

CARRETERA BERNARDO SOTO

DISEÑO DE SOBRECAPA DE CONCRETO HIDRAULICO

AUTORES:

**Ing. Mario Arce
Ing. Pedro Castro**

**Apoyo logístico:
Raquel Arriola**



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

LANAMME

San José, 9 de marzo de 2000.

LM-IC-D-144-2000

**Lic. André Garnier,
Secretario Técnico,
Consejo Nacional de Concesiones**

Estimado don André:

Sirva la presente para saludarlo y a la vez para remitirle el informe Carretera Bernardo Soto: diseño de sobrecapa de concreto hidráulico, elaborado por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), de acuerdo con su solicitud del oficio No. 200256.

Sin otro particular, me permito expresarle mis mejores muestra de consideración y estima,

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'JP Gómez', is written above a horizontal line.

**Dr. Juan Pastor Gómez, Director,
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales,
Universidad de Costa Rica**

CC: Ing. Carlos Acosta.

INDICE

CONTENIDO

1. Introducción	1
2. Condición del pavimento existente	1
2.1 Tramos homogéneos según volumen vehicular	1
2.2 Espesores de capa	1
2.3 Proyección de cargas	2
2.4 Definición de secciones homogéneas por deflectometría	2
2.5 Módulos resilientes de capas existentes	4
3. Dimensionamiento del espesor de losa	4
3.1 Módulo de reacción en capa de apoyo de la losa	4
3.2 Parámetros de diseño	10
3.3 Espesores de diseño	10
4. Dimensionamiento de juntas transversales	12
4.1 Separación de juntas transversales	12
4.2 Separación de dobelas en juntas transversales	15
4.3 Acero en juntas longitudinales	16
5. Recomendaciones finales	17
5.1 Preparación previa del pavimento existente	17
5.2 Diseño de sobrecapa de concreto hidráulico	18
5.3 Diseño de espaldón	19
5.4 Recomendaciones finales	19
6. Referencias	22

ANEXOS

- 1. Deflexiones**
- 2. Gráficos de SPEC para la definición de secciones homogéneas**
- 3. Hoja de cálculo: retrocálculo de módulos**

DISEÑO DE SOBRECAPA DE CONCRETO HIDRAULICO: PROYECTO BERNARDO SOTO

1. INTRODUCCION.

El objeto de este informe es el dimensionamiento de una losa de concreto hidráulico a colocar como sobrecapa ("white topping") en el pavimento existente en la Carretera Bernardo Soto.

El diseño estructural de la sobrecapa se realiza a partir de un análisis de retrocálculo de módulos resilientes para el pavimento existente, y de la metodología de la Guía de diseño de pavimentos (1993) de la Asociación Americana de Oficiales Estatales de Transportes y Carreteras -AASHTO- (Ref. 2).

2. CONDICION DEL PAVIMENTO EXISTENTE.

2.1. Tramos homogéneos según volumen vehicular.

La separación en tramos homogéneos se hace en función del número de carriles de diseño y de las cargas de diseño (tránsito promedio diario, distribución vehicular y proyección de crecimiento). Así, se evalúan los dos siguientes tramos homogéneos:

- Aeropuerto – Manolo's (Tramo 1). Correspondiente a dos carriles por sentido.
- Manolo's – San Ramón (Tramo 2). Correspondiente a un carril por sentido.

2.2. Espesores de capa.

Los espesores actuales en los tramos homogéneos se presentan en la Tabla 1. Debe considerarse que estos espesores de capa fueron determinados a partir de sondeos realizados por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), disponibles en 1998, y correspondientes al percentil 20 de la información disponible, de manera que el 80 % de los espesores detectados son superiores a los indicados en la Tabla 1.

Tabla 1: Espesores de diseño.

Capa	Aeropuerto – Manolo's	Manolo's – San Ramón
Carpeta asfáltica	15 cm	11 cm
Base granular	17 cm	19 cm
Sub-base granular	21 cm	25 cm

Fuente: LANAMME, Evaluación del diseño de pavimento rígido para la rehabilitación de la autopista Bernardo Soto, 1998. Datos suministrados por el MOPT (Ref. 1).

2.3. Proyección de cargas.

Las proyecciones de cargas, para cada tramo homogéneo, se hacen en función de las proyecciones de tránsito del MOPT; considerando una reducción del tránsito promedio diario de 30 % en el año 6 de operación del pavimento, por la entrada en funcionamiento del proyecto Ciudad Colón – Orotina. La información referente a la estimación de las cargas de diseño se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2: Cargas de diseño por tramo homogéneo.

Tramo	TPD (1)	% de crecimiento	Ejes equivalentes de 8.2 Ton en el carril de diseño	
			15 años	20 años
No. 1	17503	5 %	17.6 millones	26.1 millones
No. 2	13600	5 %	23.5 millones	34.8 millones

(1) TPD de 1998. Considerando 1999 como el primer año de operación.

Fuente: LANAMME, op. cit. Datos suministrados por el MOPT.

2.4. Definición de secciones homogéneas por deflectometría.

A partir del análisis deflectométrico realizado en 1999, se hizo un estudio estadístico con el propósito de segmentar los tramos homogéneos en secciones estadísticamente diferenciadas (a un nivel de confianza del 95 %).

La Tabla 3 presenta la deflexión característica, por sección homogénea. Se entiende por deflexión característica a un valor tal que el 95 % de las determinaciones de deflexión son inferiores, conforme a una distribución de frecuencia normal. La deflexión característica ha sido determinada como el promedio por tramo, más 1.8 veces la desviación estándar de las deflexiones del tramo.

Tabla 3: Definición de segmentos homogéneos a partir de análisis deflectométrico, Carretera Bernardo Soto.

	Sección	Puntos	Deflexión (x)	Desv.Est.(s)	$\bar{x} + 1.8 * s$
TRAMO 2	j	1-29	71.7	18.1	147.1
	i	30-49	84.7	18.98	171.4
	h	50-73	107.9	21.51	215.8
	g	74-94	86.7	20.57	176.6
	f	95-112	80.0	10.89	154.9
	e	113-127	86.3	10.19	165.5
	d	128-149	65.6	10.76	128.8
	c	150-205	76.2	20.49	157.6
	b	206-227	97.7	15.63	191.5
	a	228-249	82.3	26.25	174.3
TRAMO 1	b	250-263	61.0	12.32	122.1
	a	264-345	77.9	21.58	161.8

■ Valores máximo y mínimo de deflexión.

TRAMO 1: Aeropuerto-Manolo's

TRAMO 2: Manolo's-San Ramón

Nota: Deflexiones en centésimas de milímetro

2.5. Módulos resilientes de capas existentes.

A partir de los espesores de diseño (Tabla 1) y las deflexiones características por sección homogénea (Tabla 2), se hizo un retrocálculo de los módulos resilientes por capa. Para tal propósito se utilizó la teoría elástica multicapa, a partir de la modelación con el programa ELSYM5.

La Tabla 4 presenta el resumen de la información referente a los módulos resilientes por capa, para cada tramo homogéneo. Los resultados del retrocálculo de módulos por sección homogénea se presentan en la Tabla 5.

Tabla 4: Resumen de módulos resilientes por capa, por tramo homogéneo.

Capa	Tramo No. 1				Tramo No. 2			
	Mínimo		Máximo		Mínimo		Máximo	
	psi	Kg/cm2	psi	kg/cm2	psi	kg/cm2	psi	kg/cm2
Carpeta	50000	3521	75000	5282	40000	2817	100000	7042
Base granular	13000	915	16000	1127	10000	704	18000	1268
Sub-base	10000	704	10000	704	9000	634	12000	845
Sub-rasante	5000	352	6500	458	4000	282	6000	423

3. DIMENSIONAMIENTO DEL ESPEÑOR DE LOSA.

De acuerdo con lo indicado, para el dimensionamiento del pavimento se aplica la metodología de la Asociación Americana de Oficiales de Transporte y Carreteras (AASHTO), Guía para el diseño de pavimentos (Ref. 2).

3.1. Módulo de reacción en capa de apoyo de la losa.

Para la determinación del módulo de reacción en la capa de apoyo de la losa, se evalúa el módulo de elasticidad equivalente para la estructura de pavimento sobre la sub-rasante (carpeta, base granular y sub-base), de acuerdo con la ecuación 2.

La Tabla 6, por lo tanto, presenta la información referente al cálculo del módulo de elasticidad equivalente (E_p), para las capas de carpeta, base granular y sub-base. La determinación del módulo de elasticidad equivalente (Ecuación 2) se realiza para todas las secciones homogéneas definidas en la Sección 2.4.

A partir del módulo resiliente de la sub-rasante (MR), el módulo de elasticidad equivalente (E_p) y el espesor del pavimento (H), se hace la determinación del módulo de reacción (k) en la capa de soporte de la losa de concreto hidráulico (Tabla 7). Para tales propósitos se utiliza la Figura 3.3 de la Guía para el diseño de pavimentos de la AASHTO.

ECUACIÓN 1: Fórmula AASHTO para pavimentos rígidos

$$\log W_{118} = Z_R S_o + 7.35 \log(D+1) - 0.06 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{(4.5-1.5)} \right]}{1 + \frac{1.624E7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32p_i) \log \left[\frac{S_c C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k} \right)^{0.25}} \right]} \right]$$

Donde:

- W_{t18}: cantidad de ejes de carga de 18-kip aplicados en el tiempo t.
- Z_R: factor que depende de una confiabilidad R dada.
- S_o: desviación estándar del proceso constructivo.
- Z_RS_o: término de confiabilidad y dispersión.
- D: espesor de la losa (in).
- ΔPSI: variación en el índice de servicio.
- P_i: índice final de servicio.
- S_c: módulo de ruptura del concreto (psi).
- C_d: coeficiente de drenaje.
- E_c: módulo de elasticidad del concreto (psi).
- k: módulo de reacción de la sub – rasante (pci).

ECUACIÓN 2: Fórmula AASHTO para el retrocálculo de módulos.

$$\delta_o = 1.5pa \left[\frac{1}{\left(MR \sqrt{1 + \left[\frac{D}{a} \sqrt[3]{\frac{Ep}{MR}} \right]^2} \right)} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{Ep} \right]$$

Donde:

- δ_o : deflexión bajo el punto de aplicación de la carga (in).
- MR: módulo resiliente de la sub-base (psi).
- D: espesor del pavimento sobre la sub-base (in).
- a: radio del plato del FWD (in).
- Ep: módulo efectivo del pavimento para capas sobre la sub-base (psi).

Tabla 5: Resultados de retrocálculo de módulos por sección homogénea.

Carretera Bernardo Soto

Tramo	Sección	Estacionamiento	Longitud (km)	E ₁ (psi)	E ₂ (psi)	E ₃ (psi)	E ₄ (psi)	Deflexión característica (*)		
								Valor estimado (10-2 mm)	Valor medido (10-2 mm)	Diferencia (%)
1	a	31+400 a 39+600	8.2	50000	13000	10000	5000	159.5	161.8	1.4
	b	29+900 a 31+300	1.4	75000	16000	10000	6500	123.7	122.1	1.3
2	a	27+500 a 29+800	2.3	50000	13000	10000	5000	175.0	174.3	0.4
	b	25+300 a 27+400	2.1	45000	10000	10000	5000	192.0	191.5	0.3
	c	19+200 a 25+200	6	65000	16000	10000	5000	158.2	157.6	0.4
	d	16+900 a 19+100	2.2	100000	18000	12000	6000	128.5	128.8	0.2
	e	15+400 s 16+800	1.4	50000	16000	10000	5000	165.6	165.5	0.1
	f	13+600 s 15+300	1.7	75000	16000	10000	5000	154.4	154.9	0.3
	g	11+500 a 13+500	2	50000	13000	10000	5000	175.0	176.6	0.9
	h	9+100 a 11+400	2.3	40000	10000	9000	4000	217.4	215.8	0.7
	i	3+00 a 4+900	1.9	55000	13000	10000	5000	172.0	171.4	0.4
	j	0+100 a 2+900	2.8	100000	16000	10000	5000	147.3	147.1	0.1

(*) Magnitud tal que el 95% de los valores de la sección homogénea son menores, de acuerdo con una distribución normal.

Nota: el estacionamiento 39+600 corresponde al Aeropuerto.

Tabla 6: Estimación del módulo resiliente efectivo (Ep) para las capas sobre la sub-rasante.

Tramo unidad	Sección	d0 medido (1/100 cm)	q (psi)	MR (psi)	D (in)	a (in)	Ep (psi)	d0 calc. (1/100 cm)	dif. (1/100 cm)
1	a	0.0637	85	5000	20.9	5.81	15150	0.0637	0.0000
1	b	0.0481	85	6500	20.9	5.81	20250	0.0480	0.0000
2	a	0.0686	85	5000	21.7	5.81	13500	0.0686	0.0000
2	b	0.0754	85	5000	21.7	5.81	11855	0.0754	0.0000
2	c	0.0620	85	5000	21.7	5.81	15520	0.0621	0.0000
2	d	0.0507	85	6000	21.7	5.81	19150	0.0507	0.0000
2	e	0.0652	85	5000	21.7	5.81	14500	0.0652	0.0000
2	f	0.0610	85	5000	21.7	5.81	15900	0.0610	0.0000
2	g	0.0695	85	5000	21.7	5.81	13250	0.0695	0.0000
2	h	0.0850	85	4000	21.7	5.81	10930	0.0850	0.0000
2	i	0.0675	85	5000	21.7	5.81	13800	0.0675	0.0000
2	j	0.0579	85	5000	21.7	5.81	17150	0.0579	0.0000

Tabla 7: Capacidad de soporte en la base de apoyo de la sobrecapa de concreto hidráulico.

Tramo	Sección	M_R (SR) (psi)	E_p (psi)	H (in)	ko (pci)
1	a	5000	15150	20.9	390
1	b	6500	20250	20.9	500
2	a	5000	13500	21.7	320
2	b	5000	11855	21.7	310
2	c	5000	15520	21.7	410
2	d	6000	19150	21.7	480
2	e	5000	14500	21.7	380
2	f	5000	15900	21.7	430
2	g	5000	13250	21.7	420
2	h	4000	10930	21.7	250
2	i	5000	13800	21.7	370
2	j	5000	17150	21.7	400

Según la metodología de la AASHTO, el factor de pérdida de soporte (L_s), cuando la capa de apoyo de la losa es de concreto asfáltico, debe ubicarse entre 0.0 y 1.0; mientras que si la capa de apoyo de la losa es granular, el factor de pérdida de soporte debe estar entre 1.0 y 3.0. En este caso la capa asfáltica presenta un elevado nivel de deterioro (capa fatigada), tal como se puede apreciar en el rango de módulo resiliente determinado a partir del retrocálculo de módulos. Así, se ha seleccionado un valor intermedio de pérdida de soporte para una capa asfáltica (0.5), tomando en cuenta el estado de deterioro de la capa asfáltica y el nivel de confianza utilizado en el retrocálculo de módulos (la deflexión característica supera el 95 % de las deflexiones en cada tramo conforme a una distribución de frecuencia del tipo normal).

3.2. Parámetros de diseño.

Los siguientes parámetros de diseño son constantes, para todos los escenarios de análisis considerados.

- Módulo de elasticidad del concreto hidráulico (E_c): 5000000 psi
- Módulo de ruptura del concreto hidráulico a los 28 días (S_c): 650 psi
- Desviación estándar del proceso constructivo (S_o): 0.30
- Coeficiente de drenaje (C_d): 1.0
- Coeficiente de transferencia de carga en las juntas (J): 3.2 (dobelas, espaldones de estructura no rígida).
- Índice de servicio inicial: 4.5
- Índice de servicio terminal (P_t): 2.5

Adicionalmente, se consideran diferentes escenarios de diseño, a partir de los parámetros de la Tabla 8.

Tabla 8: Parámetros variables por escenario de diseño.

Parámetro	Tramo No. 1		Tramo No. 2	
	90 %	95 %	90 %	95 %
Nivel de confianza	90 %	95 %	90 %	95 %
Período de diseño	15 años	20 años	15 años	20 años
Módulo de reacción de la capa de apoyo de la losa	250 pci	300 pci	170 pci	200 pci
			250 pci	290 pci

3.3. Espesores de diseño.

A partir de los parámetros de diseño de la Sección 3.2., se obtienen los espesores de diseño de la Tabla 9.

Tabla 9: Dimensionamiento de espesores de sobre-capa de concreto hidráulico.

Período de diseño: 15 años

% Confianza: 90%

Tramo	E.Eq.	D losa (in)	Pt	k (pci)	Sc (psi)	Cd	J	Ec (psi)	R (%)	Zr	So	Zr*So	log (E.Eq) (*)	log (W18) (*)	D (in)	diferencia (*)
1	1.76E+07	10.632	2.5	250	650	1.000	3.200	5.70E+06	90	1.281551	0.3	0.384	7.246	7.245	10.632	1.25E-04
1	1.76E+07	10.541	2.5	300	650	1.000	3.200	5.70E+06	90	1.281551	0.3	0.384	7.246	7.246	10.541	-5.51E-06
2	2.36E+07	11.301	2.5	170	650	1.000	3.200	5.70E+06	90	1.281551	0.3	0.384	7.373	7.373	11.301	1.19E-04
2	2.36E+07	11.232	2.5	200	650	1.000	3.200	5.70E+06	90	1.281551	0.3	0.384	7.373	7.373	11.232	-2.88E-05
2	2.36E+07	11.129	2.5	250	650	1.000	3.200	5.70E+06	90	1.281551	0.3	0.384	7.373	7.373	11.129	9.56E-05
2	2.36E+07	11.054	2.5	290	650	1.000	3.200	5.70E+06	90	1.281551	0.3	0.384	7.373	7.373	11.054	3.03E-04

Período de diseño: 20 años

% Confianza: 90%

Tramo	E.Eq.	D losa (in)	Pt	k (pci)	Sc	Cd	J	Ec	R (%)	Zr	So	Zr*So	log (E.Eq)	log (W18)	D (in)	diferencia
1	2.61E+07	11.303	2.5	250	650	1.000	3.200	5.70E+06	90	1.281551	0.3	0.384	7.417	7.417	11.303	7.30E-05
1	2.61E+07	11.213	2.5	300	650	1.000	3.200	5.70E+06	90	1.281551	0.3	0.384	7.417	7.417	11.213	7.16E-05
2	3.48E+07	11.987	2.5	170	650	1.000	3.200	5.70E+06	90	1.281551	0.3	0.384	7.542	7.542	11.987	7.27E-05
2	3.48E+07	11.917	2.5	200	650	1.000	3.200	5.70E+06	90	1.281551	0.3	0.384	7.542	7.542	11.917	7.21E-05
2	3.48E+07	11.815	2.5	250	650	1.000	3.200	5.70E+06	90	1.281551	0.3	0.384	7.542	7.542	11.815	7.15E-05
2	3.48E+07	11.743	2.5	290	650	1.000	3.200	5.70E+06	90	1.281551	0.3	0.384	7.542	7.542	11.743	4.26E-06

Período de diseño: 15 años

% Confianza: 95%

Tramo	E.Eq.	D losa (in)	Pt	k (pci)	Sc	Cd	J	Ec	R (%)	Zr	So	Zr*So	log (E.Eq)	log (W18)	D (in)	diferencia
1	1.76E+07	11.056	2.5	250	650	1.000	3.200	5.70E+06	95	1.644853	0.3	0.493	7.246	7.245	11.056	1.51E-05
1	1.76E+07	10.965	2.5	300	650	1.000	3.200	5.70E+06	95	1.644853	0.3	0.493	7.246	7.245	10.965	1.48E-05
2	2.36E+07	11.740	2.5	170	650	1.000	3.200	5.70E+06	95	1.644853	0.3	0.493	7.373	7.373	11.740	1.57E-05
2	2.36E+07	11.671	2.5	200	650	1.000	3.200	5.70E+06	95	1.644853	0.3	0.493	7.373	7.373	11.671	1.56E-05
2	2.36E+07	11.569	2.5	250	650	1.000	3.200	5.70E+06	95	1.644853	0.3	0.493	7.373	7.373	11.569	1.55E-05
2	2.36E+07	11.496	2.5	290	650	1.000	3.200	5.70E+06	95	1.644853	0.3	0.493	7.373	7.373	11.496	1.55E-05

Período de diseño: 20 años

% Confianza: 95%

Tramo	E.Eq.	D losa (in)	Pt	k (pci)	Sc	Cd	J	Ec	R (%)	Zr	So	Zr*So	log (E.Eq)	log (W18)	D (in)	diferencia
1	2.61E+07	11.749	2.5	250	650	1.0	3.2	5.70E+06	95	1.645	0.3	0.493	7.417	7.417	11.749	1.56E-05
1	2.61E+07	11.659	2.5	300	650	1.0	3.2	5.70E+06	95	1.645	0.3	0.493	7.417	7.417	11.659	1.55E-05
2	3.48E+07	12.448	2.5	170	650	1.0	3.2	5.70E+06	95	1.645	0.3	0.493	7.542	7.542	12.448	1.60E-05
2	3.48E+07	12.379	2.5	200	650	1.0	3.2	5.70E+06	95	1.645	0.3	0.493	7.542	7.542	12.379	1.60E-05
2	3.48E+07	12.278	2.5	250	650	1.0	3.2	5.70E+06	95	1.645	0.3	0.493	7.542	7.542	12.278	1.59E-05
2	3.48E+07	12.205	2.5	290	650	1.0	3.2	5.70E+06	95	1.645	0.3	0.493	7.542	7.542	12.205	4.12E-06

(*) Comparación de ambos términos de la ecuación AASHTO para pavimentos rígidos.

El resumen de los espesores de diseño se presenta en la Tabla 10.

Tabla 10: Resumen de espesores de sobre-capa de concreto hidráulico.

Tramo	15 años		20 años	
	90 % confianza	95 % confianza	90 % confianza	95 % confianza
1	27.0	28.0	29.0	30.0
2	29.0	30.0	30.5	31.5

Se determinó muy poca sensibilidad del espesor de losa a los cambios en las condiciones de soporte en la capa de apoyo que fueron considerados a partir de los diferentes escenarios de análisis (Tabla 9).

Considerando los siguientes elementos de incertidumbre:

- Incremento de las cargas reales, respecto a las cargas de diseño originales (LANAMME, *op. cit.*), por el retraso en la entrada en funcionamiento de la estructura de pavimento rehabilitado (el primer año de funcionamiento debió ser 1999).
- Variabilidad en las condiciones de soporte de la capa de apoyo de la losa (variación del parámetro "k").
- Período de diseño inicial de 15 años.
- Recomendación de un nivel de confianza entre 85 y 99 % (AASHTO, *op. cit.*).

Se recomienda utilizar el diseño a 15 años, con un nivel de confianza del 95 %, es decir, la aplicación de una sobre-capa de 28.0 cm en el caso del Tramo 1, y de 30.0 cm en el caso del Tramo 2, considerando que el diseño original se realizó a 15 años.

Nota: para efectos de evaluar la sensibilidad de la separación de juntas y el diseño del acero de refuerzo (transversal y longitudinal), en función del espesor de losa, se analiza también la posibilidad de utilizar un espesor de losa de 29.0 cm para el Tramo 1 y de 30.5 cm para el Tramo 2.

4. DIMENSIONAMIENTO DE JUNTAS TRANSVERSALES.

4.1. Separación de juntas transversales.

La separación de juntas transversales se calcula de acuerdo con el criterio de esfuerzo máximo, causado por el diferencial térmico superficie – fondo de la losa de concreto hidráulico.

De acuerdo con Yang H. Huang, en *Pavement Analysis and Design* (Ref. 3), el esfuerzo térmico máximo en una losa de concreto ocurre en el borde de la losa y está determinado por la siguiente expresión.

$$\sigma_t = C \times E \times \alpha_t \times \delta_t$$

Donde:

σ_t : esfuerzo máximo provocado por el diferencial térmico en el borde de la losa (psi).

C : factor de corrección, que depende de la relación "L / l", donde "L" es la longitud de la losa (in) y "l" es el radio de rigidez relativa (in).

α_t : coeficiente térmico del concreto hidráulico, igual a 5×10^{-6} in/in/°F

δ_t : diferencial térmico entre la superficie y el fondo de la losa de concreto (16°C, equivalente a 28.8°F).

$$l = \left[E \times h^3 / (12 \times \{1 - \nu^2\} \times k) \right]^{0.25}$$

Donde:

E: módulo de elasticidad del concreto hidráulico (5000000 psi)

h: espesor de la losa de concreto hidráulico (in).

ν : módulo de Poisson del concreto hidráulico (0.15)

k: módulo de reacción de la sub-rasante (pci).

El esfuerzo máximo inducido por el diferencial térmico no debe ser superior al valor del módulo de ruptura ajustado por un factor de seguridad (2), dado que existen varias fuentes de incertidumbre: a) el control de condiciones que se da en el laboratorio en el momento de determinar el módulo de ruptura, que no se dan en la práctica; b) la pérdida de capacidad de soporte en la base de apoyo de la losa, y c) la variabilidad en las condiciones de soporte de losa.

En la Tabla 11 se presenta el resultado del cálculo del espaciamiento de juntas, utilizando los valores extremos en el módulo de capacidad de soporte (k) y los espesores de losa definidos en la Sección 3.3.

Por lo tanto, debe considerarse una separación de juntas de 3.85 m para el pavimento del tramo 1, y de 4.25 m para el pavimento del tramo 2. Nótese que el criterio recomendado representa una condición promedio, dados los resultados obtenidos, por tramo, en la Tabla 11.

Tabla 11: Cálculo de espaciamiento de juntas (L).

Tramo	K	h losa (in)	E (psi)	α_t (in/in/°F)	δ_t (°F)	γ	I (in)	C	L/I	L	
										in	m
1	250	11.0236	5.00E+06	5.00E-06	28.8	0.15	38.88	0.45	4.0	155.502	3.95
1	300	11.0236	5.00E+06	5.00E-06	28.8	0.15	37.14	0.45	4.0	148.573	3.77
1	250	11.4173	5.00E+06	5.00E-06	28.8	0.15	39.91	0.45	4.0	159.649	4.06
1	300	11.4173	5.00E+06	5.00E-06	28.8	0.15	38.13	0.45	4.0	152.535	3.87
2	170	11.811	5.00E+06	5.00E-06	28.8	0.15	45.08	0.45	4.0	180.34	4.58
2	290	11.811	5.00E+06	5.00E-06	28.8	0.15	39.45	0.45	4.0	157.80	4.01
2	170	12.007	5.00E+06	5.00E-06	28.8	0.15	45.64	0.45	4.0	182.58	4.64
2	290	12.007	5.00E+06	5.00E-06	28.8	0.15	39.94	0.45	4.0	159.75	4.06

4.2. Separación de dobelas en juntas transversales

La separación de las dobelas, en la junta transversal, se determina mediante la comparación del nivel de esfuerzo entre la dobla y el concreto hidráulico, y el máximo nivel de esfuerzo para la falla (resistencia).

El máximo nivel de esfuerzo para la falla (resistencia) es:

$$f_b = (4 - d) / 3 \times f'_c$$

Donde:

f_b : máximo nivel de esfuerzo entre la dobla y el concreto hidráulico (psi).

d : diámetro de la dobla (in).

f'_c : resistencia del concreto a la compresión simple a los 28 días (psi).

Así, para un diámetro de dobla de 2.54 cm (1 in) y un concreto de resistencia a la compresión simple a los 28 días de 3000 psi, se obtiene:

$$f_b = (4 - 1) / 3 * 3000 \text{ psi} = 3000 \text{ psi}$$

El nivel de esfuerzo que se genera efectivamente entre la dobla y la losa, considerando la aplicación de un eje equivalente (9000 lb por llanta), se determina a partir de:

$$\sigma_d = K \times P_t \times (2 + \beta * z) / (4 * \beta^3 \times E_d \times I_d)$$

$$I_d = 1 / 64 \times \pi \times d^4$$

$$\beta = \sqrt[4]{K \times d / (4 \times E_d \times I_d)}$$

Donde:

σ_d : nivel de esfuerzo generado por el contacto dobla – losa (psi)

K : módulo de soporte de la dobla. Usualmente dentro de un rango de 300000 psi a 1500000 psi. En este caso se utiliza el punto medio del rango (900000 psi).

E_d : módulo de Young de la dobla (29×10^6).

I_d : momento de inercia de la dobla. Para una dobla de un diámetro de 2.54 cm (1 in), se tiene un momento de inercia de $I_d = \pi / 64 \text{ in}^4$.

β : rigidez relativa de la dovela embebida en el concreto. Para las condiciones de análisis de este caso corresponderá a $\beta = 0.631$ in.

z : ancho de la junta transversal. En este caso se considerará 0.6 cm (1/4 in).

Pt: carga máxima soportada por una dovela, dada la aplicación de un eje equivalente (18000 lb).

Considerando una transferencia de carga en la dovela de 50 % / 50 %, y la aplicación de 9000 lb por llanta del eje, se obtiene que:

1. A partir de una separación de dovelas de 30 cm (12 in) y un diámetro de dovela de 2.54 cm (1 in), se obtienen los radios de rigidez relativa de la Tabla 11.
2. A partir de los radios de rigidez relativa "l" críticos (38.88 in para el Tramo 1 y 39.45 in para el Tramo 2), se obtienen las respectivas longitudes de desarrollo críticas ($1.8 * l$), dada la aplicación de una carga en el borde de la losa, que corresponden a 66.9 in para el Tramo 1 y 71.0 para el Tramo 2.
3. Al considerar la aplicación de un eje de 18000 lb, con una dimensión de 72 in (entre puntos de carga), el nivel de carga máximo sobre una dovela es 941 lb (Tramo 1) y 930 lb (Tramo 2). El nivel de carga máxima ocurre sobre las dovelas directamente bajo cada carga, considerando la aplicación de una carga en el borde de la losa.

Por lo tanto, aplicando la expresión para el nivel de esfuerzo generado por el contacto dovela – losa (σ_b), se obtiene un nivel de esfuerzo generado de 1283 psi, para el Tramo 1, y 1268 psi, para el Tramo 2.

En este caso el nivel de esfuerzo generado (1283 psi / 1268 psi) es menor que la resistencia (3000 psi), de manera que la separación de 30 cm entre dovelas es adecuada.

Desde el punto de vista de concentraciones de esfuerzos, se considera necesario el incremento del diámetro de dovelas a 2.85 cm (1 1/8 in)

Así, se recomienda la utilización de dovelas de 2.85 cm, con una separación centro a centro de 30 cm, colocando la primera dovela a 15 cm del borde de la losa.

4.3. Acero en juntas longitudinales

La determinación del porcentaje del área de contacto longitudinal que debe ser reforzada con acero, se determina a partir de la Figura 3.8 de la Guía para el diseño de pavimentos, de la AASHTO (1993).

El cálculo del área a reforzar con acero, a lo largo de la junta longitudinal se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12: Cálculo de acero longitudinal.

Tramo	Longitud de losa		F (1)	fs (2)	Ps (3)	H losa	Acero
	m	ft					
1	3.50	11.5	2.0	30000	0.035	28.0	3.43
						29.0	3.55
2	3.75	12.3	2.0	30000	0.035	30.0	3.94
						30.5	4.00

Notas:

- (1) Factor de fricción.
- (2) Resistencia del acero a la tracción.
- (3) Porcentaje del área que corresponde a acero.

Considerando el uso de varilla No. 4 (diámetro de 1.27 cm), con una separación de 60 cm (24 in), se obtiene un área de 7.60 cm², que supera cualquiera de los requerimientos de la Tabla 12.

La selección de una separación de 60 cm corresponde a un criterio de separación máxima del acero de refuerzo en la junta longitudinal, en función del espesor de losa y la distancia al borde libre de la losa.

5. RECOMENDACIONES FINALES.**5.1. Preparación previa del pavimento existente.**

De acuerdo con el Instituto del Concreto Americano (ACI), en Sobrecapas de concreto hidráulico: whitetopping (Ref. 4), aplican las consideraciones de la Tabla 13, previas a la construcción de la sobrecapa de concreto hidráulico.

Tabla 13: Recomendaciones de reparación previa de la superficie de concreto asfáltico.

Condición general del pavimento	Reparación previa del pavimento
Rodera < 50 mm	Ninguna
Rodera > 50 mm	Perfilado o nivelado
Gradillas	Perfilado
Baches no tapados	Relleno con mezcla fría o caliente.
Fallas de la sub-rasante	Remover y re-emplazar / reparar
Cuero de lagarto	Ninguna

Tabla 13: Recomendaciones de reparación previa de la superficie de concreto asfáltico (continuación).

Condición general del pavimento	Reparación previa del pavimento
Fractura en bloques	Ninguna
Fracturas transversales	Ninguna
Fracturas longitudinales	Ninguna
Exudación	Ninguna

Fuente: ACI Costa Rica, Publicación Especial No. 16.

5.2. Diseño de sobre-capa de concreto hidráulico.

Para el tramo Aeropuerto – Manolo's:

- Espesor de losa de 28.0 cm
- Separación de juntas transversales de 3.85 m
- Dobelas de 2.85 cm de diámetro
- Separación de dobelas, en juntas transversales, de 30 cm
- Acero de amarre longitudinal de 1.27 cm de diámetro (No. 4)
- Separación de varillas de amarre, en juntas longitudinales, de 60 cm
- Sello en silicón, en todas las juntas.

Para el tramo Manolo's – San Ramón:

- Espesor de losa de 30.0 cm
- Separación de juntas transversales de 4.25 m
- Dobelas de 2.85 cm de diámetro
- Separación de dobelas, en juntas transversales, de 30 cm
- Acero de amarre longitudinal de 1.27 cm de diámetro (No. 4)
- Separación de varillas de amarre, en juntas longitudinales, de 60 cm
- Sello en silicón, en todas las juntas.

Nota: en los tramos donde se construirá un segundo carril, debe garantizarse una capacidad de soporte, en la base de apoyo de la losa de concreto hidráulico de 250 pci, para Aeropuerto-Manolo's, y de 200 pci, para el tramo Manolo's – Aeropuerto. Para un material de sub-rasante con CBR de 3, se recomienda la construcción de una base estabilizada con cemento de 20.0 cm, que cumple ambos requerimientos, con una pérdida de soporte de 0.5 (Ls), que es el rango medio para bases estabilizadas con cemento (AASHTO, op.cit.)

Nota: las Figuras 1 y 2 adjuntas presentan los perfiles característicos para las secciones de pavimento definidas.

5.3 Diseño de espaldón.

El diseño de pavimento rígido ha sido desarrollado en función de que no existe transferencia de carga con el espaldón, de manera que puede utilizarse una estructura consistente en:

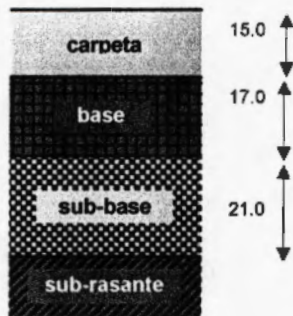
- Superficie de mezcla asfáltica de 4.0 cm de espesor, o tratamiento superficial triple TS3.
- Base de toba-cemento plástica con una resistencia a la compresión de 50 kg/cm², a los 7 días, de 15 cm de espesor.
- Base de toba-cemento plástica con una resistencia a la compresión de 35 kg/cm², a los 7 días, en el espesor necesario para dar el nivel de rasante del pavimento.

Las capas de base de toba-cemento plástica deben presentar el mismo patrón de aserrado que las losas de concreto del pavimento (3.85 m en Aeropuerto-Manolo's y 4.25 m en Manolo's-San Ramón).

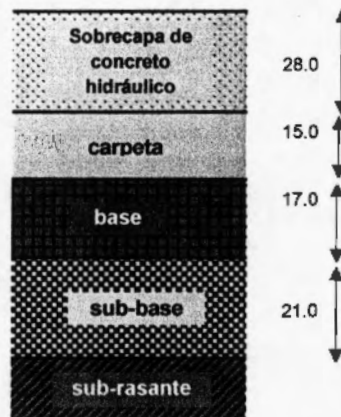
5.4 Recomendaciones finales

Es indispensable la construcción de sistemas de drenaje apropiados, con base en colectores transversales (zonas de corte) y longitudinales.

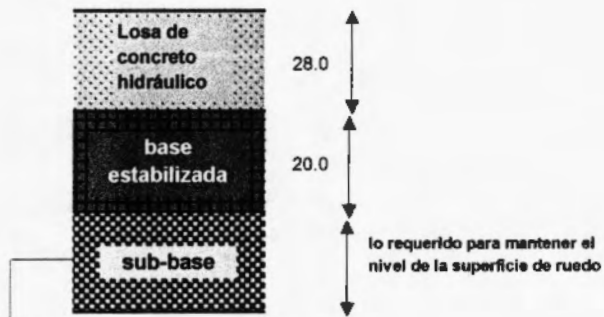
El diseño de la estructura de pavimento se realizó a 15 años, en concordancia con el diseño inicial planteado por el concesionario. Un incremento de 1.0 cm en el espesor de losa corresponde a un período de diseño de 20 años, aunque con un menor nivel de confianza (90% o menos).



Existente

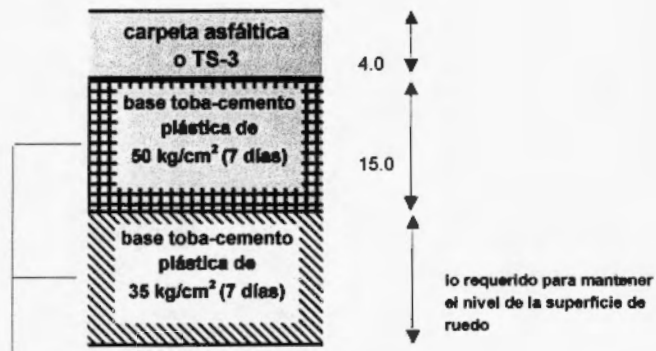


Sobre-capa en pavimento existente



Al 98% de compactación.

Construcción de segundo carril

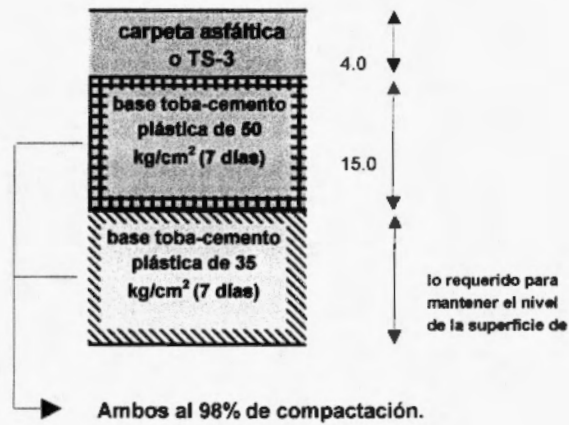
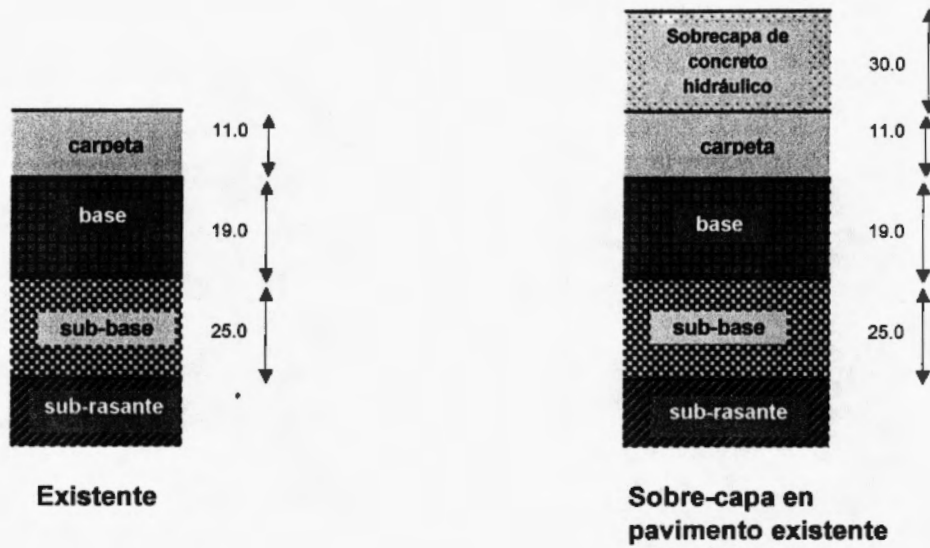


Ambos al 98% de compactación.

Espaldón

Nota: cotas en centímetros.

Figura 1: Secciones de pavimento diseñadas. Tramo: AEROPUERTO - MANOLO'S



Espaldón

Figura 2: Secciones de pavimento diseñadas. Tramo: MANOLO'S - SAN RAMON

6. REFERENCIAS.

- (1) Arce, Mario; Castro, Pedro; Evaluación del diseño de pavimento rígido para la rehabilitación de la autopista Bernardo Soto; Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, 1998.
- (2) American Association of State Highway and Transportation Officials; AASHTO guide for design of pavement structures; AASHTO, 1993.
- (3) Huang, Yang H.; Pavement analysis and design; Prentice Hall, 1993.
- (4) American Concrete Institute, Capítulo de Costa Rica; Sobrecarpeta de concreto hidráulico: whitetopping; publicación especial No. 16, 1996.

ANEXO 1
DEFLEXIONES

**LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES
ENSAYO DE DEFLECTOMETRIA CON VIGA BENKELMAN**

Autopista Bernardo Soto

PESO DEL EJE : 8200 Kg
 PRECISION DEL MICROMETRO : 0.01mm
 MEDICIONES CADA 100 METROS
 PRESION DE LLANTAS: 80 Lbs

TRAMO: San Ramón - Aeropuerto
 SENTIDO: San Ramón - Aeropuerto
 RUTA No. 1
 CARRIL: Derecho
 FECHA: 21-Oct-99

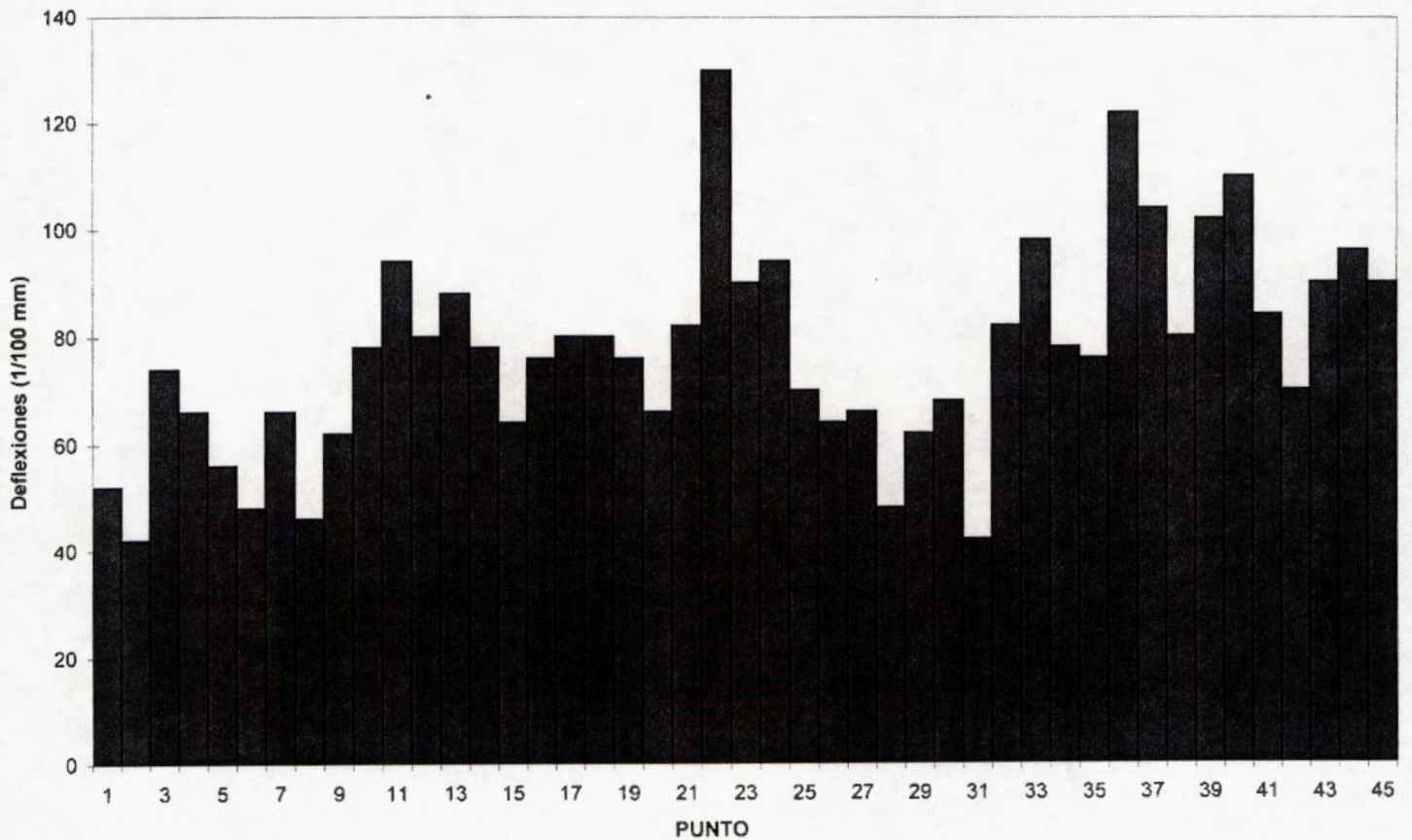
ESTACION	PUNTO Nº	DEFLEXION mm*10 ⁻²	TEMPER PAVIM (°C)	TEMPER AIRE (°C)
0+ 100	1	52	39	29
0+ 200	2	42	39	29
0+ 300	3	74	39	29
0+ 400	4	66	39	29
0+ 500	5	56	38	29
0+ 600	6	48	38	29
0+ 700	7	66	38	29
0+ 800	8	46	38	29
0+ 900	9	62	37	29
1+ 000	10	78	37	29
1+ 100	11	94	37	29
1+ 200	12	80	37	29
1+ 300	13	88	37	29
1+ 400	14	78	36	29
1+ 500	15	64	36	29
1+ 600	16	76	36	29
1+ 700	17	80	36	29
1+ 800	18	80	36	29
1+ 900	19	76	36	29
2+ 000	20	66	36	29
2+ 100	21	82	36	29
2+ 200	22	130	35	29
2+ 300	23	90	35	28
2+ 400	24	94	35	28
2+ 500	25	70	35	28
2+ 600	26	64	35	28
2+ 700	27	66	35	28
2+ 800	28	48	35	28
2+ 900	29	62	35	28
3+ 000	30	68	34	28
3+ 100	31	42	34	28
3+ 200	32	82	34	28
3+ 300	33	98	34	28
3+ 400	34	78	34	28
3+ 500	35	76	34	28
3+ 600	36	122	34	28
3+ 700	37	104	34	28
3+ 800	38	80	34	28
3+ 900	39	102	33	28
4+ 000	40	110	33	27
4+ 100	41	84	33	27
4+ 200	42	70	33	27
4+ 300	43	90	33	27
4+ 400	44	96	33	27
4+ 500	45	90	33	27

LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES
ENSAYO DE DEFLECTOMETRIA CON VIGA BENKELMAN

RUTA Noº: 1
puntos 1-45

TRAMO: San Ramón - Aeropuerto
SENTIDO: San Ramón - Aeropuerto
MEDICIONES CADA 100 METROS

PERFIL DE DEFLEXIONES



PROMEDIO (D): 81.81

DESV. EST. (s): 19.64

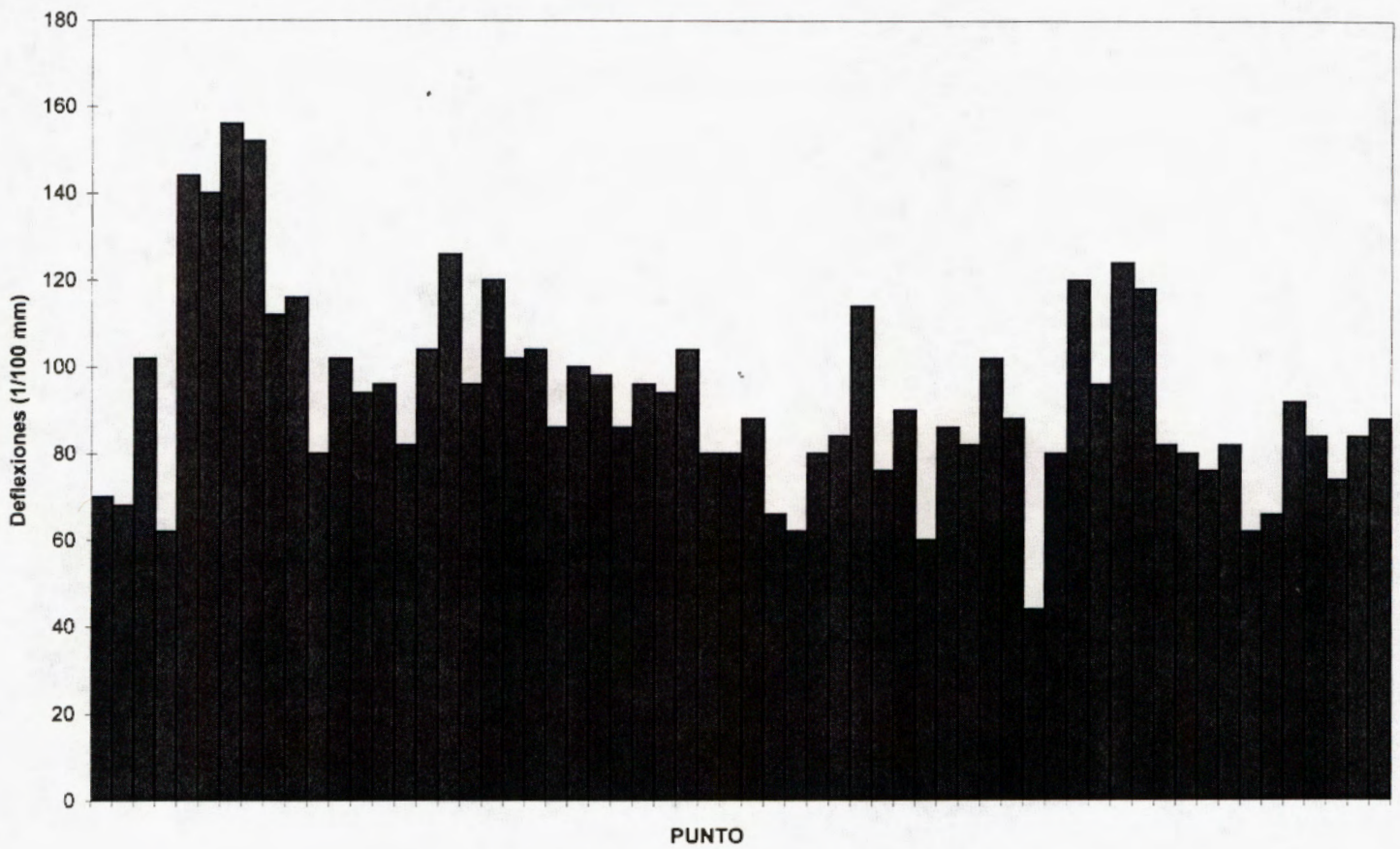
4+ 600	46	70	33	27
4+ 700	47	68	33	27
4+ 800	48	102	32	27
4+ 900	49	62	32	27
9+ 100	50	144	32	27
9+ 200	51	140	32	27
9+ 300	52	156	32	27
9+ 400	53	152	32	27
9+ 500	54	112	32	27
9+ 600	55	116	32	27
9+ 700	56	80	32	27
9+ 800	57	102	32	27
9+ 900	58	94	31	27
10+ 000	59	96	31	27
10+ 100	60	82	31	27
10+ 200	61	104	31	27
10+ 300	62	126	31	27
10+ 400	63	96	31	27
10+ 500	64	120	31	27
10+ 600	65	102	31	27
10+ 700	66	104	31	27
10+ 800	67	86	31	27
10+ 900	68	100	31	26
11+ 000	69	98	31	26
11+ 100	70	86	31	26
11+ 200	71	96	31	26
11+ 300	72	94	31	26
11+ 400	73	104	31	26
11+ 500	74	80	31	26
11+ 600	75	80	31	26
11+ 700	76	88	31	26
11+ 800	77	66	31	26
11+ 900	78	62	31	26
12+ 000	79	80	31	26
12+ 100	80	84	37	26
12+ 200	81	114	37	26
12+ 300	82	76	37	26
12+ 400	83	90	38	26
12+ 500	84	60	38	26
12+ 600	85	86	38	27
12+ 700	86	82	39	27
12+ 800	87	102	39	27
12+ 900	88	88	39	27
13+ 000	89	44	39	28
13+ 100	90	80	40	28
13+ 200	91	120	40	28
13+ 300	92	96	40	28
13+ 400	93	124	40	29
13+ 500	94	118	41	29
13+ 600	95	82	41	29
13+ 700	96	80	41	29
13+ 800	97	76	41	30
13+ 900	98	82	41	30
14+ 000	99	62	42	30
14+ 100	100	66	42	30
14+ 200	101	92	42	30
14+ 300	102	84	42	30
14+ 400	103	74	42	31
14+ 500	104	84	42	31
14+ 600	105	88	42	31

LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES
ENSAYO DE DEFLECTOMETRIA CON VIGA BENKELMAN

RUTA Noº: 1
puntos 46-105

TRAMO: San Ramón - Aeropuerto
SENTIDO: San Ramón - Aeropuerto
MEDICIONES CADA 100 METROS

PERFIL DE DEFLEXIONES



PROMEDIO (D): 93.03

DESV. EST. (s): 22.71

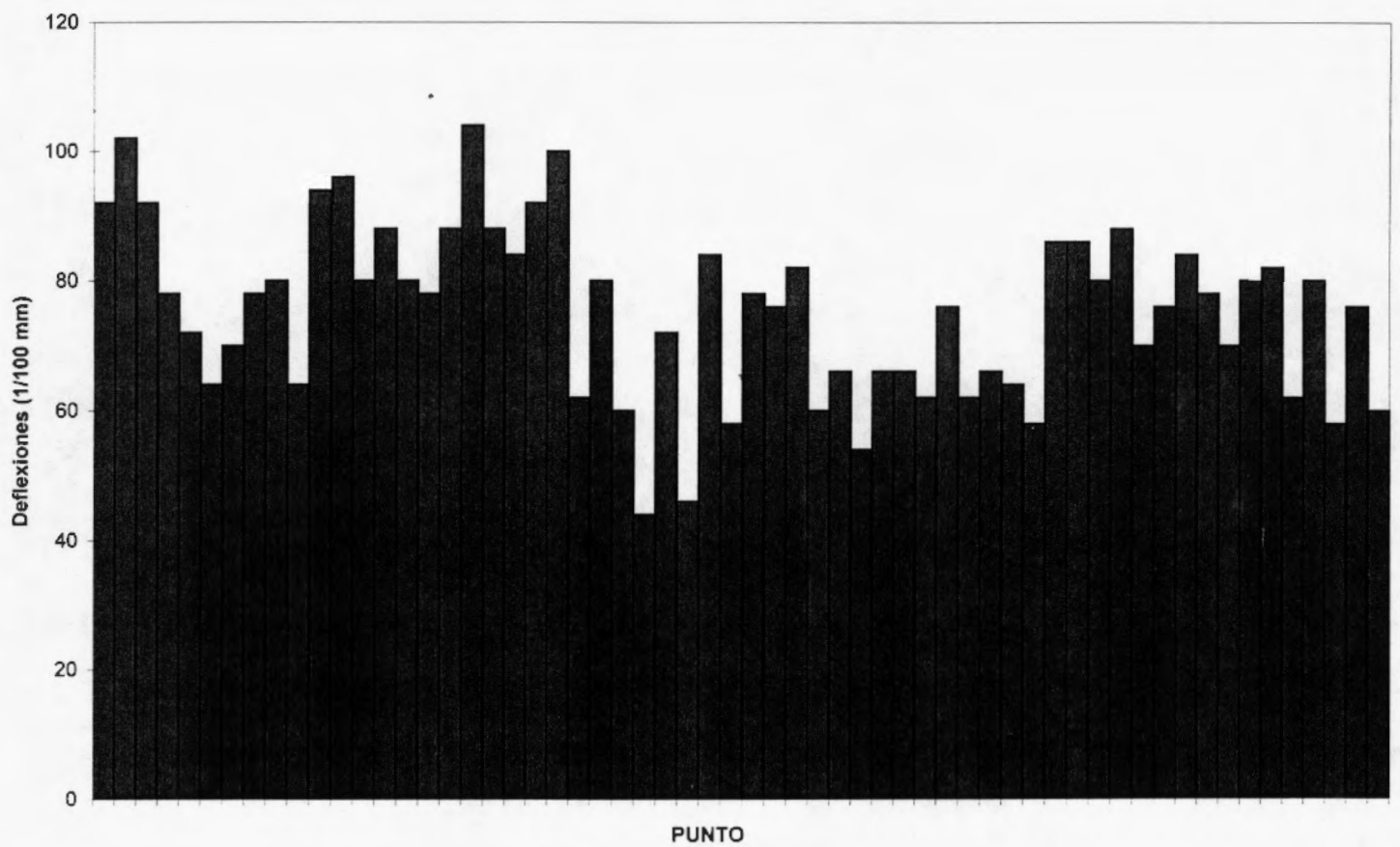
14+ 700	106	92	43	31
14+ 800	107	102	43	31
14+ 900	108	92	43	31
15+ 000	109	78	43	31
15+ 100	110	72	43	31
15+ 200	111	64	43	31
15+ 300	112	70	43	32
15+ 400	113	78	43	32
15+ 500	114	80	43	32
15+ 600	115	64	43	32
15+ 700	116	94	43	32
15+ 800	117	96	42	32
15+ 900	118	80	42	32
16+ 000	119	88	42	32
16+ 100	120	80	42	32
16+ 200	121	78	42	32
16+ 300	122	88	42	32
16+ 400	123	104	42	33
16+ 500	124	88	42	33
16+ 600	125	84	42	33
16+ 700	126	92	42	33
16+ 800	127	100	42	33
16+ 900	128	62	42	33
17+ 000	129	80	42	33
17+ 100	130	60	42	33
17+ 200	131	44	42	33
17+ 400	132	72	36	29
17+ 500	133	46	36	29
17+ 600	134	84	36	29
17+ 700	135	58	36	29
17+ 800	136	78	36	29
17+ 900	137	76	36	29
18+ 000	138	82	36	30
18+ 100	139	60	36	30
18+ 200	140	66	36	30
18+ 300	141	54	36	30
18+ 400	142	66	36	30
18+ 500	143	66	36	30
18+ 600	144	62	36	30
18+ 700	145	76	36	30
18+ 800	146	62	36	30
18+ 900	147	66	36	30
19+ 000	148	64	36	30
19+ 100	149	58	36	30
19+ 200	150	86	36	30
19+ 300	151	86	36	30
19+ 400	152	80	36	31
19+ 500	153	88	36	31
19+ 600	154	70	36	31
19+ 700	155	76	36	31
19+ 800	156	84	36	31
19+ 900	157	78	36	31
20+ 000	158	70	36	31
20+ 100	159	80	36	31
20+ 200	160	82	36	31
20+ 300	161	62	36	31
20+ 400	162	80	36	32
20+ 500	163	58	36	32
20+ 600	164	76	37	32
20+ 700	165	60	37	32

LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES
ENSAYO DE DEFLECTOMETRIA CON VIGA BENKELMAN

RUTA Noº: 1
puntos 106-165

TRAMO: San Ramón - Aeropuerto
SENTIDO: San Ramón - Aeropuerto
MEDICIONES CADA 100 METROS

PERFIL DE DEFLEXIONES



PROMEDIO (D): 75.37

DESV. EST. (s): 13.39

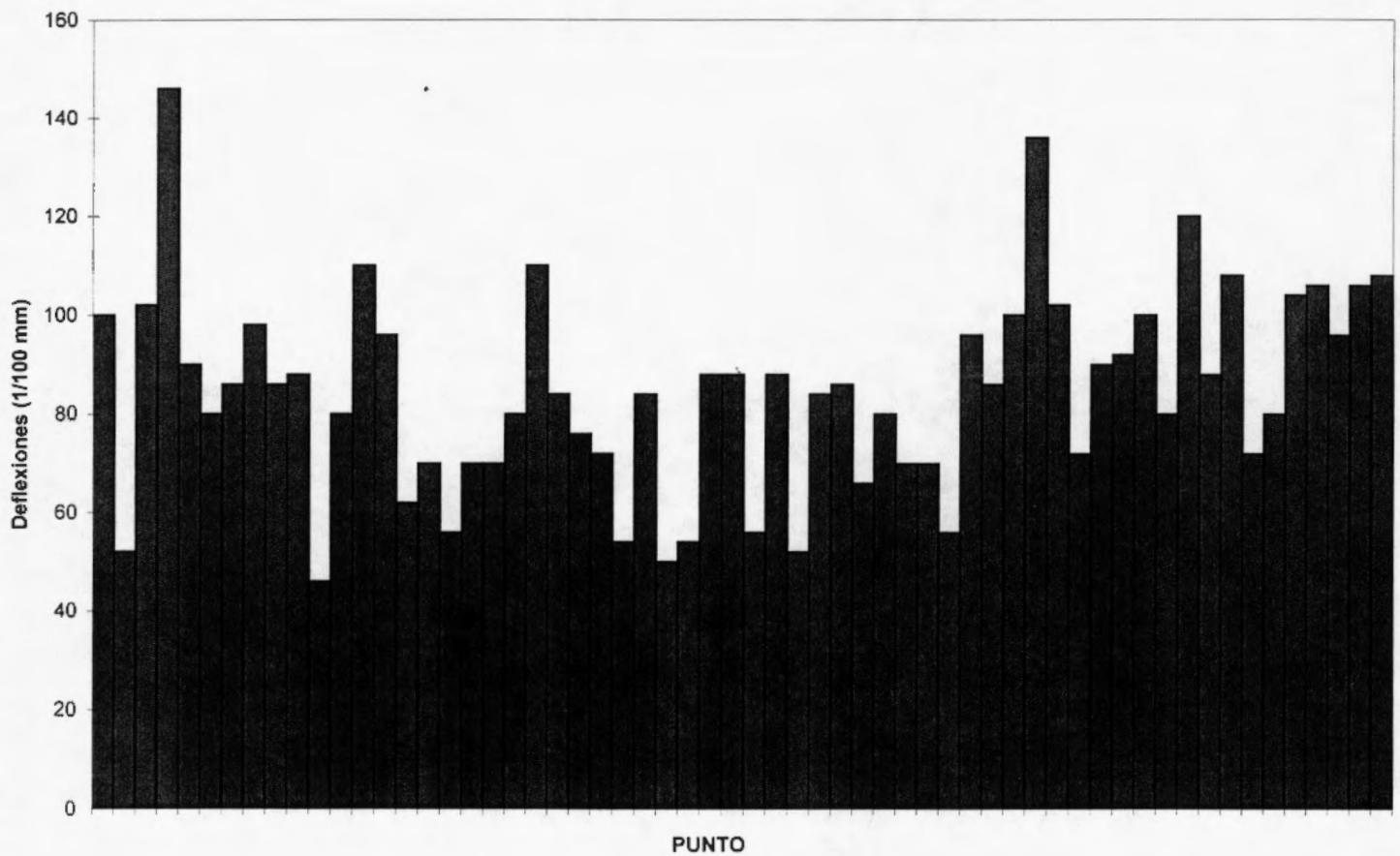
20+ 800	166	100	37	32
21+ 100	167	52	37	32
21+ 200	168	102	37	32
21+ 300	169	146	37	32
21+ 400	170	90	37	32
21+ 500	171	80	37	32
21+ 600	172	86	37	32
21+ 700	173	98	37	32
21+ 800	174	86	37	32
21+ 900	175	88	37	32
22+ 000	176	46	37	32
22+ 100	177	80	37	32
22+ 400	178	110	37	33
22+ 500	179	96	38	33
22+ 600	180	62	38	33
22+ 700	181	70	38	33
22+ 800	182	56	38	33
22+ 900	183	70	38	33
23+ 000	184	70	38	33
23+ 100	185	80	38	33
23+ 200	186	110	38	33
23+ 300	187	84	38	33
23+ 400	188	76	38	33
23+ 500	189	72	38	33
23+ 600	190	54	38	33
23+ 700	191	84	38	33
23+ 800	192	50	38	33
23+ 900	193	54	38	33
24+ 100	194	88	39	33
24+ 200	195	88	39	33
24+ 300	196	56	39	33
24+ 400	197	88	39	33
24+ 500	198	52	39	33
24+ 600	199	84	39	33
24+ 700	200	86	39	33
24+ 800	201	66	39	33
24+ 900	202	80	39	33
25+ 000	203	70	39	33
25+ 100	204	70	39	33
25+ 200	205	56	38	33
25+ 300	206	96	38	33
25+ 400	207	86	38	33
25+ 500	208	100	38	33
25+ 600	209	136	38	33
25+ 700	210	102	38	33
25+ 800	211	72	38	33
25+ 900	212	90	38	33
26+ 000	213	92	28	24
26+ 100	214	100	28	24
26+ 200	215	80	28	24
26+ 300	216	120	28	24
26+ 400	217	88	28	24
26+ 500	218	108	28	24
26+ 600	219	72	28	24
26+ 700	220	80	28	25
26+ 800	221	104	28	25
26+ 900	222	106	28	25
27+ 000	223	96	29	25
27+ 100	224	106	29	25
27+ 200	225	108	29	25

LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES
ENSAYO DE DEFLECTOMETRIA CON VIGA BENKELMAN

RUTA No°: 1
puntos 166-225

TRAMO: San Ramón - Aeropuerto
SENTIDO: San Ramón - Aeropuerto
MEDICIONES CADA 100 METROS

PERFIL DE DEFLEXIONES



PROMEDIO (D): 84.63

DESV. EST. (s): 20.65

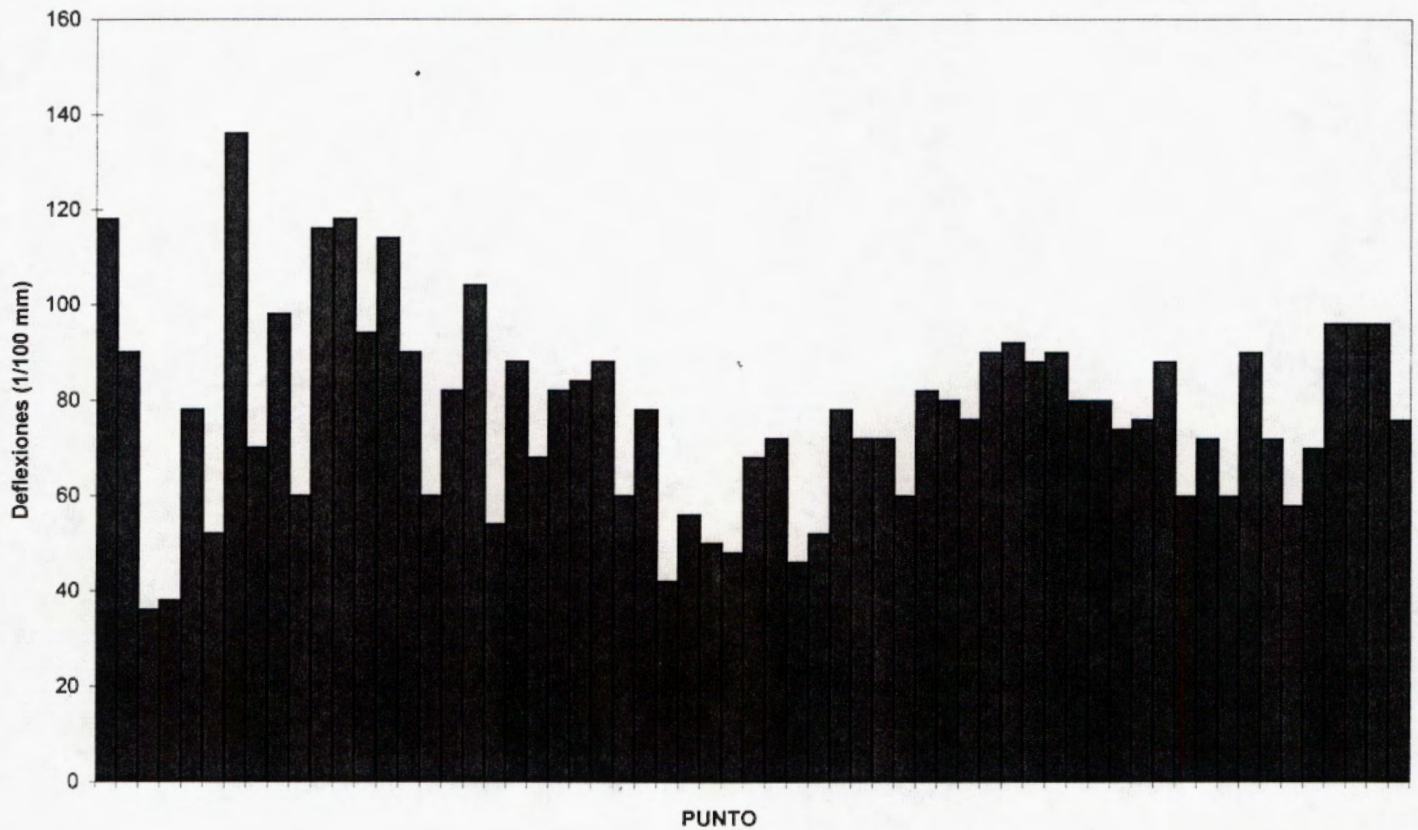
27+ 300	226	118	29	25
27+ 400	227	90	29	25
27+ 500	228	36	29	26
27+ 600	229	38	29	26
27+ 700	230	78	29	26
27+ 800	231	52	29	26
28+ 100	232	136	29	26
28+ 200	233	70	29	26
28+ 300	234	98	29	26
28+ 400	235	60	29	26
28+ 500	236	116	29	27
28+ 600	237	118	30	27
28+ 700	238	94	30	27
28+ 800	239	114	30	27
28+ 900	240	90	30	27
29+ 000	241	60	30	27
29+ 100	242	82	30	27
29+ 200	243	104	30	27
29+ 300	244	54	30	27
29+ 400	245	88	30	27
29+ 500	246	68	30	27
29+ 600	247	82	30	28
29+ 700	248	84	30	28
29+ 800	249	88	30	28
29+ 900	250	60	30	28
30+ 000	251	78	30	28
30+ 100	252	42	30	28
30+ 200	253	56	30	28
30+ 300	254	50	30	28
30+ 400	255	48	30	28
30+ 500	256	68	30	28
30+ 700	257	72	31	28
30+ 800	258	46	31	28
30+ 900	259	52	31	28
31+ 000	260	78	31	29
31+ 100	261	72	31	29
31+ 200	262	72	31	29
31+ 300	263	60	31	29
31+ 400	264	82	31	29
31+ 500	265	80	31	29
31+ 600	266	76	31	29
31+ 700	267	90	32	29
31+ 800	268	92	32	30
31+ 900	269	88	32	30
32+ 000	270	90	32	30
32+ 100	271	80	32	30
32+ 200	272	80	32	30
32+ 300	273	74	32	30
32+ 400	274	76	32	30
32+ 500	275	88	32	30
32+ 600	276	60	33	30
32+ 700	277	72	33	30
32+ 800	278	60	33	30
32+ 900	279	90	33	30
33+ 000	280	72	33	30
33+ 100	281	58	33	30
33+ 200	282	70	33	30
33+ 300	283	96	34	28
33+ 400	284	96	34	28
33+ 500	285	96	34	28
33+ 600	286	76	35	28

LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES
ENSAYO DE DEFLECTOMETRIA CON VIGA BENKELMAN

RUTA No°: 1
puntos 226-286

TRAMO: San Ramón - Aeropuerto
SENTIDO: San Ramón - Aeropuerto
MEDICIONES CADA 100 METROS

PERFIL DE DEFLEXIONES



PROMEDIO (D): 77.28

DESV. EST. (s): 20.68

33+ 700	287	82	34	28
33+ 800	288	98	34	28
33+ 900	289	84	35	28
34+ 000	290	84	36	28
34+ 100	291	86	36	28
34+ 200	292	92	36	29
34+ 300	293	100	37	29
34+ 400	294	92	37	29
34+ 500	295	86	37	29
34+ 600	296	78	37	29
34+ 700	297	100	38	29
34+ 800	298	96	38	29
34+ 900	299	98	38	29
35+ 000	300	76	39	30
35+ 100	301	102	39	30
35+ 200	302	108	39	30
35+ 300	303	56	40	30
35+ 400	304	90	40	30
35+ 500	305	96	40	30
35+ 600	306	80	40	30
35+ 700	307	88	40	30
35+ 800	308	78	41	31
35+ 900	309	72	41	31
36+ 000	310	70	41	31
36+ 100	311	82	41	31
36+ 200	312	70	41	31
36+ 300	313	80	41	31
36+ 400	314	70	42	31
36+ 500	315	90	42	31
36+ 600	316	98	42	31
36+ 700	317	78	43	32
36+ 800	318	80	43	32
36+ 900	319	80	43	32
37+ 000	320	78	43	32
37+ 100	321	92	43	32
37+ 200	322	90	43	32
37+ 300	323	92	43	32
37+ 400	324	98	43	32
37+ 500	325	60	43	32
37+ 600	326	66	43	32
37+ 700	327	78	43	32
37+ 800	328	90	43	32
37+ 900	329	78	43	32
38+ 000	330	70	43	32
38+ 100	331	98	43	32
38+ 200	332	60	43	32
38+ 300	333	80	43	32
38+ 400	334	92	43	32
38+ 500	335	92	43	32
38+ 600	336	64	43	32
38+ 800	337	64	43	32
38+ 900	338	56	43	32
39+ 000	339	70	43	32
39+ 100	340	56	43	32
39+ 200	341	112	43	32
39+ 300	342	68	43	32
39+ 400	343	70	43	32
39+ 500	344	64	43	32
39+ 600	345	100	43	32

PROMEDIO (D): 81.81

DESV. EST. (σ):

19.64

LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES
ENSAYO DE DEFLECTOMETRIA CON VIGA BENKELMAN

RUTA Noº: 1

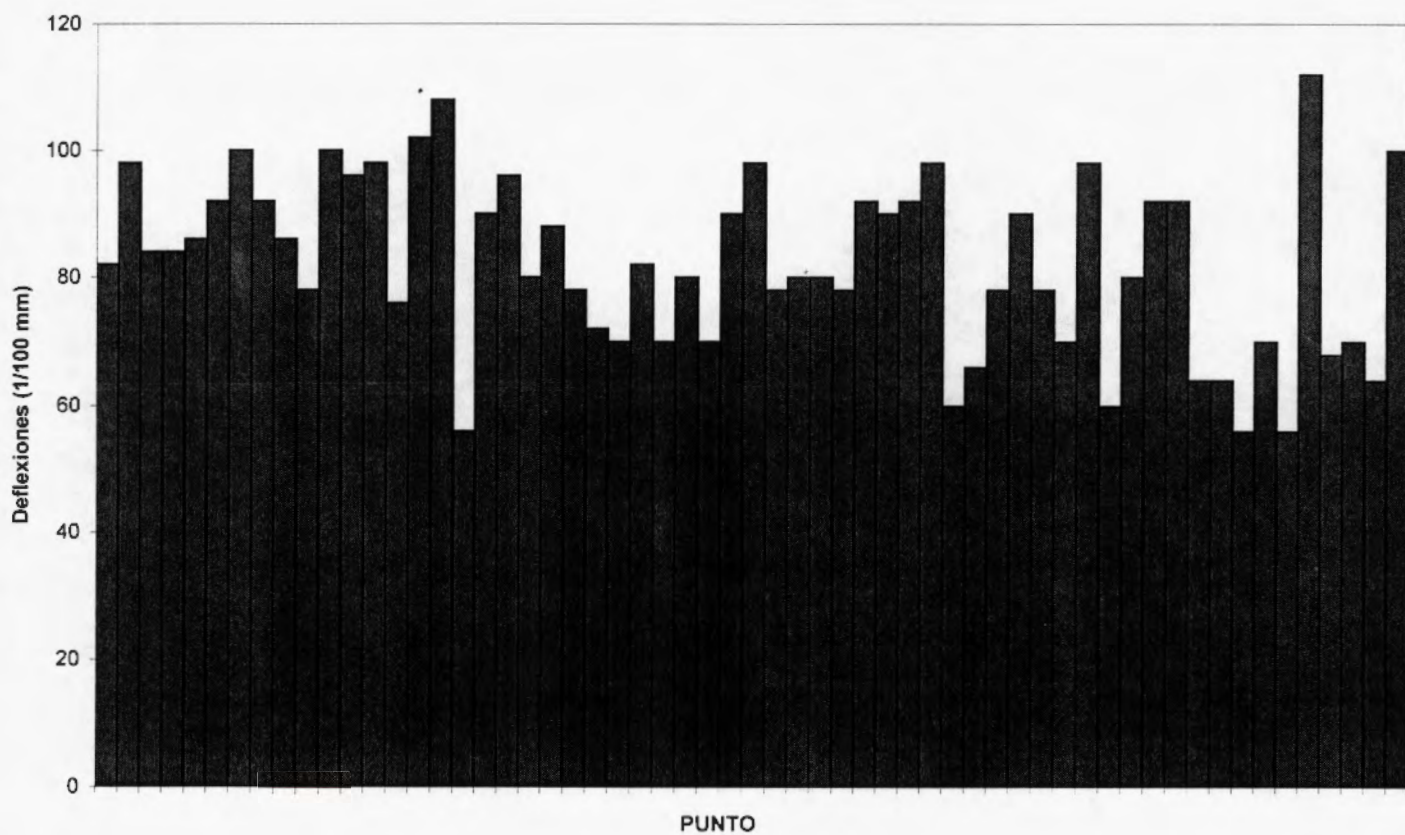
puntos 287-345

TRAMO: San Ramón - Aeropuerto

SENTIDO: San Ramón - Aeropuerto

MEDICIONES CADA 100 METROS

PERFIL DE DEFLEXIONES

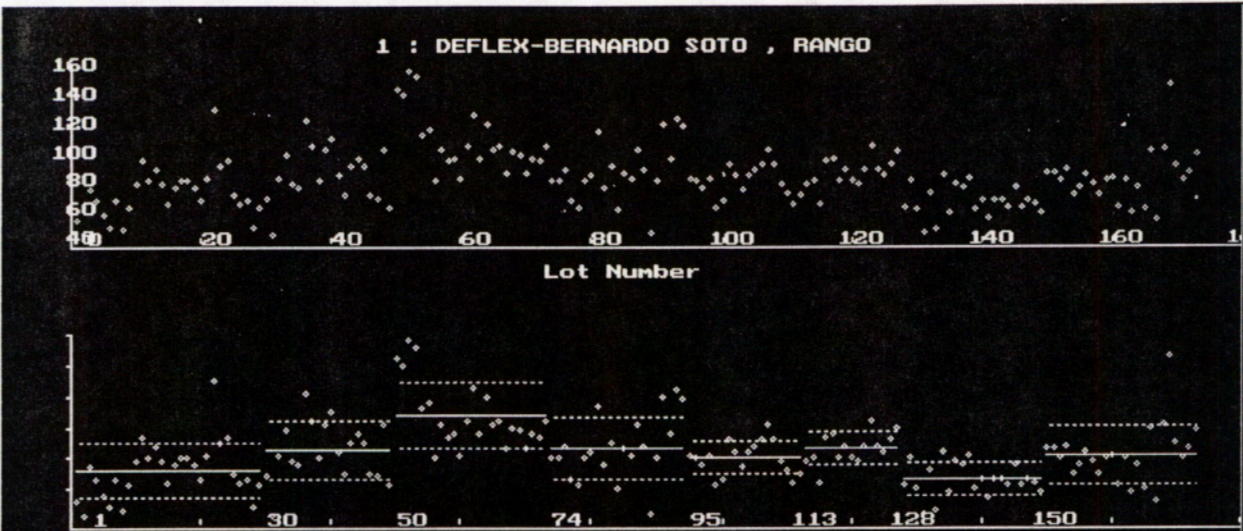


PROMEDIO (D): 82.34

DESV. EST. (s): 13.82

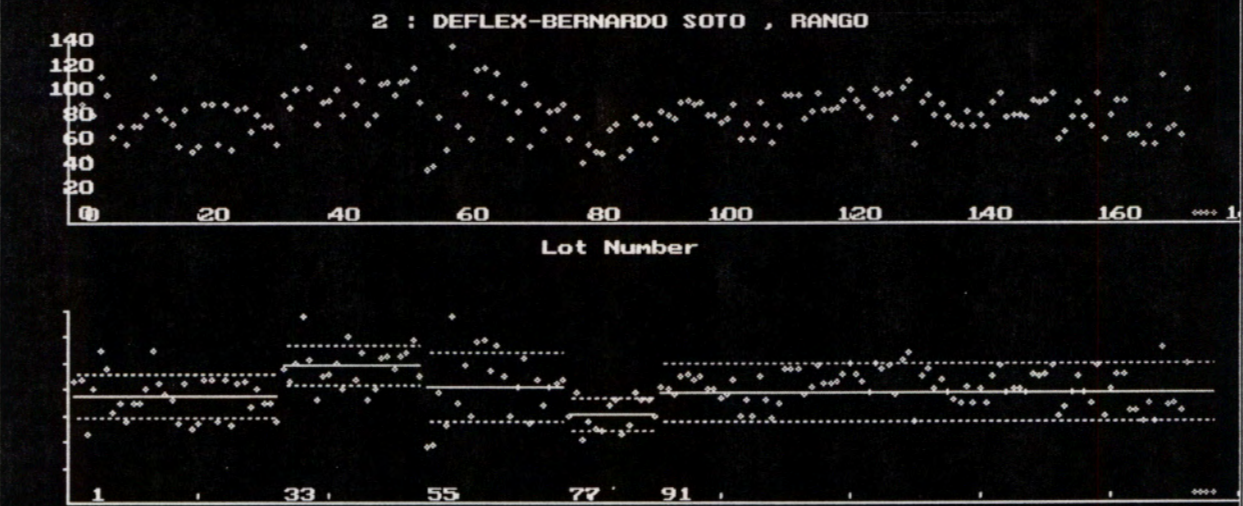
ANEXO 2
GRAFICOS SPEC PARA LA DEFINICION DE
SECCIONES HOMOGENEAS

ANALISIS POR TRAMOS HOMOGENEOS - DEFLEXIONES
 AUTOPISTA BERNARDO SOTO
 SENTIDO: SAN RAMON-AEROPUERTO



Segment Data

Lot Range	Average Value	Std Dev
1.0, 29.01	71.66	18.10
30.0, 49.01	84.70	18.98
50.0, 73.01	107.92	21.51
74.0, 94.01	86.67	20.57
95.0, 112.01	80.00	10.89
113.0, 127.01	86.27	10.19
128.0, 149.01	65.55	10.76
150.0, 173.01	82.08	18.63



Segment Data

Lot Range	Average Value	Std Dev
1.0, 32.01	74.44	16.52
33.0, 54.01	97.73	15.63
55.0, 76.01	82.27	26.25
77.0, 90.01	61.00	12.32
91.0, 176.01	77.91	21.58

<L>user Print, <D>ot Matrix Print, <C>ontinue

Tramos: (150-173) y (1-32), forman un solo tramo homogéneo. $\bar{x}=76.18$, $\sigma=20.49$.

RETROCALCULO DE MODULOS: BERNARDO SOTO

1) TRAMO 1: Aeropuerto-Manolo's

ESPEORES	cm	pulg
CA	15	5.91
BG	17	6.69
SB	21	8.27
SR		

E1 (psi)	E2 (psi)	E3 (psi)	E4 (psi)	U _z : z=0 (pulg)	U _z : z=0 (mm*10 ⁻²)
75000	16000	10000	5000	0.0552	140.2
125000	20000	12000	7500	0.0382	97.0
50000	16000	10000	5000	0.0603	153.2
50000	13000	10000	5000	0.0628	159.5
40000	13000	10000	5000	0.0662	168.1
100000	20000	12000	7500	0.0401	101.9
75000	20000	12000	7500	0.0428	108.7
40000	13000	10000	5000	0.0662	168.1
75000	16000	10000	7500	0.0457	116.1
75000	16000	10000	6500	0.0487	123.7
75000	16000	10000	6000	0.0506	128.5

2) TRAMO 2: Manolo's-San Ramón

ESPEORES	cm	pulg
CA	11	4.33
BG	19	7.48
SB	25	9.84
SR		

E1 (psi)	E2 (psi)	E3 (psi)	E4 (psi)	U _z : z=0 (pulg)	U _z : z=0 (mm*10 ⁻²)
75000	16000	10000	5000	0.0608	154.4
125000	20000	12000	7500	0.0430	109.2
50000	16000	10000	5000	0.0652	165.6
50000	13000	10000	5000	0.0689	175.0
40000	10000	10000	5000	0.0773	196.3
70000	16000	10000	5000	0.0615	156.2
65000	16000	10000	5000	0.0623	158.2
100000	16000	10000	5000	0.0580	147.3
100000	20000	12000	7500	0.0447	113.5
40000	13000	10000	5000	0.0717	182.1
40000	12000	9000	4000	0.0734	186.4
80000	16000	10000	5000	0.0602	152.9
75000	20000	12000	7500	0.0470	119.4
45000	10000	10000	5000	0.0756	192.0
100000	16000	12000	7500	0.0474	120.4
100000	16000	12000	6000	0.0521	132.3
30000	10000	8000	3500	0.0968	245.9
20000	10000	8000	3500	0.105	266.7
55000	13000	10000	5000	0.0677	172.0
100000	18000	12000	6000	0.0506	128.5
40000	10000	8000	3500	0.092	233.7
40000	10000	8000	4000	0.087	221.0
300000	10000	8000	4000	0.0917	232.9
40000	10000	9000	4000	0.0856	217.4