

**ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MARSHALL  
DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

**ING. MARIO ARCE  
ING. LAURA RAMÍREZ  
ING. EDDIE BALTODANO**

**DICIEMBRE 2001**



San José, 20 de diciembre del 2001

**Ing. Juan Ramón Chacón Prendas, Director  
Dirección de Conservación Vial  
CONAVI  
Presente**

Estimado señor:

Adjunto le remito el informe de la investigación de laboratorio sobre los parámetros Marshall de las mezclas asfálticas.

Quedo a su disposición para cualquier aclaración o comentario que al respecto estime oportuno.

Lo saluda

**Ing. Mario Arce  
Coordinador PITRA**

Cc: Dr. Juan Pastor,  
Ings. Carlos Villalta, Daniel Solís, Anibal Sanabria, Guillermo Loría, Marco  
Rodríguez, Federico Baltodano

## INDICE GENERAL

1.	Introducción .....	1
2.	Estudio de Laboratorio.....	3
2.1.	Fase I.....	3
2.2.	Propiedades de los asfaltos utilizados.....	4
2.3.	Análisis de resultados para la planta 1 .....	8
2.3.1.	Generalidades .....	8
2.3.2.	Resultados obtenidos.....	8
2.4.	Análisis de resultados para la planta 2 .....	17
2.4.1.	Generalidades .....	17
2.4.2.	Resultados obtenidos.....	17
2.5.	Análisis de resultados para la planta 3 .....	25
2.5.1.	Generalidades .....	25
2.5.2.	Resultados obtenidos.....	25
2.6.	Uniformidad de los procesos de producción de la mezcla.....	33
2.7.	Análisis de resultados. Fase I.....	37
2.7.1.	Parámetros Marshall.....	37
2.7.2.	Análisis de parámetros volumétricos superpave .....	39
2.8.	Fase II.....	43
2.9.	Análisis de resultados para la planta 1 .....	44
2.9.1.	Generalidades .....	44
2.9.2.	Resultados obtenidos.....	45
2.10.	Análisis de resultados para la planta 2.....	54
2.10.1.	Generalidades .....	54
2.10.2.	Resultados obtenidos.....	54
2.11.	Análisis de resultados para la planta 3.....	63
2.11.1.	Generalidades .....	63
2.11.2.	Resultados obtenidos.....	64
2.12.	Comparación de resultados entre plantas .....	73
2.13.	Análisis de resultados .....	75
2.13.1.	Parámetros volumétricos .....	75

2.14.	Fase III-a.....	77
2.15.	Granulometría patrón.....	78
2.16.	Resultados obtenidos .....	80
2.16.1.	Parámetros Marshall.....	80
2.17.	Análisis de resultados .....	84
2.17.1.	Parámetros Marshall.....	84
2.18.	Fase III-b.....	85
2.19.	Granulometrías analizadas.....	86
2.20.	Resultados Obtenidos .....	87
2.20.1.	Parámetros Marshall.....	87
2.21.	Comparaciones entre la fase III-a y III-b.....	91
3.	Conclusiones generales.....	92
4.	Recomendaciones .....	94
5.	Bibliografía .....	97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ensayos físico-químicos del asfalto patrón.....	4
Tabla 2: Ensayos complementarios del asfalto patrón.....	4
Tabla 3: Ensayos reológicos del asfalto patrón.....	5
Tabla 4: Ensayos físico-químicos del asfalto de planta .....	6
Tabla 5: Ensayos complementarios del asfalto de planta.....	6
Tabla 6: Ensayos reológicos del asfalto de planta .....	7
Tabla 7: Valores promedio de las propiedades de los agregados utilizados en la planta 1. Datos tomados durante el período julio-octubre del año 2000.....	8
Tabla 8: Resumen de resultados de los ensayos de verificación para mezcla asfáltica, en la planta 1. Período julio-octubre del año 2000.....	9
Tabla 9: Resultados obtenidos de los especímenes Marshall elaborados con asfalto patrón y asfalto de planta.....	10
Tabla 10: Propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio. Planta 1.....	14
Tabla 11: Valores promedio de las propiedades de los agregados utilizados en la planta 2. Datos tomados durante el período julio-octubre del año 2000.....	17
Tabla 12: Resumen de resultados de los ensayos de verificación para mezcla asfáltica, en la planta 2. Período julio-octubre del año 2000.....	18
Tabla 13: Resultados obtenidos de los especímenes Marshall moldeados con asfalto patrón y asfalto de planta.....	19
Tabla 14: Propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio. Planta 2.....	22
Tabla 15: Valores promedio de las propiedades de los agregados utilizados en la planta 3. Datos tomados durante el período julio-octubre del año 2000.....	25

Tabla 16: Resumen de resultados de los ensayos de verificación para mezcla asfáltica, en la planta 3. Período julio-octubre del año 2000. ....	26
Tabla 17: Resultados obtenidos de los especímenes Marshall elaborados con asfalto patrón y asfalto de planta.....	27
Tabla 18: Propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio. Planta 3.....	30
Tabla 19: Granulometría del diseño de mezcla vigente, con fecha 8 de agosto del 2000, y otras propiedades de los agregados y el asfalto. Planta 1. ....	44
Tabla 20: Resumen de resultados obtenidos para los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio. Planta 1.....	46
Tabla 21: Propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio. Planta 1.....	50
Tabla 22: Granulometría del diseño de mezcla vigente, con fecha 30 de noviembre de 1999, y otras propiedades de los agregados y el asfalto para la planta 2. ....	54
Tabla 23: Resumen de los parámetros Marshall obtenidos de los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio. Planta 2.....	55
Tabla 24: Propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio. Planta 2.....	59
Tabla 25: Granulometría del diseño de mezcla vigente, con fecha 22 de junio del 2000, y otras propiedades de los agregados y el asfalto. Planta 3.....	63
Tabla 26: Resumen de los parámetros Marshall obtenidos de los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio. Planta 3.....	65
Tabla 27: Propiedades volumétricas de la mezcla compactada en el compactador giratorio. Planta 3.....	69
Tabla 28: Granulometrías utilizadas y porcentaje de asfalto óptimo.....	78

Tabla 29: Porcentajes de asfalto óptimo para cada granulometría.....	79
Tabla 30: Resumen de los parámetros Marshall obtenidos de los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio con el agregado patrón.....	81
Tabla 31: Granulometrías analizadas .....	86
Tabla 32: Resumen de los parámetros Marshall obtenidos de los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio .....	88

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Variación de los parámetros Marshall en especímenes moldeados en laboratorio, para el período julio-octubre del 2000. Planta 1 .....	11
Gráfico 2: Variación de los parámetros Marshall de estabilidad y flujo, en especímenes moldeados en laboratorio, para el período julio-octubre del 2000. Planta 1 .....	12
Gráfico 3: Curvas granulométricas empleadas por la planta 1 en los meses de julio a octubre del año 2000.....	15
Gráfico 4: Variación de la compactación en función del número de giros para la planta 1 .....	16
Gráfico 5: Variación de los parámetros de densidad máxima teórica, densidad Marshall y vacíos en especímenes moldeados en laboratorio, para el período julio-octubre del 2000. Planta 2 .....	20
Gráfico 6: Variación de los parámetros Marshall de estabilidad y flujo, en especímenes moldeados en laboratorio, para el período julio-octubre del 2000. Planta 2 .....	21
Gráfico 7: Curvas granulométricas empleadas por la planta 2 en los meses de julio a octubre del año 2000.....	23
Gráfico 8: Variación de la compactación en función del número de giros para la planta 2 .....	24
Gráfico 9: Variación de los parámetros Marshall en especímenes moldeados en laboratorio, para el período julio-octubre del 2000. Planta 3 .....	28
Gráfico 10: Variación de los parámetros Marshall de estabilidad y flujo, en especímenes moldeados en laboratorio, para el período julio-octubre del 2000. Planta 3 .....	29
Gráfico 11: Curvas granulométricas empleadas por la planta 3 en los meses de julio a octubre del año 2000. ....	31

Gráfico 12: Variación de la compactación en función del número de giros para la planta 3. ....	32
Gráfico 13: Comparación de uniformidad. Período julio-octubre, 2000. ....	33
Gráfico 14: Comparación de la uniformidad de los agregados. Período julio-octubre, 2000. ....	36
Gráfico 15: Variación de los parámetros Marshall en especímenes moldeados en laboratorio, en función del tiempo de curado. Planta 1. ....	47
Gráfico 16: Variación de las propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio, en función del tiempo de curado. Planta 1. ....	51
Gráfico 17: Variación de la compactación en función del número de giros, para distintas condiciones de curado. Planta 1. ....	53
Gráfico 18: Variación de los parámetros Marshall en especímenes moldeados en laboratorio. Planta 2. ....	56
Gráfico 19: Variación de las propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio, en función del tiempo de curado. Planta 2. ....	60
Gráfico 20: Variación de la compactación en función del número de giros, para distintas condiciones de curado. Planta 2. ....	62
Gráfico 21: Variación de los parámetros Marshall en especímenes moldeados en laboratorio. Planta 3. ....	66
Gráfico 22: Variación de las propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio, en función del tiempo de curado. Planta 3. ....	70
Gráfico 23: Variación de la compactación en función del número de giros, para distintas condiciones de curado. Planta 3. ....	72
Gráfico 24: Comparación de uniformidad. Flujo y vacíos Marshall. ....	73
Gráfico 25: Comparación de uniformidad para parámetros volumétricos de la mezcla moldeada en el compactador giratorio. ....	74

Gráfico 26: Curvas granulométricas analizadas. Fase III-A.....	79
Gráfico 27: Variación de los parámetros Marshall en especímenes moldeados en laboratorio.....	82
Gráfico 28: Curvas granulométricas analizadas. ....	87
Gráfico 29: Variación de los parámetros Marshall en especímenes moldeados en laboratorio.....	89
Gráfico 30: Histogramas para los parámetros de flujo y vacíos Marshall. ....	91

# ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MARSHALL DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

## 1. INTRODUCCIÓN

En este estudio se analizan las propiedades Marshall de las mezclas asfálticas, flujo, estabilidad, densidad y propiedades volumétricas de la mezcla. Para esto se toma como referencia la mezcla producida en tres plantas asfálticas durante el período julio a octubre de 2000. Adicionalmente, como referente se utiliza también en este análisis un agregado patrón. Las mezclas son sometidas a diferentes períodos de curado y se pretende visualizar, bajo dicho acondicionamiento en el horno, las variaciones que experimentan los parámetros Marshall de la mezcla. Para ampliar criterio al respecto, las mezclas son sometidas al diseño Superpave nivel 1.

Este análisis se desarrolló en tres fases.

En la primera fase se analizaron, para tres distintas plantas productoras de mezcla asfáltica y dos distintos tipos de asfalto (ambos clasificados como AC-20), las tendencias y comportamientos de los parámetros de estabilidad, flujo, densidad máxima teórica, densidad Marshall y vacíos, utilizando la dosificación promedio de la mezcla producida durante cada mes analizado (granulometría y contenido de asfalto). Además se analizaron comparativamente las tendencias de las propiedades volumétricas (densidad, VMA, VFA y vacíos) de la mezcla moldeada en el compactador giratorio (parámetros volumétricos Superpave nivel 1).

En la fase 2 del estudio, se analizó el efecto de diferentes condiciones de curado en los parámetros de estabilidad, flujo, vacíos Marshall, densidad máxima teórica, densidad Marshall y en las propiedades volumétricas de la mezcla. Para esto se utilizó la granulometría del diseño de mezcla vigente para cada planta y agregado proveniente de cada planta.

En la fase 3-a se mantuvieron las mismas condiciones de curado de la fase 2, pero se seleccionó una granulometría óptima, utilizando para esto la metodología Superpave y un agregado patrón. Con esto se analizó el cambio en las propiedades de estabilidad, flujo, densidad máxima teórica, densidad Marshall, vacíos Marshall y las propiedades volumétricas Superpave (N(inicial), N(diseño), N(máximo)), vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con asfalto.

En la fase 3-b del estudio, se trabajó con agregado de la planta 3 y se seleccionó de entre tres granulometrías, una granulometría patrón, utilizando para esto la metodología Superpave. Se obtuvo el porcentaje de asfalto óptimo para esta granulometría por el método Superpave y se procedió a moldear especímenes de prueba para determinar el efecto en las propiedades de estabilidad, flujo, densidad Marshall, densidad máxima teórica y vacíos Marshall en función de distintos tiempos y temperaturas de curado (0h, 16h a 60°C, 2h a 145°C y 4h a 135°C). En esta fase se trabajó con asfalto patrón, al igual que en las fases 2 y 3-a.

Con este análisis experimental se trata de encontrar los aspectos que más pueden incidir en el control de los parámetros Marshall de la mezcla, con especial énfasis en el flujo y los vacíos.

## 2. ESTUDIO DE LABORATORIO

### 2.1. FASE I

En esta primera fase del estudio, se hace un análisis de los siguientes parámetros Marshall:

- Estabilidad
- Flujo
- Densidad máxima teórica
- Densidad Marshall
- Vacíos,

para esto se consideran las siguientes variables experimentales: tres distintas plantas productoras de mezcla asfáltica, las cuales para efectos del estudio se identificaron como planta 1, planta 2 y planta 3 y dos distintos tipos de asfalto (ambos clasificados como AC-20), identificados como asfalto patrón y asfalto de planta y la curva promedio mensual de granulometría utilizada por cada planta. El período de análisis corresponde a los meses de julio, agosto, setiembre y octubre del 2000.

El asfalto patrón fue traído del plantel de Recope en Moín, el 27 de noviembre del 2000. El asfalto de planta utilizado, corresponde a asfalto muestreado regularmente por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) en las distintas plantas productoras de mezcla asfáltica, en cada uno de los meses objeto de este estudio.

En esta fase, todos los especímenes se realizaron bajo las mismas condiciones, con un curado de 16 horas a 60°C, y se obtuvieron los parámetros Marshall y los parámetros volumétricos de la mezcla. Para obtener los parámetros volumétricos se utilizó el compactador giratorio siguiendo el procedimiento de Superpave.

La granulometría utilizada y el porcentaje de asfalto a dosificar en los especímenes de prueba, fueron obtenidos del promedio mensual de los datos de verificación con que cuenta el LANAMME para cada una de las plantas involucradas en el estudio. El objetivo de esta primera fase es analizar comparativamente las tendencias de comportamiento de

dichas variables experimentales, utilizando la condición promedio de la mezcla producida durante cada mes analizado (granulometría y contenido de asfalto).

## 2.2. PROPIEDADES DE LOS ASFALTOS UTILIZADOS

### ASFALTO PATRÓN

En las Tablas 1, 2 y 3, se presentan los valores obtenidos para los ensayos de caracterización realizados al asfalto patrón.

**Tabla 1: Ensayos físico-químicos del asfalto patrón**

ENSAYO	UNIDADES	VALOR	ESPECIFICACIONES
Penetración a 25°C	(1/10 mm)	71	Mín. 60
Ductilidad a 25°C (envejecido RTFO)	cm	>100	-
Gravedad específica a 25°C	-	1.0295	-
Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	1750	1600-2400
Viscosidad cinemática a 125°C	cSt	766	-
Viscosidad cinemática a 135°C	cSt	417	Mín.300
Viscosidad cinemática a 145°C	cSt	211	-
Pérdida en película delgada RTFO	%	0.425	-
Viscosidad absoluta a 60°C (envejecida RTFO)	Poise	4034	Máx. 8000
Razón de viscosidades	-	2.3	Máx. 3.0
Índice de susceptibilidad térmico (VTS)	-	3.0	3.30-3.90

**Tabla 2: Ensayos complementarios del asfalto patrón.**

ENSAYO	UNIDADES	VALOR	ESPECIFICACIONES
Solubilidad en tricloroetileno	%	99.98	Mín. 99.00
Asfaltenos	%	16.9	-
Saturados	%	11.8	-
Nafténicos	%	39.5	-
Aromáticos	%	31.8	-
Índice de inestabilidad coloidal	%	0.4	Máx. 0.6
Contenido de ceras	%	0.9	Máx. 3.0

**Tabla 3: Ensayos reológicos del asfalto patrón.**

ENSAYO	UNIDADES	TEMPERATURA	VALOR
G*/sen $\delta$ (cond. original)	kPa	58°C	2.260
		70°C	0.469
		82°C	0.150
Angulo de fase (cond. original)	°	58°C	84.7
		70°C	87.2
		82°C	87.8
G*/sen $\delta$ (cond. RTFO)	kPa	58°C	4.998
		70°C	0.958
		82°C	0.273
Angulo de fase (cond. RTFO)	°	58°C	81.1
		70°C	85.5
		82°C	87.5
G*sen $\delta$ (cond. PAV)	MPa.	16°C	8.726
		22°C	3.796
		28°C	1.755
Angulo de fase (cond. PAV)	°	16°C	45.7
		22°C	51.5
		28°C	56.9
PG superior	°C	-	58
PG intermedio	°C	-	22

## ASFALTO DE PLANTA

En las Tablas 4, 5 y 6, se presentan los valores obtenidos para los ensayos de caracterización realizados al asfalto de planta.

**Tabla 4: Ensayos físico-químicos del asfalto de planta (1).**

ENSAYO	UND.	PLANTA 1			ESPEC.
		JULIO	SETIEMBRE	OCTUBRE	
Penetración a 25°C	(1/10 mm)	69	84	88	Mín. 60
Ductilidad a 25°C (envejecido RTFO)	cm	+100	-	-	-
Gravedad específica a 25°C	-	-	1.0256	-	-
Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	2010	1696	1758	1600-2400
Viscosidad cinemática a 125°C	cSt	890 (2)	966	-	-
Viscosidad cinemática a 135°C	cSt	468 (2)	523	560 (2)	Máx. 300
Viscosidad cinemática a 145°C	cSt	280 (2)	286	-	-
Pérdida en película delgada RTFO	%	0.265	0.671	-	-
Viscosidad absoluta a 60°C (envejecida RTFO)	Poise	6729	-	-	Máx. 8000
Razón de viscosidades	-	3.3	-	-	Máx. 3.0
Índice de susceptibilidad térmico (VTS)	-	3.38	3.26	3.18	3.30-3.90

(1) No se cuenta con información acerca del asfalto del mes de agosto utilizado en la planta 1, así como tampoco hay información de los asfaltos utilizados en las plantas 2 y 3.

(2) Resultados en centi-Poises.

**Tabla 5: Ensayos complementarios del asfalto de planta (1).**

ENSAYO	UNIDADES	PLANTA 1		
		JULIO	SETIEMBRE	OCTUBRE
Solubilidad en tricloroetileno	%	99.93	-	-
Asfaltenos	%	26.2	21.1	21.7

(1) No se cuenta con información acerca del asfalto del mes de agosto utilizado en la planta 1, así como tampoco hay información de los asfaltos utilizados en las plantas 2 y 3.

**Tabla 6: Ensayos reológicos del asfalto de planta (1).**

ENSAYO	UNIDADES	TEMP.	PLANTA 1		
			JULIO	SETIEMBRE	OCTUBRE
G*/sen $\delta$ (cond. original)	kPa	58°C	2.624	2.089	-
		70°C	0.605	0.575	-
		82°C	1.191	0.165	-
Angulo de fase (cond. original)	°	58°C	82.2	82.6	-
		70°C	85.5	85.7	-
		82°C	88.0	86.8	-
G*/sen $\delta$ (cond. RTFO)	kPa	58°C	8.437	5.946	-
		70°C	2.339	1.618	-
		82°C	0.69	0.461	-
Angulo de fase (cond. RTFO)	°	58°C	74.6	77.2	-
		70°C	80	81.5	-
		82°C	85.3	84.9	-
G*sen $\delta$ (cond. PAV)	MPa	16°C	-	3.539	-
		22°C	-	1.735	-
		28°C	-	0.893	-
Angulo de fase (cond. PAV)	°	16°C	-	44.3	-
		22°C	-	47.5	-
		28°C	-	51.9	-
PG superior	°C	-	58	58	-
PG intermedio	°C	-	-	16	-

(1) No se cuenta con información acerca del asfalto del mes de agosto utilizado en la planta 1, así como tampoco hay información de los asfaltos utilizados en las plantas 2 y 3.

## 2.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LA PLANTA 1

### 2.3.1. GENERALIDADES

A partir de los datos históricos de ensayos de agregados, para el período de julio a octubre del año 2000, se obtuvieron los valores de algunas características de los agregados utilizados en la elaboración de especímenes de prueba. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7: Valores promedio de las propiedades de los agregados utilizados en la planta 1. Datos tomados durante el período julio-octubre del año 2000.**

Ensayo	n	Valor promedio	Desv. Estándar
Gbs gruesos	6	2.62	0.01
% Abs gruesos	6	2.0	0.1
Gbs finos	6	2.67	0.03
% Abs finos	6	1.5	0.4
% 1 cara fracturada	6	98.58	0.80
% 2 caras fracturadas	6	97.43	1.17
Equivalente arena	1	90	-
Vacios no compactados	6	37.5	1.2

Conforme se indicó, a partir de los datos históricos de verificación se obtuvo el porcentaje de asfalto y la granulometría promedio para cada mes. Además se obtuvieron los valores promedio por mes de los parámetros de estabilidad, flujo, densidad, densidad máxima teórica y el porcentaje de vacíos. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

### 2.3.2. RESULTADOS OBTENIDOS

#### 2.3.2.1. Parámetros Marshall

De los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio, elaborados tanto con el asfalto patrón como con el asfalto de planta, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 9. En los gráficos 1 y 2 se muestran los resultados obtenidos para cada parámetro.

Tabla 8: Resumen de resultados de los ensayos de verificación para mezcla asfáltica, en la planta 1. Período julio-octubre del año 2000.

ENSAYO (1)	Diseño Mezcla	JULIO			AGOSTO			SETIEMBRE			OCTUBRE		
	8/8/00	Valores prom.	Desv. Estándar	n									
		Estabilidad	1300	1447	127	7	1389	219	6	1603	170	5	1563
Flujo	33	44	2	7	41	4	6	37	4	5	36	3	6
Densidad	2270	2312	20	7	2315	62	6	2395	15	5	2343	44	6
Gravedad máxima teórica	2365	2445	17	7	2452	11	6	2464	16	5	2468	33	6
Vacios	4,0	5,4	0,9	7	5,6	2,4	6	2,8	0,8	5	5,1	1,0	6
Contenido de asfalto (mezcla)	5,40	5,64	0,68	7	5,50	-	1	5,40	-	1	5,10	0,28	6
Contenido de asfalto (agregado)	5,70	6,02	0,69	7	5,90	-	1	5,70	-	1	5,48	0,26	6
<b>GRANULOMETRIA</b>	<b>% PASANDO</b>												
19 mm	100	100	0	7	100	0	6	100	0	5	100	0	5
9.5 mm	83	84	3	7	86	3	6	84	3	5	81	3	5
No 4	59	57	3	7	55	4	6	55	3	5	52	5	5
No 8	33	37	3	7	34	1	6	38	3	5	37	3	5
No 50	10	12	2	7	12	1	6	14	1	5	13	1	5
No 200	3,0	5,6	1,4	7	6,6	1,5	6	7,2	0,6	5	5,7	0,9	5

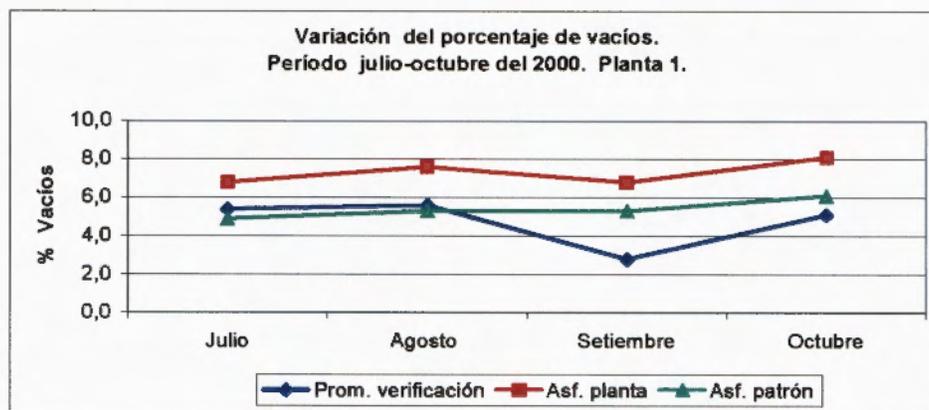
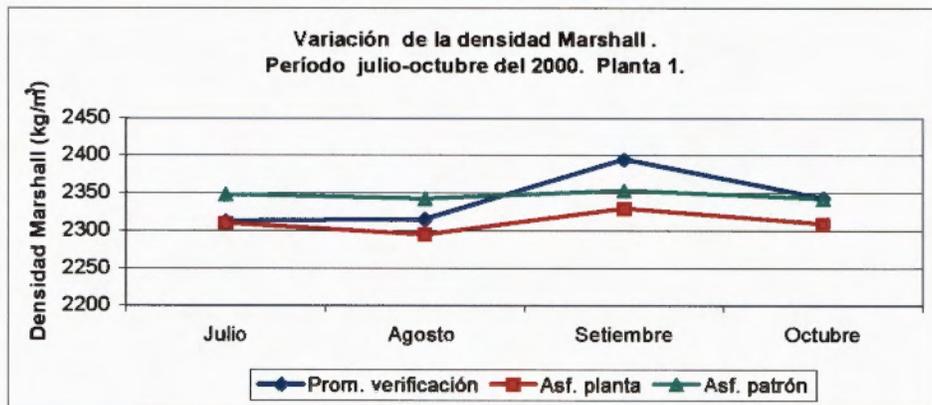
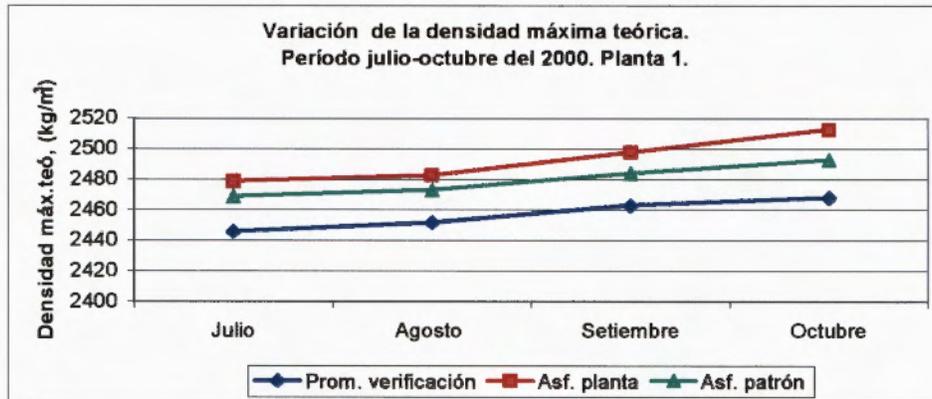
(1) Los especímenes fueron moldeados en los respectivos laboratorios de planta.

**Tabla 9: Resultados obtenidos de los especímenes Marshall elaborados con asfalto patrón y asfalto de planta.  
Período julio-octubre del 2000. Planta 1 (1).**

Parámetro	Julio		Agosto		Setiembre		Octubre	
	Asf. Planta	Asf. Patrón						
Estabilidad (kg)	1368	1412	1124	1319	1289	1737	1322	1808
Flujo (1/100 cm)	22	19	26	21	28	20	23	19
Den. Marshall (kg/m <sup>3</sup> )	2310	2348	2295	2342	2329	2353	2309	2342
Den. Máxima teórica (kg/m <sup>3</sup> ) (1)	2479	2469	2483	2473	2498	2484	2513	2493
% Vacíos	6.8	4.9	7.6	5.3	6.8	5.3	8.1	6.1

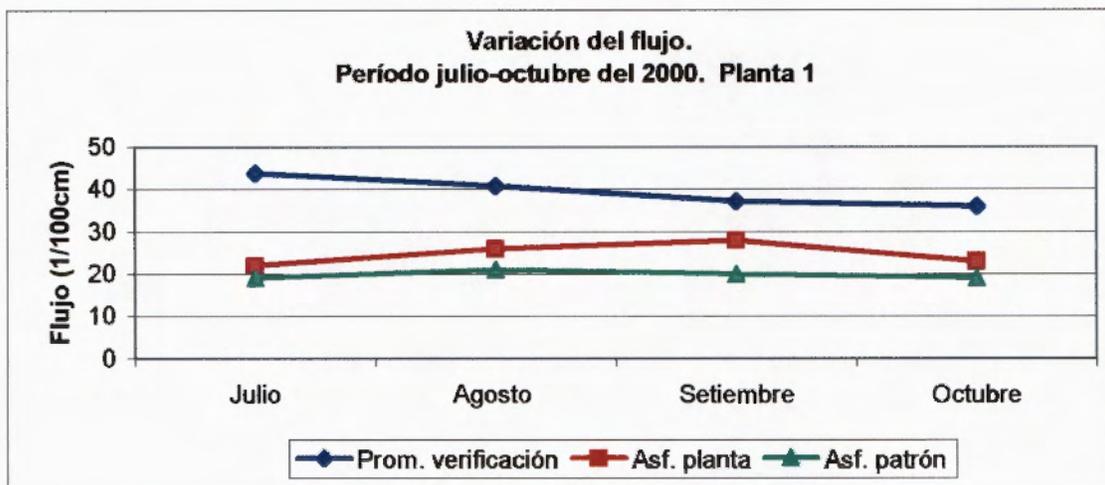
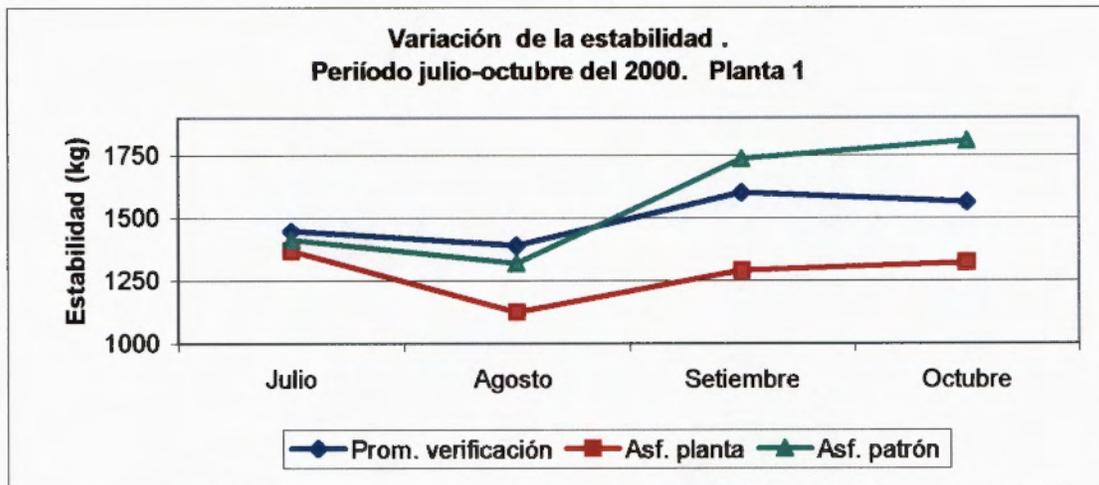
(1) Especímenes moldeados con la granulometría y el contenido de asfalto promedio del mes.

**Gráfico 1: Variación de los parámetros Marshall en especímenes moldeados en laboratorio, para el período julio-octubre del 2000. Planta 1 (1).**



(1) Especímenes moldeados con la granulometría y el contenido de asfalto promedio del mes.

**Gráfico 2: Variación de los parámetros Marshall de estabilidad y flujo, en especímenes moldeados en laboratorio, para el período julio-octubre del 2000. Planta 1 (1).**



(1) Especímenes moldeados con la granulometría y el contenido de asfalto promedio del mes.

### **2.3.2.2. Propiedades volumétricas de la mezcla. Método Superpave (planta 1).**

Para obtener las propiedades volumétricas de la mezcla, se trabajó con especímenes moldeados en el compactador giratorio, siguiendo las especificaciones establecidas por Superpave, utilizando la granulometría y el contenido de asfalto promedio obtenido en los ensayos de verificación de cada período.

En la Tabla 10, se presentan los parámetros de:

- %Gmm (N-inicial), el cual corresponde al porcentaje de compactación inicial de la mezcla, que debe ser menor a 89%
- % Gmm (N-Diseño), corresponde al porcentaje de compactación para el cual se debe diseñar la mezcla, cuyo valor debe ser del 96%
- %Gmm (N-máxima), previene el efecto de post-compactación a largo plazo, cuyo valor debe ser menor a 98%.

Además se presentan los parámetros de vacíos de aire, el porcentaje de vacíos en el agregado mineral y el porcentaje de vacíos llenos con asfalto, todos estos calculados para el número de giros de diseño.

Se aplica este método Superpave por ser un ensayo de mayor precisión para determinar las propiedades volumétricas de la mezcla.

**Tabla 10: Propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio. Planta 1.**

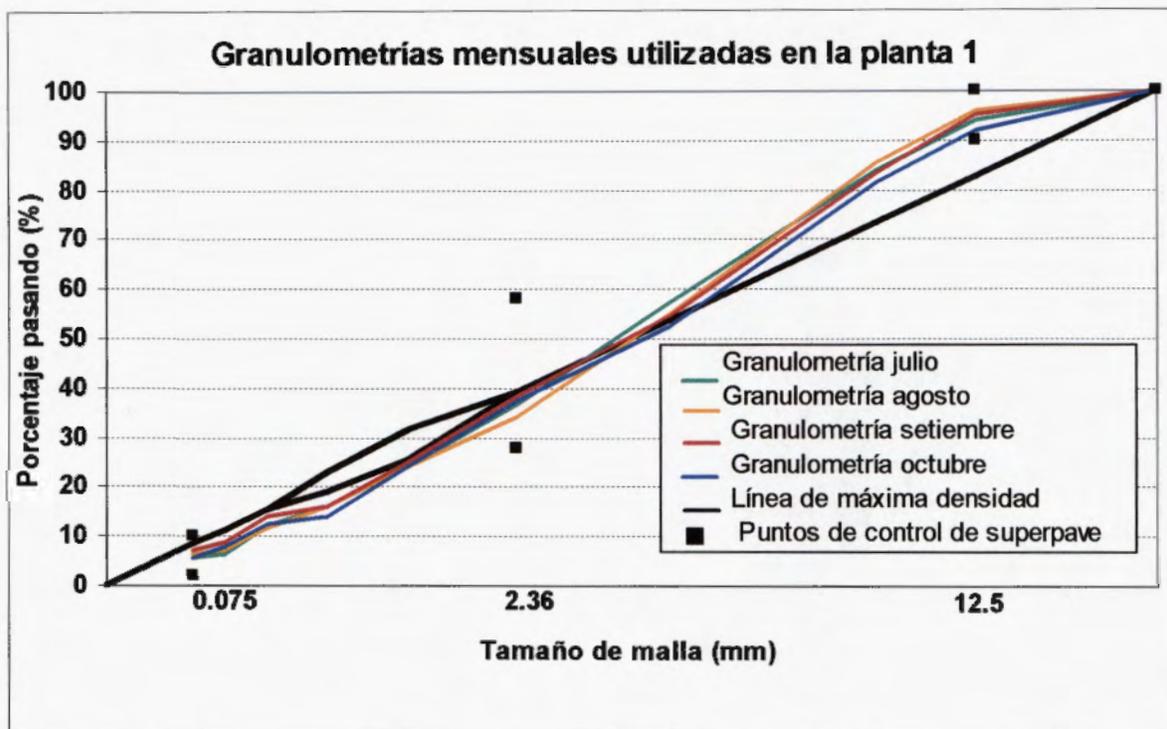
Parámetro	Junio		Agosto		Setiembre		Octubre		Espec.
	Asf. planta	Asf. patrón							
%Gmm (N-inicial)	85.2	86.7	84.8	87.5	86.9	88.1	85.1	87.7	<89
%Gmm (N-Diseño)	94.4	95.9	94.6	96.4	96.5	97.3	93.7	96	96
%Gmm (N-Máx.)	95.8	97.4	96.1	97.8	97.8	98.6	95.1	97.3	<98
% vacíos (N-Dis)	5.6	4.1	5.4	3.6	3.5	2.7	6.3	4.0	4.0
% VMA (N-Dis)	16.57	15.54	16.19	14.93	14.03	13.82	15.92	15.48	>14
%VFA (N-Dis)	66.07	73.82	66.73	76.04	74.82	80.1	60.73	72.63	65-75 (1)

(1) Esta especificación aplica para 10 millones de ejes equivalentes.

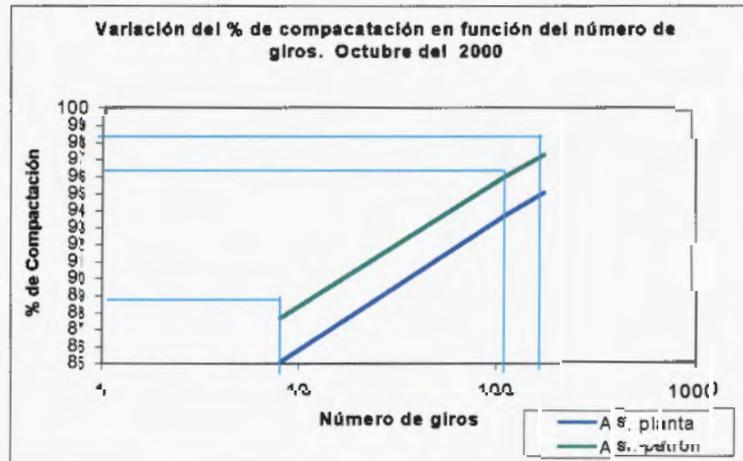
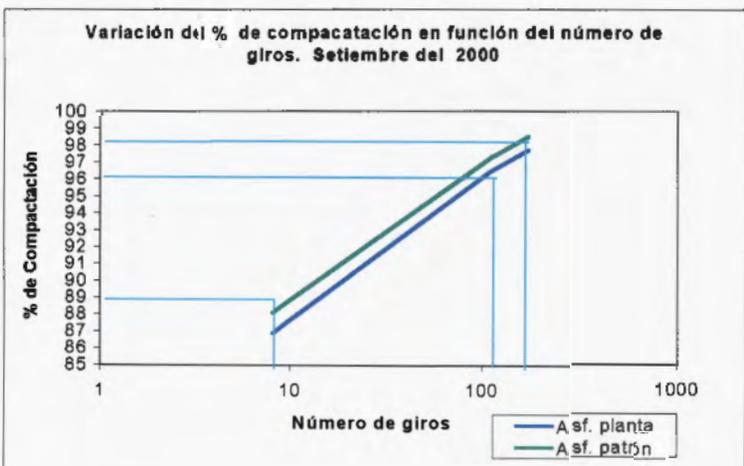
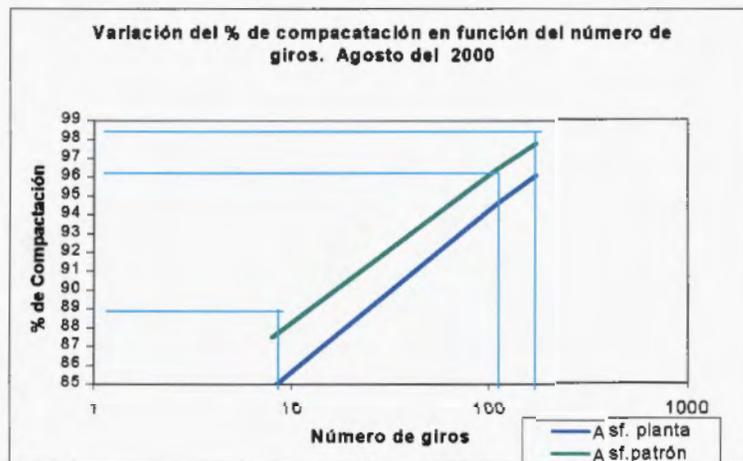
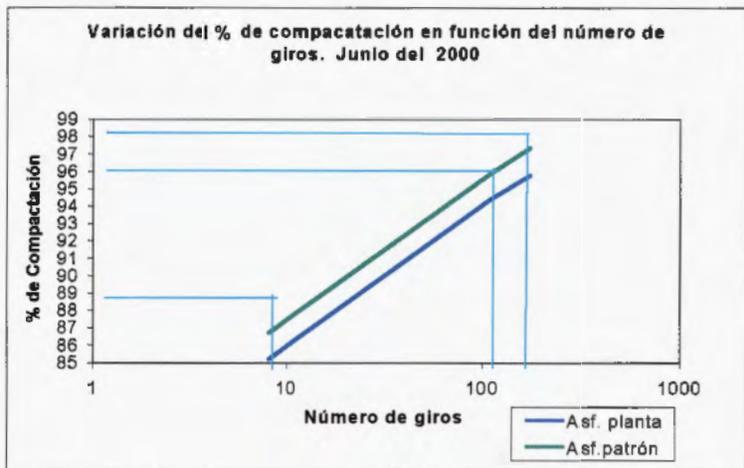
Aparecen sombreados los datos que se apartan de la especificación Superpave.

En el gráfico 3 se presentan las distintas curvas granulométricas empleadas por la planta 1 y en el gráfico 4, se presentan los resultados por mes, para las variaciones de la compactación de la mezcla en función del número de giros.

**Gráfico 3: Curvas granulométricas promedio empleadas por la planta 1 en los meses de julio a octubre del año 2000.**



**Gráfico 4: Variación de la compactación en función del número de giros para la planta 1**



## 2.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LA PLANTA 2

### 2.4.1. GENERALIDADES

Manteniendo las mismas condiciones que en la planta 1, los resultados de los análisis realizados a los agregados se muestran en la Tabla 11. En la Tabla 12 se muestran los datos de los resultados de verificación realizados a la mezcla asfáltica.

**Tabla 11: Valores promedio de las propiedades de los agregados utilizados en la planta 2. Datos tomados durante el período julio-octubre del año 2000.**

Ensayo	n	Valor promedio	Desv. Estándar
Gbs gruesos	7	2.61	0.02
% Abs gruesos	7	2.0	0.1
Gbs finos	7	2.59	0.06
% Abs finos	7	2.7	0.7
% 1 cara fracturada	7	97.66	1.30
% 2 caras fracturadas	7	96.14	2.00
Equivalente arena	1	73	-
Vacios no compactados	7	37.0	1.4

### 2.4.2. RESULTADOS OBTENIDOS

#### 2.4.2.1. Parámetros Marshall

Al igual que se comentó en la planta 1, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 13 y en los gráficos 4 y 5 se muestran las tendencias y comportamientos presentados.

**Tabla 12: Resumen de resultados de los ensayos de verificación para mezcla asfáltica, en la planta 2. Período julio-octubre del año 2000.**

Ensayo (1)	Diseño Mezcla	JULIO			AGOSTO			SETIEMBRE			OCTUBRE		
		Valores prom.	Desv. Estándar	n	Valores prom.	Desv. Estándar	n	Valores prom.	Desv. Estándar	n	Valores prom.	Desv. Estándar	n
	30/11/99												
Estabilidad	1480	1470	329	5	1575	171	12	1426	138	14	1319	123	9
Flujo	36	35	5	5	36	6	12	35	4	14	35	5	9
Densidad	2374	2335	26	5	2320	25	12	2310	18	14	2324	18	9
Gravedad máxima teórica	2473	2449	22	5	2429	15	12	2439	12	14	2459	17	9
Vacios	4,3	4,6	1,1	5	4,5	1,0	12	5,3	1,0	14	5,5	0,7	9
Contenido de asfalto (mezcla)	6,20	6,02	0,32	5	5,82	0,36	11	5,66	0,32	14	5,82	0,16	9
Contenido de asfalto (agregado)	6,61	6,41	0,36	5	6,19	0,39	11	6,06	0,32	14	6,21	0,18	9
<b>GRANULOMETRIA</b>	<b>% PASANDO</b>												
19 mm	100	100	0	7	100	0	13	100	0	15	100	0	8
9.5 mm	77	77	3	7	79	3	13	76	3	15	77	5	8
No 4	53	51	3	7	51	4	13	47	3	15	47	4	8
No 8	36	34	2	7	35	2	13	32	2	15	33	3	8
No 50	12	13	0	7	13	1	13	12	1	15	12	1	8
No 200	5,8	7,5	0,4	7	7,6	0,9	13	6,8	0,4	15	6,2	1,2	8

(1) Los especímenes fueron moldeados en los respectivos laboratorios de planta.

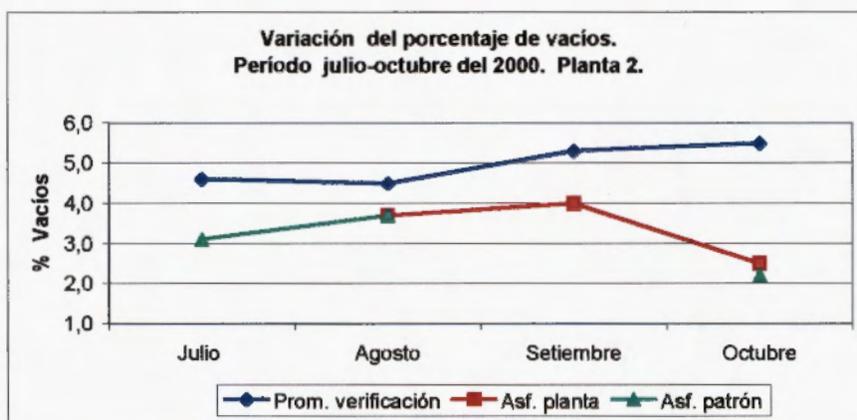
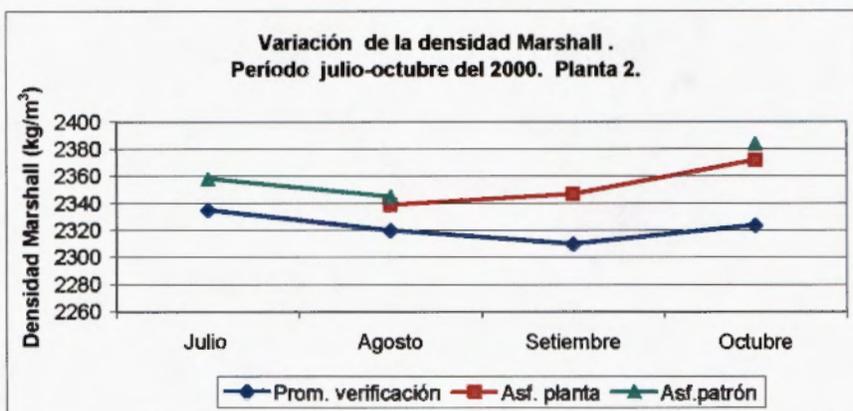
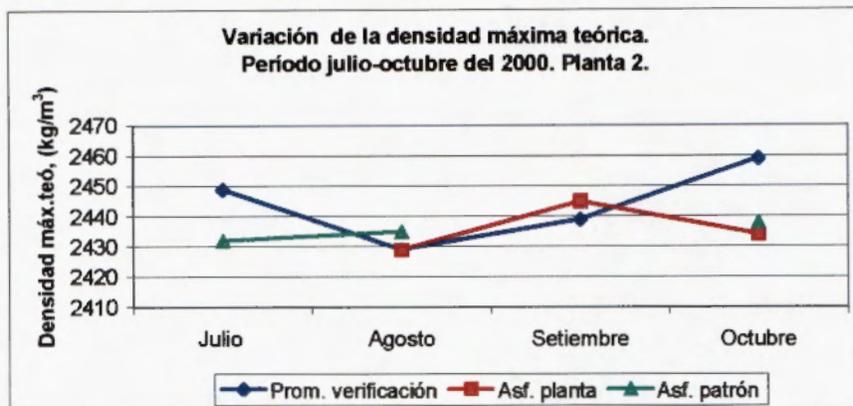
**Tabla 13: Resultados obtenidos de los especímenes Marshall moldeados con asfalto patrón y asfalto de planta. Período julio-octubre del 2000. Planta 2 (1).**

Parámetro	Julio		Agosto		Setiembre		Octubre	
	Asf. Planta (2)	Asf. Patrón	Asf. Planta	Asf. Patrón	Asf. Planta	Asf. Patrón (2)	Asf. Planta	Asf. Patrón
Estabilidad (kg)	-	1536	1292	1443	1471	-	1548	1479
Flujo (1/100 cm)	-	51	43	34	42	-	45	31
Den. Marshall (kg/m <sup>3</sup> )	-	2358	2339	2345	2347	-	2372	2384
Den. Máxima teórica (kg/m <sup>3</sup> ) (1)	-	2432	2429	2435	2445	-	2434	2438
% Vacíos	-	3.1	3.7	3.7	4.0	-	2.5	2.2

(1) Especímenes moldeados con la granulometría y el contenido de asfalto promedio del mes.

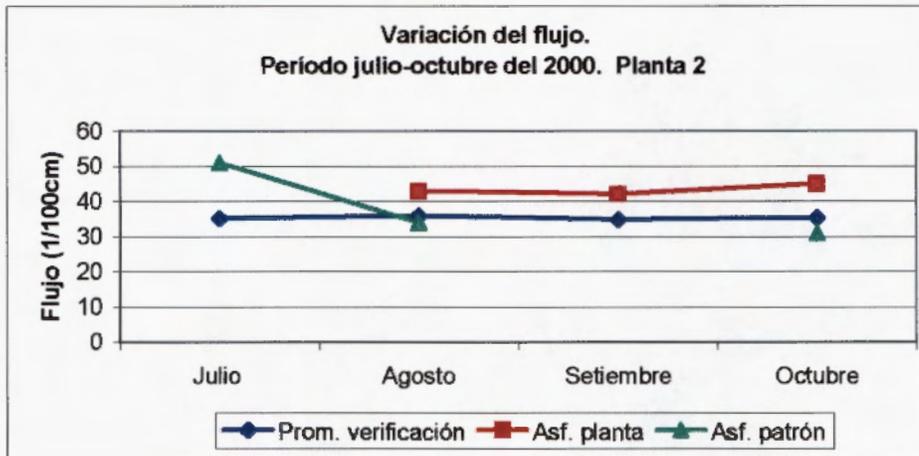
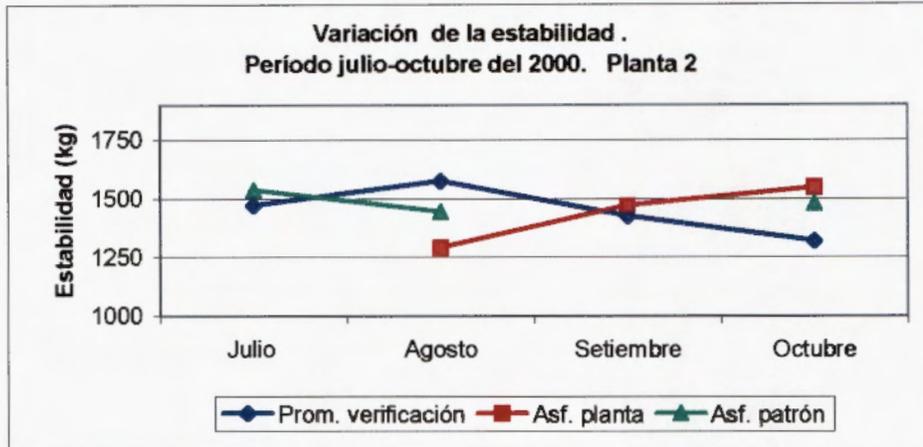
(2) Por falta de asfalto de planta del mes de julio, no se realizaron especímenes para esta condición.

**Gráfico 5: Variación de los parámetros de densidad máxima teórica, densidad Marshall y vacíos en especímenes moldeados en laboratorio, para el período julio-octubre del 2000. Planta 2 (1).**



(1) Especímenes moldeados con la granulometría y el contenido de asfalto promedio del mes.

**Gráfico 6: Variación de los parámetros Marshall de estabilidad y flujo, en especímenes moldeados en laboratorio, para el período julio-octubre del 2000. Planta 2 (1).**



(1) Especímenes moldeados con la granulometría y el contenido de asfalto promedio del mes.

#### 2.4.2.2. Parámetros Volumétricos de la mezcla. Método Superpave.

Al igual que en la anterior planta, se presentan en la Tabla 14 los parámetros volumétricos de los especímenes moldeados en el compactador giratorio.

**Tabla 14: Propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio. Planta 2.**

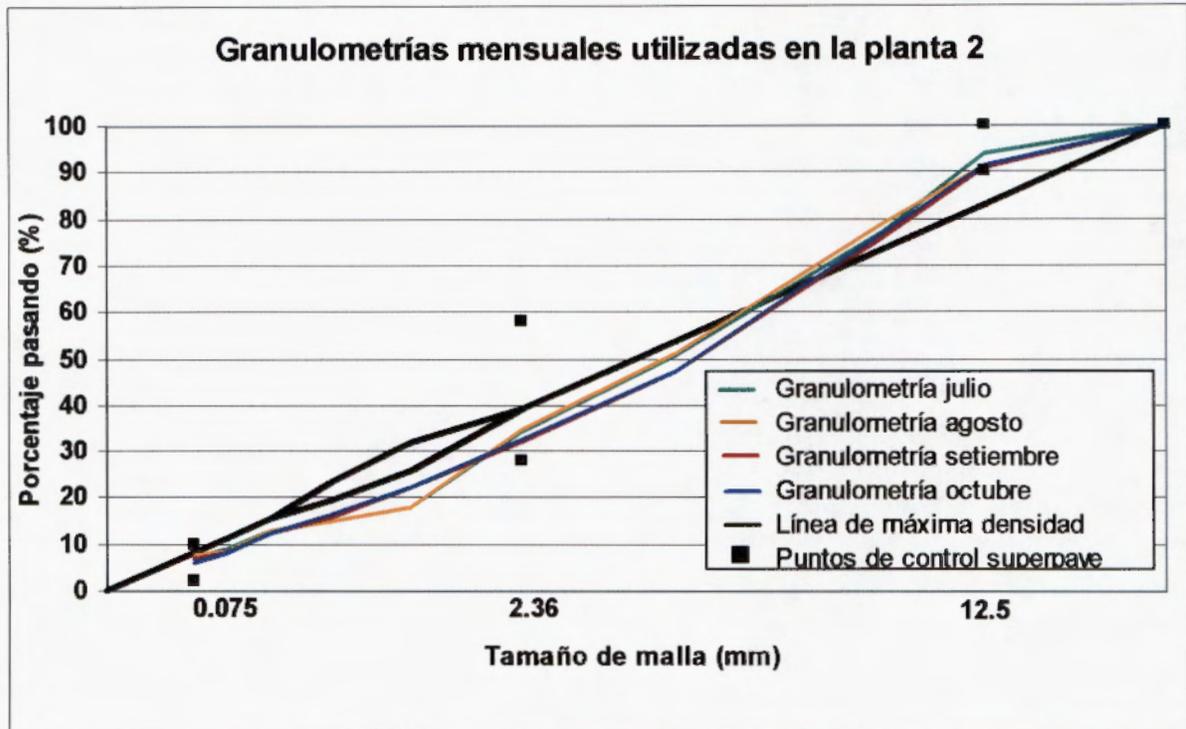
Parámetro	Junio		Agosto		Setiembre		Octubre		Especificaciones
	Asf. Planta (1)	Asf. patrón	Asf. planta	Asf. patrón	Asf. planta	Asf. patrón	Asf. planta	Asf. patrón	
%Gmm (N-inicial)	-	86.7	86.7	87.0	86.2	85.6	87.3	87.4	<89
%Gmm (N-Diseño)	-	97.1	97.3	97.4	97.0	96.2	97.9	97.9	96
%Gmm (N-Máx.)	-	98.6	98.7	98.9	98.5	97.7	99.4	99.5	<98
% vacíos (N-Dis)	-	2.9	2.7	2.6	3.0	3.8	2.1	2.1	4.0
% VMA (N-Dis)	-	14.39	14.11	13.95	13.95	14.5	13.46	13.49	>14
%VFA (N-Dis)	-	79.73	80.68	81.72	81.72	74.06	84.61	84.4	65-75 (2)

- (1) Por falta de asfalto de planta del mes de junio, no se realizaron especímenes para esta condición.
- (2) Esta especificación aplica para 10 millones de ejes equivalentes

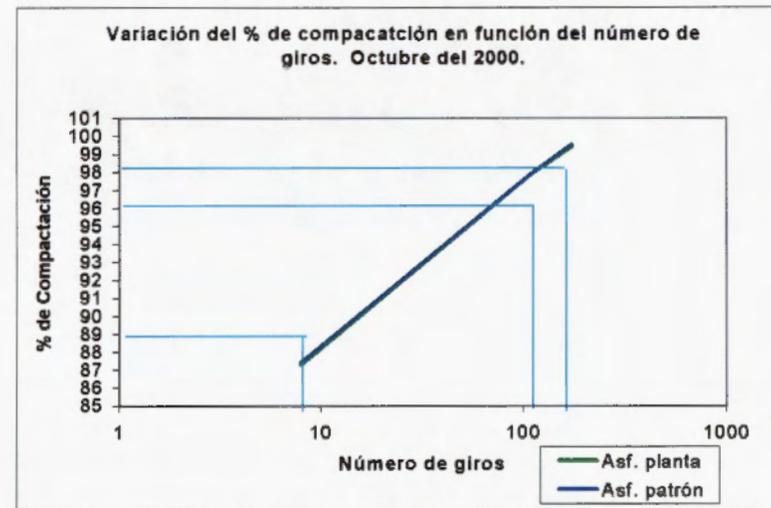
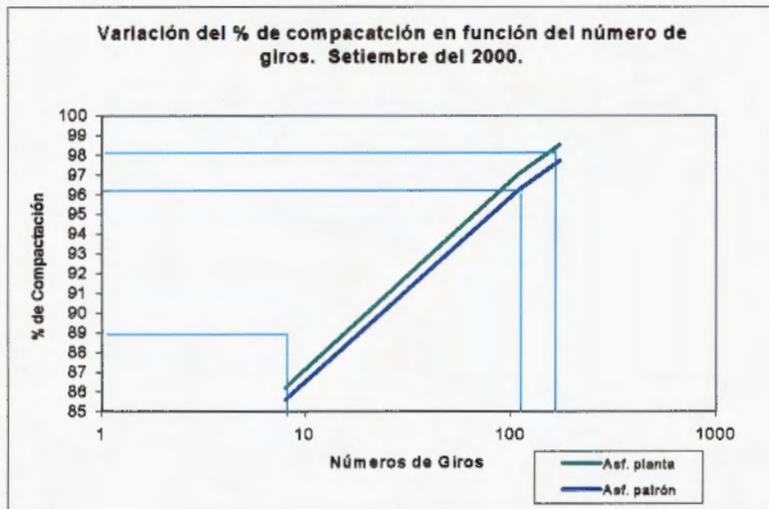
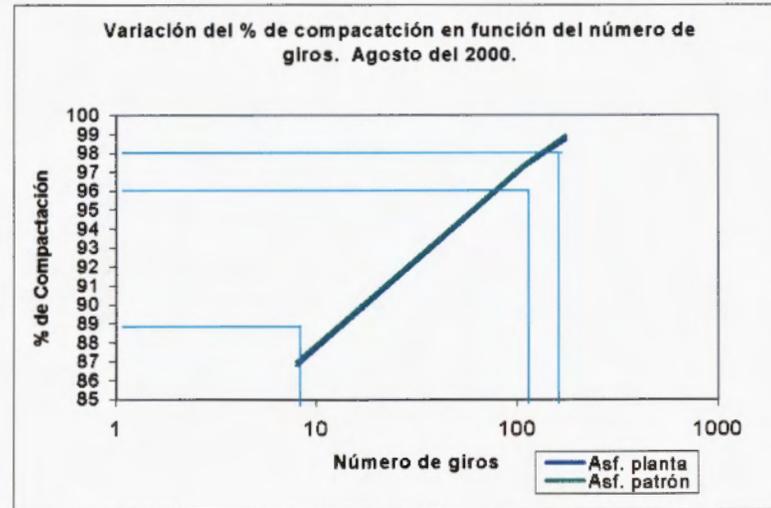
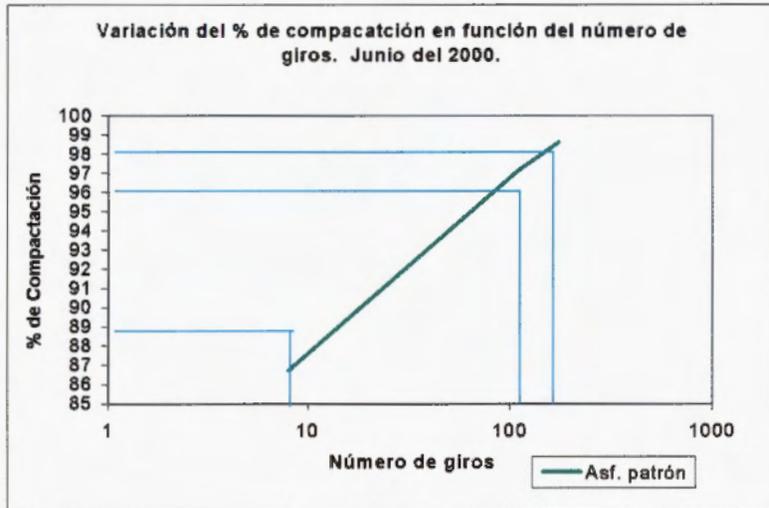
Aparecen sombreados los datos que se apartan de las especificaciones Superpave.

En el gráfico 7 se presentan las distintas curvas granulométricas empleadas por la planta 2 y en el gráfico 8, se presentan los resultados por mes, para las variaciones de la compactación de la mezcla en función del número de giros.

**Gráfico 7: Curvas granulométricas empleadas por la planta 2 en los meses de julio a octubre del año 2000.**



**Gráfico 8: Variación de la compactación en función del número de giros para la planta 2**



## 2.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LA PLANTA 3

### 2.5.1. GENERALIDADES

Al igual que para las plantas anteriores, y manteniendo las mismas condiciones, los resultados obtenidos de los diferentes ensayos se presentan en las Tablas 15 y 16.

**Tabla 15: Valores promedio de las propiedades de los agregados utilizados en la planta 3. Datos tomados durante el período julio-octubre del año 2000.**

Ensayo	n	Valor promedio	Desv. Estándar
Gbs gruesos	5	2.51	0.05
% Abs gruesos	5	2.3	0.2
Gbs finos	5	2.52	0.03
% Abs finos	5	2.7	0.5
% 1 cara fracturada	5	100.00	0.09
% 2 caras fracturadas	5	100.00	0.00
Equivalente arena	1	80	-
Vacios no compactados	4	36.2	1.5

### 2.5.2. RESULTADOS OBTENIDOS

#### 2.5.2.1. Parámetros Marshall

De los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio, elaborados tanto con el asfalto patrón como con el asfalto de planta, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 17. En los gráficos 9 y 10 se muestran los resultados obtenidos para cada parámetro.

**Tabla 16: Resumen de resultados de los ensayos de verificación para mezcla asfáltica, en la planta 3. Período julio-octubre del año 2000.**

Ensayo (1)	Diseño Mezcla	JULIO			AGOSTO			OCTUBRE		
		Valores prom.	Desv. Estándar	n	Valores prom.	Desv. Estándar	n	Valores prom.	Desv. Estándar	n
Estabilidad	22/6/00	1331	138	11	1462	238	4	1283	183	11
Flujo	31	41	7	11	40	1	4	42	5	10
Densidad Marshall	2270	2247	18	11	2259	22	4	2297	24	11
Densidad máxima teórica	2372	2394	11	11	2389	15	4	2421	23	11
Vacios	4,3	6,1	1,1	11	2,4	1,5	4	5,1	1,4	11
Contenido de asfalto (mezcla)	6,60	6,81	0,22	10	6,40	(2)	2	6,05	0,21	11
Contenido de asfalto (agregado)	7,07	7,29	0,24	10	6,90	(2)	2	6,52	0,20	11
<b>GRANULOMETRIA</b>	<b>% PASANDO</b>									
19 mm	100	100	0	11	100	0	4	100	0	11
9.5 mm	79	82	3	11	80	3	4	76	3	11
No 4	54	54	4	11	52	2	4	48	3	11
No 8	36	34	3	11	33	1	4	33	2	11
No 50	10	10	1	11	10	1	4	12	0	11
No 200	5,2	5,4	0,7	11	5,7	0,3	4	7,0	0,7	11

(1) Los especímenes fueron moldeados en los respectivos laboratorios de planta.

(2) No se calcula la desviación estándar debido a que sólo se tienen dos valores.

**Tabla 17: Resultados obtenidos de los especímenes Marshall elaborados con asfalto patrón y asfalto de planta.**

**Período julio-octubre del 2000. Planta 3 (1).**

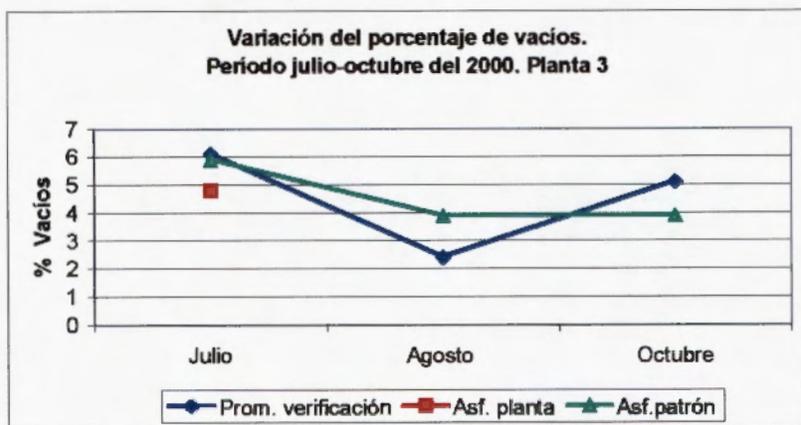
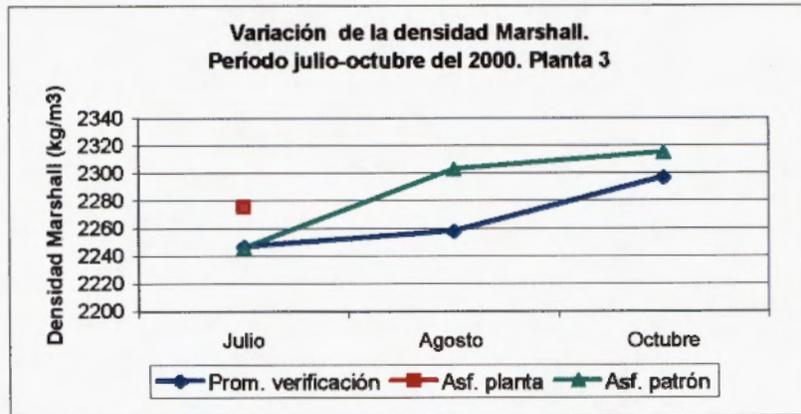
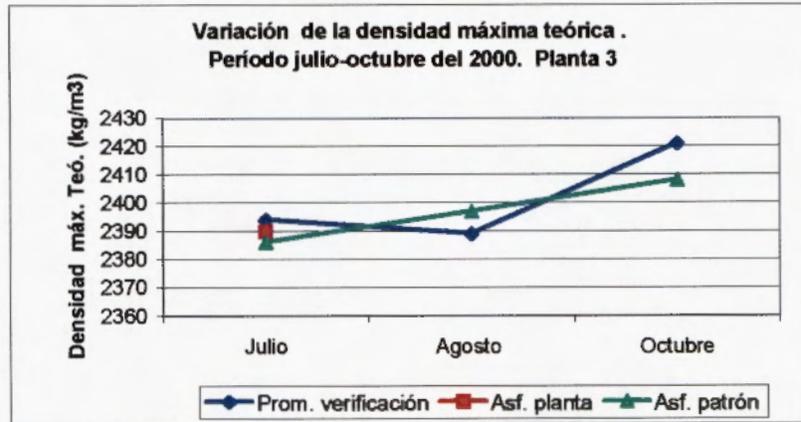
Parámetro	Julio		Agosto		Setiembre (3)		Octubre	
	Asf. Planta	Asf. Patrón	Asf. Planta (2)	Asf. Patrón	Asf. Planta	Asf. Patrón	Asf. Planta (2)	Asf. Patrón
Estabilidad (kg)	1506	1195	-	1404	-	-	-	1212
Flujo (1/100 cm)	43	57	-	39	-	-	-	48
Den. Marshall (kg/m <sup>3</sup> )	2276	2246	-	2303	-	-	-	2315
Den. Máxima teórica (kg/m <sup>3</sup> )	2390	2386	-	2397	-	-	-	2408
% Vacíos	4.8	5.9	-	3.9	-	-	-	3.9

(1) Especímenes moldeados con la granulometría y el contenido de asfalto promedio del mes.

(2) Por falta de asfalto de planta de los meses de agosto y octubre, no se realizaron especímenes para esta condición.

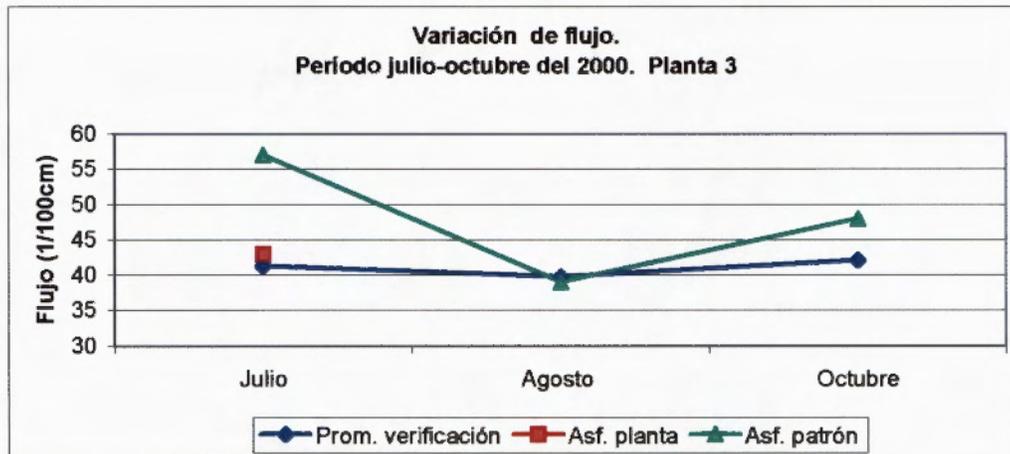
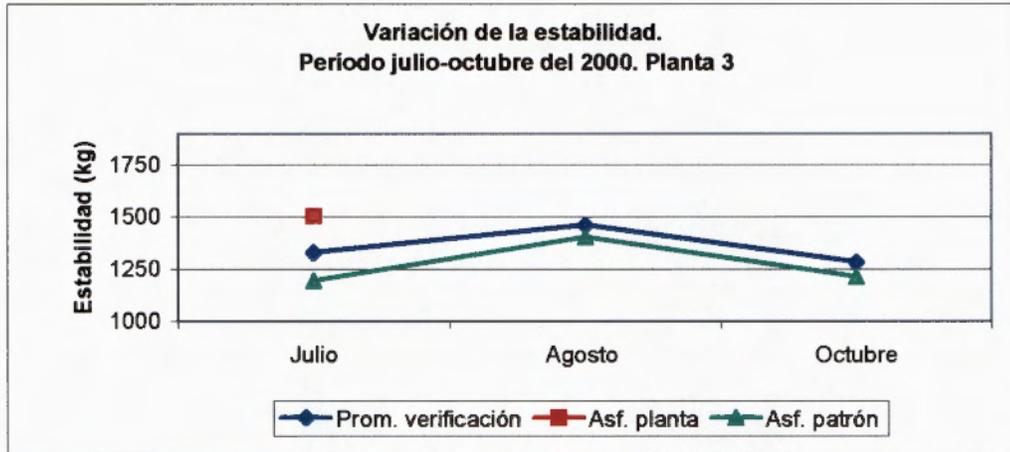
(3) No se tienen resultados del mes de setiembre ya que la planta no produjo mezcla asfáltica durante este mes.

**Gráfico 9: Variación de los parámetros Marshall en especímenes moldeados en laboratorio, para el período julio-octubre del 2000. Planta 3 (1).**



(1) Especímenes moldeados con la granulometría y el contenido de asfalto promedio del mes.

**Gráfico 10: Variación de los parámetros Marshall de estabilidad y flujo, en especímenes moldeados en laboratorio, para el período julio-octubre del 2000. Planta 3 (1).**



(1) Especímenes moldeados con la granulometría y el contenido de asfalto promedio del mes.

### 2.5.2.2. Propiedades volumétricas de la mezcla. Método superpave

De la misma manera que se comentó en las plantas anteriores, en la Tabla 18 se presentan las propiedades volumétricas obtenidas de los especímenes moldeados en el compactador giratorio.

**Tabla 18: Propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio. Planta 3.**

Parámetro	Junio		Agosto		Setiembre (2)		Octubre		Especificaciones
	Asf. Planta	Asf. patrón	Asf. Planta (1)	Asf. patrón	Asf. planta	Asf. patrón	Asf. Planta (1)	Asf. patrón	
%Gmm (N-inicial)	84.9	83.9	-	84.5	-	-	-	86.6	<89
%Gmm (N-Diseño)	95.3	94.0	-	95.0	-	-	-	97.3	96
%Gmm (N-Máx.)	96.9	95.5	-	96.6	-	-	-	98.8	<98
% vacíos (N-Dis)	4.7	6.0	-	5.0	-	-	-	2.7	4.0
% VMA (N-Dis)	15.51	16.79	-	15.51	-	-	-	13.08	>14
%VFA (N-Dis)	69.51	64.21	-	67.73	-	-	-	79.18	65-75 (3)

(1) Por falta de asfalto de planta de los meses de agosto y octubre, no se realizaron especímenes para esta condición.

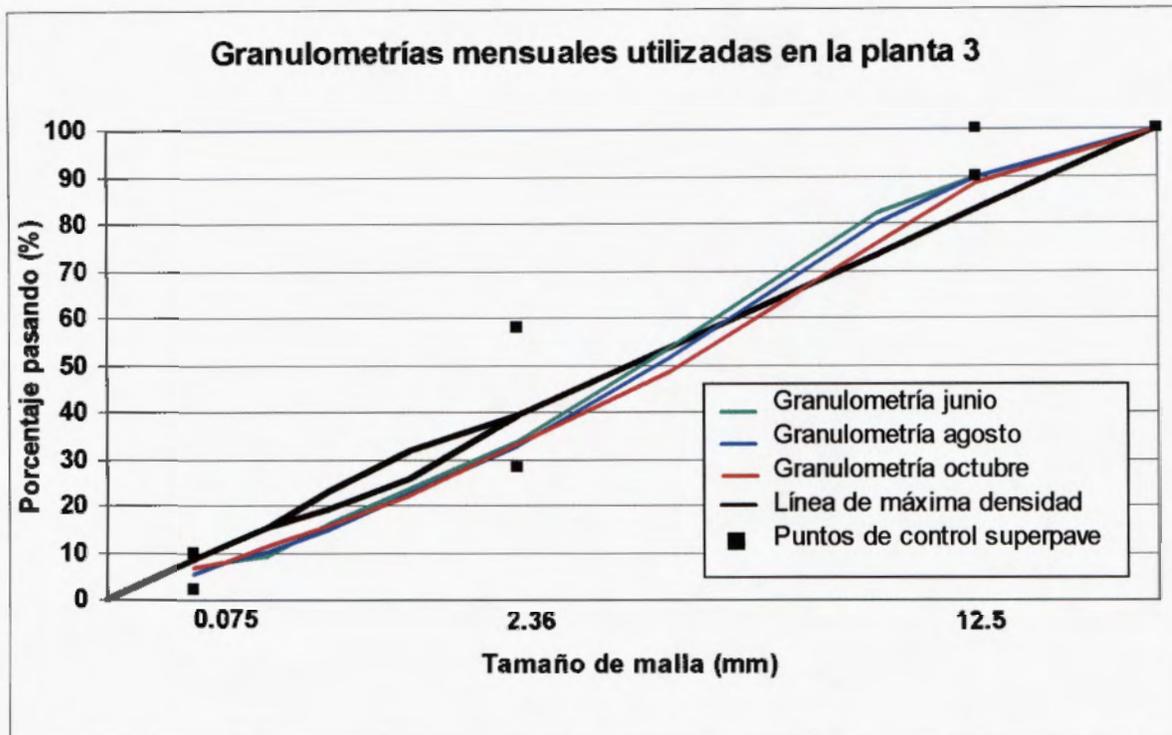
(2) No se tienen resultados del mes de setiembre ya que la planta no produjo mezcla asfáltica durante este mes.

(3) Esta especificación aplica para 10 millones de ejes equivalentes.

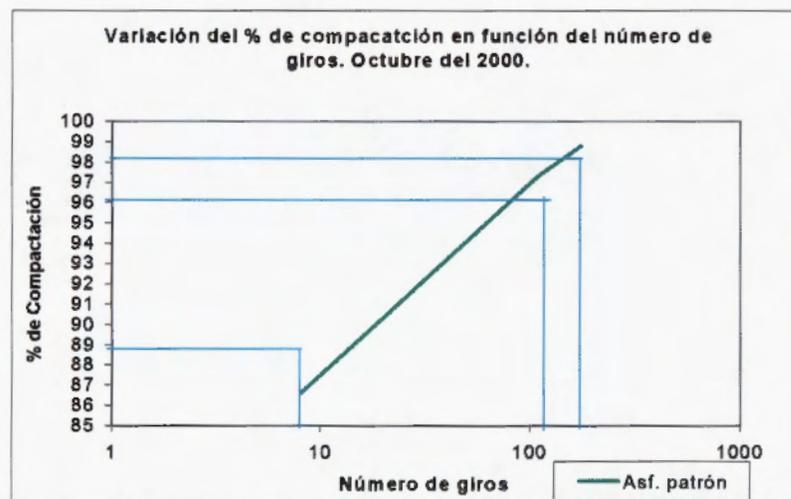
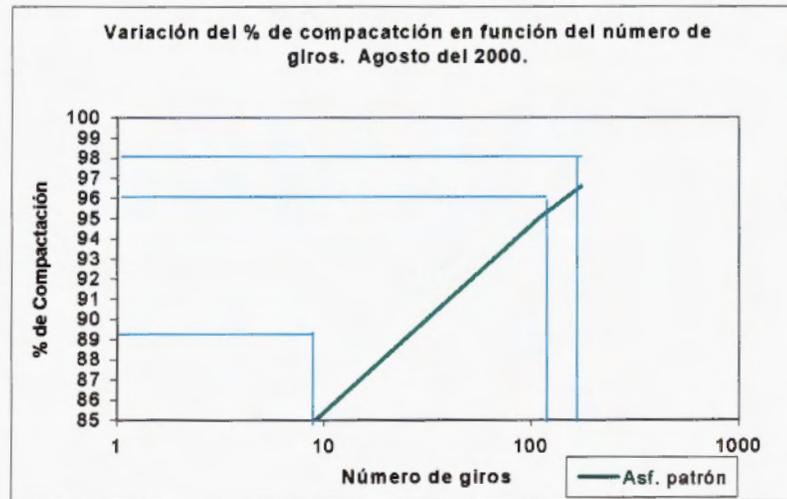
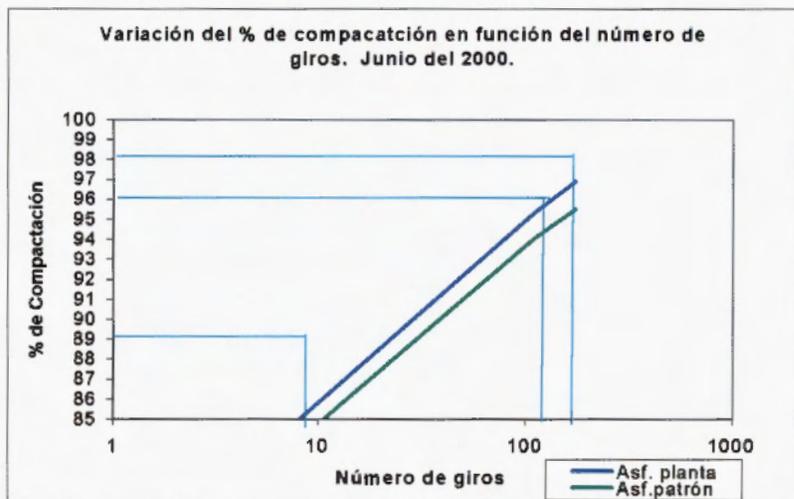
Aparecen sombreados los datos que se apartan de la especificación Superpave.

En el gráfico 11, se presentan las distintas curvas granulométricas empleadas por la planta 3 y en el gráfico 12, se presentan los resultados por mes, para las variaciones de la compactación de la mezcla en función del número de giros.

Gráfico 11: Curvas granulométricas empleadas por la planta 3 en los meses de julio a octubre del año 2000.

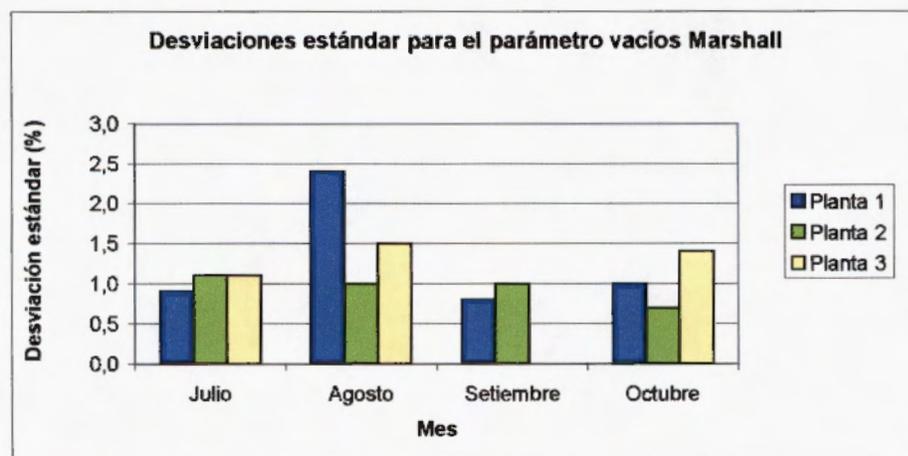
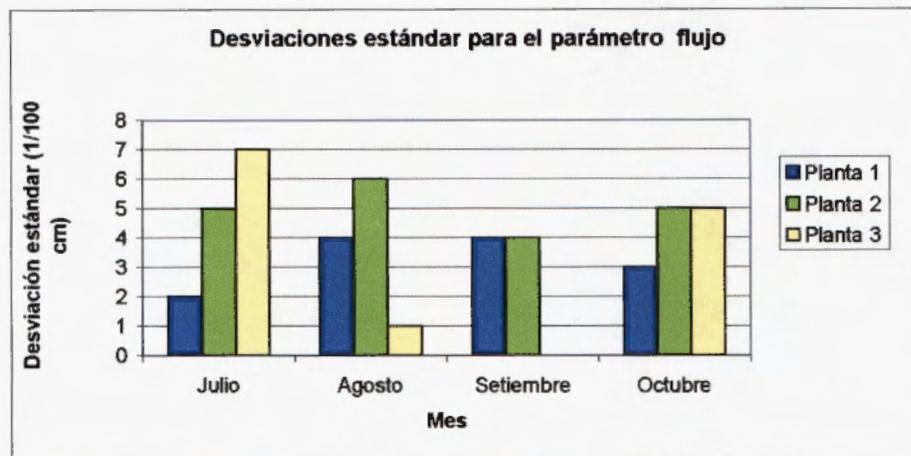
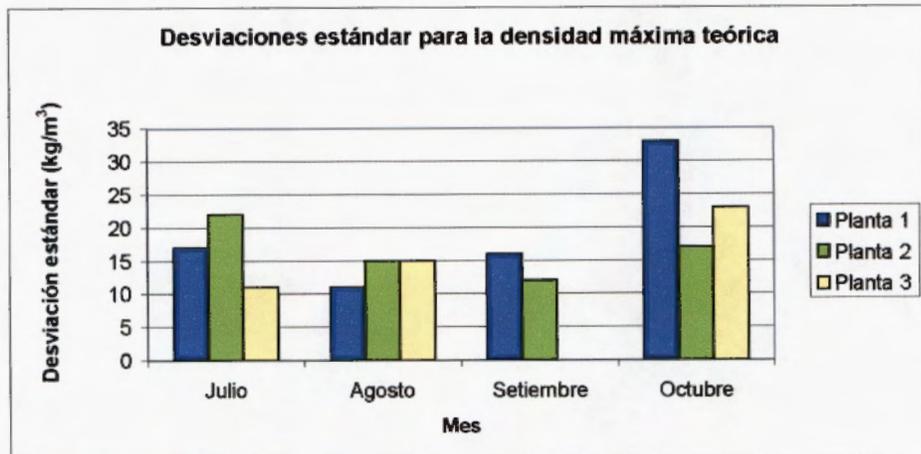


**Gráfico 12: Variación de la compactación en función del número de giros para la planta 3.**

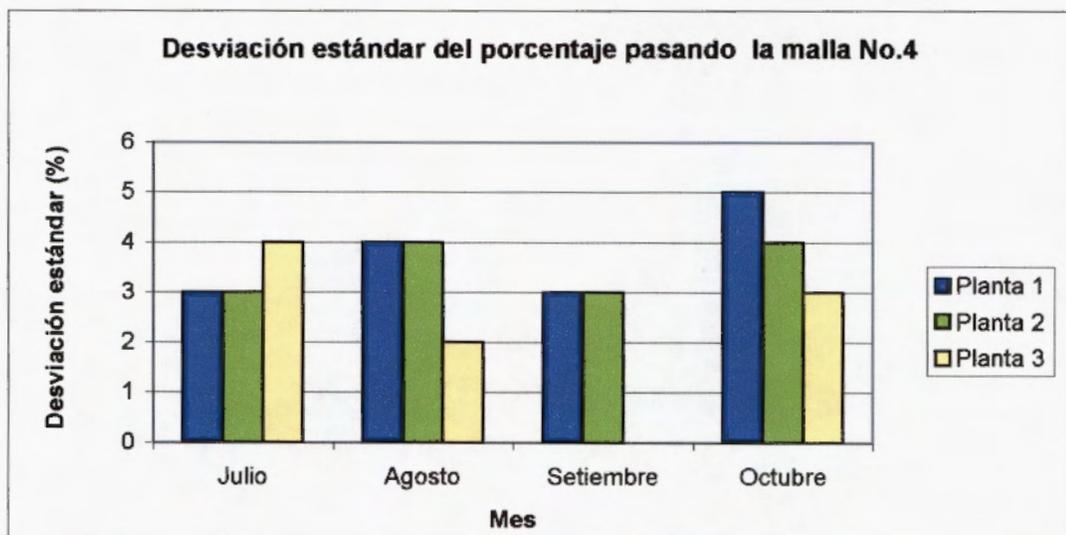
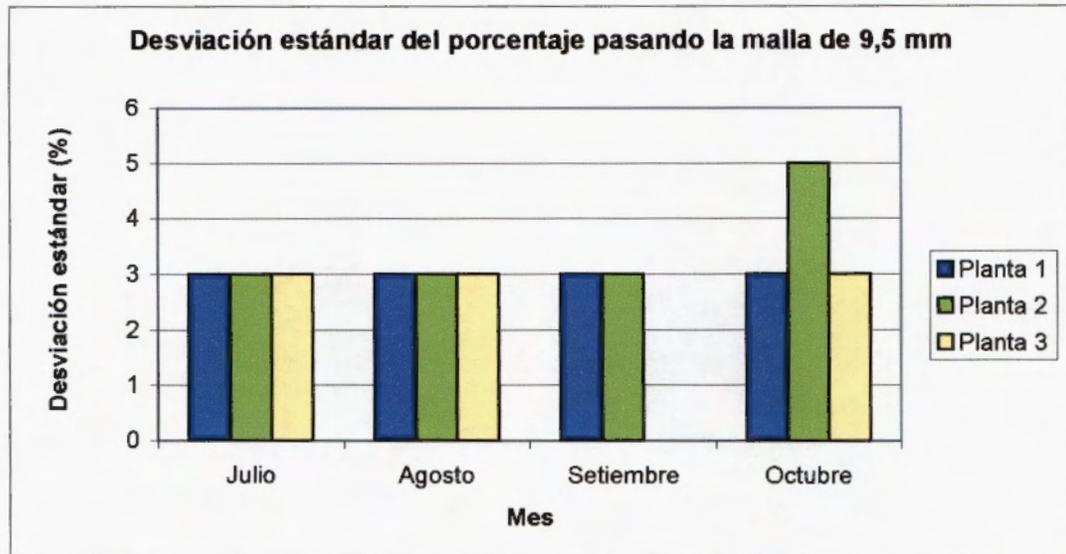


## 2.6. UNIFORMIDAD DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE LA MEZCLA

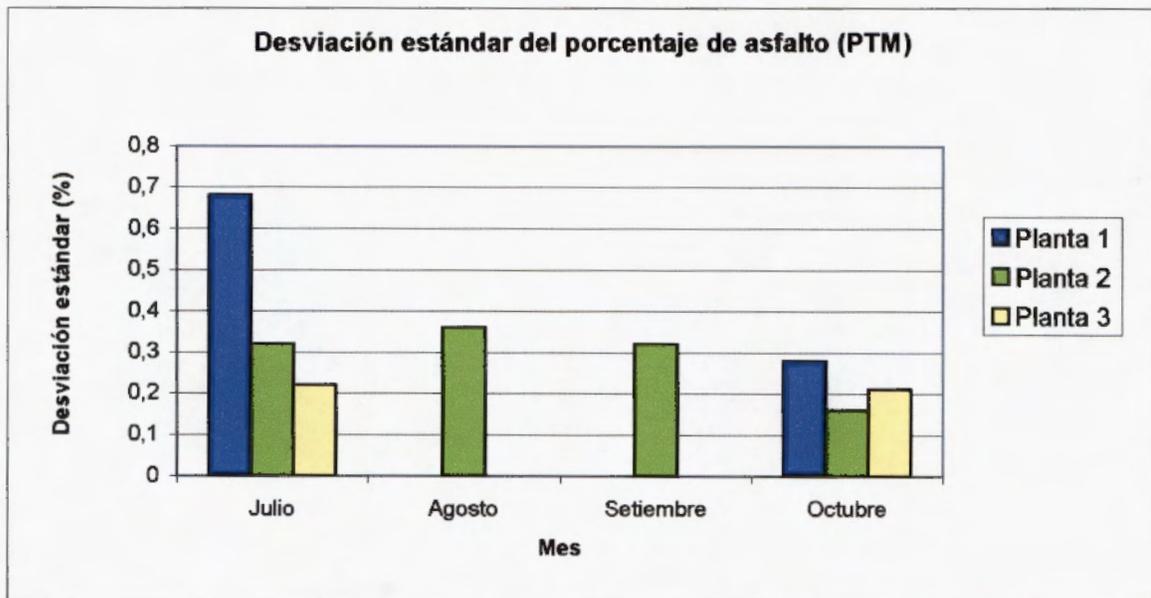
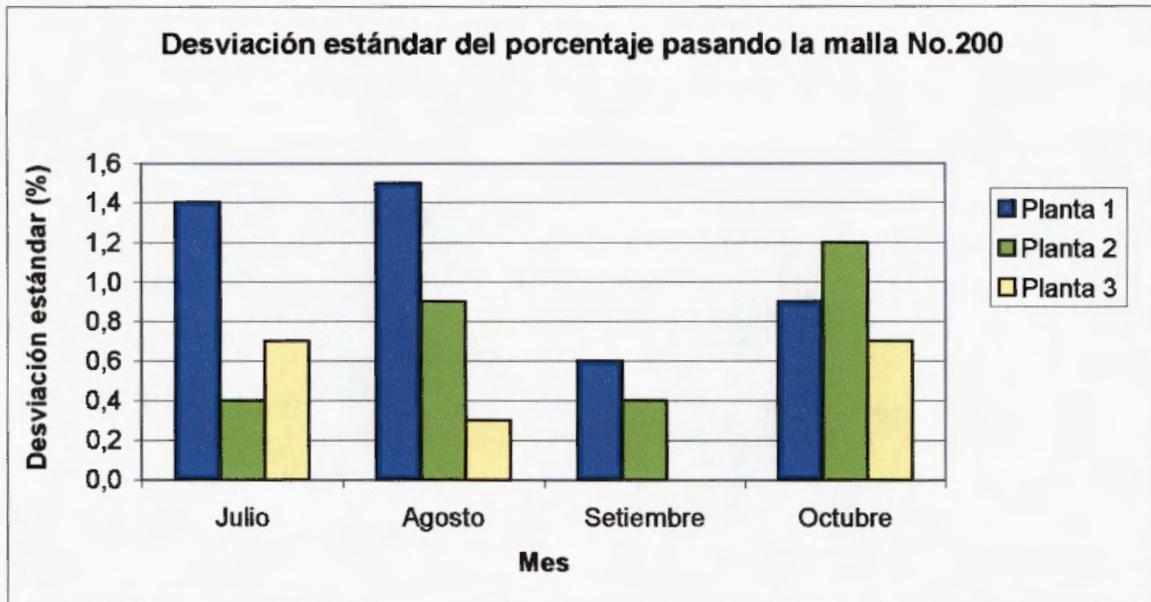
Gráfico 13: Comparación de uniformidad. Período julio-octubre, 2000.



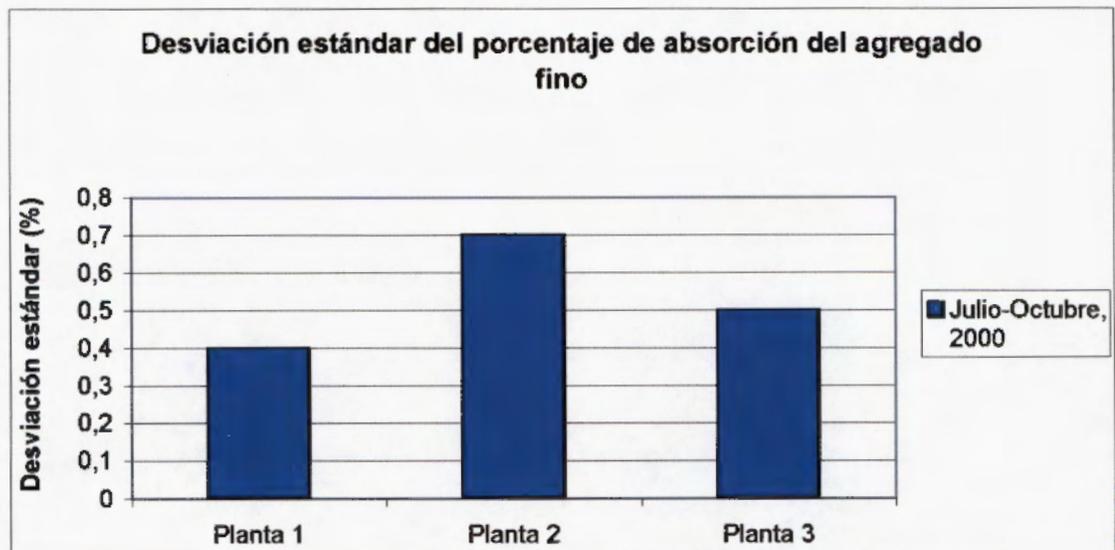
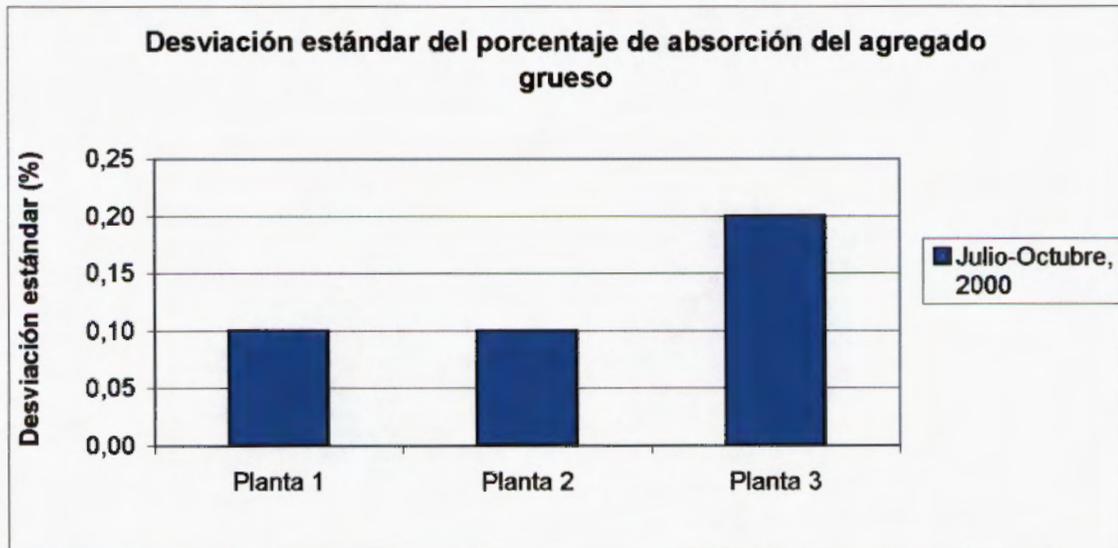
Continuación Gráfico 13: Comparación de uniformidad. Período julio-octubre, 2000.



Continuación Gráfico 13: Comparación de uniformidad. Período julio-octubre, 2000.



**Gráfico 14: Comparación de la uniformidad de los agregados. Período julio-octubre, 2000.**



## **2.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS. FASE I**

### **2.7.1. PARÁMETROS MARSHALL**

Para cada planta, las variables experimentales con las que se trabajó fueron la granulometría y el asfalto, los cuales varían mensualmente.

#### **Planta 1**

Para la planta 1, durante los cuatro meses en que se realizó el estudio (julio-octubre del 2000) el comportamiento que presentaron los parámetros de estabilidad, flujo, densidad Marshall, densidad máxima teórica y vacíos, los valores promedio de dichos parámetros experimentaron variación en los promedios y en algunos casos alta dispersión (desviación estándar del proceso de producción). Los siguientes parámetros experimentales muestran valores sumamente altos de variación: vacíos Marshall, contenido de asfalto y densidad Marshall. Adicionalmente, la estabilidad, el porcentaje que pasa la malla No.4 y el porcentaje que pasa la malla No. 200 muestran valores altos de variación.

En esta planta 1, el parámetro flujo se ubica en el rango alto de variación, oscilando los valores promedio de cada mes entre 36 y 44  $\text{mm} \cdot 10^{-1}$  en contraste con el valor de 33 máximo que establece el diseño de mezcla. Estos especímenes fueron moldeados en la planta.

Lo anterior muestra que en esta planta el proceso estuvo fuera de control en diferentes momentos del período analizado.

Para los parámetros de estabilidad y densidad máxima teórica, se obtienen valores más altos con el asfalto patrón que con el asfalto de planta. Para los parámetros de flujo, densidad Marshall y vacíos, se obtienen valores más altos con el asfalto de planta.

## **Planta 2**

Para la planta 2, el comportamiento de los parámetros no es el mismo a lo largo de los cuatro meses de estudio. En el caso de la estabilidad, en los meses de agosto y setiembre, los valores más altos se obtienen con el asfalto patrón, no así en el mes de octubre, donde se obtiene un mayor valor de estabilidad con el asfalto de planta. Para el flujo y la densidad Marshall el comportamiento es similar al presentado en la planta 1, a excepción del resultado obtenido para la densidad Marshall en el mes de agosto, donde no hay diferencia entre el resultado obtenido con el asfalto de planta y el obtenido con el asfalto patrón. El comportamiento mostrado por el parámetro de densidad máxima teórica en la planta 2, es contrario al presentado en la planta 1. Es decir, se obtuvieron valores más altos cuando se utilizó el asfalto patrón. Para los vacíos en la mezcla, el comportamiento es variado dependiendo del mes. En el mes de agosto los vacíos en la mezcla fueron los mismos, sin importar cuál asfalto se utilizara. Para el mes de setiembre, se obtuvieron mayores vacíos cuando se utilizó el asfalto patrón, situación contraria se presentó en el mes de octubre, donde los mayores vacíos se presentan cuando se utilizó el asfalto de planta.

En esta planta se detectaron valores de dispersión sumamente altos en la estabilidad y en la absorción del agregado fino. Otros parámetros que presentaron dispersión alta fueron el porcentaje de asfalto, la malla No.4 y la malla No.200. En menos grado que la anterior, para esta planta también su proceso de producción estuvo fuera de control en diferentes momentos del período analizado.

Cabe destacar que los valores de flujo del diseño de mezcla coinciden con los valores promedios obtenidos en los ensayos de verificación.

## **Planta 3**

En la planta 3, sólo se pueden hacer comparaciones en el mes de julio, ya que en los otros meses no se tiene la información completa. Los parámetros de estabilidad, densidad Marshall y densidad máxima teórica, presentaron mayores valores cuando se utilizó el asfalto de planta, mientras que el flujo y los vacíos presentaron mayores valores cuando

se utilizó el asfalto patrón. A excepción del parámetro de densidad máxima teórica, todos los demás parámetros presentan un comportamiento contrario al presentado por los mismos parámetros en la planta 1.

Para esta planta, el parámetro de flujo presentó una variabilidad muy alta, y se sitúan en el rango de variación alta de la absorción del agregado grueso, la estabilidad, la malla No.4 y los vacíos Marshall.

El flujo se encuentra en el rango alto con promedios mensuales variando entre 40 y 42  $\text{mm} \cdot 10^{-1}$ , y además con dispersión muy alta, y con valores muy por encima de lo que establece el diseño de mezcla (31 máximo). Al determinar el flujo con asfalto de planta y con asfalto patrón, utilizando la granulometría y el asfalto promedio del mes, nuevamente se obtienen valores altos, que oscilan entre 39 y 57  $\text{mm} \cdot 10^{-1}$  y vacíos entre 3.9 y 5.9 %. Los vacíos, también con muy alta variación, se ubican los promedios mensuales entre 5.1 y 6.1.

De conformidad con estos resultados el proceso de producción ha estado fuera de control en diferentes momentos del período analizado.

### **2.7.2. ANÁLISIS DE PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS SUPERPAVE**

Los parámetros volumétricos se analizaron bajo las mismas condiciones que los parámetros Marshall, es decir las variables experimentales fueron la granulometría y el asfalto, los cuales se variaron mensualmente. Los resultados fueron los siguientes:

#### **Planta 1**

Se analizaron los parámetros de porcentaje de compactación  $N(\text{inicial})$ ,  $N(\text{diseño})$  y  $N(\text{máxima})$ , el porcentaje de vacíos, el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) y el porcentaje de vacíos llenos con asfalto (VFA), los últimos tres para el número de giros de diseño. Los resultados fueron los siguientes:

- Compactación inicial (% Gmm N(inicial)): los valores obtenidos varían entre 84.8 y 88.1. De los ocho casos analizados, todos cumplen con la especificación del Nivel 1 de Superpave.
- Compactación de diseño (% Gmm N(diseño)): los valores oscilan entre 93.7 y 97.3. En este caso sólo tres de los ocho casos analizados cumplen con la especificación del Nivel 1 de Superpave.
- Compactación máxima (% Gmm N(máximo)): los valores oscilan entre 95.1 y 98.6. Sólo 1 caso de los ocho analizados incumple con la especificación Superpave Nivel 1.
- Vacíos de diseño (% Vacíos N(diseño)): los valores obtenidos varían entre 2.7 y 6.3. Tres de los ocho casos analizados cumplen con la especificación Superpave Nivel 1.
- Vacíos en el agregado mineral (% VMA N(diseño)): los valores obtenidos oscilan entre 13.82 y 16.57. Los ocho casos analizados cumplen con la especificación Superpave Nivel 1.
- Vacíos llenos con asfalto (% VFA N(diseño)): los valores oscilan entre 60.73 y 80.1. Tres de los ocho casos analizados incumplen con la especificación Superpave Nivel 1.

## **Planta 2**

Al igual que para la planta 1, se analizaron los parámetros de % compactación N(inicial), N(diseño) y N(máxima), el porcentaje de vacíos, el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) y el porcentaje de vacíos llenos con asfalto (VFA), los últimos tres para el número de giros de diseño. Los resultados fueron los siguientes:

- Compactación inicial (% Gmm N(inicial)): los valores obtenidos varían entre 85.6 y 87.4. De los siete casos analizados, todos cumplen con la especificación del Nivel 1 de Superpave.

- Compactación de diseño (% Gmm N(diseño)): los valores oscilan entre 96.2 y 97.9. En este caso sólo uno de los siete casos analizados cumplen con la especificación del Nivel 1 de Superpave.
- Compactación máxima (% Gmm N(máximo)): los valores oscilan entre 97.7 y 99.5. Sólo un caso de los siete analizados cumple con la especificación Superpave Nivel 1.
- Vacíos de diseño (% Vacíos N(diseño)): los valores obtenidos varían entre 2.1 y 3.8. Sólo un caso de los siete analizados cumple con la especificación Superpave Nivel 1.
- Vacíos en el agregado mineral (% VMA N(diseño)): los valores obtenidos oscilan entre 13.46 y 14.5. Dos de los siete casos analizados incumplen con la especificación Superpave Nivel 1.
- Vacíos llenos con asfalto (% VFA N(diseño)): los valores oscilan entre 74.06 y 84.6. Sólo uno de los siete casos analizados cumple con la especificación Superpave Nivel 1.

### **Planta 3**

Al igual que para las plantas 1 y 2, se analizaron los parámetros de porcentaje de compactación N(inicial), N(diseño) y N(máxima), el porcentaje de vacíos, el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) y el porcentaje de vacíos llenos con asfalto (VFA), los últimos tres para el número de giros de diseño. Los resultados fueron los siguientes:

- Compactación inicial (% Gmm N(inicial)): los valores obtenidos varían entre 83.9 y 86.6. De los cuatro casos analizados, todos cumplen con la especificación del Nivel 1 de Superpave.
- Compactación de diseño (% Gmm N(diseño)): los valores oscilan entre 94.0 y 97.3. En este caso los cuatro casos analizados incumplen con la especificación del Nivel 1 de Superpave.

- Compactación máxima (% Gmm N<sub>máximo</sub>): los valores oscilan entre 95.5 y 98.8. Tres de los cuatro casos analizados cumplen con la especificación Superpave Nivel 1.
- Vacíos de diseño (% Vacíos N<sub>diseño</sub>): los valores obtenidos varían entre 2.7 y 6.0. Los cuatro casos analizados incumplen con la especificación Superpave Nivel 1.
- Vacíos en el agregado mineral (% VMA N<sub>diseño</sub>): los valores obtenidos oscilan entre 13.08 y 16.79. Tres de los cuatro casos analizados cumplen con la especificación Superpave Nivel 1.
- Vacíos llenos con asfalto (% VFA N<sub>diseño</sub>): los valores oscilan entre 64.21 y 79.18. Sólo dos de los cuatro casos analizados cumplen con la especificación Superpave Nivel 1.

## 2.8. FASE II

En esta fase se analiza como factor experimental el tiempo y temperatura de curado. Para este factor se consideran siete acondicionamientos en el horno: 0 horas, 16 horas a 60°C, 2 horas a 145°C, 4 horas a 135°C, 4 horas a 155°C y 24 horas a 155°C.

Preliminarmente se hizo un análisis para valorar si el tiempo transcurrido posterior al acondicionamiento del espécimen y el momento de la falla (en condición de temperatura ambiente) tenía incidencia en los parámetros Marshall. Dicho plazo se varió entre 0 horas y 7 días, y se concluyó que no incidía en los valores obtenidos.

El tipo de asfalto utilizado en esta fase del estudio se mantuvo constante, y se utilizó para este fin, el asfalto patrón caracterizado en la fase 1. Para la elaboración de la mezcla asfáltica se utilizó la granulometría del diseño de mezcla vigente para cada planta considerada en este estudio (planta 1, planta 2 y planta 3), y los contenidos óptimos de asfalto indicados en cada caso. El agregado utilizado corresponde a material obtenido de cada planta.

Adicionalmente se analizaron los parámetros volumétricos por medio del compactador giratorio, siguiendo el procedimiento Superpave.

Para analizar el factor tiempo y la temperatura de curado, se puso la mezcla sin compactar al horno, en una bandeja sin cobertor, por el tiempo y a la temperatura requerida para cada tipo de acondicionamiento.

## 2.9. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LA PLANTA 1

### 2.9.1. GENERALIDADES

En la Tabla 19 se presenta la granulometría del diseño de mezcla vigente (con fecha 8 de agosto del 2000) para el período del estudio, el porcentaje de asfalto óptimo y las propiedades del agregado y del asfalto utilizados en la elaboración de los especímenes.

**Tabla 19: Granulometría del diseño de mezcla vigente, con fecha 8 de agosto del 2000, y otras propiedades de los agregados y el asfalto. Planta 1.**

MALLA	% PASANDO
19 mm	100
12.7 mm	95
9.5 mm	80
No.4	50
No.8	33
No.16	22
No.30	14
No.50	10
N0.200	3.0
<b>CONTENIDO DE ASFALTO</b>	
Contenido de asfalto (mezcla) %	5.92
Contenido de asfalto (agregado) %	6.29
<b>CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO</b>	
Gbs grueso	2.62
Gbs fino	2.67
Abs Grueso (%)	2.0
Abs fino (%)	1.5
<b>2.9.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO</b>	
Viscosidad a 60°C (Poises)	1750
Penetración (1/10 mm)	71

## **2.9.2. RESULTADOS OBTENIDOS**

### **2.9.2.1. Propiedades Marshall**

En la Tabla 20 y en el Gráfico 15, se presentan los resultados obtenidos para los especímenes elaborados y fallados en el laboratorio para los parámetros de estabilidad, flujo, densidad Marshall, densidad máxima teórica y vacíos en la mezcla.

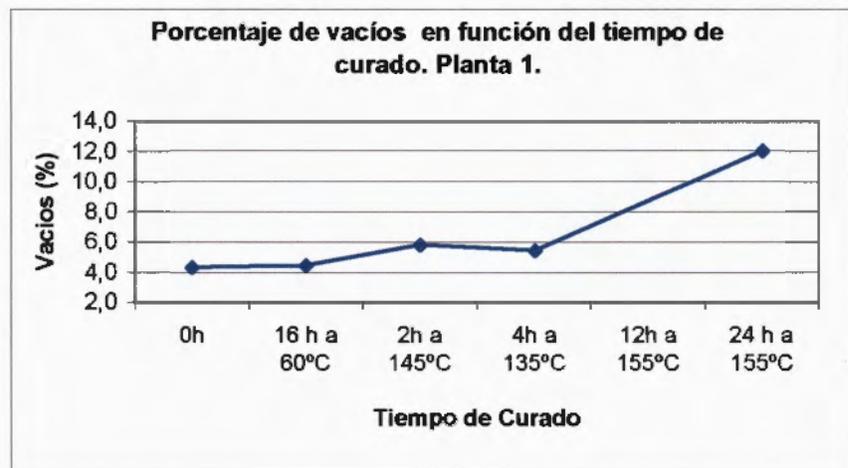
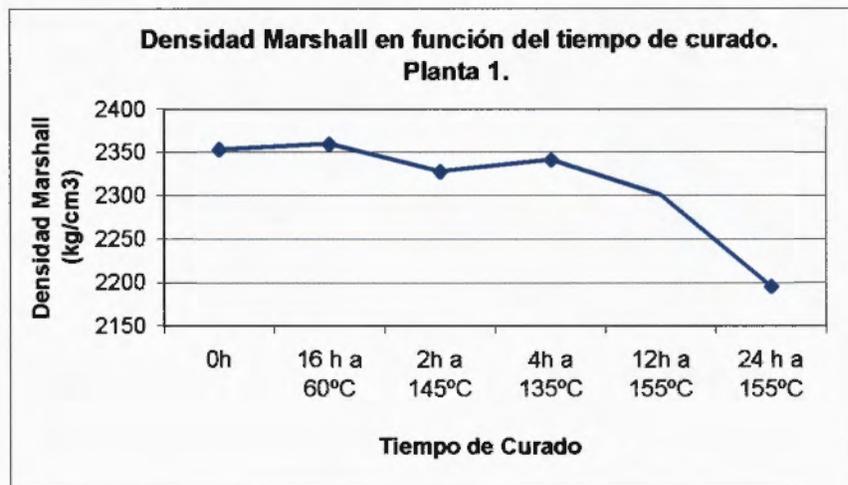
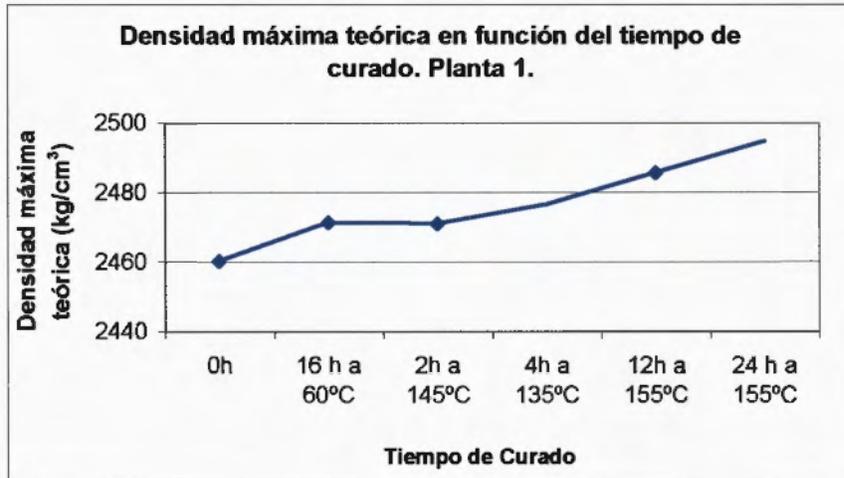
Los especímenes fueron sometidos a diferentes acondicionamientos de curado en el horno.

Posteriormente se hace el mismo análisis moldeando la mezcla con el compactador giratorio y aplicando los mismos métodos de curado que en el caso anterior.

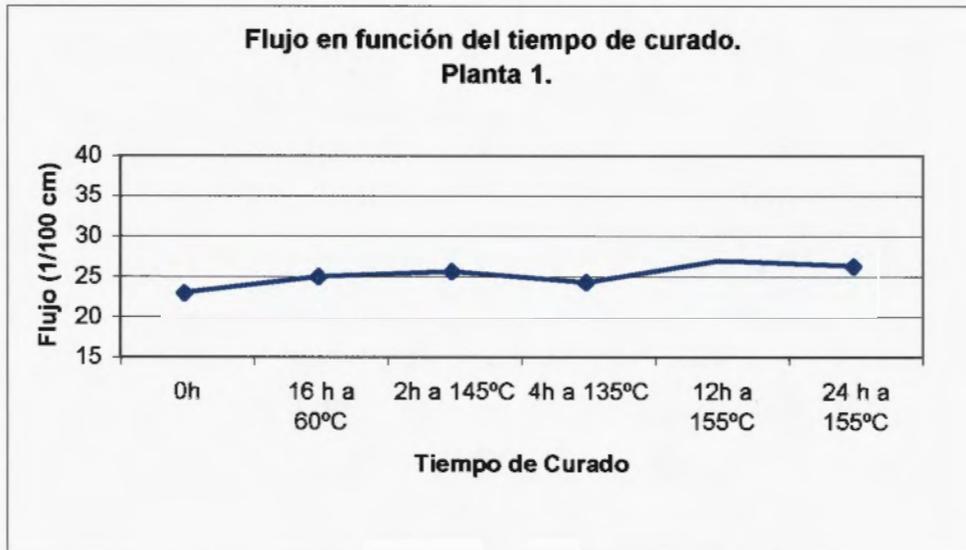
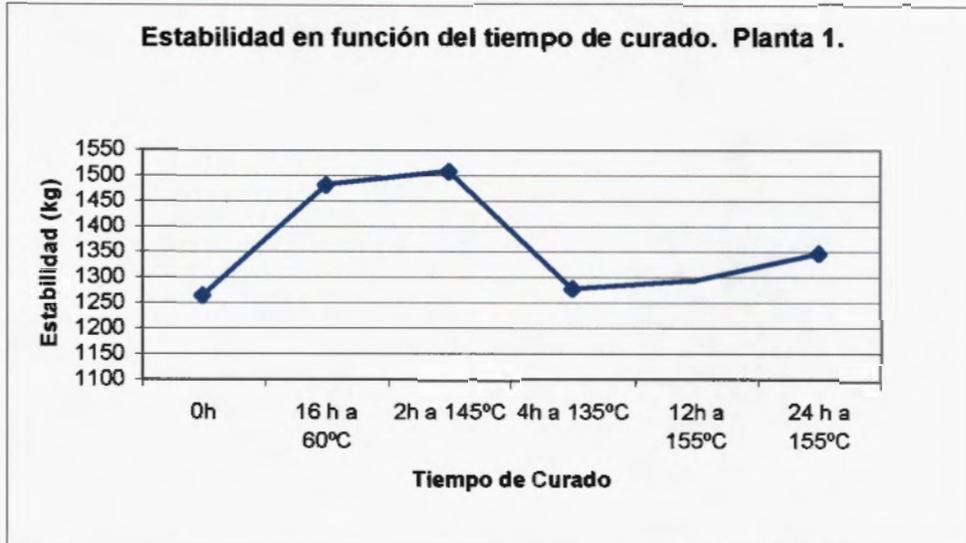
**Tabla 20: Resumen de resultados obtenidos para los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio. Planta 1.**

<b>Parámetro Marshall</b>	<b>Tiempo de curado</b>	<b>Valores</b>
Estabilidad	0h	1266
Flujo		23
Densidad Marshall		2354
Densidad máxima teórica		2461
Vacíos		4,4
Estabilidad	16 h a 60°C	1482
Flujo		25
Densidad Marshall		2360
Densidad máxima teórica		2472
Vacíos		4,5
Estabilidad	2h a 145°C	1509
Flujo		26
Densidad Marshall		2328
Densidad máxima teórica		2471
Vacíos		5,8
Estabilidad	4h a 135°C	1278
Flujo		24
Densidad Marshall		2342
Densidad máxima teórica		2477
Vacíos		5,5
Estabilidad	12h a 155°C	1295
Flujo		27
Densidad Marshall		2301
Densidad máxima teórica		
Vacíos		
Estabilidad	24 h a 155°C	1347
Flujo		26
Densidad Marshall		2196
Densidad máxima teórica		2495
Vacíos		12,0

**Gráfico 15: Variación de los parámetros Marshall en especímenes moldeados en laboratorio, en función del tiempo de curado. Planta 1.**



**Continuación Gráfico 15.**



### **2.9.2.2. Propiedades Volumétricas de la mezcla . Método superpave.**

Para obtener las propiedades volumétricas de la mezcla, se trabajó con especímenes moldeados en el compactador giratorio, siguiendo las especificaciones dictadas por Superpave.

Este análisis se hace para la granulometría y el porcentaje óptimo de asfalto del diseño de mezcla vigente con fecha 8 de agosto del 2000. Conviene tener presente que el mismo análisis se hizo en la fase I, pero utilizando el promedio de la granulometría y el contenido de asfalto de cada mes.

En la Tabla 21, se presentan los parámetros de:

- %Gmm (N-inicial), el cual corresponde al porcentaje de compactación inicial de la mezcla, que debe ser menor a 89%
- % Gmm (N-diseño), corresponde al porcentaje de compactación para el cual se debe diseñar la mezcla, cuyo valor debe ser del 96%
- %Gmm (N-máxima), corresponde a la compactación máxima que debe presentar un pavimento luego de su vida de servicio, cuyo valor debe ser menor a 98%.

Además se presentan los parámetros de vacíos de aire, el porcentaje de vacíos en el agregado mineral y el porcentaje de vacíos llenos con asfalto, todos estos calculados para el número de giros de diseño.

Cabe aclarar que según la norma ASHTO TP4: Método estándar para la preparación y determinación de la densidad de mezclas asfálticas en caliente en especímenes moldeados en el compactador giratorio, el tiempo de curado exigido por Superpave es de 4 horas a 135°C.

**Tabla 21: Propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio. Planta 1.**

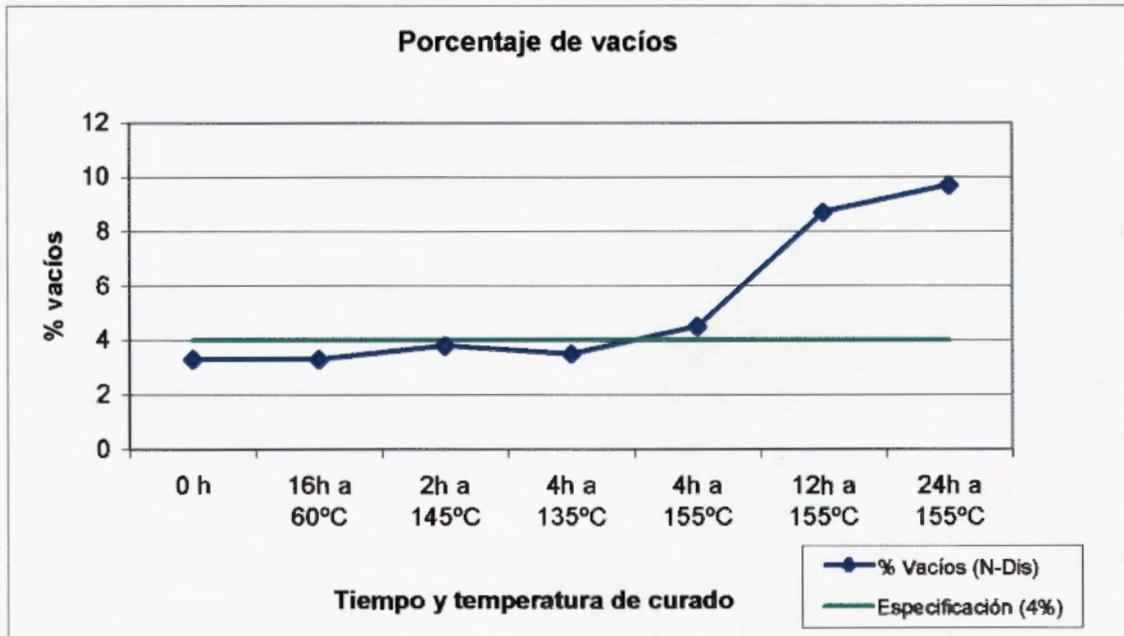
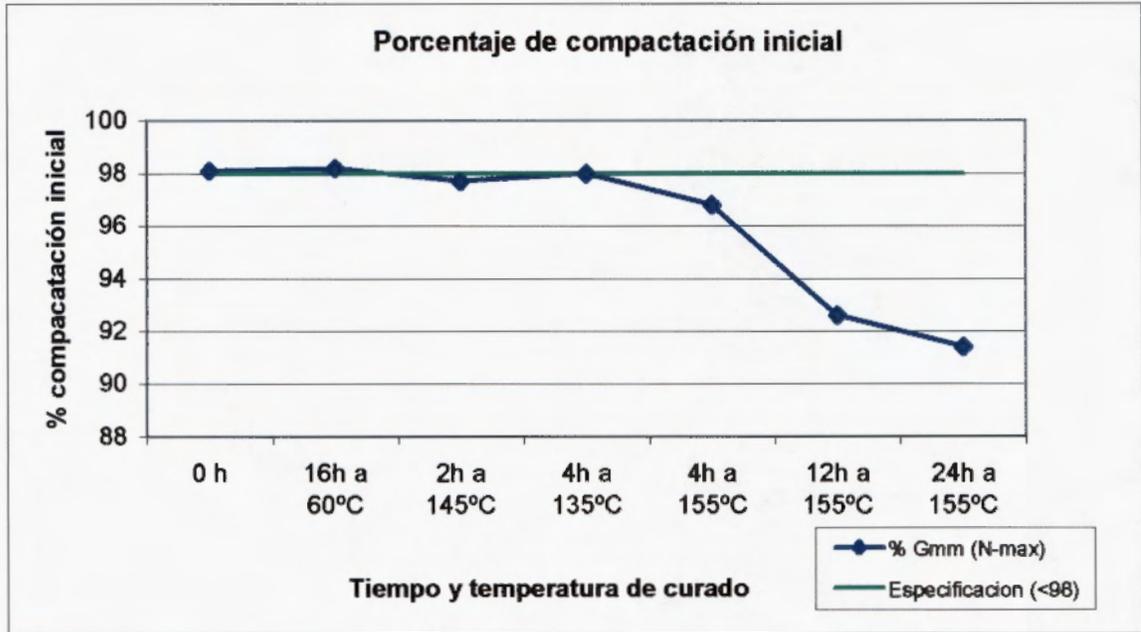
Parámetro	Tiempo de curado							Especificaciones
	0h	16 h a 60°C	2h a 145°C	4h a 135°C	4h a 155°C	12h a 155°C	24h a 155°C	
%Gmm (N-inicial)	87.2	86.9	86.7	87.0	86.3	82.0	81.8	<89
%Gmm (N-Diseño)	96.7	96.7	96.2	96.5	95.5	91.3	90.3	96
%Gmm (N-Máx.)	98.1	98.2	97.7	98	96.8	92.6	91.4	<98
% vacíos (N-Dis)	3.3	3.3	3.8	3.5	4.5	8.7	9.7	4.0
% VMA (N-Dis)	15.24	15.01	15.16	15.02	15.61	18.87	19.57	>14
%VFA (N-Dis)	78.09	77.9	74.97	76.54	71.2	53.67	50.2	65-75 (1)

(1) Esta especificación aplica para 10 millones de ejes equivalentes.

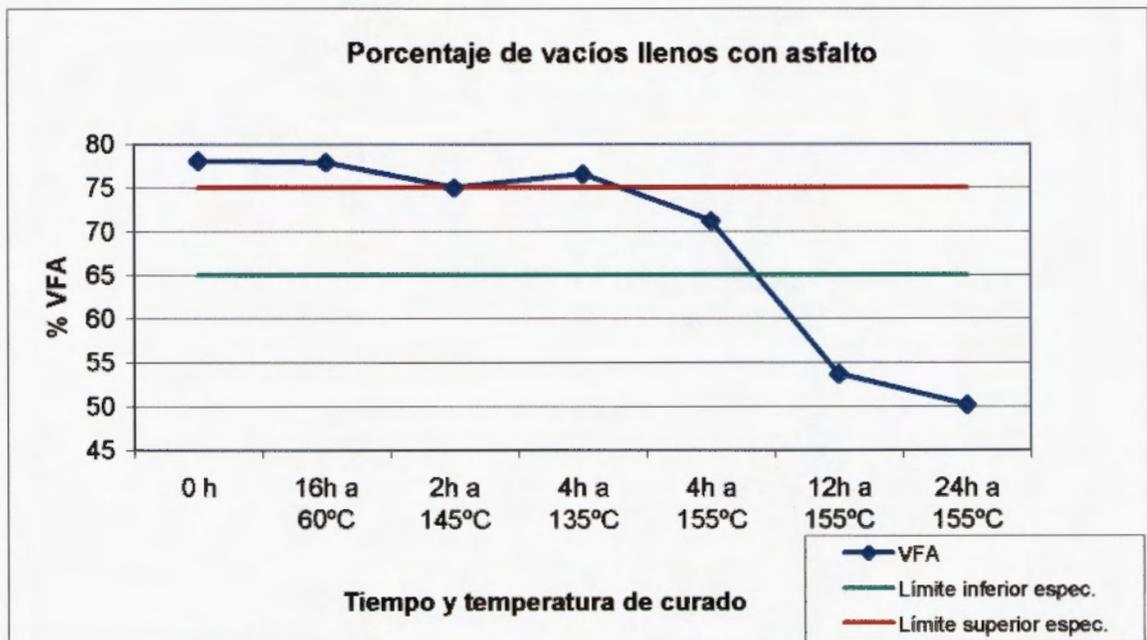
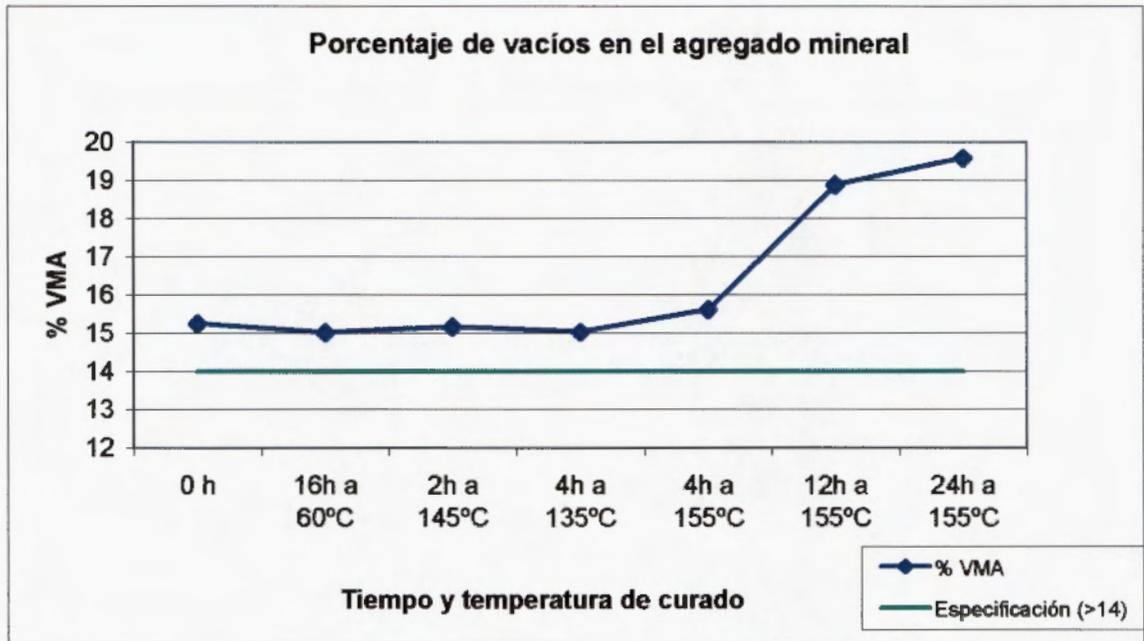
Aparecen sombreados los datos que se apartan de las especificaciones Superpave.

En el gráfico 16, se presentan las variaciones del porcentaje de compactación máximo, el porcentaje de vacíos, los vacíos en el agregado mineral y el porcentaje de vacíos llenos con asfalto, en función del tiempo de curado. En el gráfico 17, se presentan los resultados para las variaciones de la compactación de la mezcla en función del número de giros, para los distintos curados.

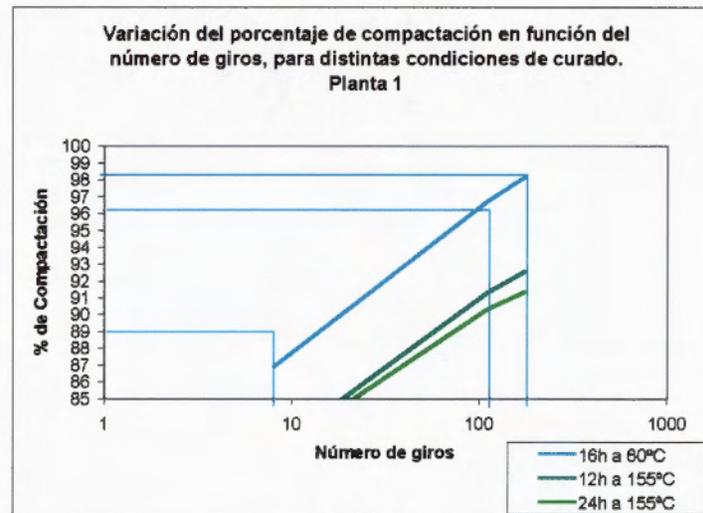
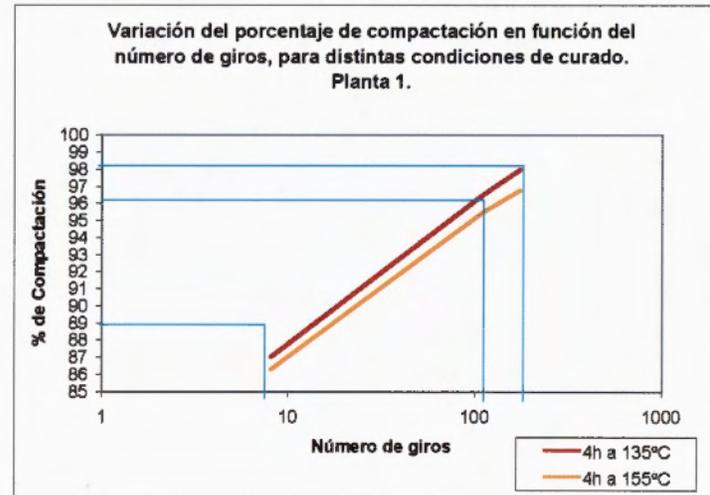
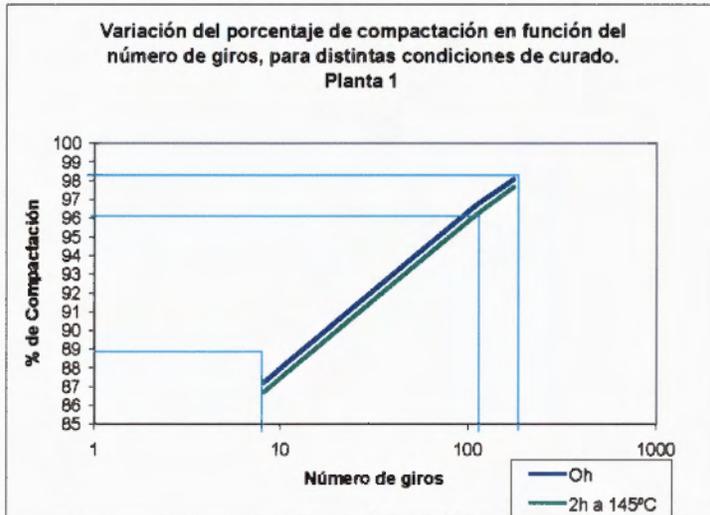
**Gráfico 16: Variación de las propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio, en función del tiempo de curado. Planta 1.**



Continuación Gráfico No. 16.



**Gráfico 17: Variación de la compactación en función del número de giros, para distintas condiciones de curado. Planta 1**



## 2.10. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LA PLANTA 2

### 2.10.1. GENERALIDADES

En la Tabla 22 se presenta la granulometría del diseño de mezcla vigente (con fecha 30 de noviembre de 1999) para los meses en que se realizó el estudio, el porcentaje de asfalto óptimo y las propiedades del agregado y del asfalto utilizados en la elaboración de los especímenes.

**Tabla 22: Granulometría del diseño de mezcla vigente, con fecha 30 de noviembre de 1999, y otras propiedades de los agregados y el asfalto para la planta 2.**

MALLA	% PASANDO
19 mm	100
9.5 mm	77
No.4	51
No.8	34
No.50	13
N0.200	7.5
<b>CONTENIDO DE ASFALTO</b>	
Contenido de asfalto (mezcla) (%)	6.18
Contenido de asfalto (agregado) (%)	6.59
<b>CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO</b>	
Gbs grueso	2.61
Gbs fino	2.59
Abs Grueso (%)	2.0
Abs fino (%)	2.7
<b>2.10.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO</b>	
Viscosidad a 60°C (Poises)	1750
Penetración (1/10 mm)	71

### 2.10.2. RESULTADOS OBTENIDOS

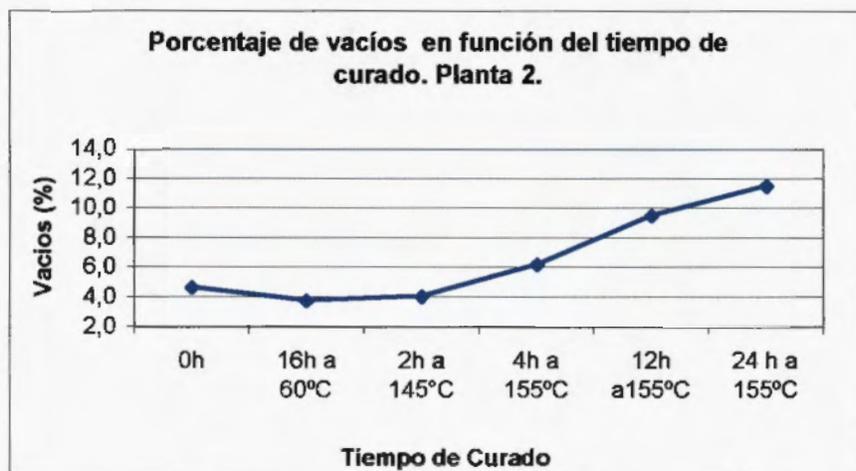
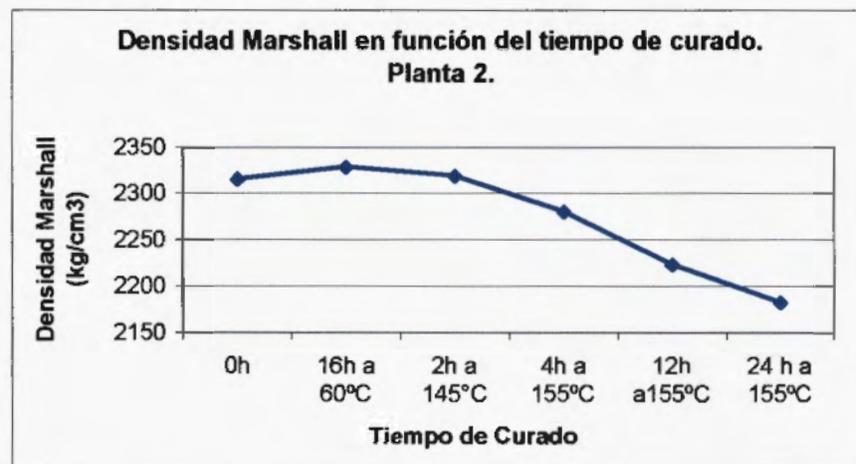
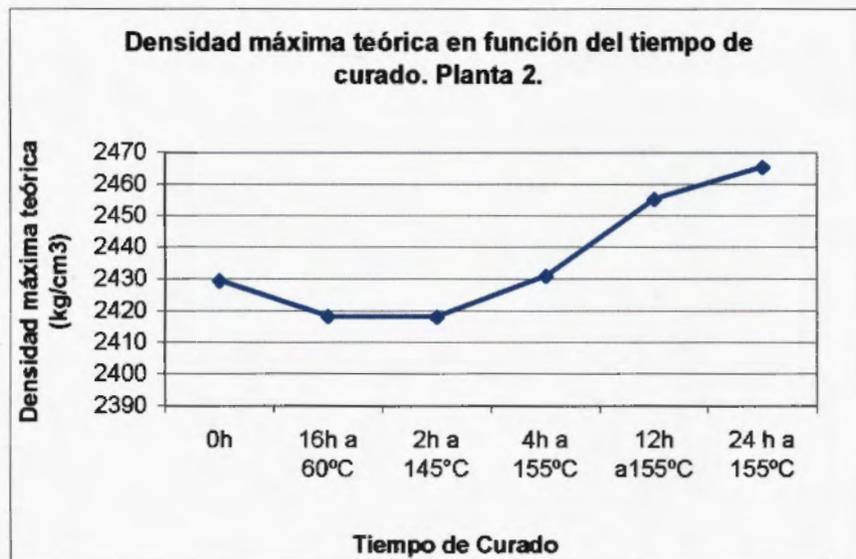
#### 2.10.2.1. Parámetros Marshall

En la Tabla 23 y en el Gráfico 18, se presentan los resultados obtenidos para los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio para los parámetros de estabilidad, flujo, densidad Marshall, densidad máxima teórica y vacíos en la mezcla.

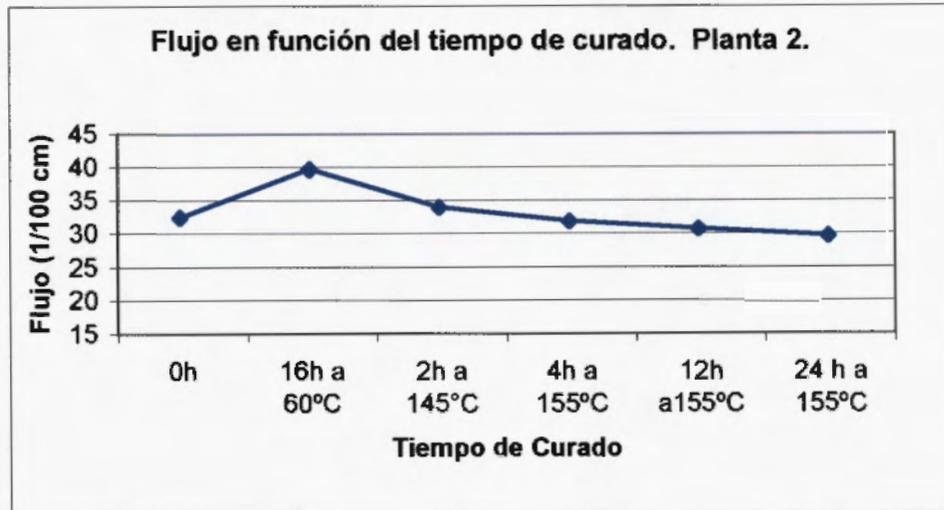
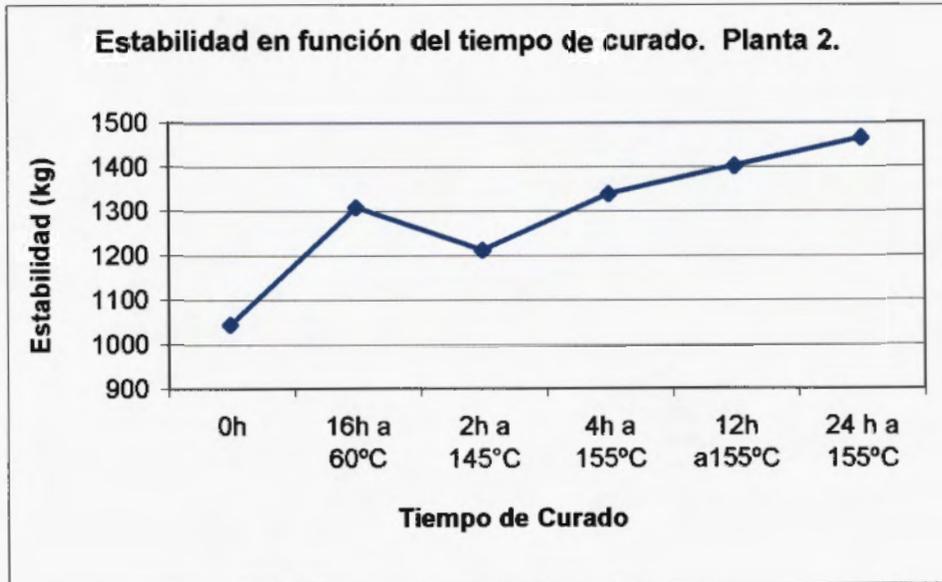
**Tabla 23: Resumen de los parámetros Marshall obtenidos de los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio. Planta 2.**

Ensayo	Tiempo de curado	Valores
Estabilidad	0h	1046
Flujo		33
Densidad Marshall		2316
Densidad máxima teórica		2430
Vacíos		4,7
Estabilidad	16h a 60°C	1310
Flujo		40
Densidad Marshall		2328
Densidad máxima teórica		2418
Vacíos		3,7
Estabilidad	2h a 145°C	1213
Flujo		34
Densidad Marshall		2319
Densidad máxima teórica		2418
Vacíos		4,0
Estabilidad	4h a 155°C	
Flujo		
Densidad Marshall		2280
Densidad máxima teórica		2431
Vacíos		6,2
Estabilidad	12h a 155°C	
Flujo		
Densidad Marshall		2223
Densidad máxima teórica		2455
Vacíos		9,5
Estabilidad	24 h a 155°C	1466
Flujo		30
Densidad Marshall		2182
Densidad máxima teórica		2465
Vacíos		11,5

**Gráfico 18: Variación de los parámetros Marshall en especímenes moldeados en laboratorio. Planta 2.**



Continuación Gráfico 18.



### **2.10.2.2. Parámetros volumétricos de la mezcla. Método Superpave**

Para obtener las propiedades volumétricas de la mezcla, se trabajó con especímenes moldeados en el compactador giratorio, siguiendo las especificaciones dictadas por Superpave.

Este análisis se hace para la granulometría y el porcentaje óptimo de asfalto del diseño de mezcla vigente (con fecha 30 de noviembre de 1999) para el período en el cual se realizó este estudio.

En la Tabla 24, se presentan los parámetros de:

- %Gmm (N-inicial), el cual corresponde al porcentaje de compactación inicial de la mezcla, que debe ser menor a 89%
- % Gmm (N-diseño), corresponde al porcentaje de compactación para el cual se debe diseñar la mezcla, cuyo valor debe ser del 96%
- %Gmm (N-máxima), corresponde a la compactación máxima que debe presentar un pavimento luego de su vida de servicio, cuyo valor debe ser menor a 98%.

Además se presentan los parámetros de vacíos de aire, el porcentaje de vacíos en el agregado mineral y el porcentaje de vacíos llenos con asfalto, todos estos calculados para el número de giros de diseño.

Cabe aclarar que según la norma ASHTO TP4: Método estándar para la preparación y determinación de la densidad de mezclas asfálticas en caliente en especímenes moldeados en el compactador giratorio, el tiempo de curado exigido por Superpave es de 4 horas a 135°C.

**Tabla 24: Propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio. Planta 2.**

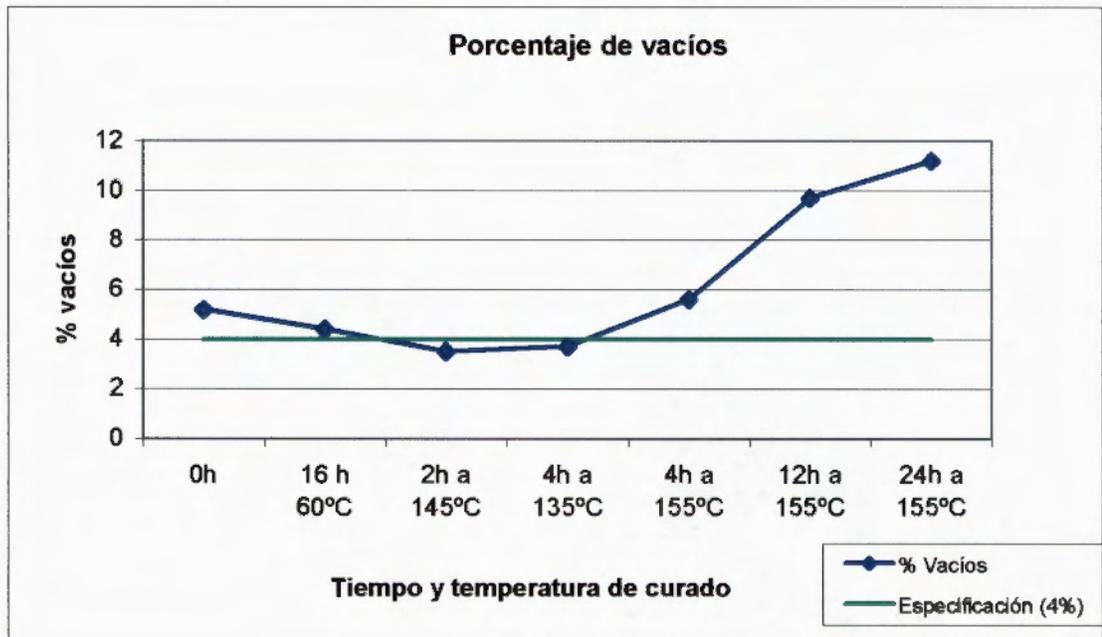
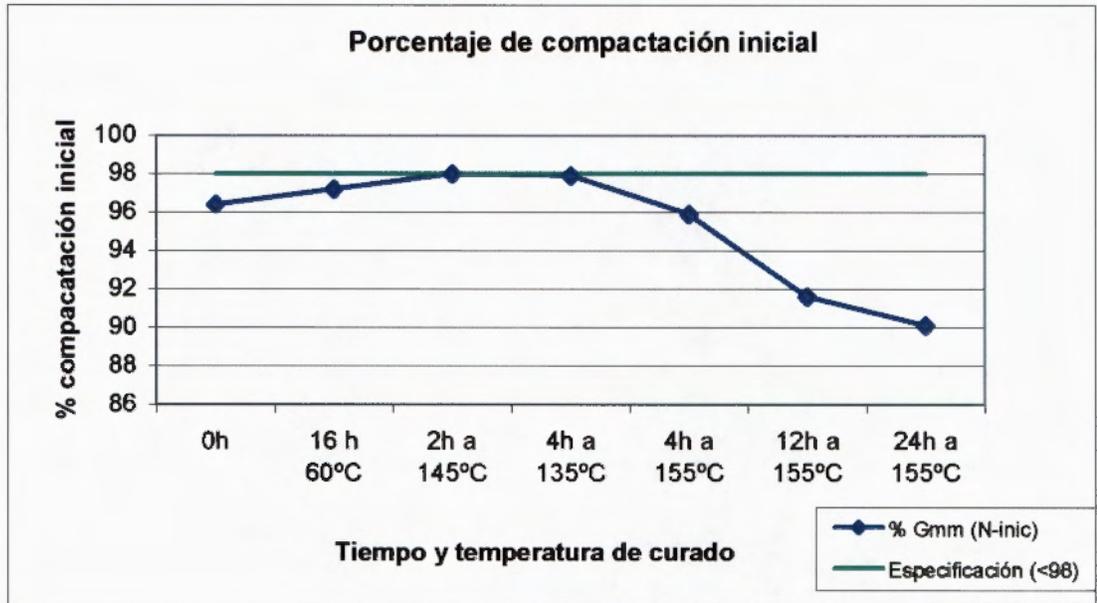
Parámetro	Tiempo de curado							Especificaciones
	0h	16 h a 60°C	2h a 145°C	4h a 135°C	4h a 155°C	12h a 155°C	24h a 155°C	
%Gmm (N-inicial)	84.5	85.1	86.3	86.1	84.2	81.2	79.7	<89
%Gmm (N-Diseño)	94.8	95.6	96.5	96.3	94.4	90.3	88.8	96
%Gmm (N-Máx.)	96.4	97.2	98.0	97.9	95.9	91.6	90.1	<98
% vacíos (N-Dis)	5.2	4.4	3.5	3.7	5.6	9.7	11.2	4.0
% VMA (N-Dis)	16.56	16.49	15.32	15.56	16.75	19.72	20.18	>14
%VFA (N-Dis)	68.64	73.05	77.13	76.48	66.79	50.95	44.64	65-75 (1)

(1) Esta especificación aplica para 10 millones de ejes equivalentes.

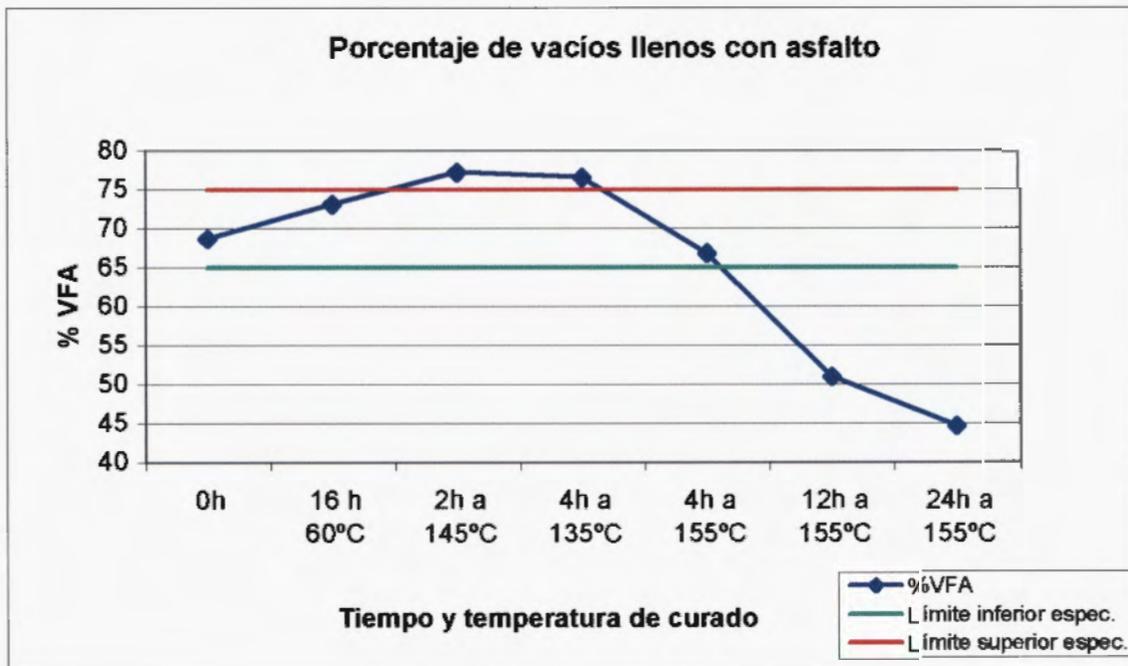
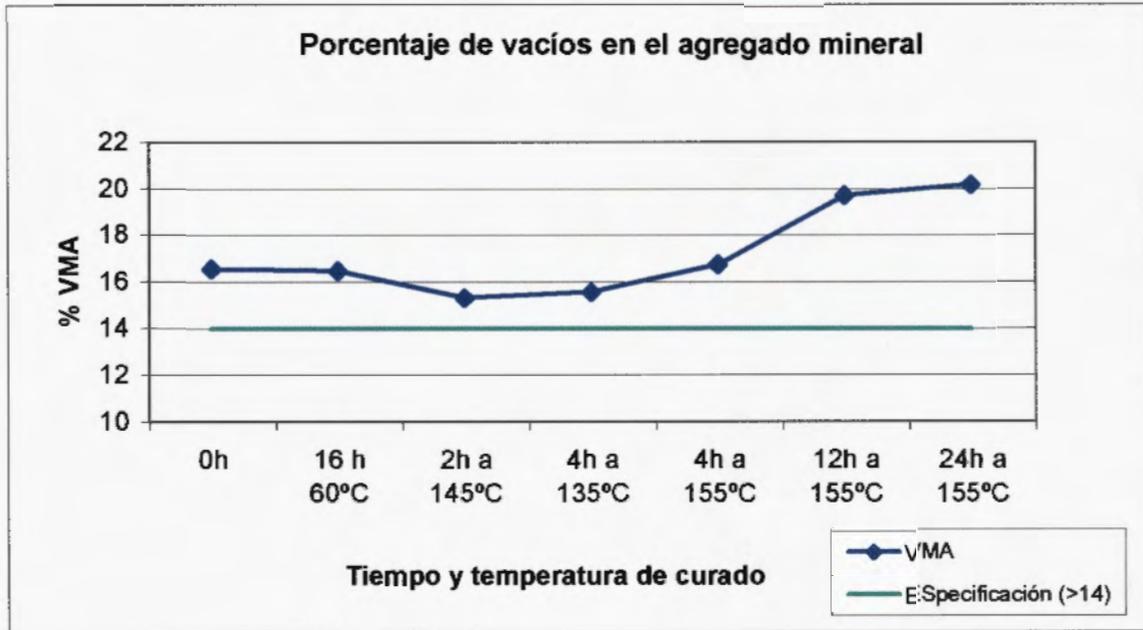
Aparecen sombreados los datos que se apartan de la especificación Superpave.

En el gráfico 19, se presentan las variaciones del porcentaje de compactación máximo, el porcentaje de vacíos, los vacíos en el agregado mineral y el porcentaje de vacíos llenos con asfalto, en función del tiempo de curado. En el gráfico 20 se presentan las variaciones en la compactación de la mezcla en función del número de giros, para distintas condiciones de curado.

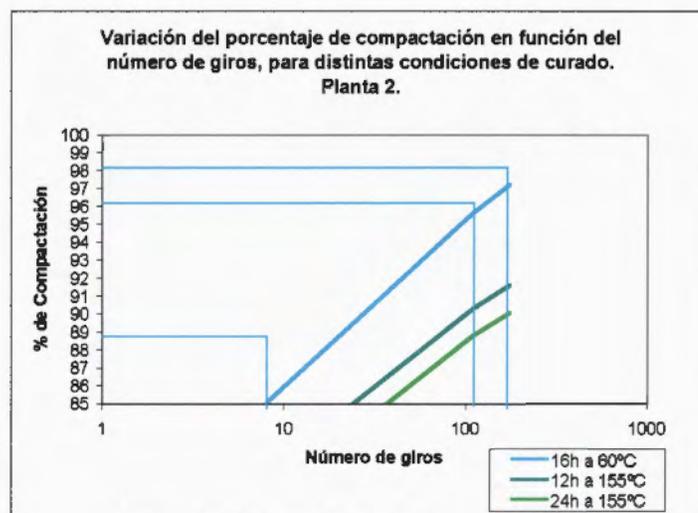
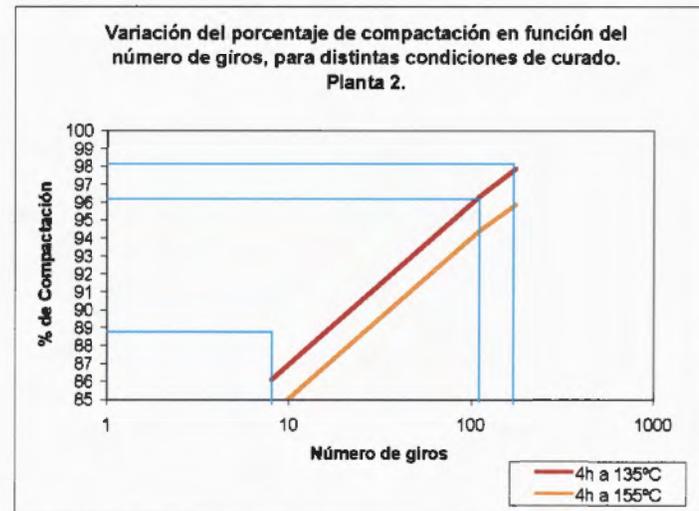
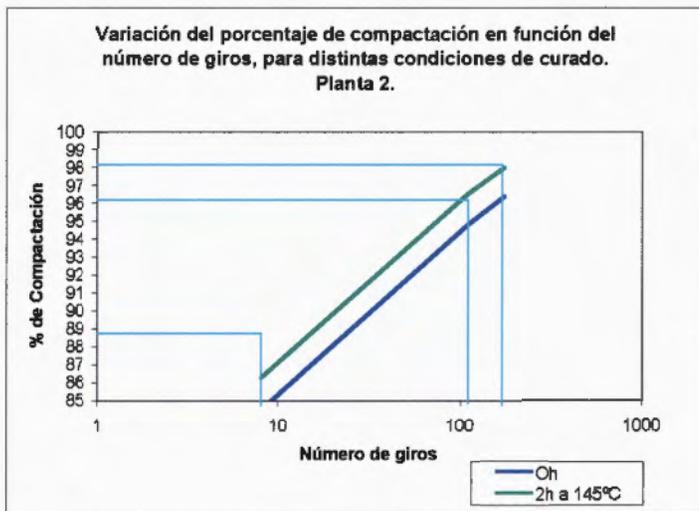
**Gráfico 19: Variación de las propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio, en función del tiempo de curado. Planta 2**



Continuación Gráfico 19.



**Gráfico 20: Variación de la compactación en función del número de giros, para distintas condiciones de curado. Planta 2**



## 2.11. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LA PLANTA 3

### 2.11.1. GENERALIDADES

En la Tabla 25 se presenta la granulometría del diseño de mezcla vigente (con fecha 22 de junio del 200) para los meses en los que se realizó el estudio, el porcentaje de asfalto óptimo y las propiedades del agregado y del asfalto utilizados en la elaboración de los especímenes.

**Tabla 25: Granulometría del diseño de mezcla vigente, con fecha 22 de junio del 2000, y otras propiedades de los agregados y el asfalto. Planta 3.**

MALLA	% PASANDO
19 mm	100
12.7 mm	94
9.5 mm	79
No.4	54
No.8	36
No.16	23
No.30	16
No.50	10
N0.200	5.2
<b>CONTENIDO DE ASFALTO</b>	
Contenido de asfalto (mezcla) (%)	6.49
Contenido de asfalto (agregado) (%)	6.94
<b>CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO</b>	
Gbs grueso	2.51
Gbs fino	2.52
Abs Grueso (%)	2.3
Abs fino (%)	2.7
<b>2.11.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO</b>	
Viscosidad a 60°C (Poisés)	1750
Penetración (1/10 mm)	71

## **2.11.2. RESULTADOS OBTENIDOS**

### **2.11.2.1. Parámetros Marshall**

En la Tabla 26 y en el Gráfico 21, se presentan los resultados obtenidos para los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio para los parámetros de estabilidad, flujo, densidad Marshall, densidad máxima teórica y vacíos en la mezcla.

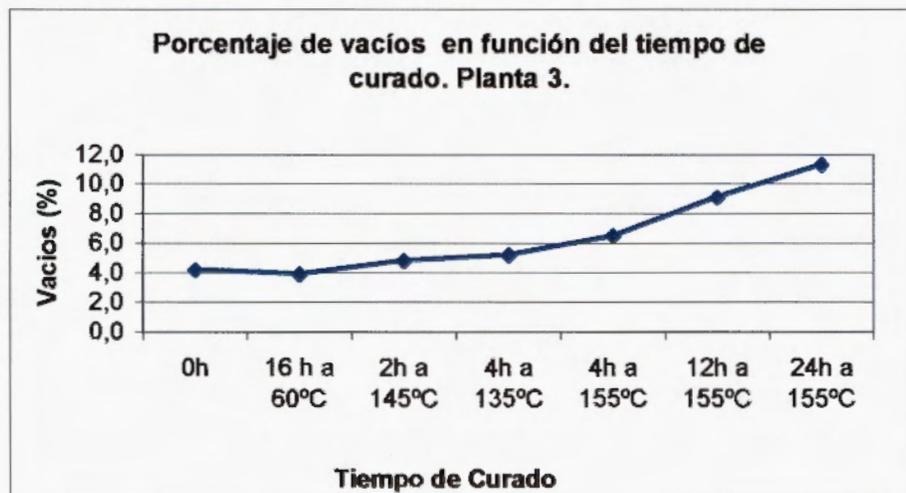
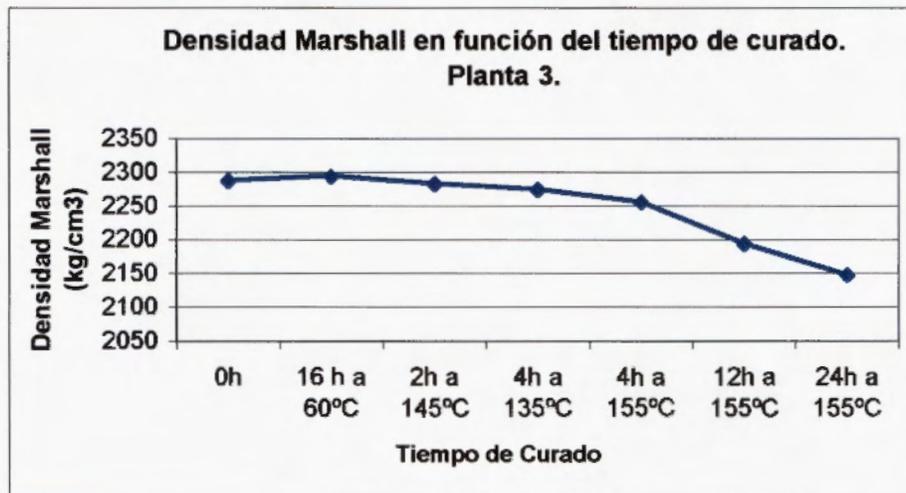
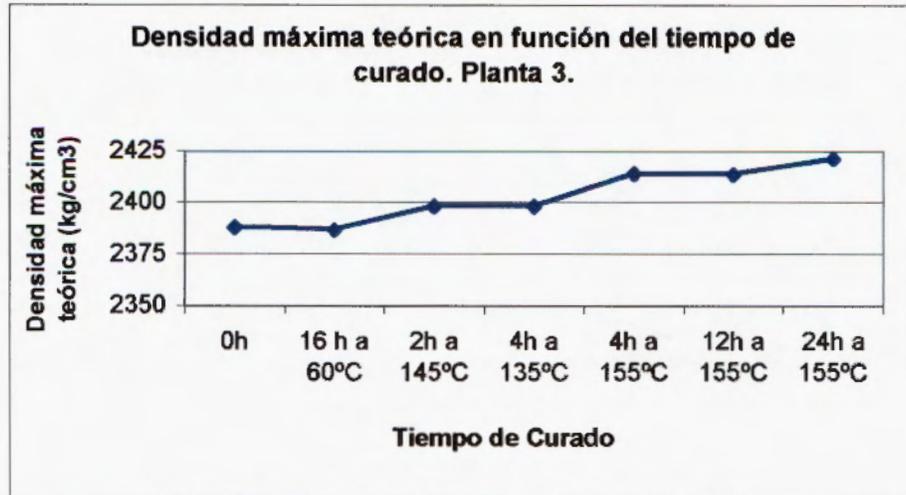
Los especímenes fueron sometidos a diferentes acondicionamientos de curado en el horno.

Posteriormente se hace el mismo análisis moldeando la mezcla con el compactador giratorio y aplicando los mismos métodos de curado que en el caso anterior.

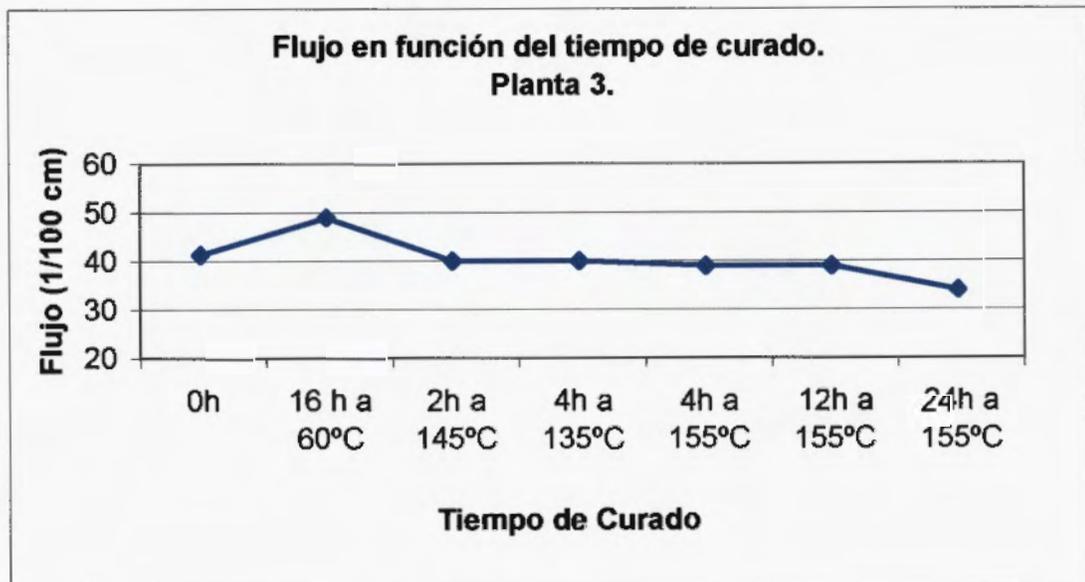
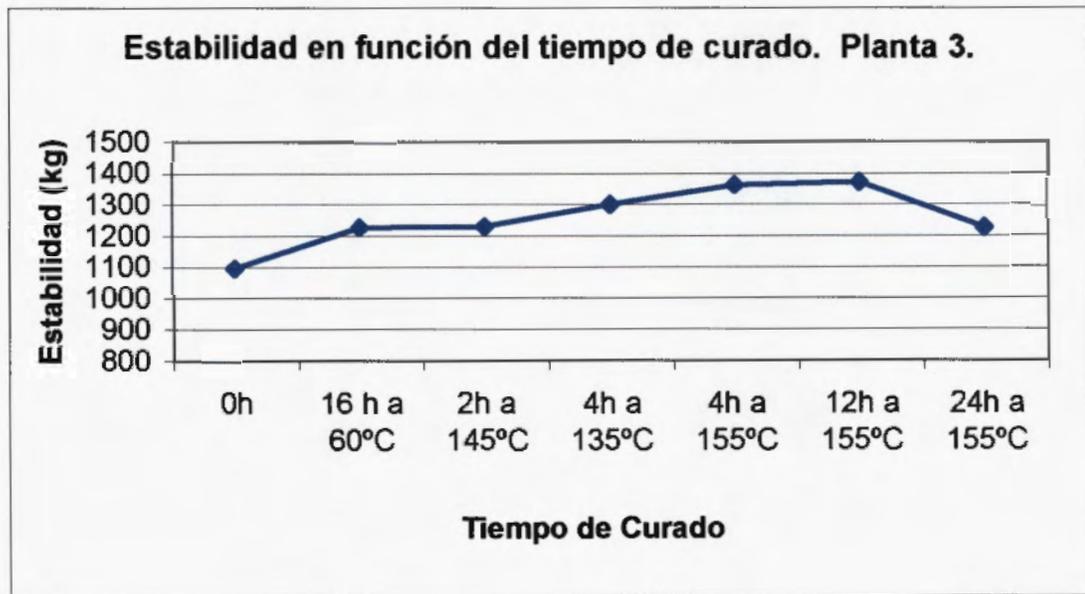
**Tabla 26: Resumen de los parámetros Marshall obtenidos de los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio. Planta 3.**

Ensayo	Tiempo de curado	Valores
Estabilidad	0h	1097
Flujo		41
Densidad Marshall		2288
Densidad máxima teórica		2388
Vacíos		4,2
Estabilidad	16 h a 60°C	1228
Flujo		49
Densidad Marshall		2294
Densidad máxima teórica		2387
Vacíos		3,9
Estabilidad	2h a 145°C	1231
Flujo		40
Densidad Marshall		2283
Densidad máxima teórica		2398
Vacíos		4,8
Estabilidad	4h a 135°C	1301
Flujo		40
Densidad Marshall		2275
Densidad máxima teórica		2398
Vacíos		5,2
Estabilidad	4h a 155°C	1363
Flujo		39
Densidad Marshall		2256
Densidad máxima teórica		2414
Vacíos		6,5
Estabilidad	12h a 155°C	1372
Flujo		39
Densidad Marshall		2194
Densidad máxima teórica		2414
Vacíos		9,1
Estabilidad	24h a 155°C	1227
Flujo		34
Densidad Marshall		2148
Densidad máxima teórica		2421
Vacíos		11,3

**Gráfico 21: Variación de los parámetros Marshall en especímenes moldeados en laboratorio. Planta 3.**



Continuación Gráfico 21.



### **2.11.2.2. Parámetros volumétricos de la mezcla. Método superpave**

Para obtener las propiedades volumétricas de la mezcla, se trabajó con especímenes moldeados en el compactador giratorio, siguiendo las especificaciones dictadas por Superpave.

Este análisis se hace para la granulometría y el porcentaje óptimo de asfalto del diseño de mezcla vigente (con fecha 22 de junio del 2000) para el período en el cual se realizó este estudio.

En la Tabla 27, se presentan los parámetros de:

%Gmm (N-inicial), el cual corresponde al porcentaje de compactación inicial de la mezcla, que debe ser menor a 89%

% Gmm (N-diseño), corresponde al porcentaje de compactación para el cual se debe diseñar la mezcla, cuyo valor debe ser del 96%

%Gmm (N-máxima), corresponde a la compactación máxima que debe presentar un pavimento luego de su vida de servicio, cuyo valor debe ser menor a 98%.

Además se presentan los parámetros de vacíos de aire, el porcentaje de vacíos en el agregado mineral y el porcentaje de vacíos llenos con asfalto, todos estos calculados para el número de giros de diseño.

Cabe aclarar que según la norma ASHTO TP4: Método estándar para la preparación y determinación de la densidad de mezclas asfálticas en caliente en especímenes moldeados en el compactador giratorio, el tiempo de curado exigido por Superpave es de 4 horas a 135°C.

**Tabla 27: Propiedades volumétricas de la mezcla compactada en el compactador giratorio. Planta 3.**

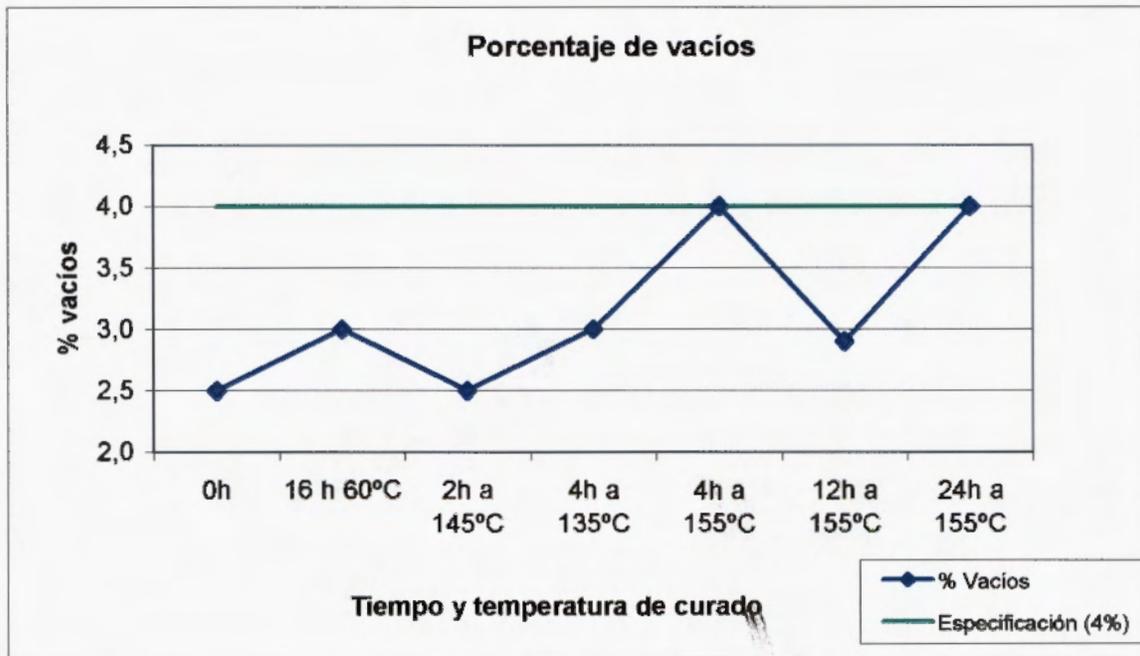
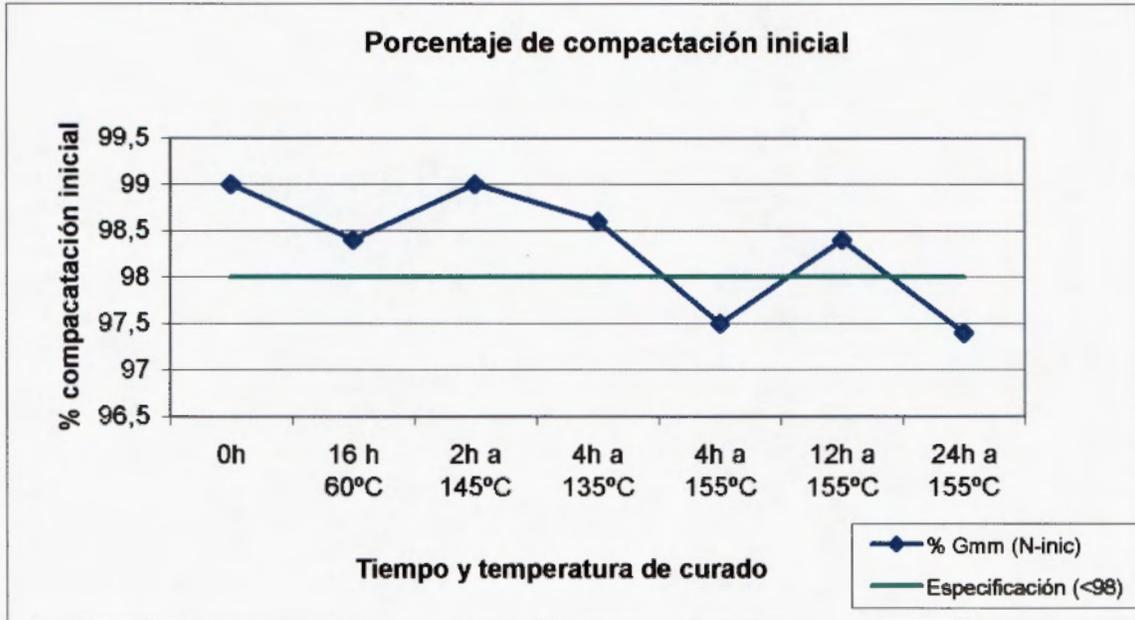
Parámetro	Tiempo de curado							Especificaciones
	0h	16 h a 60°C	2h a 145°C	4h a 135°C	4h a 155°C	12h a 155°C	24h a 155°C	
%Gmm (N-inicial)	87.1	87.7	87.4	86.8	86.1	86.4	87.9	<89
%Gmm (N-Diseño)	97.5	97.0	97.5	97.0	96.0	96.0	97.1	96
%Gmm (N-Máx.)	99.0	98.4	99.0	98.6	97.5	97.4	98.4	<98
% vacíos (N-Dis)	2.5	3.0	2.5	3.0	4.0	4.0	2.9	4.0
% VMA (N-Dis)	13.28	12.59	13.24	13.17	13.59	13.3	12.48	>14
%VFA (N-Dis)	81.12	75.93	81.39	77.54	70.68	69.81	76.68	65-75 (1)

(1) Esta especificación aplica para 10 millones de ejes equivalentes

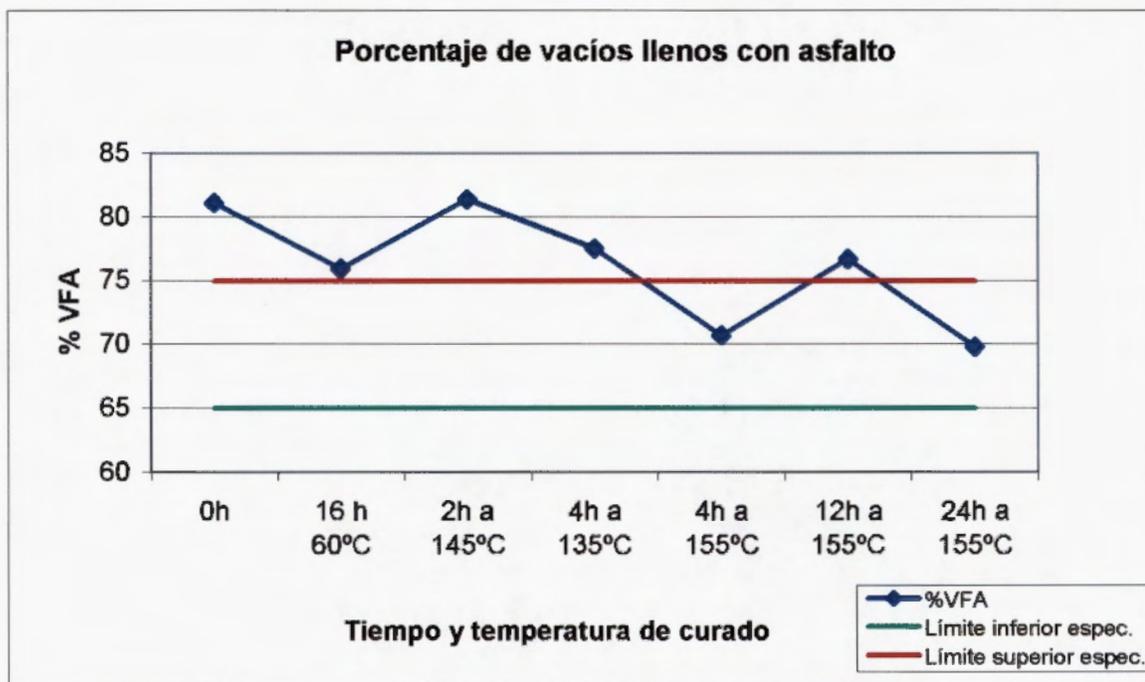
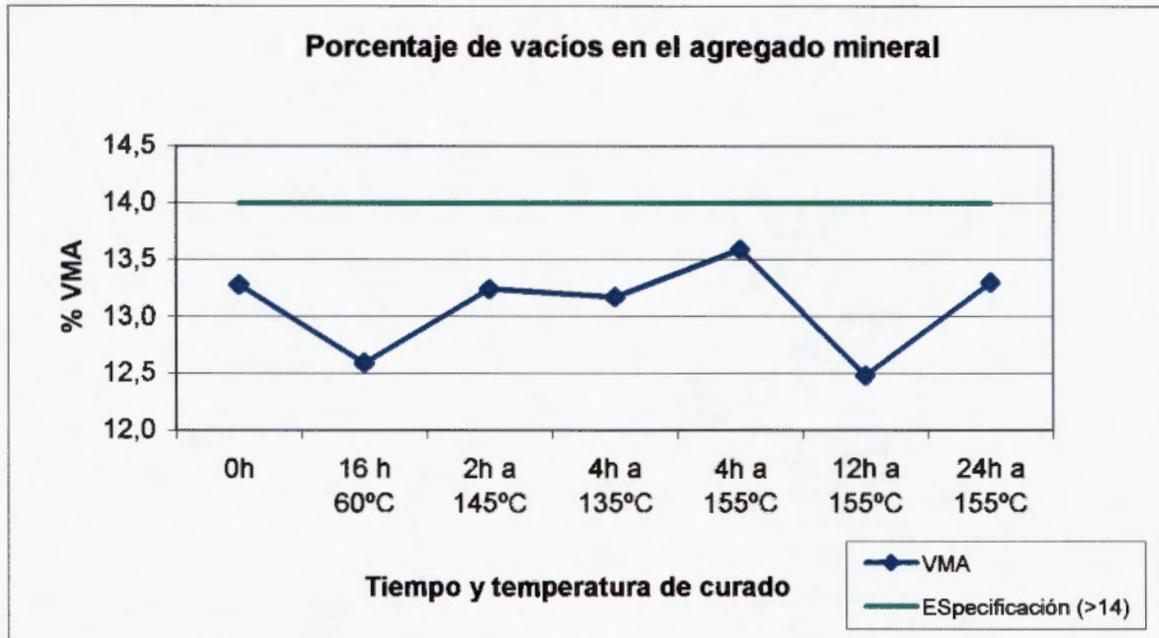
Aparecen sombreados los datos que se apartan de la especificación Superpave.

En el gráfico 22, se presentan las variaciones del porcentaje de compactación máximo, el porcentaje de vacíos, los vacíos en el agregado mineral y el porcentaje de vacíos llenos con asfalto, en función del tiempo de curado. En el gráfico 23, se presentan las variaciones en la compactación de la mezcla en función del número de giros, para distintas condiciones de curado.

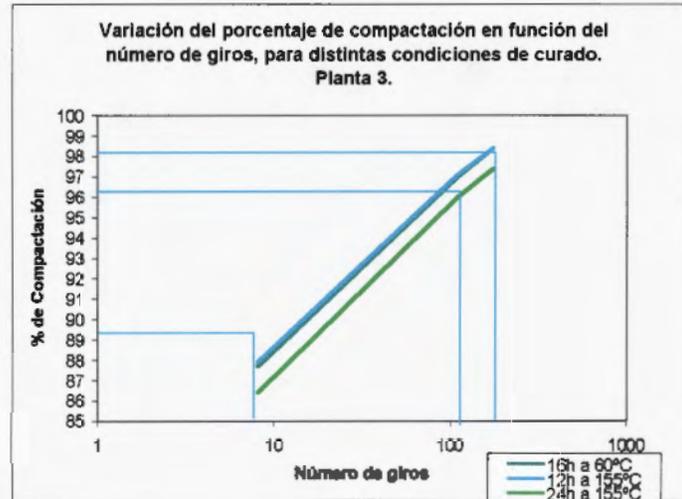
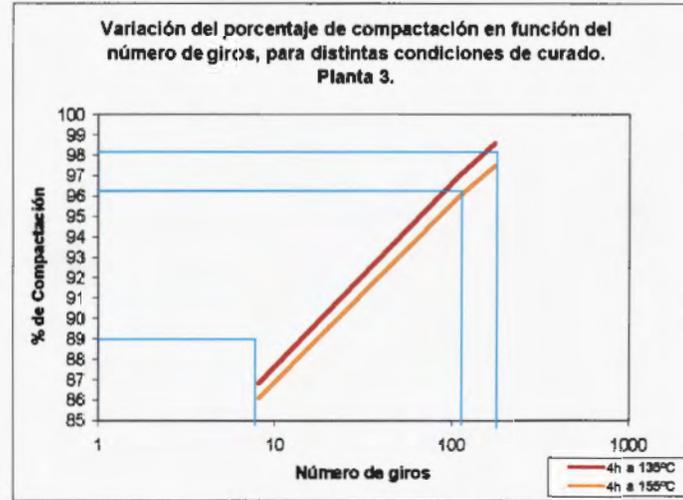
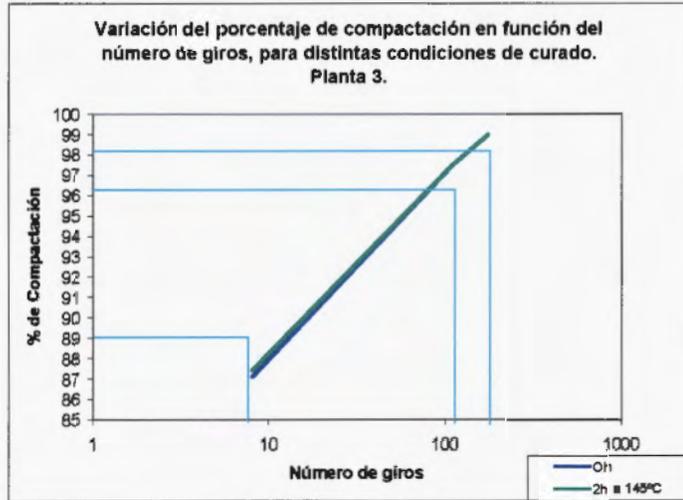
**Gráfico 22: Variación de las propiedades volumétricas de la mezcla moldeada en el compactador giratorio, en función del tiempo de curado. Planta 3**



Continuación Gráfico 22:

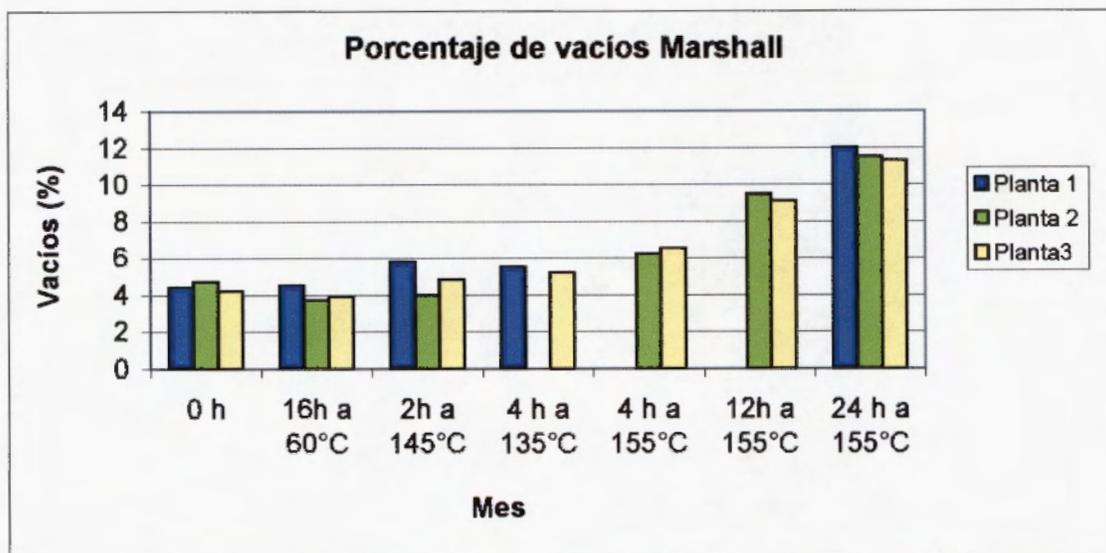
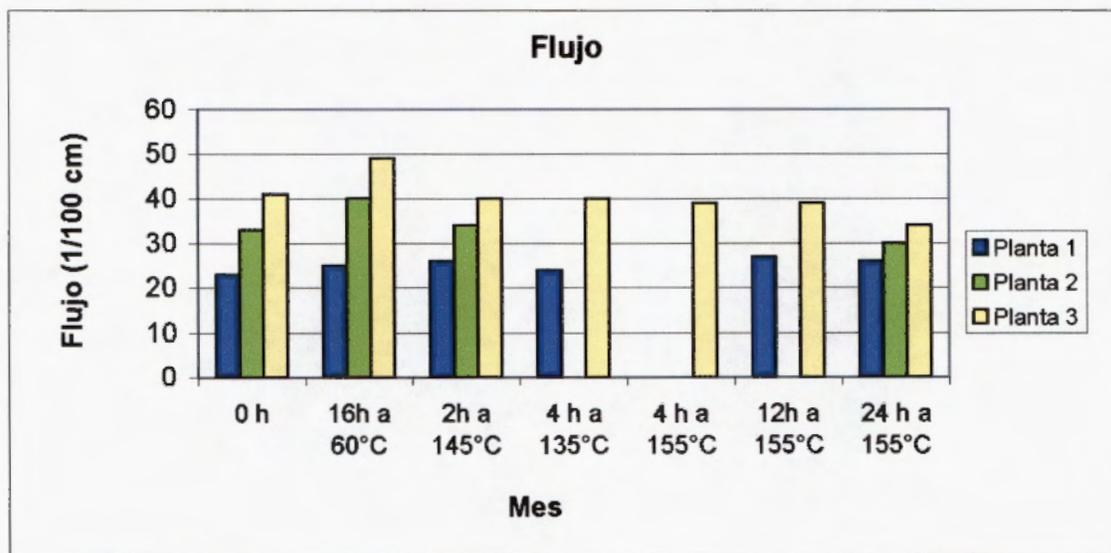


**Gráfico 23: Variación de la compactación en función del número de giros, para distintas condiciones de curado. Planta 3.**

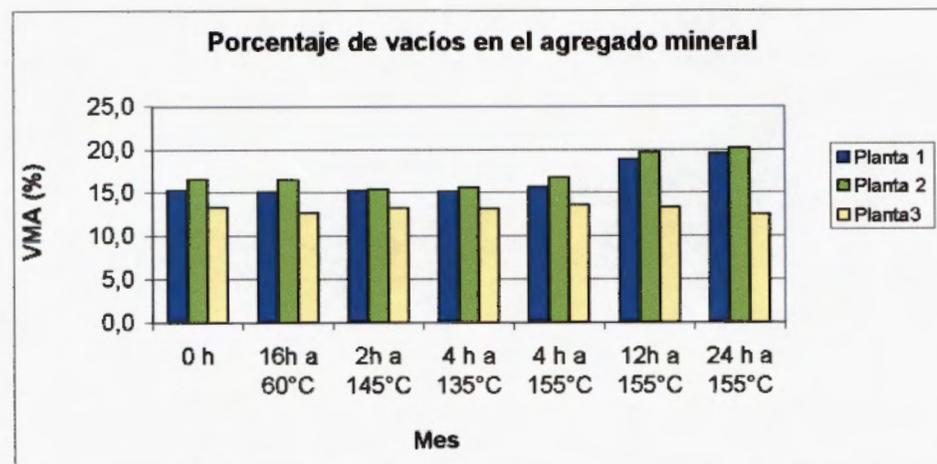
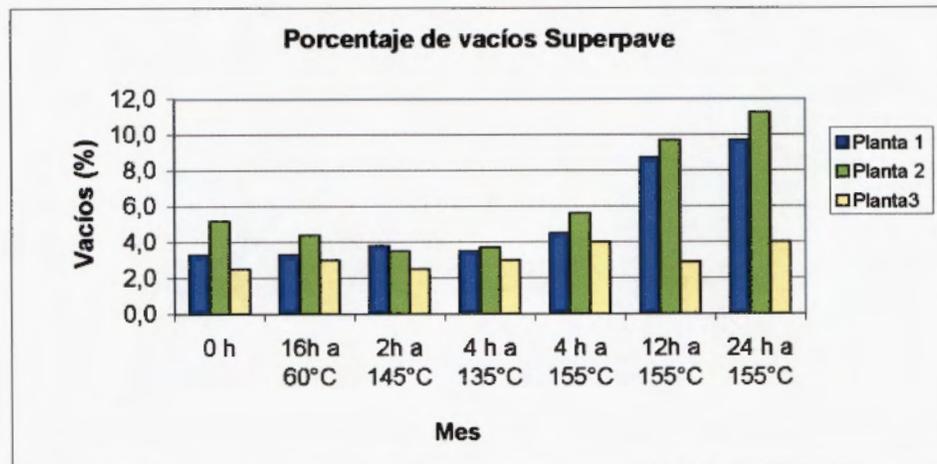
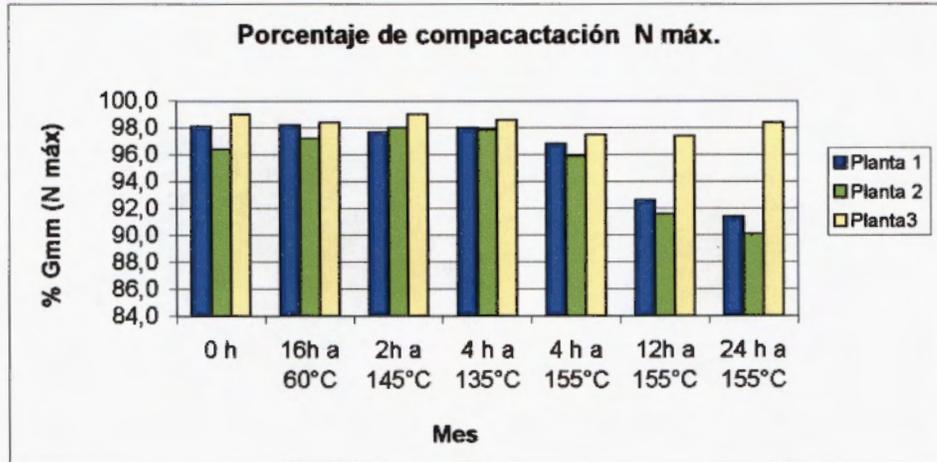


## 2.12. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE PLANTAS

Gráfico 24: Comparación flujo y vacíos Marshall en los diferentes acondicionamientos.



**Gráfico 25: Comparación de parámetros volumétricos de la mezcla moldeada en el compactador giratorio.**



## 2.13. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 2.13.1. PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS

Los parámetros volumétricos se analizaron variando el tiempo y la temperatura del curado, con el fin de analizar cómo varían estos parámetros debido a cambios en la absorción y endurecimiento del asfalto. Los resultados fueron los siguientes:

#### Planta 1 y Planta 2

Ambas plantas presentan un comportamiento similar en todos los parámetros volumétricos obtenidos. Para las seis propiedades volumétricas, las mayores diferencias se presentaron para las condiciones más severas de curado, es decir para 12 y 24 horas a 155°C. Para cada parámetro se tiene lo siguiente:

- **Compactación inicial (% Gmm N-inicial):** Se presenta un decremento en el porcentaje de compactación inicial en los curados más severos. Este decremento registrado puede atribuirse al hecho de que al estar la mezcla expuesta a altas temperaturas y durante largos períodos de tiempo, la absorción aumenta y el asfalto se endurece, produciéndose una disminución en el asfalto efectivo, lo que conlleva a un aumento en el porcentaje de vacíos en la mezcla, el cual determinará una menor compactación inicial.
- **Compactación de diseño (% Gmm N-diseño):** Se presenta un decremento en el porcentaje de compactación de diseño en los curados más severos. Al igual que en el caso anterior, este decremento registrado puede atribuirse al hecho de que al estar la mezcla expuesta a altas temperaturas y durante largos períodos de tiempo, la mezcla se rigidiza, siendo más difícil su compactación.
- **% Compactación máximo (%Gmm N-max):** Se presenta un decremento en el porcentaje de compactación máxima para los curados más severos. Este decremento puede deberse igual que en el caso anterior a un aumento en la rigidez de la mezcla.

- **Vacíos en la mezcla (n-diseño):** Este parámetro muestra un aumento en sus valores para los tiempos y temperaturas de curado más altos. Este aumento se relaciona directamente con la disminución del asfalto efectivo, el cual disminuye a causa del aumento en la absorción de asfalto por parte del agregado. El ligante más endurecido también aporta en este caso.
  
- **Vacíos en el agregado mineral (VMA n-diseño):** Este parámetro muestra un aumento en sus valores para los curados a 155°C durante 12 y 24 horas. Este aumento se relaciona directamente con el aumento en los vacíos en la mezcla, ya que el porcentaje de vacíos en el agregado mineral es el contenido de cavidades llenas con aire y con ligante asfáltico efectivo.
  
- **Vacíos llenos con asfalto (n-diseño):** Se presenta un decremento en los vacíos llenos con asfalto cuando la mezcla ha sido curada a altas temperaturas y durante largos períodos de tiempo. Este decremento se debe a una disminución del asfalto efectivo, lo que implica una menor cantidad de asfalto disponible para llenar las cavidades vacías entre agregado.

### **Planta 3**

En la planta 3, al variar las condiciones de curado, no se presentan grandes diferencias en los valores de los parámetros volumétricos. Por ejemplo, para el porcentaje de compactación (N inicial), los valores obtenidos para los siete distintos tipos de curados varían entre 86.1 y 87.7%; en el caso del porcentaje de compactación inicial, el rango de variación oscila entre 96.0 y 97.5 %; el porcentaje de compactación (N máximo) varía entre 97.4 y 99.0%; el porcentaje de vacíos oscila entre 2.5 y 4.0%, mientras el porcentaje de vacíos en el agregado mineral y el porcentaje de vacíos llenos con asfalto varían entre 12.48 y 13.59% y 69.8 y 83.39% respectivamente. Esta es la planta que presentó mayor cantidad de incumplimientos al contrastar la mezcla con los parámetros volumétricos del método Superpave Nivel 1.

#### **2.14. FASE III-A**

En la Fase 3-A de este estudio se mantuvieron las mismas condiciones de tiempo y temperatura de curado. A diferencia de la fase 2, en la fase 3-A se escogió una granulometría patrón con la cual se trabajó.

Para realizar el diseño de mezcla, se utilizó la metodología Superpave, mediante la cual se seleccionó de entre tres granulometrías la granulometría óptima, para luego, a partir de esta, obtener el porcentaje de asfalto óptimo por el método Superpave. Con este diseño se procedió a realizar especímenes de prueba Marshall, para determinar la estabilidad y el flujo y especímenes de prueba Superpave, para determinar las propiedades volumétricas de la mezcla.

## 2.15. GRANULOMETRÍA PATRÓN

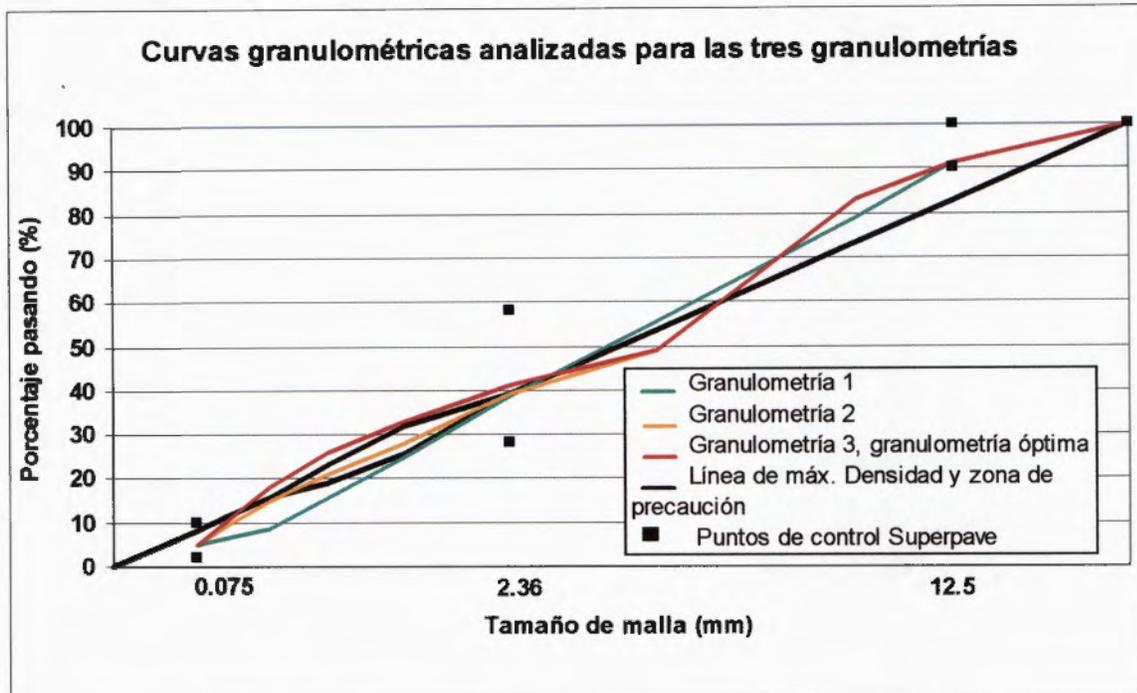
Las granulometrías empleadas y algunas propiedades del agregado y del asfalto utilizado, se muestran en la Tabla 28 y en el gráfico 18.

**Tabla 28: Granulometrías utilizadas y porcentaje de asfalto óptimo.**

MALLA	% PASANDO		
	#1	#2	#3 (1)
19 mm	100	100	100
12.5 mm	91.4	91.4	91.4
9.5 mm	78.9	83	83
No.4	55.6	49	49
No.8	38.7	39	41
No.16	24.8	28	33
No.30	15.5	21	26
No.50	8.7	15	18
No.100	6.5	9.5	10.5
N0.200	5	5	5
<b>2.15.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO</b>			
Gbs grueso	2.614	2.620	2.615
Gbs fino	2.456	2.529	2.667
%Abs Grueso	2.123	2.020	2.121
%Abs fino	2.332	1.502	1.854
<b>CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO</b>			
Viscosidad a 60°C (Poises)	1750	1750	1750
Penetración (1/10 mm)	71	71	71

(1) La granulometría #3 fue la seleccionada como la granulometría óptima.

**Gráfico 26: Curvas granulométricas analizadas. Fase III-A**



El porcentaje de asfalto óptimo obtenido para cada granulometría se muestra en la Tabla 31.

**Tabla 29: Porcentajes de asfalto óptimo para cada granulometría.**

CONTENIDO DE ASFALTO (%)	GRANULOMETRÍA #1	GRANULOMETRÍA #2	GRANULOMETRÍA #3
Por peso total de mezcla	(*)	5.80	6.00
Por peso total de agregado	(*)	6.20	6.40

(\*) No se pudo determinar el contenido de asfalto óptimo ya que los puntos utilizados para el diseño no cumplen con el 4 % de vacíos requeridos.

## **2.16. RESULTADOS OBTENIDOS**

### **2.16.1. PARÁMETROS MARSHALL**

En la Tabla 30 y en el Gráfico 25, se presentan los resultados obtenidos para los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio para los parámetros de estabilidad, flujo, densidad Marshall, densidad máxima teórica y vacíos en la mezcla.

Es importante tener presente que en este caso se seleccionó la granulometría por el método Superpave, y este mismo procedimiento se utilizó para determinar el porcentaje de asfalto.

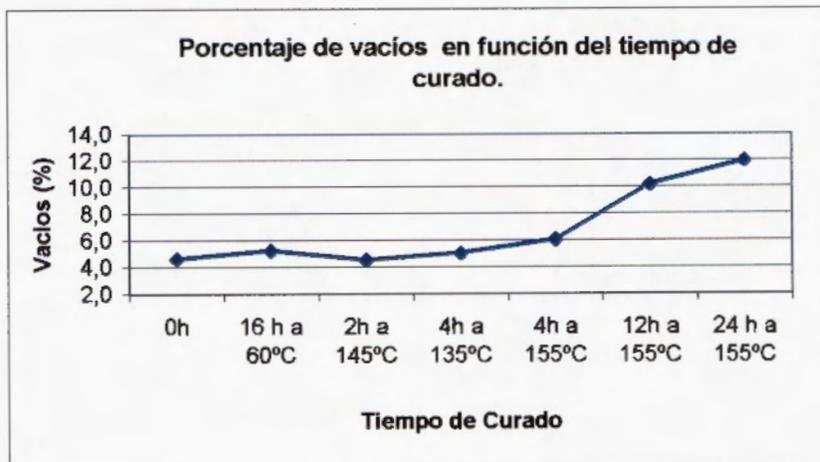
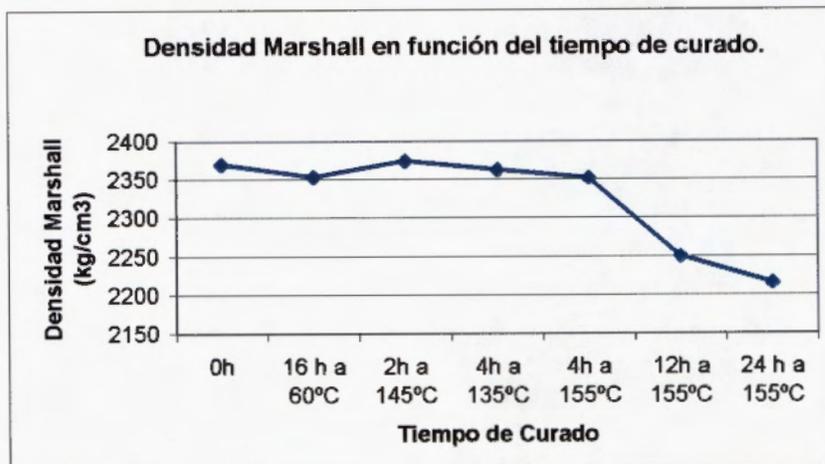
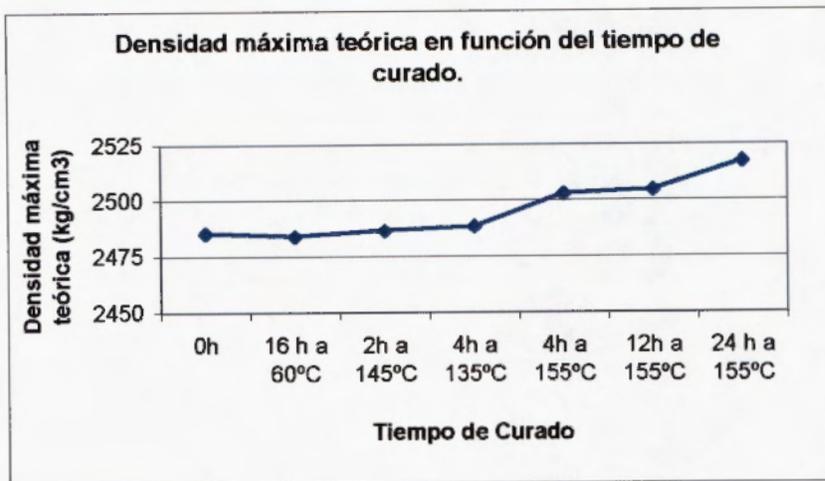
En este caso, la mejor granulometría pasa por la parte superior de la zona de precaución (graduación fina).

**Tabla 30: Resumen de los parámetros Marshall obtenidos de los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio con el agregado patrón (1).**

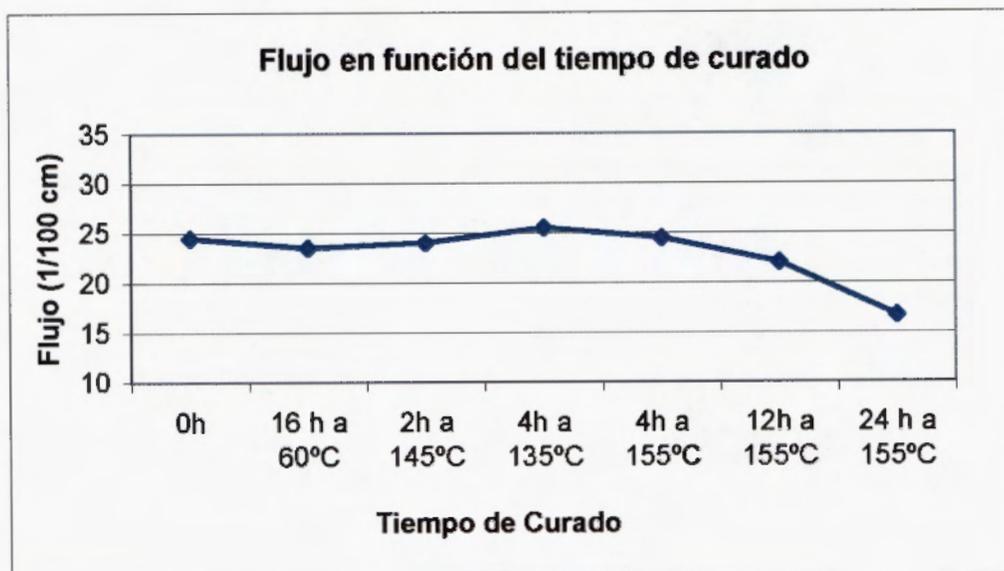
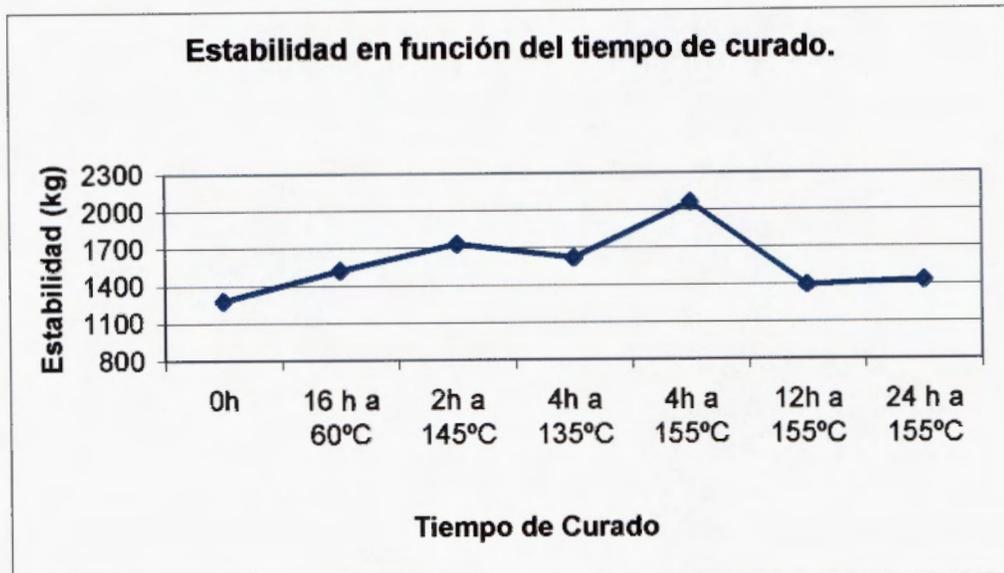
<b>Ensayo</b>	<b>Tiempo de curado</b>	<b>Valores</b>
Estabilidad	0h	1281
Flujo		25
Densidad Marshall		2370
Densidad máxima teórica		2486
Vacíos		4,7
Estabilidad	16 h a 60°C	1524
Flujo		24
Densidad Marshall		2354
Densidad máxima teórica		2484
Vacíos		5,3
Estabilidad	2h a 145°C	1735
Flujo		24
Densidad Marshall		2374
Densidad máxima teórica		2487
Vacíos		4,6
Estabilidad	4h a 135°C	1620
Flujo		26
Densidad Marshall		2363
Densidad máxima teórica		2489
Vacíos		5,1
Estabilidad	4h a 155°C	2064
Flujo		25
Densidad Marshall		2352
Densidad máxima teórica		2503
Vacíos		6,1
Estabilidad	12h a 155°C	1396
Flujo		22
Densidad Marshall		2250
Densidad máxima teórica		2505
Vacíos		10,2
Estabilidad	24 h a 155°C	1430
Flujo		17
Densidad Marshall		2216
Densidad máxima teórica		2517
Vacíos		12,0

(1) Mezclas elaboradas con el % de asfalto del diseño de mezcla Superpave.

**Gráfico 27: Variación de los parámetros Marshall en especímenes moldeados en laboratorio.**



Continuación Gráfico 25



## 2.17. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 2.17.1. PARÁMETROS MARSHALL

- **Estabilidad:** Se puede observar como no existe una diferencia muy marcada en los valores de estabilidad obtenidos con mezclas que fueron curadas durante 2 horas a 145°C y las que fueron curadas durante 4 horas a 135°C. Para el curado de 4 horas a 155°C, se registra un aumento considerable en el valor de la estabilidad.
  
- **Flujo:** A partir del punto que representa el curado de 4 horas a 135°C, la tendencia mostrada por este parámetro es a disminuir. Los valores obtenidos de flujo oscilan entre 17 y 26 (1/100 cm).
  
- **Densidad máxima teórica:** Se observa una tendencia que a partir del punto de 4 horas a 135°C, la densidad máxima teórica aumenta. Para las condiciones de este estudio, no se observan diferencias muy marcadas entre el efecto de los curados de 16 horas a 60°C, 2 horas a 145°C y 4 horas a 135°C.
  
- **Densidad Marshall:** La tendencia mostrada por este parámetro, a medida que el tipo de curado es más severo, es a disminuir. Esta disminución se hace evidente a partir del curado de 4 horas a 135°C. Para las características de este estudio, los curados de 16 horas a 60°C, 2 horas a 145°C y 4 horas a 135°C, producen un efecto similar en la densidad Marshall.
  
- **Vacíos:** A medida que la mezcla se rigidiza, los vacíos comienzan a aumentar, tendencia que se observa a partir de la condición de curado de 4 horas a 135°C. No se presentan diferencias entre los curados de 16 horas a 60°C, 2 horas a 145°C y 4 horas a 135°C por lo que para las condiciones del estudio, se puede decir que estos tipos de curados son similares.

## **2.18. FASE III-B**

En esta fase se trabajó con agregado de la planta 3. Para realizar el diseño de mezcla, se utilizó la metodología Superpave, mediante la cual se seleccionó de entre tres granulometrías la granulometría óptima, para luego, a partir de esta granulometría obtener el porcentaje óptimo de asfalto.

Una vez seleccionada la granulometría patrón y obtenido el porcentaje de asfalto óptimo, se realizaron especímenes de prueba para obtener los parámetros Marshall de estabilidad, flujo, densidad, densidad máxima teórica y vacíos.

El factor experimental con el que se trabajó fue el tiempo y temperatura de curado. Para analizar este factor, se puso la mezcla sin compactar al horno por el tiempo y a la temperatura requerida para cada caso.

En este caso, la granulometría óptima pasa por la zona de precaución de Superpave.

## 2.19. GRANULOMETRÍAS ANALIZADAS

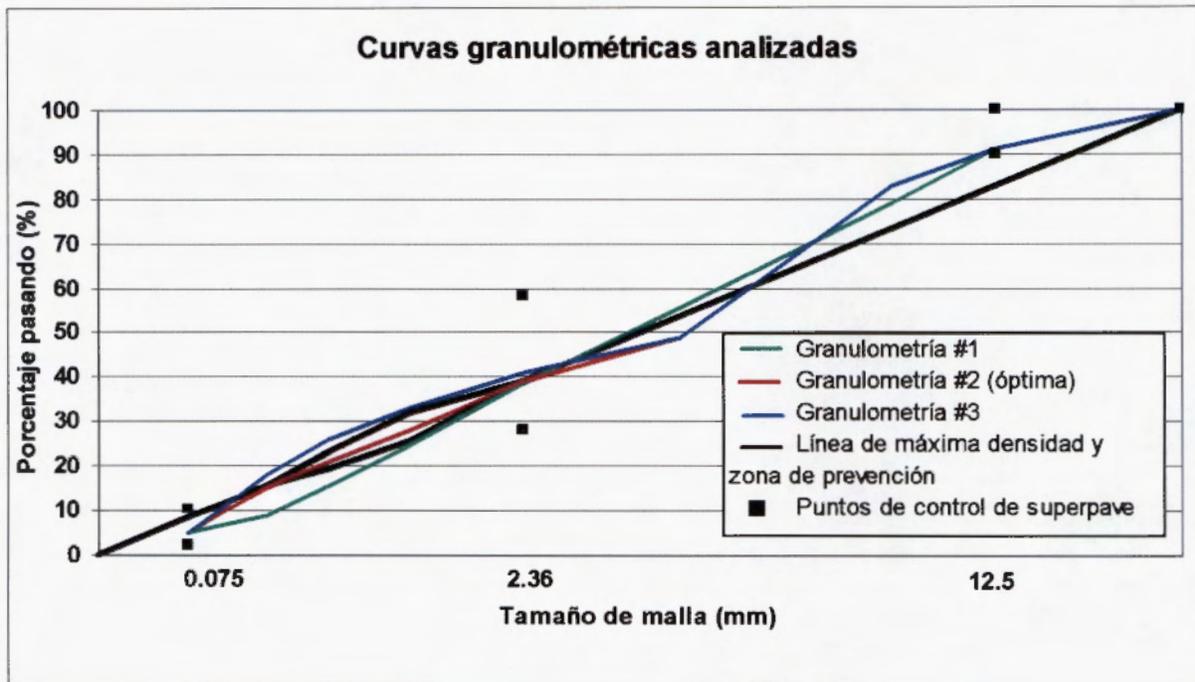
Las tres granulometrías analizadas, así como algunas propiedades del agregado y del asfalto utilizado, se muestran en la Tabla 31. En el Gráfico 26 se muestran las tres granulometrías analizadas.

**Tabla 31: Granulometrías analizadas**

MALLA	% PASANDO		
	#1	#2 (1)	#3
19 mm	100	100	100
12.5 mm	91.4	91.4	91.4
9.5 mm	79	83	83
No.4	56	49	49
No.8	39	39	41
No.16	25	28	33
No.30	16	21	26
No.50	9	15	18
No.100	6.5	9.5	10.5
No.200	5	5	5
<b>CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO</b>			
Gbs Fino	2.529		
Abs Fino (%)	2.754		
Gbs quintilla	2.546		
Abs quintilla (%)	2.061		
Gbs cuartilla	2.542		
Abs cuartilla (%)	2.243		
<b>CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO</b>			
Viscosidad a 60°C (Poises)	1750		
Penetración 25°C (1/10 mm)	71		

(1) La granulometría #2 fue la que se seleccionó como granulometría óptima.

**Gráfico 28: Curvas granulométricas analizadas.**



Para la granulometría óptima (#2) el porcentaje óptimo de asfalto fue :

- % PTM: 6.45
- % PTA: 6.90

## 2.20. RESULTADOS OBTENIDOS

### 2.20.1. PARÁMETROS MARSHALL

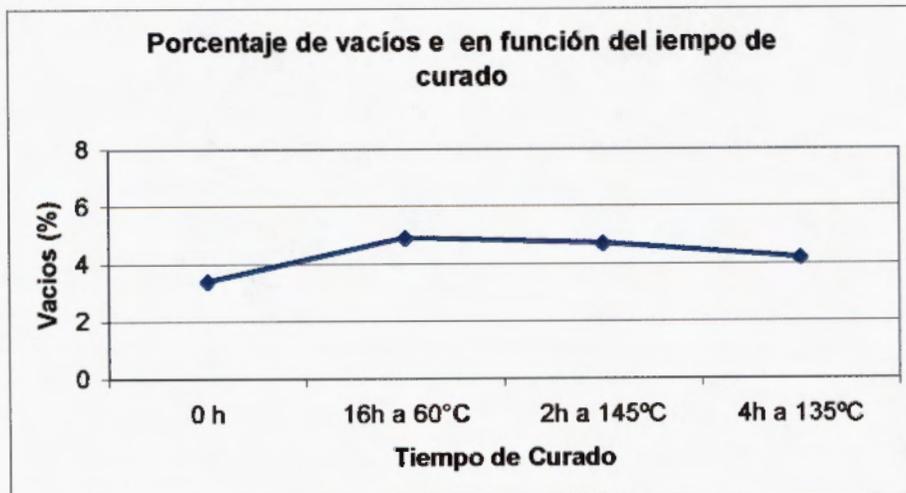
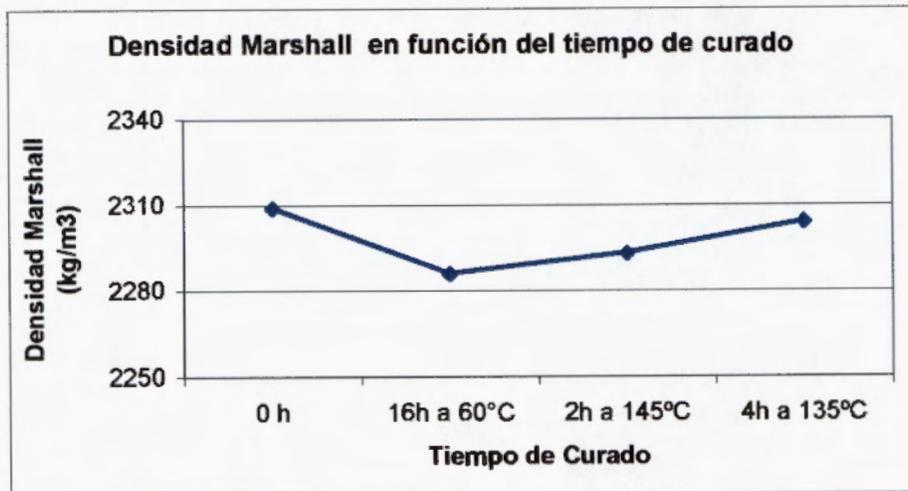
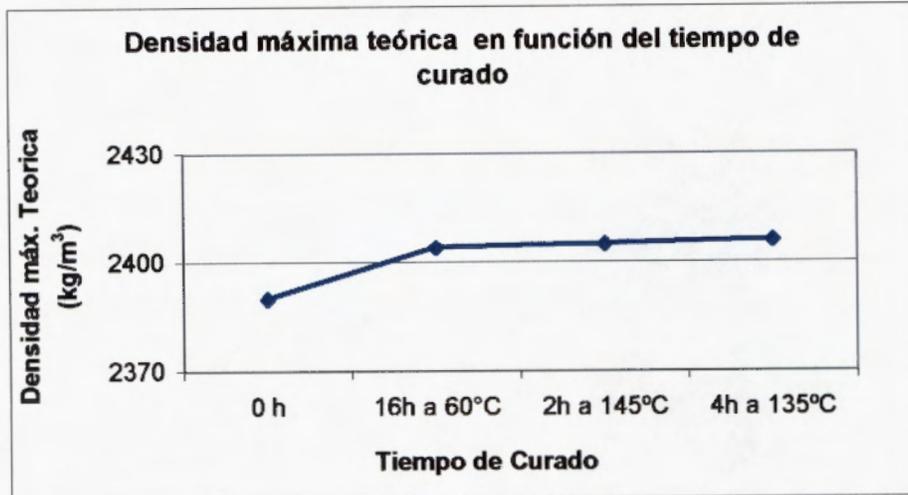
En la Tabla 32 y en el Gráfico 27, se presentan los resultados obtenidos para los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio para los parámetros de estabilidad, flujo, densidad Marshall, densidad máxima teórica y vacíos Marshall.

**Tabla 32: Resumen de los parámetros Marshall obtenidos de los especímenes moldeados y fallados en el laboratorio (1).**

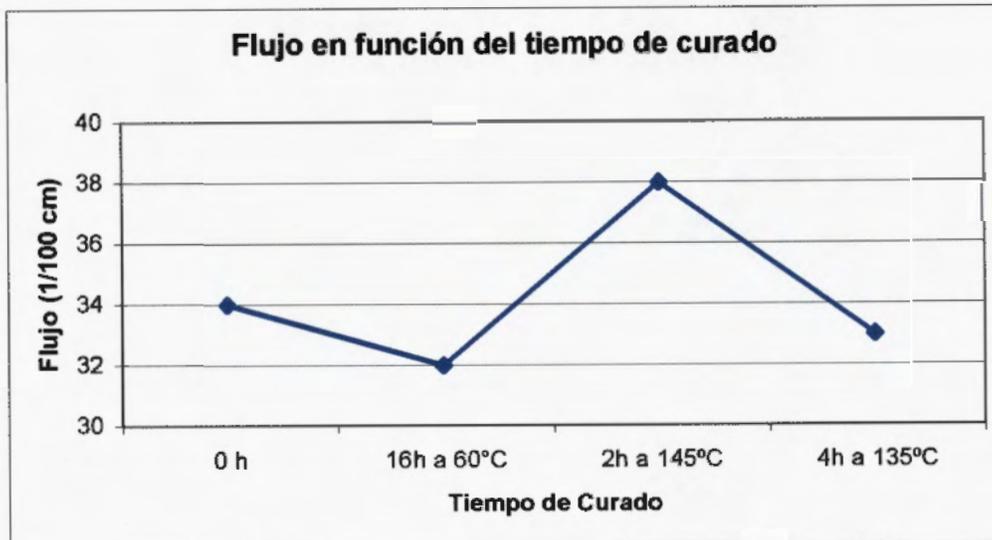
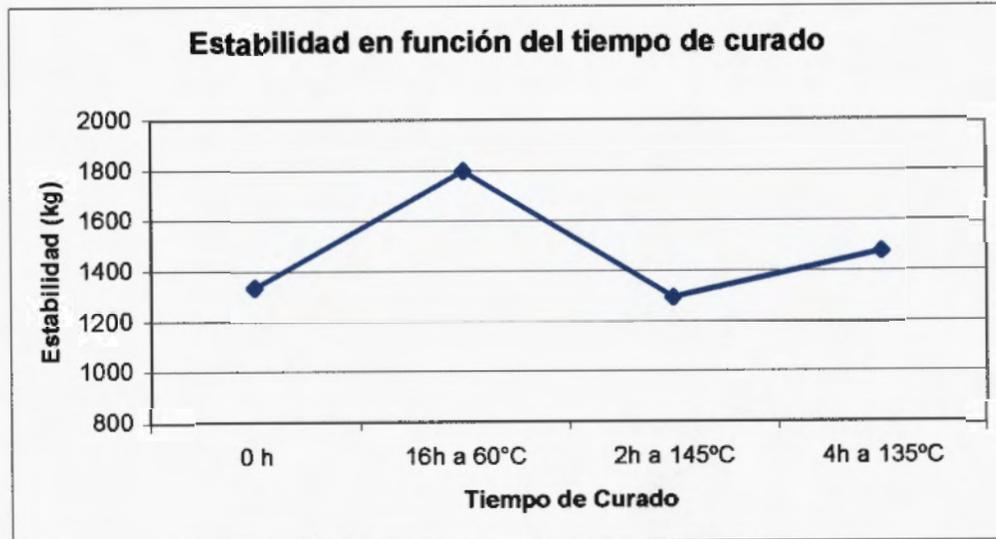
<b>Ensayo</b>	<b>Tiempo de curado</b>	<b>Valores</b>
Estabilidad	0 h	1336
Flujo		34
Densidad Marshall		2309
Densidad máxima teórica		2390
Vacíos		3,4
Estabilidad	16h a 60°C	1798
Flujo		32
Densidad Marshall		2286
Densidad máxima teórica		2404
Vacíos		4,9
Estabilidad	2h a 145°C	1295
Flujo		38
Densidad Marshall		2293
Densidad máxima teórica		2405
Vacíos		4,7
Estabilidad	4h a 135°C	1477
Flujo		33
Densidad Marshall		2304
Densidad máxima teórica		2406
Vacíos		4,2

(1) Mezclas elaboradas con el porcentaje de asfalto del diseño de mezcla Superpave.

**Gráfico 29: Variación de los parámetros Marshall en especímenes moldeados en laboratorio.**

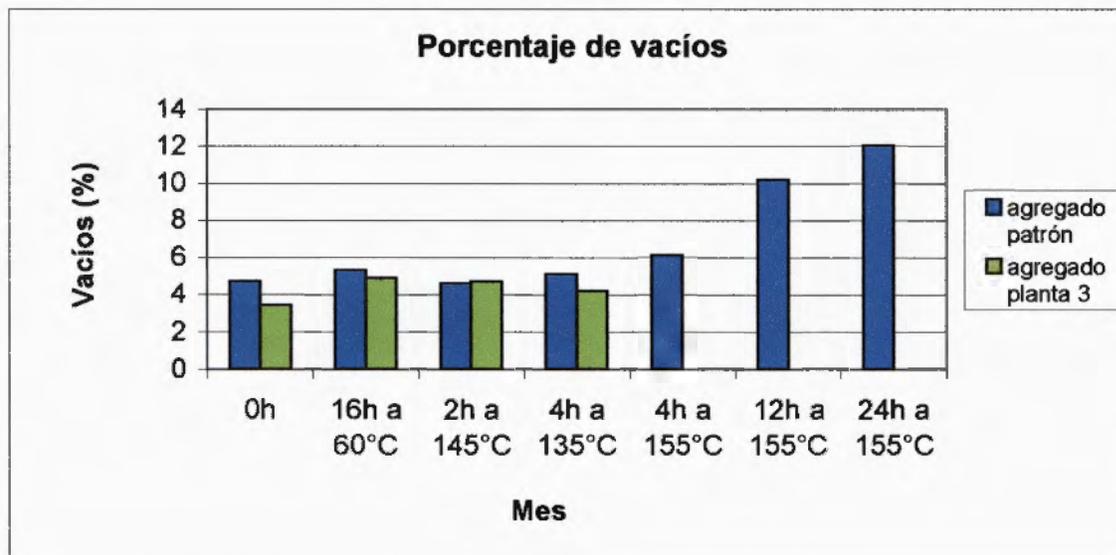
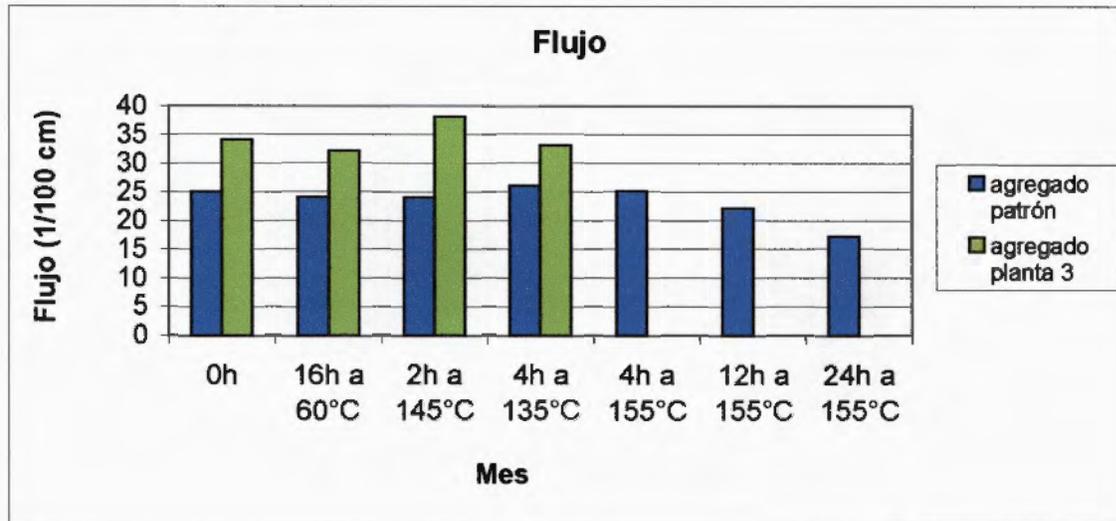


Continuación Gráfico 27.



## 2.21. COMPARACIONES ENTRE LA FASE III-A Y III-B

Gráfico 30: Histogramas para los parámetros de flujo y vacíos Marshall.



### 3. CONCLUSIONES GENERALES

1. Para los tres agregados analizados, se corrobora que las condiciones de curado: 16 h a 60°C, 2 h a 145°C, 4 h a 135°C, no evidencian cambios significativos en los parámetros Marshall al ser comparados entre sí.
2. El cambio significativo de la densidad máxima teórica al ser expuesta en el horno a 155°C durante 12h y 24h, confirma el hecho de que, al ser almacenada la mezcla en el silo por períodos largos, se incrementará el asfalto absorbido en función del tiempo de almacenaje y de la porosidad del agregado. A partir de una absorción del agregado mayor al 2%, dicho fenómeno se acentúa.
3. En consecuencia con lo anterior, debe mantenerse un control permanente del asfalto absorbido de la mezcla que se despacha, para contrastarlo con el asfalto efectivo especificado en el diseño de mezcla.
4. Se comprueba que el tipo de agregado influye significativamente en los valores de flujo de la mezcla, por tanto, hay fuentes de agregado que fácilmente cumplen con las especificaciones de flujo
5. Adicionalmente a lo anterior, para un mismo tipo de agregado se pueden obtener distintos valores de flujo por el sólo hecho de cambiar la curva granulométrica.
6. Es fundamental mantener un adecuado proceso de control de calidad para asegurar el cumplimiento permanente del flujo y de los demás parámetros Marshall de la mezcla.

7. También se comprobó que al cambiar el tipo de asfalto, se pueden obtener valores diferentes de flujos y vacíos. Asimismo, con asfaltos diferentes se pueden obtener valores diferentes en los parámetros volumétricos de la mezcla al diseñar por el método Superpave.
8. Al aplicar el método Superpave se lograron curvas granulométricas con las que se logra disminuir el valor de flujo Marshall.
9. Se comprobó que a falta de un procedimiento idóneo para el control y aseguramiento de la calidad, los procesos se salen de control y se incumple con el diseño de la mezcla.
10. Los parámetros Marshall de estabilidad, flujo y vacíos, son muy susceptibles al proceso mismo del ensayo, especialmente mezclado, homogenización y control de temperaturas, por tanto el técnico de laboratorio responsable de estos ensayos debe cumplir con requisitos mínimos de "precisión" en la ejecución de la prueba. Estos parámetros de precisión del técnico se deben determinar para cada técnico, se deben verificar de forma sistemática y el laboratorio debe conocer el grado de precisión con que ejecuta el ensayo.
11. La granulometría óptima que se obtuvo por el método Superpave, en la fracción fina, no concuerda con el rango de especificación que actualmente se aplica. En uno de los casos, la mejor granulometría pasa sobre la zona de precaución y en otro pasa por dicha zona, contrario a lo que establece la especificación granulométrica vigente.
12. Es indispensable, previo de los ensayos, que todos los equipos, incluidos los moldes, cuenten con un certificado confiable de calibración.

#### 4. RECOMENDACIONES

1. Se puede garantizar el cumplimiento de las especificaciones de flujo de la mezcla asfáltica, aplicando una o varias de las siguientes opciones:

- Utilizando fuentes de agregados que de previo se sabe que cumplen con esta especificación
- Lavando los agregados e incorporando cal o cemento y/o algún tipo de relleno mineral de aportación de buena calidad.
- Readecuando la curva granulométrica para obtener el flujo deseado. El método Superpave ayuda a optimizar la curva granulométrica.
- Seleccionando apropiadamente las diferentes fracciones de agregados. Para esto se deben separar los agregados como mínimo en tres fracciones, cada una de estas fracciones pueden venir de fuentes diferentes, de modo que la combinación de éstos sea tal que se obtengan los valores especificados de flujo y vacíos.
- Incorporando aditivos poliméricos se puede también cambiar las propiedades de flujo de la mezcla asfáltica.
- Cualquiera que sea el método que se utilice, para garantizar el cumplimiento de las especificaciones de flujo y vacíos, se requiere de un estricto control en las diferentes etapas del proceso:
  - i. Producción de agregados y construcción de apilamientos
  - ii. Proceso de producción de la mezcla
  - iii. Etapa de almacenamiento, despacho, especialmente en lo relativo a absorción y endurecimiento del asfalto.
  - iv. Transporte, colocación, compactación y acabado final

2. La frecuencia y la cantidad de ensayos que el contratista debe hacer en cada etapa del proceso de producción de la mezcla, son fundamentales para garantizar la calidad del producto terminado. El contratista debe tener un plan de calidad que garantice el cumplimiento permanente de las especificaciones, de lo contrario, tal y como se comprueba en este estudio, el proceso se sale de control.
3. Para tener mejores criterios respecto a la calidad de las mezclas y su desempeño a largo plazo, se deben complementar los parámetros Marshall con otras exigencias como:
  - Deformación permanente
  - Módulo de rigidez
  - Capacidad a fatiga

Es muy importante introducir este tipo de criterios para garantizar que se coloque mezcla asfáltica de la calidad que se requiere, especialmente en condiciones de altos volúmenes de tránsito y/o zonas de temperaturas elevadas.

4. La deformación permanente de la mezcla (incluido el desplazamiento lateral) y la pérdida de la textura superficial, son patologías que con frecuencia se presentan, por tanto, mientras se introducen nuevas exigencias a las mezclas asfálticas (ver punto anterior) conviene mantener un estricto control de las especificaciones vigentes de flujo y vacíos Marshall, así como la compactación en sitio. Cualquier cambio que se haga en este sentido debe dirigirse a mejorar tales patologías de la mezcla.
5. En consecuencia con lo anterior, se debe buscar otras opciones adicionales como:
  - Mezclas densas de mayor módulo de rigidez
  - Mezclas abiertas (o drenantes)
  - Mezclas tipo SMA (con matriz de agregado grueso)

- Micro-aglomerados

Los volúmenes y las cargas de tránsito continuarán aumentando año con año, por tanto es muy importante, en el corto plazo, complementar este marco de especificaciones basado en los parámetros Marshall.

6. Cualquiera que sea el tipo de mezcla, es muy importante introducir una especificación para el coeficiente de pulimento (CPA) del agregado y además establecer un límite de absorción máxima de los agregados.
7. También se requiere introducir un procedimiento para el control del asfalto efectivo de la mezcla. Esta condición es especialmente crítica cuando el agregado tiene una absorción mayor a 2.5% y la mezcla es almacenada en el silo por más de 4 horas.
8. Es de gran importancia para la seguridad de los vehículos, introducir procedimientos de evaluación de textura y coeficiente de rozamiento del pavimento, así como los rangos permisibles para dichos parámetros. Los pavimentos deslizantes incrementan de manera importante los índices de accidentes.
9. Conviene revisar y modificar el rango de especificación de la granulometría, porque excluye la posibilidad, para algunos tipos de agregados, de obtener mezclas de mayor rigidez y más resistentes a la deformación permanente.
10. También hay que analizar y si es el caso, definir una especificación para la angularidad de los finos.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

1. Adam J. Hand, John A. Epps and Peter E. Sebaaly.  
Development of APT based permanent deformation prediction models translatable to other environments.  
International Conference on Accelerated pavements testing, Reno, Nevada. 1999.
2. ASTM Publication.  
Physical properties of asphalt cement binders.  
ASTM Code number 04-012410-08. 1995.
3. Asphalt Institute.  
Métodos de ensayo de ligantes asfálticos Superpave.  
Asphalt Institute. 1998
4. Asphalt Institute.  
Diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave.  
Asphalt Institute. 1990.
5. Asphalt Institute.  
MS-2 Mix design methods for asphalt concrete and other hot mix types.  
Asphalt Institute. Sixth Edition.
6. Asphalt Institute.  
SP-2 Superpave mix desing.  
Asphalt Institute.
7. C.S. Hughes.  
Evolución de especificaciones de mezcla en caliente (HMA) en USA.  
Asphalt Technology Conference. Austin, Texas. 2000.
8. Ing. Fernando Martínez.  
Apuntes del curso: Tecnologías modernas de diseño y análisis de mezclas asfálticas.  
Universidad del Rosario. Argentina. 2000.
9. Horacio Daniel Osio.  
Estudio comparativo de diferentes asfaltos basado en parámetros reológicos.  
Comisión de investigaciones Científicas-LEMIT. Buenos Aires. 2001.
10. Hussain Bahia.  
PG System and PG grade selection for modified binders. University of Madison, Wisconsin. 2000.

11. J. Lijzenga.  
The stiffness relation in the rutting prediction module of the Shell pavement design method.  
Shell International Oil Products BV, Amsterdam. 1999.
12. J.A Fernández del Campo.  
Factores de variación en la calidad de una mezcla bituminosa.  
Universidad Politécnica de Burgos. España. 2001.
13. John D'angelo.  
Binder technology-past, present, and future.  
Federal Highway Administration. 2000.
14. John D'angelo.  
Superpave binder specification "How has it performed in the real world".  
Federal Highway Administration. U.S.A 2000.
15. John D. Ferry (University of Wisconsin).  
Viscoelastic properties of Polymers.  
John Wiley and Sons. 1961.
16. John Epps.  
Hot mix asphalt issues and opportunities.  
Granite Construction Company. 2001.
17. Marcela Balige, Cristian Sawyer.  
Caracterización integral de materiales asfálticos.  
Empresa Repsol YPF. 2001.
18. National Asphalt Pavement Association.  
Analysis and control for hot mix asphalt operations.  
NAPA. 1997.
19. R.C Williams, P Romero, K.D Stuart.  
Comparison of Superpave Shear test results to WesTrack performance.  
Federal Highway Administration. 1999.
20. S.V. Kekwick, H.L Theyse and E.G Kleyn.  
Development of a long-term accelerated pavement testing programme and structural design models.  
Transportek, CSIR. South Africa. 1999.

