

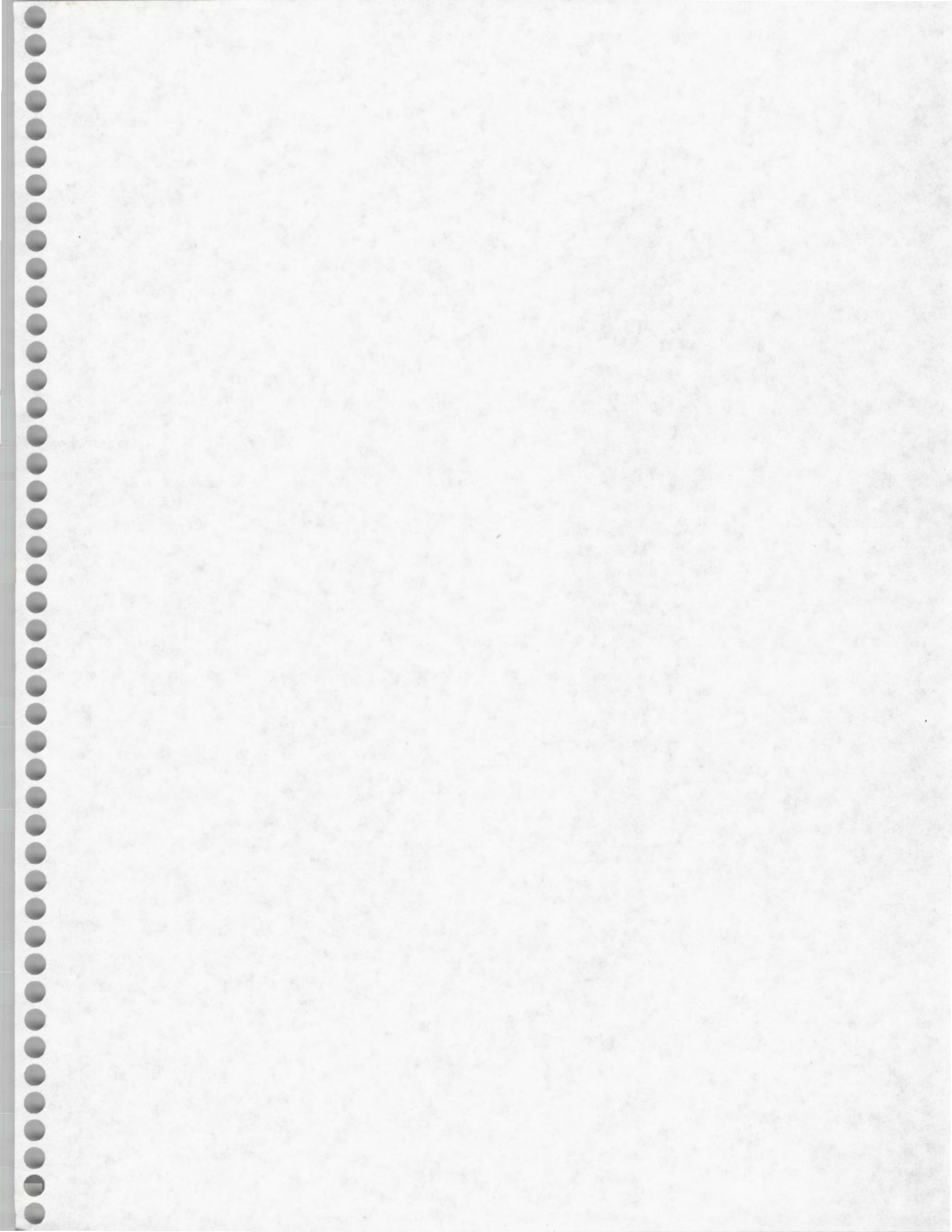


UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y
MODELOS ESTRUCTURALES

**CARRETERA BERNARDO
SOTO**

**DISEÑO DE LA BASE DE APOYO
PARA LA LOSA DE CONCRETO
HIDRAULICO**





***DISEÑO DE LA BASE DE APOYO PARA
LA LOSA DE CONCRETO HIDRAULICO:
PROYECTO BERNARDO SOTO***



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

LANAMME

San José, 27 de abril de 2000.

LM-IC-D-286-2000

**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 y con los comentarios del Ing. Carlos Acosta.

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

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Juan Pastor Gómez', written over 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
2.6	Módulo resiliente equivalente para la estructura de pavimento existente	4
3.	Diseño de sobre-capa asfáltica como base de apoyo de la losa de concreto	8
3.1	Escenarios de diseño	8
3.2	Estimación del módulo de elasticidad equivalente para la estructura de soporte de la losa por escenario de diseño	8
3.3	Estimación del módulo de soporte en la base de apoyo de la losa de concreto hidráulico	12
3.4	Verificación del nivel de confianza por escenario de diseño	20
3.4.1	Parámetros de diseño	20
3.4.2	Nivel de confianza	21
4.	Conclusión	21
5.	Referencias	26

ANEXOS

1.	Diseño de sobre-capa de concreto hidráulico: Proyecto Bernardo Soto	i
A.1	Módulo de reacción en capa de apoyo de la losa	i
A.2	Parámetros de diseño	iii
A.3	Espesores de diseño	iii
A.4	Separación de juntas transversales	v
A.5	Recomendaciones finales	vii
A.5.1	Preparación previa del pavimento existente	vii
A.5.2	Secciones de diseño con sobre-capa de concreto hidráulico	vii
A.5.3	Diseño de espaldón	viii

A.5.4 Recomendaciones finales viii

- 2. Estudio deflectométrico en el pavimento existente (1999)**
- 3. Gráficos SPEC para la definición de secciones homogéneas**
- 4. Ejemplos de cálculo de deflexión en la superficie de la sobre-capa asfáltica considerada**

DISEÑO DE LA BASE DE APOYO PARA LA LOSA DE CONCRETO HIDRAULICO: PROYECTO BERNARDO SOTO

1. INTRODUCCION.

El objeto de este informe es el dimensionamiento de la capa de apoyo para una losa de concreto hidráulico de 23.0 cm, a construir sobre el pavimento existente en la Carretera Bernardo Soto.

Se busca cumplir con los términos contractuales del proyecto de concesión y construcción del pavimento de la Autopista Bernardo Soto, en cuanto al módulo de reacción combinado en la base de apoyo de la losa de concreto hidráulico. El contrato del proyecto, en su página 24 dice:

"La dosificación de cemento Portland o puzolánico, deberá ser tal, que garantice un módulo de reacción combinado K_c igual o superior a 500 pci (14 kg/cm²/cm)".

El diseño de la estructura de soporte de la losa de concreto hidráulico 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) durante 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 (No.1)	Manolo's – San Ramón (No.2)
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 %	23.6 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 tramo homogéneos en secciones estadísticamente diferenciadas (a un nivel de confianza del 95 %).

La Tabla 3 presenta dos escenarios de deflexión característica, por sección homogénea. Se entiende por deflexión característica a un valor tal que un porcentaje significativo de las determinaciones de deflexión son inferiores (en el caso de la Tabla 3, un 90 % y un 93 %), conforme a una distribución de frecuencia normal.

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

	Sección	Puntos	Estacionamiento	Deflexión (\bar{x})	Desv.Est. (σ)	$\bar{x} + 1.3 * \sigma$	$\bar{x} + 1.475 * \sigma$
TRAMO 2	j	1-29	0+100 a 2+900	71.7	18.1	95.2	98.4
	i	30-49	3+000 a 4+900	84.7	18.98	109.4	112.7
	h	50-73	9+100 a 11+400	107.9	21.51	135.9	139.6
	g	74-94	11+500 a 13+500	86.7	20.57	113.4	117.0
	f	95-112	13+600 s 15+300	80.0	10.89	94.2	96.1
	e	113-127	15+400 s 16+800	86.3	10.19	99.5	101.3
	d	128-149	16+900 a 19+100	65.6	10.76	79.5	81.4
	c	150-205	19+200 a 25+200	76.2	20.49	102.8	106.4
	b	206-227	25+300 a 27+400	97.7	15.63	118.0	120.8
	a	228-249	27+500 a 29+800	82.3	26.25	116.4	121.0
TRAMO 1	b	250-263	29+900 a 31+300	61.0	12.62	77.0	79.2
	a	264-345	31+400 a 39+600	77.9	21.58	106.0	109.7

☐ Valores máximo y mínimo de deflexión.

TRAMO 1: Aeropuerto-Manolo's

TRAMO 2: Manolo's-San Ramón

Nota: Deflexiones en centésimas de milímetro

Nota: el estacionamiento 39+600 corresponde al Aeropuerto.

2.5. Módulos resilientes de capas existentes.

A partir de los espesores de diseño (Tabla 1) y las deflexiones características por sección homogénea, al 90 % (Tabla 2), se hizo un retrocálculo de los módulos resilientes por capa. Para tal propósito se utilizó la teoría elástica multi-capas, 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/cm ²	psi	kg/cm ²	psi	kg/cm ²	psi	kg/cm ²
Carpeta	150000	10563	300000	21127	75000	5281	300000	21127
Base granular	20000	1408	30000	2113	16000	1127	30000	2113
Sub-base	12000	845	16000	1127	12000	845	16000	1127
Sub-rasante	7500	528	8000	563	6000	423	8000	563

2.6. Módulo resiliente equivalente para la estructura de pavimento existente.

Se evalúa el módulo resiliente equivalente para la estructura de pavimento sobre la sub-rasante (carpeta, base granular y sub-base), de acuerdo con la Ecuación 1. (pag.6).

La Tabla 6, por lo tanto, presenta la información referente al cálculo del módulo resiliente equivalente (E_p), para las capas de carpeta, base granular y sub-base. La determinación del módulo resiliente equivalente (Ecuación 1) se realiza para todas las secciones homogéneas definidas en la Sección 2.4.

A partir del módulo resiliente de la sub-rasante (MR), la deflexión característica al 90 %, la condición de carga en la deflectometría y el espesor del pavimento (D), se hace la determinación del módulo resiliente equivalente sobre la sub-rasante.

Tabla 5: Resultados de retrocálculo de módulos por sección homogénea, pavimento existente. Carretera Bernardo Soto.

Tramo	Sección	Estacionamiento	Longitud (km)	E1 (psi)	E2 (psi)	E3 (psi)	E4 (psi)	Deflexión característica (*)		
								Valor estimado (10-2 mm)	Valor medido (10-2 mm)	Diferencia (%)
TRAMO 2	j	0+100 a 2+900	2.8	125000	20000	12000	7500	97.0	95.2	1.9
	i	3+000 a 4+900	1.9	75000	20000	12000	7500	108.7	109.4	0.6
	h	9+100 a 11+400	2.3	85000	16000	12000	6000	136.1	135.9	0.2
	g	11+500 a 13+500	2	100000	20000	12000	7500	113.5	113.4	0.1
	f	13+600 s 15+300	1.7	200000	20000	14000	8000	95.5	94.2	1.4
	e	15+400 s 16+800	1.4	160000	20000	14000	8000	99.6	99.5	0.1
	d	16+900 a 19+100	2.2	300000	30000	16000	8000	80.5	79.5	1.2
	c	19+200 a 25+200	6	150000	20000	12000	8000	102.9	102.8	0.1
	b	25+300 a 27+400	2.1	75000	20000	12000	7500	119.4	118.0	1.1
a	27+500 a 29+800	2.3	150000	20000	12000	6000	117.3	116.4	0.8	
TRAMO 1	b	29+900 a 31+300	1.4	350000	30000	16000	8000	78.5	77.0	1.9
	a	31+400 a 39+600	8.2	150000	20000	12000	7500	105.9	106.0	0.1

(*) Magnitud tal que el 90% de los valores de la sección homogénea son menores, de acuerdo con una distribución normal.

Nota: el estacionamiento 39+600 corresponde al Aeropuerto.

ECUACIÓN 1: Fórmula AASHTO para el retrocálculo de módulos.

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

Donde:

- δ_o : deflexión bajo el centro 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).
- E_p : módulo efectivo del pavimento para capas sobre la sub-base (psi).
- p: presión aplicada (psi).

Tabla 6: Estimación del módulo resiliente equivalente (Ep) para las capas sobre la sub-rasante, en el pavimento existente.

Tramo	Sección	d0 medido (10-2 mm)	d0 medido (pulg)	p (psi)	MR (psi)	D (in)	a (in)	Ep (psi)	d0 calc. (1/100 cm)	dif. (1/100 cm)
2	j	95.2	0.0375	85	7500	21.7	5.81	26800	0.0375	0.0000
2	i	109.4	0.0431	85	7500	21.7	5.81	22000	0.0431	0.0000
2	h	135.9	0.0535	85	6000	21.7	5.81	17750	0.0535	0.0000
2	g	113.4	0.0446	85	7500	21.7	5.81	20950	0.0446	0.0000
2	f	94.2	0.0371	85	8000	21.7	5.81	26500	0.0371	0.0000
2	e	99.5	0.0392	85	8000	21.7	5.81	24500	0.0392	0.0000
2	d	79.5	0.0313	85	8000	21.7	5.81	33800	0.0313	0.0000
2	c	102.8	0.0405	85	8000	21.7	5.81	23400	0.0405	0.0000
2	b	118.0	0.0465	85	7500	21.7	5.81	19800	0.0465	0.0000
2	a	116.4	0.0458	85	6000	21.7	5.81	22150	0.0458	0.0000
1	b	77.0	0.0303	85	8000	20.9	5.81	36100	0.0304	0.0000
1	a	106.0	0.0417	85	7500	20.9	5.81	23300	0.0417	0.0000

3. DISEÑO DE SOBRECAPA ASFÁLTICA COMO BASE DE APOYO DE LA LOSA DE CONCRETO.

De acuerdo con la Ecuación 2, 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. Escenarios de diseño.

Se consideran tres espesores de capa asfáltica, a construir sobre la estructura existente, con el propósito de evaluar cuál de tales espesores satisface el requisito de módulo de soporte en la base de apoyo de la losa de 500 pci (requerido por los términos del contrato). Los espesores de la capa asfáltica a evaluar son:

- 7.0 cm
- 9.0 cm
- 11.0 cm

Adicionalmente, se evalúan dos condiciones de rigidez de la capa asfáltica:

- Condición típica en período frío: módulo resiliente de 400000 psi.
- Condición típica en período caliente: módulo resiliente de 200000 psi.

3.2. Estimación del módulo de elasticidad equivalente para la estructura de soporte de la losa por escenario de diseño.

A partir del módulo resiliente efectivo para la estructura de pavimento existente (Tabla 6), se determina la deflexión correspondiente a los diferentes escenarios de diseño (tres espesores de capa asfáltica y dos magnitudes de módulo resiliente).

La Tabla 7 presenta la estimación de la deflexión correspondiente a la estructura existente más sobrecapas de 7.0 cm, 9.0 cm y 11.0 cm, con un módulo resiliente de la sobrecapa asfáltica de 400000 psi.

La Tabla 8 presenta la estimación de la deflexión correspondiente a la estructura existente más sobrecapas de 7.0 cm, 9.0 cm y 11.0 cm, con un módulo resiliente de la sobrecapa asfáltica de 200000 psi.

Nota: la determinación de la deflexión relacionada con una carga de eje equivalente se realiza a partir del método multi-capas elástica, a partir del programa ELSYM-5.

ECUACIÓN 2: Fórmula AASHTO para pavimentos rígidos

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

Donde:

- W_{118} : 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.
 $Z_R S_o$: 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).

Tabla 7: Estimación de deflexión en el punto de aplicación de carga, en el ensayo de deflectometría, considerando espesores de sobre-capa asfáltica de 7, 9 y 11 cm, con módulo resiliente de 400000 psi

Carretera Bernardo Soto

Tramo	Sección	Estacionamiento	Longitud (km)	Mr _{sobrecapa} (psi)	Ep (psi)	Mr _{sub-rasante} (psi)	Deflexión calculada (1/100 cm)		
							Espesor sobrecapa asfáltica de 7.0 cm	Espesor sobrecapa asfáltica de 9.0 cm	Espesor sobrecapa asfáltica de 11.0 cm
TRAMO 2	j	0+100 a 2+900	2.8	400000	26800	7500	88.6	80.3	73.7
	i	3+000 a 4+900	1.9	400000	22000	7500	96.5	86.6	78.7
	h	9+100 a 11+400	2.3	400000	17750	6000	115.6	103.4	93.7
	g	11+500 a 13+500	2	400000	20950	7500	98.0	87.6	79.5
	f	13+600 s 15+300	1.7	400000	26500	8000	85.9	77.7	71.1
	e	15+400 s 16+800	1.4	400000	24500	8000	88.9	80.0	73.2
	d	16+900 a 19+100	2.2	400000	33800	8000	77.5	70.9	65.5
	c	19+200 a 25+200	6	400000	23400	8000	90.9	81.5	74.2
	a	27+500 a 29+800	2.3	400000	22150	6000	105.4	96.0	87.4
TRAMO 1	b	29+900 a 31+300	1.4	400000	36100	8000	75.2	69.1	64.3
	a	31+400 a 39+600	8.2	400000	23300	7500	93.5	84.1	76.7

Nota: el estacionamiento 39+600 corresponde al Aeropuerto.

Tabla 8: Estimación de deflexión en el punto de aplicación de carga, en el ensayo de deflectometría, considerando espesores de sobre-capa asfáltica de 7, 9 y 11 cm, con módulo resiliente de 200000 psi

Carretera Bernardo Soto

Tramo	Sección	Estacionamiento	Longitud (km)	Mr sobrecapa (psi)	Ep (psi)	Mr sub-rasante (psi)	Deflexión calculada (1/100 cm)		
							Espesor sobrecapa asfáltica de 7.0 cm	Espesor sobrecapa asfáltica de 9.0 cm	Espesor sobrecapa asfáltica de 11.0 cm
TRAMO 2	j	0+100 a 2+900	2.8	200000	26800	7500	96.5	88.9	82.6
	i	3+000 a 4+900	1.9	200000	22000	7500	105.7	96.5	88.9
	h	9+100 a 11+400	2.3	200000	17750	6000	127.3	115.3	105.9
	g	11+500 a 13+500	2	200000	20950	7500	107.7	97.8	89.9
	f	13+600 s 15+300	1.7	200000	26500	8000	93.7	86.1	80.9
	e	15+400 s 16+800	1.4	200000	24500	8000	97.3	89.2	82.3
	d	16+900 a 19+100	2.2	200000	33800	8000	83.6	78.0	72.9
	c	19+200 a 25+200	6	200000	23400	8000	99.3	90.9	83.8
	b	25+300 a 27+400	2.1	200000	19800	7500	110.5	100.3	91.9
a	27+500 a 29+800	2.3	200000	22150	6000	114.8	105.4	97.5	
TRAMO 1	b	29+900 a 31+300	1.4	200000	36100	8000	81.3	75.9	71.4
	a	31+400 a 39+600	8.2	200000	23300	7500	102.1	93.5	86.4

Nota: el estacionamiento 39+600 corresponde al Aeropuerto.

Una vez que se determina la deflexión ante una carga de eje equivalente, para la estructura reforzada de acuerdo con los escenarios de diseño, es posible determinar el módulo resiliente equivalente de la estructura de pavimento correspondiente a la condición actual más la sobrecapa asfáltica, según los escenarios de diseño propuestos.

La Tabla 9 presenta la estimación del módulo resiliente equivalente (E_p) para la estructura de apoyo de la losa de concreto hidráulico (existente más sobrecapa), considerando un módulo resiliente de la capa asfáltica de 400000 psi.

La Tabla 10 presenta la estimación del módulo resiliente equivalente (E_p) para la estructura de apoyo de la losa de concreto hidráulico (existente más sobrecapa), considerando un módulo resiliente de la capa asfáltica de 200000 psi.

3.3. Estimación del módulo de soporte en la base de apoyo de la losa de concreto hidráulico.

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

La Tabla 11 corresponde a la estimación del módulo de soporte en la base de apoyo de la losa de concreto hidráulico, para capas asfálticas de 7.0 cm, 9.0 cm y 11.0 cm, colocadas sobre el pavimento existente, considerando un módulo resiliente de 400000 psi para la capa asfáltica.

La Tabla 12 corresponde a la estimación del módulo de soporte en la base de apoyo de la losa de concreto hidráulico, para capas asfálticas de 7.0 cm, 9.0 cm y 11.0 cm, colocadas sobre el pavimento existente, considerando un módulo resiliente de 200000 psi para la capa asfáltica.

Tabla 9a: Estimación del módulo resiliente efectivo (Ep) para las capas sobre la sub-rasante, considerando la estructura de pavimento existente más espesores de sobre-capa asfáltica de 7 cm, con módulo resiliente de 400000 psi.

Tramo	Sección	d0 estimado (1/100 cm)	p (psi)	MR (psi)	D (in)	a (in)	Ep (psi)	d0 calc. (1/100 cm)	dif. (1/100 cm)
2	j	0.0347	85	7500	24.45	5.84	28700	0.0346	0.0000
2	i	0.0378	85	7500	24.45	5.84	25400	0.0378	0.0000
2	h	0.0455	85	6000	24.45	5.84	21400	0.0455	0.0000
2	g	0.0386	85	7500	24.45	5.84	24700	0.0386	0.0000
2	f	0.0338	85	8000	24.45	5.84	28900	0.0338	0.0000
2	e	0.0350	85	8000	24.45	5.84	27600	0.0350	0.0000
2	d	0.0305	85	8000	24.45	5.84	33500	0.0305	0.0000
2	c	0.0358	85	8000	24.45	5.84	26800	0.0357	0.0000
2	b	0.0395	85	7500	24.45	5.84	23900	0.0395	0.0000
2	a	0.0415	85	6000	24.45	5.84	24400	0.0415	0.0000
1	b	0.0299	85	8000	23.65	5.84	34900	0.0299	0.0000
1	a	0.0370	85	7500	23.65	5.84	26500	0.0370	0.0000

Tabla 9b: Estimación del módulo resiliente efectivo (Ep) para las capas sobre la sub-rasante, considerando la estructura de pavimento existente más espesores de sobre-capa asfáltica de 9 cm, con módulo resiliente de 400000 psi.

Tramo	Sección	d0 estimado (1/100 cm)	p (psi)	MR (psi)	D (in)	a (in)	Ep (psi)	d0 calc. (1/100 cm)	dif. (1/100 cm)
2	j	0.0315	85	7500	25.24	5.81	32400	0.0315	0.0000
2	i	0.0339	85	7500	25.24	5.81	29300	0.0339	0.0000
2	h	0.0407	85	6000	25.24	5.81	24800	0.0407	0.0000
2	g	0.0345	85	7500	25.24	5.81	28600	0.0345	0.0000
2	f	0.0306	85	8000	25.24	5.81	32900	0.0306	0.0000
2	e	0.0315	85	8000	25.24	5.81	31600	0.0315	0.0000
2	d	0.0279	85	8000	25.24	5.81	37500	0.0279	0.0000
2	c	0.0321	85	8000	25.24	5.81	30800	0.0321	0.0000
2	b	0.0352	85	7500	25.24	5.81	27800	0.0352	0.0000
2	a	0.0378	85	6000	25.24	5.81	27500	0.0378	0.0000
1	b	0.0274	85	8000	24.44	5.81	39000	0.0274	0.0000
1	a	0.0333	85	7500	24.44	5.81	30400	0.0333	0.0000

Tabla 9c: Estimación del módulo resiliente efectivo (Ep) para las capas sobre la sub-rasante, considerando la estructura de pavimento existente más espesores de sobre-capa asfáltica de 11 cm, con módulo resiliente de 400000 psi.

Tramo	Sección	d0 estimado (1/100 cm)	p (psi)	MR (psi)	D (in)	a (in)	Ep (psi)	d0 calc. (1/100 cm)	dif. (1/100 cm)
2	j	0.0289	85	7500	26.03	5.81	36300	0.0289	0.0000
2	i	0.0309	85	7500	26.03	5.81	33000	0.0309	0.0000
2	h	0.0369	85	6000	26.03	5.81	28100	0.0369	0.0000
2	g	0.0313	85	7500	26.03	5.81	32300	0.0313	0.0000
2	f	0.0280	85	8000	26.03	5.81	36800	0.0280	0.0000
2	e	0.0288	85	8000	26.03	5.81	35400	0.0288	0.0000
2	d	0.0258	85	8000	26.03	5.81	41400	0.0258	0.0000
2	c	0.0292	85	8000	26.03	5.81	34700	0.0292	0.0000
2	b	0.0319	85	7500	26.03	5.81	31500	0.0319	0.0000
2	a	0.0344	85	6000	26.03	5.81	31100	0.0344	0.0000
1	b	0.0254	85	8000	25.23	5.81	43000	0.0254	0.0000
1	a	0.0303	85	7500	25.23	5.81	34300	0.0303	0.0000

Tabla 10a: Estimación del módulo resiliente efectivo (Ep) para las capas sobre la sub-rasante, considerando la estructura de pavimento existente más espesores de sobre-capa asfáltica de 7 cm, con módulo resiliente de 200000 psi.

Tramo	Sección	d0 estimado (1/100 cm)	p (psi)	MR (psi)	D (in)	a (in)	Ep (psi)	d0 calc. (1/100 cm)	dif. (1/100 cm)
2	j	0.0377	85	7500	24.45	5.81	25500	0.0377	0.0000
2	i	0.0414	85	7500	24.45	5.81	22400	0.0415	0.0000
2	h	0.0501	85	6000	24.45	5.81	18750	0.0501	0.0000
2	g	0.0424	85	7500	24.45	5.81	21750	0.0424	0.0000
2	f	0.0369	85	8000	24.45	5.81	25700	0.0368	0.0000
2	e	0.0383	85	8000	24.45	5.81	24400	0.0383	0.0000
2	d	0.0329	85	8000	24.45	5.81	30000	0.0330	0.0000
2	c	0.0391	85	8000	24.45	5.81	23700	0.0391	0.0000
2	b	0.0435	85	7500	24.45	5.81	21000	0.0435	0.0000
2	a	0.0452	85	6000	24.45	5.81	21600	0.0452	0.0000
1	b	0.0323	85	8000	23.65	5.81	31300	0.0323	0.0000
1	a	0.0405	85	7500	23.65	5.81	23350	0.0405	0.0000

Tabla 10b: Estimación del módulo resiliente efectivo (Ep) para las capas sobre la sub-rasante, considerando la estructura de pavimento existente más espesores de sobre-capa asfáltica de 9 cm, con módulo resiliente de 200000 psi.

Tramo	Sección	d0 estimado (1/100 cm)	p (psi)	MR (psi)	D (in)	a (in)	Ep (psi)	d0 calc. (1/100 cm)	dif. (1/100 cm)
2	j	0.0348	35	7500	25.24	5.81	28200	0.0348	0.0000
2	i	0.0377	35	7500	25.24	5.81	25250	0.0377	0.0000
2	h	0.0454	35	6000	25.24	5.81	21300	0.0454	0.0000
2	g	0.0385	35	7500	25.24	5.81	24550	0.0385	0.0000
2	f	0.0339	35	8000	25.24	5.81	28500	0.0339	0.0000
2	e	0.0351	35	8000	25.24	5.81	27200	0.0351	0.0000
2	d	0.0307	35	8000	25.24	5.81	32700	0.0307	0.0000
2	c	0.0358	35	8000	25.24	5.81	26500	0.0358	0.0000
2	b	0.0395	35	7500	25.24	5.81	23700	0.0395	0.0000
2	a	0.0415	35	6000	25.24	5.81	24100	0.0415	0.0000
1	b	0.0301	35	8000	24.44	5.81	34000	0.0302	0.0000
1	a	0.0370	35	7500	24.44	5.81	26200	0.0370	0.0000

Tabla 10c: Estimación del módulo resiliente efectivo (E_p) para las capas sobre la sub-rasante, considerando la estructura de pavimento existente más espesores de sobre-capa asfáltica de 11 cm, con módulo resiliente de 200000 psi.

Tramo	Sección	d0 estimado (1/100 cm)	p (psi)	MR (psi)	D (in)	a (in)	E_p (psi)	d0 calc. (1/100 cm)	dif. (1/100 cm)
2	j	0.0323	85	7500	26.03	5.81	31000	0.0323	0.0000
2	i	0.0348	85	7500	26.03	5.81	27900	0.0348	0.0000
2	h	0.0417	85	6000	26.03	5.81	23700	0.0417	0.0000
2	g	0.0354	85	7500	26.03	5.81	27300	0.0354	0.0000
2	f	0.0319	85	8000	26.03	5.81	30750	0.0319	0.0000
2	e	0.0324	85	8000	26.03	5.81	30000	0.0325	0.0000
2	d	0.0287	85	8000	26.03	5.81	35600	0.0287	0.0000
2	c	0.0330	85	8000	26.03	5.81	29300	0.0330	0.0000
2	b	0.0362	85	7500	26.03	5.81	26500	0.0362	0.0000
2	a	0.0384	85	6000	26.03	5.81	26600	0.0384	0.0000
1	b	0.0283	85	8000	25.23	5.81	36700	0.0283	0.0000
1	a	0.0342	83	7500	25.23	5.81	28900	0.0342	0.0000

Tabla 11: Capacidad de soporte en la base de apoyo de la sobrecapa de concreto hidráulico, considerando sobre-capas asfálticas de 7, 9 y 11 cm, con módulo resiliente de 400000 psi.

Tramo	Sección	M _R (SR) (psi)	7.0 cm de sobre-capa			9.0 cm de sobre-capa			11.0 cm de sobre-capa		
			E _p (psi)	E _p '	k	E _p (psi)	E _p '	k	E _p (psi)	E _p '	k
2	j	7500	28700	30688	700	32400	35013	750	36300	39633	780
2	i	7500	25400	27159	650	29300	31663	710	33000	36030	760
2	h	6000	21400	22882	490	24800	26800	510	28100	30680	540
2	g	7500	24700	26411	640	28600	30907	700	32300	35266	750
2	f	8000	28900	30902	720	32900	35553	780	36800	40179	800
2	e	8000	27600	29512	710	31600	34149	760	35400	38650	780
2	d	8000	33500	35820	780	37500	40525	800	41400	45201	820
2	c	8000	26800	28656	700	30800	33284	750	34700	37886	770
2	b	7500	23900	25555	630	27800	30042	700	31500	33992	740
2	a	6000	24400	26090	510	27500	29713	540	31100	33955	570
1	b	8000	34900	36906	780	39000	41695	810	43000	46162	830
1	a	7500	26500	28023	675	30400	32501	720	34300	37052	760

Tabla 12: Capacidad de soporte en la base de apoyo de la sobrecapa de concreto hidráulico, considerando sobre-capas asfálticas de 7, 9 y 11 cm, con módulo resiliente de 200000 psi.

Tramo	Sección	M _R (SR) (psi)	7.0 cm de sobre-capa			9.0 cm de sobre-capa			11.0 cm de sobre-capa		
			E _p (psi)	E _p '	k	E _p (psi)	E _p '	k	E _p (psi)	E _p '	k
2	j	7500	25500	27266	650	28200	30474	700	31000	33846	730
2	i	7500	22400	23951	610	25250	27287	650	27900	30462	700
2	h	6000	18750	20049	460	21300	23013	490	23700	25876	500
2	g	7500	21750	23256	610	24550	26530	640	27300	29886	690
2	f	8000	25700	27480	690	28500	30799	720	30750	33573	750
2	e	8000	24400	26090	680	27200	29394	710	30000	32754	740
2	d	8000	30000	32078	740	32700	35337	780	35600	38859	780
2	c	8000	23700	25341	660	26500	28637	700	29300	31990	730
2	b	7500	21000	22454	600	23700	25611	630	26500	28933	660
2	a	6000	21600	23096	490	24100	26044	510	26600	29032	540
1	b	8000	31300	33099	750	34000	36350	780	36700	39655	790
1	a	7500	23350	24692	620	26200	28011	640	28900	31227	700

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. Por lo tanto, considerando que la capa asfáltica a colocarse es nueva y que existirán adecuadas condiciones de drenaje y mantenimiento, se considera un factor de pérdida de soporte de 0.0. De manera que hay correspondencia entre el módulo de soporte calculado (k_o) y el módulo de soporte de diseño (k).

3.4. Verificación del nivel de confianza por escenario de diseño.

Considerando los módulos de capacidad de soporte en la base de apoyo de la losa de concreto hidráulico de las Tablas 11 y 12, se aplica la metodología de diseño de la AASHTO (Ecuación 2).

3.4.1. 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): 4000000 psi
- Módulo de ruptura del concreto hidráulico a los 28 días (Sc): 650 psi
- Desviación estándar del proceso constructivo (So): 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
- Período de diseño de 15 años.

Adicionalmente, se consideran diferentes escenarios de diseño, a partir de los parámetros de la Tabla 13.

Tabla 13: Parámetros variables por escenario de diseño.

Parámetro	Tramo No. 1						Tramo No. 2					
	7.0 cm		9.0 cm		11.0 cm		7.0 cm		9.0 cm		11.0 cm	
Espesor de sobrecapa asfáltica sobre el pavimento existente												
Módulo resiliente de la capa asfáltica (ksi)	200	400	200	400	200	400	200	400	200	400	200	400
Módulo de reacción en la base de apoyo de la losa (pci)	620	660	640	720	700	760	460	490	490	510	500	520
							610	640	650	700	660	740
							650	720	710	750	730	780

Nota: los valores sombreados corresponden al escenario de menor capacidad de soporte, que corresponde a la sección "h" del Tramo 2.

3.4.2. Nivel de confianza.

A partir de los parámetros de diseño de la Tabla 13, suponiendo un espesor de losa de 23.0 cm (constante), se determina el nivel de confianza satisfecho por cada escenario de módulo de capacidad de soporte de la base de apoyo de la losa de concreto hidráulico (k).

La Tabla 14 presenta el cálculo del nivel de confianza por escenario de diseño. Los resultados de la evaluación del nivel de confianza por escenario de diseño se resumen en la Tabla 15.

Tabla 14: Nivel de confianza por escenario de diseño.

Parámetro	Tramo No. 1			Tramo No. 2		
	7.0 cm	9.0 cm	11.0 cm	7.0 cm	9.0 cm	11.0 cm
Espesor de sobrecapa asfáltica sobre estructura existente						
Rango del módulo de reacción en la base de apoyo de la losa (*)	620-660	640-720	700-760	460-720	490-750	500-780
Rango de nivel de confianza (*)	73-75	74-77	76-79	49-63	51-64	51-65

(*) Considerando una variación del módulo resiliente de 200000 a 400000 psi, en la sobre-capa asfáltica así como la variación en la capacidad de soporte del pavimento existente, determinada a partir del retrocálculo de módulos (utilizando los resultados de deflectometría).

4. CONCLUSION.

A. Las condiciones de capacidad de soporte contractuales para la colocación de la losa de 23.0 cm (módulo de capacidad de soporte mínimo de 500 pci), se cumplen con la aplicación de los siguientes espesores de sobre-capa asfáltica sobre el pavimento en su condición actual:

- Para el tramo 1 (estación 29+900 a 39+600), de la ruta Aeropuerto – Manolo's, la aplicación de una sobre-capa asfáltica de 7.0 cm permite superar el módulo de reacción de 500 pci, en la base de apoyo de la losa.
- Para la sección "h" del tramo 2 (estación 9+100 a 11+400), de la ruta Manolo's – San Ramón, se requiere la aplicación de una sobre-capa asfáltica de 11.0 cm para obtener un módulo de reacción que supera 500 pci, en la base de apoyo de la losa.

Tabla 15: Dimensionamiento de espesores de sobre-capa de concreto hidráulico.

Periodo de diseño: 15 años

Espesor de sobre-capa: 7 cm

Módulo resiliente de sobre-capa: 400000 psi

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	9.055	2.5	660	650	1.000	3.200	4.00E+06	75	0.67218648	0.3	0.202	7.246	7.246	9.055	8.88E-16
2	2.38E+07	9.055	2.5	490	650	1.000	3.200	4.00E+06	51	0.01623489	0.3	0.005	7.373	7.373	9.055	8.88E-16
2	2.38E+07	9.055	2.5	640	650	1.000	3.200	4.00E+06	59	0.22229866	0.3	0.067	7.373	7.373	9.055	0.00E+00
2	2.38E+07	9.055	2.5	720	650	1.000	3.200	4.00E+06	63	0.32062566	0.3	0.096	7.373	7.373	9.055	0.00E+00

Periodo de diseño: 15 años

Espesor de sobre-capa: 9 cm

Módulo resiliente de sobre-capa: 400000 psi

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	9.055	2.5	720	650	1.000	3.200	4.00E+06	77	0.74529011	0.3	0.224	7.246	7.246	9.055	0.00E+00
2	2.38E+07	9.055	2.5	510	650	1.000	3.200	4.00E+06	52	0.04570532	0.3	0.014	7.373	7.373	9.055	-8.88E-16
2	2.38E+07	9.055	2.5	700	650	1.000	3.200	4.00E+06	62	0.29666445	0.3	0.089	7.373	7.373	9.055	0.00E+00
2	2.38E+07	9.055	2.5	750	650	1.000	3.200	4.00E+06	64	0.35585826	0.3	0.107	7.373	7.373	9.055	0.00E+00

Periodo de diseño: 15 años

Espesor de sobre-capa: 11 cm

Módulo resiliente de sobre-capa: 400000 psi

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	9.055	2.5	760	650	1.000	3.200	4.00E+06	79	0.7920864	0.3	0.238	7.246	7.246	9.055	0.00E+00
2	2.38E+07	9.055	2.5	540	650	1.000	3.200	4.00E+06	54	0.08863921	0.3	0.027	7.373	7.373	9.055	0.00E+00
2	2.38E+07	9.055	2.5	740	650	1.000	3.200	4.00E+06	63	0.34420569	0.3	0.103	7.373	7.373	9.055	0.00E+00
2	2.38E+07	9.055	2.5	780	650	1.000	3.200	4.00E+06	65	0.3902906	0.3	0.117	7.373	7.373	9.055	8.88E-16

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

Tabla 15: Dimensionamiento de espesores de sobre-capa de concreto hidráulico (continuación)

Periodo de diseño: 15 años

Espesor de sobre-capa: 7 cm

Módulo resiliente de sobre-capa: 200000 psi

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	9.055	2.5	620	650	1.000	3.200	4.00E+06	73	0.62127388	0.3	0.186	7.246	7.246	9.055	0.00E+00
2	2.36E+07	9.055	2.5	460	650	1.000	3.200	4.00E+06	49	-0.02936338	0.3	-0.009	7.373	7.373	9.055	0.00E+00
2	2.36E+07	9.055	2.5	610	650	1.000	3.200	4.00E+06	57	0.18358212	0.3	0.055	7.373	7.373	9.055	0.00E+00
2	2.36E+07	9.055	2.5	650	650	1.000	3.200	4.00E+06	59	0.23496705	0.3	0.070	7.373	7.373	9.055	0.00E+00

Periodo de diseño: 15 años

Espesor de sobre-capa: 9 cm

Módulo resiliente de sobre-capa: 200000 psi

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	9.055	2.5	640	650	1.000	3.200	4.00E+06	74	0.6469352	0.3	0.194	7.246	7.246	9.055	-8.37E-06
2	2.36E+07	9.055	2.5	490	650	1.000	3.200	4.00E+06	51	0.01623489	0.3	0.005	7.373	7.373	9.055	8.88E-16
2	2.36E+07	9.055	2.5	650	650	1.000	3.200	4.00E+06	59	0.23496705	0.3	0.070	7.373	7.373	9.055	8.88E-16
2	2.36E+07	9.055	2.5	710	650	1.000	3.200	4.00E+06	62	0.30869384	0.3	0.093	7.373	7.373	9.055	0.00E+00

Periodo de diseño: 15 años

Espesor de sobre-capa: 11 cm

Módulo resiliente de sobre-capa: 200000 psi

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	9.055	2.5	700	650	1.000	3.200	4.00E+06	78	0.7213289	0.3	0.216	7.246	7.246	9.055	8.88E-16
2	2.36E+07	9.055	2.5	500	650	1.000	3.200	4.00E+06	51	0.0310587	0.3	0.009	7.373	7.373	9.055	0.00E+00
2	2.36E+07	9.055	2.5	660	650	1.000	3.200	4.00E+06	60	0.24752203	0.3	0.074	7.373	7.373	9.055	-8.88E-16
2	2.36E+07	9.055	2.5	730	650	1.000	3.200	4.00E+06	63	0.3324622	0.3	0.100	7.373	7.373	9.055	-8.88E-16

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

- Para las secciones "a" a "g" del tramo 2 (estaciones 11+500 a 29+800), y de la "i" a la "j" del tramo 2 (0+100 a 4+900) de la ruta Manolo's – San Ramón, la aplicación de una sobre-capa asfáltica de 7.0 cm permite superar el módulo de reacción de 500 pci, en la base de apoyo de la losa.

Nota: el estacionamiento 39+600 corresponde al Aeropuerto Juan Santamaría.

La Figura 1 presenta los perfiles de las secciones correspondientes.

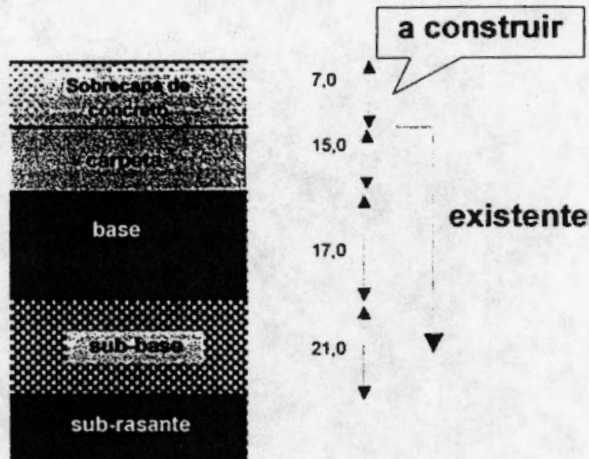
B. En algunas de las secciones es posible lograr una capacidad de soporte de 500 pci con la aplicación de una sobre-capa de espesor de 5.0 o 6.0 cm; sin embargo, se sugiere la aplicación continua de una sobre-capa de 7.0 cm, en todas las secciones, excepto en la sección "h" del tramo 2 (que requiere un refuerzo adicional por el deterioro actual), por las siguientes razones:

- Posibilidad de que con temperaturas altas el módulo resiliente de la sobre-capa asfáltica sea inferior a 200000 psi (escenario de diseño evaluado).
- Reducción del módulo resiliente de la capa asfáltica con el envejecimiento y carga sobre el pavimento, a lo largo del período de servicio.
- Efecto de la entrada en funcionamiento de la carretera Ciudad Colón – Orotina, que conlleva al incremento de cargas sobre el pavimento, durante el período de diseño.

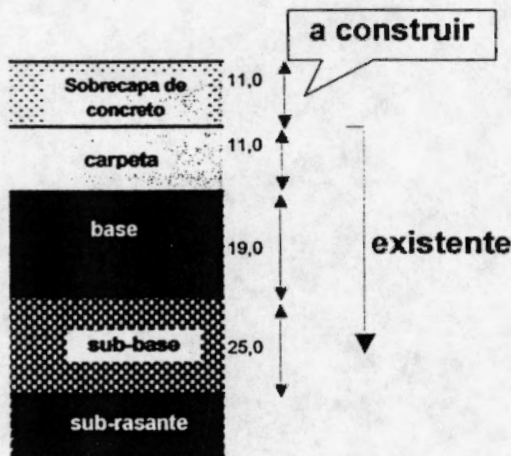
C. Ninguno de los espesores de sobre-capa asfáltica aplicados permite alcanzar el nivel de confianza mínimo recomendable para el diseño de una carretera de alta importancia (85 %), de acuerdo con la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras y Transportes (AASHTO).

Una capacidad de soporte de 500 pci, en la base de apoyo de la losa de 23.0 cm, no es suficiente para lograr un nivel de confianza mínimo del 85 %, de manera que, a pesar de que se apliquen las medidas de mantenimiento preventivo adecuadas, es de esperar la falla del pavimento antes del año 15 de operación.

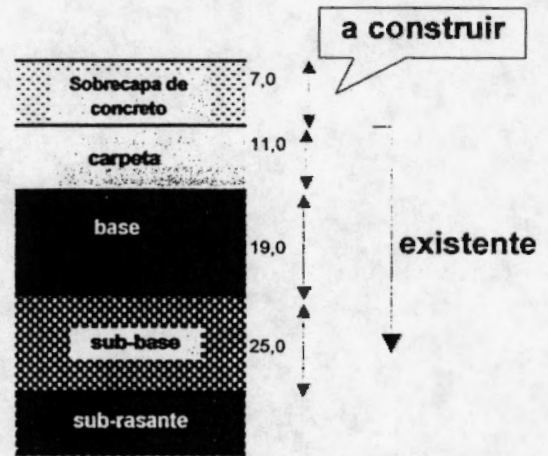
D. En el Anexo I se presenta una solución técnica más apropiada, para un nivel de confianza del 85.0 %, dimensionando la losa de concreto hidráulico de acuerdo con la capacidad de soporte del pavimento existente ("white topping").



Aeropuerto - Manolo's



Manolo's-San Ramón
Tramo "h"



Manolo's-San Ramón
Tramo "a" a "g" ; "i" a "j"

Figura 1: Refuerzo estructural para alcanzar un módulo de reacción de 500 pci en la base de apoyo de la losa.

5. 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

**DISEÑO DE SOBRECAPA DE CONCRETO HIDRAULICO:
PROYECTO BERNARDO SOTO**

ANEXO I

DISEÑO DE SOBRECAPA DE CONCRETO HIDRAULICO: PROYECTO BERNARDO SOTO

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).

A.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 resiliente equivalente para la estructura de pavimento sobre la sub-rasante (carpeta, base granular y sub-base), de acuerdo con la ecuación 1.

La Tabla 6 (pp.7) 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 1) 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 resiliente 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 A-1). Para tales propósitos se utiliza la Figura 3.3 de la Guía para el diseño de pavimentos de la AASHTO.

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 90 % de las deflexiones en cada tramo conforme a una distribución de frecuencia del tipo normal).

Tabla A-1: Capacidad de soporte en la base de apoyo de la sobrecapa de concreto hidráulico.

Tramo	Sección	MR (psi)	Ep (psi)	H (in)	ko (pci)	k (pci)
2	j	7500	26800	21.7	640	370
2	i	7500	22000	21.7	600	350
2	h	6000	17750	21.7	450	260
2	g	7500	20950	21.7	600	350
2	f	8000	26500	21.7	680	400
2	e	8000	24500	21.7	650	380
2	d	8000	33800	21.7	730	440
2	c	8000	23400	21.7	640	370
2	b	7500	19800	21.7	580	330
2	a	6000	22150	21.7	490	280
1	b	8000	36100	20.9	780	470
1	a	7500	23300	20.9	610	360

A.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): 4000000 psi
- Módulo de ruptura del concreto hidráulico a los 28 días (Sc): 650 psi
- Desviación estándar del proceso constructivo (So): 0.30
- Coeficiente de drenaje (Cd): 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 (Pt): 2.5

Adicionalmente, se consideran diferentes escenarios de diseño, a partir de los parámetros de la Tabla A-2.

Tabla A-2: Parámetros variables por escenario de diseño.

Parámetro	Tramo No. 1		Tramo No. 2	
	90 %	85 %	90 %	85 %
Período de diseño	15 años	20 años	15 años	20 años
Módulo de reacción de la capa de apoyo de la losa (pci)	360	470	260	350
			400	440

A.3. Espesores de diseño.

A partir de los parámetros de diseño de la Sección A.2., se obtienen los espesores de diseño de la Tabla A-3, de acuerdo con la metodología de la Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes (AASHTO).

Tabla A-3 : Dimensionamiento de espesores de sobre-capa de concreto hidráulico.

Periodo 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)	D (cm)	diferencia (*)
1	1.76E+07	10.2	2.5	360	650	1.000	3.200	4.00E+06	90	1.282	0.3	0.384	7.246	7.245	10.2	26.0	2.16E-04
1	1.76E+07	10.0	2.5	470	650	1.000	3.200	4.00E+06	90	1.282	0.3	0.384	7.246	7.245	10.0	25.5	2.87E-04
2	2.36E+07	10.9	2.5	260	650	1.000	3.200	4.00E+06	90	1.282	0.3	0.384	7.373	7.373	10.9	27.7	1.26E-04
2	2.36E+07	10.7	2.5	400	650	1.000	3.200	4.00E+06	90	1.282	0.3	0.384	7.373	7.373	10.7	27.2	2.16E-04
2	2.36E+07	10.7	2.5	350	650	1.000	3.200	4.00E+06	90	1.282	0.3	0.384	7.373	7.373	10.7	27.2	1.84E-04
2	2.36E+07	10.6	2.5	440	650	1.000	3.200	4.00E+06	90	1.282	0.3	0.384	7.373	7.373	10.6	26.9	2.41E-04

Periodo 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)	D (cm)	diferencia (*)
1	2.61E+07	11.1	2.5	360	650	1.000	3.200	4.00E+06	90	1.282	0.3	0.384	7.417	7.416	11.1	27.7	1.82E-04
1	2.61E+07	11.1	2.5	470	650	1.000	3.200	4.00E+06	90	1.282	0.3	0.384	7.417	7.416	11.1	27.7	2.48E-04
2	3.48E+07	11.8	2.5	260	650	1.000	3.200	4.00E+06	90	1.282	0.3	0.384	7.542	7.541	11.8	29.9	1.01E-04
2	3.48E+07	11.6	2.5	400	650	1.000	3.200	4.00E+06	90	1.282	0.3	0.384	7.542	7.541	11.6	29.3	1.81E-04
2	3.48E+07	11.7	2.5	350	650	1.000	3.200	4.00E+06	90	1.282	0.3	0.384	7.542	7.541	11.7	29.4	1.53E-04
2	3.48E+07	11.5	2.5	440	650	1.000	3.200	4.00E+06	90	1.282	0.3	0.384	7.542	7.541	11.5	28.9	2.03E-04

Periodo de diseño: 15 años

% Confianza: 85%

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)	D (cm)	diferencia
1	1.76E+07	10.1	2.5	360	650	1.000	3.200	4.00E+06	85	1.036	0.3	0.311	7.246	7.245	10.1	25.3	2.30E-04
1	1.76E+07	10.2	2.5	470	650	1.000	3.200	4.00E+06	85	1.036	0.3	0.311	7.246	7.245	10.2	25.8	3.03E-04
2	2.36E+07	10.8	2.5	260	650	1.000	3.200	4.00E+06	85	1.036	0.3	0.311	7.373	7.373	10.8	27.0	1.37E-04
2	2.36E+07	10.6	2.5	400	650	1.000	3.200	4.00E+06	85	1.036	0.3	0.311	7.373	7.373	10.6	26.7	2.31E-04
2	2.36E+07	10.7	2.5	350	650	1.000	3.200	4.00E+06	85	1.036	0.3	0.311	7.373	7.373	10.7	26.9	1.98E-04
2	2.36E+07	10.5	2.5	440	650	1.000	3.200	4.00E+06	85	1.036	0.3	0.311	7.373	7.373	10.5	26.2	2.58E-04

Periodo de diseño: 20 años

% Confianza: 85%

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)	D (cm)	diferencia
1	2.61E+07	10.8	2.5	360	650	1.0	3.2	4.00E+06	85	1.036	0.3	0.311	7.417	7.416	10.8	26.9	1.96E-04
1	2.61E+07	10.8	2.5	470	650	1.0	3.2	4.00E+06	85	1.036	0.3	0.311	7.417	7.416	10.8	26.5	2.65E-04
2	3.48E+07	11.5	2.5	260	650	1.0	3.2	4.00E+06	85	1.036	0.3	0.311	7.542	7.541	11.5	28.7	1.12E-04
2	3.48E+07	11.3	2.5	400	650	1.0	3.2	4.00E+06	85	1.036	0.3	0.311	7.542	7.541	11.3	28.1	1.96E-04
2	3.48E+07	11.4	2.5	350	650	1.0	3.2	4.00E+06	85	1.036	0.3	0.311	7.542	7.541	11.4	28.3	1.66E-04
2	3.48E+07	11.2	2.5	440	650	1.0	3.2	4.00E+06	85	1.036	0.3	0.311	7.542	7.541	11.2	27.3	2.19E-04

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

El resumen de los espesores de diseño se presenta en la Tabla A-4.

Tabla A-4: Resumen de espesores de sobre-capa de concreto hidráulico.

Tramo	15 años		20 años	
	90 % confianza	85 % confianza	90 % confianza	85 % confianza
1	26.0	25.5	28.0	27.0
2	27.5	27.0	29.5	28.5

Se determinó muy poca sensibilidad del espesor de losa a los cambios en las condiciones de soporte en la capa de apoyo por sección homogénea (Tabla A-2), para cada uno de los dos tramos considerados.

De acuerdo con el nivel de confianza del diseño original, evaluado en Arce, Mario y Castro, Pedro, op. cit. (Ref. 1), procede aplicar el diseño para el 85 % de confianza, indicándose que se presentan las siguientes condiciones:

- Eventual retraso en la entrada en funcionamiento de la carretera Ciudad Colón – Orotina (proyectado para el año 6 de operación del pavimento de la Bernardo Soto).
- Retraso en la entrada en operación, de manera que hay un aumento en las cargas proyectadas para 15 años.
- Variabilidad en las condiciones de algunas secciones de los tramos evaluados.

Por lo cual se deberán aplicar todas las medidas pertinentes de mantenimiento preventivo y rutinario, con particular énfasis en la reparación de losas agrietadas, sello de juntas y limpieza de drenajes, para lograr así un óptimo desempeño del pavimento a largo plazo.

A.4. 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_c : coeficiente térmico del concreto hidráulico, igual a 5 E-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).

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

Donde:

E: módulo de elasticidad del concreto hidráulico (4000000 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 (2.0), teniendo en cuenta que existen varias fuentes de incertidumbre: a) diferencia en las condiciones de determinación del módulo de ruptura, calculado en condiciones controladas de laboratorio, que en la práctica pueden diferir del que realmente se alcanza en el campo; b) la pérdida de capacidad de soporte en la base de apoyo de la losa a lo largo del tiempo, y c) la variabilidad en las condiciones de soporte de losa.

Debe considerarse una separación de juntas de 4.0 m tanto para el pavimento del tramo 1, como para el pavimento del tramo 2.

A.5 RECOMENDACIONES FINALES.

A.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 A-5, previas a la construcción de la sobrecapa de concreto hidráulico.

Tabla A-5: Recomendaciones de reparación previa de la superficie de concreto asfáltico.

Condición general del pavimento	Reparación previa del pavimento
Roderos < 50 mm	Ninguna
Roderos > 50 mm	Perfilado o nivelado
Gradillas	Perfilado
Baches	Relleno con mezcla fría o caliente.
Fallas de la sub-rasante	Remover y re-emplazar / reparar
Cuero de lagarto	Ninguna
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.

A.5.2 Secciones de diseño con sobre-capa de concreto hidráulico.

Para el tramo Aeropuerto – Manolo's:

- Espesor de losa de 25.5 cm
- Separación de juntas transversales de 4.0 m
- Dobelas de 2.54 cm de diámetro (No. 8) (*)
- 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 neupreno, en todas las juntas.

(*) Criterios de diseño preliminar.

Para el tramo Manolo's – San Ramón:

- Espesor de losa de 27.0 cm
- Separación de juntas transversales de 4.0 m
- Dobelas de 2.54 cm de diámetro (No. 8) (*)
- 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 neupreno, en todas las juntas.

(*) Criterios de diseño preliminar.

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 350 pci, para Aeropuerto-Manolo's, y de 270 pci, para Manolo's – Aeropuerto; ambos considerando un apropiado coeficiente de pérdida de soporte (L_s). Para un material de sub-rasante con CBR de 3, se recomienda la aplicación de una base estabilizada con cemento de 15.0 cm; que supera ambos requerimientos.

Nota: las Figuras A1 y A2 adjuntas presentan los perfiles característicos para las secciones de pavimento definidas.

A.5.3 Diseño de espaldón.

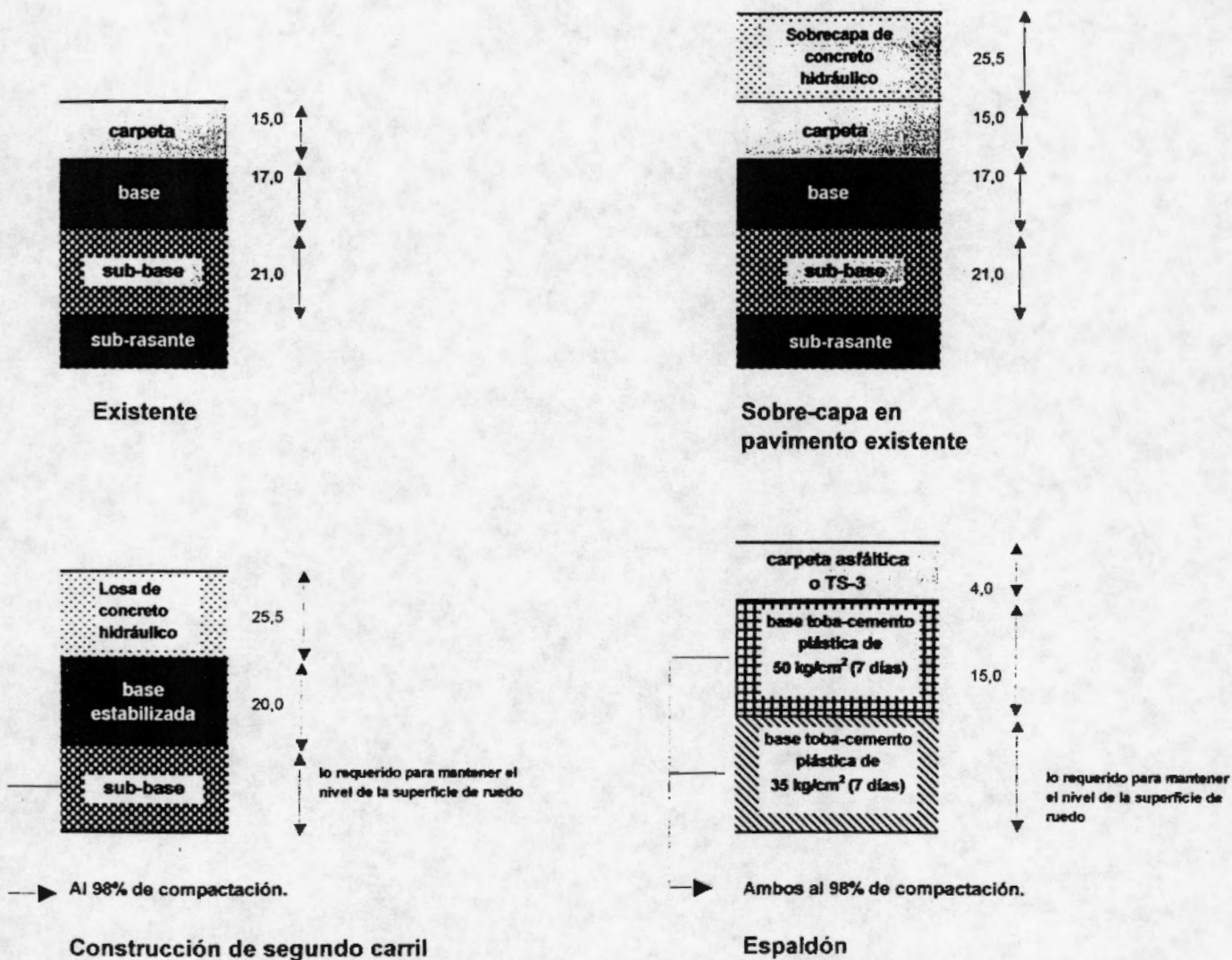
El diseño de pavimento rígido ha sido desarrollado en función de que no existe transferencia de carga con el espaldón, de manera que puede utilizarse una estructura consistente en:

- Base de toba-cemento plástica de resistencia de 35 kg/cm^2 (a los 7 días), en el espesor requerido para dar el nivel de la superficie de ruedo.
- Base de toba-cemento plástica de resistencia de 50 kg/cm^2 (a los 7 días), con un espesor de 15.0 cm
- Superficie de mezcla asfáltica de 4.0 cm de espesor, o tratamiento superficial triple TS3.

A.5.4 Recomendaciones finales

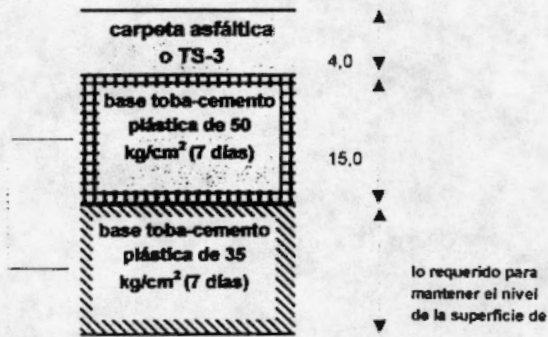
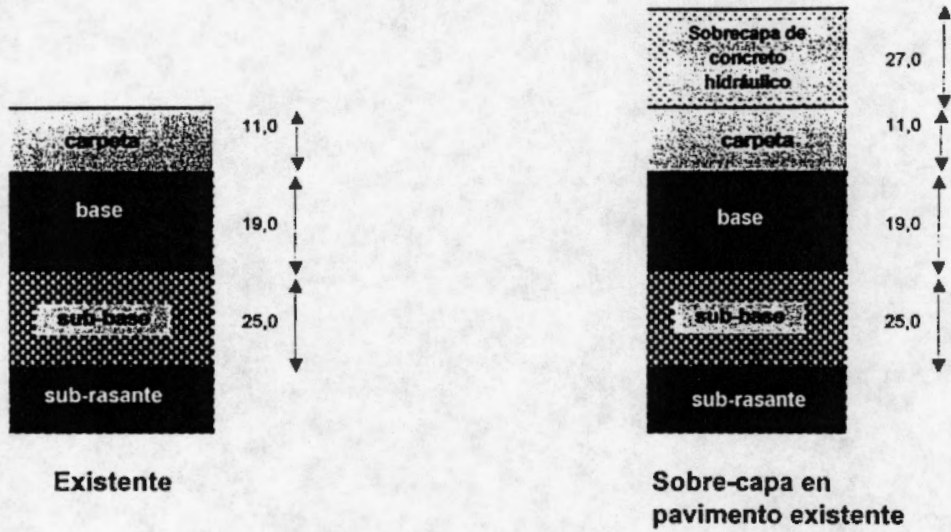
Es indispensable la construcción de sisternas de drenaje apropiados, con base en colectores transversales (zonas de corte) y longitudinales.

Para que la vida útil del pavimento, en condiciones adecuadas para el tránsito seguro y confortable, corresponda al período de diseño, se requiere que se apliquen labores de mantenimiento preventivo y mantenimiento rutinario, con particular énfasis en la reparación de losas fracturadas, sello de juntas (debe mantenerse en perfecto estado) y funcionamiento de los sistemas de drenaje.



Nota: cotas en centímetros.

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



▶ Ambos al 98% de compactación.

Espaldón

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

ANEXO 2

**ESTUDIO DEFLECTOMETRICO EN EL PAVIMENTO
EXISTENTE (1999)**

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

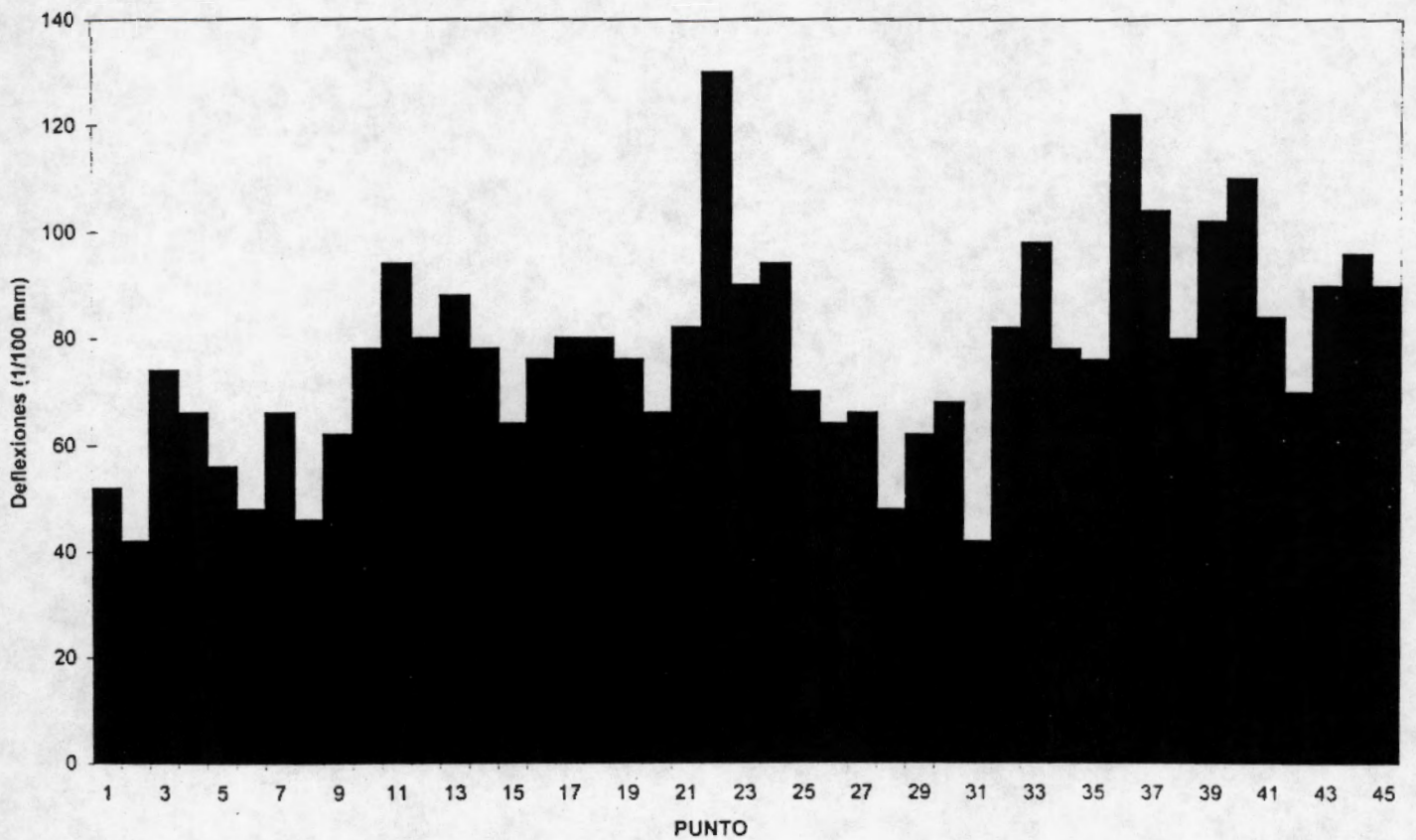
ESTACION	PUNTO Nº	DEFLEXION mm*10 ⁻²	TEMPER PAVIM (°C)	TEMPER AIRE (°C)
0+ 100	1	52	39	29
0+ 200	2	42	39	29
0+ 300	3	74	39	29
0+ 400	4	66	39	29
0+ 500	5	56	38	29
0+ 600	6	48	38	29
0+ 700	7	66	38	29
0+ 800	8	46	38	29
0+ 900	9	62	37	29
1+ 000	10	78	37	29
1+ 100	11	94	37	29
1+ 200	12	80	37	29
1+ 300	13	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

ROUTA 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

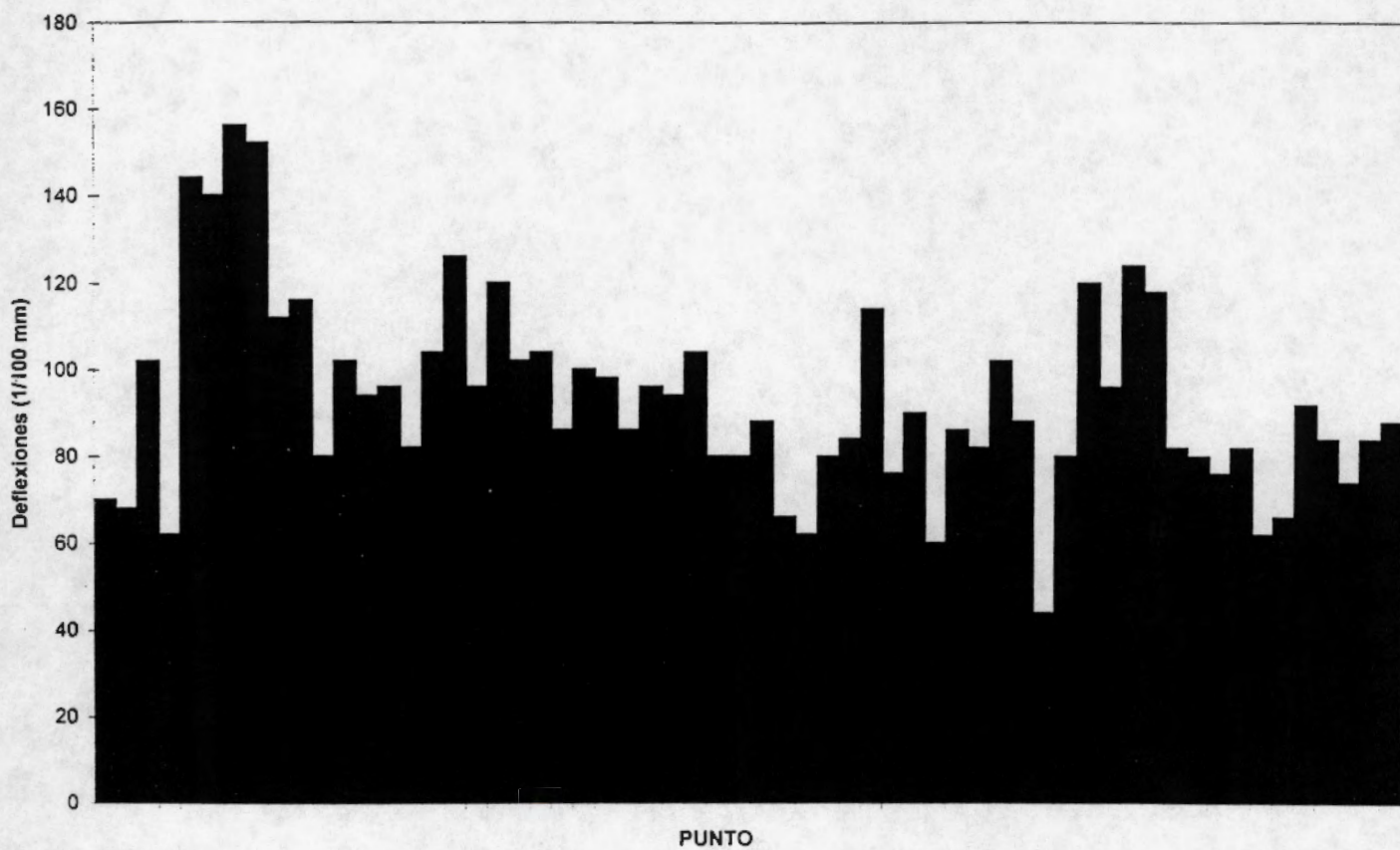
4+ 600	46	70	33	27
4+ 700	47	68	33	27
4+ 800	48	102	32	27
4+ 900	49	62	32	27
9+ 100	50	144	32	27
9+ 200	51	140	32	27
9+ 300	52	156	32	27
9+ 400	53	152	32	27
9+ 500	54	112	32	27
9+ 600	55	116	32	27
9+ 700	56	80	32	27
9+ 800	57	102	32	27
9+ 900	58	94	31	27
10+ 000	59	96	31	27
10+ 100	60	82	31	27
10+ 200	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 No°: 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

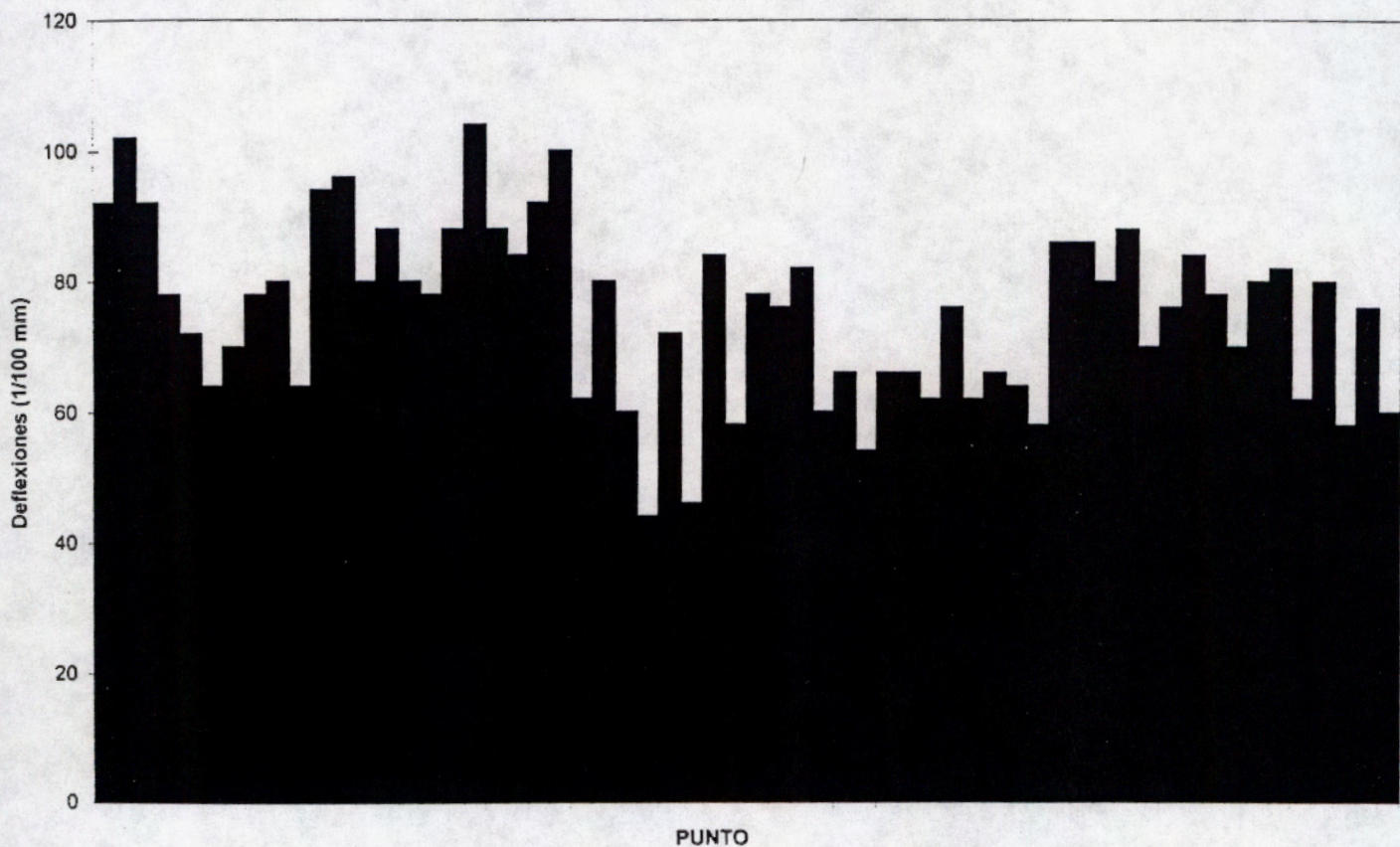
14+ 700	106	92	43	31
14+ 800	107	102	43	31
14+ 900	108	92	43	31
15+ 000	109	78	43	31
15+ 100	110	72	43	31
15+ 200	111	64	43	31
15+ 300	112	70	43	32
15+ 400	113	78	43	32
15+ 500	114	80	43	32
15+ 600	115	64	43	32
15+ 700	116	94	43	32
15+ 800	117	96	42	32
15+ 900	118	80	42	32
16+ 000	119	88	42	32
16+ 100	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 No°: 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

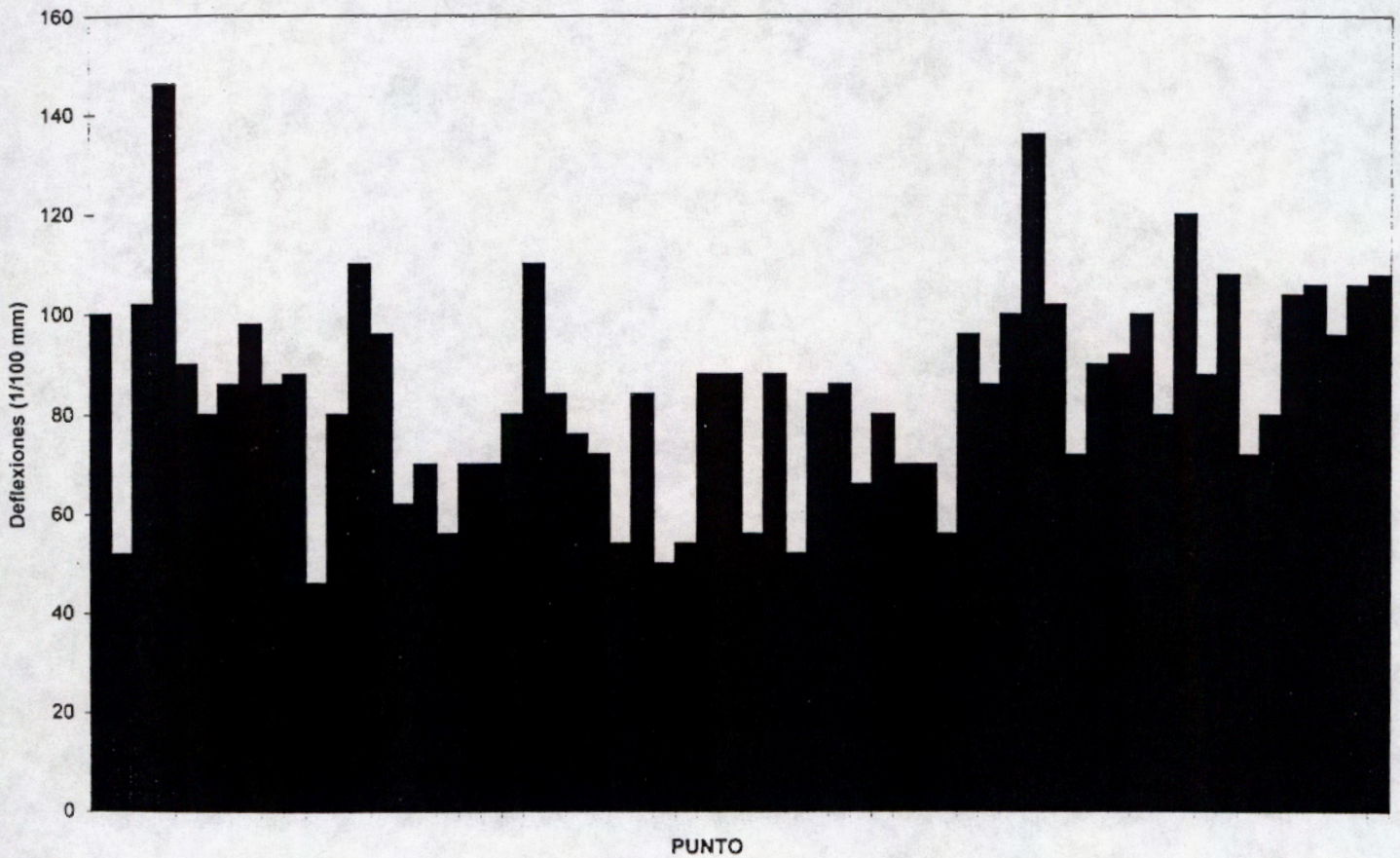
20+ 800	166	100	37	32
21+ 100	167	52	37	32
21+ 200	168	102	37	32
21+ 300	169	146	37	32
21+ 400	170	90	37	32
21+ 500	171	80	37	32
21+ 600	172	86	37	32
21+ 700	173	98	37	32
21+ 800	174	86	37	32
21+ 900	175	88	37	32
22+ 000	176	46	37	32
22+ 100	177	80	37	32
22+ 400	178	110	37	33
22+ 500	179	96	38	33
22+ 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 Noº: 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

ROUTA Noº: 1

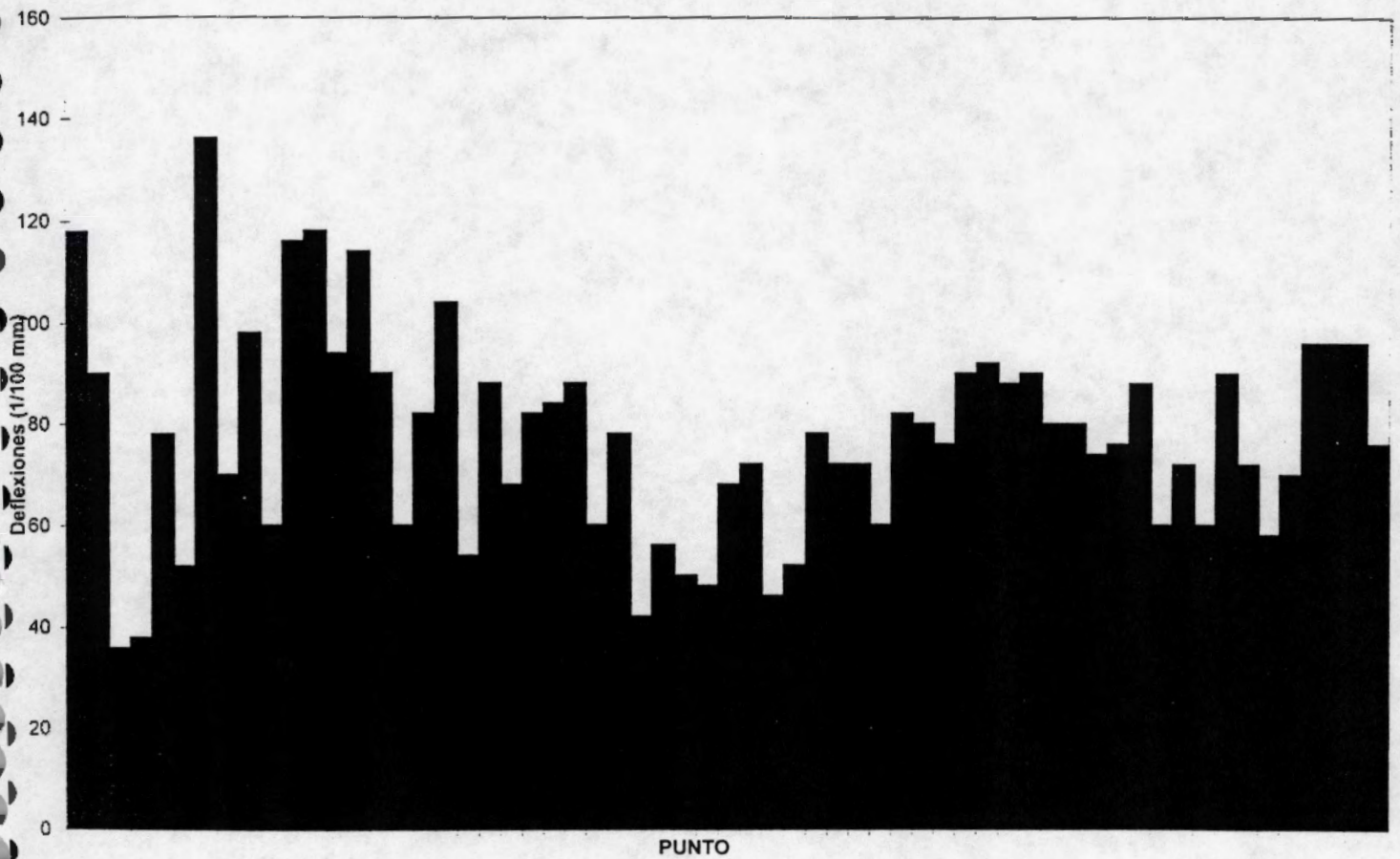
puntos 226-286

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):

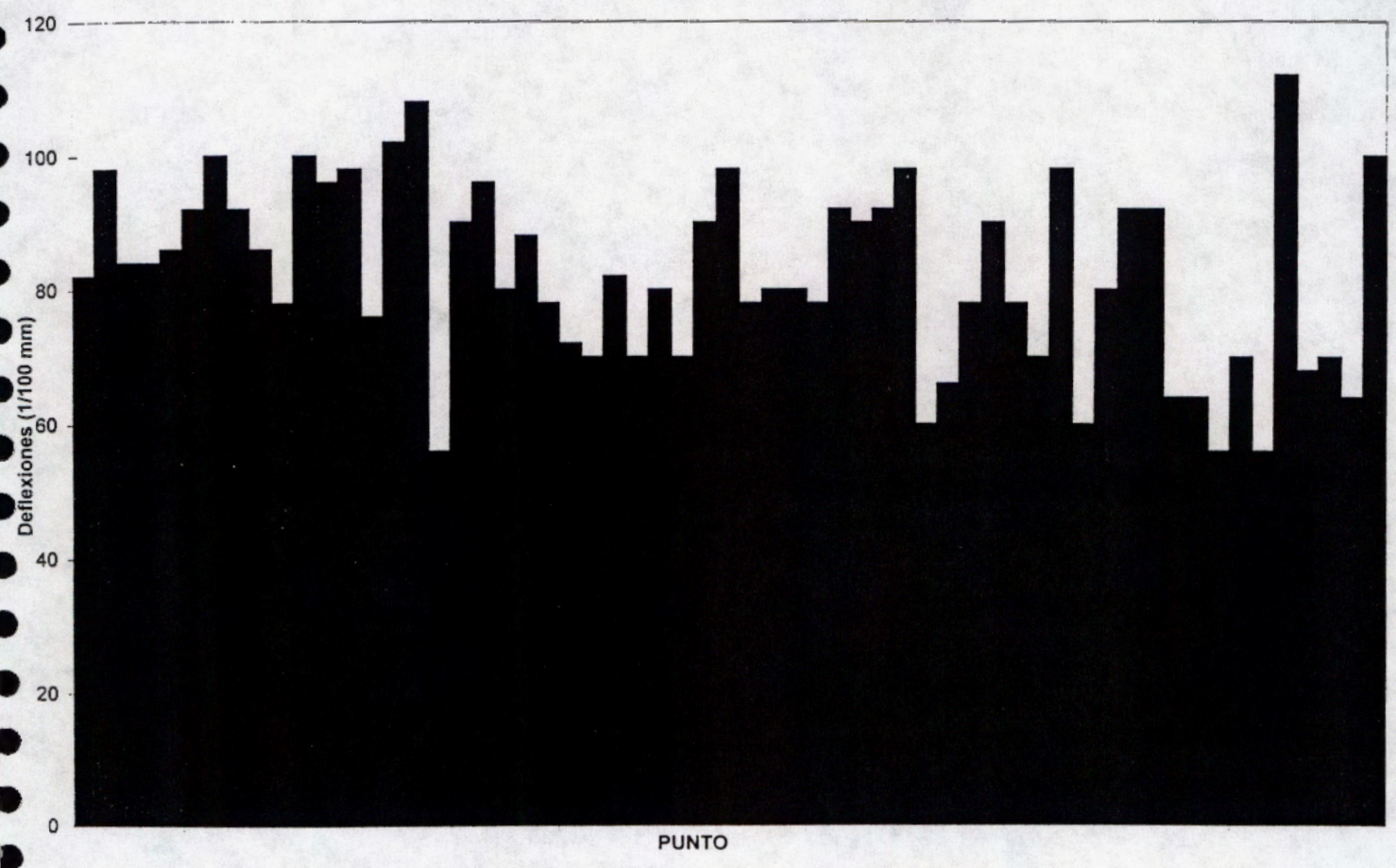
19.64

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

RUTA No°: 1
puntos 287-345

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

PERFIL DE DEFLEXIONES



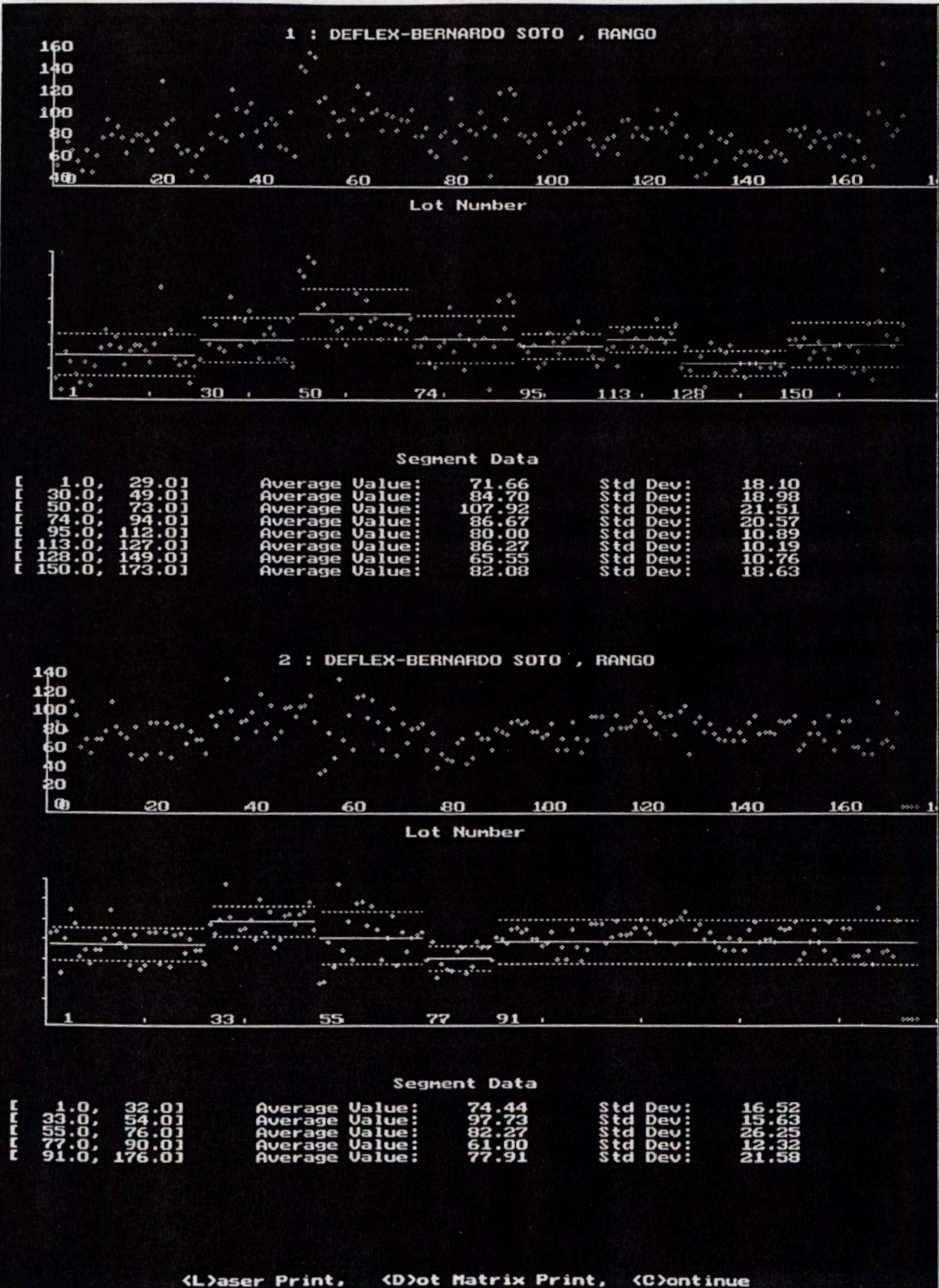
PROMEDIO (D): 82.34

DESV. EST. (s): 13.82

ANEXO 3

**GRÁFICOS SPEC PARA LA DEFINICION DE SECCIONES
HOMOGÉNEAS**

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



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 ⁻³)
75000	16000	10000	5000	0.0552	140.2
50000	16000	10000	5000	0.0603	153.2
50000	13000	10000	5000	0.0628	159.7
40000	13000	10000	5000	0.0662	168.1
100000	20000	12000	7500	0.0401	101.9
40000	13000	10000	5000	0.0662	168.1
75000	16000	10000	7500	0.0457	116.8
75000	16000	10000	6500	0.0487	123.7
75000	16000	10000	6000	0.0506	128.5
80000	20000	12000	7500	0.0421	108.9
90000	20000	12000	7500	0.041	104.1
450000	30000	18000	8000	0.0309	78.5
150000	20000	12000	7500	0.0317	105.9

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 ⁻³)
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
85000	16000	12000	8000	0.0536	136.1
100000	20000	12000	7500	0.0447	113.5
150000	20000	12000	8000	0.0405	102.9
160000	20000	14000	8000	0.0392	99.6
200000	20000	14000	8000	0.0376	95.5
300000	30000	18000	8000	0.0317	80.5
150000	20000	12000	6000	0.0462	117.3
125000	20000	12000	7500	0.0382	97.0
75000	20000	12000	7500	0.0428	108.7

ANEXO 4

**EJEMPLOS DE CÁLCULO DE DEFLEXIÓN EN LA
SUPERFICIE DE LA SOBRE-CAPA ASFÁLTICA
CONSIDERADA**

Sobrecapa: 7 cm

1) TRAMO 1: Aeropuerto-Manolo's

ESPEORES	pulg
	2.75
	20.9
	0

Mr sobrecapa (psi)	Ep (psi)	Mr sub-rasante (psi)	U ₂ : z=0 (pulg)	U ₂ : z=0 (mm 10 ⁻³)
400000	26800	7500	0.0349	88.8
400000	22000	7500	0.038	96.5
200000	26800	7500	0.0380	96.5
200000	22000	7500	0.0416	105.7

2) TRAMO 2: Manolo's-San Ramón

ESPEORES	pulg
	2.75
	21.7
	0

Mr sobrecapa (psi)	Ep (psi)	Mr sub-rasante (psi)	U ₂ : z=0 (pulg)	U ₂ : z=0 (mm 10 ⁻³)
400000	17750	6000	0.0455	115.6
400000	20950	7500	0.0386	98.0
400000	26500	8000	0.0338	85.9
400000	24500	8000	0.035	88.9
400000	33800	8000	0.0305	77.5
400000	23400	8000	0.0358	90.9
400000	19800	7500	0.0395	100.3
400000	22150	6000	0.0415	105.4
400000	36100	8000	0.0296	75.2
400000	23300	7500	0.0368	93.5
200000	17750	6000	0.0501	127.3
200000	20950	7500	0.0424	107.7
200000	26500	8000	0.0369	93.7
200000	24500	8000	0.0383	97.3
200000	33800	8000	0.0329	83.6
200000	23400	8000	0.0391	99.3
200000	19800	7500	0.0435	110.5
200000	22150	6000	0.0452	114.8
200000	36100	8000	0.0320	81.3
200000	23300	7500	0.0402	102.1

Sobrecapa: 9 cm

1) TRAMO 1: Aeropuerto-Manolo's

ESPEORES	pulg
	3.54
	20.9
	0

Mr sobrecapa (psi)	Ep (psi)	Mr sub-rasante (psi)	U _z : z=0 (pulg)	U _z : z=0 (mm·10 ⁻³)
400000	26800	7500	0.0316	80.3
400000	22000	7500	0.0341	86.6
200000	26800	7500	0.0350	88.9
200000	22000	7500	0.0380	96.5

2) TRAMO 2: Manolo's-San Ramón

ESPEORES	pulg
	3.54
	21.7
	0

Mr sobrecapa (psi)	Ep (psi)	Mr sub-rasante (psi)	U _z : z=0 (pulg)	U _z : z=0 (mm·10 ⁻³)
400000	17750	6000	0.0407	103.4
400000	20950	7500	0.0345	87.6
400000	26500	8000	0.0306	77.7
400000	24500	8000	0.0315	80.0
400000	33800	8000	0.0279	70.9
400000	23400	8000	0.0321	81.5
400000	19800	7500	0.0352	89.4
400000	22150	6000	0.0378	96.0
400000	36100	8000	0.0272	69.1
400000	23300	7500	0.0331	84.1
200000	17750	6000	0.0454	115.3
200000	20950	7500	0.0385	97.8
200000	26500	8000	0.0339	86.1
200000	24500	8000	0.0351	89.2
200000	33800	8000	0.0307	78.0
200000	23400	8000	0.0358	90.9
200000	19800	7500	0.0395	100.3
200000	22150	6000	0.0415	105.4
200000	36100	8000	0.0299	75.9
200000	23300	7500	0.0368	93.5

Sobrecapa: 11 cm

1) TRAMO 1: Aeropuerto-Manolo's

ESPEORES	pulg
	4.33
	20.9
	0

Mr sobrecapa (psi)	Ep (psi)	Mr sub-rasante (psi)	U _z : z=0 (pulg)	U _z : z=0 (mm*10 ⁻²)
400000	26800	7500	0.029	73.7
400000	22000	7500	0.031	73.7
200000	26800	7500	0.0325	82.6
200000	22000	7500	0.035	88.9

2) TRAMO 2: Manolo's-San Ramón

ESPEORES	pulg
	4.33
	21.7
	0

Mr sobrecapa (psi)	Ep (psi)	Mr sub-rasante (psi)	U _z : z=0 (pulg)	U _z : z=0 (mm*10 ⁻²)
400000	17750	6000	0.0369	93.7
400000	20950	7500	0.0313	79.5
400000	26500	8000	0.028	71.1
400000	24500	8000	0.0288	73.2
400000	33800	8000	0.0258	65.5
400000	23400	8000	0.0292	74.2
400000	19800	7500	0.0319	81.0
400000	22150	6000	0.0344	87.4
400000	36100	8000	0.0253	64.3
400000	23300	7500	0.0302	76.7
200000	17750	6000	0.0417	105.9
200000	20950	7500	0.0354	89.9
200000	26500	8000	0.03185	80.9
200000	24500	8000	0.0324	82.3
200000	33800	8000	0.0287	72.9
200000	23400	8000	0.0330	83.8
200000	19800	7500	0.0362	91.9
200000	22150	6000	0.0384	97.5
200000	36100	8000	0.0281	71.4
200000	23300	7500	0.0340	86.4

