



REPORTE DE INVESTIGACIÓN LM- PI - PV- IN- 05 - 02

Microaglomerados en caliente para capas de rodadura

INFORME PARCIAL

Investigador principal

Ing. Guillermo Loría

Investigador asociado

Ing. Mario Arce

Enero 2003

MICROAGLOMERADOS EN CALIENTE PARA CAPAS DE RODADURA

1. INTRODUCCIÓN

El principal problema que han enfrentado las mezclas asfálticas en caliente de tipo denso utilizadas en el país durante los últimos años, ha sido su escasa resistencia a la deformación permanente. Son incontables los casos de proyectos en donde se han colocado mezclas que en pocos meses, presentan deformaciones que se esperarían luego de muchos años de servicio.

Por esto, se inició una discusión acerca de las condiciones que debe tener la capa de rodadura para soportar las cargas de tránsito en su vida útil de diseño sin presentar deformaciones importantes. Esto conllevó a plantear la necesidad de investigar otros tipos de mezcla asfáltica para utilizar como superficie de ruedo con la principal característica de poseer una altísima resistencia ante la deformación permanente.

Como una alternativa de investigación, se planteó el análisis del tipo de mezcla denominado *microaglomerados discontinuos en caliente*, para comparar su desempeño a escala de laboratorio con el de las mezclas densas convencionales, y efectuar comparaciones entre ambas.

Por lo tanto, se busca analizar mezclas finas para capas de rodamiento, que presenten buen desempeño en cuanto a deformación permanente y fatiga. También se pretende estudiar la influencia que tienen la adición de modificantes, la granulometría y características propias del asfalto, en el desempeño de las mezclas finas.

Como punto de partida en la investigación se utilizará lo indicado por la *normativa española* para diseño, granulometrías y ensayos desempeño. Posteriormente se harán ajustes para adaptar esta tecnología ante nuestras condiciones particulares.

Una vez concluída la primera y segunda etapa del proyecto se propondrá una metodología de control de calidad para la puesta en obra de capas de migroaglomerados y una vez que se coloque una primera capa en alguna obra específica (tramos experimentales) se analizará la evolución de la micro y macrotextura de estas mezclas.

Los diseños de mezcla se harán utilizando la metodología Marshall y se la “Pista de laboratorio de Georgia” (APA) para determinar la deformación permanente a escala de laboratorio. También se harán ensayos de resistencia a la compresión uniaxial y a la tensión diametral.

A la fecha no se ha concluido el estudio. Actualmente se está trabajando en la selección de una segunda granulometría. Luego de esta selección, se harán ensayos para determinar el módulo de la mezcla, ensayos de fatiga, ensayos adicionales de compresión uniaxial, tensión diametral y de deformación permanente.

En la primera etapa del proyecto se trabajó con una granulometría virgen y luego esa misma modificada con cal al 2.0%. El asfalto se modificó con un 1.5% de polímero. Las características de la mezcla se indican a continuación:

- Granulometría F8 española, con un tamaño máximo 12.5mm.
- Asfalto modificado con 1.5% de polímero tipo EGA (PG-76).
- Porcentaje de vacíos de $5.0 \pm 1.0\%$.
- Cal como relleno mineral al 2%.

A continuación se presenta el esquema experimental que se siguió en esta primera etapa de la investigación:

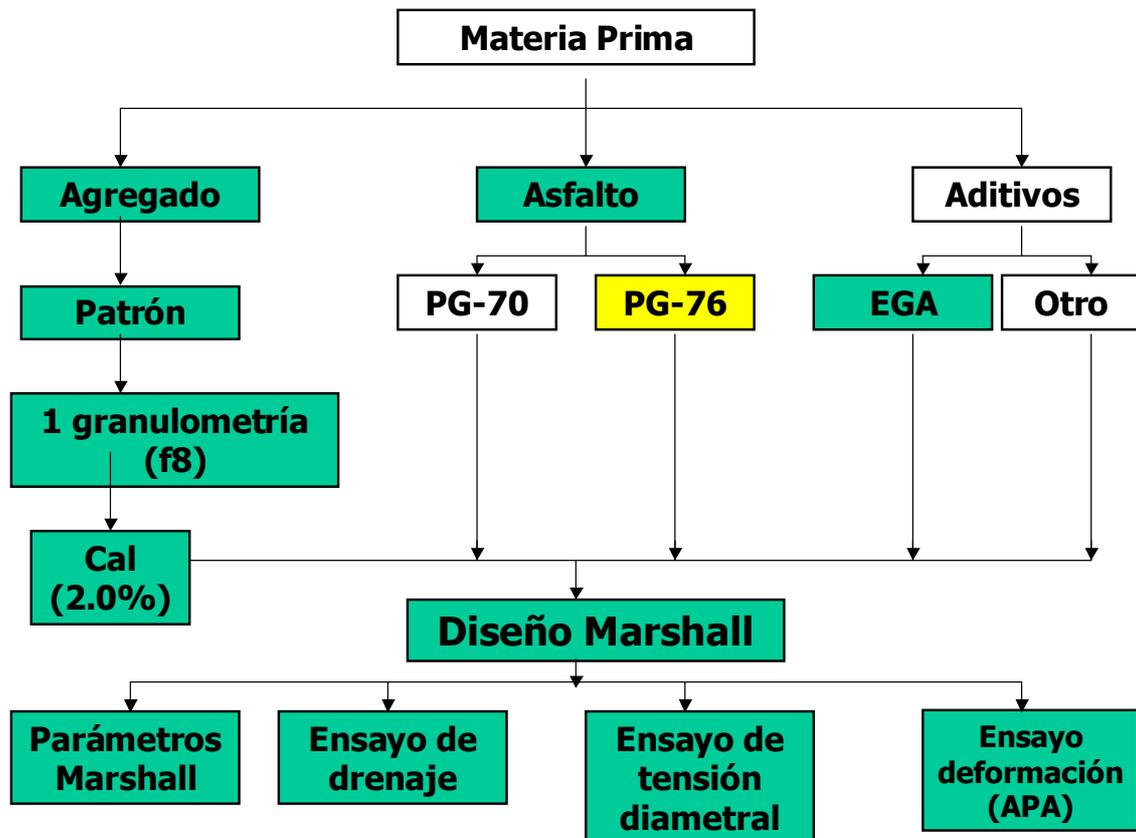
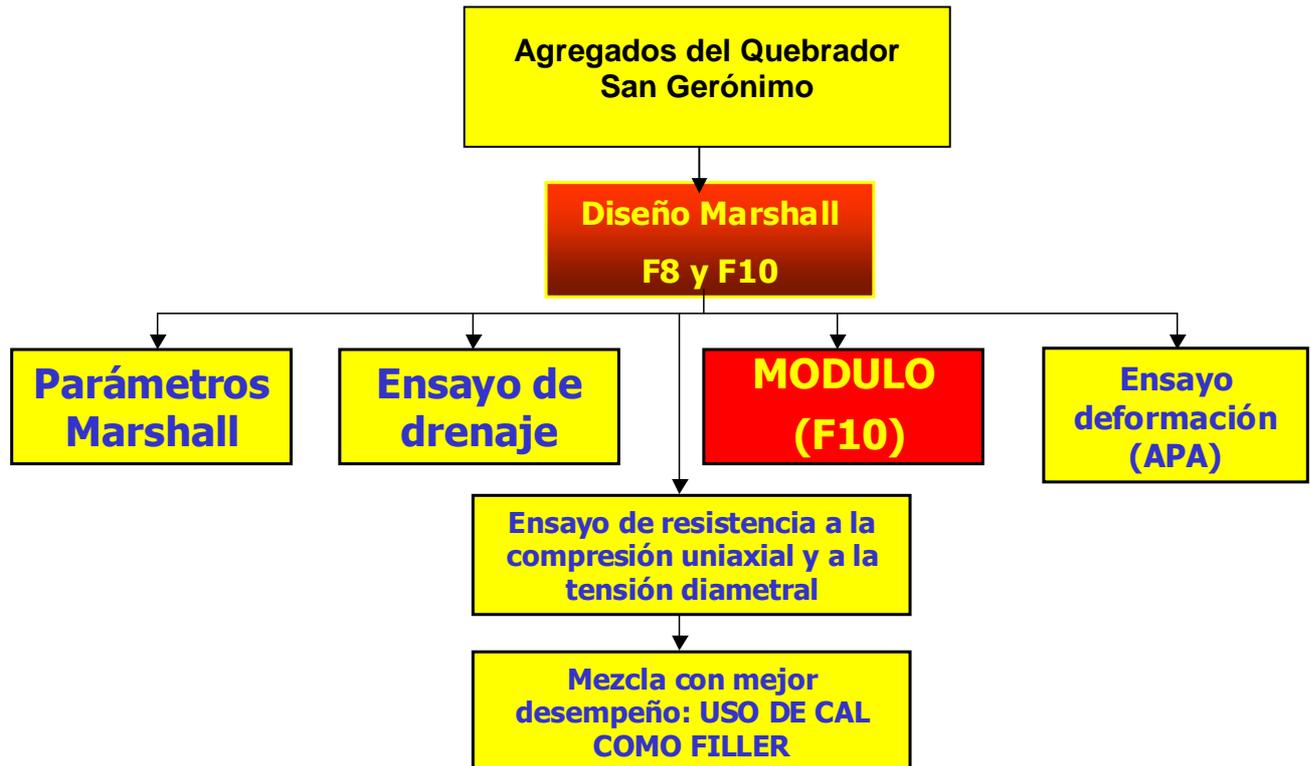


Figura No. 1: Esquema experimental

La segunda etapa del proyecto incluyó el análisis completo de la granulometría F10 tal y como se hizo con la F8, y el análisis de ambas granulometrías con agregados provenientes del Quebrador San Jerónimo. Dicho agregado se utilizó en la construcción de los accesos del Ríos Tempisque.

A continuación se presenta el esquema experimental que se siguió en la segunda etapa de la investigación:



Solamente queda pendiente la realización del diseño con agregados del quebrador San Jerónimo con cal, para lo cual se escogerá la granulometría que desempeñe mejor.

1.1 Definición y características de los microaglomerados discontinuos en caliente

Los microaglomerados se definen como mezclas asfálticas discontinuas de agregado con tamaño máximo de 12.0 mm, que se colocan en obra con espesores menores a 4 cm.

Es empleado como capa de rodadura con aporte estructural, y proporciona o restituye características superficiales de los pavimentos como: resistencia al deslizamiento, drenabilidad superficial, baja sonoridad, alta resistencia ante la deformación permanente, mejora notablemente la comodidad y seguridad del usuario, a un costo relativamente bajo debido a su pequeño espesor.

En España se normalizaron dos tipos de mezclas discontinuas, las mezclas tipo F (capas finas), con espesores entre los 2.0 y 4.0 cm; y las mezclas tipo M (monogranulares), extendidas en capas de 1.0 y 2.0 cm de espesor. En ambas los tamaños máximos utilizados son 8.0 y 10.0 mm.

Para conseguir una buena macrotextura con un tamaño de agregado reducidos se han sustituido las curvas granulométricas continuas por curvas discontinuas, cuya principal característica es la discontinuidad entre el porcentaje que pasa la malla No.4 y que retiene la No. 8 cuyo valor máximo permitido es de 8.0%. Adicionalmente se debe indicar que poseen un elevado porcentaje de tamaños gruesos (70-80%). Esta característica asegura su alta estabilidad dada la alta fricción interna. El contenido de filler tiene un rango del 7 al 10%.

El empleo de un alto contenido de polímeros al betún podría hacer peligrar la estabilidad de la mezcla y provocar la exudación del ligante. Para evitar este fenómeno se ha recurrido al empleo de ligantes asfálticos modificados con polímeros. Para verificar que este fenómeno no ocurrirá se hace la prueba de drenaje.

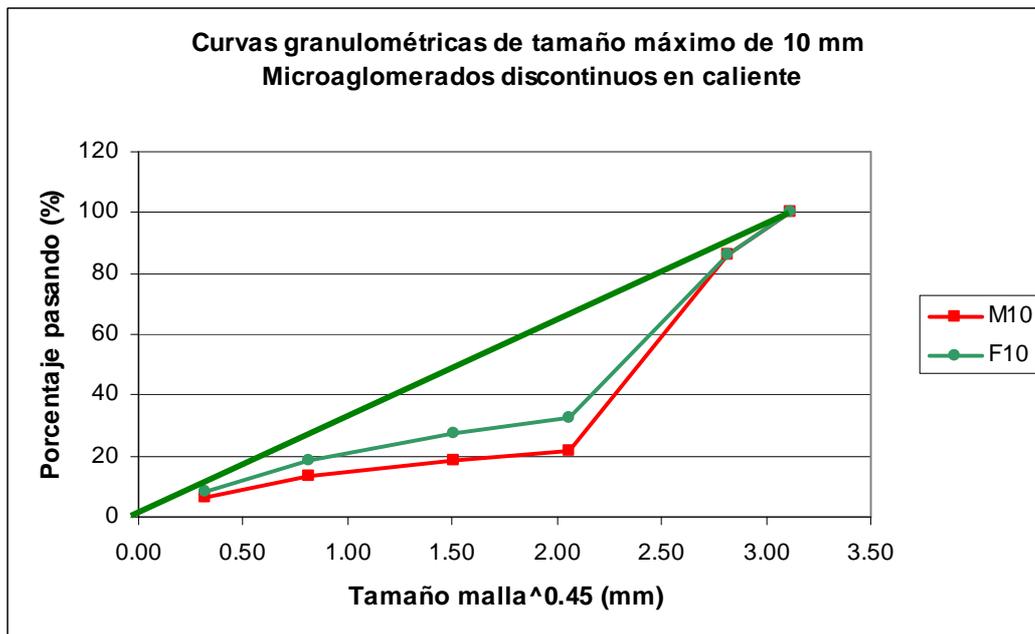
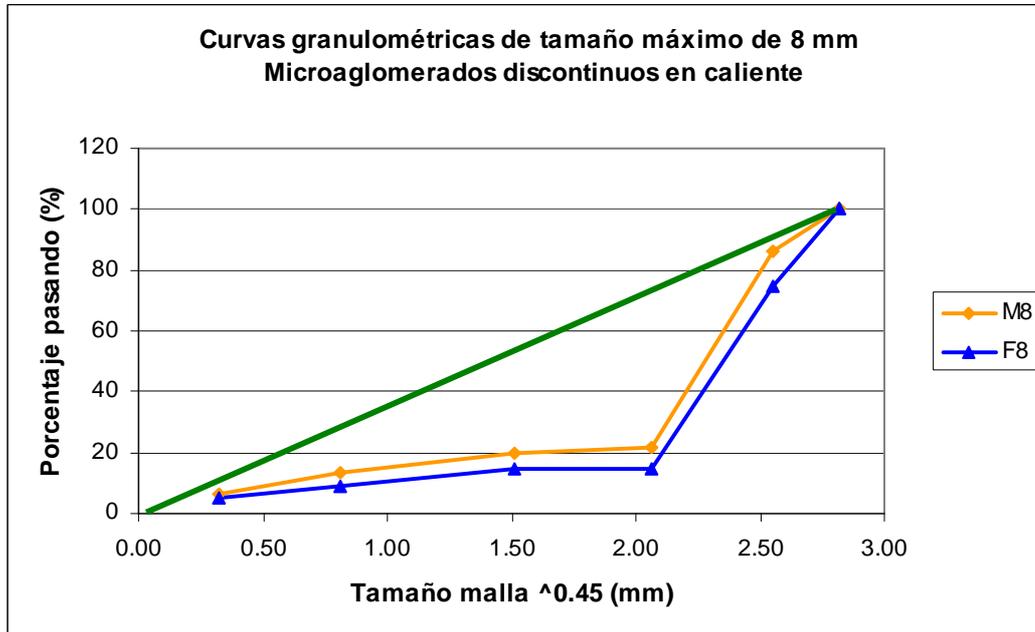
Las granulometrías especificadas en España son las siguientes:

Tabla No. 1: Granulometrías de los microaglomerados

Tamiz (mm)	F8	F10	M8	M10
12.5		100		100
10	100	75 – 97	100	75 – 97
8	75 – 97		75 – 97	
4	23 – 38	23 – 38	14 – 27	14 – 27
2	18 – 32	18 – 32	11- 22	11 – 22
0.500	11 – 23	11 – 23	8 – 16	8 – 16
0.063	7 – 9	7 - 9	5 - 7	5 – 7

Fuente: Experiencia europea en predicción del desempeño a largo plazo de pavimentos, Dr. Rodrigo Miró, Universidad Politécnica de Cataluña

La figura No.2 ilustra ambos tipos de granulometría:



Fuente: Experiencia europea en predicción del desempeño a largo plazo de pavimentos,
Dr. Rodrigo Miró, Universidad Politécnica de Cataluña

Figura No. 2: Granulometrías de microaglomerados de tamaño máximo 8 y 10 mm.

1.1.1 Especificaciones españolas para microaglomerados

Para tener un marco de referencia que indique cuáles son los principales ensayos para diseño y aseguramiento de la calidad de microaglomerados discontinuos en caliente se indican a continuación los ensayos normados en España, ya que se utilizó la experiencia española como punto de partida para la investigación.

Tabla No. 2: Especificaciones para agregado grueso

Ensayo	Categoría de tráfico	Mezcla tipo F	Mezcla tipo M
Partículas fracturadas	Tránsito alto	100	100
	Tránsito medio y bajo	75	75
Coeficiente de desgaste Los Ángeles	Tránsito alto	20	15
	Tránsito medio y bajo	<25	<25
Coeficiente de pulido acelerado	Tránsito alto	0.55	0.55
	Tránsito medio	0.50	0.50
	Tránsito bajo	0.45	0.45
Índice de lajas	Tránsito alto	20	20
	Tránsito medio y bajo	<25	<25
Equivalente de arena	Todos los casos	Mínimo 50%	
Azul de matileno	Todos los casos	Máximo 1	
Cont. de impurezas	Todos los casos	<0.5%	
Adhesividad ligante agregado	Todos los casos	≥95%	

Fuente: Experiencia europea en predicción del desempeño a largo plazo de pavimentos, Dr. Rodrigo Miró, Universidad Politécnica de Cataluña

Tabla No. 3: Especificaciones para agregado fino

Características	Mezcla tipo F	Mezcla tipo M
Equivalente de arena	Mínimo 50%	
Azul de matileno	Máximo 1	
Adhesividad ligante agregado	>4%	

Fuente: Experiencia europea en predicción del desempeño a largo plazo de pavimentos, Dr. Rodrigo Miró, Universidad Politécnica de Cataluña

Tabla No. 4: Proporciones mínimas de filler de aportación

Categoría de tráfico	Valores mínimos % peso
Alto y medio	100
Bajo	50

Fuente: Experiencia europea en predicción del desempeño a largo plazo de pavimentos, Dr. Rodrigo Miró, Universidad Politécnica de Cataluña

Definición de polvo mineral o filler: fracción total del agregado que pasa por el tamiz No. 100 y queda retenido en el tamiz No. 200.

Tabla No.5: Requisitos para el polvo mineral

Ensayos	Requisitos
Densidad aparente	0.5 – 0.8 g/cm ³
Coefficiente de emulsividad	< 0.6 g/cm ³

Fuente: Experiencia europea en predicción del desempeño a largo plazo de pavimentos, Dr. Rodrigo Miró, Universidad Politécnica de Cataluña

Tabla No. 6: Requisitos para cementos asfálticos modificados

Ensayo	Requisito	
	BM 60/70	BM 80/100
Penetración (25 °C, 100g, 5s)	60 -70	80 – 100
Punto de reblandecimiento anillo y bola	Mínimo 65C	Mínimo 60C
Ductilidad (5cm/min) a 5 °C	mínimo 30cm	Mínimo 60cm
Indice de penetración	Mínimo +4	Mínimo +4
Punto de fragilidad	Máximo –15C	Máximo –15C
Recuperación elástica	Mínimo 60%	Mínimo 60%
Flotación	2000s	2000s
Estabilidad al almacenamiento. Diferenc. punto ablandamiento Diferencia de penetración, 0.1mm	Máximo 5 Máximo 10	Máximo 5 Máximo 12

Fuente: Experiencia europea en predicción del desempeño a largo plazo de pavimentos, Dr. Rodrigo Miró, Universidad Politécnica de Cataluña

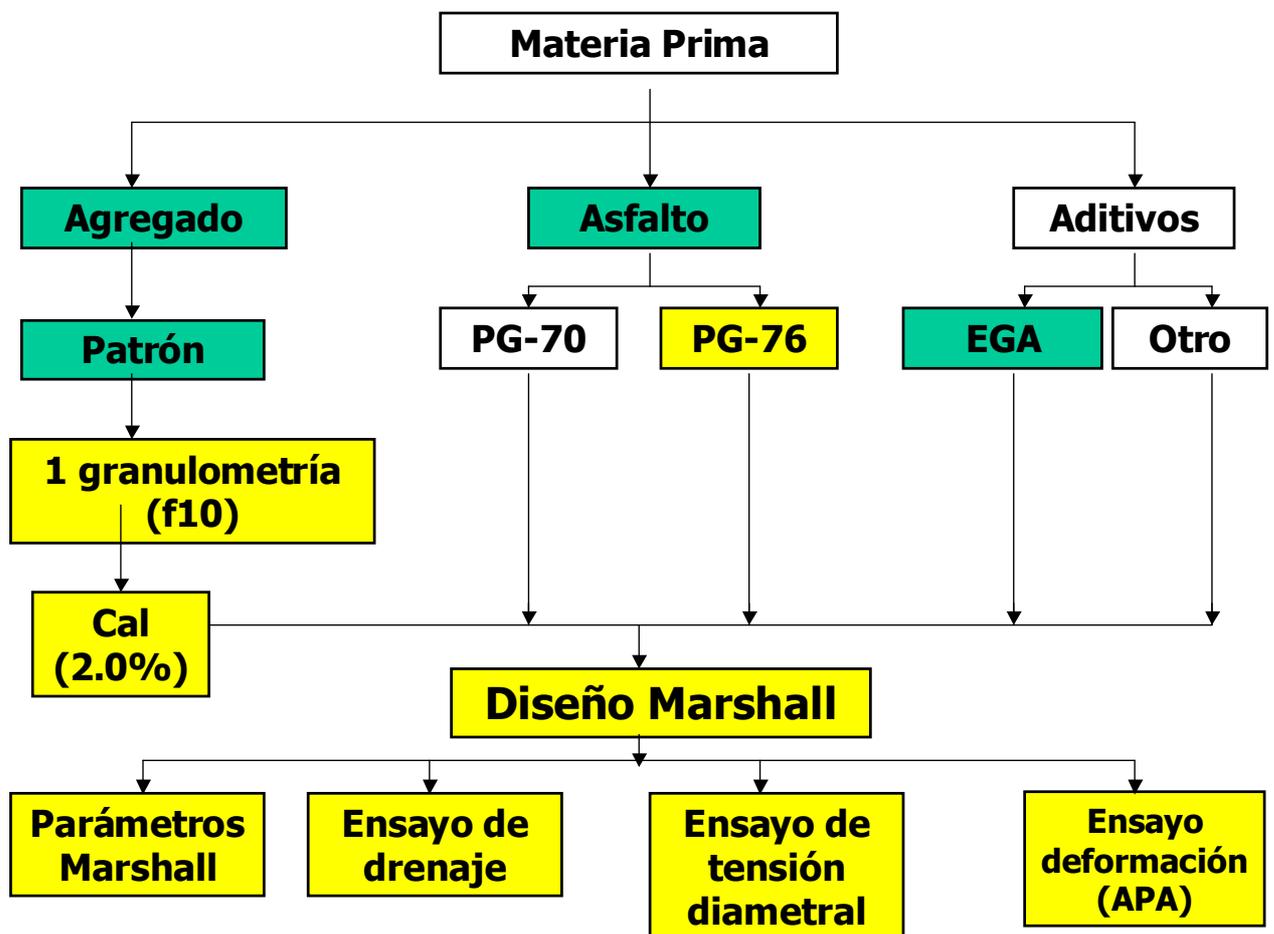
Tabla 7: Requisitos para el diseño de la mezcla.

Ensayo / Característica	Requisito
Dotación media	
Tipo M8	25 –40 kg/m ²
Tipo M10	35 –50 kg/m ²
Tipo F8	40 –75 kg/m ²
Tipo F10	50 –100 kg/m ²
% de asfalto	
Tipo M	≥5.0
Tipo F	≥5.5
Betún residual en riego de adherencia	
Tipo M Pavimento nuevo Pavimento antiguo	>0.25 >0.40
Tipo F Pavimento nuevo Pavimento antiguo	>0.20 >0.35
Dosificación para mezclas Tipo F	
Procedimiento Marshall (50golpes) Vacíos en la mezcla Estabilidad	Mínimo 4% Mínimo 75kN
Velocidad de deformación en el intervalo de 105 – 120min	12 - 15µm/min
Perdida de resistencia (ensayo de inmersión – compresión)	25%≥
Dosificación para mezclas Tipo M	
Procedimiento Cántabro Tipo de probeta No. Golpes por cara Pérdida por abrasión en seco (25C) Vacíos en la mezcla	Marshall 50 <15% ≥12%

Fuente: Experiencia europea en predicción del desempeño a largo plazo de pavimentos,
Dr. Rodrigo Miró, Universidad Politécnica de Cataluña

2. UBICACIÓN DEL AVANCE DEL PROYECTO

Para ubicar el estado de avance del proyecto, a continuación se presenta el esquema experimental coloreado de forma que se muestra para cada actividad su avance particular. En verde se presentan las actividades que ya han sido concluídas, en amarillo las actividades que están en proceso, y en blanco las actividades que aún no se han ejecutado.



3. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

En este estudio se utilizó un solo tipo de agregado, proveniente del quebrador La Esmeralda en Guápiles y un solo tipo de ligante asfáltico, a saber AC-30 modificado con un polímero de tipo EGA al 1.5%, lo cual resultó en un PG-76.

3.1 Ligante asfáltico

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

Tabla No. 8: Caracterización físico-química del ligante asfáltico virgen

ENSAYO	AASHTO	Resultado	Especif.AASHTO	Especificación Nacional	UNID.
Punto de inflamación	T 48	276	min. 232	min. 232	°C
Penetración a 25°C	T 49	61	min. 50	min 50	(1/10 mm)
Viscosidad cinemática a 125°C	T 201	1033	-	-	cSt
Viscosidad cinemática a 135°C	T 201	578	min. 350	min. 350	cSt
VISCOSIDAD CINEMATICA a 145 °C	T 201	332	-	-	cSt
VISCOSIDAD ABSOLUTA a 60°C (original)	T 201	3041	2400-3600	2400-3600	Poise
VISCOSIDAD ABSOLUTA a 60°C (envejecido en TFO)	T 201	7283	máx.12000	-	Poise
DUCTILIDAD A 25°C (envejecido en TFO)	T 51	-	mín. 40	mín. 40	cm
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO	T 44	99,99	min. 99,00	min. 99,00	%
GRAVEDAD ESPECIFICA A 25°C	T 228	1,021	-	-	-
PERDIDA EN PELULA DELGADA (RTFO)		0,61	-	-	-
PERDIDA EN PELICULA DELGADA (D 1754)	T 179	0,42	max. 0,50	max. 0,50	%
Indice de susceptibilidad térmica (VTS)	No norma AASHTO	3,41	-	3,30-3,90	-
Razón de viscosidades	No norma AASHTO	2,4	-	máx.3,0	-
Indice de inestabilidad coloidal (IC)	-	-	-	máx 0,60	-
Porcentaje de ceras.	-	-	-	máx 3,0	%

El ligante asfáltico virgen utilizado clasifica como un AC-30.

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 las Tablas No. 9, 10 y 11 se presenta la caracterización reológica del ligante.

**Tabla No. 9: Caracterización reológica del ligante asfáltico virgen:
Determinación del grado de desempeño superior**

Ensayos de Determinación del grado de desempeño superior				
TEMP.	CONDICION ORIGINAL		CONDICION ENVEJECIDA EN RTFO (4)	
	Módulo de deformabilidad G* / sen δ (kPa)	ANGULO DE FASE	Módulo de deformabilidad G* / sen δ (kPa)	ANGULO DE FASE
58°C	4,045	82,7	10,918	77,6
70°C	0,829	86,1	2,221	82,3
82°C	0,248	87,9	0,607	85,5
Grado de desempeño	69,2 (64°C)	-	70,1 (70°C)	-

**Tabla No. 10: Caracterización reológica del ligante asfáltico virgen:
Determinación del grado de desempeño intermedio**

Ensayos de Determinación del grado de desempeño intermedio		
TEMP.	CONDICION ENVEJECIDA EN RTFO + PAV	
	Módulo de fatiga G* sen δ (MPa)	ANGULO DE FASE
16°C	6,367	42,5
22°C	3,131	47,1
28°C	1,612	52,0
Grado de desempeño	17,99 (19°C)	-

Tabla No. 11: Grado de desempeño superior e intermedio del ligante asfáltico virgen

GRADO DE DESEMPEÑO	
Temperatura superior (°C)	64
Temperatura intermedia (°C)	19

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.

3.1.1 Ligante asfáltico modificado con Polímero tipo EGA

Para mejorar las propiedades del ligante asfáltico, éste se modificó con un polímero de tipo EGA (ver punto 2.3.1). En la tabla siguiente se presentan los resultados de caracterización del ligante modificado:

Tabla No. 12: Caracterización reológica del ligante asfáltico modificado: Determinación del grado de desempeño superior

Ensayos de Determinación del grado de desempeño superior				
TEMPERATURA DE ENSAYO	CONDICION ORIGINAL		CONDICION ENVEJECIDA EN RTFO (4)	
	Módulo de deformabilidad $G^* / \text{sen } \delta$ (kPa)	ANGULO DE FASE	Módulo de deformabilidad $G^* / \text{sen } \delta$ (kPa)	ANGULO DE FASE
58°C	7,866	73,8	16,255	74,3
70°C	1,898	77,6	3,529	79,8
82°C	0,616	79,7	1,052	83,5
Grado de desempeño	76	-	76	-

Tabla No. 13: Caracterización reológica del ligante asfáltico modificado: Determinación del grado de desempeño intermedio

Ensayos de determinación del grado de desempeño intermedio		
TEMPERATURA DE ENSAYO	CONDICION ENVEJECIDA EN RTFO + PAV	
	Módulo de fatiga $G^* \text{ sen } \delta$ (MPa)	ANGULO DE FASE
16°C	8,590	43,3
22°C	4,396	47,4
28°C	2,340	51,9
Grado de desempeño	22	-

Tabla No. 14: Grado de desempeño superior e intermedio del ligante asfáltico modificado con Polímero tipo EGA al 1.5%

GRADO DE DESEMPEÑO	
Temperatura superior	76
Temperatura intermedia	22

3.2 Agregado

El agregado utilizado proviene de la región de Guápiles. En la Tabla No.15 se presenta la caracterización del agregado.

Tabla No. 15: Caracterización del agregado patrón .

Ensayo	Valor	Requerimientos	
		Especificación mínima	Especificación máxima
Agregado grueso			
Gbs	2.62	-	-
Absorción (%)	1.7	-	-
Abrasión tipo A (%)	19.1	-	20
Caras fracturadas (1 cara)	86	100	-
Partículas planas y elongadas			
Menor que -3 a 1	6.9	-	-
Menor que -5 a 1	0.9	-	-
Agregado fino			
Gbs	2.64	-	-
Absorción (%)	2.0	-	-
Índice de plasticidad (%)	NP	-	-
Vacíos no compactados (%)	36.6	-	-
Equivalente de arena (%)	96	50	-
Disgregabilidad en sulfato de sodio (%)	5.65	-	-

El ensayo de caras fracturadas no se cumple.

3.2.1 Coeficientes de pulimento acelerado

Basados en las normas NLT 174-93 *Pulimento 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.4 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. 16: 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.5 se presentan los resultados de pulimento obtenidos para esta fuente.

Tabla No. 17: Coeficiente de pulimento acelerado

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

Tabla No. 15: Caracterización del agregado del Quebrador San Gerónimo

Ensayo	Valor	Requerimientos	
		Especificación mínima	Especificación máxima
Agregado grueso			
Gbs	2.61	-	-
Absorción (%)	2.2	-	-
Abrasión tipo A (%)	-	-	20
Caras fracturadas (1 cara)	86	100	-
Partículas planas y elongadas			
Menor que -3 a 1	-	-	-
Menor que -5 a 1	0.0	-	-
Agregado tipo chorro			
Gbs	2.68	-	-
Absorción (%)	1.3	-	-
Abrasión tipo A (%)	11.0	-	20
Caras fracturadas (1 cara)	94.5	100	-
Índice de Plasticidad (%)	NP		
Equivalente de arena (%)	59	50	
Partículas planas y elongadas			
Menor que -3 a 1	-	-	-
Menor que -5 a 1	0.0	-	-
Agregado fino			
Gbs	2.50	-	-
Absorción (%)	4.2	-	-
Índice de plasticidad (%)	NP	-	-
Vacíos no compactados (%)	35.4	-	-
Equivalente de arena (%)	55	50	-

El ensayo de caras fracturadas no se cumple.

3.3 Modificantes

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 este¹.

3.3.1 Polímero

3.3.1.1 Polímero tipo EGA

El polímero tipo EGA es del tipo 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.

Se dosificó al 1.5% del peso del asfalto.

La figura No.3 muestra al polímero citado.



Figura No. 3: Polímero EGA

3.3.2 Cal hidratada

Para analizar el efecto de rigidizar el mastique asfáltico en la mezcla, se añadió mediante vía húmeda a la granulometría un 2.0% de cal hidratada.

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

3.3.3 Granulometría utilizada

Tabla No. 18: Granulometría utilizada F8

Tamiz	Tamaño de abertura (mm)	Porcentaje pasando (%)	Límite inferior de especificación	Límite superior de especificación
3/8	19,00	100	100	100
1/2	12,5	100	100	100
3/8	9,5	96	94	99
No.4	4,75	32	24	40
No.8	2,36	27	20	35
No.16	1,18	22	15	29
No.30	0,6	19	12	25
No.50	0,3	14	10	19
No.100	0,15	11	8	14
No.200	0,075	8	7,0	10,0

En el caso en donde se añadió cal hidratada, se sustituye un 2% del porcentaje pasando la malla No. 200 y se inserta el 2% de cal.

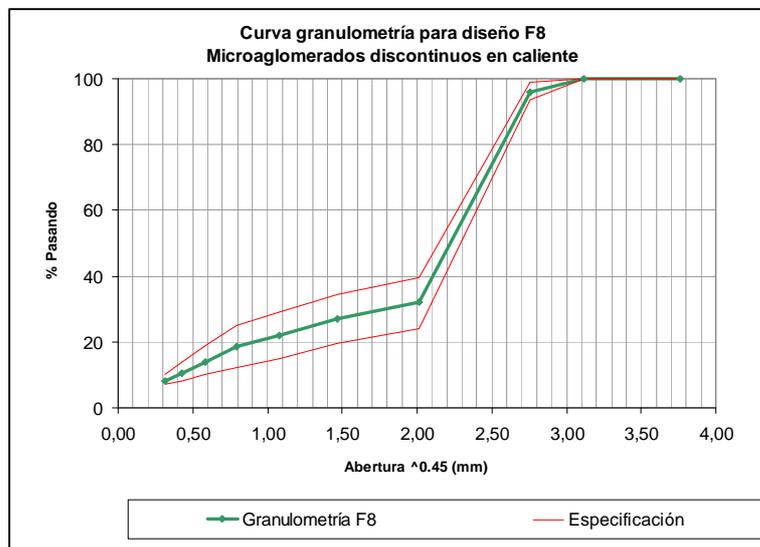


Figura No. 4: Curva granulométrica de tipo F8 utilizada

Tabla No. 18: Granulometría F10 utilizada

MALLA	Tamiz mm	% PASANDO	Límite inferior de especificación	Limite superior de especificación
25 mm				
19 mm				
12.7 mm	12,7	100		100
9.5 mm	9,5	81	70	92
No 4	4,75	32	30	46
No 8	2,36	27	20	34
No 16	1,18	22	12	28
No 30	0,6	18,5	10	25
No 50	0,3	14	8	18
No 100	0,15	10,7		
No 200	0,075	8	8	12
CHAROLA		0		

En el caso en donde se añadió cal hidratada, se sustituye un 2% del porcentaje pasando la malla No. 200 y se inserta el 2% de cal.

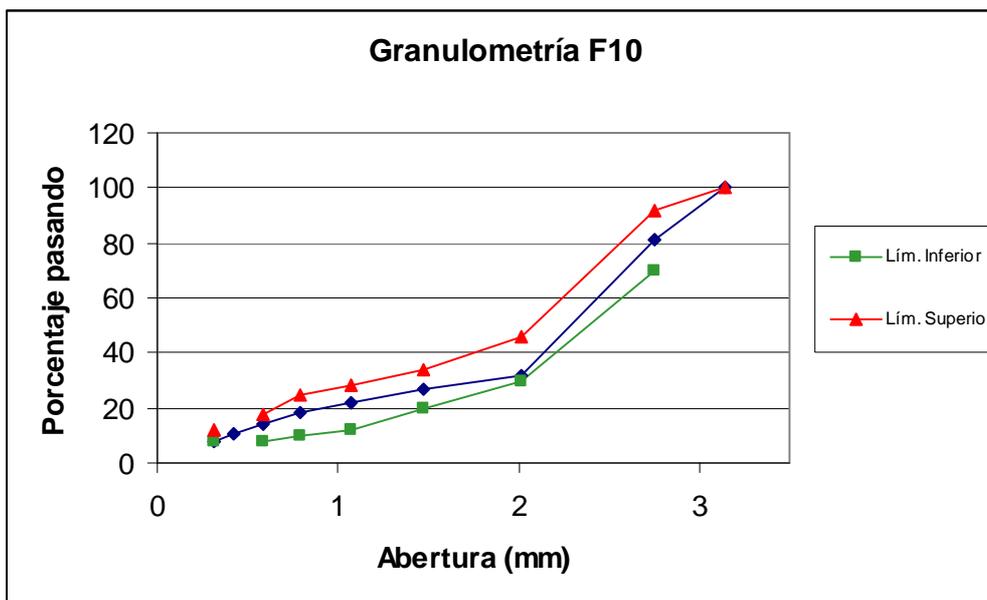


Figura No. 4: Curva granulométrica de tipo F10 utilizada

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Granulometría F8

4.1.1 Análisis del microaglomerado sin cal

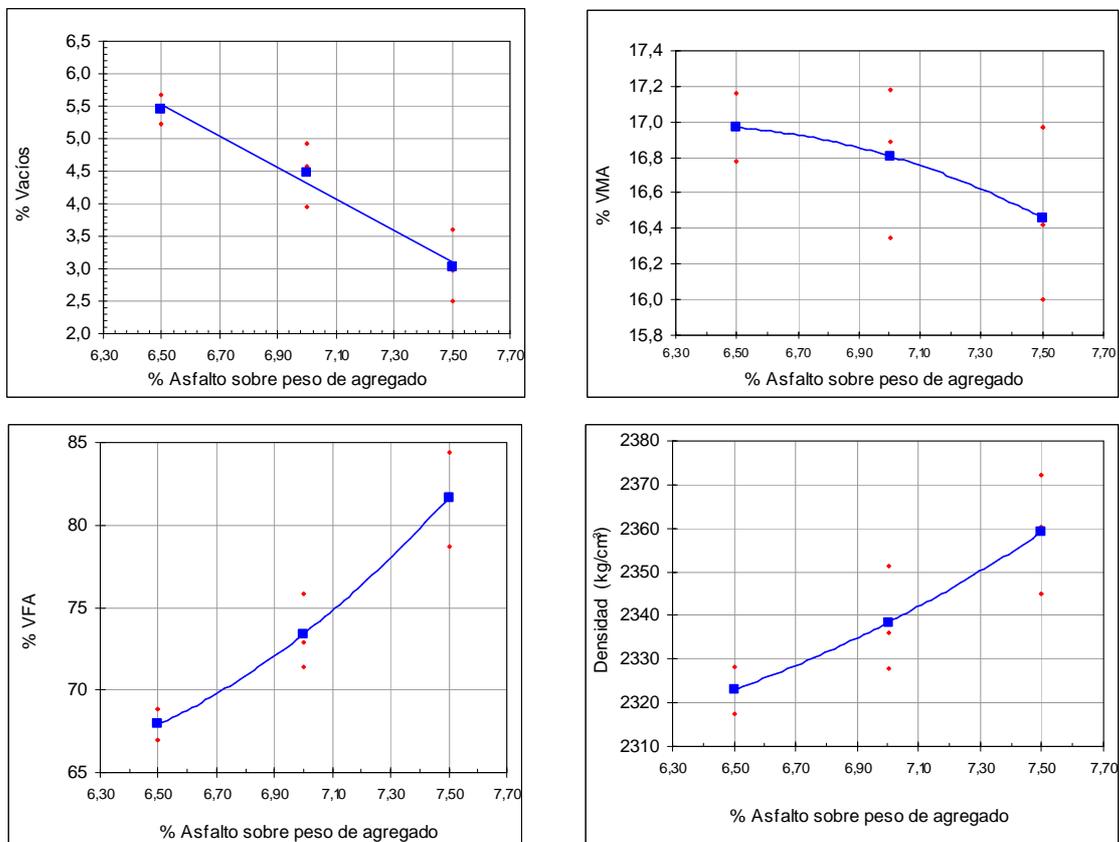
Esta fue la primera etapa de la investigación en la cual se analizó la granulometría indicada, con el asfalto modificado con Polímero tipo EGA, pero sin añadir cal.

El objetivo de esta primera etapa fue iniciar la caracterización de las propiedades del microaglomerado.

El diseño de mezcla se ejecutó utilizando el método Marshall con 50 golpes por cara. El contenido de vacíos buscado fue de $5.0 \pm 1.0\%$, por lo tanto, se analizaron 3 puntos diferentes de contenido de asfalto: 6.5%, 7.0% y 7.5%.

Los resultados de dicho diseño se indican a continuación.

Gráfico No. 1: Curvas de diseño para el parámetro de vacíos de aire. Microaglomerado sin cal.



Los gráficos de vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos llenos con asfalto se incluyen a modo de ilustración, debido a que no están normados dentro de la metodología de diseño para microaglomerados.

De los gráficos anteriores se desprende que hay cumplimiento de la condición básica de que el porcentaje de vacíos debe ser superior al 4.0%. Además, los porcentaje de asfalto obtenidos se encuentran dentro de un rango común para nuestro medio.

Para el 5.0% de vacíos se requiere de un 6.7% de asfalto sobre mezcla.

Una vez que se determinó el porcentaje de vacíos para distintos contenidos de asfalto, se procedió a efectuar la prueba de drenaje para verificar que no la mezcla no tuviera problemas de exudación.

El ensayo de drenaje (Schellenberg test) consiste en tomar una muestra de un 1 kg de mezcla, se introduce dentro de un recipiente cilíndrico normado (98 mm de diámetro y 136 mm de altura), y luego se coloca en un horno a 170 °C (en caso de utilizar asfaltos modificados), durante 2 horas. Finalmente, luego de las 2 horas se voltea rápidamente el recipiente dejando caer la mezcla. El porcentaje de asfalto adherido al recipiente debe ser menor a un 0.2%. Como referencia se indica que la norma AASHTO T-305, indica un ensayo similar al descrito. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla No. 19: Resultado del ensayo de drenaje

Muestra	% Drenado <0.2%
1	0,10%
2	0,10%

De la tabla anterior se deduce que hay cumplimiento de la norma de drenaje, por lo cual es de esperar que esta mezcla no tenga problemas de exudación de asfalto.

También se efectuaron ensayos en la “Pista de Ensayo de Georgia”, para determinar la resistencia ante la deformación permanente. Este dispositivo de ensayo

Tabla No. 20: Resultados de ensayo en el Asphalt Pavement Evaluator

Resultados en pista de ensayo de laboratorio, Diseño F8 sin cal			
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3
% Vacíos de diseño	4,5	5,0	5,5
% Asfalto	6,9	6,7	6,5
Deformación (mm)	2,6	2,2	3,3
Vacíos APA	6,9	7,5	7,4

Como se observa en la tabla anterior, para un 5.0% de vacíos la deformación permanente es de 2.2 mm, valor muy inferior a las deformaciones típicas encontradas en las mezclas densas típicas producidas en el país (valores de deformación superiores a 3 mm).

Adicionalmente se efectuaron ensayos de durabilidad a la mezcla asfáltica construida con el contenido óptimo de asfalto. Los resultados se indican en la siguientes tablas.

Tabla No. 21: Resultados de ensayo de resistencia retenida a la compresión uniaxial. Diseño F8 sin cal.

	Porcentaje de vacíos (%)	Carga de compresión (kg)	Resistencia (MPa)
Resultados promedio para especímenes sin condicionar	6.9	2049.2	2.6
Desviación estándar	0.5	105.0	0.1
Resultados promedio para especímenes condicionados (24 hr)	6.9	2007.6	2.5
Desviación estándar	0.3	83.8	0.1
Resistencia retenida a la compresión uniaxial			98.0%
Especificación			> 75.0%

Tabla No. 22: Resultados de ensayo de resistencia retenida a la tensión indirecta. Diseño F8 sin cal.

	Porcentaje de vacíos (%)	Saturación (%)	Tensión Diametral (Pa)
Resultados promedio para especímenes sin condicionar	5.1	-	1079
Desviación estándar	0.7	-	78
Resultados promedio para especímenes condicionados (24 hr)	5.2	60.9	916
Desviación estándar	0.7	2.5	48
Resistencia retenida a la tensión indirecta retenida			85.0%
Especificación			> 75.0%

De las dos tablas anteriores se concluye que hay cumplimiento de las especificaciones de durabilidad para esta mezcla. En ambos ensayos el margen de diferencia con el límite inferior de la especificación es importante.

4.1.2 Análisis del microaglomerado con un 2% de cal

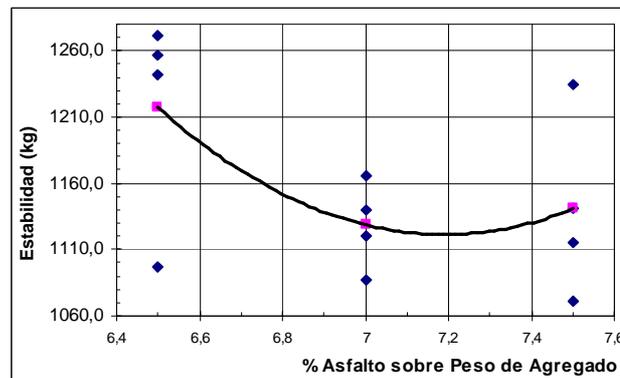
En este caso se mantiene el asfalto modificado con Polímero tipo EGA, pero a la granulometría se le añadió un 2%, que sustituye esa cantidad de material que pasa la malla No. 200. La forma en que se añadió la cal a la granulometría en el laboratorio fue por vía húmeda.

El diseño de mezcla se ejecutó utilizando el método Marshall con 50 golpes por cara. El contenido de vacíos buscado fue de $5.0 \pm 1.0\%$, por lo tanto, se analizaron 3 puntos diferentes de contenido de asfalto: 6.5%, 7.0% y 7.5% al igual que en caso anterior.

Además de los ensayos de vacíos, densidad, VFA y VMA en este caso se efectuó el ensayo de estabilidad para determinar si se cumple con el valor mínimo indicado por la normativa española.

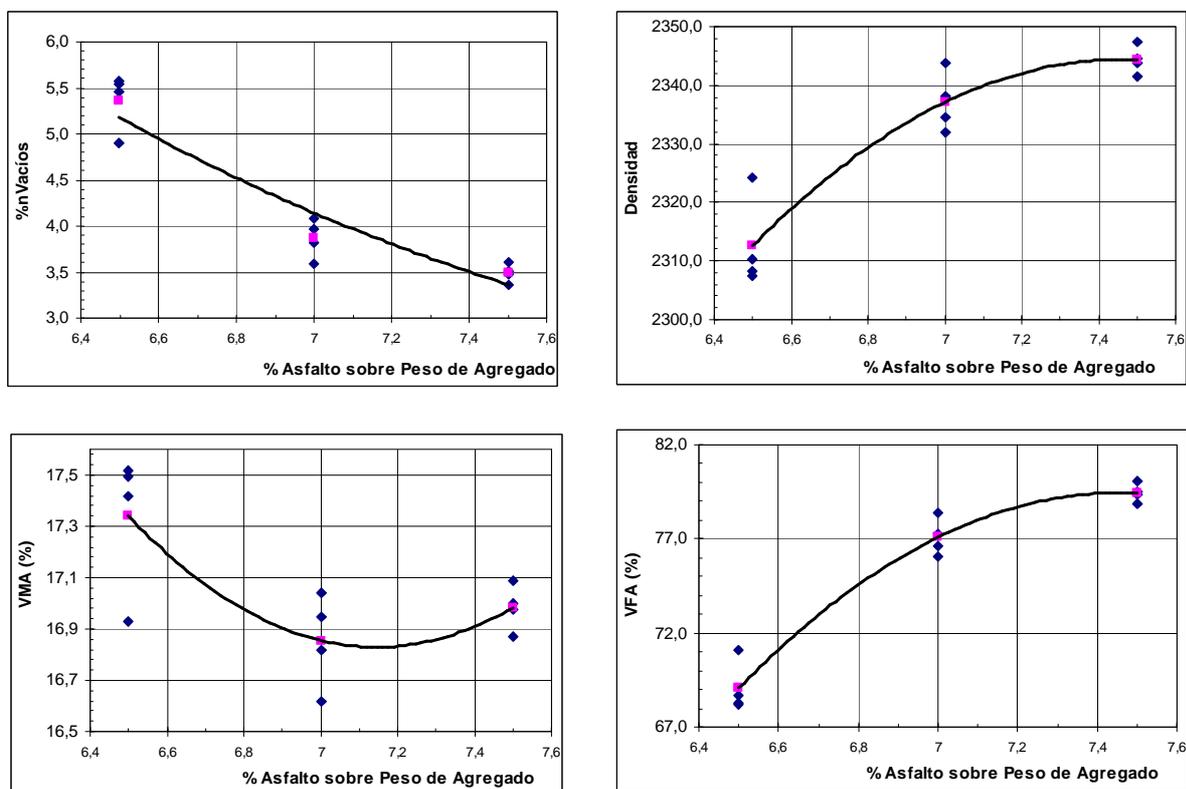
El gráfico No.2 muestra la curva de variación de la estabilidad respecto del contenido de asfalto.

Gráfico No. 1: Curva de estabilidad respecto del contenido de asfalto. Microaglomerado modificado con cal al 2.0%.



Los resultados de los otros parámetros del diseño se indican a continuación.

Gráfico No. 2: Curvas de diseño para el parámetro de vacíos de aire. Microaglomerado con 2% de cal.



Los gráficos de vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos llenos con asfalto se incluyen a modo de ilustración, debido a que no están normados dentro de la metodología de diseño para microaglomerados.

De los gráficos anteriores se desprende que hay cumplimiento de la condición básica de que el porcentaje de vacíos debe ser superior al 4.0%. Además, los porcentaje de asfalto obtenidos se encuentran dentro de un rango común para nuestro medio.

Para el 5.0% de vacíos se requiere de un 6.6% de asfalto sobre mezcla.

Una vez que se determinó el porcentaje de vacíos para distintos contenidos de asfalto, se procederá a efectuar la prueba de drenaje para verificar que no la mezcla no tuviera problemas de exudación. Este ensayo está pendiente aún.

También se efectuaron ensayos en la “Pista de Ensayo de Georgia” (APA) o pista de ensayo de laboratorio, para determinar la resistencia ante la deformación permanente. Este dispositivo de ensayo

Tabla No. 23: Resultados de ensayo en el Asphalt Pavement Evaluator

Resultados en pista de ensayo de laboratorio, Diseño F8 con 2,0% de cal			
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3
% Vacíos de diseño	4,5	5,0	5,5
% Asfalto	7,0	6,6	6,2
Deformación (mm)	3,1	2,8	2,5
Vacíos APA	5,5	7,5	7,4

Como se observa en la tabla anterior, para un 5.0% de vacíos la deformación permanente es de 2.8 mm, valor cercano a las deformaciones típicas encontradas en las mezclas densas típicas producidas en el país (valores de deformación superiores a 3 mm). Esto denota que en una mezcla del tipo microaglomerado, en donde las principales características están dadas por la trabazón interna del esqueleto mineral y no por el mastique asfáltico, probablemente la adición de un elemento rigidizante no mejore la resistencia ante la deformación permanente.

Adicionalmente se efectuaron ensayos de durabilidad a la mezcla asfáltica construida con el contenido óptimo de asfalto. Los resultados se indican en la siguientes tablas.

Tabla No. 24: Resultados de ensayo de resistencia retenida a la compresión uniaxial. Diseño F8 con 2.0% cal.

	Porcentaje de vacíos (%)	Carga de compresión (kg)	Resistencia (MPa)
Resultados promedio para especímenes sin condicionar	6.7	2219.7	2.8
Desviación estándar	0.7	36.5	0.0
Resultados promedio para especímenes condicionados (24 hr)	7.1	2253.8	2.8
Desviación estándar	0.3	57.2	0.1
Resistencia retenida a la compresión uniaxial			100.0%
Especificación			> 75.0%

Tabla No. 25: Resultados de ensayo de resistencia retenida a la tensión indirecta. Diseño F8 sin cal.

	Porcentaje de vacíos (%)	Saturación (%)	Tensión Diametral (Pa)
Resultados promedio para especímenes sin condicionar	6.9	-	882
Desviación estándar	0.4	-	58
Resultados promedio para especímenes condicionados (24 hr)	6.9	69.0	815
Desviación estándar	0.4	3.5	30
Resistencia retenida a la tensión indirecta retenida			92.0%
Especificación			> 75.0%

De las dos tablas anteriores se concluye que hay cumplimiento de las especificaciones de durabilidad para esta mezcla. En ambos ensayos el margen de diferencia con el límite inferior de la especificación es sustancialmente mayor.

4.1.3 Comparación entre resultados obtenidos en microaglomerado sin cal y con 2.0% de cal

Con el fin de efectuar comparaciones entre los resultados de microaglomerados presentados, se presentan las siguientes tablas de comparación:

Tabla No. 26: Comparación de contenido de asfalto obtenido entre el microaglomerado sin cal y con 2.0% de cal.

% Vacíos de diseño	Virgen	2% CAL
	% Asfalto	% Asfalto
4,5	6,9	7,0
5,0	6,7	6,6
5,5	6,5	6,2

Para el porcentaje óptimo analizado (5.0% de vacíos), se encuentra que hay una diferencia mínima respecto del contenido de asfalto por peso total de agregado, en el caso en donde se utilizó la mezcla sin cal se obtuvo un 6.7% y en el caso en donde se añadió el 2.0% de cal un 6.6%. En el caso del microaglomerado virgen se requiere un mayor porcentaje de asfalto, lo cual se evidencia en la Tabla No.23,

en el caso en donde se usa cal, hay evidencia de una disminución en el contenido de asfalto.

Tabla No. 27: Comparación de resultados del ensayo de deformación permanente entre el microaglomerado sin cal y con 2.0% de cal.

% Vacíos de diseño	Virgen	2% CAL	Virgen	2% CAL
	Deformación (mm)	Deformación (mm)	Vacíos APA	Vacíos APA
4,5	2,6	3,1	6,9	5,5
5,0	2,2	2,8	7,5	7,5
5,5	3,3	2,5	7,4	6,5
Promedio	2,7	2,7	7,3	7,0
Desviación Estándar	0,4	0,3	0,3	0,5

De la tabla anterior se puede concluir que en el caso de 5.0% de contenido de vacíos, la deformación permanente para el microaglomerado sin cal fue menor que en el caso sin añadirla. Esto refuerza la afirmación de que probablemente la cal no sea tan incidente para mejorar la resistencia ante la deformación permanente.

Tabla No. 28: Comparación de resultados del ensayo de durabilidad entre el microaglomerado sin cal y con 2.0% de cal.

Ensayo de resistencia retencia a:	Virgen	2% CAL
Compresión uniaxial	98%	100%
Tensión diametral	85%	92%

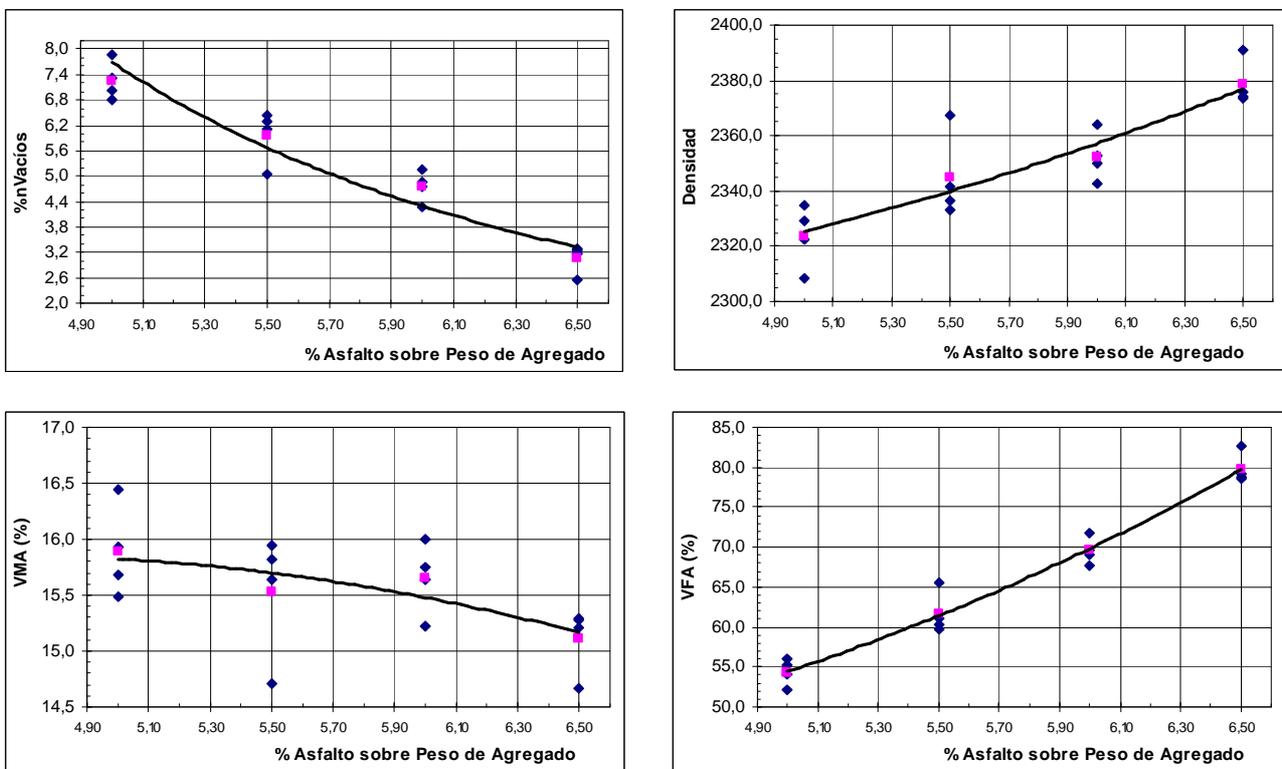
Como se muestra en la tabla No. 25, en el caso de los ensayos de durabilidad si hay mejoras apreciables debidas a la adición de un 2.0% de cal.

4.2 Granulometría F10

4.2.1 Análisis del microaglomerado sin cal

Los resultados de dicho diseño se indican a continuación.

Gráfico No. 1: Curvas de diseño para el parámetro de vacíos de aire. Microaglomerado sin cal.



Los gráficos de vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos llenos con asfalto se incluyen a modo de ilustración, debido a que no están normados dentro de la metodología de diseño para microaglomerados.

De los gráficos anteriores se desprende que hay cumplimiento de la condición básica de que el porcentaje de vacíos debe ser superior al 4,0%. Además, los porcentaje de asfalto obtenidos se encuentran dentro de un rango común para nuestro medio.

Para el 5,0% de vacíos se requiere de un 5,7% de asfalto sobre mezcla.

Gráfico No. 1: Curva de estabilidad respecto del contenido de asfalto. Microaglomerado F10 sin cal.

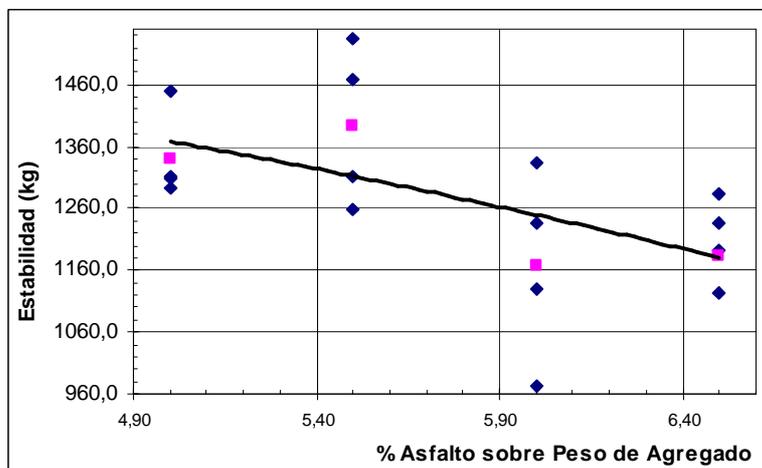


Tabla No. 19: Resultado del ensayo de drenaje

Muestra	% Drenado <0.2%
5,0	0,00%
5,5	0,02%
6,0	0,04%
6,5	0,10%
OPTIMO	0,03 < 0,2%

De la tabla anterior se deduce que hay cumplimiento de la norma de drenaje, por lo cual es de esperar que esta mezcla no tenga problemas de exudación de asfalto.

También se efectuaron ensayos en la “Pista de Ensayo de Georgia”, para determinar la resistencia ante la deformación permanente. Este dispositivo de ensayo

Tabla No. 20: Resultados de ensayo en el Asphalt Pavement Evaluator

Resultados en pista de ensayo de laboratorio, Diseño F10 sin cal			
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3
% Vacíos de diseño	5,0	5,0	5,0
% Asfalto	5,7	5,7	5,7
Deformación (mm)	1,7	2,1	2,2
Vacíos APA	8,5	8,3	8,6

Como se observa en la tabla anterior, para un 5.0% de vacíos la deformación permanente es de 1.7 mm.

Adicionalmente se efectuaron ensayos de durabilidad a la mezcla asfáltica construida con el contenido óptimo de asfalto. Los resultados se indican en la siguientes tablas.

Tabla No. 21: Resultados de ensayo de resistencia retenida a la compresión uniaxial. Diseño F10 sin cal.

	Porcentaje de vacíos (%)	Carga de compresión (kg)	Resistencia (MPa)
Resultados promedio para especímenes sin condicionar	6.7	3886.4	4.9
Desviación estándar	0.3	218.2	0.3
Resultados promedio para especímenes condicionados (24 hr)	6.7	3204.5	4.0
Desviación estándar	0.2	119.2	0.1
Resistencia retenida a la compresión uniaxial			83.0%
Especificación			> 75.0%

Tabla No. 22: Resultados de ensayo de resistencia retenida a la tensión indirecta. Diseño F10 sin cal.

	Porcentaje de vacíos (%)	Saturación (%)	Tensión Diametral (Pa)
Resultados promedio para especímenes sin condicionar	7.0	-	1224
Desviación estándar	0.3	-	65
Resultados promedio para especímenes condicionados (24 hr)	7.0	58.1	1201
Desviación estándar	0.6	1.2	37
Resistencia retenida a la tensión indirecta retenida			98.0%
Especificación			> 75.0%

De las dos tablas anteriores se concluye que hay cumplimiento de las especificaciones de durabilidad para esta mezcla. En ambos ensayos el margen de diferencia con el límite inferior de la especificación es importante.

4.2.2 Análisis del microaglomerado granulometría F10 con un 2% de cal

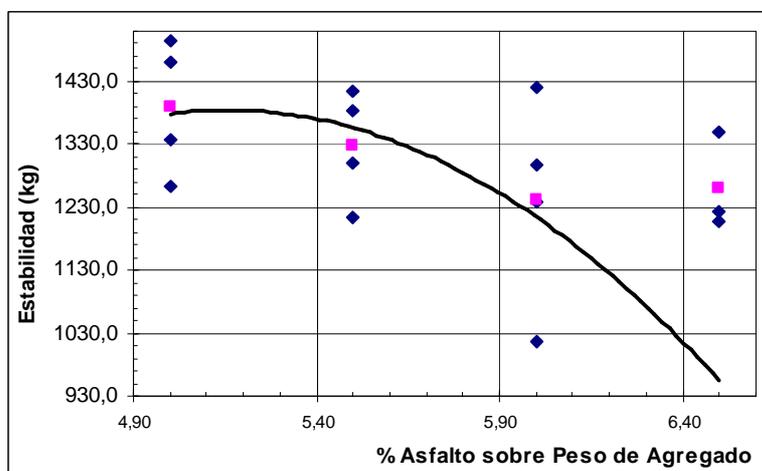
En este caso se mantiene el asfalto modificado con Polímero tipo EGA, pero a la granulometría se le añadió un 2%, que sustituye esa cantidad de material que pasa la malla No. 200. La forma en que se añadió la cal a la granulometría en el laboratorio fue por vía húmeda.

El diseño de mezcla se ejecutó utilizando el método Marshall con 50 golpes por cara. El contenido de vacíos buscado fue de $5.0 \pm 1.0\%$, por lo tanto, se analizaron 3 puntos diferentes de contenido de asfalto: 6.5%, 7.0% y 7.5% al igual que en caso anterior.

Además de los ensayos de vacíos, densidad, VFA y VMA en este caso se efectuó el ensayo de estabilidad para determinar si se cumple con el valor mínimo indicado por la normativa española.

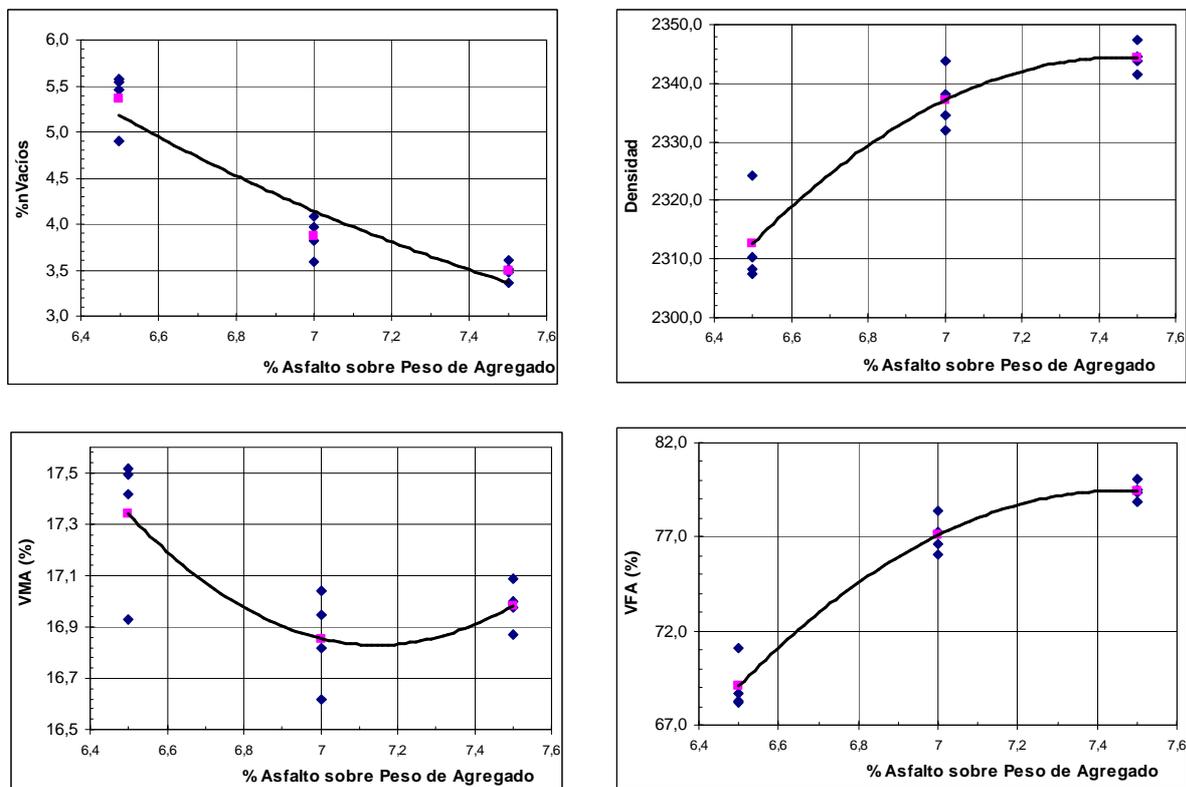
El gráfico No.2 muestra la curva de variación de la estabilidad respecto del contenido de asfalto.

Gráfico No. 1: Curva de estabilidad respecto del contenido de asfalto. Microaglomerado modificado con cal al 2.0%.



Los resultados de los otros parámetros del diseño se indican a continuación.

Gráfico No. 2: Curvas de diseño para el parámetro de vacíos de aire. Microaglomerado con 2% de cal.



Los gráficos de vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos llenos con asfalto se incluyen a modo de ilustración, debido a que no están normados dentro de la metodología de diseño para microaglomerados.

De los gráficos anteriores se desprende que hay cumplimiento de la condición básica de que el porcentaje de vacíos debe ser superior al 4.0%. Además, los porcentaje de asfalto obtenidos se encuentran dentro de un rango común para nuestro medio.

Para el 5.0% de vacíos se requiere de un 5.6% de asfalto sobre mezcla.

También se efectuaron ensayos en la “Pista de Ensayo de Georgia” (APA) o pista de ensayo de laboratorio, para determinar la resistencia ante la deformación permanente. Este dispositivo de ensayo

Tabla No. 23: Resultados de ensayo en la Pista de Ensayo de Georgia

Resultados en pista de ensayo de laboratorio, Diseño F10 con 2,0% de cal			
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3
% Vacíos de diseño	5,0	5,0	5,0
% Asfalto	5,6	5,6	5,6
Deformación (mm)	1,4	1,4	1,4
Vacíos APA	8,1	8,7	8,2

Como se observa en la tabla anterior, para un 5.0% de vacíos la deformación permanente es de 1.4 mm, lo cual denota una disminución en la resistencia ante la deformación permanente de la muestra.

Adicionalmente se efectuaron ensayos de durabilidad a la mezcla asfáltica construida con el contenido óptimo de asfalto. Los resultados se indican en la siguientes tablas.

Tabla No. 24: Resultados de ensayo de resistencia retenida a la compresión uniaxial. Diseño F10 con 2.0% cal.

	Porcentaje de vacíos (%)	Carga de compresión (kg)	Resistencia (MPa)
Resultados promedio para especímenes sin condicionar	6.5	4166.7	5.2
Desviación estándar	0.3	181.2	0.2
Resultados promedio para especímenes condicionados (24 hr)	6.5	3833.3	4.8
Desviación estándar	0.7	148.3	0.2
Resistencia retenida a la compresión uniaxial			92.0%
Especificación			> 75.0%

Tabla No. 25: Resultados de ensayo de resistencia retenida a la tensión indirecta. Diseño F10 con 2.0% de cal.

	Porcentaje de vacíos (%)	Saturación (%)	Tensión Diametral (Pa)
Resultados promedio para especímenes sin condicionar	8.0	-	958
Desviación estándar	0.3	-	42
Resultados promedio para especímenes condicionados (24 hr)	8.0	58.1	933
Desviación estándar	0.5	4.1	6
Resistencia retenida a la tensión indirecta retenida			97.0 %
Especificación			> 75.0%

De las dos tablas anteriores se concluye que hay cumplimiento de las especificaciones de durabilidad para esta mezcla. En ambos ensayos el margen de diferencia con el límite inferior de la especificación es sustancialmente mayor.

4.2.3 Comparación entre resultados obtenidos en microaglomerado sin cal y con 2.0% de cal. Granulometría F10.

Con el fin de efectuar comparaciones entre los resultados de microaglomerados presentados, se presentan las siguientes tablas de comparación:

Tabla No. 26: Comparación de contenido de asfalto obtenido entre el microaglomerado sin cal y con 2.0% de cal.

Comparación de resultados entre diseños		
% Vacíos de diseño	Virgen	2% CAL
	% Asfalto	% Asfalto
4,5	5,9	5,4
5,0	5,7	5,6
5,5	5,5	5,8

Para el porcentaje óptimo analizado (5.0% de vacíos), se encuentra que hay una diferencia mínima respecto del contenido de asfalto por peso total de agregado, en el caso en donde se utilizó la mezcla sin cal se obtuvo un 5.7% y en el caso en donde se añadió el 2.0% de cal un 5.6%. Cabe destacar que se mantiene un comportamiento similar en cuanto al contenido de asfalto.

Tabla No. 27: Comparación de resultados del ensayo de deformación permanente entre el microaglomerado sin cal y con 2.0% de cal.

Comparación de resultados entre diseños				
% Vacíos de diseño	Virgen	2% CAL	Virgen	2% CAL
	Deformación (mm)	Deformación (mm)	Vacíos APA	Vacíos APA
5,0	2,0	1,4	8,5	8,3

Se puede concluir que en este caso hubo una disminución en la deformación permanente en el caso en el que se añadió cal.

Tabla No. 28: Comparación de resultados del ensayo de durabilidad entre el microaglomerado sin cal y con 2.0% de cal.

Ensayo de resistencia retenia a:	Virgen	2% CAL
Compresión uniaxial		92%
Tensión diametral	98%	97%

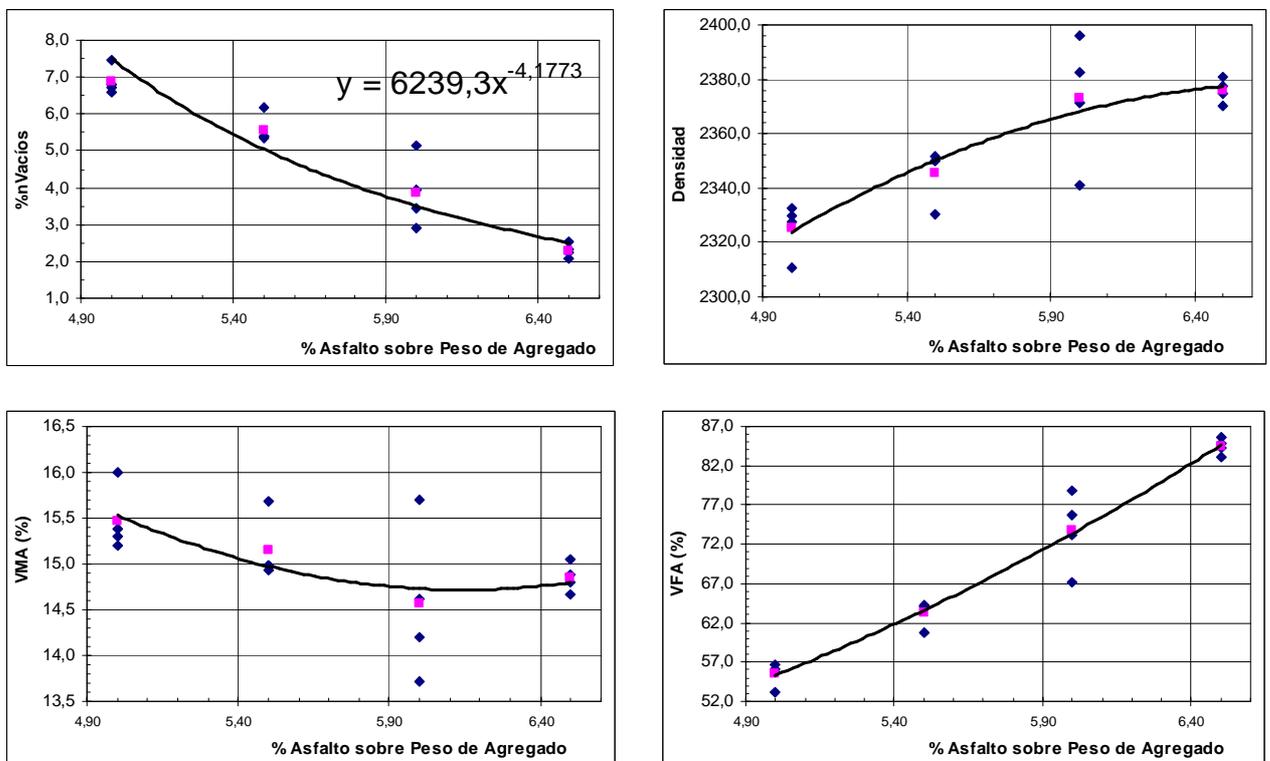
Como se muestra en la tabla No. 25, en el caso de los ensayos de durabilidad, en el caso donde se usó cal no hay mejoras apreciables en cuanto a la resistencia a la tensión diametral.

4.3 TEMPISQUE

4.3.1 Diseño F8 sin cal

Los resultados de dicho diseño se indican a continuación.

Gráfico No. 1: Curvas de diseño para el parámetro de vacíos de aire. Microaglomerado F8 sin cal.



Para el 5.0% de vacíos se requiere de un 5.5% de asfalto sobre mezcla.

Una vez que se determinó el porcentaje de vacíos para distintos contenidos de asfalto, se procedió a efectuar la prueba de drenaje para verificar que no la mezcla no tuviera problemas de exudación.

Los resultados se muestran a continuación:

Tabla No. 19: Resultado del ensayo de drenaje

F8 sin cal	
Muestra	% Drenado <0.2%
5,0	0,03%
5,5	0,07%
6,0	0,19%
6,5	0,69%
OPTIMO	0,03 < 0,2%

De la tabla anterior se deduce que hay cumplimiento de la norma de drenaje, por lo cual es de esperar que esta mezcla no tenga problemas de exudación de asfalto.

También se efectuaron ensayos en la “Pista de Ensayo de Georgia”, para determinar la resistencia ante la deformación permanente. Este dispositivo de ensayo

Tabla No. 20: Resultados de ensayo en el Asphalt Pavement Evaluator

Resultados en pista de ensayo de laboratorio, Tempisque Diseño F8 sin cal			
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3
% Vacíos de diseño	5,0	5,0	5,0
% Asfalto	5,5	5,5	5,5
Deformación (mm)	1,5	1,5	1,9
Vacíos APA	7,6	7,4	7,4

Como se observa en la tabla anterior, para un 5.0% de vacíos la deformación permanente es de 2.2 mm, valor muy inferior a las deformaciones típicas encontradas en las mezclas densas típicas producidas en el país (valores de deformación superiores a 3 mm).

Adicionalmente se efectuaron ensayos de durabilidad a la mezcla asfáltica construida con el contenido óptimo de asfalto. Los resultados se indican en la siguientes tablas.

Tabla No. 21: Resultados de ensayo de resistencia retenida a la compresión uniaxial. Diseño F8 sin cal.

	Porcentaje de vacíos (%)	Carga de compresión (kg)	Resistencia (MPa)
Resultados promedio para especímenes sin condicionar	8.6	2738.6	3.5
Desviación estándar	1.0	136.0	0.2
Resultados promedio para especímenes condicionados (24 hr)	8.7	2366.5	3.0
Desviación estándar	0.8	150.3	0.2
Resistencia retenida a la compresión uniaxial			86.0%
Especificación			> 75.0%

Tabla No. 22: Resultados de ensayo de resistencia retenida a la tensión indirecta. Diseño F8 sin cal.

	Porcentaje de vacíos (%)	Saturación (%)	Tensión Diametral (Pa)
Resultados promedio para especímenes sin condicionar	5.9	-	1159
Desviación estándar	0.6	-	99
Resultados promedio para especímenes condicionados (24 hr)	5.9	64.5	1041
Desviación estándar	0.5	5.3	62
Resistencia retenida a la tensión indirecta retenida			90.0%
Especificación			> 75.0%

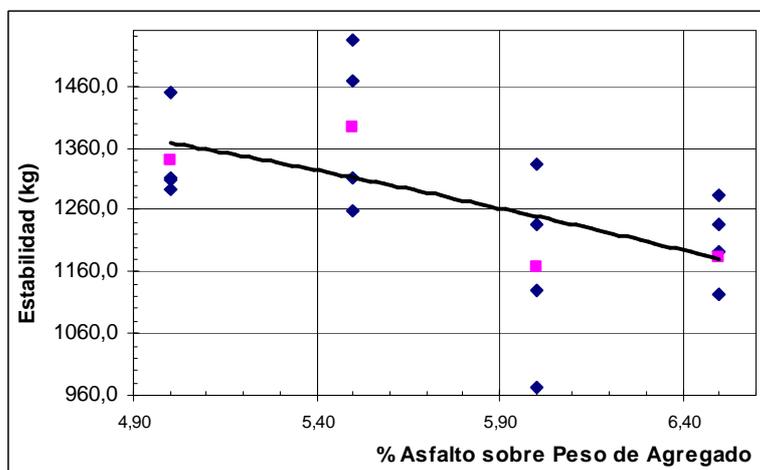
De las dos tablas anteriores se concluye que hay cumplimiento de las especificaciones de durabilidad para esta mezcla. En ambos ensayos el margen de diferencia con el límite inferior de la especificación es importante.

4.3.2 Diseño F10 sin cal

Además de los ensayos de vacíos, densidad, VFA y VMA en este caso se efectuó el ensayo de estabilidad para determinar si se cumple con el valor mínimo indicado por la normativa española.

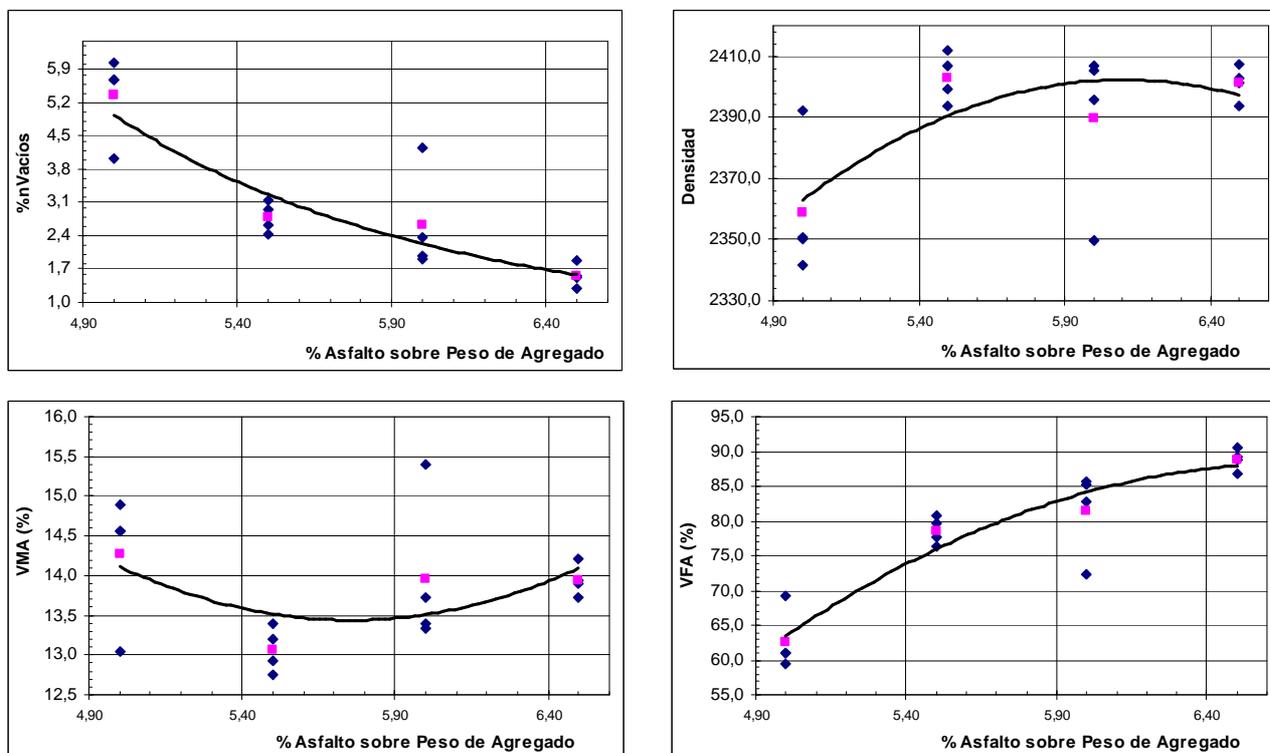
El gráfico No.2 muestra la curva de variación de la estabilidad respecto del contenido de asfalto.

Gráfico No. 1: Curva de estabilidad respecto del contenido de asfalto. Microaglomerado modificado con cal al 2.0%.



Los resultados de los otros parámetros del diseño se indican a continuación.

Gráfico No. 2: Curvas de diseño para el parámetro de vacíos de aire. Microaglomerado F10 sin cal



Los gráficos de vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos llenos con asfalto se incluyen a modo de ilustración, debido a que no están normados dentro de la metodología de diseño para microaglomerados.

De los gráficos anteriores se desprende que hay cumplimiento de la condición básica de que el porcentaje de vacíos debe ser superior al 4.0%. Además, los porcentaje de asfalto obtenido se encuentran dentro de un rango común para nuestro medio.

Para el 5.0% de vacíos se requiere de un 5.0% de asfalto sobre mezcla.

Una vez que se determinó el porcentaje de vacíos para distintos contenidos de asfalto, se procederá a efectuar la prueba de drenaje para verificar que no la mezcla no tuviera problemas de exudación.

Tabla No. 19: Resultado del ensayo de drenaje

Muestra	% Drenado <0.2%
5,0	0,02%
5,5	0,11%
6,0	0,12%
6,5	0,25%
OPTIMO	0,02 < 0,2%

También se efectuaron ensayos en la “Pista de Ensayo de Georgia” (APA) o pista de ensayo de laboratorio, para determinar la resistencia ante la deformación permanente. Este dispositivo de ensayo

Tabla No. 23: Resultados de ensayo en el Asphalt Pavement Evaluator

Resultados en pista de ensayo de laboratorio, Diseño F10 sin cal			
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3
% Vacíos de diseño	5,0	5,0	5,0
% Asfalto	5,0	5,0	5,0
Deformación (mm)	1,0	1,3	1,6
Vacíos APA	8,1	7,4	7,4

Como se observa en la tabla anterior, para un 5.0% de vacíos la deformación permanente es de 1.6 mm. Adicionalmente se efectuaron ensayos de durabilidad a la mezcla asfáltica construida con el contenido óptimo de asfalto. Los resultados se indican en la siguientes tablas.

Comparación de resultados entre diseños		
% Vacíos de diseño	F8	F10
	Deformación (mm)	Deformación (mm)
5,0	1,6	1,3

Tabla No. 24: Resultados de ensayo de resistencia retenida a la compresión uniaxial. Diseño F10 sin cal.

	Porcentaje de vacíos (%)	Carga de compresión (kg)	Resistencia (MPa)
Resultados promedio para especímenes sin condicionar	7.6	4244.3	4.9
Desviación estándar	0.2	252.0	0.3
Resultados promedio para especímenes condicionados (24 hr)	7.6	3605.1	4.0
Desviación estándar	0.5	61.1	0.1
Resistencia retenida a la compresión uniaxial			83.0%
Especificación			> 75.0%

Tabla No. 25: Resultados de ensayo de resistencia retenida a la tensión indirecta. Diseño F10 sin cal.

	Porcentaje de vacíos (%)	Saturación (%)	Tensión Diametral (Pa)
Resultados promedio para especímenes sin condicionar	8.2	-	944
Desviación estándar	0.2	-	61
Resultados promedio para especímenes condicionados (24 hr)	8.1	64.4	805
Desviación estándar	0.4	3.8	91
Resistencia retenida a la tensión indirecta retenida			85.0%
Especificación			> 75.0%

De las dos tablas anteriores se concluye que hay cumplimiento de las especificaciones de durabilidad para esta mezcla. En ambos ensayos el margen de diferencia con el límite inferior de la especificación es sustancialmente mayor.

Tabla No. 25: Comparación de resultados de deformación permanente para los 6 diseños analizados.

	Granulometría					
	Patrón		Patrón		Agregado del tempisque	
	F8	F8 + 2,0% cal	F10	F10 + 2,0% cal	F8	F10
Def. Permanente	2,7	2,8	2,0	1,4	1,6	1,3

5. Análisis de varianza de los resultados

Con el objetivo de determinar cuáles son los principales factores que afectan la resistencia ante la deformación permanente y la resistencia a la tensión diametral y a la compresión uniaxial se efectuó un análisis de varianza, para lo cual se analizaron las siguientes variantes:

- Fuente de agregados
- Granulometría F8 y F10
- Adición de cal

Los resultados del análisis de varianza se muestran a continuación:

Tabla No.21: Significancia estadística para cambios en la resistencia a la deformación permanente de mezcla asfáltica (*)

Efecto sobre la resistencia a la deformación permanente	Fuente de agregados	Tipo de Granulometría (F8 o F10)	Adición o no de cal hidratada	Interacción
	SI (**)	SI (**)	NO	Solo para el caso de la granulometría y la adición o no de cal.

(*) Análisis de variancia llevado a cabo para cada fuente de agregado, con un nivel de confianza estadística del 90%

() Efectos significativos con un nivel de confianza estadística de más de 99 %.**

Tabla No.22: Significancia estadística para cambios en la resistencia al efecto de humedad con el ensayo de resistencia retenida a la compresión uniaxial (*)(*)**

	Fuente de agregados	Tipo de Granulometría (F8 o F10)	Adición o no de cal hidratada	Interacción
Efecto sobre la resistencia a la deformación permanente	SI (**)	SI (**)	SI (**)	1) Efecto fuente y granulometría 2) Efecto granulometría-adición o no de cal

(*) Análisis de variancia llevado a cabo para cada fuente de agregado, con un nivel de confianza estadística del 90%

() Efectos significativos con un nivel de confianza estadística de más de 95 %.**

(*) Análisis efectuado para el ensayo en condición seca y condicionado. Los resultados fueron similares**

Tabla No.23: Significancia estadística para cambios en la resistencia al efecto de humedad con el ensayo de resistencia retenida a la tensión diametral (*)(*)**

	Fuente de agregados	Tipo de Granulometría (F8 o F10)	Adición o no de cal hidratada	Interacción
Efecto sobre la resistencia a la deformación permanente	SI (**)	SI (**)	SI (**)	3) Efecto fuente y granulometría 4) Efecto granulometría-adición o no de cal

(*) Análisis de variancia llevado a cabo para cada fuente de agregado, con un nivel de confianza estadística del 90%

(**) Efectos significativos con un nivel de confianza estadística de más de 97 %.

(***) Análisis efectuado para el ensayo en condición seca y condicionado. Los resultados fueron similares

En general se puede concluir que la resistencia ante la deformación permanente del microaglomerado no se ve afectada por la adición de cal, sin embargo, la resistencia ante los ensayos de evaluación del daño por humedad (resistencia retenida a la compresión uniaxial y a la tensión diametral) sí es afectada positivamente por la incorporación de cal en la mezcla,

6. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

A continuación se presenta un listado de las actividades que están pendientes por realizar.

ACTIVIDAD	DURACIÓN (semanas)
1 Diseño de mezcla Marshall para Microaglomerados Tempisque con cal (Granulometría F?)	1
2 Ensayo de resistencia y tensión diametral retenida. Ensayo de resistencia a la deformación permanente	2

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Hay evidencias suficientes para demostrar que los microaglomerados tienen una alta resistencia ante la deformación permanente en el ensayo de laboratorio. Esta resistencia es superior a los resultados típicos que han presentado las mezclas densas típicamente fabricadas en el país.
- Respecto de la graduación se debe resaltar que con la primera granulometría estudiada se resultaron que evidencia un altísimo cumplimiento de las especificaciones internacionales, lo cual indica que con este tipo de mezcla es más sencillo que con otros tipos de mezcla estudiados obtener un buen desempeño en laboratorio. Esto es beneficioso para reproducir esta granulometría a gran escala.
- Los contenidos de asfalto obtenidos se encuentran dentro del rango habitual de las mezclas del país.
- El cumplimiento del ensayo de drenaje denota que los problemas de exudación tan comunes en nuestras mezclas podrían minimizarse considerablemente,,
- Según los resultados obtenidos, el efecto de añadir cal al microaglomerado no evidenció proveer mejoras sustanciales en cuanto a la deformación permanente, lo cual refuerza el concepto del microaglomerado cuya principal característica de resistencia es la trabazón interna (70-80% de

agregado grueso). Por ende, el mastique asfáltico en cuanto a deformación permanente no es crucial en este tipo de mezcla.

- En donde sí afectó considerablemente la adición de cal fue en las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica, determinadas a través de los ensayos de tensión diametral retenida y resistencia a la compresión uniaxial retenida. Hay evidencia para concluir que el microaglomerado sin cal posee valores de durabilidad muy superiores (ver tabla No. 25) a los que tienen habitualmente nuestras mezclas asfálticas. No obstante, al añadir cal al microaglomerado estas propiedades sufrieron una considerable mejoría, lo cual motiva a estudiar con más profundidad los beneficios de la cal en microaglomerados.