



Reporte de Investigación LM- PI - PV- IN- 04f - 04

DEFORMACIÓN PERMANENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

INFORME DE AVANCE

Investigador principal

Ing. Laura Ramírez

Investigadores asociados

Ing. Mario Arce

Ing. Fabián Elizondo

Ing. Mónica Jiménez

Quim. Diego Moreira

Julio 2005

DEFORMACIÓN PERMANENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que han presentado las carreteras en Costa Rica, está asociado a la falta de resistencia a la deformación plástica. La normativa que regula y controla el desempeño de las mezclas asfálticas ante la deformación plástica, no garantiza un adecuado desempeño de la mezcla a largo plazo, por lo cual, ha surgido la necesidad de readecuar esta normativa para garantizar un mejor desempeño de las mezclas que se utilizan en las obras de pavimentación en nuestro país.

Como respuesta ante tal necesidad, se planteó este proyecto de investigación, el cual tiene como objetivo hacer una readecuación de normas de ensayo y especificaciones técnicas, con el propósito de asegurar el desempeño a largo plazo de las mezclas asfálticas, bajo las condiciones de clima y tránsito de Costa Rica, considerando diversos tipos de mezclas asfálticas.

Para lograr esto, se propuso determinar la correlación existente entre la deformación permanente a escala de laboratorio y la deformación que experimenta el pavimento; determinar la correlación entre el flujo Marshall y la deformación permanente en laboratorio y en campo.

Una de las principales finalidades de este proyecto, es proponer una norma de ensayo y especificación alternativa al flujo Marshall de cara al desempeño a largo plazo del pavimento.

El proyecto se encuentra en una fase intermedia, donde se busca recolectar información tanto de laboratorio como de campo. Para esto, se muestrea en planta, mezcla asfáltica de la vagoneta y agregados de los apilamientos. Luego, se extraen núcleos de campo que corresponden a la misma mezcla asfáltica muestreada. Por último se hacen extracciones de núcleos luego de dos años para ver cuál ha sido el cambio en los vacíos de campo.

Se presentan los esquemas experimentales planteados para el desarrollo del proyecto. En la figura 1, se muestra el esquema experimental para la mezcla traída de planta y en la figura 2 se muestra el esquema para las muestras extraídas de campo.

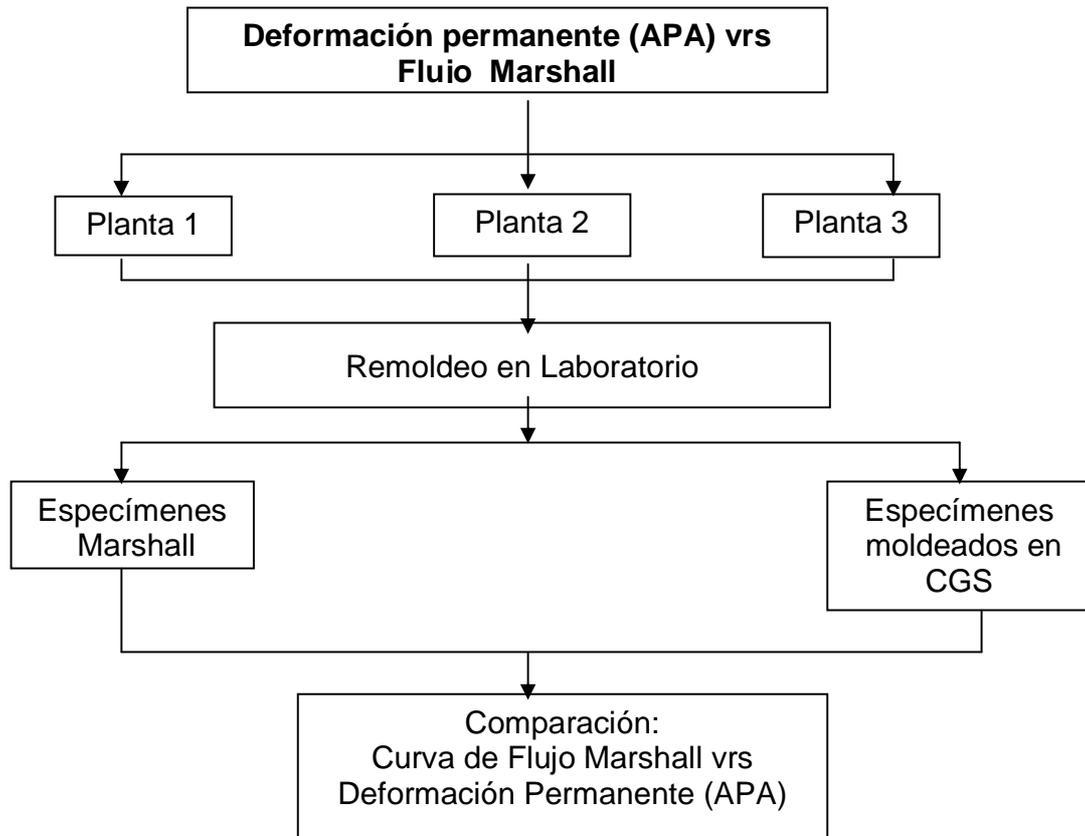


Figura No. 1: Esquema experimental para mezcla traída de planta

A los especímenes Marshall remoldeados en laboratorio se les realizan ensayos de gravedad específica bruta, gravedad específica máxima teórica, estabilidad y flujo. Con el gráfico de estabilidad y flujo se obtienen cinco distintas lecturas de flujo a saber: flujo medido en el último máximo de la curva (flujo b), flujo medido en el primer máximo (flujo c), flujo medido en la tangente horizontal (flujo d), flujo medido al 95% del primer máximo (flujo e) y el flujo medido al 95% de la tangente horizontal (flujo f).

Los especímenes remoldeados en el compactador giratorio son sometidos al ensayo de resistencia a la deformación plástica, medida en la pista de laboratorio (APA) y a el ensayo de módulo resiliente obtenido a través del ensayo de tensión indirecta.

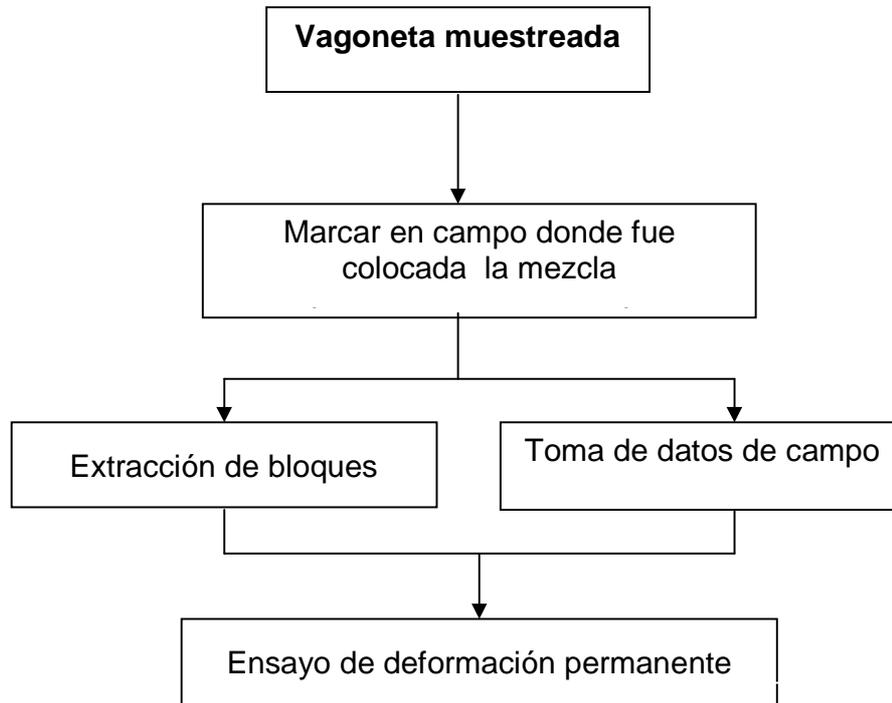


Figura No. 2: Esquema experimental para núcleos de campo

De campo se extraen 12 núcleos, 6 de 15.0 cm de diámetro y 6 de 10.0 cm de diámetro. Con los núcleos de 10.0 cm de diámetro se realizan los ensayos de gravedad específica bruta, para obtener el porcentaje de vacíos en campo. Los especímenes de 15.0 cm de diámetro son sometidos al ensayo de deformación permanente y módulo resiliente.

PLANTA 1

2. MATERIA PRIMA

2.1 Ligante asfáltico

En cada muestreo realizado, se obtuvo una copia del certificado de calidad del asfalto con el cual se fabricó la mezcla asfáltica. En la Tabla No. 1 se presentan los valores reportados por RECOPE para la planta 1.

El asfalto utilizado en el año 2002 para la elaboración de las mezclas asfálticas clasifica según su viscosidad absoluta a 60°C, como un AC-20, el cual tiene un rango de variación entre los 1600 y los 2400 Poises. Durante el 2003 utilizó asfalto AC-30, el cual tiene un rango de variación entre 2400 y 3600 Poises.

2.2 Agregado

2.2.1 Caracterización de los agregados

En la Tabla No. 2 se presenta la caracterización de los agregados utilizados por la planta 1, para la producción de mezcla asfáltica en caliente. La Planta 1 utiliza agregados provenientes de la fuente Río Chirripó Norte

2.2.2 Coeficiente de pulimento acelerado

Se determinó el coeficiente de pulimento de los agregados utilizados comúnmente en las obras de pavimentación en Costa Rica basándose en las normas AASHTO T 279 Método de prueba estándar para pulimento acelerado de agregados usando la máquina de pulimento y AASHTO T 278 Método de prueba estándar para determinar las propiedades de fricción de superficies usando el péndulo inglés. Se tomó como referencia la norma española NLT-174/93 Pulimento acelerado de los áridos.

En la Tabla No.3 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla No. 1: Propiedades físico-químicas del asfalto. Valores reportados por Recope.

Propiedad	Unidad	Fecha de muestreo				
		04/05/02	16/05/02	21/05/02	31/05/02	12/06/02
Densidad a 15°C	kg/cm ³	1028	N.I	1030	1028	1030
Viscosidad a 60°C	P	2061	N.I	2293	1884	2032
Viscosidad a 135°C	cSt	427	N.I	425	395	415
Viscosidad a 165°C	cP	102	N.I	117	106	114
Viscosidad a 60°C TFO	P	4440	N.I	5118	3996	5118
Penetración a 25°C	0,1mm	76	N.I	73	80	78
Punto de chispa	°C	247	N.I	282	296	296
Solubilidad en tricloroetano	%	99,8	N.I	99,81	99,89	99,84
Pérdida de masa en TFO	%	0,18	N.I	0,2	0,3	0,24
Índice de susceptibilidad térmica (VTS)	-	3,5	N.I	3,5	3,5	3,5
Razón de viscosidades	-	2,2	N.I	2	2	2
Temperatura de mezclado	°C	151-156	151-156	153-159	151-157	153-158
Temperatura compactación	°C	141-145	141-145	142-147	140-145	141-146

Propiedad	Unidad	Fecha de muestreo				
		18/09/02	24/10/02	30/10/02	06/11/02	05/12/02
Densidad a 15°C	kg/cm ³	1030	1037	1037	1037	1038
Viscosidad a 60°C	P	2107	2353	2353	2353	2127
Viscosidad a 135°C	cSt	447	462	462	462	458
Viscosidad a 165°C	cP	124	132	132	132	127
Viscosidad a 60°C TFO	P	5041	4809	4809	4809	5502
Penetración a 25°C	0,1mm	94	83	83	83	90
Punto de chispa	°C	288	268	268	268	274
Solubilidad en tricloroetano	%	99,78	99,85	99,85	99,85	99,91
Pérdida de masa en TFO	%	0,44	0,18	0,18	0,18	0,37
Índice de susceptibilidad térmica (VTS)	-	3,5	3,5	3,5	3,5	3,4
Razón de viscosidades	-	2	2	2	2,0	2
Temperatura de mezclado	°C	154-160	156-162	156-162	156-162	155-161
Temperatura compactación	°C	143-148	144-149	144-149	144-149	144-149

Tabla No. 2: Propiedades físico-químicas del asfalto. Valores reportados por Recope (continuación).

Propiedad	Unidad	Fecha de muestreo				
		23/01/03	30/01/03	06/02/03	13/02/03	20/02/03
Densidad a 15°C	kg/cm ³	1035	1036	1037	1038	1041
Viscosidad a 60°C	P	3039	3020	2910	3395	3119
Viscosidad a 135°C	cSt	512	537	486	546	595
Viscosidad a 165°C	cSt	124	140	135	148	162
Viscosidad a 60°C TFO	P	6340	5840	5639	7546	7294
Penetración a 25°C	0,1mm	57	60	65	64	70
Punto de chispa	°C	305	269	280	284	314
Solubilidad en tricloroetano	%	99,8	99,9	99,82	99,92	99,89
Pérdida de masa en TFO	%	0,14	0,23	0,26	0,3	0,18
Índice de susceptibilidad térmica (VTS)	-	3,5	3,4	3,5	3,5	3,4
Razón de viscosidades	-	2	1,9	2	2,0	2
Temperatura de mezclado	°C	155-161	158-163	156-162	159-165	161-167
Temperatura compactación	°C	145-149	146-151	145-150	147-152	149-154

Propiedad	Unidad	Fecha de muestreo				
		27/02/03	13/03/03	29/04/03		
Densidad a 15°C	kg/cm ³	1041	1042	1039		
Viscosidad a 60°C	P	3119	3205	3506		
Viscosidad a 135°C	cSt	595	579	582		
Viscosidad a 165°C	cSt	162	152	161		
Viscosidad a 60°C TFO	P	7294	7806	9141		
Penetración a 25°C	0,1mm	70	64	64		
Punto de chispa	°C	314	290	262		
Solubilidad en tricloroetano	%	99,89	99,98	99,89		
Pérdida de masa en TFO	%	0,18	0,41	0,59		
Índice de susceptibilidad térmica (VTS)	-	3,4	3,4	3,5		
Razón de viscosidades	-	2	2,0	3		
Temperatura de mezclado	°C	161-167	160-165	161-167		
Temperatura compactación	°C	149-154	148-153	149-154		

Tabla No. 2: Caracterización de los agregados utilizados por la planta 1.

Ensayos		Fecha de muestreo					
		04/05/2002	16/05/2002	21/05/2002	31/05/2002	12/06/2002	18/09/2002
Caras fracturada	-Quintilla	N.I	N.I	N.I	100	100	100
	-Cuartilla	N.I	N.I	N.I	100	100	100
Partículas planas y	-Quintilla	N.I	N.I	N.I	1,3	0,3	0,0
	-Cuartilla	N.I	N.I	N.I	1,0	0,9	0,0
% Humedad	-Polvo	2,62	2,23	3,63	N.I	2,67	2,99
	-Quintilla	2,85			N.I	2,97	3,25
	-Cuartilla	3,04			N.I	1,96	3,05
Equivalente de Arena		N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	73
Vacíos no compactados		N.I	N.I	N.I	36	39	36
Gbs		N.I	N.I	N.I	2,6	2,64	2,61
Absorción		N.I	N.I	N.I	2,5	2,0	2,4
Malla		Porcentaje pasando					
19 mm		100	100	100	100	N.I	100
12,5mm		88	90	91	90	N.I	91
9,5 mm		76	75	78	78	N.I	77
No.4		48	44	45	47	N.I	47
No.8		33	28	31	31	N.I	32
No,16		23	20	21	22	N.I	22
No.30		17	15	16	16	N.I	16
No.50		12	11	12	11	N.I	12
No.100		9	8	9	8	N.I	9
No.200		7	6	7	6	N.I	8

N.I: No hay información.

Tabla No. 2: Caracterización de los agregados utilizados por la planta 1 (continuación).

ID		1654-02	57-03	76-03	107-03	132-03
Fecha muestreo		05/12/2002	23/01/2003	30/01/2003	06/02/2003	13/02/2002
Caras fracturadas	-Quintilla	100		100	100	100
	-Cuartilla	100		97	100	98
Partículas planas y elongadas	-Quintilla	0,0			0,0	0,0
	-Cuartilla	0,0			0,0	0,0
% Humedad	-Polvo	4,33	1,93	2,83	2,62	2,93
	-Quintilla	1,7	1,78	1,48	2,85	2,64
	-Cuartilla	2,13	1,57	2,23	1,31	1,10
Equivalente de Arena		75		72	67	70
Vacios no compactados		43,8	34,2	33,1	34,9	35,7
Gbs		2,59	2,59	2,56	2,59	2,58
Absorción		2,5	2,4	2,7	2,7	2,6
Granulometría						
19 mm		100	100	100	100	100
12,5mm		92	93	93	92	89
9,5 mm		78	75	78	77	78
No.4		47	45	46	48	49
No.8		31	29	30	33	30
No,16		22	20	21	23	20
No.30		16	15	16	17	15
No.50		12	11	11	12	11
No.100		9	8	8	9	8
No.200		7,0	6	7	7	6

Tabla No. 2: Caracterización de los agregados utilizados por la planta 1 (continuación).

ID		158-03	189-03	238-03	362-03
Fecha muestreo		20/02/2003	27/02/2003	13/03/2003	29/04/2003
Caras fracturadas	-Quintilla	96	100	100	100
	-Cuartilla	96	98	96	98
Partículas planas y elongadas	-Quintilla	0,0	0,0	0,0	0,0
	-Cuartilla	0,0	0,0	0,0	0,0
% Humedad	-Polvo	3,23	4,01	2,5	2,67
	-Quintilla	2,07	1,43	0,46	2,04
	-Cuartilla	1,31	1,27	1,54	2,52
Equivalente de Arena		69	63	66	75
Vacíos no compactados		35,1	36,9	37,8	38,8
Gbs		2,60	2,58	2,58	2,60
Absorción		2,4	2,6	2,7	2,3
Granulometría					
19 mm		100	100	100	100
12,5mm		95	84	92	91
9,5 mm		78	70	81	78
No.4		50	43	51	48
No.8		37	29	34	32
No.16		28	20	23	22
No.30		22	15	16	17
No.50		17	11	12	12
No.100		14	8	9	9
No.200		12	6	5	6

Nota: Las columnas sombreadas representan valores poco representativos, ya que se obtuvieron con una sola muestra.

Tabla No. 3: Valores promedio del coeficiente de pulimento acelerado.

Fuente	n	Fricción inicial		Fricción final (PSV)	
		Promedio	Desv. Est	Promedio	Desv. Est
Río Costa Rica	6	0.71	0.06	0.64	0.05
Chirripó Norte	4	0.75	0.07	0.66	0.06
Buenos Aires	4	0.66	0.03	0.59	0.05
Confluencia Río Blanco-Toro Amarillo	4	0.70	0.04	0.64	0.05
Tajo en Santa Ana	4	0.76	0.03	0.64	0.09
Barranca	6	0.76	0.04	0.61	0.05
Nicoya	6	0.63	0.06	0.41	0.02

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Se presentan los resultados obtenidos de parámetros Marshall y deformación permanente medida en especímenes remoldeados en laboratorio y en núcleos extraídos de campo y valores de módulo resiliente obtenido por medio de tensión indirecta.

Se remoldearon especímenes utilizando el mazo Marshall y el compactador giratorio.

3.1 Parámetros Marshall

En la Tabla No. 4 se presentan los valores obtenidos de porcentaje de vacíos, de estabilidad y del flujo medido en distintos puntos sobre la curva estabilidad-flujo, obtenida de los especímenes remoldeados en laboratorio.

3.2 Ensayos de desempeño

Se remoldearon en el compactador giratorio seis especímenes de 15.0 cm de diámetro y 7.5 cm de espesor, con un nivel de vacíos variando entre 6.0 y 8.0%. Estos especímenes fueron ensayados en la pista de laboratorio (APA) a una temperatura de 60°C, para determinar la deformación después de 8000 ciclos de carga.

Este procedimiento se hizo tanto para los especímenes remoldeados en el laboratorio como para los núcleos extraídos de campo. En la Tabla No. 5 se presentan los promedios de las deformaciones obtenidas para los especímenes remoldeados en laboratorio y en la Tabla No. 6 se presentan las deformaciones medidas en los núcleos extraídos de campo. En la Tabla No.7 se presentan los valores para el módulo resiliente.

Tabla No. 4: Parámetros Marshall. Valores promedio.

Parámetro	Fecha de muestreo										
	4/05/02	16/05/02	21/05/02	31/05/02	12/06/02	18/09/02	17/10/02	24/10/02	30/10/02	6/11/02	5/12/02
Cont. asfalto (%PTM)	5.50	5.50	5.30	5.70	N.I	6.55	6.23	6.15	5.90	6.10	6.03
Vacíos (%)	4.0	6.1	5.4	5.2	6.8	3.9	4.3	5.4	4.6	4.4	3.6
Estabilidad (kg)	1718	1534	1825	1838	1571	1545	1756	1643	1696	1658	1755
Flujo a (mm-1)	32.4	39.0	28.7	28.2	25.7	33.9	31.6	32.4	31.8	25.6	24.8
Flujo b (mm-1)	32.8	43.4	32.8	30.9	28.4	36.0	33.6	36.9	33.5	27.5	27.1
Flujo c (mm-1)	31.1	27.3	27.4	27.9	25.7	31.7	28.9	28.9	25.0	24.9	23.6
Flujo d (mm-1)	31.8	40.1	30.8	29.4	27.3	34.6	31.9	32.6	31.9	26.5	25.4
Flujo e (mm-1)	16.9	21.2	17.7	18.0	18.4	21.0	17.9	20.6	18.1	17.5	16.4
Flujo f (mm-1)	16.9	22.1	17.7	18.0	18.4	21.7	19.3	21.3	19.4	17.5	16.4

Donde:

Flujo a corresponde al flujo medido por el equipo

Flujo b corresponde al flujo medido en el último máximo

Flujo c corresponde al flujo medido en el primer máximo

Flujo d corresponde al flujo medido en la tangente horizontal

Flujo e corresponde al flujo medido al 95% del primer máximo

Flujo f corresponde al flujo medido al 95% de la tangente horizontal

Tabla No. 4: Parámetros Marshall. Valores promedio (continuación).

Parámetro	Fecha de muestreo							
	23/1/03	30/1/03	6/2/03	13/2/03	20/2/03	27/2/03	13/3/03	29/4/03
Cont. asfalto (%PTM)	5.70	5.90	6.10	6.30	6.30	6.00	6.30	6.20
Vacíos (%)	4.8	4.9	3.5	3.1	2.9	4.2	4.4	3.6
Estabilidad (kg)	1774	1771	1891	2127	2034	1921	1800	2097
Flujo a (mm-1)	28.7	34.9	30.1	28.0	31.2	31.3	30.6	32.7
Flujo b (mm-1)	31.2	39.0	33.8	30.3	33.6	32.8	32.4	34.8
Flujo c (mm-1)	28.5	28.2	28.1	26.3	30.8	28.9	26.4	29.5
Flujo d (mm-1)	30.0	37.1	29.9	28.5	32.2	31.2	29.7	32.7
Flujo e (mm-1)	22.6	19.4	18.8	18.4	19.7	19.3	17.9	19.8
Flujo f (mm-1)	19.5	19.3	18.8	18.4	19.7	19.6	17.9	20.1

Nota: Las columnas sombreadas representan valores poco representativos, ya que se obtuvieron con una sola muestra.

Donde:

Flujo a corresponde al flujo medido por el equipo

Flujo b corresponde al flujo medido en el último máximo

Flujo c corresponde al flujo medido en el primer máximo

Flujo d corresponde al flujo medido en la tangente horizontal

Flujo e corresponde al flujo medido al 95% del primer máximo

Flujo f corresponde al flujo medido al 95% de la tangente horizontal

Tabla No. 5: Deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio.

	Fecha de muestreo									
Parámetro	4/5/02	16/5/02	21/5/02	31/5/02	12/6/02	18/9/02	17/10/02	24/10/02	30/10/02	6/11/02
Vacíos (%)	7.1	6.4	6.5	7.1	8.5	5.9	6.0	6.3	6.6	6.4
Deformación (mm)	3.0	3.0	3.6	3.6	3.6	3.5	3.2	1.6	2.3	2.0

	Fecha de muestreo									
Parámetro	5/12/02	23/1/03	30/1/03	6/2/03	13/2/03	20/2/03	27/2/03	13/3/03	29/4/03	
Vacíos (%)	6.8	7.0	7.1	7.2	6.9	6.2	7.4	7.3	6.2	
Deformación (mm)	2.4	1.9	2.5	2.4	1.6	2.1	2.0	1.8	2.0	

Los valores sombreados corresponden a una época donde el equipo estuvo presentando problemas.

Tabla No. 6: Deformaciones medidas núcleos extraídos de campo.

	Fecha de muestreo									
Parámetro	4/5/02	16/5/02	21/5/02	31/5/02	12/6/02	18/9/02	17/10/02	24/10/02	30/10/02	6/11/02
Vacíos (%)	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	5.3	6.5	8.0	7.3	7.7
Deformación (mm)	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	5.9	7.6	7.2	7.2	5.1

N.I: No hay información.

	Fecha de muestreo									
Parámetro	5/12/03	23/1/03	30/1/03	6/2/03	13/2/03	20/2/03	27/2/03	13/3/03	29/4/03	-
Vacíos (%)	11.9	8.3	6.2	4.5	11.8	4.0	6.3	5.8	10.9	-
Deformación (mm)	9.3	4.3	5.0	4.6	6.6	5.2	6.9	6.1	7.8	-

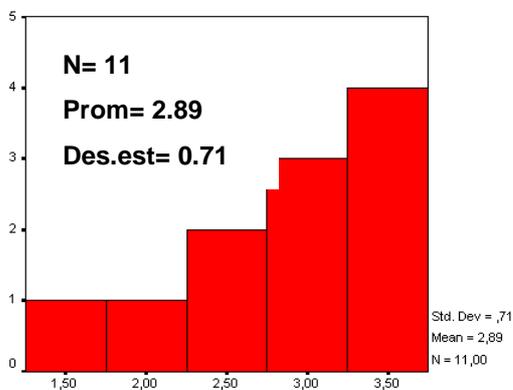
Tabla No. 7: Valores de módulo resiliente obtenidos, por tensión indirecta, de las muestras remoldeadas en laboratorio, en MPa

	Fecha de muestreo					
Carga	23/1/02	30/1/02	13/2/03	20/2/03	13/3/03	29/4/03
2000 N	4192	3926	6172	4465	4200	4783
3000 N	3928	3687	6525	4151	3872	4469

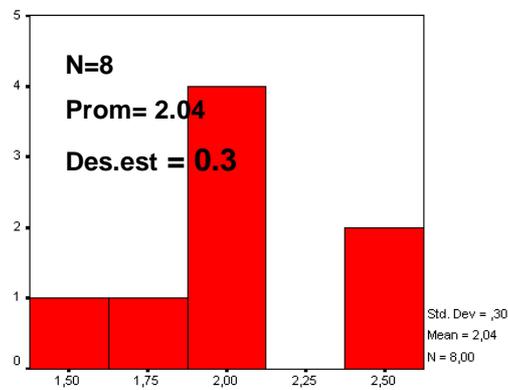
Tabla No. 8: Valores de módulo resiliente obtenidos, por tensión indirecta, de los núcleos extraídos de campo, en MPa.

	Fecha de muestreo							
Carga	23/1/02	30/1/02	6/2/03	13/2/03	20/2/03	27/2/03	13/3/03	29/4/03
2000 N	4066	3893	3703	2763	3166	2967	2954	2200
3000 N	3962	3670	3466	2635	2893	2703	2520	1874

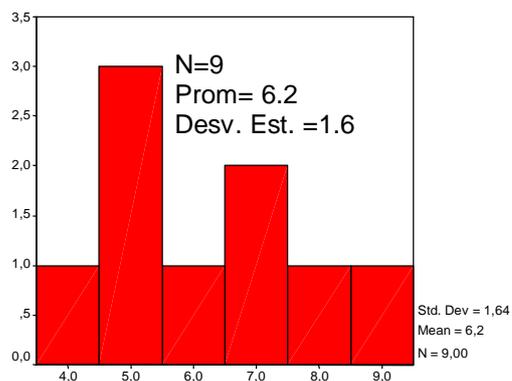
Gráfico No. 1: Histograma de deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio y en núcleos extraídos de campo. Planta 1.



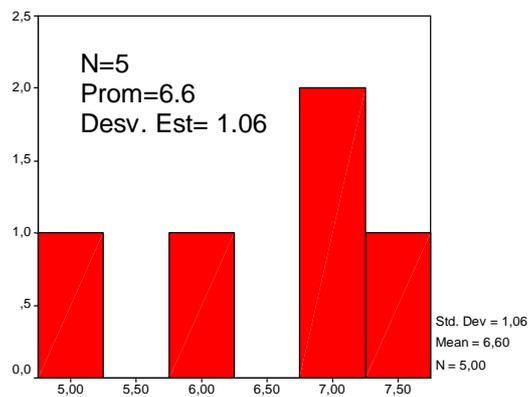
Remoldeados. 2002



Remoldeados. 2003



Núcleos de campo. 2002



Núcleos de campo. 2003

3.3 Análisis de resultados.

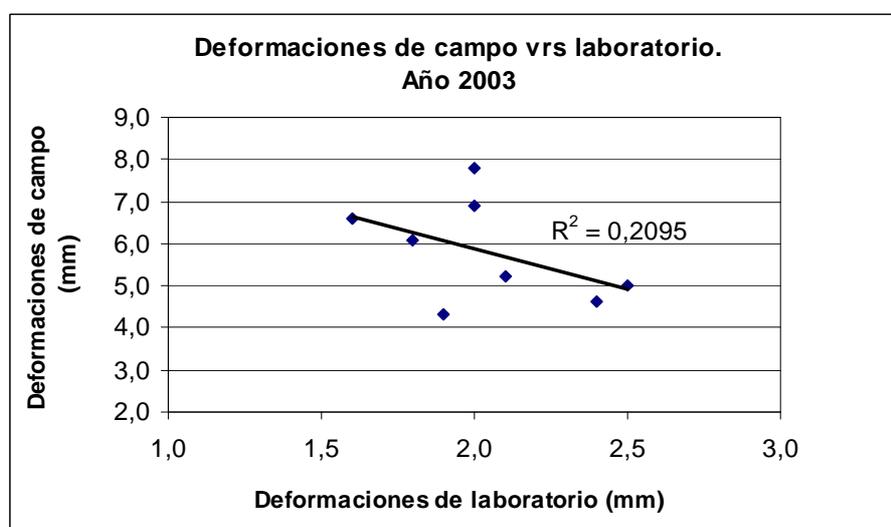
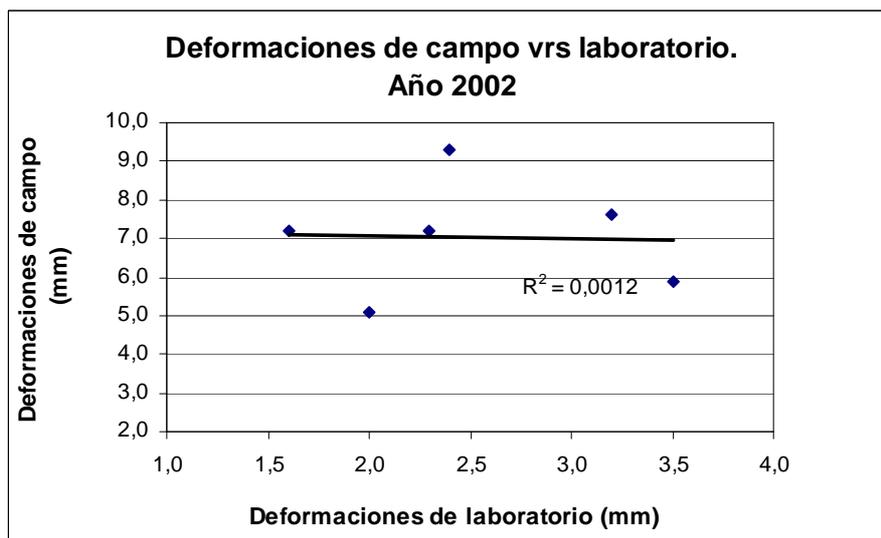
Por medio de una prueba de hipótesis hecha al 90% de confianza, se determinó que las deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio en el año 2002 eran mayores a las deformaciones medidas en el año 2003, por lo que los resultados se analizaron por separado.

Para determinar si existía relación entre las deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio y las medias en los núcleos de campo, se realizó un análisis de regresión. Los resultados se muestran en la Tabla No.9. En el gráfico No.2 se muestra la relación entre ambas deformaciones.

Tabla No. 9: Resultados del análisis de regresión: Deformación medida en especímenes remoldeados en laboratorio vrs deformación medida en núcleos extraídos de campo

Año	R	R ²
2002	0.03	0.001
2003	0.46	0.209

Gráfico No. 2: Relación entre deformaciones de campo y deformaciones de laboratorio.



Se observa como la correlación, para ambos años, entre las deformaciones obtenidas con muestras remoldeadas en laboratorio y con núcleos extraídos de campo es muy baja, siendo un poco mejor en el año 2003.

Para determinar si existía correlación entre la deformación de laboratorio y el flujo Marshall, medido en distintos puntos sobre la curva de estabilidad-flujo, se realizaron distintos gráficos, que se muestran en el Grafico No.3.

Según se observa en los gráficos, no hay una relación definida entre deformación plástica medida en especímenes remoldeados en laboratorio y el flujo. Los gráficos muestran curvas irregulares, las cuales son difíciles de ajustar.

Para analizar el efecto que tienen otras propiedades, tales como las propiedades de diseño (% asfalto, estabilidad, VMA, VFA), las propiedades combinadas del agregado (% pasando la malla #50, % pasando la malla #100%, y el porcentaje de vacíos no compactados en el agregado fino) y algunas propiedades del asfalto tales como la densidad y la viscosidad absoluta, sobre la deformación plástica medida en especímenes remoldeados en laboratorio, se presentan gráficos que muestran la tendencia que sigue la deformación plástica de laboratorio al aumentar o disminuir alguna de estas propiedades.

Gráfico No. 3: Deformación plástica versus flujo (medido en distintos puntos sobre la curva estabilidad-flujo)

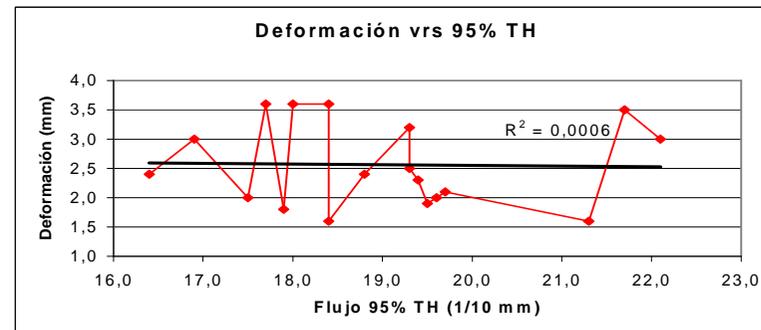
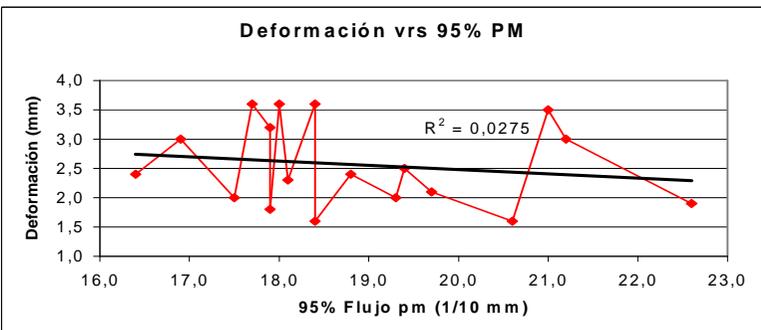
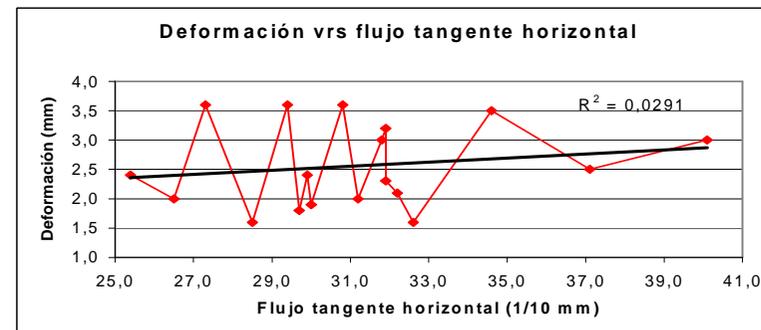
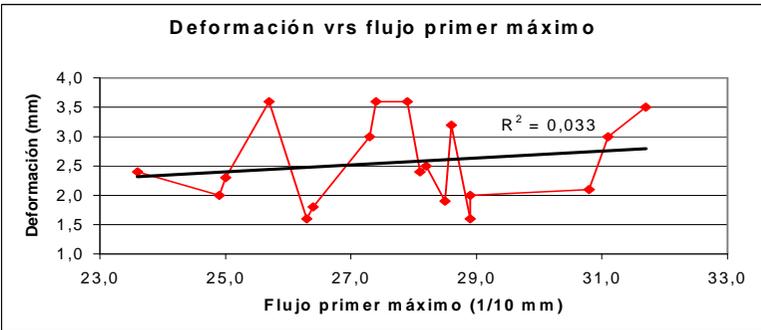
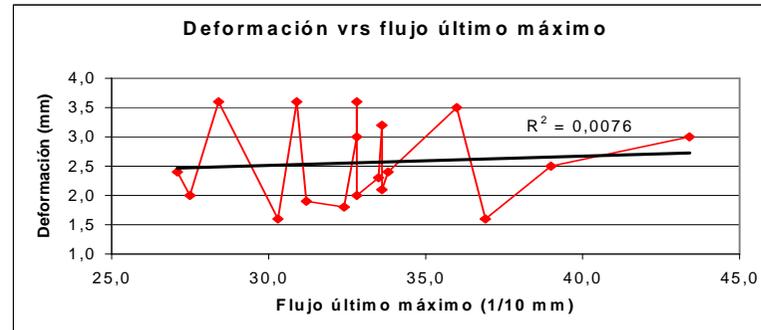
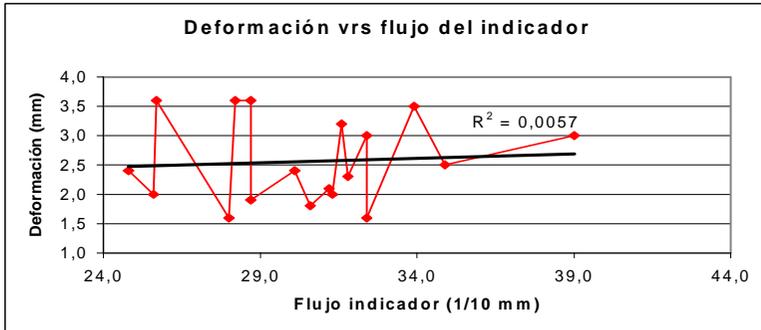
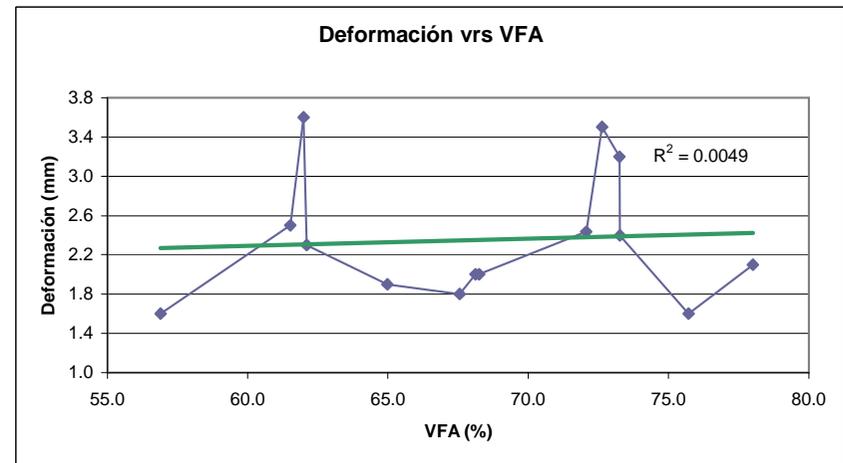
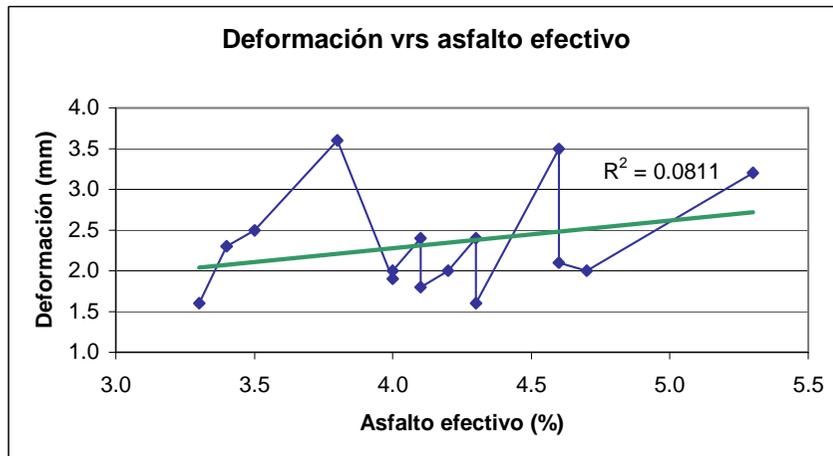
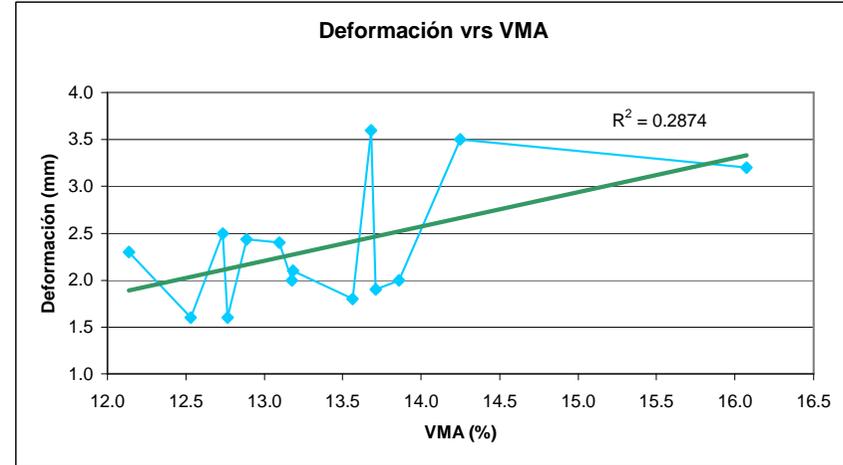
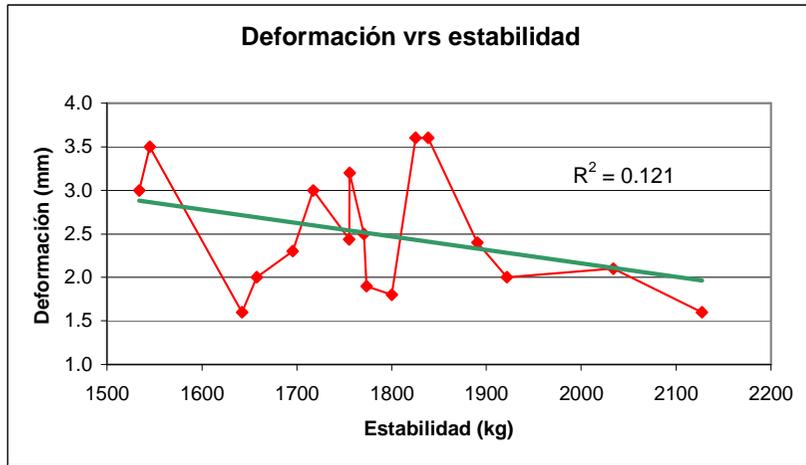


Gráfico No. 4: Propiedades de diseño: Estabilidad, VMA, VFA, asfalto efectivo



De estos gráficos se puede comentar:

Se observa una tendencia a que las deformaciones aumenten conforme aumenta el porcentaje de asfalto efectivo. Comportamiento que concuerda con el comportamiento esperado.

En cuanto a la estabilidad, se observa una tendencia decreciente, es decir a mayor estabilidad se reporta una menor deformación. Este comportamiento concuerda con el comportamiento esperado.

Se observa una marcada tendencia que a medida que aumenta el VMA la deformación plástica aumenta.

Se observa un comportamiento variable, no se logra establecer una tendencia clara de aumento o disminución de la deformación permanente en función de los vacíos llenos con asfalto. Sin embargo trazando una línea de mejor ajuste se observa un ligera tendencia de aumento de la deformación conforme aumentan los vacíos llenos con asfalto.

En todos los casos se obtienen correlaciones bajas entre la deformación y las distintas propiedades de diseño.

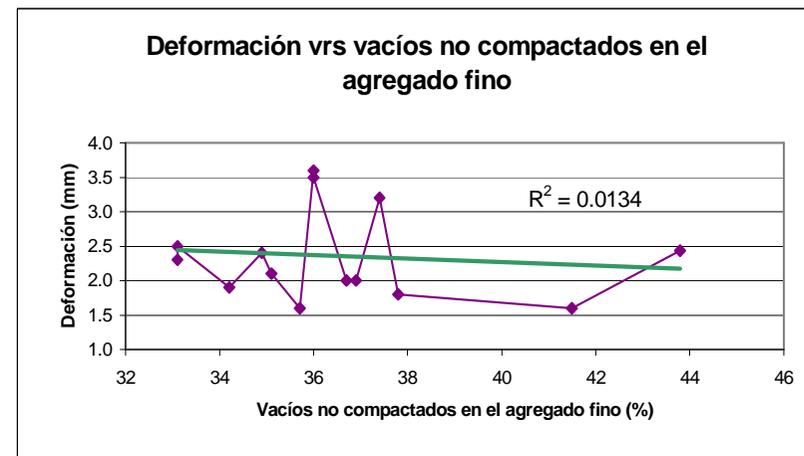
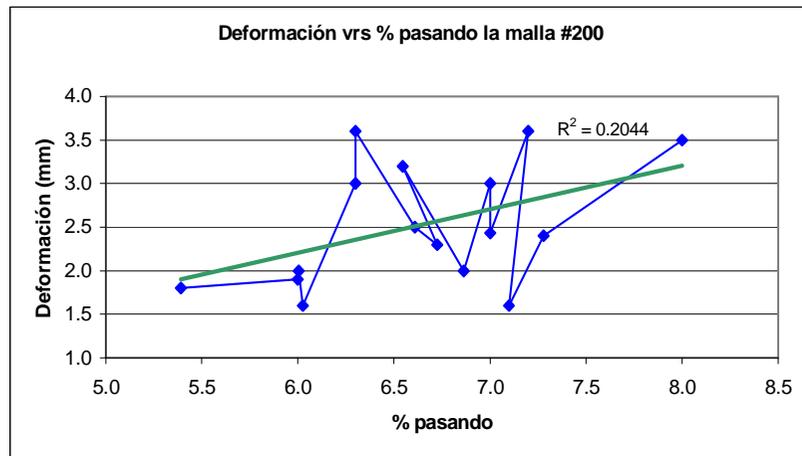
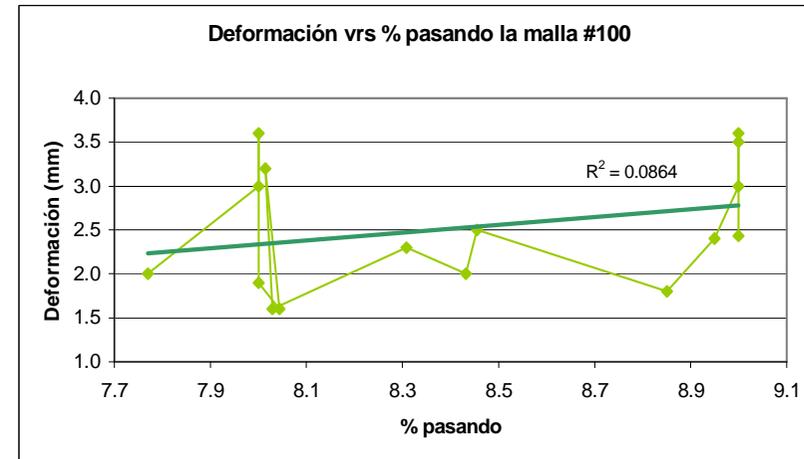
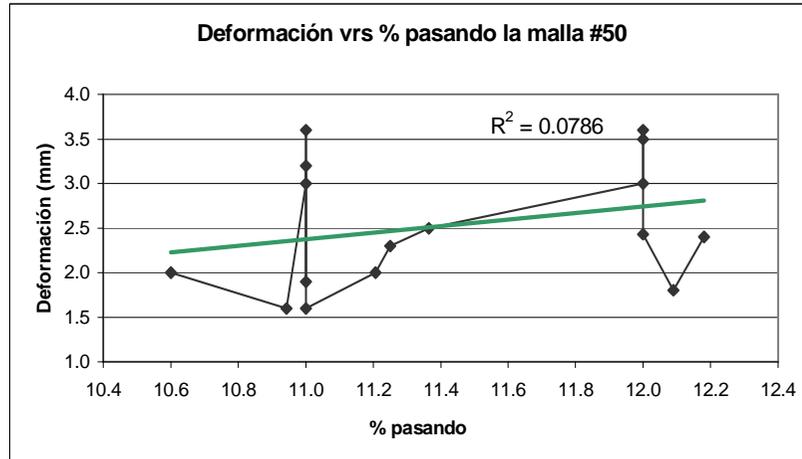
Se hizo un análisis de varianza para determinar como afectaban estas propiedades a la deformación medida en laboratorio. Los resultados se presentan en la Tabla No. 10.

Tabla No. 10: Resultados del análisis de varianza hecho para las propiedades de diseño.

Parámetro	Significancia del factor experimental			
	Tipo de ligante	Contenido efectivo de asfalto	VMA	VFA
Deformación	Sí	No	Sí	Sí

Al 90% de confianza hay evidencia estadística para afirmar que un cambio en el tipo de ligante, en los vacíos en el agregado mineral y en los vacíos llenos con asfalto efectivo, determinan cambios significativos en la deformación plástica medida en laboratorio.

Gráfico No. 5: Propiedades de los agregados.



Se observa una tendencia a que la deformación disminuya conforme los vacíos no compactados en el agregado fino aumentan. Se observa como la mayoría de las muestras incumplen el valor mínimo normado para nuestro país de 40%. La tendencia mostrada por los gráficos concuerdan con el comportamiento esperado, ya que es sabido que esta propiedad asegura un alto grado de fricción interna del agregado fino y una buena resistencia a la deformación plástica. Las correlaciones obtenidas son muy bajas en todos los casos.

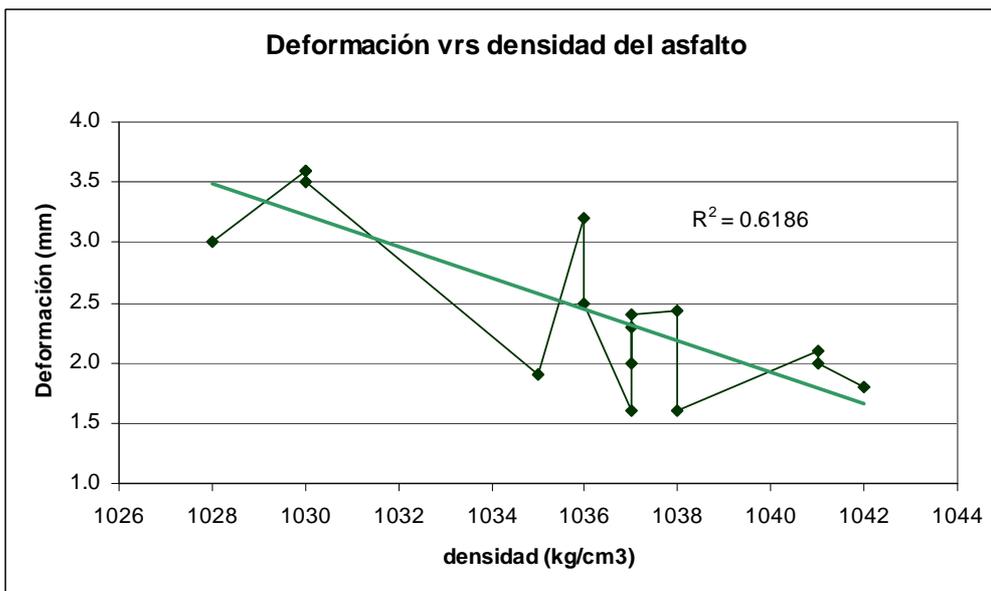
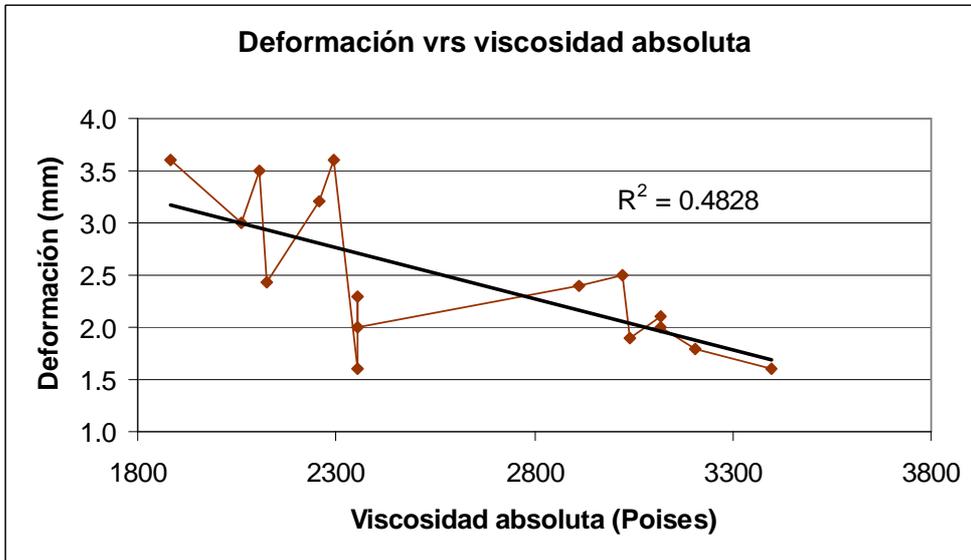
Se hizo un análisis de varianza para determinar como afectaban algunas de estas propiedades a la deformación medida en laboratorio. Los resultados se presentan en la Tabla No. 11.

Tabla No. 11: Resultados del análisis de varianza hecho para las propiedades de los agregados.

Parámetro	Significancia del factor experimental	
	Tipo de ligante	Vacíos no comp. Agregado fino
Deformación	Sí	Sí

Al 90% de confianza hay evidencia estadística para afirmar que un cambio en el tipo de ligante y en los vacíos no compactados en el agregado fino, determinan cambios significativos en la deformación plástica medida en laboratorio.

Gráfico No. 6: Propiedades del asfalto



La tendencia mostrada en estos gráficos es que a medida que se incrementa la viscosidad y la densidad del asfalto, la deformación plástica tiende a disminuir, comportamiento que resulta fácil de entender ya que si bien es cierto la estructura granular es la que resiste la mayor parte de la deformación el asfalto contribuye en algo. Se obtienen correlaciones buenas de 0.70 y 0.79 respectivamente.

Se hizo un análisis de varianza para determinar como afectaban algunas de estas propiedades a la deformación medida en laboratorio. Los resultados se presentan en la Tabla No. 12.

Tabla No. 12: Resultados del análisis de varianza hecho para las propiedades del asfalto.

Parámetro	Significancia del factor experimental	
	Tipo de ligante	Densidad a 15°C
Deformación	Sí	Sí

Al 90% de confianza hay evidencia estadística para afirmar que un cambio en el tipo de ligante y en la densidad a 15°C del ligante asfáltico, determinan cambios significativos en la deformación plástica medida en laboratorio.

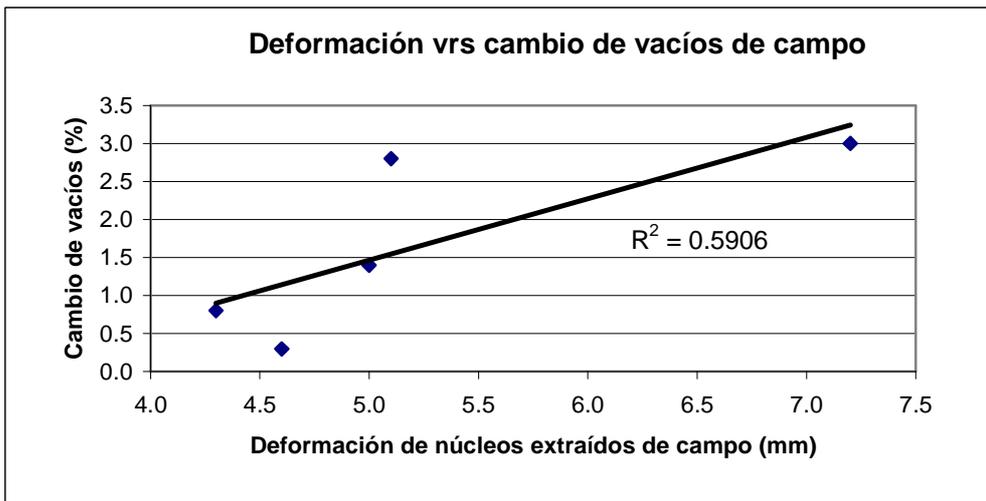
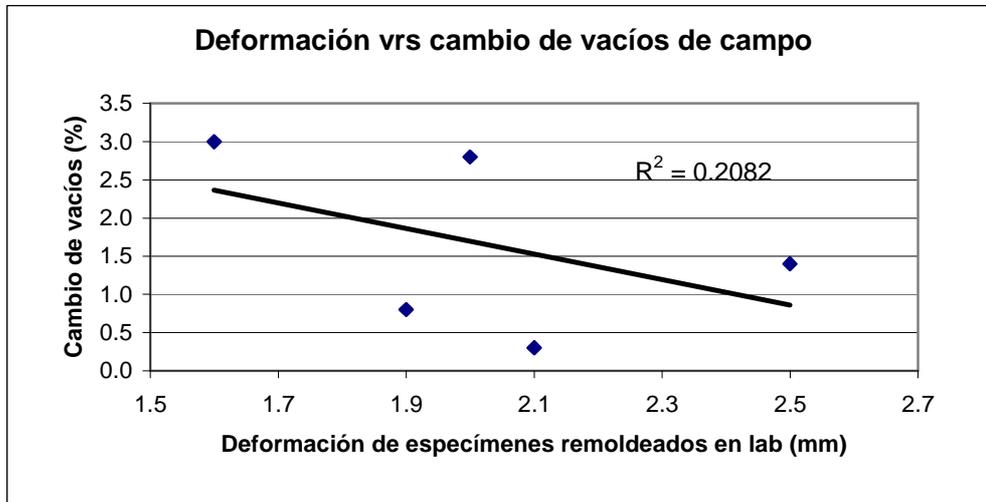
3.4 Cambio en los vacíos iniciales

Con el fin de determinar cómo variaron los vacíos a lo largo del tiempo se extrajeron núcleos en algunos de los puntos muestreados en el año 2002 y 2003 y se obtuvieron los vacíos de campo. En la Tabla No.13 se presentan los resultados obtenidos y en el gráfico No. 7 se ilustran las correlaciones entre la deformación y el cambio de vacíos.

Tabla No. 13: Cambio de vacíos de campo

ID	Fecha muestreo	Vacios 1	Def (mm) remoldeo	Def (mm) núcleos	ID	Fecha extracción	Vacios 2
1511-02	24/10/2002	8.0	1.6	7.2	0317-05	20/04/2005	5.0
064-03	24/01/2003	8.4	2.0	5.1	0309-05	20/04/2005	5.6
076-03	30/01/2003	7.2	1.9	4.3	0308-05	20/04/2005	6.4
111-03	06/02/2003	4.6	2.5	5.0	0319-05	20/04/2005	3.2
158-03	20/02/2003	4.0	2.1	4.6	0307-05	20/04/2005	3.7

Gráfico No. 7: Relación entre la deformación y el cambio de vacíos de campo.



Se observa una tendencia creciente entre la deformación medida en núcleos extraídos de campo y el cambio de vacíos. Existe una buena correlación entre estas dos variables (0.77).

La tendencia que se observa entre la deformación de los especímenes remoldeados en laboratorio y el cambio de vacíos es decreciente y la correlación entre ambas variables es inferior al 50%.

4. COMENTARIOS

De los resultados de la planta 1 se puede comentar que no se encontró correlación entre el flujo medido en distintos puntos de la curva estabilidad – flujo y la deformación plástica medida en laboratorio con la pista de ensayo de laboratorio (APA). Así como tampoco se encontró una buena correlación entre las deformaciones de laboratorio y las deformaciones de campo.

Se encontró que los siguientes parámetros afectaban de forma significativa la deformación plástica: tipo de ligante, VMA, VFA, vacíos no compactados en el agregado fino, densidad del ligante a 15°C.

PLANTA 2

5. MATERIA PRIMA

5.1 Ligante asfáltico

En cada muestreo realizado, se obtuvo una copia del certificado de calidad del asfalto con el cual se fabricó la mezcla asfáltica. En la Tabla No. 12 se presentan los valores reportados por RECOPE para la planta 2.

Tabla No. 14: Propiedades fisico-químicas del asfalto. Valores reportados por RECOPE.

Propiedad	Unidad	Fecha de muestreo		
		29/09/03	01/10/03	21/10/03
Densidad a 15°C	kg/cm ³	1041	1041	1040
Viscosidad a 60°C	P	3241	3153	3099
Viscosidad a 135°C	cSt	542	517	585
Viscosidad a 165°C	CP	147	129	164
Viscosidad a 60°C TFO	P	10630	8810	7090
Penetración a 25°C	0,1mm	67	65	71
Punto de chispa	°C	264	262	242
Solubilidad en tricloroetano	%	99,85	99,85	99,99
Pérdida de masa en TFO	%	0,66	0,66	0,74
Índice de susceptibilidad térmica (VTS)	-	3,5	3,5	3,4
Razón de viscosidades	-	3	3,0	2
Temperatura de mezclado	°C	159-164	156-161	161-167
Temperatura compactación	°C	147-152	145-150	149-154

El asfalto utilizado en el año 2003 para la elaboración de las mezclas asfálticas, clasifica según su viscosidad absoluta a 60°C, como un AC-30, el cual tiene un rango de variación entre los 2400 y los 3600 Poises.

5.2 Agregado

5.2.1 Caracterización de los agregados

En la Tabla No. 13 se presenta la caracterización de los agregados utilizados por la planta 2, para la producción de mezcla asfáltica en caliente. Son agregados provenientes del río Naranjo, ubicado en la Región Pacífica de nuestro país.

Tabla No. 15: Caracterización de los agregados utilizados por la planta 2.

Fecha muestreo		29/09/2003	01/10/2003	21/10/2003
Agregados				
Caras fracturadas	Grueso	100%	99%	100%
	Intermedio	99%	99%	100%
Partículas planas y elongadas	Grueso	0,0%	0,0%	0,0%
	Intermedio	0,0%	0,0%	0,0%
Dosificación (%)	Fino	50,0	51,0	65,0
	Intermedio	40,0	39,0	25,0
	Grueso	10,0	10,0	10,0
% Humedad Planta	Fino	5,1	6,5	2,6
	Intermedio	3,3	2,7	2,5
	Grueso	2,0	3,1	2,4
	Combinado	4,1	4,7	2,6
% Humedad Lanamme	Fino	4,4	6,2	2,9
	Intermedio	3,5	2,4	1,7
	Grueso	2,9	3,3	3,2
	Combinado	3,9	4,4	2,6
Equivalente de Arena		56	40	55
Vacíos no compactados		37,7	39,8	36
Gbs		2,58	2,58	2,55
Absorción		2,2	2,2	2,8

En la Tabla No.16 se presentan las granulometrías de trabajo obtenidas de la planta y las obtenidas mediante extracciones en el laboratorio.

Tabla No. 16: Granulometrías empleadas.

Fecha de muestreo	29/9/2003		01/10/2003		21/10/2003	
Granulometría	Planta	Lanamme	Planta	Lanamme	Planta	Lanamme
19 mm	100	100	100	100	100	100
12,5mm	91	93	91	91	91	92
9,5 mm	77	75	78	74	82	76
No.4	48	39	48	42	50	48
No.8	32	24	32	28	31	31
No,16	21	16	22	20	20	20
No.30	14	12	15	15	13	14
No.50	11	9	11	11	10	10
No.100	-	7	-	9	-	8
No.200	6,1	5,7	6,2	7,1	4,9	6

6. RESULTADOS OBTENIDOS

Se presentan los resultados obtenidos de parámetros Marshall y deformación permanente medida en laboratorio y en campo y los valores de módulo resiliente obtenido por medio de tensión indirecta.

Se remoldearon especímenes usando el mazo Marshall y el compactador giratorio. Además se analizaron núcleos extraídos de campo.

6.1 Parámetros Marshall

En la Tabla No.17 se presentan los valores obtenidos de porcentaje de vacíos, de estabilidad y del flujo medido en distintos puntos sobre la curva de estabilidad-flujo, obtenida de los especímenes remoldeados en laboratorio.

6.2 Ensayos de desempeño

Se remoldearon en el compactador giratorio seis especímenes de 15.0 cm de diámetro y 7.5 cm de espesor, con un nivel de vacíos variando entre 6.0 y 8.0%. Estos especímenes fueron ensayados en la pista de laboratorio de Georgia (APA) a una temperatura de 60°C, para determinar la deformación después de 8000 ciclos de carga.

Este procedimiento se hizo tanto para los especímenes remoldeados en el laboratorio como para los núcleos extraídos de campo, los cuales fue necesario cortar con una sierra. En la Tabla No. 18 se presentan los promedios de las deformaciones obtenidas para laboratorio y en la Tabla No. 19 se presentan las deformaciones medidas en los núcleos de campo. En la Tabla No.20 se presentan los valores obtenidos para el módulo resiliente tanto en los especímenes de laboratorio como en los núcleos de campo.

Tabla No. 17: Parámetros Marshall. Valores promedio.

Parámetro	Fecha de muestreo		
	29/09/03	01/10/03	21/10/03
Cont. asfalto (%PTM)	6.90	6.50	6.7
Vacíos (%)	6.3	2.7	4.0
Estabilidad (kg)	1807	1837	1810
Flujo a (mm-1)	41.1	32.1	30.6
Flujo b (mm-1)	39.0	33.8	32.5
Flujo c (mm-1)	31.2	30.8	26.1
Flujo d (mm-1)	37.1	32.5	30.8
Flujo e (mm-1)	22.3	20.4	16.5
Flujo f (mm-1)	21.8	20.4	18.0

Donde:

Flujo a corresponde al flujo medido por el equipo

Flujo b corresponde al flujo medido en el último máximo

Flujo c corresponde al flujo medido en el primer máximo

Flujo d corresponde al flujo medido en la tangente horizontal

Flujo e corresponde al flujo medido al 95% del primer máximo

Flujo f corresponde al flujo medido al 95% de la tangente horizontal

Tabla No. 18: Deformaciones medidas en laboratorio.

Parámetro	Fecha de muestreo		
	29/09/03	01/10/03	21/10/03
Vacíos (%)	7.5	8.5	7.4
Deformación (mm)	2.4	3.7	2.6

Tabla No. 19: Deformaciones medidas en los núcleos extraídos del campo.

Parámetro	Fecha de muestreo		
	29/09/03	01/10/03	21/10/03
Vacíos (%)	9.7	4.1	7.9
Deformación (mm)	6.3	5.1	5.3

Tabla No. 20: Valores de módulo resiliente obtenidos, por tensión indirecta, de las muestras remoldeadas en laboratorio, y de los núcleos extraídos del campo, en MPa

Fecha de muestreo	Especímenes de laboratorio			Núcleos de campo		
	29/09/03	01/10/03	21/10/03	29/09/03	01/10/03	21/10/03
Carga 1	5380	3866	5019	1939	2910	2493
Carga 2	4700	3462	4592	1561	2579	1999

PLANTA 3

7. MATERIA PRIMA

7.1 Ligante asfáltico

En cada muestreo realizado, se obtuvo una copia del certificado de calidad del asfalto con el cual se fabricó la mezcla asfáltica. En la Tabla No. 21 se presentan los valores reportados por RECOPE para la planta 3.

Tabla No. 21: Propiedades físico-químicas del asfalto. Valores reportados por Recope.

Propiedad	Unidad	Fecha de muestreo					
		13/01/04	15/01/04	04/02/04	11/02/04	12/02/04	25/02/04
Densidad a 15°C	kg/cm ³	1034	1037	1040	1041	1041	1032
Viscosidad a 60°C	P	3200	3104	3300	3300	3300	3050
Viscosidad a 135°C	cSt	473	549	525	545	545	468
Viscosidad a 165°C	cP	127	152	138	145	145	126
Viscosidad a 60°C TFO	P	6510	7829	7440	8520	8520	7490
Penetración a 25°C	0,1mm	63	70	65	69	69	63
Punto de chispa	°C	268	240	255	254	254	278
Solubilidad en tricloroetano	%	99,91	99,4	99,94	99,9	99,9	98,8
Pérdida de masa en TFO	%	0,32	0,67	0,23	0,46	0,46	0,32
Índice de susceptibilidad térmica (VTS)	-	3,6	3,4	3,5	3,4	3,4	3,5
Razón de viscosidades	-	2	2,5	2	3	3	2
Temperatura de mezclado	°C	155-161	159-165	157-163	158-164	158-164	155-161
Temperatura compactación	°C	144-149	147-152	146-151	147-152	147-152	144-149

El asfalto empleado en el año 2004 para la elaboración de las mezclas asfálticas clasifica según su viscosidad absoluta a 60°C, como un AC-30, el cual tiene un rango de variación entre los 2400 y los 3600 Poises.

7.2 Agregado

7.2.1 Caracterización de los agregados

En la Tabla No. 22 se presenta la caracterización de los agregados utilizados por la planta 3, para la producción de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados provienen del Río Toro Amarillo.

Tabla No. 22: Caracterización de los agregados utilizados por la planta 3.

Fecha muestreo		13/01/2004		15/01/2004		04/02/2004	
Agregados							
Caras fracturadas (2 ó más)	Grueso	100		98		96	
	Intermedio	-		97		98	
Partículas planas y elongadas	Grueso	0,0		0,0		0,0	
	Intermedio	-		0,0		0,0	
Dosificación (%)	Fino	34,0		34,0		33,0	
	Intermedio	29,0		27,0		28,0	
	Grueso	37,0		39,0		39,0	
% Humedad Planta	Fino	8,0		7,2		8,3	
	Intermedio	3,6		3,4		2,2	
	Grueso	1,8		2,8		1,3	
	Combinado	4,4		4,5		3,9	
% Humedad Lanamme	Fino	8,4		7,1		7,9	
	Intermedio	4,4		4,1		2,7	
	Grueso	3,0		2,7		2,4	
	Combinado	5,2		4,6		4,3	
Equivalente de Arena		72		73		75	
Vacíos no compactados		42,3		41		42,4	
Gbs		2,63		2,62		2,63	
Absorción		2,2		2,0		1,9	
Granulometría		Planta	Lanamme	Planta	Lanamme	Planta	Lanamme
19 mm		98	100	99	99	100	99
12,5mm		80	79	83	80	82	81
9,5 mm		66	65	67	66	68	67
No.4		41	42	42	43	43	43
No.8		26	29	27	29	27	28
No,16		18	21	18	20	18	19
No.30		13	16	13	15	12	14
No.50		10	11	10	11	9	10
No.100		-	8	-	8	-	8
No.200		4,5	6	4,6	6	5,3	5

Tabla No.23: Caracterización de los agregados utilizados por la planta 3 (continuación).

Fecha muestreo		11/02/2004		12/02/2004		25/02/2004	
Agregados							
Caras fracturadas (2 ó más)	Grueso	99		99		PEND.	
	Intermedio	99		99		PEND.	
Partículas planas y elongadas	Grueso	0,0		0,0		PEND.	
	Intermedio	0,0		0,0		PEND.	
Dosificación (%)	Fino	33,0		33,0		33,0	
	Intermedio	28,0		28,0		28,0	
	Grueso	39,0		39,0		39,0	
% Humedad Planta	Fino	9,7		9,9		6,4	
	Intermedio	4,1		4,0		3,3	
	Grueso	2,8		1,9		2,1	
	Combinado	5,4		5,1		3,9	
% Humedad Lanamme	Fino	8,5		10,2		N.I	
	Intermedio	4,6		3,5		N.I	
	Grueso	2,8		3		N.I	
	Combinado	5,2		5,5		N.I	
Equivalente de Arena		73		73		N.I	
Vacíos no compactados		41,3		41,3		N.I	
Gbs		2,62		2,62		N.I	
Absorción		2,0		2,0		N.I	
Granulometría		Planta	Lanamme	Planta	Lanamme	Planta	Lanamme
19 mm		100	100	100	100	99	100
12,5mm		86	79	86	84	76	79
9,5 mm		70	64	70	68	63	60
No.4		45	38	45	42	42	36
No.8		29	26	29	28	26	24
No,16		19	18	19	20	17	17
No.30		13	14	13	14	13	13
No.50		10	10	10	10	9	9
No.100		-	7	-	7	-	7
No.200		4,4	5	4,4	5,1	4,3	5

8. RESULTADOS OBTENIDOS

Se presentan los resultados obtenidos de parámetros Marshall y deformación permanente medida en especímenes remoldeados en laboratorio y en núcleos extraídos de campo y valores de módulo resiliente obtenido por medio de tensión indirecta.

La Planta 3 emplea agregados provenientes de la fuente Río Toro amarillo. Se remoldearon especímenes utilizando el mazo Marshall y el compactador giratorio.

8.1 Parámetros Marshall

En la Tabla No. 23 se presentan los valores obtenidos de porcentaje de vacíos, de estabilidad y del flujo medido en distintos puntos sobre la curva estabilidad-flujo, obtenida de los especímenes remoldeados en laboratorio.

8.2 Ensayos de desempeño

Se remoldearon en el compactador giratorio seis especímenes de 15.0 cm de diámetro y 7.5 cm de espesor, con un nivel de vacíos variando entre 6.0 y 8.0%. Estos especímenes fueron ensayados en la pista de ensayo de laboratorio (APA) a una temperatura de 60°C, para determinar la deformación después de 8000 ciclos de carga.

Este procedimiento se hizo tanto para los especímenes remoldeados en el laboratorio como para los núcleos extraídos de campo. En la Tabla No. 24 se presentan los promedios de las deformaciones obtenidas para los especímenes remoldeados en laboratorio y en la Tabla No.25 se presentan las deformaciones medidas en los núcleos extraídos de campo. En la Tabla No.26 se presentan los valores para el módulo resiliente obtenidos de las muestras remoldeadas en laboratorio y en la Tabla No.27 se presentan los valores para el módulo resiliente obtenidos de los núcleos extraídos de campo.

Tabla No. 23: Parámetros Marshall. Valores promedio.

Parámetro	Fecha de muestreo					
	13/01/04	15/01/04	04/02/04	11/02/04	12/02/04	25/02/04
Cont. asfalto (%PTM)	5.14	5.33	5.56	5.22	5.38	4.85
Vacíos (%)	4.0	4.1	6.0	6.7	5.7	3.6
Estabilidad (kg)	2306	1834	1644	2215	1916	2104
Flujo a (mm-1)	22.4	22.8	29.1	23.4	23.0	28.9
Flujo b (mm-1)	20	25.8	34.3	26.8	25.5	30.4
Flujo c (mm-1)	16	21.6	25.4	22.7	23.1	24.3
Flujo d (mm-1)	18	23.9	33.2	24.7	24.2	28.6
Flujo e (mm-1)	10	14.5	17.0	12.8	15.1	15.9
Flujo f (mm-1)	10	14.5	17.0	12.8	15.1	16.3

Donde:

Flujo a corresponde al flujo medido por el equipo

Flujo b corresponde al flujo medido en el último máximo

Flujo c corresponde al flujo medido en el primer máximo

Flujo d corresponde al flujo medido en la tangente horizontal

Flujo e corresponde al flujo medido al 95% del primer máximo

Flujo f corresponde al flujo medido al 95% de la tangente horizontal

Tabla No. 24: Deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio.

	Fecha de muestreo					
Parámetro	13/01/04	15/01/04	04/02/04	11/02/04	12/02/04	25/02/04
Vacíos (%)	7.3	6.9	6.7	6.8	7.1	7.8
Deformación (mm)	3.2	2.3	1.8	1.3	2.0	3.1

Tabla No. 25: Deformaciones medidas en núcleos extraídos de campo.

	Fecha de muestreo					
Parámetro	13/01/04	15/01/04	04/02/04	11/02/04	12/02/04	25/02/04
Vacíos (%)	10.4	9.4	11.1	6.8	6.6	9.8
Deformación (mm)	8.8	8.8	5.7	3.8	3.9	8.3

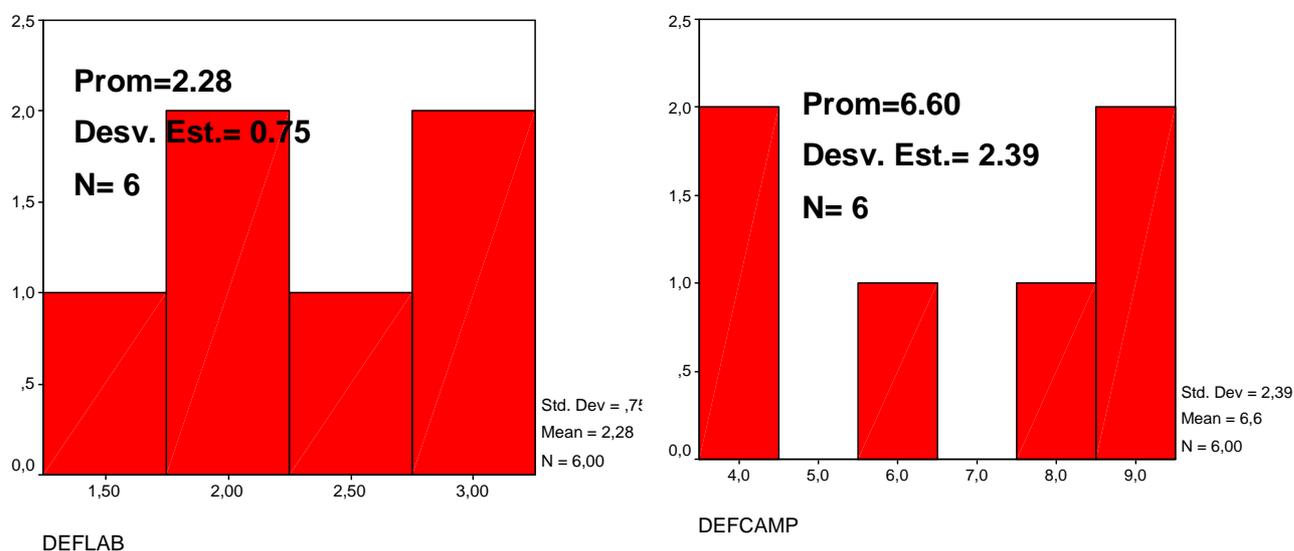
Tabla No. 26: Valores de módulo resiliente obtenidos, por tensión indirecta, de las muestras remoldeadas en laboratorio, en MPa

	Fecha de muestreo					
Carga	13/01/04	15/01/04	04/02/04	11/02/04	12/02/04	25/02/04
2000 N	4788	5253	6721	6953	5102	4263
3000 N	4307	4950	6417	6764	4776	3912

Tabla No. 27: Valores de módulo resiliente obtenidos, por tensión indirecta, de los núcleos extraídos de campo, en MPa.

	Fecha de muestreo					
Carga	13/01/04	15/01/04	04/02/04	11/02/04	12/02/04	25/02/04
2000 N	2295	2097	1972	2934	3246	2811
3000 N	1989	1681	1800	2549	3030	2465

Gráfico No. 8: Histograma de deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio y en núcleos extraídos de campo. Planta 3.



8.3 Análisis de resultados.

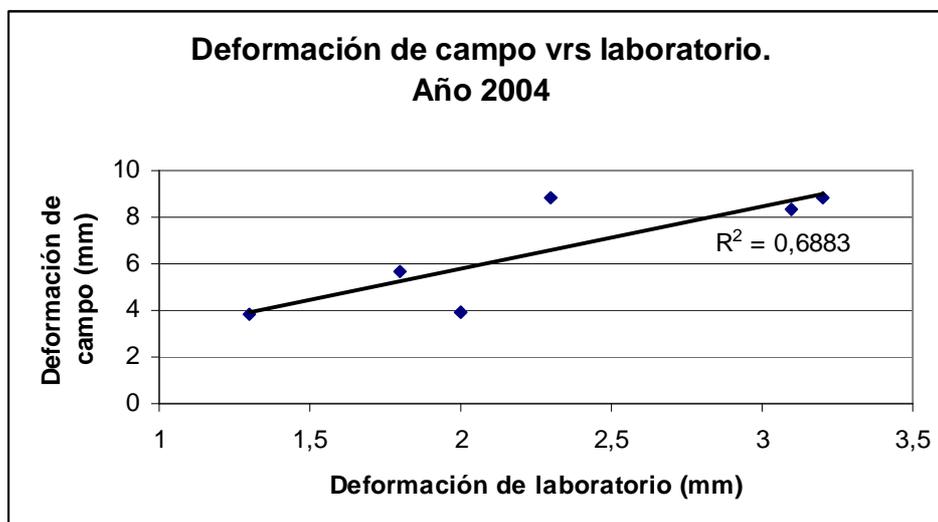
Para determinar si existía relación entre las deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio y las medias en los núcleos de campo se realizó un análisis de regresión. Los resultados se muestran en la Tabla No.28.

Tabla No. 28: Resultados del análisis de regresión

Año	R	R ²
2004	0.83	0.688

Para ilustrar mejor el análisis de regresión, se presenta el gráfico No. 9, donde se observa la relación entre las ambas deformaciones.

Gráfico No. 9: Relación entre deformaciones mediadas en los núcleos de campo y en los especímenes remoldeados en laboratorio.



Para determinar si existía correlación entre la deformación medida en los especímenes remoldeados en laboratorio y el flujo Marshall, medido en distintos puntos sobre la curva de estabilidad-flujo, se realizaron distintos gráficos, que se muestran en el Gráfico No.10.

Según se observa en los gráficos, no existe una relación lineal entre deformación plástica medida en especímenes remoldeados en laboratorio y el flujo. Los gráficos muestran curvas irregulares, las cuales son difíciles de ajustar.

Para analizar el efecto que tienen otras propiedades, tales como las propiedades de diseño (% asfalto, estabilidad, VMA, VFA), las propiedades combinadas del agregado (% pasando la malla #50, % pasando la malla #100%, y el porcentaje de vacíos no compactados en el agregado fino) y algunas propiedades del asfalto tales como la densidad y la viscosidad absoluta, sobre la deformación plástica medida en laboratorio, se presentan gráficos que muestran la tendencia que sigue la deformación plástica de laboratorio al aumentar o disminuir alguna de estas propiedades.

**Gráfico No. 10: Deformación plástica versus flujo (medido en distintos puntos sobre la curva estabilidad-flujo).
Planta 3**

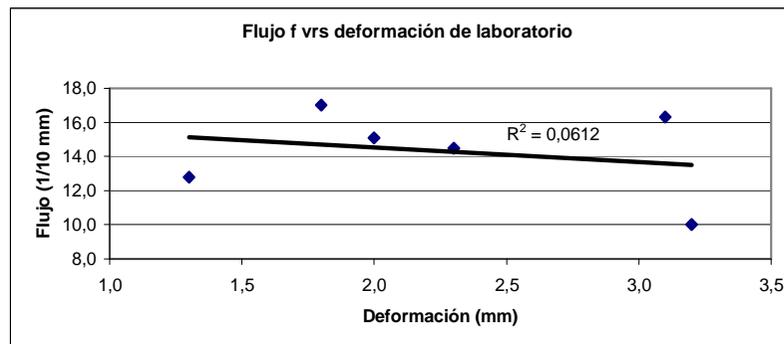
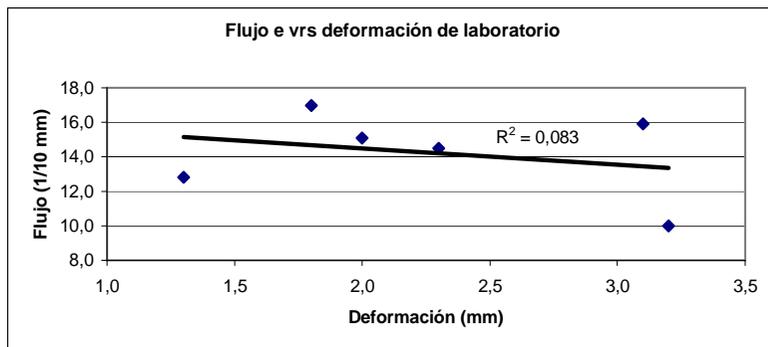
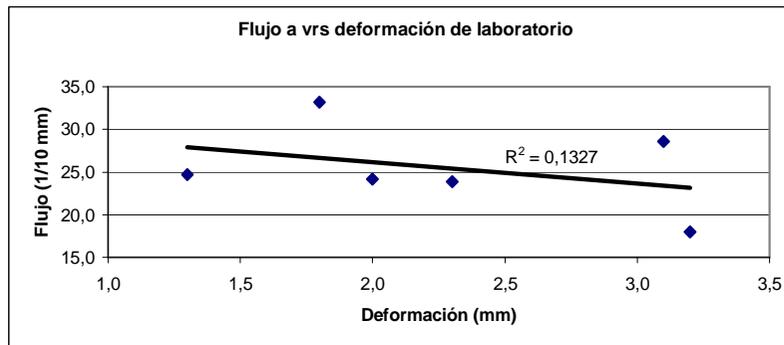
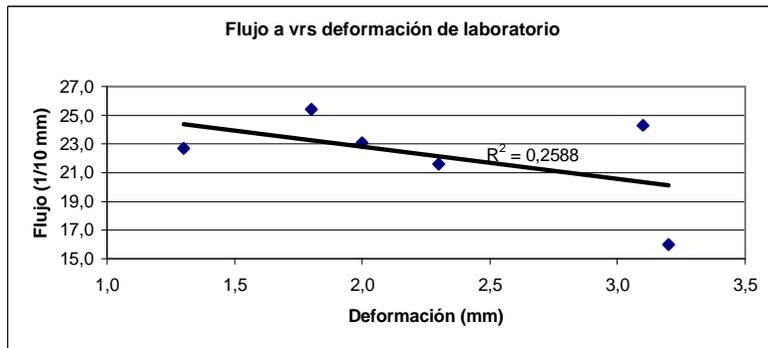
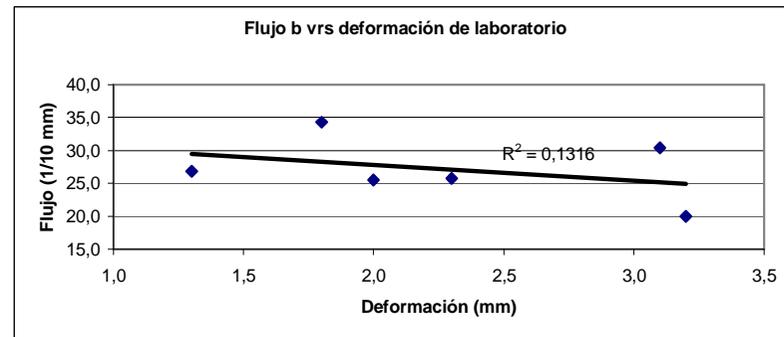
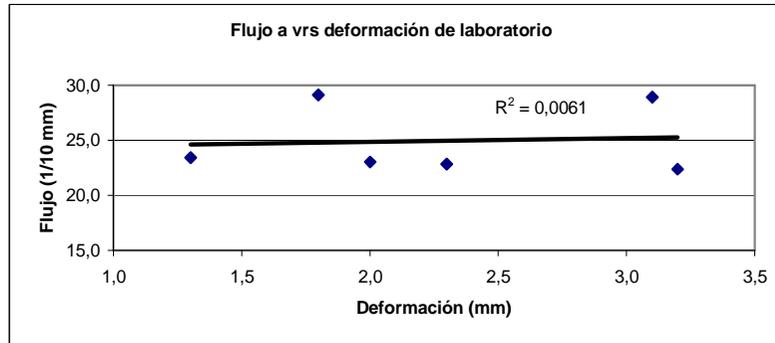
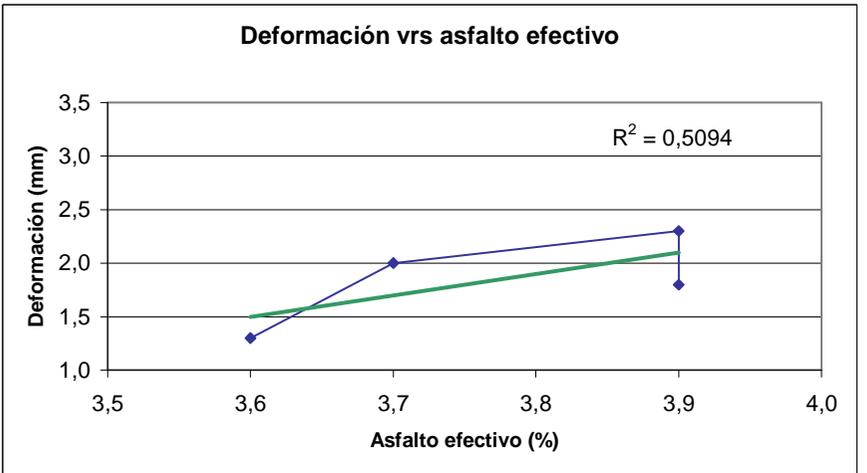
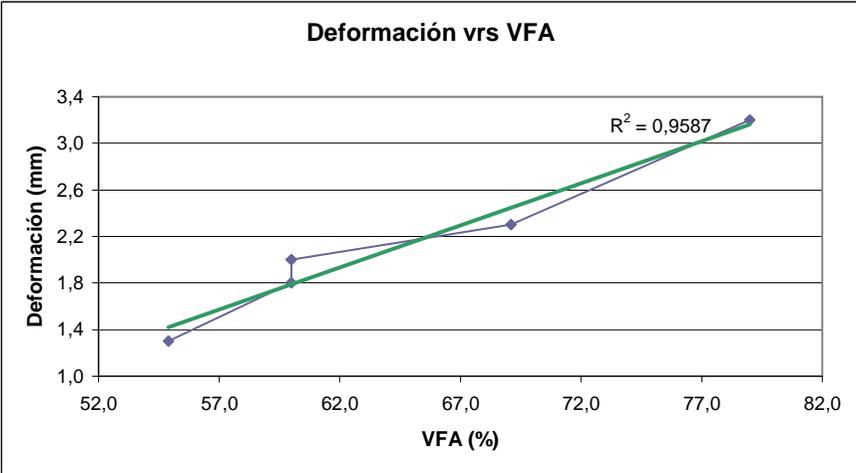
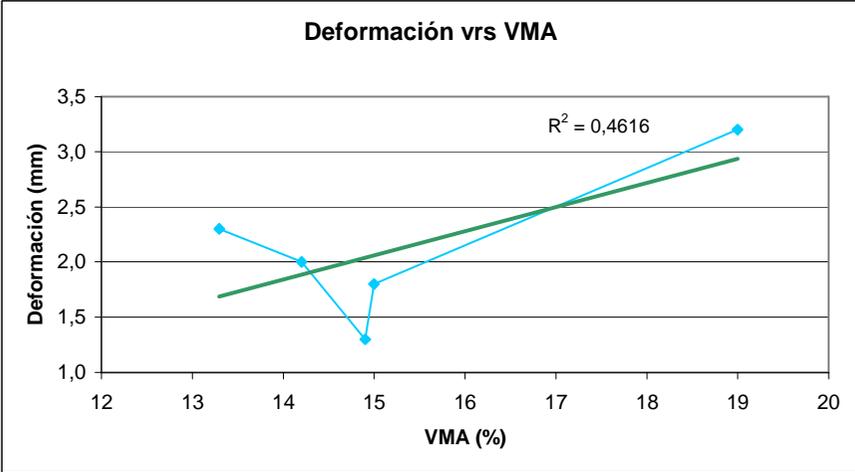
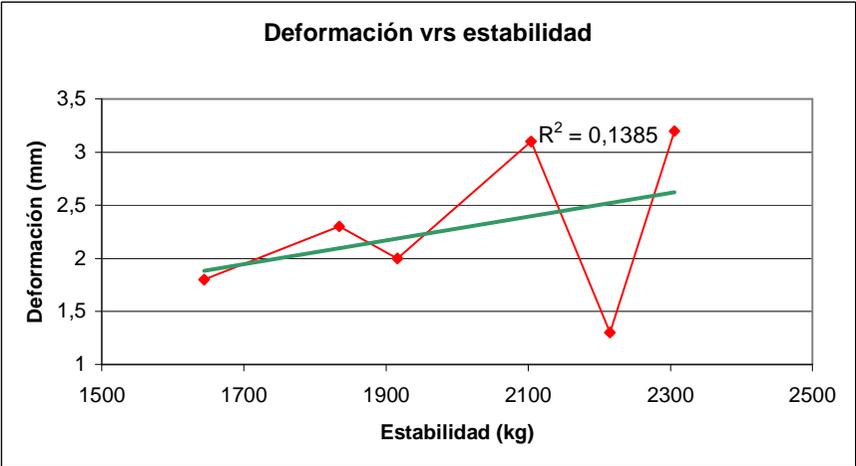


Gráfico No. 11: Propiedades de diseño: Estabilidad, VMA, VFA, asfalto efectivo. Planta 3



De estos gráficos se puede comentar:

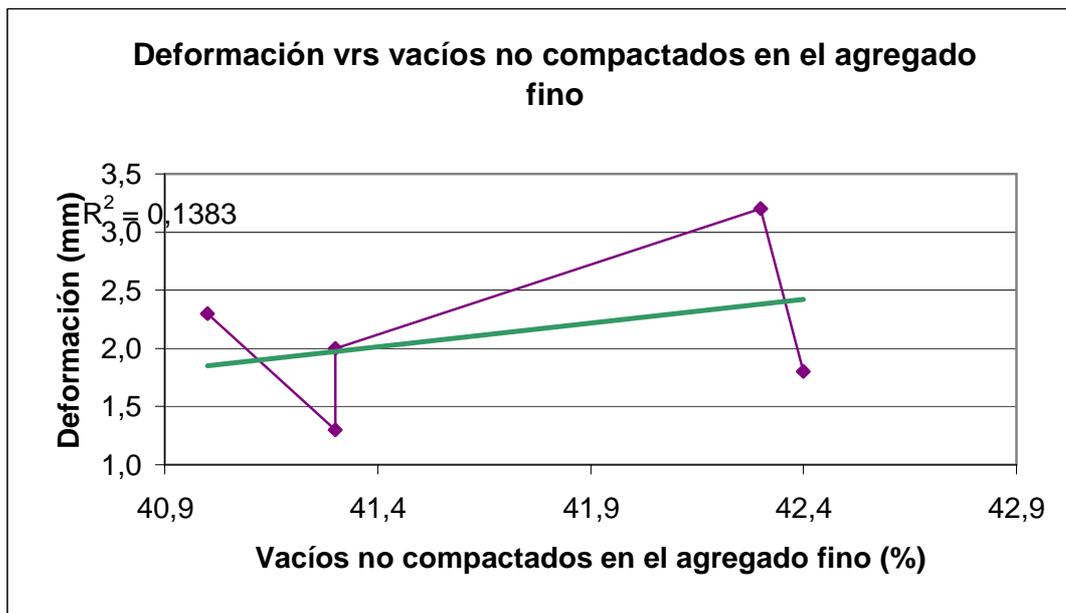
Se observa una tendencia a que las deformaciones aumenten conforme aumenta el porcentaje de asfalto efectivo. Comportamiento que concuerda con el comportamiento esperado.

En cuanto a la estabilidad, se observa una leve tendencia creciente, es decir a mayor estabilidad se reporta una mayor deformación. Sin embargo la correlación entre estabilidad y deformación es muy baja (0.37)

Se observa una tendencia que a medida que aumenta el VMA la deformación plástica aumenta.

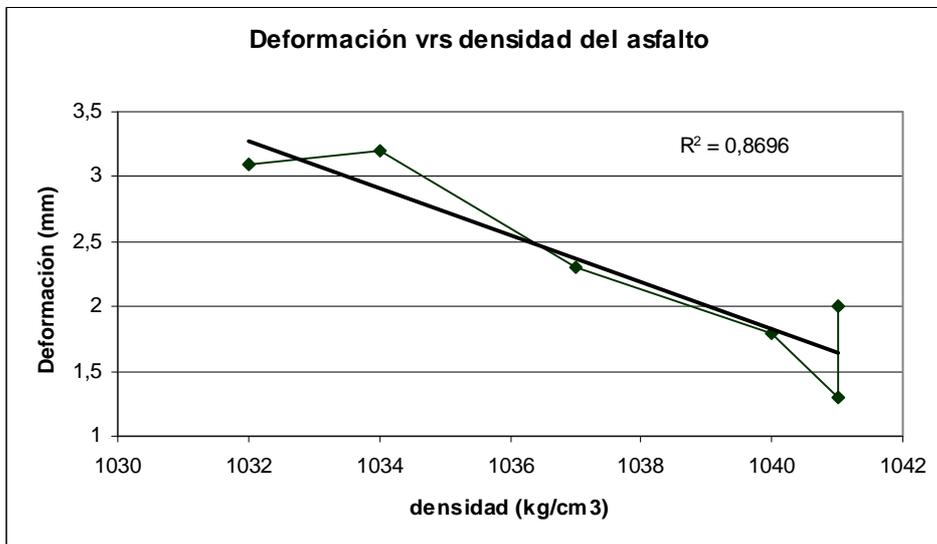
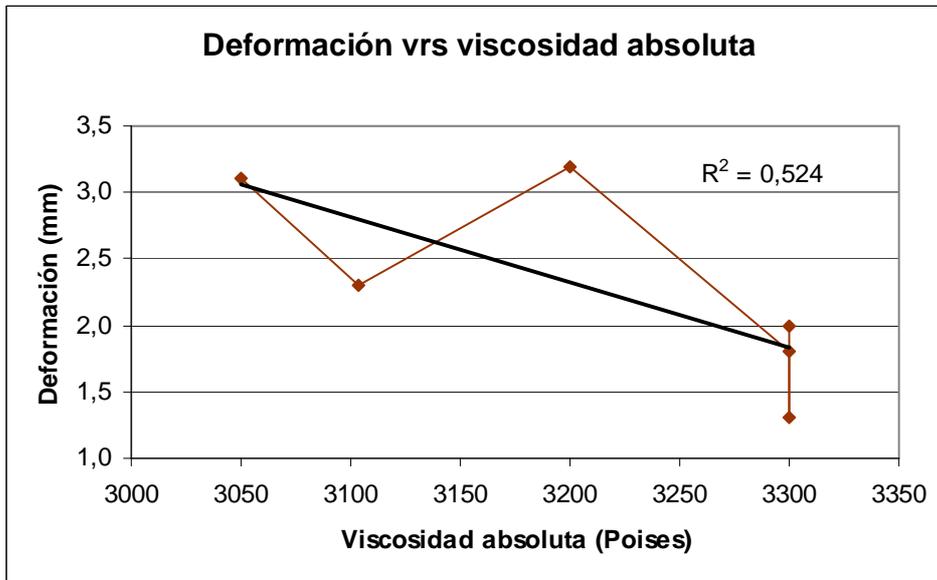
La mejor correlación se presentó entre los vacíos llenos con asfalto (VFA) y la deformación (0.979). Se observa una marcada tendencia a que conforme aumenta el VFA la deformación aumenta.

Gráfico No. 12: Propiedades de los agregados: Vacíos no compactados en el agregado fino.



No se obtiene una buena correlación entre los vacíos no compactados en el agregado fino y la deformación, según se puede observar en el gráfico No. 12, donde se obtuvo una correlación (R) de 0.37%

Gráfico No. 13: Propiedades del asfalto



La tendencia mostrada en estos gráficos es que a medida que se incrementa la viscosidad y la densidad del asfalto, la deformación plástica tiende a disminuir, comportamiento que resulta fácil de entender ya que si bien es cierto la estructura granular es la que resiste la mayor parte de la deformación, el asfalto tiene algún aporte.

Se observa además una buena correlación ($R = 0.93$) entre la densidad del asfalto y la deformación obtenida en laboratorio.

9. COMENTARIOS

De los resultados de la planta 3 se puede comentar que no se encontró correlación entre el flujo medido en distintos puntos de la curva estabilidad – flujo y la deformación plástica medida en laboratorio con la pista de ensayo de laboratorio. Sí se encontró una buena correlación ($R = 0.83$) entre las deformaciones de laboratorio y las deformaciones de campo.

Se determinó que el VMA, el VFA y el asfalto efectivo determinaban correlaciones buenas con la deformación medida en laboratorio.

Hasta el momento, no se ha logrado obtener resultados concluyentes en cuanto a la correlación entre la deformación obtenida en laboratorio y la deformación medida en campo. Esto hace, cada vez mas necesario, la implementación de una pista de ensayo a escala natural.

Otro aspecto a considerar, es el hecho de que para poder discernir mejor entre los distintos parámetros que afectan el desempeño de la mezcla, se requieren condiciones más controladas, por lo que sería factible analizar la posibilidad de fabricar mezcla en el laboratorio y analizarla.

PLANTA 4

10. MATERIA PRIMA

10.1 Ligante asfáltico

En cada muestreo realizado, se obtuvo una copia del certificado de calidad del asfalto con el cual se fabricó la mezcla asfáltica. En la Tabla No. 29 se presentan los valores reportados por RECOPE para la planta 4.

Tabla No. 29: Propiedades físico-químicas del asfalto. Valores reportados por Recope.

Propiedad	Unidad	Fecha de muestreo								
		23/03/04	22/04/04	03/06/04	09/06/04	10/06/04	17/06/04	25/06/04	29/06/04	16/11/04
Densidad a 15°C	kg/cm ³	1039	1043	1043	1041	1041	1037	1041	1041	1039
Viscosidad a 60°C	P	2960	3440	3115	3180	3180	3300	3270	3270	3460
Viscosidad a 135°C	cSt	536	511	532	549	549	494	556	556	568
Viscosidad a 165°C	cP	142	142	148	147	147	145	147	147	149
Viscosidad a 60°C TFO	P		8000	9560	8930	8930	8830	8780	8780	8110
Penetración a 25°C	0,1mm	74	64	70	69	69	68	69	69	71
Punto de chispa	°C		300	268	256	256	290	296	296	252
Solubilidad en tricloroetano	%	99.83	99.34	99.88	99.85	99.85	99.84	99.85	99.85	99.92
Pérdida de masa en TFO	%	0.82	0.12	0.72	0.63	0.63	0.67	0.64	0.64	0.38
Índice de susceptibilidad térmica (VTS)	-	3.4	3.52	3.5	3.4	3.4	3.5	3.4	3.4	3.4
Razón de viscosidades	-	3	2.0	3	3	3	3	3	3	2
Temperatura de mezclado	°C	158-164	158-164	159-165	159-164	159-164	158-164	159-165	159-165	159-165
Temperatura compactación	°C	147-152	146-151	147-152	147-152	147-152	146-151	146-152	146-152	148-153

El asfalto empleado en el año 2004 para la elaboración de las mezclas asfálticas clasifica según su viscosidad absoluta a 60°C, como un AC-30, el cual tiene un rango de variación entre los 2400 y los 3600 Poises.

10.2 Agregado

10.2.1 Caracterización de los agregados

En la Tabla No. 30 se presenta la caracterización de los agregados utilizados por la planta 4, para la producción de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados provienen del Río General.

Tabla No. 30: Caracterización de los agregados utilizados por la planta 3.

Fecha muestreo	23/03/2004		22/04/2004		03/06/2004	
Agregados						
Caras fracturadas	Grueso	100%	97%	98%		
	Intermedio					
Partículas planas y elongadas	Grueso	0,0%	0,0%	0,0%		
	Intermedio					
Dosificación (%)	Fino	41,0	40,0			
	Intermedio	49,0	45,0	45,0		
	Grueso	10,0	15,0	18,3		
% Humedad Lanamme	Combinado	1,7	-	3,5		
Equivalente de Arena	64		61		63	
Vacíos no compactados	35,1		35,2		38,1	
Gbs	2,67		2,71		2,62	
Absorción	1,4		1,4		1,7	
Granulometría						
19 mm	100	100	100	100	100	100
12,5mm	96	97	99	96	93	93
9,5 mm	84	88	90	86	85	85
No.4	52	56	55	53	54	54
No.8	35	37	32	32	32	34
No,16	25	24	20	22	22	24
No.30	18	17	14	16	16	18
No.50	13	12	10	11	11	13
No.100	-	8	-	9	-	9
No.200	5,8	4	5,5	7,3	5,5	6,1

Tabla No.30: Caracterización de los agregados utilizados por la planta 3 (continuación).

Fecha muestreo	09/06/2004		10/06/2004		17/06/2004	
Agregados						
Caras fracturadas	Gueso	97%	97%	97%	96%	
	Intermedio					
Partículas planas y elongadas	Gueso	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
	Intermedio					
Dosificación (%)	Fino	36,7	36,7	36,7	36,7	
	Intermedio	45,0	45,0	45,0	45,0	
	Gueso	18,3	18,3	18,3	18,3	
% Humedad Lanamme	Combinado	2,5	2,1	2,1	3,7	
Equivalente de Arena		61	61	61	66	
Vacios no compactados		31,5	31,5	31,5	36,1	
Gbs		2,65	2,65	2,65	2,67	
Absorción		1,5	1,5	1,5	1,5	
Granulometría						
19 mm		100	100	100	100	100
12,5mm		92	92	92	87	92
9,5 mm		79	84	79	76	83
No.4		52	55	52	51	52
No.8		38	35	38	35	32
No,16		26	24	26	26	20
No.30		19	17	19	19	14
No.50		13	12	13	15	10
No.100		-	9	-	11	7
No.200		7	6	7	9	5

Tabla No.30: Caracterización de los agregados utilizados por la planta 3 (continuación).

ID	767-04		785-04		1226-04	
Fecha muestreo	25/06/2004		29/06/2004		16/11/2004	
Agregados						
Caras fracturadas	Grueso	97%	97%	97%	99%	
	Intermedio					
Partículas planas y elongadas	Grueso	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
	Intermedio					
Dosificación (%)	Fino	38.0	38.0	38.0	37.0	
	Intermedio	50.0	50.0	50.0	52.0	
	Grueso	12.0	12.0	12.0	11.0	
% Humedad Lanamme	Combinado	2.8	2.7	2.7	2.2	
Equivalente de Arena	65		65		62	
Vacíos no compactados	32.1		32.1		30.3	
Gbs	2.64		2.64		2.64	
Absorción	1.7		1.7		1.8	
Granulometría						
19 mm	100	100	100	100	100	100
12,5mm	94	95	98	95	97	96
9,5 mm	85	88	88	88	85	87
No.4	53	55	56	55	52	55
No.8	31	33	34	33	34	39
No,16	21	21	22	22	23	29
No.30	15	15	15	16	17	23
No.50	11	10	11	12	12	18
No.100		8		9	-	15
No.200	6	6	6	7	6	13

11. RESULTADOS OBTENIDOS

Se presentan los resultados obtenidos de parámetros Marshall y deformación permanente medida en especímenes remoldeados en laboratorio y en núcleos extraídos de campo y valores de módulo resiliente obtenido por medio de tensión indirecta, para ocho muestreos realizados

La Planta 4 emplea agregados provenientes de la fuente Río General. Se remoldearon especímenes utilizando el mazo Marshall y el compactador giratorio.

11.1 Parámetros Marshall

En la Tabla No. 31 se presentan los valores obtenidos de porcentaje de vacíos, de estabilidad y del flujo medido en distintos puntos sobre la curva estabilidad-flujo, obtenida de los especímenes remoldeados en laboratorio.

11.2 Ensayos de desempeño

Se remoldearon en el compactador giratorio seis especímenes de 15.0 cm de diámetro y 7.5 cm de espesor, con un nivel de vacíos variando entre 6.0 y 8.0%. Estos especímenes fueron ensayados en la pista de ensayo de laboratorio (APA) a una temperatura de 60°C, para determinar la deformación después de 8000 ciclos de carga.

Este procedimiento se hizo tanto para los especímenes remoldeados en el laboratorio como para los núcleos extraídos de campo. En la Tabla No. 32 se presentan los promedios de las deformaciones obtenidas para laboratorio y en la Tabla No.33 se presentan las deformaciones medidas en campo. En la Tabla No.34 se presentan los valores para el módulo resiliente obtenidos de las muestras remoldeadas en laboratorio y en la Tabla No.35 se presentan los valores para el módulo resiliente obtenidos de los núcleos extraídos de campo.

Tabla No. 31: Parámetros Marshall. Valores promedio.

Parámetro	Fecha de muestreo								
	23/03/2004	22/04/2004	03/06/2004	09/06/2004	10/06/2004	17/06/2004	25/06/2004	29/06/2004	16/11/2004
Cont. asfalto (%PTM)	6.01	5.61	5.49	5.92	5.76	5.47	5.12	5.19	5.14
Vacíos (%)	2.7	3.7	1.9	1.8	1.1	4.8	5.4	4.2	4.1
Estabilidad (kg)	1810	1894	2028	2295	2124	1773	1673	1771.2	1658
Flujo a (mm-1)	26	26.2	20.7	25.675	24.1	22.6	23.7	22.5	26.3
Flujo b (mm-1)	27.3	28.7	22.9	29.1	25.8	25.8	24.8	24.7	31.15
Flujo c (mm-1)	23.4	22	19.7	25.1	21.8	22.1	21.9	21.8	25.925
Flujo d (mm-1)	25.4	26.6	21.4	27.5	23.9	23.9	23.3	23.3	29.6
Flujo e (mm-1)	16.8	15.9	12.4	18.2	16.0	14.2	15.1	14.5	18
Flujo f (mm-1)	16.8	15.4	12.4	18.2	16.0	14.2	15.1	14.5	18

Donde:

Flujo a corresponde al flujo medido por el equipo

Flujo b corresponde al flujo medido en el último máximo

Flujo c corresponde al flujo medido en el primer máximo

Flujo d corresponde al flujo medido en la tangente horizontal

Flujo e corresponde al flujo medido al 95% del primer máximo

Flujo f corresponde al flujo medido al 95% de la tangente horizontal

Tabla No. 32: Deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio.

	Fecha de muestreo								
Parámetro	23/03/04	22/04/04	03/06/04	09/06/04	10/06/04	17/06/04	25/06/04	29/06/04	16/11/04
Vacíos (%)	7.6	7.7	5.6	5.3	3.5	9.1	10.3	8.2	7.4
Deformación permanente (mm)	3.6	2.7	4.1	3.5	3.4	4	4.9	4.4	4.0

Tabla No. 33: Deformaciones medidas en núcleos extraídos de campo.

	Fecha de muestreo								
Parámetro	23/03/04	22/04/04	03/06/04	09/06/04	10/06/04	17/06/04	25/06/04	29/06/2004	16/11/04
Vacíos (%)	13.4	9.5	5.7	6.9	2.9	4.8	9.5	8.4	11.2
Deformación permanente (mm)	9.5	5.7	7.8	7.5	6	6.4	7.2	6.8	11.9

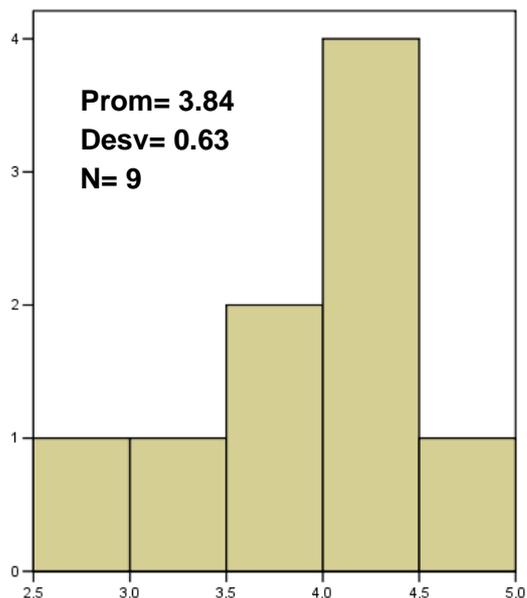
Tabla No. 34: Valores de módulo resiliente obtenidos, por tensión indirecta, de las muestras remoldeadas en laboratorio, en MPa

	Fecha de muestreo								
Parámetro	23/03/04	22/04/04	03/06/04	09/06/04	10/06/04	17/06/04	25/06/04	29/06/04	16/11/2004
Vacíos (%)	7.6	7.7	5.6	5.3	3.5	9.1	10.3	8.2	7.4
Modulo resiliente (MPa)	3207.0	3637.0	3811	3981	4307	3598	3624	3819	3184

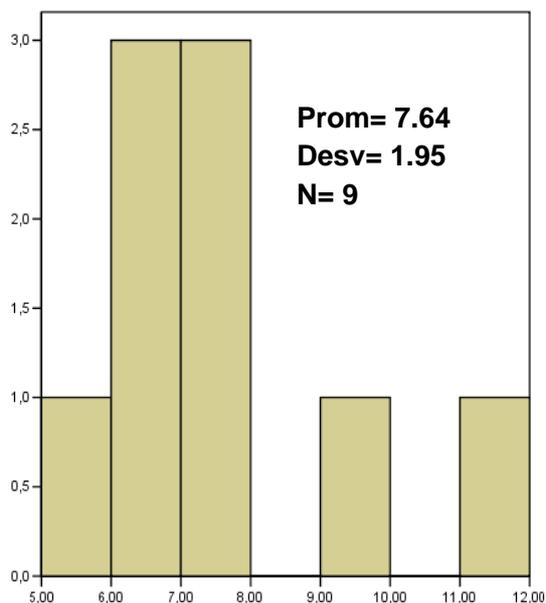
Tabla No. 35: Valores de módulo resiliente obtenidos, por tensión indirecta, de los núcleos extraídos de campo, en MPa.

	Fecha de muestreo								
Parámetro	23/03/04	22/04/04	03/06/04	09/06/04	10/06/04	17/06/04	25/06/04	29/06/04	16/11/04
Vacíos (%)	13.4	9.5	5.7	6.9	2.9	4.8	9.5	8.4	11.2
Modulo resiliente (MPa)	2022.0	1407.0	1568	1406	1767	2062	1897	1960	1615

Gráfico No. 14: Histograma de deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio y núcleos extraídos de campo. Planta 4.



Especímenes remoldeados en laboratorio



Núcleos extraídos de campo

11.3 Análisis de resultados.

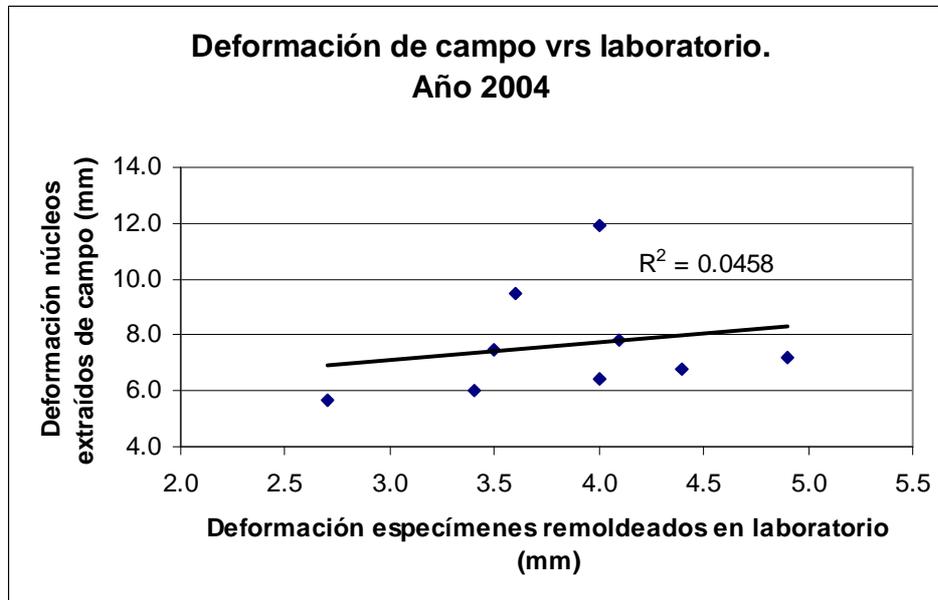
Para determinar si existía relación entre las deformaciones medidas en laboratorio y las medias en los núcleos de campo se realizó un análisis de regresión. Los resultados se muestran en la Tabla No.36.

Tabla No. 36: Resultados del análisis de regresión

Año	R	R ²
2004	0,214	0,046

Para ilustrar mejor el análisis de regresión, se presenta el gráfico No. 15, donde se observa que no existe buena relación entre las deformaciones medidas en núcleos extraídos de campo y las deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio.

Gráfico No. 15: Relación entre deformaciones de campo y deformaciones de laboratorio.



Para determinar si existía correlación entre la deformación medida en especímenes remoldeados en laboratorio y el flujo Marshall, medido en distintos puntos sobre la curva de estabilidad-flujo, se realizaron distintos gráficos, que se muestran en el Gráfico No.16.

Se observa como no existe una buena correlación entre el flujo medido en distintos

Para analizar el efecto que tienen otras propiedades, tales como las propiedades de diseño (% asfalto, estabilidad, VMA, VFA), el porcentaje de vacíos no compactados en el agregado fino y algunas propiedades del asfalto tales como la densidad y la viscosidad absoluta, sobre la deformación plástica medida en espeímenes remoldeados en laboratorio, se presentan gráficos que muestran la tendencia que sigue la deformación plástica de laboratorio al aumentar o disminuir alguna de estas propiedades.

**Gráfico No. 16: Deformación plástica versus flujo (medido en distintos puntos sobre la curva estabilidad-flujo).
Planta 4**

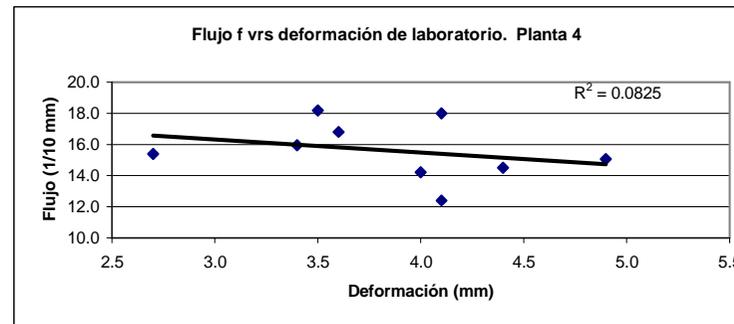
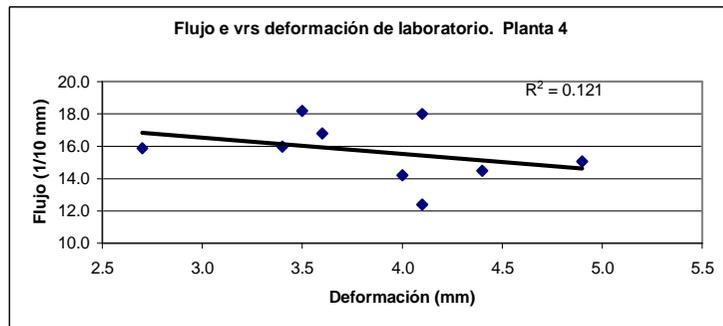
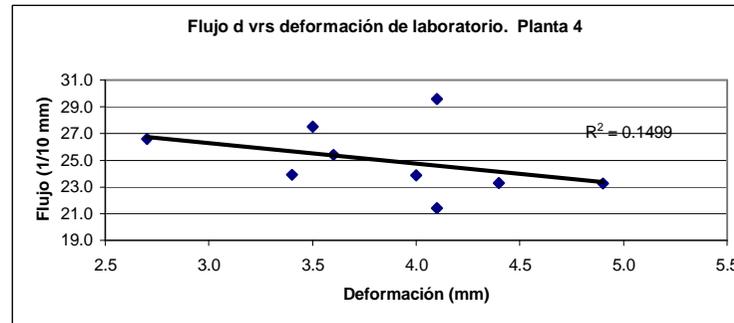
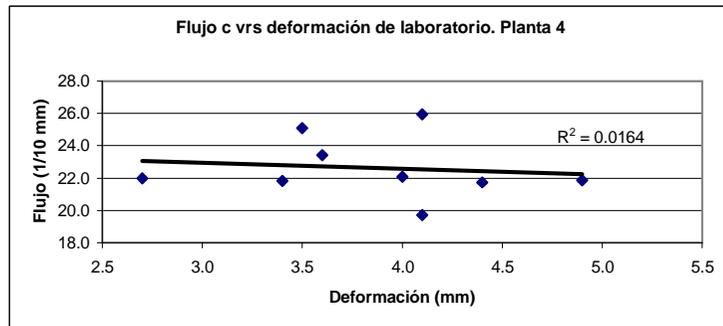
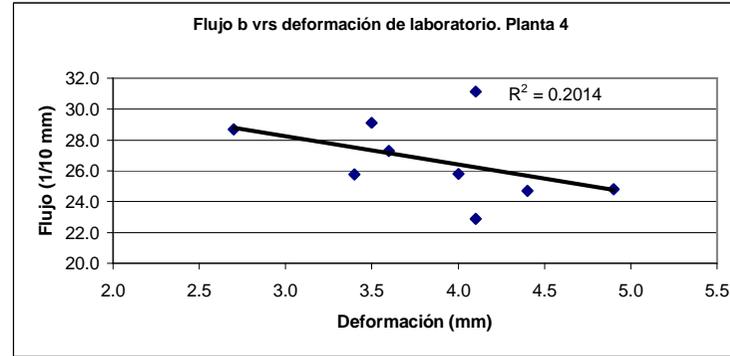
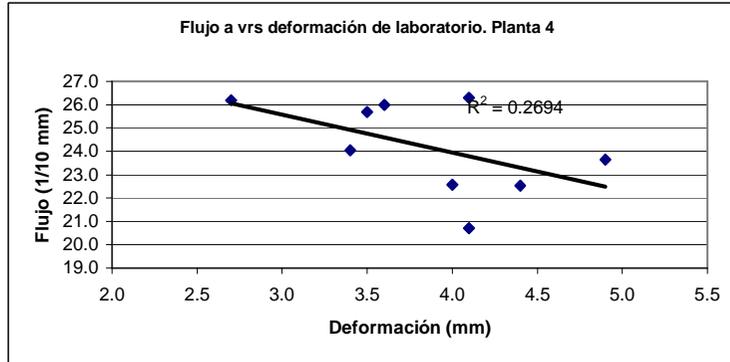
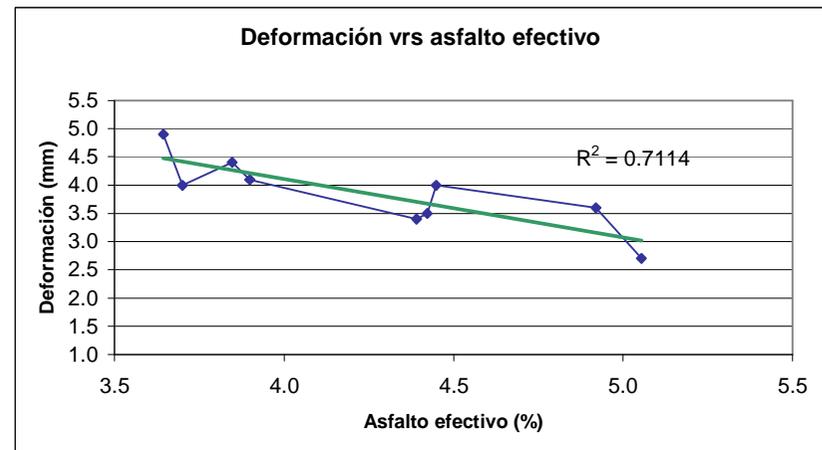
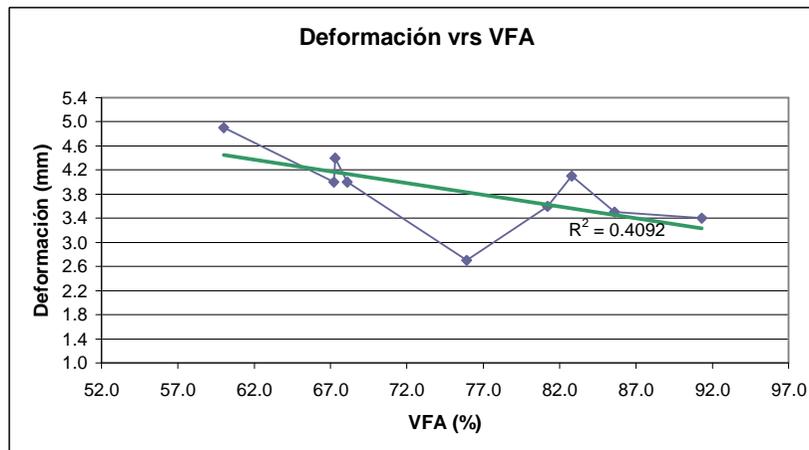
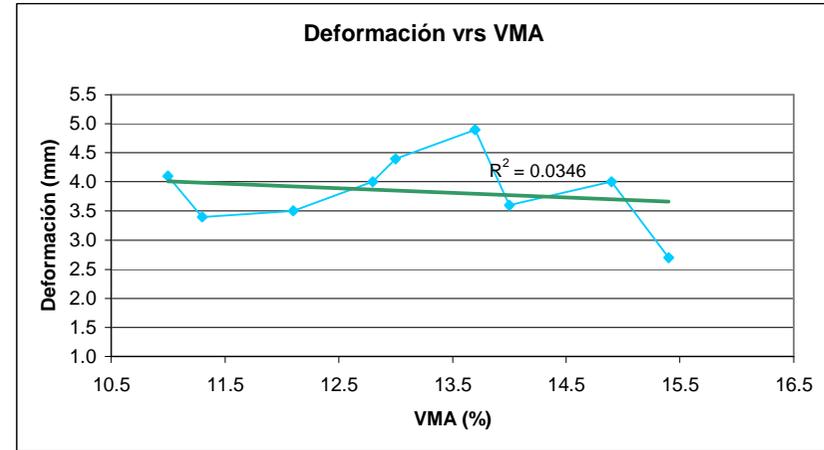
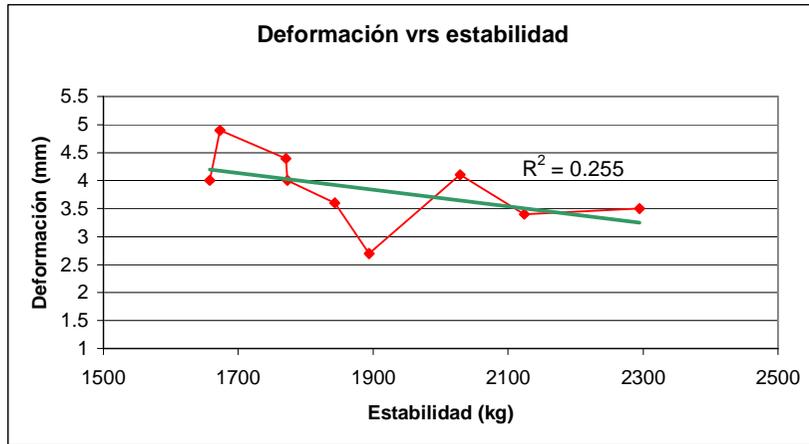


Gráfico No. 17: Propiedades de diseño: Estabilidad, VMA, VFA, asfalto efectivo. Planta 4



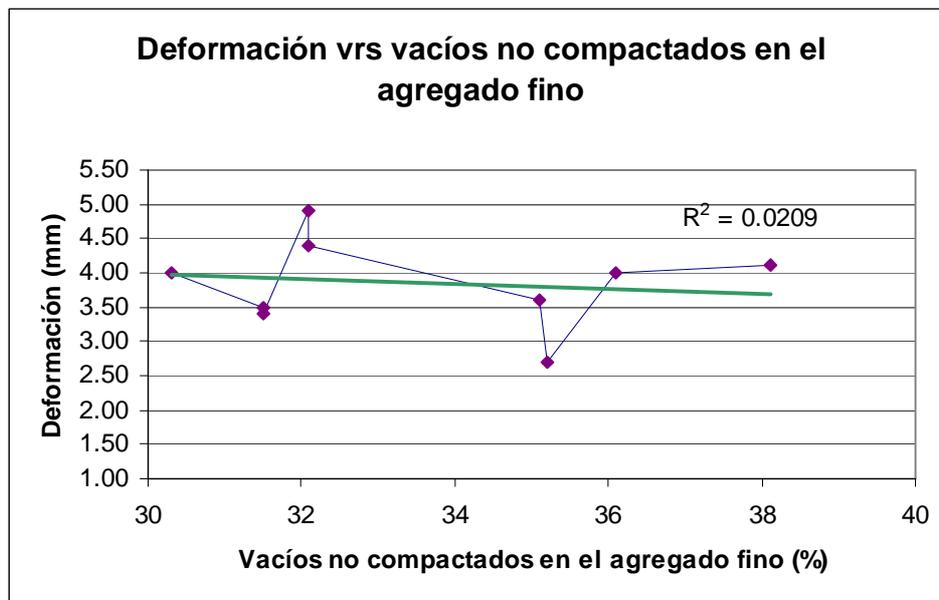
De estos gráficos se puede comentar:

Se observa una tendencia a que las deformaciones disminuyen conforme disminuye el porcentaje de asfalto efectivo y los vacíos llenos con asfalto (VFA). Tendencia que concuerda con el comportamiento esperado. Ambas relaciones presentan una correlación alta; 0.84 y 0.64 respectivamente.

En cuanto a la estabilidad, se observa una leve tendencia decreciente, es decir a mayor estabilidad se reporta una menor deformación. Sin embargo la correlación entre estabilidad y deformación es baja (0.52)

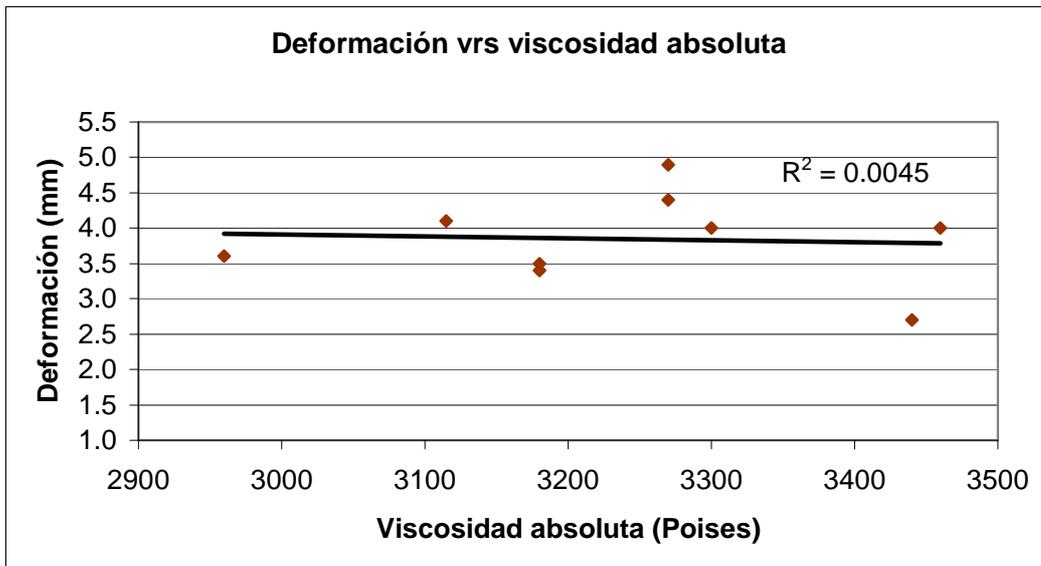
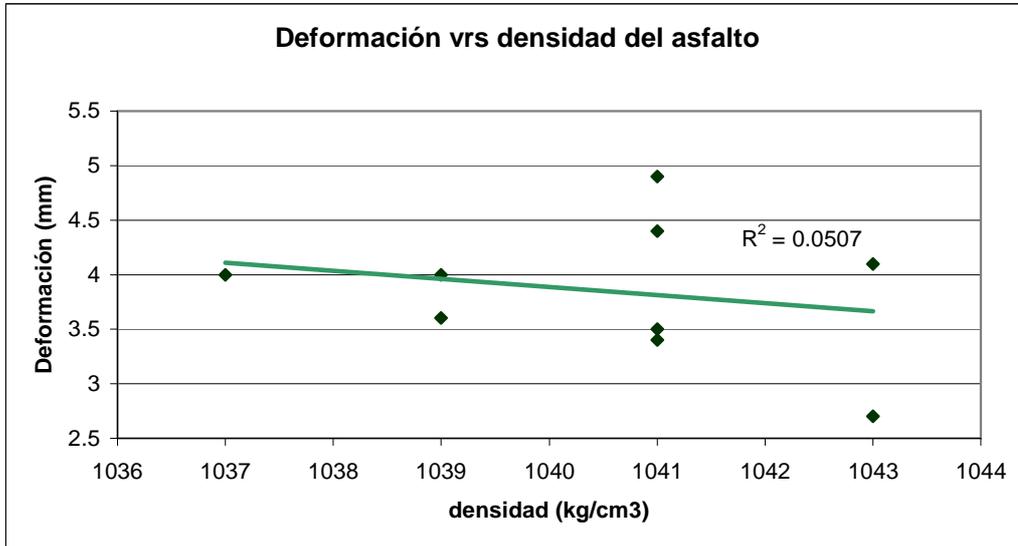
No se observa una tendencia definida en cuanto a la relación entre el VMA y la deformación medida en laboratorio

Gráfico No. 18: Propiedades de los agregados: Vacíos no compactados en el agregado fino.



No se obtiene una buena correlación entre los vacíos no compactados en el agregado fino y la deformación, según se puede observar en el gráfico No. 18, donde se obtuvo una correlación (R) de 0.14.

Gráfico No. 19: Propiedades del asfalto



La tendencia mostrada en estos gráficos es que a medida que se incrementa la densidad del asfalto, la deformación plástica tiende a disminuir, comportamiento que resulta fácil de entender ya que si bien es cierto la estructura granular es la que resiste la mayor parte de la deformación, el asfalto tiene algún aporte. En cuanto a la viscosidad, esta tendencia no se observa tan claramente.

Sin embargo, se observa una pobre correlación entre la viscosidad y la densidad del asfalto con la deformación obtenida en laboratorio.

12. COMENTARIOS

De los resultados de la planta 4 se puede comentar lo siguiente:

No se encontró una buena correlación ($R=0.24$) entre las deformaciones medidas en laboratorio y las deformaciones medidas en los núcleos extraídos de campo.

Los flujos que presentaron mejores correlaciones con la deformación medida en laboratorio fueron los que se midieron en el último máximo de la curva estabilidad-flujo, los que calcula el equipo y los medidos en la tangente horizontal de la curva.

La peor correlación se obtuvo entre el flujo medido en el primer máximo y la deformación de laboratorio

Se observa una tendencia contraria a la esperada, entre la deformación en laboratorio y el asfalto efectivo y los vacíos llenos con asfalto. Una disminución de estos parámetros produce un aumento en la deformación permanente medida en laboratorio.

Hasta el momento, no se ha logrado obtener resultados concluyentes en cuanto a la correlación entre la deformación obtenida en laboratorio y la deformación medida en campo. Esto hace, cada vez más necesario, la implementación de una pista de ensayo a escala natural.

Otro aspecto a considerar, es el hecho de que para poder discernir mejor entre los distintos parámetros que afectan el desempeño de la mezcla, se requieren condiciones más controladas, por lo que sería factible analizar la posibilidad de fabricar mezcla en el laboratorio y analizarla.

Indice General

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
PLANTA 1	4
2. MATERIA PRIMA	4
2.1 Ligante asfáltico.....	4
2.2 Agregado	4
2.2.1 Caracterización de los agregados.....	4
2.2.2 Coeficiente de pulimento acelerado	4
3. RESULTADOS OBTENIDOS	11
3.1 Parámetros Marshall.....	11
3.2 Ensayos de desempeño	11
3.3 Análisis de resultados.....	17
3.4 Cambio en los vacíos iniciales.....	26
4. COMENTARIOS	28
PLANTA 2	28
5. MATERIA PRIMA	28
5.1 Ligante asfáltico.....	28
5.2 Agregado	29
5.2.1 Caracterización de los agregados.....	29
6. RESULTADOS OBTENIDOS	30
6.1 Parámetros Marshall.....	30
6.2 Ensayos de desempeño	30
PLANTA 3	32
7. MATERIA PRIMA	32
7.1 Ligante asfáltico.....	32

7.2 Agregado	34
7.2.1 Caracterización de los agregados	34
8. RESULTADOS OBTENIDOS	36
8.1 Parámetros Marshall.....	36
8.2 Ensayos de desempeño	36
8.3 Análisis de resultados.....	40
9. COMENTARIOS	46
PLANTA 4	46
10. MATERIA PRIMA	46
10.1Ligante asfáltico.....	46
10.2Agregado	48
10.2.1 Caracterización de los agregados.....	48
11. RESULTADOS OBTENIDOS	51
11.1Parámetros Marshall.....	51
11.2Ensayos de desempeño	51
11.3Análisis de resultados.....	55
12. COMENTARIOS	61

Indice de Tablas

Tabla	Página
Tabla No. 1: Propiedades físico-químicas del asfalto. Valores reportados por Recope.....	5
Tabla No. 2: Propiedades físico-químicas del asfalto. Valores reportados por Recope (continuación).	6
Tabla No. 3: Valores promedio del coeficiente de pulimento acelerado.	10
Tabla No. 4: Parámetros Marshall. Valores promedio.....	12
Tabla No. 5: Deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio.	14
Tabla No. 6: Deformaciones medidas núcleos extraídos de campo.....	15
Tabla No. 7: Valores de módulo resiliente obtenidos, por tensión indirecta, de las muestras remoldeadas en laboratorio, en MPa...	16
Tabla No. 8: Valores de módulo resiliente obtenidos, por tensión indirecta, de los núcleos extraídos de campo, en MPa.	16
Tabla No. 9: Resultados del análisis de regresión: Deformación medida en especímenes remoldeados en laboratorio vrs deformación medida en núcleos extraídos de campo.....	18
Tabla No. 10: Resultados del análisis de varianza hecho para las propiedades de diseño.....	22
Tabla No. 11: Resultados del análisis de varianza hecho para las propiedades de los agregados.....	24
Tabla No. 12: Resultados del análisis de varianza hecho para las propiedades del asfalto.	26
Tabla No. 13: Cambio de vacíos de campo	26
Tabla No. 14: Propiedades físico-químicas del asfalto. Valores reportados por RECOPE.....	28
Tabla No. 15: Caracterización de los agregados utilizados por la planta 2.	29
Tabla No. 16: Granulometrías empleadas.....	30
Tabla No. 17: Parámetros Marshall. Valores promedio.....	31
Tabla No. 18: Deformaciones medidas en laboratorio.	31

Tabla No. 19: Deformaciones medidas en los núcleos extraídos del campo.	32
Tabla No. 20: Valores de módulo resiliente obtenidos, por tensión indirecta, de las muestras remoldeadas en laboratorio, y de los núcleos extraídos del campo, en MPa	32
Tabla No. 21: Propiedades físico-químicas del asfalto. Valores reportados por Recope.....	33
Tabla No. 22: Caracterización de los agregados utilizados por la planta 3.	34
Tabla No. 23: Parámetros Marshall. Valores promedio.....	37
Tabla No. 24: Deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio.	38
Tabla No. 25: Deformaciones medidas en núcleos extraídos de campo.	38
Tabla No. 26: Valores de módulo resiliente obtenidos, por tensión indirecta, de las muestras remoldeadas en laboratorio, en MPa...	39
Tabla No. 27: Valores de módulo resiliente obtenidos, por tensión indirecta, de los núcleos extraídos de campo, en MPa.	39
Tabla No. 28: Resultados del análisis de regresión	40
Tabla No. 29: Propiedades físico-químicas del asfalto. Valores reportados por Recope.....	47
Tabla No. 30: Caracterización de los agregados utilizados por la planta 3.	48
Tabla No. 31: Parámetros Marshall. Valores promedio.....	52
Tabla No. 32: Deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio.	53
Tabla No. 33: Deformaciones medidas en núcleos extraídos de campo.	53
Tabla No. 34: Valores de módulo resiliente obtenidos, por tensión indirecta, de las muestras remoldeadas en laboratorio, en MPa...	54
Tabla No. 35: Valores de módulo resiliente obtenidos, por tensión indirecta, de los núcleos extraídos de campo, en MPa.	54
Tabla No. 36: Resultados del análisis de regresión	55

Índice de Gráficos

Gráfico	Página
Gráfico No. 1: Histograma de deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio y en núcleos extraídos de campo. Planta 1.....	17
Gráfico No. 2: Relación entre deformaciones de campo y deformaciones de laboratorio.....	18
Gráfico No. 3: Deformación plástica versus flujo (medido en distintos puntos sobre la curva estabilidad-flujo).....	20
Gráfico No. 4: Propiedades de diseño: Estabilidad, VMA, VFA, asfalto efectivo.....	21
Gráfico No. 5: Propiedades de los agregados.....	23
Gráfico No. 6: Propiedades del asfalto.....	25
Gráfico No. 7: Relación entre la deformación y el cambio de vacíos de campo.	27
Gráfico No. 8: Histograma de deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio y en núcleos extraídos de campo. Planta 3.....	40
Gráfico No. 9: Relación entre deformaciones mediadas en los núcleos de campo y en los especímenes remoldeados en laboratorio.	41
Gráfico No. 10: Deformación plástica versus flujo (medido en distintos puntos sobre la curva estabilidad-flujo). Planta 3.....	42
Gráfico No. 11: Propiedades de diseño: Estabilidad, VMA, VFA, asfalto efectivo. Planta 3.....	43
Gráfico No. 12: Propiedades de los agregados: Vacíos no compactados en el agregado fino.	44
Gráfico No. 13: Propiedades del asfalto.....	45
Gráfico No. 14: Histograma de deformaciones medidas en especímenes remoldeados en laboratorio y núcleos extraídos de campo. Planta 4.	55
Gráfico No. 15: Relación entre deformaciones de campo y deformaciones de laboratorio.....	56

Gráfico No. 16: Deformación plástica versus flujo (medido en distintos puntos sobre la curva estabilidad-flujo). Planta 4.....	57
Gráfico No. 17: Propiedades de diseño: Estabilidad, VMA, VFA, asfalto efectivo. Planta 4.....	58
Gráfico No. 18: Propiedades de los agregados: Vacíos no compactados en el agregado fino.	59
Gráfico No. 19: Propiedades del asfalto.....	60