdo con la normativa Argentina los diseños de mezcla deben cumplir con los siguientes requerimientos:

Tabla No. 7: Especificaciones para los diseños de mezcla[3]

Parámetro	**Especificación**
Compactación Marshall	50 golpes por cara
Compactación Superpave	75 a 100 giros dependiendo del proyecto
Vacíos de aire	4% (climas templados y cálidos) 2% para climas fríos
Vacíos en el agregado mineral (VMA)	No inferior a 17%
Vacíos en el agregado grueso (VCA %) (AASHTO MP8)	Menor que VCA $_{DRC}$ (condición envarillada seca)
Contenido de ligante por peso total de mezcla	Mínimo 6.5%
Contenido de fibras celulósicas por peso total de mezcla	Mínimo 0.3%
Escurrimiento de ligante a la temperatura de mezclado (AASHTO T305)	Máximo 0.3%

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Primera etapa

La figura No.6 muestra el esquema experimental de trabajo. En esta etapa se utilizaron dos granulometrías, denominadas granulometría 1 y granulometría 2. En la Tabla No. 8 se observa la distribución por tamices y en el Gráfico No.1 se muestran ambas curvas.

[3] Especificaiones Técnicas particulares Stone mastic asphalt (SMA), Pablo E. Bolzán, Mayo 2002

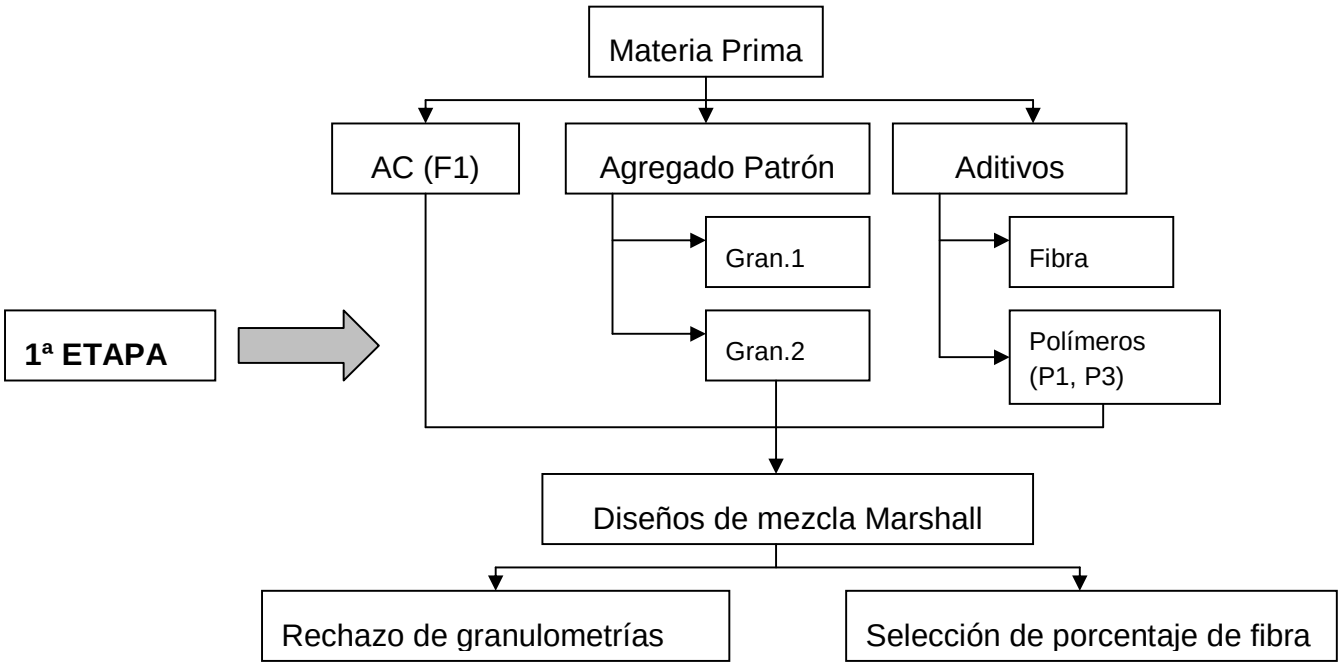
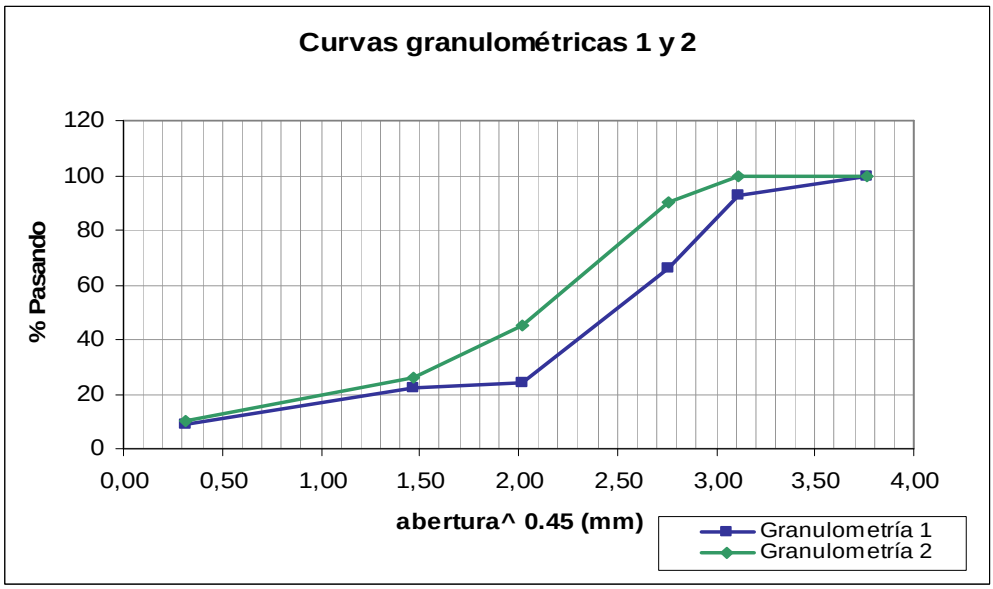


Figura No. 6: Esquema experimental primera etapa. Fase I

Tabla No. 8: Granulometrías 1 y 2.

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

Gráfico No. 1: Curvas granulométricas 1 y 2

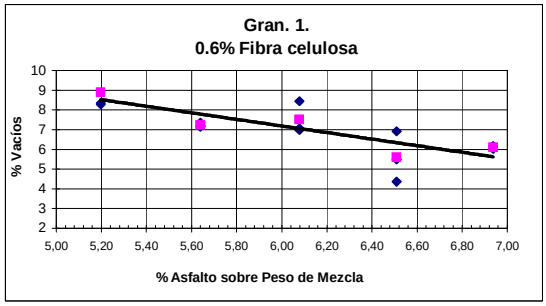


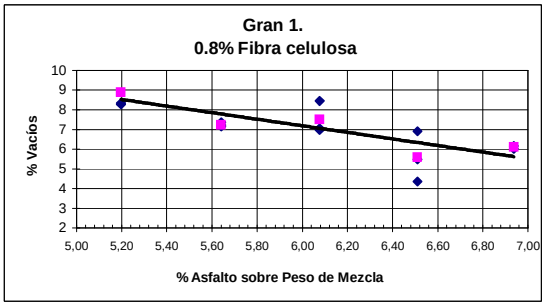
Con ambas granulometrías se hicieron 3 diseños de mezcla; dos de ellos utilizando fibra de celulosa al 0.6% y al 0.8%, y el tercer diseño, para ambos casos, se hizo utilizando el polímero P2, dosificado al 4% en la granulometría 1 y al 2% en la granulometría 2.

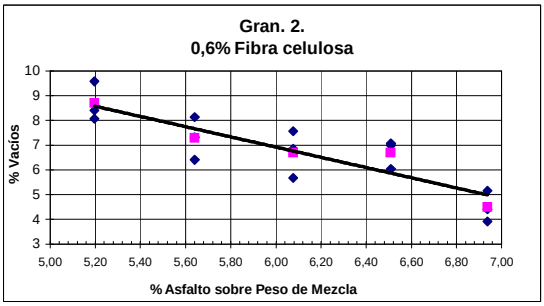
Todos los diseños se hicieron con 50 golpes del mazo Marshall y al 4% de vacíos. Se hicieron cinco puntos para el diseño: 5.5, 6.0, 6.5, 7.0 y 7.5% de asfalto por peso total de agregado.

Con ninguno de los seis diseños se logró obtener el 4% de vacíos, como se muestra en los gráficos No.2 y No.3.

Gráfico No. 2: Curvas de diseño para el parámetro de vacíos de aire, utilizando fibra de celulosa. Granulometrías 1 y 2.







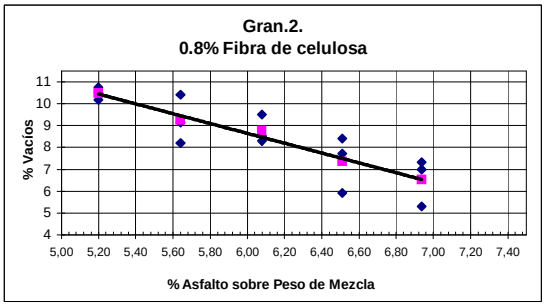
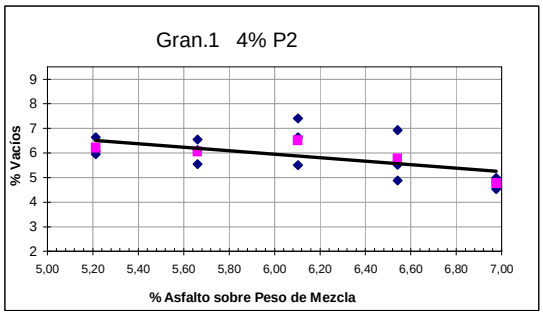
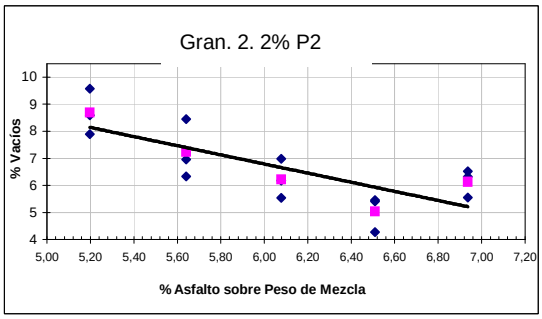


Gráfico No. 3: Curvas de diseño para el parámetro de vacíos de aire, utilizando el polímero P2. Granulometrías 1 y 2





Para alcanzar el 4% de vacíos es necesario utilizar porcentajes de asfalto muy altos, superiores a 7.5% PTA, lo cual hace que las mezclas no cumplan con el ensayo de escurrimiento, el cual define 0.3% como valor máximo permitido.

En esta primera etapa se seleccionó el porcentaje de fibra a utilizar, el cual fue de un 0.5% por peso total de agregado. Ninguna de las granulometrías fue seleccionada ya que no dieron buenos resultados.

4.2 Segunda etapa

En la figura No.7 se presenta el esquema experimental de trabajo. Se utilizaron dos nuevas granulometrías, denominadas para efecto del estudio granulometrías 3 y 4.

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

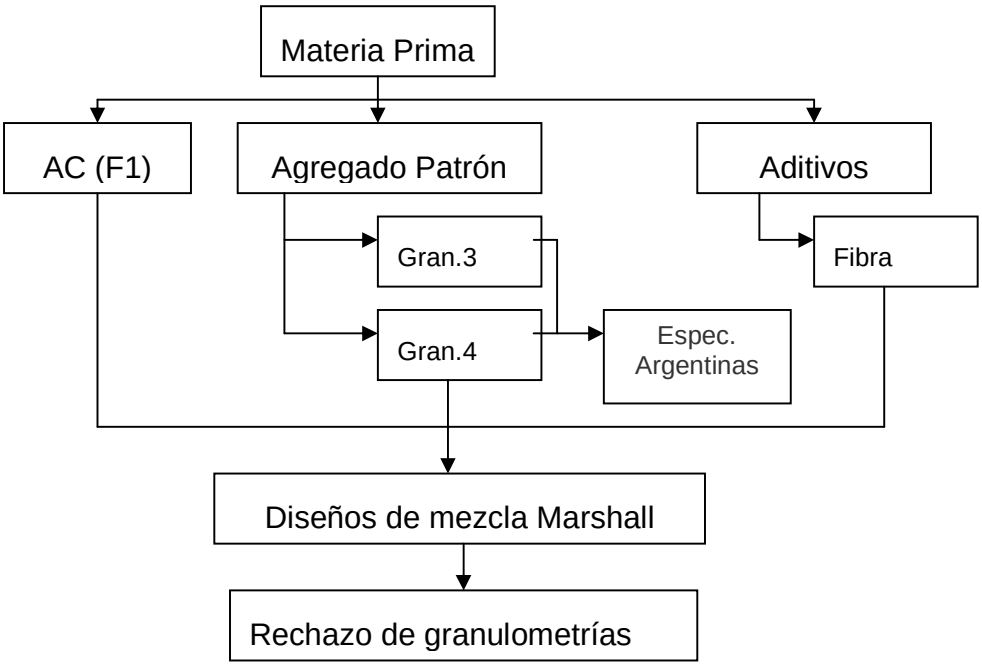


Figura No. 7:Esquema experimental segunda etapa. Fase I

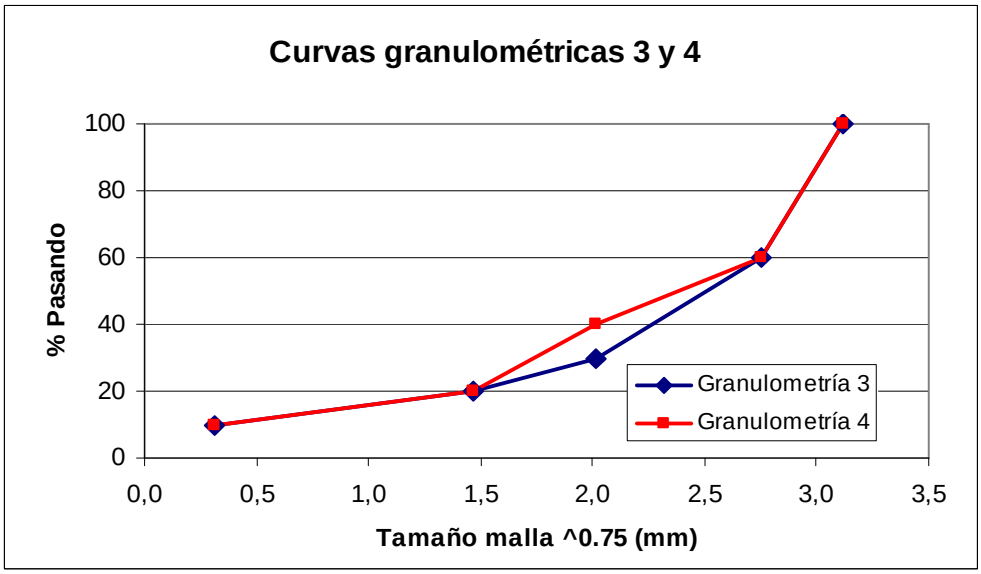
En la Tabla No.9 se presentan los porcentajes pasando para cada malla y los límites granulométricos.

Tabla No. 9: Granulometrías 3 y 4.

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

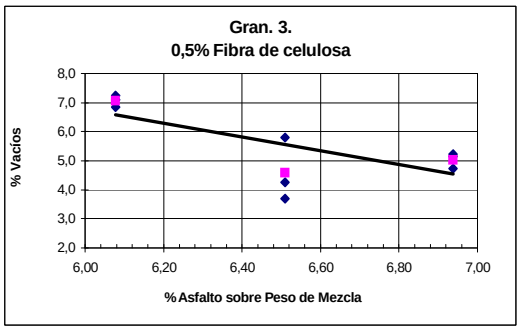
En el Gráfico No.4 se presentan ambas curvas granulométricas.

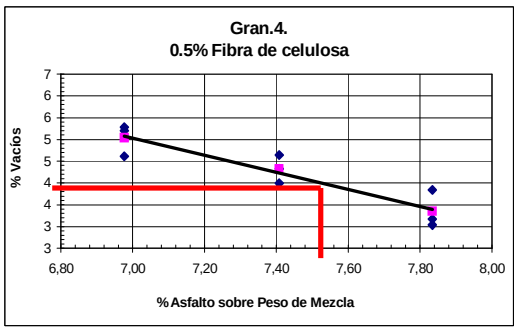
Gráfico No. 4: Curvas granulométricas 3 y 4.



Con ambas granulometrías se hizo un diseño de mezcla Marshall utilizando fibra de celulosa al 0.5% por peso de agregado. Para el diseño con la granulometría 3 se usaron tres puntos de asfalto: 6.5, 7.0 y 7.5% por peso total de agregado. Para el diseño con la granulometría 4 se utilizaron porcentajes mayores: 7.5, 8.0 y 8.5% por peso total de agregado. En el Gráfico No.5 se observan las curvas del diseño para el parámetro de vacíos de aire.

Gráfico No. 5: Curvas de diseño para el parámetro de vacíos de aire, utilizando fibra de celulosa al 0.5% PTA. Granulometrías 3 y 4.





Con la granulometría 3 y el rango de asfalto de 6.5 a 7.5% PTA, no se logró obtener el 4% de vacíos. Fue por este motivo, que se planteó el uso de una nueva granulometría, la granulometría 4. A esta granulometría se le aumentó el

porcentaje pasando la malla No.4, en comparación con el porcentaje pasando la malla No.4 de la granulometría 3. Esto con la finalidad de que al haber más material fino, este se encargara de rellenar vacíos. Además de esta modificación a la curva granulométrica, se aumentó el rango de asfalto para el diseño, utilizando un rango entre 7.5 y 8.5% de asfalto PTA .

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

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

4.3 Tercera etapa

En la figura No. 8 se muestra el esquema experimental de trabajo.

En esta etapa se analizaron 8 nuevas granulometrías, denominadas para efectos del estudio granulometría 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12. Se hicieron diseños de mezcla al 4% de vacíos, con 0.5% de fibra de celulosa para cada una de las granulometrías. En la Tabla No.10 se muestran los porcentajes pasando para cada malla.

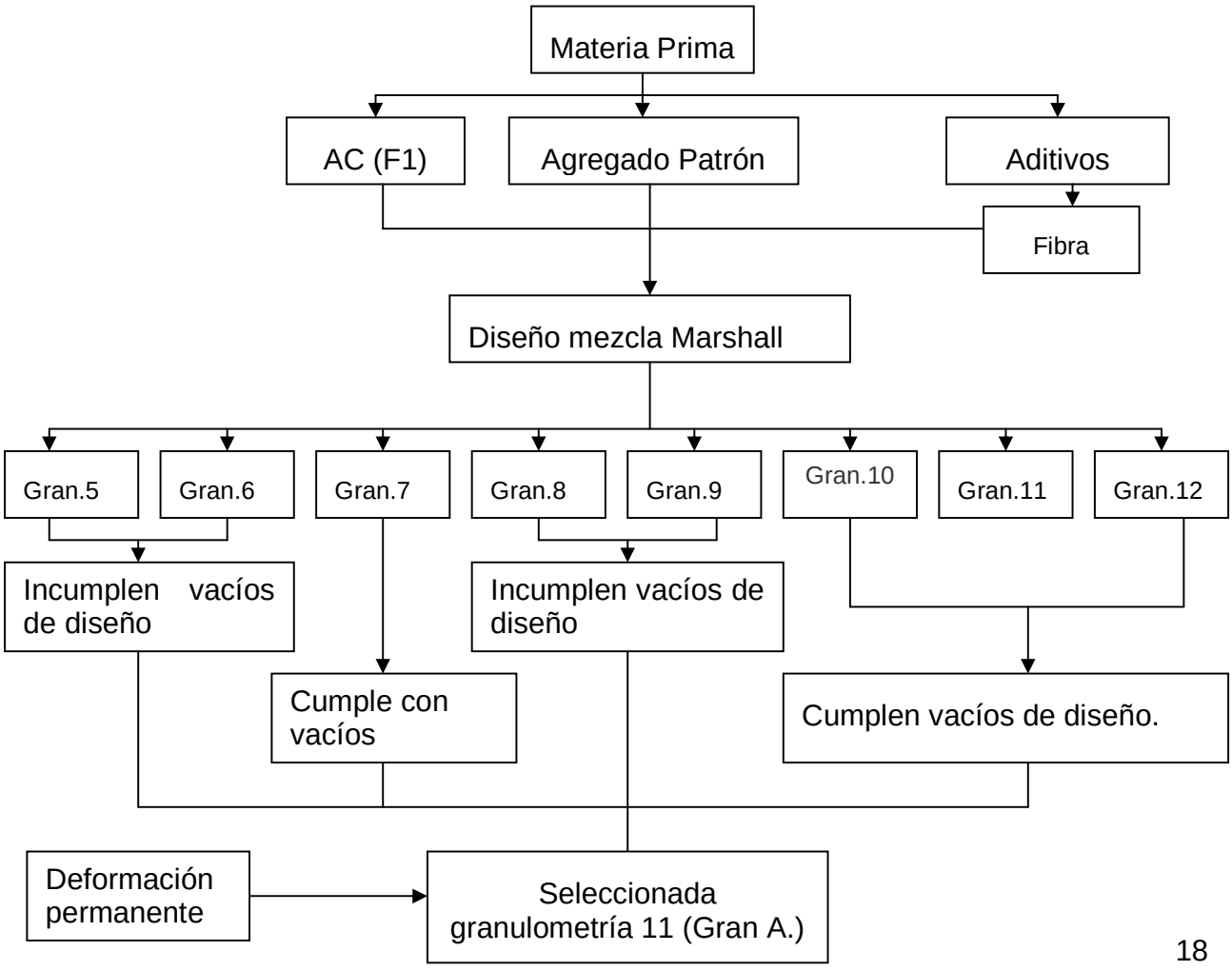
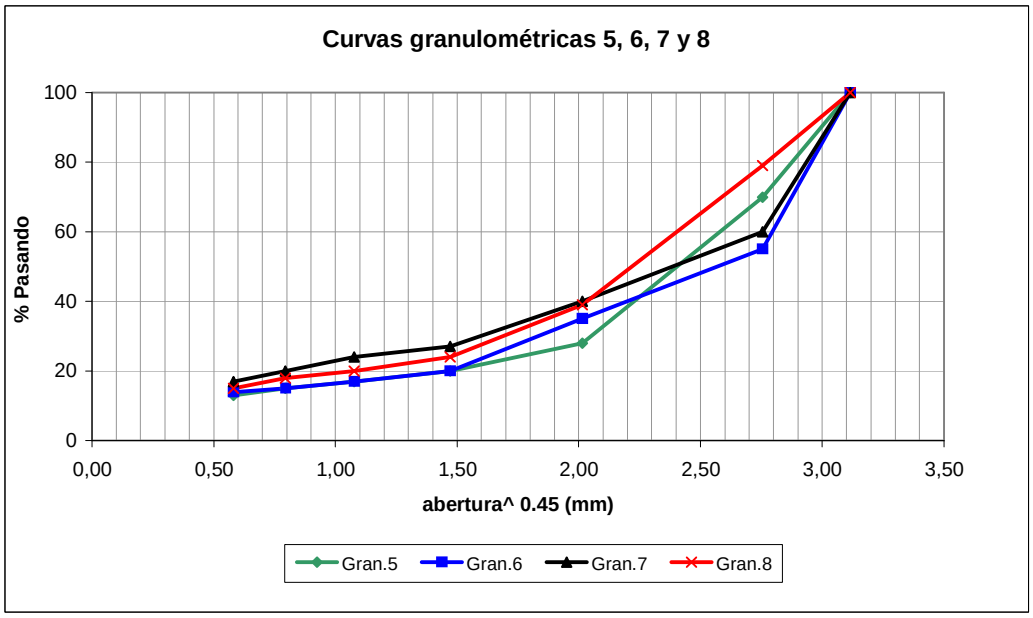


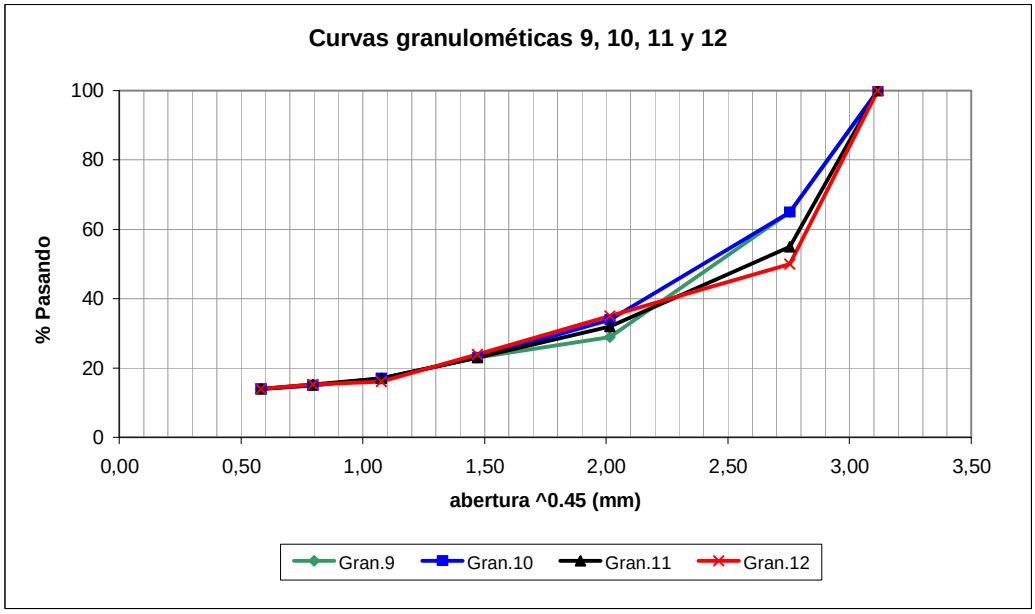
Tabla No. 10: Porcentajes pasando, granulometrías de la 5 a la 12.

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

En el Gráfico No.6 se presentan las curvas de cada granulometría.

Gráfico No. 6: Curvas granulométricas. Granulometrías de la 5 a la 12.





Los resultados de los diseños Marshall se presentan en la Tabla No.11.

Tabla No. 11: Resultados obtenidos de los diseños Marshall, realizados con 0.5 % de fibra de celulosa por peso total de agregado.

Parámetro	Resultados obtenidos							
	Gran. 5	**Gran.6**	**Gran.7**	**Gran.8**	**Gran.9**	**Gran.10**	**Gran.11**	**Gran.12**
Vacíos (%)	5.5	4.7	4.0	4.9	4.8	4.0	4.0	4.0
Asfalto (% PTA)	7.5	7.5	6.1	7.5	7.5	7.0	7.0	7.1
VMA (%)	18.8	18.0	14.7	17.8	18.0	16.4	16.8	16.5
VFA (%)	71.0	74.0	73.0	72.5	73.0	75.6	77.0	76.3
Densidad (kg/cm^3)	2290	2317	2378	2320	2318	2350	2338	2349

Notas:

1) Los diseños se hicieron con tres porcentajes de asfalto, 6.5, 7.0 y 7.5% por peso total de agregado.
2) Cuando no se obtuvo el 4% de vacíos, se reporta el porcentaje de vacíos más cercano al 4%.

De la Tabla No. 11 se observa como de las 8 granulometrías analizadas, sólo con cuatro de ellas se logró alcanzar el 4% de vacíos (granulometrías 7, 10, 11 y 12). De estas cuatro granulometrías, ninguna cumplió con la especificación mínima requerida para los vacíos en el agregado mineral, VMA (17%).

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

De las restantes tres granulometrías, se seleccionó la granulometría 11 para realizar nuevos diseños con polímeros y para evaluar la resistencia a la deformación plástica. La escogencia de esta granulometría se fundamentó en el porcentaje óptimo de asfalto y en el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

Con esta granulometría y 0.5% de fibra de celulosa se fabricaron especímenes a los cuales se les realizó el ensayo de deformación plástica.

En la Tabla No. 12 se presentan los resultados obtenidos para este ensayo

Tabla No. 12: Deformaciones plásticas medidas con la pista de laboratorio de Georgia (APA).

Diseño con 0.5% de fibra de celulosa		
% Asfalto (PTA)	**Vacíos**	**Deformación (mm)**
7.0	5.4	3.9
	5.7	3.6
	6.9	5.0

De la Tabla No. 12 se puede comentar, que con la granulometría seleccionada no se obtienen los resultados esperados para una granulometría con graduación discontinua, ya que las deformaciones medidas son superiores a 3 mm.

4.4 Cuarta etapa

Para evaluar el desempeño de la granulometría 11, se planteó una cuarta etapa que incluyó los siguientes ensayos

- Diseño de mezcla Marshall al 4% de vacíos utilizando fibra de celulosa al 0.5% (PTA) y el polímero P1 al 1.5%
- Diseño de mezcla Marshall al 4% de vacíos utilizando fibra de celulosa al 0.5% (PTA) y el polímero P3 al 3%
- Diseño de mezcla Marshall al 5% de vacíos utilizando el polímero P1 al 1.5%
- Diseño de mezcla Marshall al 5% de vacíos utilizando el polímero P3 al 3%

Para todos los casos se hicieron los ensayos de escurrimiento.

En la figura No.9 se presenta el esquema experimental de trabajo.

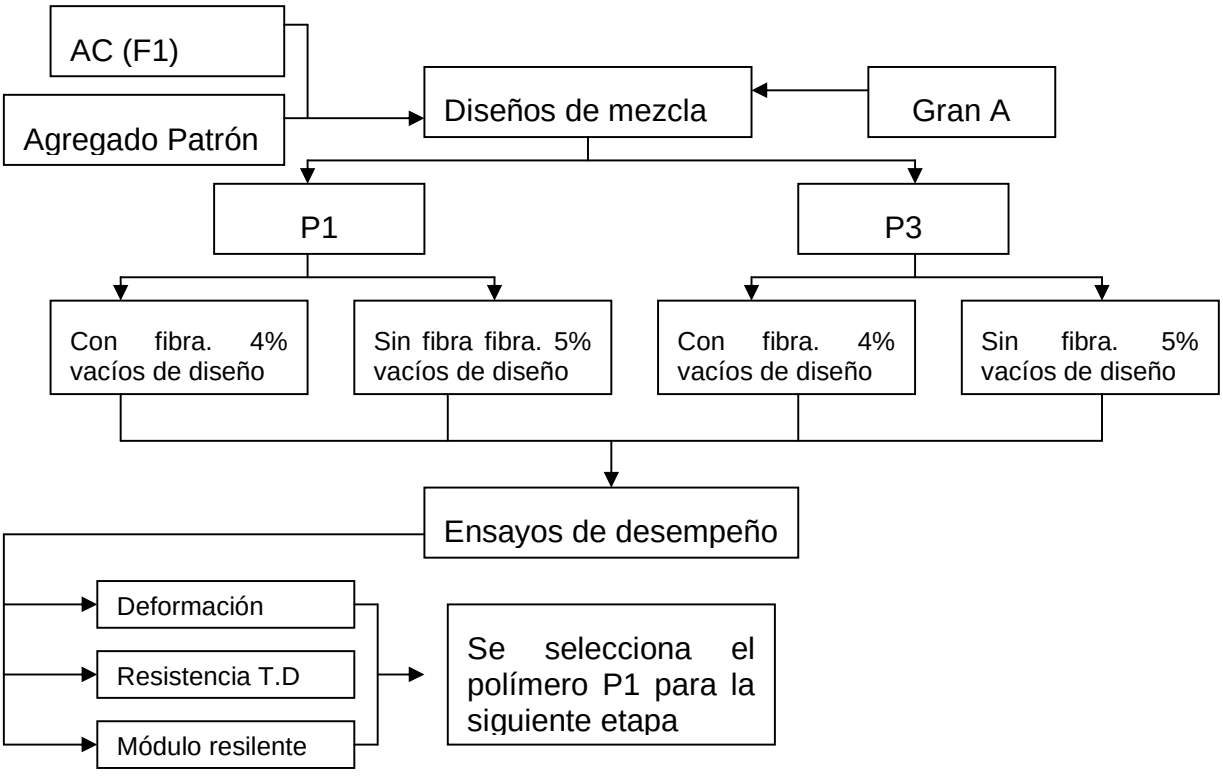


Figura No. 8: Esquema experimental cuarta etapa. Fase I

En la Tabla No.13 se presentan los resultados del los diseños de mezcla para los cuatro casos arriba mencionados.

Tabla No. 13: Resultados obtenidos de los diseños Marshall utilizando los polímeros P1 y P3. Granulometría 11

	Diseños con P1 al 1.5%		Diseños con P3 al 3%	
Parámetros	**Sin fibra**	**Con fibra**	**Sin fibra**	**Con fibra**
Vacíos (%)	5	4	5	4
Asfalto (%PTA)	5.60	6.40	5.60	6.20
VMA (%)	15.5	16.2	15.2	15.7
VFA (%)	66	75	68	74
Densidad (kg/cm^3)	2346	2348	2356	2357

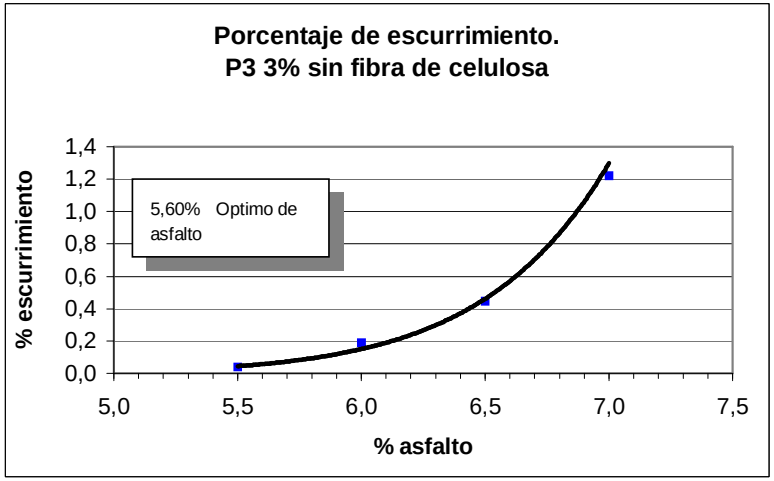
Para cada uno de los puntos de los diseños se realizó el ensayo de escurrimiento. En la Tabla No. 14 se presentan los resultados para cada diseño y en el gráfico No.7 se presentan las curvas de escurrimiento. El valor máximo admisible para escurrimiento es de 0.3%.

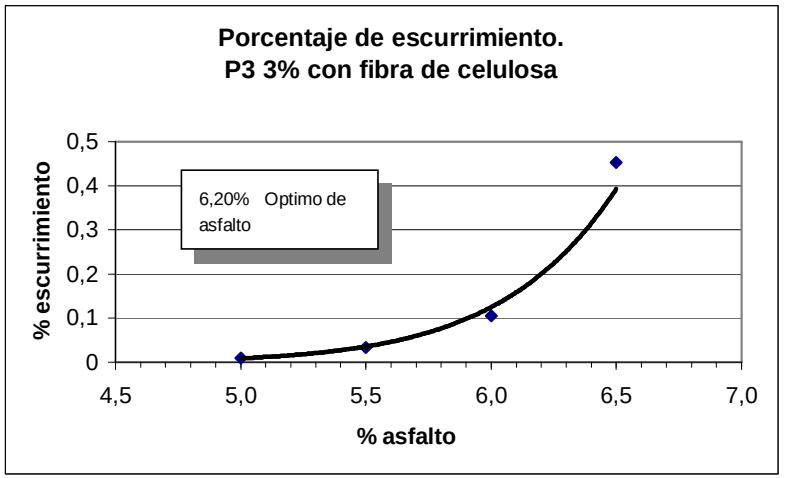
Tabla No. 14: Resultados de escurrimiento

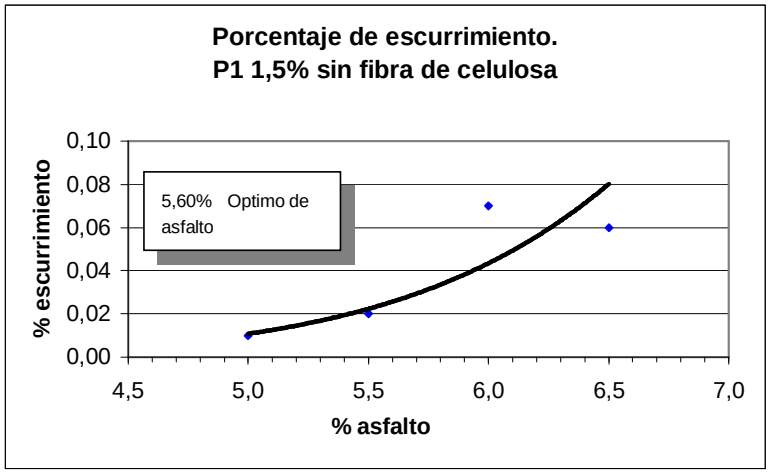
	% Escurrimiento			
Contenido de asfalto (% PTA)	**P1 1.5% sin fibra**	**P1 1.5% con fibra**	**P3 3% sin fibra**	**P3 3% con fibra**
5.0	0.01	0.02	-	0.01
5.5	0.02	0.05	0.04	0.03
6.0	0.07	0.08	0.19	0.11
6.5	0.06	0.08	0.45	0.45
7.0	-	-	1.22	-

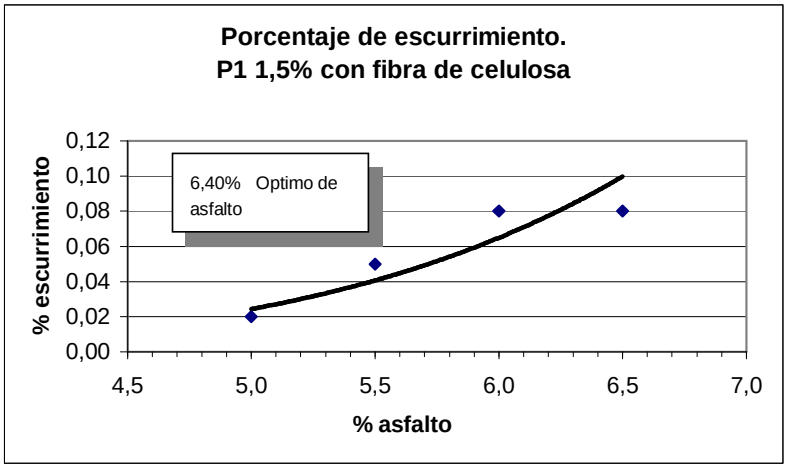
De las Tablas No.13 y 14 se observa que los óptimos de asfalto cumplen con el escurrimiento.

Gráfico No. 7: Ensayo de escurrimiento.









Para evaluar el desempeño de estas mezclas se realizaron ensayos de deformación permanente, ensayos para determinar la resistencia a la tensión diametral y ensayos para determinar el módulo resilente por medio de la tensión indirecta.

En la Tabla No.15 se presentan los resultados de las deformaciones medidas en mezclas fabricadas usando el polímero P1 al 1.5%, mientras que en la Tabla No. 16 se presentan las deformaciones medidas para mezclas fabricadas usando el polímero P3.

En la Tabla No.16 se presentan los resultados del ensayo de resistencia retenida a la tensión diametral y en la Tabla No.18 los valores obtenidos para el módulo resilente. Para determinar lo módulos resilentes se emplearon especimenes de 15 cm de diámetro y 7,5 cm de altura, con vacíos de 7±1%.

Tabla No. 15: Deformaciones plásticas medidas en laboratorio utilizando el polímero P1 al 1.5%

Pastilla No.	*Con fibra*			*Sin fibra*		
	% Vacíos	*Prom. Vacíos*	*Deformación*	*% Vacíos*	*Prom. Vacíos*	*Deformación*
1	6,7	6,9	2,2	7,4	7,6	1,7
2	7,0			7,7		
3	6,9	6,9	2,0	7,6	7,6	2,0
4	6,8			7,6		
5	6,9	6,9	2,8	7,4	7,5	1,8
6	6,8			7,5		
Promedio	6,9	6,9	2,3	7,5	7,5	1,8
Desv. est.	0,1	0,0	0,5	0,1	0,1	0,1

Tabla No. 16: Deformaciones plásticas medidas en laboratorio utilizando el polímero P3 al 3%

Pastilla No.	*Con fibra*			*Sin fibra*		
	% Vacíos	*Prom. Vacíos*	*Deformación*	*% Vacíos*	*Prom. Vacíos*	*Deformación*
1	7,3	7,9	1,8	8,1	7,8	2,7
2	8,4			7,4		
3	7,8	8,1	2,6	7,5	7,6	2,0
4	8,4			7,6		
5	8,4	8,3	2,8	7,2	7,4	2,0
6	8,1			7,5		
Promedio	8,1	8,1	2,4	7,6	7,6	2,3
Desv. est.	0,4	0,2	0,5	0,3	0,2	0,4

Tabla No. 17: Resistencia a la tensión diametral. Valores promedio

	P1 al 1,5%		P3 al 3%	
	Sin fibra	**Con fibra**	**Sin fibra**	**Con fibra**
Vacíos (%)	6,1	6,1	6,0	6,9
Resistencia estado seco (MPa)	1,14	0,93	1,18	0,89
Resistencia estado condicionado (MPa)	1,06	0,91	1,09	0,83
Porcentaje de resistencia retenida (%)	**93**	**98**	**92**	**92**

Tabla No. 18: Módulos resilentes. Valores promedio

	P1 al 1,5%		P3 al 3%	
Modulo resilente (MPa)	**Con fibra**	**Sin fibra**	**Con fibra**	**Sin fibra**
Carga 1 2000 N	3915	3922	3663	4075
Carga 2 3000 N	3573	3629	3313	3726

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de seleccionar el polímero que presentara un mejor desempeño en cuanto a deformación permanente, resistencia al daño del agua y módulos resilentes, se hicieron análisis estadísticos del tipo ANOVA y comparaciones de medias por el método de contrastes. Los análisis se hicieron a un 90% de confianza. Los resultados se muestran en la siguiente tabla resumen.

Tabla No. 19: Resumen de los análisis estadísticos realizados. Cuarta etapa. Fase I

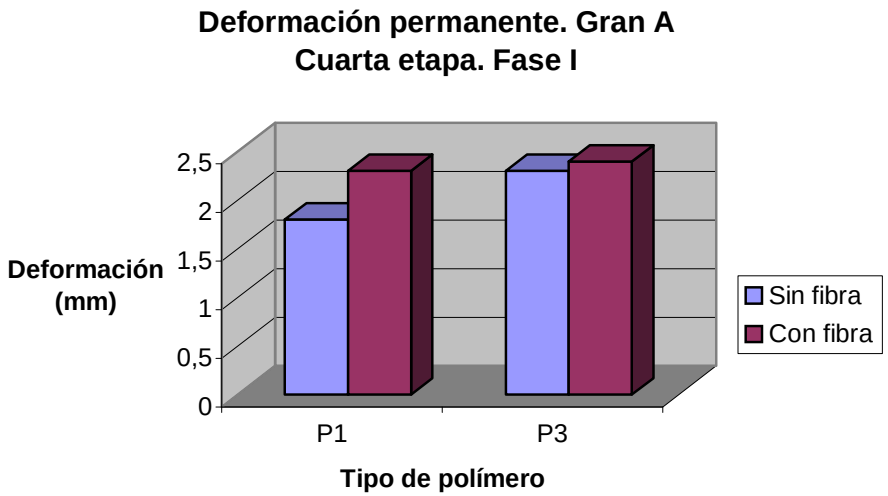
Parámetro	Resultado del análisis estadístico
Deformación permanente (medido en laboratorio con equipo APA) 	– Los polímeros empleados no determinan ningún cambio significativo en la deformación permanente. – Al 80% de confianza la fibra produce cambios significativos en la deformación – Hay evidencia estadística al 80% de confianza que las mezclas fabricadas con fibra de celulosa presentan mayores deformaciones

Tabla 19: Resumen de los análisis estadísticos realizados. Cuarta etapa. Fase I (Continuación)

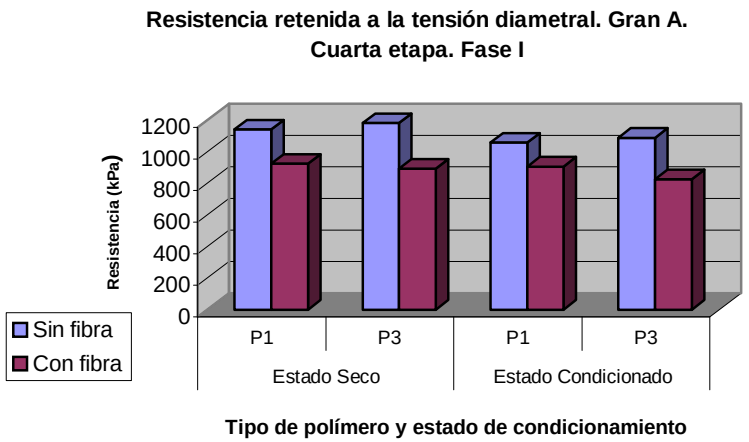
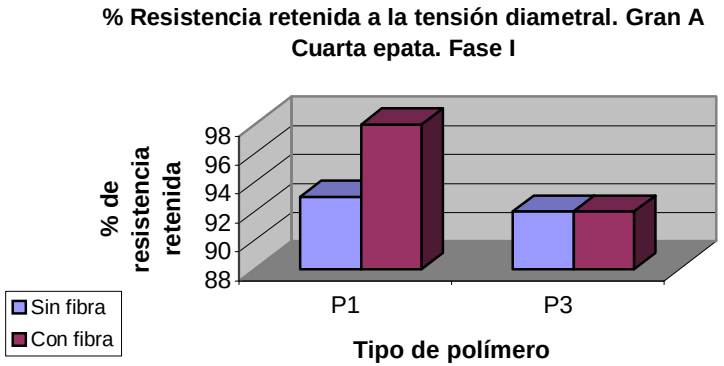
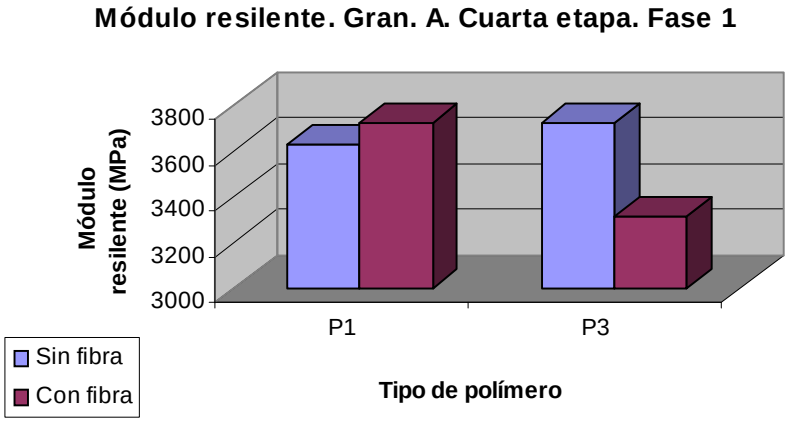
Parámetro	Resultados del análisis estadístico
Resistencia a la tensión diametral   	– Hay evidencia al 90% de confianza que el *Estado* (seco o condicionado), la *Fibra* (con fibra o sin fibra) y la interacción entre ambos factores, determinan cambios significativos en la resistencia a la tensión diametral. – Al 90% de confianza se puede afirmar que la resistencia (seca y condicionada), en mezclas fabricadas sin fibra, **es mayor** a la obtenida en mezclas fabricadas con fibra. – Se determinó, al 90% de confianza que las resistencias condicionadas de mezclas fabricadas con fibra y P1, son mayores a las resistencias condicionadas con fibra y P3. Esto puede justificarse por el hecho de que la fibra es más afín al agua que la mezcla asfáltica y que el polímero P1 al reaccionar con el asfalto, produce “OH” el cual interactúa con el agua, forma como una barrera que evita que el agua llegue al agregado.

Tabla 19: Resumen de los análisis estadísticos realizados. Cuarta etapa. Fase I (Continuación)

Parámetro	Resultados del análisis estadístico
Módulo resilente (a la tensión indirecta) 	– Hay evidencia al 90% de confianza que el factor *Fibra* (con fibra o sin fibra) y la interacción *Fibra*Polímero* determinan cambios significativos en el módulo resilente. – Al 90% de confianza, se determinó que los módulos medidos en mezclas fabricadas con el polímero P3 y sin fibra son mayores a los módulos obtenidos en mezclas fabricadas con el polímero P1 y sin fibra

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE LA PRIMERA FASE

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

- La falta de cubicidad del agregado puede estar afectando el desempeño de las mezclas con graduación discontinua. Esto debido a que no se logra un buen contacto piedra sobre piedra, principio en el cual se fundamenta el desempeño de estas mezclas.
- Según los ensayos realizados en las primeras etapas, se determinó que un cambio en la curva granulométrica genera cambios considerables en los resultados obtenidos, por lo que se considera un factor de alta sensibilidad.
- Al utilizar un polímero y aumentar el porcentaje de vacíos de diseño de 4% a 5%, no es necesario el uso de la fibra de celulosa, ya que las mezclas cumplieron con el porcentaje máximo de escurrimiento.

En cuanto a los ensayos de desempeño, se puede comentar para la granulometría, los polímeros estudiados y las condiciones propias del proyecto lo siguiente:

- En cuanto al uso del polímero P1 o el polímero P3, no se encontró un beneficio o perjuicio evidente, tanto para las deformaciones permanentes como para los módulos resilentes.
- Las mezclas fabricadas con fibra de celulosa presentaron mayores deformaciones con respecto a las mezclas fabricadas sin fibra de celulosa.
- Las resistencias (seca y condicionada) obtenidas en mezclas fabricadas sin fibra de celulosa son mayores a las resistencias (seca y condicionada) obtenidas en mezclas fabricadas con fibra de celulosa.
- La combinación del polímero P1 con la fibra de celulosa en estado condicionado, representa un beneficio significativo en la resistencia a la tensión diametral.
- Debido a que el módulo resilente no es un buen parámetro para evaluar el desempeño de mezclas SMA, para la selección del polímero, se consideró la deformación permanente y la resistencia a la tensión diametral, por lo que se selecciona el polímero P1 para usar en la siguiente fase del proyecto.

Recomendaciones

- El proceso de producción debe ser bien controlado, de tal manera que se garantice una mezcla homogénea. Hay que tener un cuidado especial con los apilamientos, los cuales deberán ser separados en varias fracciones, para garantizar la adecuada reproducción de la curva granulométrica.
- Debe considerarse el uso de un relleno mineral que ayude a rigidizar el mastique y además tenga un aporte positivo en la resistencia a la deformación

plástica. Además debe considerarse que la cantidad de relleno mineral en mezclas con graduación discontinua es muy elevado, entre un 8 y 10%, por lo que es difícil obtener estas cantidades del polvo natural del agregado.

- Hay que analizar el costo/beneficio de usar, además del polímero, la fibra en proyectos reales, ya que hasta el momento se ha encontrado que con solo el uso del polímero las mezclas cumplen con el porcentaje de escurrimiento establecido.
- Ya que la principal ventaja de las mezclas discontinuas del tipo SMA, es la resistencia a la deformación permanente se recomienda implementar otros ensayos para evaluar este parámetro, como los ensayos de carga repetida.

II FASE DEL PROYECTO

La segunda fase de este proyecto se diferencia de la primera fase en el cambio de la materia prima, básicamente el agregado y el ligante asfáltico empleados. Se eliminó el uso del polímero SBS, denominado P3 y se trabajó solamente con el polímero EGA, denominado P1.

Se analizarán dos granulometrías, la seleccionada en la primera fase (Gran. A) y otra (Gran B), cuya diferencia con la primera radica en una disminución de un 2.5% del material pasando la malla no.200.

Adicionalmente se hará un diseño de mezcla usando el agregado y el ligante de la fase anterior disminuyendo en un 2.5% el material pasando la malla No.200. Se evaluará para esta mezcla la resistencia al daño del agua mediante el ensayo de resistencia a la tensión diametral.

7. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA. II FASE

7.1 Agregado

Proveniente de la Región de Guápiles, de depósitos aluviales de origen ígneo, y extraído de río, denominado para efectos del informe como GP-1. En la Tabla No.20 se presenta la caracterización física del agregado.

7.2 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), denominado para efectos del informe como AC-F2.

En la Tabla No.21 se presenta la caracterización físico-química del ligante asfáltico sin modificar y modificado y en la Tabla No.22 se presenta su caracterización reológica.

Tabla No. 20: Caracterización del agregado. II Fase.

Ensayo	Norma	Valor
Agregado grueso		
Gbs	AASHTO T100	2.65
Absorción (%)		1.6
Abrasión tipo B (%)	AASHTO T-96	23.6
Abrasión tipo B (%) (intermedio)		27.2
Caras fracturadas (1 cara)	AASHTO D5821	99
Partículas planas y elongadas	ASTM D4791	0%
Resistencia al pulido	AASHTO T278-279	0.40
Agregado fino		
Gbs	AASHTO T85	2.54
Absorción (%)		3.8
Límites de attemberg	AASHTO T89	NP
Vacíos no compactados (%)	ASTM C1252	39.5
Equivalente de arena	AASHTO T176	64
Propiedades combinadas		
Gbs	-	2.61
Absorción (%)	-	2.2

Tabla No. 21: Caracterización físico-química del ligante asfáltico empleado en la II fase.

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

Tabla No. 22: Caracterización reológica del ligante asfáltico empleado en la II fase.

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

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

8. RESULTADOS OBTENIDOS

8.1 Primera etapa

En la primera etapa de la II fase se realizó un diseño de mezcla usando el agregado y el ligante de la fase anterior y la granulometría B. En la Tabla No.23 se presentan las granulometrías A y B.

Se evaluó además, para esta mezcla, la resistencia al daño del agua mediante el ensayo de resistencia a la tensión diametral.

En la figura se presenta el esquema experimental empleado.

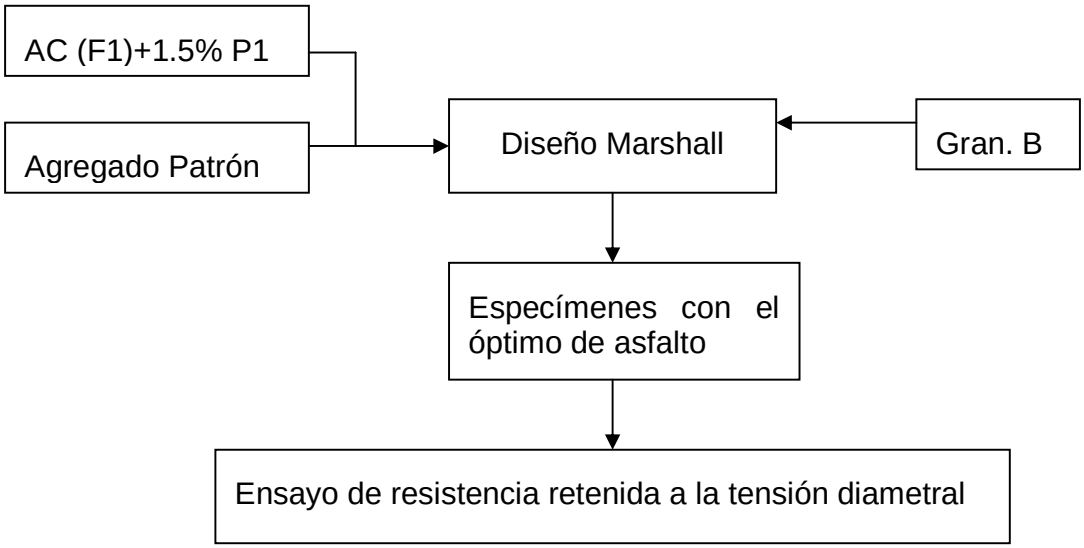


Figura No. 9: Esquema experimental primera etapa. Fase II

8.1.1 Diseño de mezcla Marshall.

Se realizó un diseño de mezcla con asfalto modificado con 1.5% de P1, con la granulometría B y los vacíos de diseño se fijaron en 5.0%.

En la Tabla No. 23 se muestran las granulometrías A y B. Los resultados del diseño se muestran en la Tabla No.24.

Tabla No. 23: Granulometrías A y B

	Granulometría A	**Granulometría B**
Malla	**% pasando**	**% pasando**
12,7 mm	100	100
9,50 mm	55	55
N0.4	32	32
N0.8	23	23
No.16	17	17
No.30	15	15
No.50	14	14
No.100	11	11
No.200	10	7,5

Tabla No. 24: Resultados del diseño de mezcla usando la granulometría B y el agregado patrón.

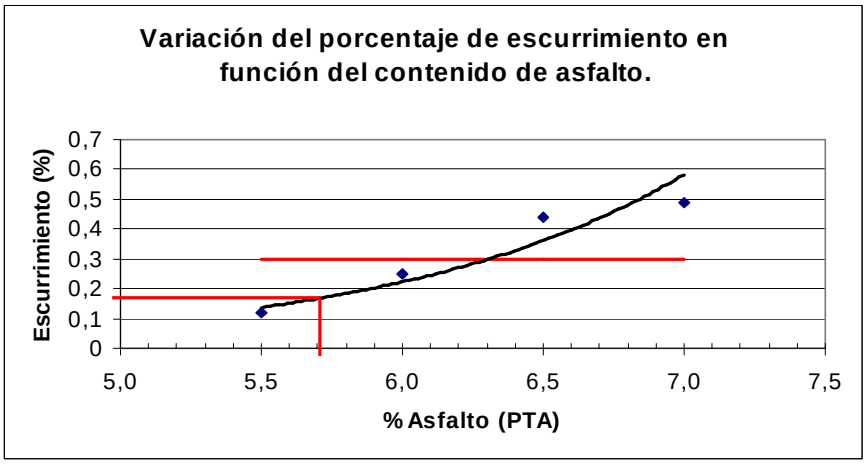
Parámetro	**Valor**
Vacíos (%)	5,0
Asfalto (%PTA)	5,7
VMA (%)	15,4
VFA (%)	68
Densidad (kg/m3)	2354

Los resultados del ensayo de escurrimiento, para cada punto del diseño, se presentan en la Tabla No.25 y en el gráfico No. 8

Tabla No. 25: Resultados del ensayo de escurrimiento.

% asfalto	Escurrimiento (%)
5,5	0,12
6,0	0,25
6,5	**0,44**
7,0	**0,49**

Gráfico No. 8: Curva de variación del porcentaje de escurrimiento según el contenido de asfalto.



Como se observa del gráfico anterior, con el porcentaje óptimo de asfalto no se excede el límite máximo permisible para el ensayo de escurrimiento (0.3%).

8.1.2 Ensayos de resistencia al daño del agua.

Se evaluó, mediante el ensayo de resistencia retenida a la tensión diametral, la susceptibilidad de la mezcla al daño del agua. Los resultados se presentan en la Tabla No.269.

Tabla No. 26 : Resistencia a la tensión diametral. Valores promedio

Parámetro	Valor
Vacíos (%)	7,1
Resistencia estado seco (MPa)	0,78
Resistencia estado condicionado (MPa)	0,75
Porcentaje de resistencia retenida (%)	96

8.1.3 Comparación de resultados Gran A vrs Gran B. Materia prima Fase I

En la Tabla No. 27 se observa como la disminución de 2.5% de material pasando la malla No.200 no produce variaciones drásticas en los parámetros obtenidos del diseño. En la Tabla No. 28 se observa como la Gran B, presenta mayores escurrimientos, llegando al límite de cumplimiento para el óptimo de asfalto del diseño.

Tabla No. 27: Comparación de las características del diseño de mezcla. Gran A vrs GranB.

Parámetro	Gran A	Gran B
Vacíos (%)	5,0	5,0
Asfalto (%PTA)	5,6	5,7
VMA (%)	15,5	15,4
VFA (%)	66	68
Densidad (kg/m3)	2346	2354

Tabla No. 28: Comparación del escurrimiento presentado por mezclas fabricada con la Gran A y la Gran B

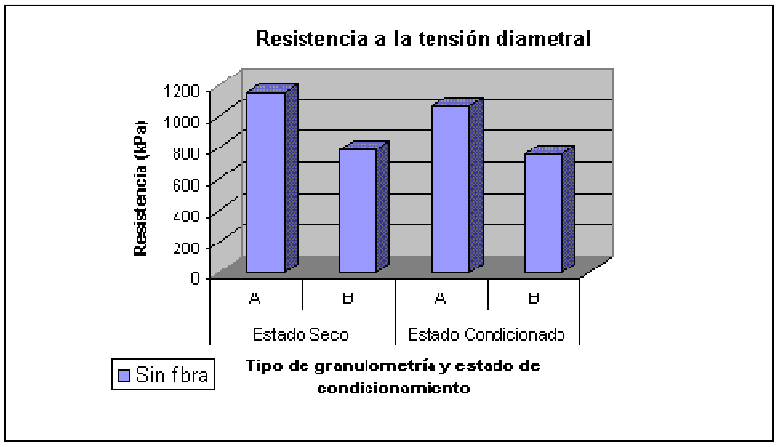
% asfalto	Gran A	Gran B
5,5	0.02	0,12
6,0	0.07	0,25
6,5	0.06	**0,44**
7,0	**-**	**0,49**

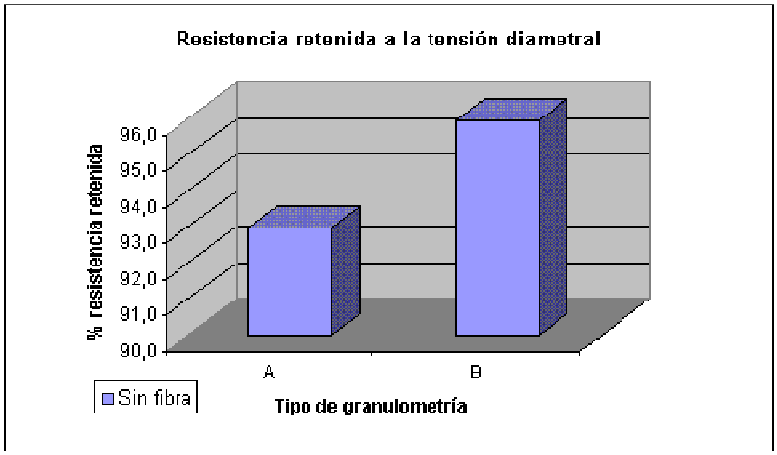
En cuanto a las resistencias a la tensión diametral, son mayores los valores obtenidos en la mezcla fabricada con la granulometría A, sin embargo la granulometría B presenta un mayor porcentaje de resistencia retenida, como se puede observar en la Tabla No.29. y en el gráfico No. 9.

Tabla No. 29: Comparación de las resistencias a la tensión diametral obtenidas con la Gran A y la Gran B

Parámetro	Gran A	Gran B
Vacíos (%)	6,1	7,1
Resistencia estado seco (MPa)	1,14	0,78
Resistencia estado condicionado (MPa)	1,06	0,75
Porcentaje de resistencia retenida (%)	93	96

Gráfico No. 9: Comparación de resistencias a la tensión diametral. Granulometrías A y B. Agregado Patrón, AC F1





8.2 Segunda etapa

En esta etapa se realizaron cuatro diseños de mezcla, tres de ellos según la metodología de diseño Marshall y uno siguiendo la metodología de diseño Superpave.

Se empleó ligante asfáltico (AC (F-2)) modificado con 1.5% del polímero P1 (EGA), las granulometrías A y B y en un caso se usó fibra de celulosa. El agregado empleado fue el GP-1 , proveniente de Guápiles.

En la figura No.10 se presenta el esquema experimental empleado en la etapa.

8.2.1 Diseño de mezcla

En la Tabla No.30 se presentan los resultados obtenidos en los diseños Marshall y Superpave.

Tabla No. 30. Resultados obtenidos de los diseños de mezcla con 1.5% de P1.

Parámetro	Granulometría A		Granulometría B	
	Sin fibra	Con fibra	Sin fibra	Sin fibra
Metodología diseño	Marshall	Marshall	Marshall	Superpave
Vacíos (%)	5,0	4,0	5,0	5.0
Asfalto (%PTA)	5,8	6,5	5,7	5.54
Escurrimiento (%)	0.02	0.02	0.03	-
VMA (%)	14,8	16,0	15,2	15.0
VFA (%)	66	75	67	67
Densidad (kg/m3)	2356	2339	2344	2362

8.2.2 Ensayos de desempeño

En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos para los ensayos de deformación permanente (realizado con la pista de laboratorio, APA), resistencia a la tensión diametral y módulo resilente obtenido por medio de la tensión indirecta, realizados para los contenidos óptimos de asfalto obtenidos mediante la metodología de diseño Marshall. Todas las mezclas se fabricaron con ligante asfáltico modificado con 1.5% de P1.

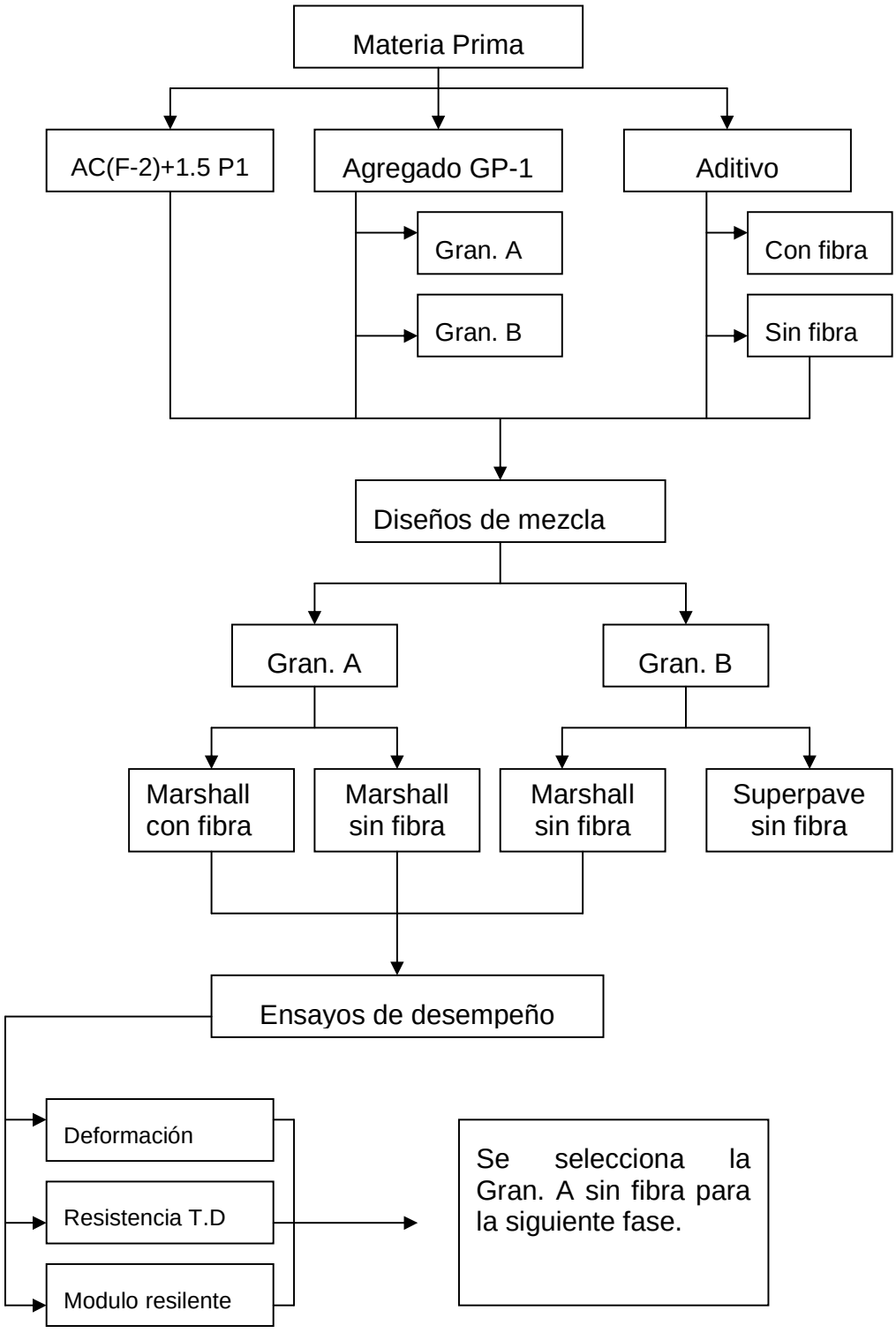


Figura No. 10: Esquema experimental segunda etapa. Fase II

Tabla No. 31: Deformación permanente. Granulometrías A y B

	Granulometría A						Granulometría B		
	Sin fibra			Con fibra			Sin Fibra		
Especímen	**% Vacíos**	**Prom. Vacíos (%)**	**Def. (mm)**	**% Vacíos**	**Prom. Vacíos (%)**	**Def. (mm)**	**% Vacíos**	**Prom. Vacíos (%)**	**Def. (mm)**
1	7,0	7,2	2,3	6,3	6,3	2,9	7,5	7,4	3,0
2	7,4			6,3			7,2		
3	7,0	7,1	2,9	6,6	6,4	2,7	8,0	7,6	2,4
4	7,1			6,2			7,2		
5	7,0	7,0	2,8	6,6	6,5	3,2	7,2	7,5	2,6
6	7,0			6,3			7,7		
Promedio	7,1	-	2,7	6,4	-	2,9	7,5	-	2,7
Desv. Est	0,2	-	0,4	0,2	-	0,2	0,3	-	0,3

Tabla No. 32: Resistencia a la tensión diametral. Granulometrías A y B. Valores promedio

	Granulometría A		Granulometría B
	Sin fibra	**Con fibra**	**Sin fibra**
Vacíos (%)	7,2	7,2	7,5
Resistencia estado seco (MPa)	1,004	0,868	0,909
Resistencia estado condicionado (MPa)	0,837	0,819	0,836
Porcentaje de resistencia retenida (%)	**83**	**94**	**92**

Tabla No. 33: Módulos resilentes obtenidos para las granulometrías A y B. Valores promedio.

	Granulometría A		Granulometría B
Modulo resilente (MPa)	**Sin fibra**	**Con fibra**	**Sin Fibra**
Carga 1 2000 N	2986	2371	2502
Carga 2 3000 N (15% de la carga de TD)	2662	2158	2356

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de determinar cual de las mezclas diseñadas con la granulometría A determina mejor comportamiento en cuanto a resistencia a la deformación plástica, resistencia al daño del agua y mayores módulos, se analizaron los resultados obtenidos para los diferentes ensayos, mediante pruebas de hipótesis hechas al 90% de confianza. Los resultados se comentan en la siguiente tabla:

Tabla No. 34: Resultado de las pruebas de hipótesis efectuadas al 90% de confianza. Ensayos de desempeño. Fase II

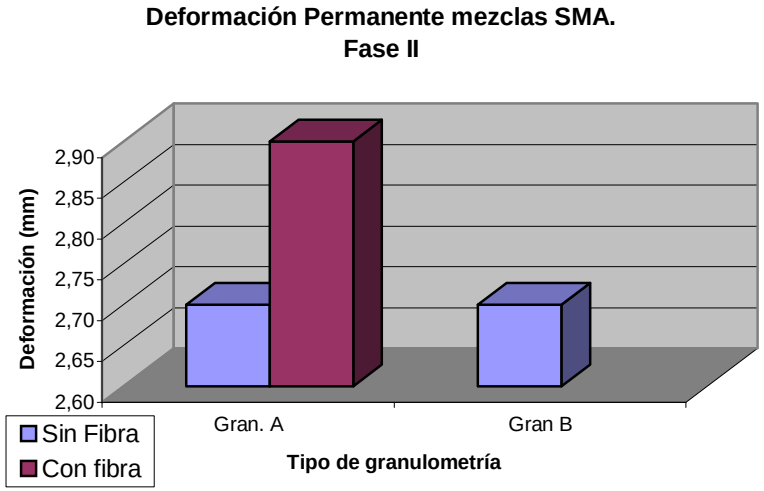
Parámetro analizado	Conclusión
Deformación permanente 	– No hay evidencia estadística, al 90% de confianza, para afirmar que las deformaciones promedio medidas en mezclas fabricadas con fibra de celulosa y sin fibra sean diferentes, para las mezclas fabricadas con la granulometría A. – No hay evidencia, al 90% de confianza para afirmar que las deformaciones obtenidas en mezclas fabricadas sin fibra con las granulometrías A y B sean diferentes.

Tabla No.34: Resultado de las pruebas de hipótesis efectuadas al 90% de confianza. Ensayos de desempeño. Fase II

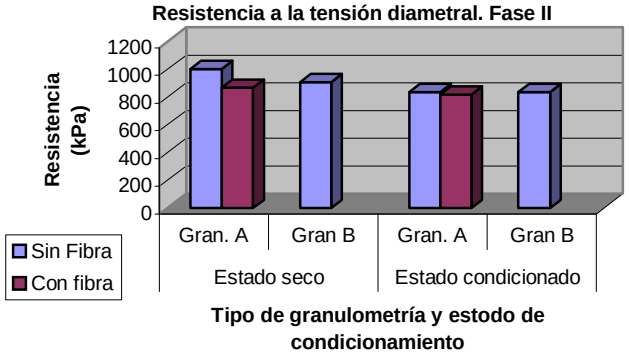
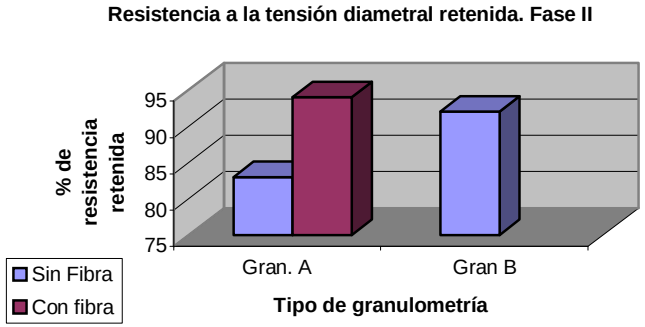
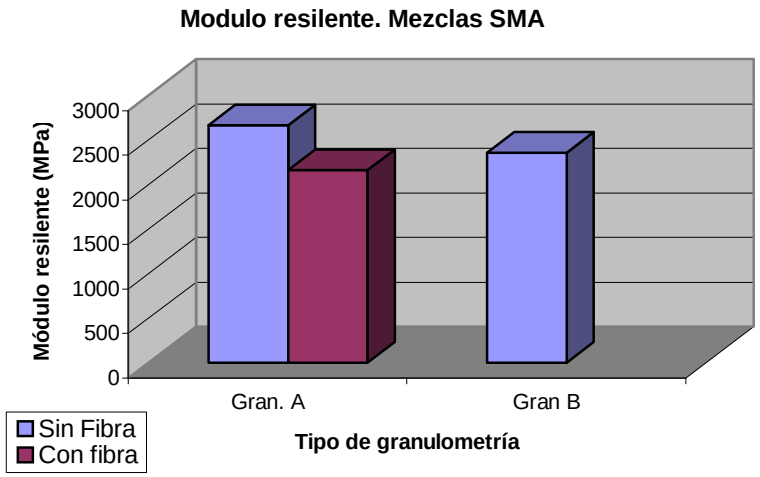
Parámetro analizado	Conclusión
Resistencia a la tensión diametral   	– Al 90% de confianza hay evidencia estadística para afirmar que el promedio de las resistencias secas, en mezclas fabricadas con la granulometría A, es mayor en las mezclas fabricadas sin fibra de celulosa, que en las mezclas fabricadas con fibra. – Al 90% de confianza, no hay evidencia estadística para afirmar que el promedio de las resistencias condicionadas de mezclas fabricadas con la granulometría A, sea diferente para mezclas fabricadas con fibra de celulosa y las fabricadas sin fibra. – Hay evidencia estadística de que las resistencias en estado seco, de las mezclas fabricadas con la granulometría A y sin fibra de celulosa, son mayores a las resistencias secas obtenidas en mezclas fabricadas con la granulometría B y sin fibra de celulosa.

Tabla No.34: Resultado de las pruebas de hipótesis efectuadas al 90% de confianza. Ensayos de desempeño. Fase II

Parámetro analizado	Conclusión
Módulo resilente 	– Hay evidencia estadística, al 90% de confianza, para afirmar que el promedio de los módulos de las mezclas fabricadas sin fibra de celulosa es mayor al promedio de los módulos obtenidos en mezclas fabricadas con fibra de celulosa. – Al 90% de confianza hay evidencia estadística para afirmar que los módulos obtenidos de mezclas fabricadas con la granulometría A y sin fibra de celulosa son mayores a los módulos obtenidos de mezclas fabricadas con la granulometría B y sin fibra de celulosa.

10. COMPARACIONES ENTRE LA FASE I Y LA FASE II.

Como se mencionó anteriormente, una de las diferencia entre la fase I y la fase II está en el cambio del agregado y del asfalto. Sin embargo, tanto el agregado de la fase I como el de la fase II provienen de la Zona Norte de Costa Rica, y presentan propiedades físico-mecánicas similares. En cuanto al asfalto, el empleado en la fase II presentaba un PG superior al empleado en la fase I.

10.1 Granulometría A

En la Tabla No. 35 se presentan las propiedades del diseño Marshall, en la Tabla No.36 las resultados de deformación permanente, en la Tabla No.37 se presentan los resultados del ensayo de resistencia retenida a la tensión diametral y en la Tabla No. 38 los resultado del ensayo de módulo resilente.

Tabla No. 35: Comparación de propiedades de diseño de la gran A. Fase I vrs Fase II

	Fase I: Gran A		Fase II: Gran A	
Parámetros	**Sin fibra**	**Con fibra**	**Sin fibra**	**Con fibra**
Vacíos (%)	5	4	5	4
Asfalto (%PTA)	5,6	6,4	5,8	6,5
Escurrimiento (%)	0,04	0,09	0,02	0,02
VMA (%)	15,5	16,2	14,8	16
VFA (%)	66	75	66	75
Densidad (kg/cm^3)	2346	2348	2356	2339

Tabla No. 36: Comparación de deformación permanente de la gran A. Fase I vrs Fase II

	Fase I: Gran A		Fase II: Gran A	
	Sin fibra	**Con fibra**	**Sin fibra**	**Con fibra**
Vacíos (%)	7,5	6,9	7,1	6,4
Def. (mm)	1,8	2,3	2,7	2,9
Desv. (mm)	0,1	0,5	0,4	0,2

Tabla No. 37: Comparación de la resistencia a la tensión diametral de la gran A. Fase I vrs Fase II

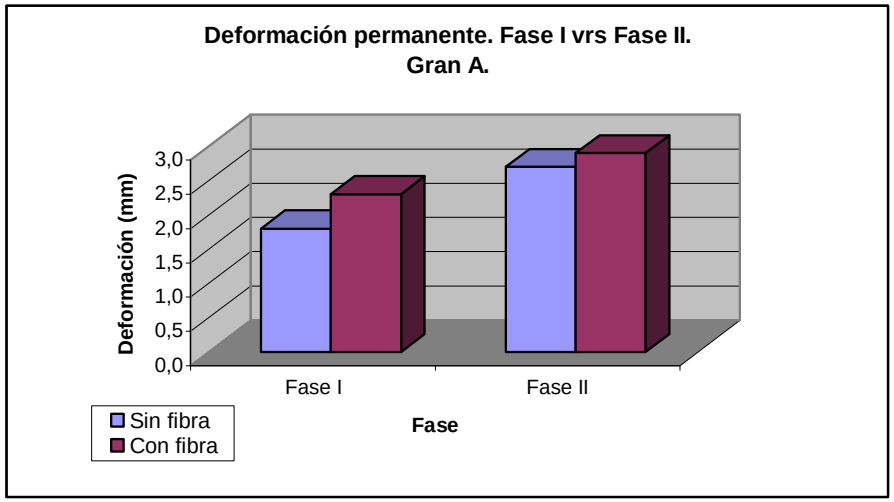
	Fase I: Gran A		Fase II. Gran A	
	Sin fibra	**Con fibra**	**Sin fibra**	**Con fibra**
Vacíos (%)	6,1	6,1	7,2	7,2
Resistencia estado seco (MPa)	1,14	0,93	1,004	0,868
Resistencia estado condicionado (MPa)	1,06	0,91	0,837	0,819
Porcentaje de resistencia retenida	**93**	**98**	**83**	**94**

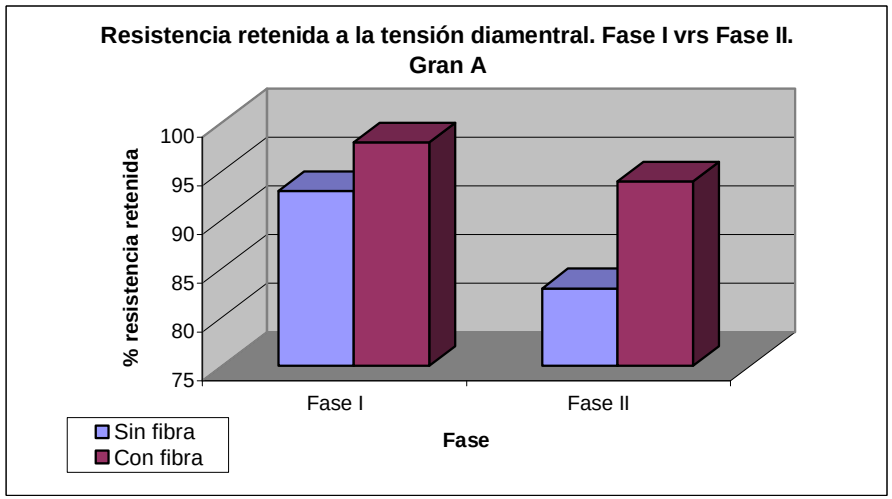
Tabla No. 38: Comparación del módulo resilente de la gran A. Fase I vrs Fase II

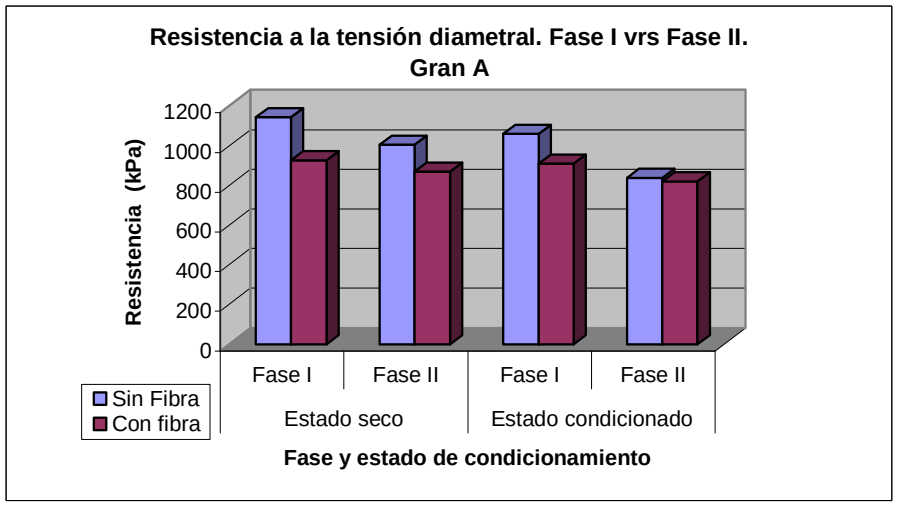
	Fase I. Gran A		Fase II. Gran A	
Modulo resilente	**Sin fibra**	**Con fibra**	**Sin fibra**	**Con fibra**
Carga 1 2000 N (MPa)	3922	3915	2986	2371
Carga 2 3000 N (MPa)	3629	3573	2662	2158

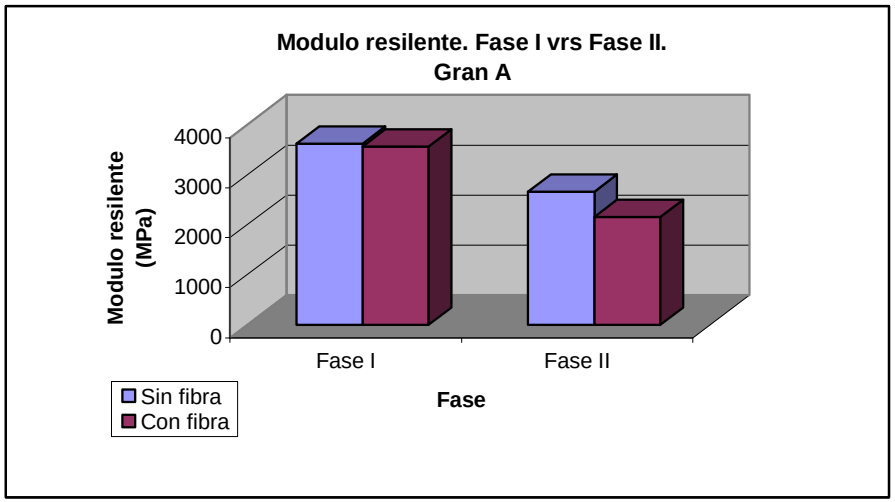
Como se puede observar, tanto de las tablas anteriores como del gráfico No.10, en la fase I se obtuvo un mejor desempeño que en la fase II, atribuible únicamente al cambio de agregado y de asfalto. Para justificar estadísticamente estas observaciones se realizaron pruebas de hipótesis, al 90% de confianza, y se determinó que las deformaciones obtenidas en la fase II son mayores a las obtenidas en la fase I; que la resistencia (seca y condicionada) es mayor en la fase I que en la fase II y que los módulos obtenidos en la fase I son mayores a los obtenidos en la fase II, todo esto analizado para la Gran A.

Gráfico No. 10: Comparación de los ensayos de desempeño. Gran A. Fase I vrs Fase II.









10.2 Granulometría B

En la Tabla No. 39 se presentan las propiedades del diseño Marshall y Superpave y en la Tabla No.40 y el gráfico No.11, se presentan los resultados del ensayo de resistencia retenida a la tensión diametral. No hay comparaciones para deformación permanente ni módulos resilentes, ya que no se realizaron estos ensayos con la materia prima de la fase I.

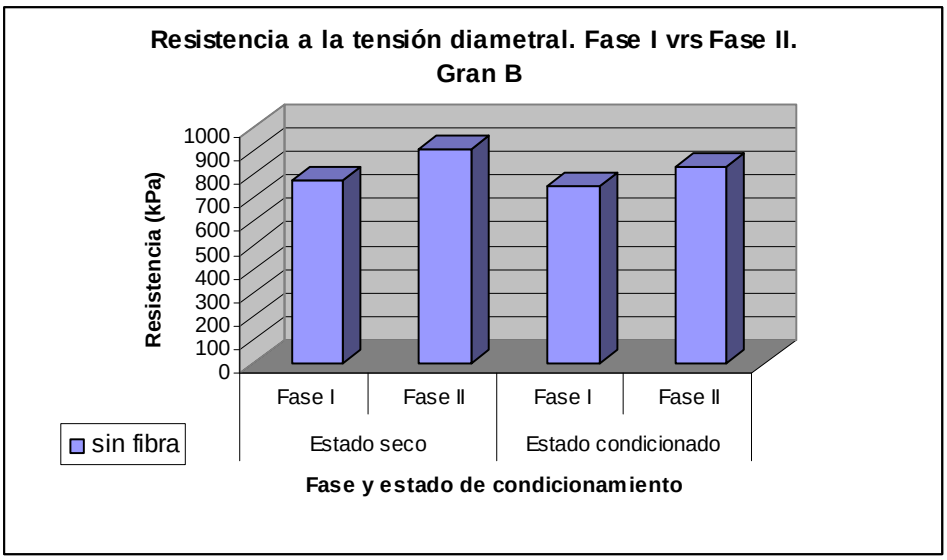
Tabla No. 39: Comparación de propiedades de diseño de la gran B. Fase I vrs Fase II

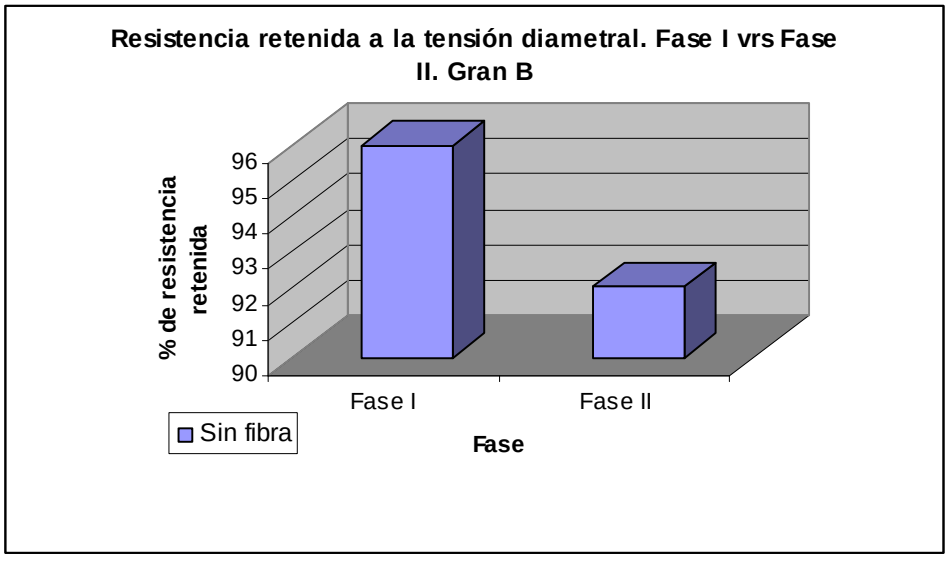
	Fase I: Gran B	**Fase II: Gran B**	
Parámetro	**Sin fibra**	**Sin fibra**	**Sin fibra**
Metodología	Marshall	Marshall	Superpave
Vacíos (%)	5	5	5
Asfalto (%PTA)	5,7	5,7	5.5
Escurrimiento (%)	0,2	0.03	-
VMA (%)	15,4	15,2	15.0
VFA (%)	68	67	67
Densidad (kg/m3)	2354	2344	2362

Tabla No. 40: Comparación de la resistencia a la tensión diametral de la gran B. Fase I vrs Fase II

	Fase I	**Fase II**
Parámetro	**Sin fibra**	**Sin fibra**
Vacíos (%)	7,1	7,5
Resistencia estado seco (MPa)	0,78	0,909
Resistencia estado condicionado (MPa)	0,75	0,836
Porcentaje de resistencia retenida (%)	**96**	**92**

Gráfico No. 11: Comparación de la resistencia a la tensión diametral obtenida con la granulometría B, en la fase I y la fase II.





Para el caso de la granulometría B, se observa como las propiedades volumétricas se mantienen muy parecidas al variar la materia prima. En el caso de la resistencia a la tensión diametral sí se observan cambios mayores. El porcentaje de resistencia retenida es mayor en la fase I, pero las resistencias seca y condicionada son mayores en la fase II. Esto se comprobó con pruebas de hipótesis al 90% de confianza.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE LA SEGUNDA FASE

Para las mezclas fabricadas con el agregado GP-1 y el asfalto AC-F2 se puede comentar lo siguiente:

- En cuanto a deformación permanente no se encontró una diferencia, positiva o negativa, en el uso de la granulometría A o B.
- Con la granulometría A, sin fibra de celulosa, se obtienen mayores resistencias (secas y condicionadas) y mayores módulos que los obtenidos con la granulometría B, sin fibra de celulosa.
- Con la granulometría B se obtienen mayores porcentajes de resistencia retenida que con la granulometría A.

Para las mezclas fabricadas con agregado patrón y asfalto AC-F1, se puede comentar lo siguiente:

- Una disminución de 2.5% de material pasando la malla No. 200 no produce variaciones drásticas en los parámetros obtenidos de diseño.
- Con la granulometría A s obtienen mayores resistencias a la tensión diametral que con la granulometría B, sin embargo con la granulometría B se obtienen un mayor porcentaje de resistencia retenida que con la granulometría A.

Comparando los resultados obtenidos en la fase I con los obtenidos en la fase II, tanto para la granulometría A como para la B, se puede comentar lo siguiente:

- Las propiedades volumétricas de la mezcla no se vieron muy afectadas por el cambio en la materia prima, esto tanto para la granulometría A como para la granulometría B
- Para la granulometría A, en la fase I se obtuvo un mejor desempeño (deformación permanente, resistencia al efecto del agua y módulo resilente) que en la fase II, atribuible únicamente al cambio de agregado y de asfalto.
- Para la granulometría B, se obtienen mayores resistencias (seca y condicionada) en la fase II, pero en la fase I se obtiene un mayor porcentaje de resistencia retenida.

Recomendaciones

- Analizar una granulometría que difiera, lo más que se pueda, de las granulometrías A y B, ya que se demostró que el desempeño no es susceptible a pequeñas variaciones en el contenido de polvo.
- Usar un aditivo que mejore la resistencia a la deformación, ya que la principal característica de las mezclas SMA es su gran capacidad de resistir

deformación, y hasta el momento no se han logrado obtener valores muy buenos de deformación.

III FASE DEL PROYECTO

Para la tercera fase de este proyecto, se cambia el agregado por el GP-2, el cual proviene del mismo quebrador que el agregado GP-1. SE mantiene el mismo asfalto empleado en la fase anterior, el AC-F2 y se incluye la cal como un nuevo aditivo. Además de estos cambios en la materia prima, se propone otra granulometría, denominada granulometría C, la cual difiere bastante de las granulometrías A y B.

Esta fase se encuentra en su etapa inicial.

12. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA. FASE III.

12.1 Agregado

Proveniente de la Región de Guápiles, de depósitos aluviales de origen ígneo, y extraído de río, denominado para efectos del informe como GP-2. En la Tabla No.41 se presenta la caracterización física del agregado.

12.2 Ligante asfáltico

Se empleó para esta fase el mismo ligante usado en la fase anterior, el cual corresponde a un ligante asfáltico de uso común en Costa Rica para obras de pavimentación, modificado con 1.5% de polímero tipo EGA (Etilen glicidil acrilato), denominado para efectos del informe como AC-F2. Su caracterización se presenta en la Tabla No.21 y 22.

Tabla No. 41: Caracterización física del agregado GP-2

		Requerimientos AASHTO MP8-00	
Ensayo	**Valor**	**Espec mín**	**Espec.máx**
Agregado grueso			
Gbs	2,64	-	-
% absorción	1,6	-	-
% Abrasión (B)	23,9	-	30
Caras fracturadas (1 cara)	96	100	-
Caras fracturadas (2 ó más)	93,8	90	-
Partículas planas y elongadas	0%		
Agregado intermedio			
Gbs	2,64	-	-
% absorción	1,8	-	-
% Abrasión (B)	23,9	-	30
Caras fracturadas (1 cara)	100	100	-
Caras fracturadas (2 ó más)	100	90	-
Partículas planas y elongadas	0%		
Agregado fino			
Gbs	2,53	-	-
% absorción	3,3	-	-
Límites	NP	-	-
% vacíos compactados	37,6	-	-
Equivalente de arena	72	-	

13. ESQUEMA EXPERIMENTAL PLANTEADO

En la figura No. se presenta el esquema de trabajo para la fase III del proyecto.

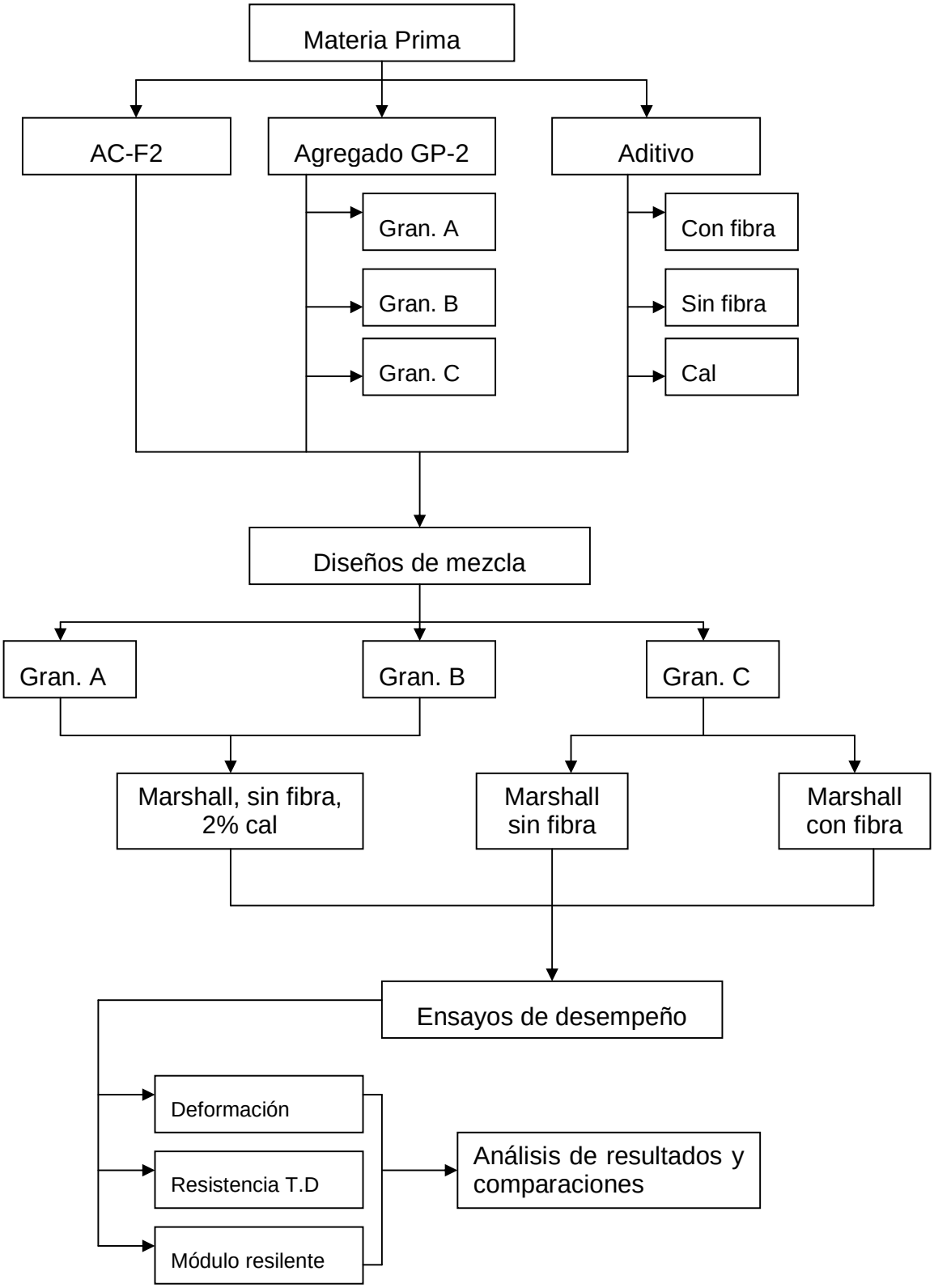


Figura No. 11: Esquema experimental. Fase III

ANEXOS

Tabla A-1: Resumen de resultados I Fase

Polímero	1,5P1		3% P3		1,5%P1
Granulometría	A	A	A	A	B
Fibra	Sin Fibra	Con Fibra	Sin Fibra	Con Fibra	Sin fibra
Agregados					
Gbs	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63
Absorción	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Contenido de asfalto					
%PTA	5,60	6,40	5,60	6,20	5,70
%PTM	5,30	6,02	5,30	5,84	5,39
Escurrimiento (%)	0,04	0,08	0,15	0,2	0,18
Granulometría					
12,5mm	100	100	100	100	100
9,5 mm	55	55	55	55	55
No.4	32	32	32	32	32
No.8	23	23	23	23	23
No,16	17	17	17	17	17
No.30	15	15	15	15	15
No.50	14	14	14	14	14
No.100	11	11	11	11	11
No.200	10	10	10	10	8
Parámetros Marshall					
Vacíos (%)	5,0	4,0	5,0	4,0	5,0
Densidad Marshall	2346	2348	2356	2357	2354
VMA	15,5	16,2	15,2	15,7	15,4
VFA	68	75	67	75	68
Cont. de asfalto efec. (PTM)	**4,6**	**5,3**	**4,4**	**5,1**	**4,5**
Cont. de asfalto abs. (PTM)	**0,7**	**0,7**	**0,9**	**0,8**	**0,9**
Polvo asfalto efectivo	2,17	1,89	2,25	1,97	1,66
Desempeño					
RTD	93	98	92	92	96
Deformación permanente (mm)	1,8	2,3	2,3	2,4	-

Tabla A-2: Resumen de resultados II Fase

Granulometría	A	A	B	B
Metodología de diseño	Marshall	Marshall	Marshall	Superpave
Fibra	Con fibra	Sin fibra	Sin fibra	Sin fibra
Agregados				
Gbs	2,61	2,61	2,61	2,61
Absorción	2,2	2,2	2,2	2,2
Contenido de asfalto				
%PTA	6,50	5,80	5,70	5,54
%PTM	6,10	5,48	5,39	5,25
Escurrimiento (%)	0,02	0,02	0,03	-
Granulometría				
12,5mm	100	100	100	100
9,5 mm	55	55	55	55
No.4	32	32	32	32
No.8	23	23	23	23
No,16	17	17	17	17
No.30	15	15	15	15
No.50	14	14	14	14
No.100	11	11	11	11
No.200	10	10	8	8
Parámetros Marshall				
Vacíos (%)	4,0	5,0	5,0	5,0
Densidad Marshall (kg/m^3)	2339	2356	2344	2362
VMA (%)	16,0	14,8	15,2	15,0
VFA (%)	75	66	67	67
Cont. de asfalto efec. (PTM) (%)	**5,2**	**4,2**	**4,4**	**4,0**
Cont. de asfalto abs. (PTM) (%)	**0,9**	**1,3**	**1,0**	**1,2**
Polvo asfalto efectivo (%)	1,92	2,37	1,70	1,86
Desempeño				
Resistencia a la tensión diametral (%)	94	83	92	-
Deformación permanente (mm)	2,9	2,7	2,7	-

INDICE GENERAL

Página

1. MARCO TEÓRICO 1

2. INTRODUCCIÓN 3

I FASE DEL PROYECTO 5

3. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA 5

3.1 Ligante asfáltico 5

3.2 Agregado 7

3.2.1 Coeficientes de pulimento acelerado 8

3.3 Aditivos 9

3.3.1 Fibra de celulosa 9

3.3.2 Polímero 10

3.3.2.1 Polímero EGA 10

3.3.2.2 Plastómero 10

3.3.2.3 Elastómero 11

3.4 Especificaciones 12

4. RESULTADOS OBTENIDOS 12

4.1 Primera etapa 12

4.2 Segunda etapa 16

4.3 Tercera etapa 18

4.4 Cuarta etapa 23

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS 29

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE LA PRIMERA FASE 32

II FASE DEL PROYECTO 33

7. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA. II FASE 33

7.1 Agregado 33

7.2 Ligante asfáltico 33

8. RESULTADOS OBTENIDOS 37

8.1 Primera etapa 37

8.1.1 Diseño de mezcla Marshall. 38
8.1.2 Ensayos de resistencia al daño del agua. 39
8.1.3 Comparación de resultados Gran A vrs Gran B. Materia prima Fase I . 40

8.2 Segunda etapa 42

8.2.1 Diseño de mezcla 42
8.2.2 Ensayos de desempeño 42

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS 46

10. COMPARACIONES ENTRE LA FASE I Y LA FASE II. 49

10.1 Granulometría A 49

10.2 Granulometría B 52

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE LA SEGUNDA FASE 54

III FASE DEL PROYECTO 55

12. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA. FASE III. 55

12.1 Agregado 55

12.2 Ligante asfáltico 55

13. ESQUEMA EXPERIMENTAL PLANTEADO 56

INDICE DE TABLAS

Página

Tabla

Tabla No. 1: Caracterización físico-química del ligante asfáltico.....5

Tabla No. 2: Caracterización reológica 6

Tabla No. 3: Algunas propiedades de los ligantes modificados con los polímeros P1 y P3. 7

Tabla No. 4: Caracterización de los agregados.....8

Tabla No. 5: Ubicación y características generales de la fuente 9

Tabla No. 6: Coeficiente de pulimento acelerado.....9

Tabla No. 7: Especificaciones para los diseños de mezcla.....12

Tabla No. 8: Granulometrías 1 y 2. 13

Tabla No. 9: Granulometrías 3 y 4. 16

Tabla No. 10: Porcentajes pasando, granulometrías de la 5 a la 12. 19

Tabla No. 11: Resultados obtenidos de los diseños Marshall, realizados con 0.5 % de fibra de celulosa por peso total de agregado. 21

Tabla No. 12: Deformaciones plásticas medidas con la pista de laboratorio de Georgia (APA).....22

Tabla No. 13: Resultados obtenidos de los diseños Marshall utilizando los polímeros P1 y P3. Granulometría 11.....24

Tabla No. 14: Resultados de escurrimiento 24

Tabla No. 15: Deformaciones plásticas medidas en laboratorio utilizando el polímero P1 al 1.5%.....27

Tabla No. 16: Deformaciones plásticas medidas en laboratorio utilizando el polímero P3 al 3%.....27

Tabla No. 17: Resistencia a la tensión diametral. Valores promedio 28

Tabla No. 18: Módulos resilentes. Valores promedio 28

Tabla No. 19: Resumen de los análisis estadísticos realizados. Cuarta etapa. Fase I 29

Tabla No. 20: Caracterización del agregado. II Fase. 34

Tabla No. 21: Caracterización físico-química del ligante asfáltico empleado en la II fase. 35

Tabla No. 22: Caracterización reológica del ligante asfáltico empleado en la II fase. 36

Tabla No. 23: Granulometrías A y B 38

Tabla No. 24: Resultados del diseño de mezcla usando la granulometría B y el agregado patrón 38

Tabla No. 25: Resultados del ensayo de escurrimiento. 39

Tabla No. 26 : Resistencia a la tensión diametral. Valores promedio 40

Tabla No. 27: Comparación de las características del diseño de mezcla. Gran A vrs GranB. 40

Tabla No. 28: Comparación del escurrimiento presentado por mezclas fabricada con la Gran A y la Gran B 40

Tabla No. 29: Comparación de las resistencias a la tensión diametral obtenidas con la Gran A y la Gran B 41

Tabla No. 30. Resultados obtenidos de los diseños de mezcla con 1.5% de P1. ... 42

Tabla No. 31: Deformación permanente. Granulometrías A y B 44

Tabla No. 32: Resistencia a la tensión diametral. Granulometrías A y B. Valores promedio 45

Tabla No. 33: Módulos resilentes obtenidos para las granulometrías A y B. Valores promedio. 45

Tabla No. 34: Resultado de las pruebas de hipótesis efectuadas al 90% de confianza. Ensayos de desempeño. Fase II 46

Tabla No. 35: Comparación de propiedades de diseño de la gran A. Fase I vrs Fase II 49

Tabla No. 36: Comparación de deformación permanente de la gran A. Fase I vrs Fase II 49

Tabla No. 37: Comparación de la resistencia a la tensión diametral de la gran A. Fase I vrs Fase II 50

Tabla No. 38: Comparación del módulo resilente de la gran A. Fase I vrs Fase II ... 50

Tabla No. 39: Comparación de propiedades de diseño de la gran B. Fase I vrs Fase II 52

Tabla No. 40: Comparación de la resistencia a la tensión diametral de la gran B. Fase I vrs Fase II 52

Tabla No. 41: Caracterización física del agregado GP-2 56

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico **Página**

Gráfico No. 1: Curvas granulométricas 1 y 2.....14

Gráfico No. 2: Curvas de diseño para el parámetro de vacíos de aire, utilizando fibra de celulosa. Granulometrías 1 y 2.....15

Gráfico No. 3: Curvas de diseño para el parámetro de vacíos de aire, utilizando el polímero P2. Granulometrías 1 y 2.....15

Gráfico No. 4: Curvas granulométricas 3 y 4.....17

Gráfico No. 5: Curvas de diseño para el parámetro de vacíos de aire, utilizando fibra de celulosa al 0.5% PTA. Granulometrías 3 y 4.....17

Gráfico No. 6: Curvas granulométricas. Granulometrías de la 5 a la 12. 20

Gráfico No. 7: Ensayo de escurrimiento.....25

Gráfico No. 8: Curva de variación del porcentaje de escurrimiento según el contenido de asfalto. 39

Gráfico No. 9: Comparación de resistencias a la tensión diametral. Granulometrías A y B. Agregado Patrón, AC F1.....41

Gráfico No. 10: Comparación de los ensayos de desempeño. Gran A. Fase I vrs Fase II. 51

Gráfico No. 11: Comparación de la resistencia a la tensión diametral obtenida con la granulometría B, en la fase I y la fase II. 53