



REPORTE DE INVESTIGACIÓN LM-PI-PV-IN-20c-05

PATOLOGÍA DEL PROYECTO

LIMONAL – TEMPISQUE

Informe de Avance

Investigadora Principal

Ing. Tracy Gutiérrez Ruiz

Investigador asociado

Ing. Mario Arce

Diciembre 2004

PATOLOGÍA DEL PROYECTO

LIMONAL - TEMPISQUE

1 INTRODUCCIÓN

En el año 2000 se finalizó el proyecto: Limonal – Tempisque (25.2 km), en la provincia de Guanacaste, Costa Rica. Este proyecto consistió en la escarificación del material de base existente, para reconformar una base estabilizada; sobre la cual se colocó concreto hidráulico en el primer tramo, y concreto asfáltico en el segundo tramo.

En el corto plazo, año 2002, aparecieron las primeras grietas en el proyecto, en zonas localizadas. Debido a esta falla prematura del pavimento y al compromiso del LANAMME (establecido en la Ley 8114 de Simplificación Tributaria y Eficiencia Tributaria) de desarrollar proyectos de investigación, es que se plantea este estudio.

El objetivo principal es determinar la(s) causa que provocó este fallamiento, para lo cual se va a realizar la caracterización de los materiales de construcción, evaluación visual del proyecto, ensayos no destructivos con el deflectómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD) y ensayos destructivos: extracción de núcleos, ensayo de penetración estándar SPT.

2 EVALUACIÓN PAVIMENTO RÍGIDO

El pavimento rígido del proyecto Limonal - Tempisque (Ruta 18), tiene una extensión de 19.2 kilómetros. Inicia en Limonal (0+000), en la intersección con la Ruta 1, y finaliza en la intersección a CEMEX (Cementos Mexicanos) en el estacionamiento 19+200.

El proyecto Limonal –Tempisque (pavimento rígido) inició en el año 1999 y se finalizó en el año 2000. Consistió en un trabajo de rehabilitación: escarificación del material de base existente, que en algunos casos era base granular y en otros, base estabilizada. Al material escarificado se le adicionó el material necesario para conformar una base estabilizada BE-25 (30 kg/cm² a los 7 días) de 25 cm.

Finalmente, se colocó una losa de concreto de 23.0 cm, con resistencia a la flexión de 48 kg/cm² a los 28 días.

Patrones de falla

Para este estudio se realizaron dos evaluaciones visuales. La primera se llevó a cabo en octubre del 2002, y la segunda en octubre del 2003.

En ambas evaluaciones se detectaron tres tipos de fallas predominantes:

- Fallas por problemas geotécnicos.
- Agrietamiento en las esquinas, transversal y longitudinal.
- Fallas en las juntas.

En puntos localizados se observan defectos superficiales: agrietamiento en el concreto, desprendimiento de agregados. En la Figura N°1 se muestran fotografías con los tipos de falla mencionados.



Figura N°1a: Agrietamiento por problemas geotécnicos



Figura N°1b: Agrietamiento en las esquinas, transversal y longitudinal.

En la Figura N°2 se resumen los resultados de la segunda evaluación visual. En ella se muestran los estacionamientos donde se presentan los patrones de falla predominantes. En la Tabla N°1 se resume la misma información.

Se nota como en el kilómetro 11 y 17, es donde predominan las fallas asociadas a problemas geotécnicos.



Doble junta



Falla en la junta



Deterioro en la junta

Figura N°1c: Fallas en las juntas



Desprendimiento de agregados



Agrietamiento en el concreto

Figura N°1d: Defectos superficiales

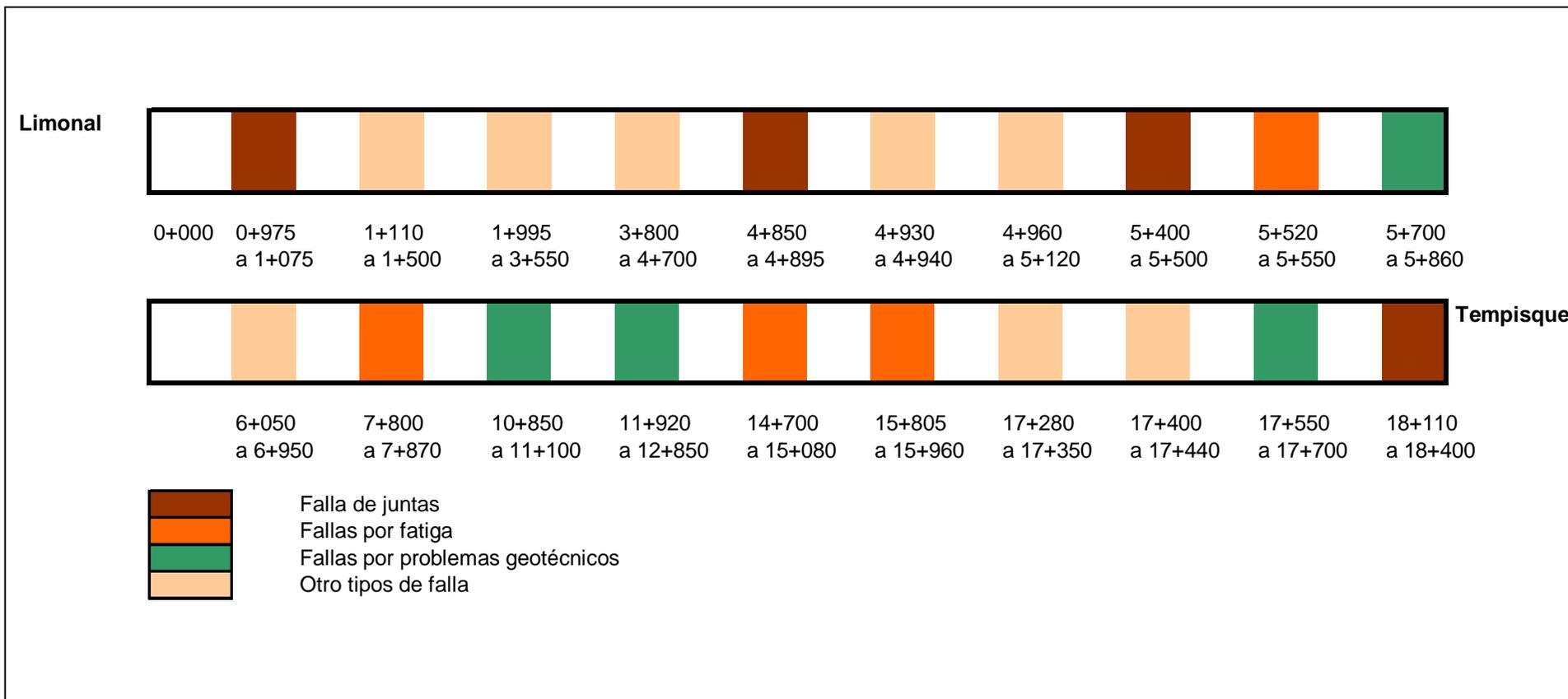


Figura Nº2: Patrones de falla predominantes en pavimento rígido (evaluación octubre 2003)

Tabla N°1: Resumen de levantamiento de daños, octubre 2003.

Tipo de falla	Cantidad de ocurrencias	Porcentaje de ocurrencias (%)	Ubicación
Fallas por problemas geotécnicos	30	15.3	5+700 - 5+860, 10+850 - 11+100, 11+920 - 12+850, 17+550 - 17+700
Agrietamiento en las esquinas, transversal y longitudinal	36	18.4	5+520 - 5+550, 7+800 - 7+870, 14+700 - 15+080, 15+805 - 15+960
Fallas de junta	57	29.1	0+975 - 1+075, 4+850 - 4+895, 5+400 - 5+500, 18+110 - 18+400,
Otros tipos de falla	73	37.2	1+110 - 1+500, 1+995 - 3+550, 3+800 - 4+700, 4+930 - 4+940, 4+960 - 5+120, 6+050 - 6+950, 17+280 - 17+350, 17+400 - 17+440

Sondeos

Para este estudio se realizaron tres tipos de sondeos: excavaciones en el pavimento, sondeos con SPT (ensayo de penetración normal) y trincheras en el espaldón de la carretera. El objetivo de estos sondeos, fue obtener la caracterización de los materiales que componen las capas del pavimento.

Excavaciones en el pavimento

En el pavimento rígido se realizaron tres excavaciones o sondeos (octubre 2002), cuya ubicación se seleccionó con base en la primer evaluación visual del proyecto. En la Tabla N°2 se anota la ubicación de estos sondeos.

Tabla N°2: Ubicación de los sondeos

N° Sondeo (excavación)	Estacionamiento	Sentido
1	6+000	Tempisque - Limonal
2	17+800	Limonal - Tempisque
3	18+900	Tempisque - Limonal

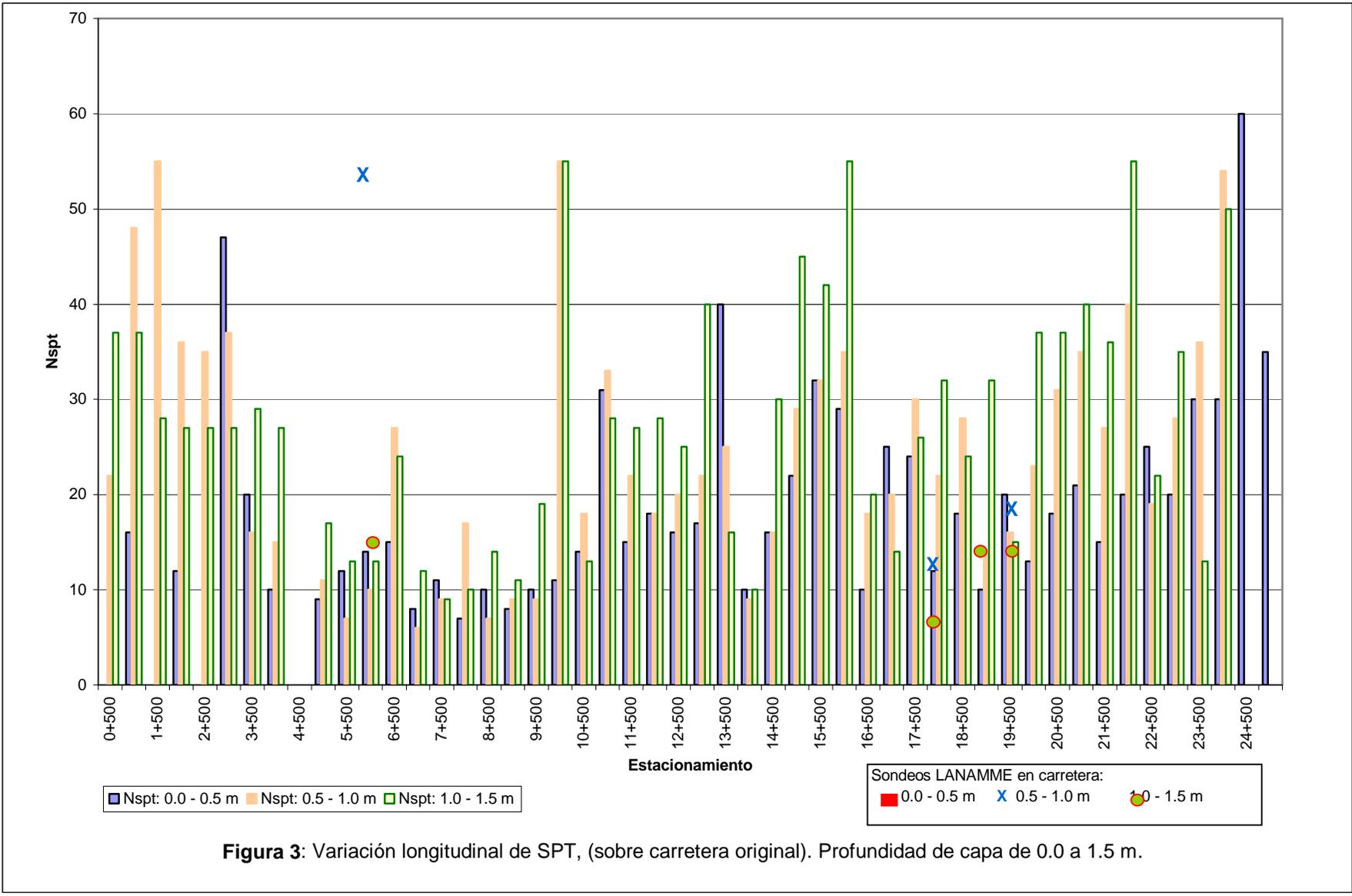
En el Anexo 1 se presentan los resultados de cada sondeo: espesores y caracterización del material.

Sondeos con SPT (Ensayo de Penetración Normal)

Los sondeos con SPT se hicieron (enero 2003) en los mismos puntos donde se llevaron a cabo las excavaciones. En cada uno de estos puntos se realizaron dos perforaciones, una en la carretera y otra en el espaldón. En el Anexo 2 se muestra la información completa de cada sondeo: espesores, número de golpes de penetración y caracterización del material.

Antes de que se iniciaran los trabajos de rehabilitación, se hicieron ensayos con el SPT, a lo largo del proyecto, cada 500 metros. Estos resultados se muestran en la Figura N°3. En esta figura, también se observan los valores de SPT obtenidos después de la rehabilitación, en los tres puntos de estudio antes citados.

Además, en las Figuras N°4 y N°5, se presentan los resultados de plasticidad y humedad asociados con los ensayos de SPT, antes de la rehabilitación.



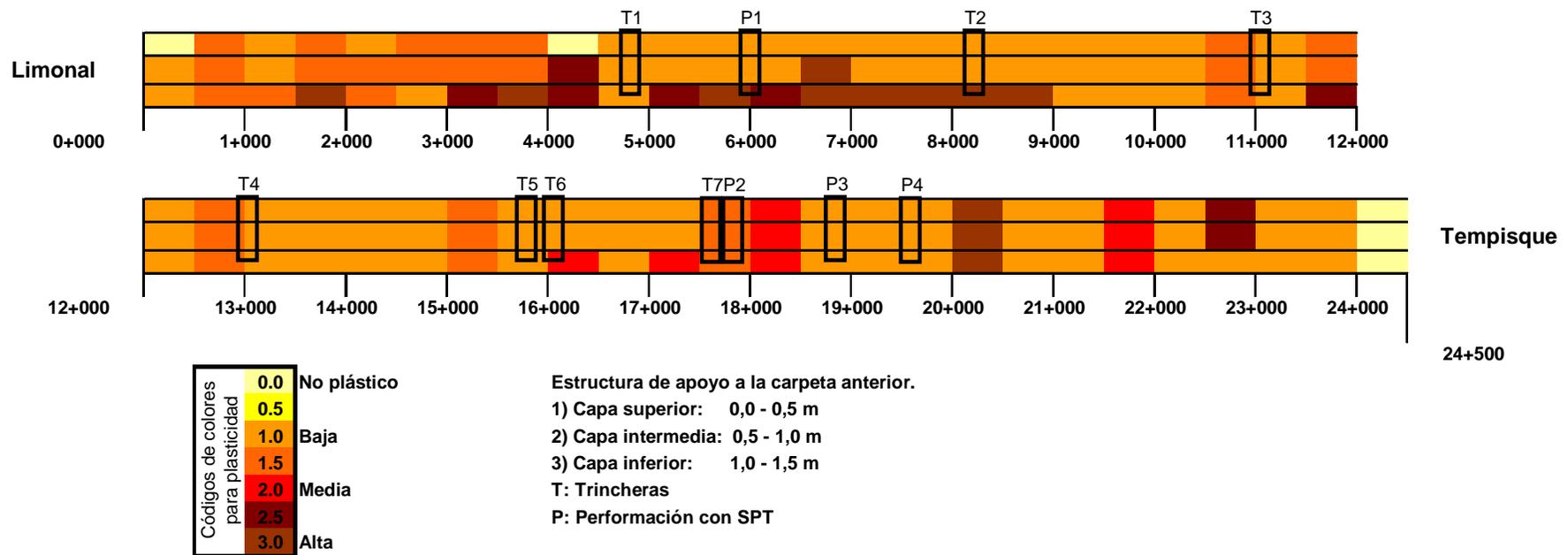


Figura N°4: Variación de la plasticidad (antes de la rehabilitación) a diferentes profundidades.

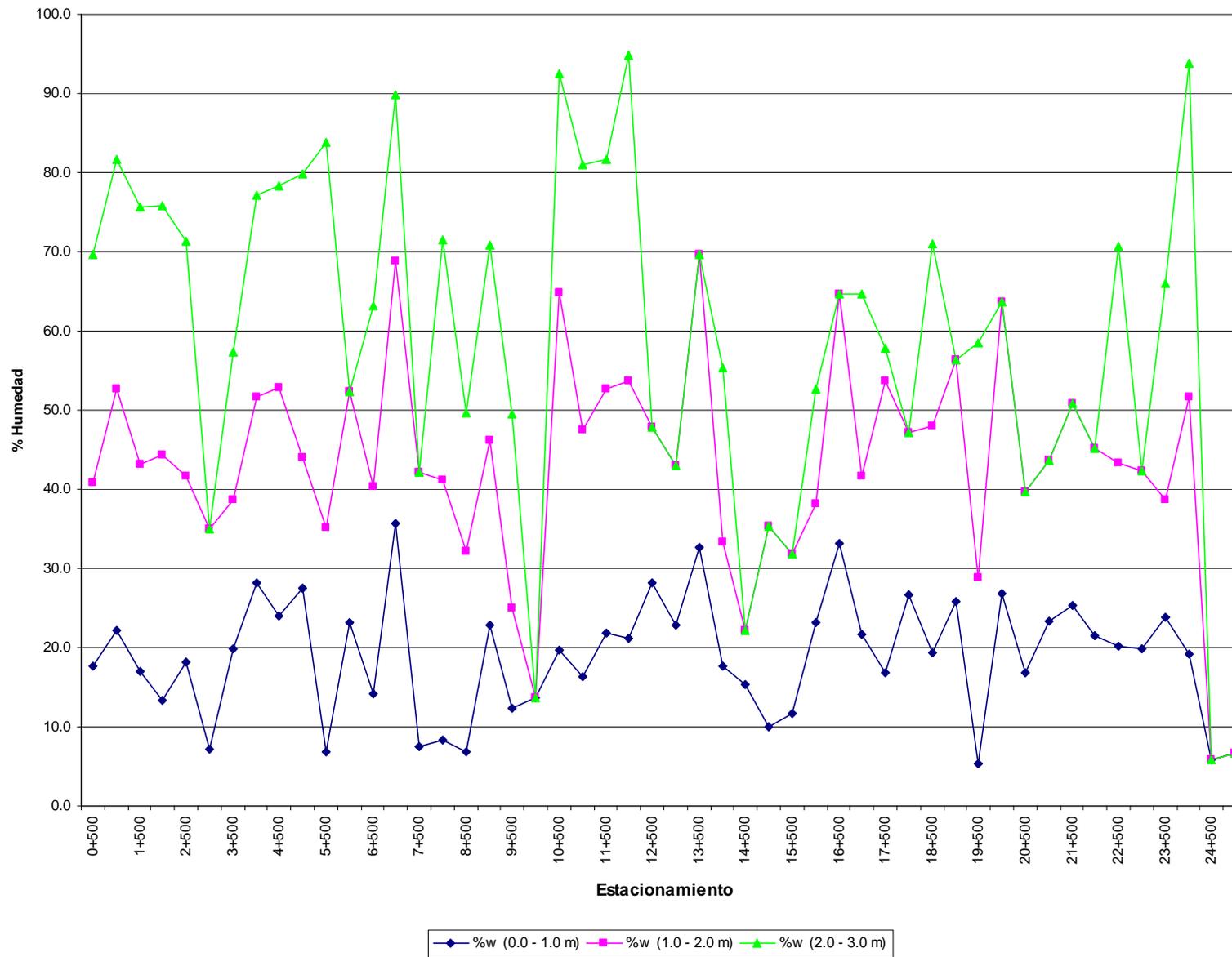


Figura N°5: Variación de la humedad (antes de la rehabilitación) a diferentes profundidades.

Trincheras

Con base en la información de las evaluaciones visuales, caracterización de los materiales y con los datos de deflectometría; se seleccionaron 7 puntos para realizar trincheras en el espaldón de la carretera y obtener de esta manera, mayor información sobre las capas que constituyen el pavimento. En la Tabla N°3 se presenta la ubicación de las trincheras, con una breve descripción de cada punto por evaluar.

Tabla N°3: Ubicación de las trincheras

Trinchera	Estación	Sentido	Observaciones
1	4+800	Limonal - Tempisque	En este tramo la totalidad del proyecto se encuentra en relleno. La losa donde se realizó la trinchera, presenta rellenos entre 1.2 m y 1.5 m. Esta losa tiene una grieta transversal. En este punto se realizaron ensayos con el deflectómetro de impacto y se obtuvieron deflexiones bajas, de aproximadamente 15 mm^{-2} para una carga de 80 KN.
2	8+185	Limonal - Tempisque	Esta trinchera se realizó sobre una losa sana, con deflexiones de aproximadamente 15 mm^{-2} para una carga de 80 KN. La sección se encuentra en relleno, mayor a 1.5 m en ambos lados de la carretera.
3	11+090	Limonal - Tempisque	El tramo donde se realizó el ensayo es una recta de aproximadamente 1.5 km, en el cruce hacia Colorado. Cerca de este estacionamiento se encuentran aproximadamente 6 losas con agrietamiento circular (grietas en forma de "C") y precisamente la losa donde se realizó la trinchera fue la que presentó mayor deflexión, 110 mm^{-2} para una carga de 80 KN. La sección se encuentra en relleno (oscilan entre 1.0 m y 1.2 m).
4	13+055	Tempisque - Limonal	Esta trinchera se realizó sobre una losa sana, con deflexiones de 20 mm^{-2} para una carga de 80 KN. La sección se encuentra en corte, mayor a 1.0 m en un lado y superior a los 2.0 m en el otro.
5	15+875	Tempisque - Limonal	Esta trinchera se realizó al inicio de la zona del proyecto que presenta la mayor cantidad grietas. En este punto se realizaron ensayos con el deflectómetro de impacto, obteniéndose deflexiones muy altas, de 135 mm^{-2} con una carga de 80.0 KN. La sección en este punto se encuentra en relleno, muy pequeño (alrededor de 70.0 cm) en un lado y de 2.0 m en el otro (al terreno natural).

6	16+075	Tempisque - Limonal	Esta trinchera se realizó al inicio de la zona del proyecto que presenta la mayor cantidad grietas. En este punto se realizaron ensayos con el deflectómetro de impacto, obteniéndose deflexiones muy bajas, (de 15 mm ⁻² con una carga de 80.0 KN) a pesar de que la losa evaluada se encontraba agrietada. La sección en este punto se encuentra en corte de poca altura.
7	17+700	Tempisque - Limonal	El tramo donde se realizó el ensayo es una recta de aproximadamente 400 m, que corresponde a la zona del proyecto donde las losas presentan mayor cantidad de grietas. Además, los rellenos en este tramo oscilan entre 1.8 m y 0.6 m de altura. En esta recta se encuentran tres alcantarillas.

En el Anexo 3 se observa el perfil del pavimento encontrado en cada trinchera y la caracterización de los materiales. En el Anexo 4, se presenta una descripción detallada (con fotografías) de cada punto.

Es importante indicar que debajo del espaldón no se encontró base estabilizada, sino un material granular, tal como se aprecia en los perfiles.

Caracterización de materiales existentes

Losa de concreto hidráulico.

En cada una de las excavaciones realizadas en el pavimento (octubre 2002), se tomaron tres núcleos de la losa, los cuales fueron ensayados por resistencia a la compresión simple. Posteriormente, en enero del 2003, cuando se llevaron a cabo los ensayos con SPT, se tomó un núcleo de cada uno y también se evaluó la resistencia a la compresión simple. En la Tabla N°4 se muestran los resultados.

Tabla N°4: Resultados a la compresión simple.

N° Sondeo (excavación)	Estacionamiento	Octubre 2002		Enero 2003
		Esfuerzo promedio (kg/cm ²)	Desviación (kg/cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	6+000	352	35	306
2	17+800	279	14	270
3	18+900	291	17	254

Nota: En el proyecto se pedía una resistencia a la flexión de 48 kg/cm² a los 28 días.

En la Figura N°6 se muestra un gráfico con los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión simple a los 28 días, que se realizaron durante la ejecución del proyecto.

Base estabilizada

En el estacionamiento 6+000 (excavación N°1), se tomaron núcleos de la base estabilizada, sin embargo, sólo los primeros 6.0 se obtuvieron íntegros, el resto se desintegraba. Por esta razón, no se le aplicaron ensayos directos.

Materiales granulares y suelos

La caracterización completa de los materiales, se llevó a cabo mediante sondeos. La información completa se presentó en el apartado 2.2 de este documento.

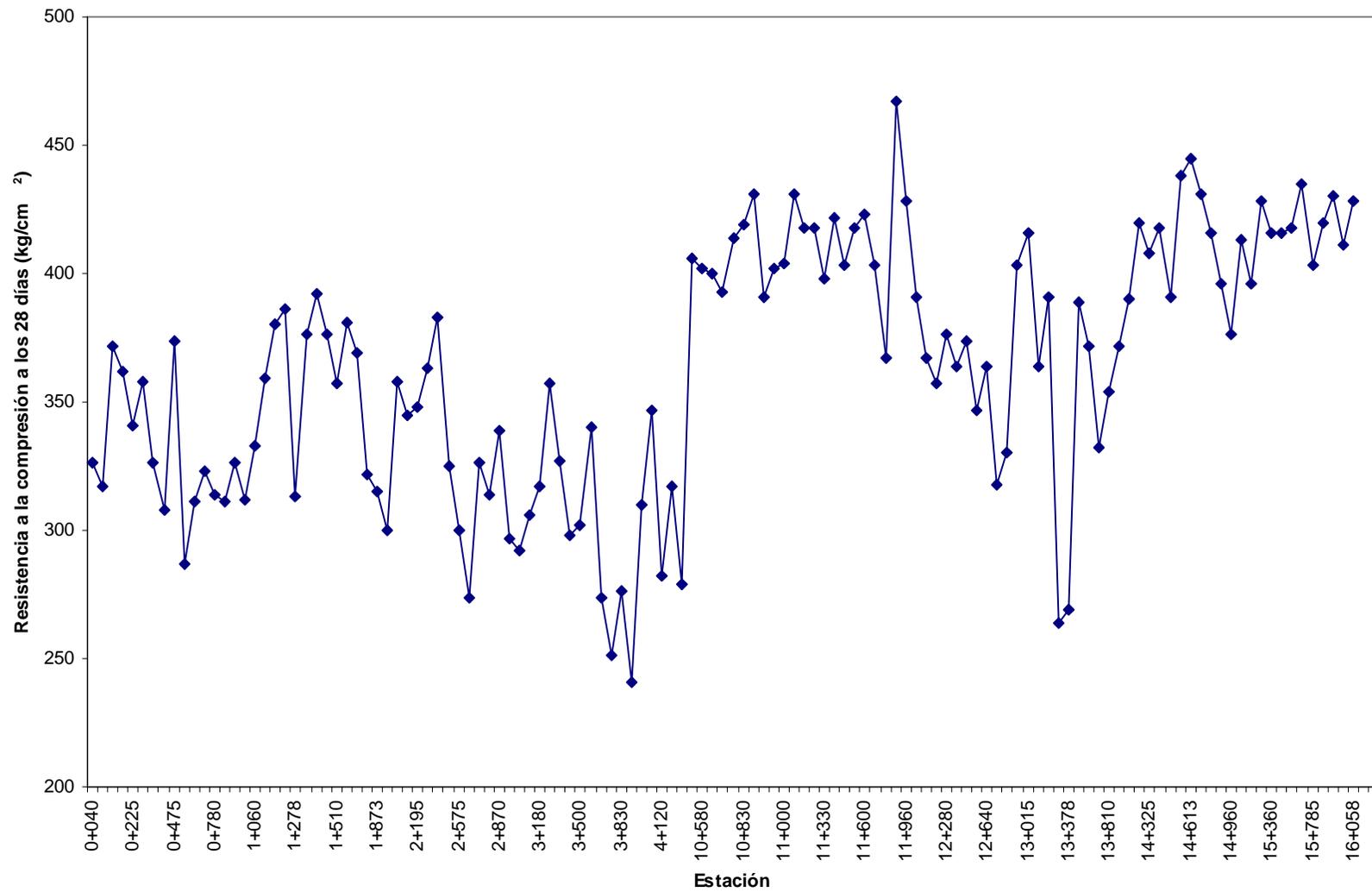


Figura N°6: Variación longitudinal de la resistencia a la compresión axial simple, durante la ejecución del proyecto.

Evaluación de capacidad estructural existente

Sección típica

Con base en las excavaciones realizadas en el pavimento, se tienen los siguientes espesores de capa, ver Tabla N°4.

Tabla N°4: Espesores de capa

Excavación	Estación	Capa		
		Losa (cm)	Base estabilizada (cm)	Relleno (cm)
N°1	6+000	23.5	25.0	75.0
N°2	17+800	24.0	No determinado	75.0
N°3	18+900	22.0	No determinado	75.0
Promedio		23.2	25.0	75.0
Desviación estándar		1.0	0.0	0.0

Nota: El espesor del material de relleno, se determinó a partir de los sondeos realizados con SPT.

De esta manera se define la sección típica para los análisis: 23.0 cm de losa, 25.0 cm de base estabilizada, 75.0 cm de material de relleno y el resto de los materiales subyacentes, se consideran como capa de soporte.

Módulos de rigidez

Se realizaron ensayos con el Defletómetro de Impacto, FWD, en los tres puntos donde se hicieron las excavaciones en el pavimento: 6+000, 17+800 y 18+900.

Los ensayos se hicieron en 15 losas antes del punto de la excavación, y 15 losas después. Cada losa se ensayó en tres puntos, tal como se muestra en la Figura N°7.

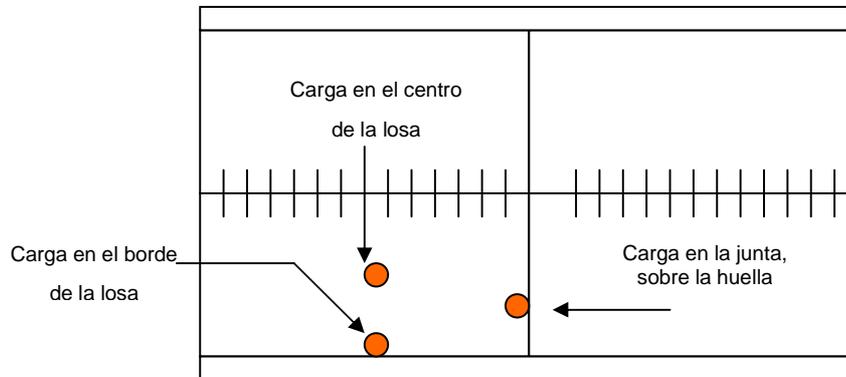


Figura N°7: Esquema de evaluación de las losas con FWD.

En la Tabla N°5, aparece un resumen de las deflexiones (centro y borde de la losa) utilizadas para el retrocálculo de módulos. Estas deflexiones corresponden a una carga de 80 KN.

El retrocálculo de módulos se hizo con el programa de elemento finito EverFe2.21. Los resultados se muestran en la Tabla N°6. Ver Anexo 5.

Capacidad estructural en capas de soporte

A partir de los datos de deflexión en las juntas, se determina el módulo de reacción en la losa (k_1) y en la base estabilizada (k_2). En la Tabla N°7 se muestran los valores de los módulos de rigidez retrocalculados en las juntas, el detalle se presenta en el Anexo 5.

En la Tabla N°8 aparecen los módulos de reacción k_1 y k_2 ; y en el Anexo 6 se muestra el cálculo.

Tabla N°5: Resultado de deflexiones (mm⁻²), Carga de 80 KN.

Estación	Parámetro	Número de sensor								
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
6+000 Excavación N°1 Centro de la losa	Promedio	13.78	13.08	12.59	11.82	11.20	9.70	8.29	6.96	5.80
	Desv. Est.	4.93	4.86	4.75	4.50	4.28	3.70	3.10	2.66	2.21
	Percentil 70	16.24	15.51	14.96	14.07	13.34	11.55	9.84	8.29	6.91
	Percentil 85	18.70	17.94	17.34	16.32	15.48	13.40	11.40	9.62	8.01
6+000 Excavación N°1 Borde de la losa	Promedio	13.83	13.18	12.71	11.95	11.28	9.72	8.30	6.99	5.85
	Desv. Est.	3.90	3.98	3.84	3.51	3.21	2.70	2.25	1.96	1.70
	Percentil 70	15.77	15.17	14.63	13.70	12.88	11.07	9.43	7.97	6.69
	Percentil 85	17.72	17.16	16.55	15.46	14.49	12.42	10.55	8.96	7.54
17+800 Excavación N°2 Centro de la losa	Promedio	5.77	5.46	5.20	4.91	4.67	4.11	3.67	3.21	2.77
	Desv. Est.	0.50	0.52	0.49	0.46	0.50	0.40	0.36	0.37	0.34
	Percentil 70	6.02	5.72	5.45	5.14	4.92	4.31	3.85	3.39	2.94
	Percentil 85	6.27	5.98	5.69	5.37	5.18	4.51	4.02	3.58	3.11
17+800 Excavación N°2 Bode de la losa	Promedio	7.40	7.14	6.78	6.45	6.09	5.33	4.65	4.07	3.42
	Desv. Est.	0.82	0.79	0.77	0.73	0.70	0.65	0.67	0.61	0.68
	Percentil 70	7.81	7.54	7.16	6.82	6.44	5.66	4.99	4.37	3.76
	Percentil 85	8.22	7.94	7.54	7.18	6.79	5.98	5.32	4.68	4.10
18+900 Excavación N°3 Centro de la losa	Promedio	13.77	12.97	12.42	11.55	10.80	9.30	8.02	6.97	5.59
	Desv. Est.	1.65	1.61	1.55	1.49	1.39	1.25	1.11	1.05	0.75
	Percentil 70	14.60	13.77	13.19	12.29	11.49	9.93	8.58	7.50	5.96
	Percentil 85	15.43	14.57	13.97	13.04	12.18	10.55	9.13	8.02	6.34
18+900	Promedio	15.55	14.82	14.23	13.34	12.60	10.87	9.21	7.74	6.39

Excavación N°3 Bode de la losa	Desv. Est.	1.70	1.66	1.60	1.53	1.42	1.25	1.11	1.00	0.74
	Percentil 70	16.39	15.65	15.03	14.11	13.31	11.50	9.76	8.24	6.76
	Percentil 85	17.24	16.48	15.83	14.88	14.02	12.12	10.31	8.75	7.13

Tabla N°6: Módulos de rigidez retrocalculados.

Estación	Percentil	Módulos de rigidez (MPa)							
		centro de losa				borde de losa			
		losa	base estab.	relleno	Módulo de reacción (Mpa/mm)	losa	base estab.	relleno	Módulo de reacción (Mpa/mm)
6+000	70	38000	12000	350	0.065	55000	15000	350	0.091
	85	35000	12000	300	0.060	50000	10000	300	0.091
17+800	70	55000	15000	300	0.085	55000	15000	300	0.095
	85	55000	15000	300	0.080	55000	15000	300	0.090
18+900	70	55000	15000	300	0.081	55000	15000	350	0.091
	85	55000	15000	300	0.075	53000	13000	300	0.091

Nota: 1 MPa = 145 psi; ; 1 MPa/mm = 3684 pci.

Tabla N°7: Módulos de rigidez, en la junta.

Estación	Ubicación	Carga (kN)	Módulos (MPa) Percentil 70			
			losa	base estabilizada	relleno	módulo de reacción
6+000	junta	40	48000	15000	300	0.075
		60	50000	15000	325	0.070
		80	53000	15000	350	0.074
17+800	junta	40	47000	12000	275	0.110
		60	47000	12000	275	0.110
		80	47000	12000	275	0.110
18+900	junta	40	39000	8000	190	0.055
		60	39000	8000	190	0.055
		80	39000	8000	190	0.055
Estación	Ubicación	Carga (kN)	Módulos (MPa) Percentil 85			
			losa	base estabilizada	relleno	módulo de reacción
6+000	junta	40	50000	15000	300	0.065
		60	48000	15000	300	0.060
		80	50000	15000	350	0.066
17+800	junta	40	45000	11500	250	0.095
		60	45000	11500	250	0.095

		80	45000	11500	250	0.095
18+900	junta	40	38000	7500	190	0.046
		60	38000	7500	190	0.046
		80	38000	7500	190	0.046

Tabla N°8: Módulos de reacción en capa de soporte.

Estación	Módulo de reacción (MPa/mm)			Módulo de reacción teórico (MPa/mm)	
	Percentil	K1	K2	K1	K2
6+000	70	1.776	0.112	0.625	0.217
	85	1.282	0.186	-	-
17+800	70	1.552	0.364	0.625	0.217
	85	1.502	0.315	-	-
18+900	70	0.974	0.194	0.625	0.217
	85	0.880	0.179	-	-

Nota: 1 MPa/mm = 3684 pci.

Los módulos de reacción teóricos resultan de una estructura ideal de pavimento sometida a una carga de 40 kN.

Evaluación de transferencia de carga en juntas transversales

Para determinar la eficiencia en la transferencia de carga a través de las juntas transversales, se aplica la ecuación:

$$\text{Eficiencia en la transferencia de carga} = \frac{d_2}{d_1} 100$$

Donde:

d_2 : deflexión en la junta de la losa no cargada

d_1 : deflexión en la junta de la losa cargada

En las Tablas N°9, N°10 y N°11 se presentan los resultados de eficiencia para los mismos puntos donde se llevaron a cabo las excavaciones en el pavimento.

Tabla N°9: Transferencia de carga en juntas transversales, excavación N°1 (6+000).

15 losas antes	Temperatura (°C)		Eficiencia (%)			15 losas después	Temperatura (°C)		Eficiencia (%)		
			Rango de carga						Rango de carga		
	Sup.	Aire	20 kN	40 kN	80 kN		Sup.	Aire	20 kN	40 kN	80 kN
1	47.1	34.3	69.2	73.3	77.1	1	47.3	34.4	84.0	81.2	83.5
2	47.1	34.3	78.5	77.9	80.1	2	47.3	34.5	28.3	28.8	30.3
3	46.2	34.1	65.0	67.0	70.9	3	47.5	35.9	75.1	75.3	77.9
4	46.9	33.8	72.3	70.5	73.0	4	47.6	35.6	80.0	79.4	82.1
5	46.3	34.4	73.6	77.6	79.5	5	47.7	35.5	68.0	69.1	71.4
6	46.7	34.0	79.1	79.6	81.0	6	48.0	35.1	73.1	73.4	75.3
7	47.2	34.4	82.8	80.3	81.6	7	48.4	34.2	71.3	71.1	72.9
8	47.2	36.0	75.5	75.8	77.4	8	48.5	35.4	77.1	81.5	82.3
9	48.1	35.2	80.2	78.2	78.7	9	48.1	35.5	46.2	52.6	57.6
10	46.4	34.5	75.6	75.9	78.6	10	48.0	34.6	62.5	65.2	68.7
11	47.2	34.9	87.6	84.2	84.3	11	46.8	34.6	77.8	79.5	82.4
12	47.9	34.5	21.7	23.0	25.3	12	47.6	35.4	80.3	79.6	82.2
13	47.8	34.9	54.2	51.1	53.0	13	47.4	34.0	64.5	65.0	68.0
14	47.6	34.1	78.7	77.6	80.2	14	47.6	35.1	63.6	66.5	69.0
15	47.0	34.5	68.2	72.8	76.8	15	47.3	34.2	56.8	60.2	65.0

Nota: Las celdas sombreadas fueron seleccionadas para la detección de vacíos en la losa. Ver apartado 2.4.5.

Tabla N°10: Transferencia de carga en juntas transversales, excavación N°2 (17+800).

15 losas antes	Temperatura (°C)		Eficiencia (%)			15 losas después	Temperatura (°C)		Eficiencia (%)		
			Rango de carga						Rango de carga		
	Sup.	Aire	20 kN	40 kN	80 kN		Sup.	Aire	20 kN	40 kN	80 kN
1	42.4	31.9	86.9	93.5	92.2	1	44.0	31.6	87.1	90.6	89.5
2	41.5	32.2	93.5	94.4	94.3	2	41.8	31.8	89.0	90.6	90.9
3	42.0	31.4	93.4	95.2	95.5	3	41.5	31.1	89.2	88.9	90.4
4	41.3	31.3	95.8	94.2	95.4	4	41.5	30.8	85.6	89.3	88.9
5	41.9	31.0	85.1	91.2	91.2	5	40.4	30.5	91.9	91.8	90.0
6	44.6	31.7	89.4	94.8	94.2	6	37.0	30.1	86.1	92.3	91.7
7	44.3	32.0	88.1	90.6	90.6	7	33.4	29.5	84.1	86.8	86.5
8	44.5	32.1	86.6	91.5	90.6	8	34.5	29.5	84.8	88.1	88.4
9	44.6	32.9	87.9	90.6	89.5	9	41.5	29.8	90.6	91.0	90.0
10	44.3	32.3	87.7	88.8	87.5	10	42.7	30.8	92.3	94.6	95.5
11	42.9	31.9	86.8	91.0	90.3	11	43.2	31.0	92.7	94.7	92.2
12	43.7	31.3	94.5	94.3	92.2	12	43.0	31.1	93.9	94.3	94.8
13	43.3	31.3	90.5	94.4	93.3	13	41.8	30.4	96.5	97.6	96.4
14	44.9	32.0	93.9	92.4	90.0	14	40.6	29.4	94.9	95.2	95.3
15	42.8	31.4	93.0	95.2	93.7	15	42.2	29.2	88.7	89.4	92.8

Nota: Las celdas sombreadas fueron seleccionadas para la detección de vacíos en la losa. Ver apartado 2.4.5.

Tabla N°11: Transferencia de carga en juntas transversales, excavación N°3, (18+900)

15 losas antes	Temperatura (°C)		Eficiencia (%)			15 losas después	Temperatura (°C)		Eficiencia (%)		
			Rango de carga						Rango de carga		
	Sup.	Aire	20 kN	40 kN	80 kN		Sup.	Aire	20 kN	40 kN	80 kN
1	47.1	34.3	95.9	97.2	96.3	1	47.3	34.4	95.5	98.1	96.8
2	47.1	34.3	93.8	95.1	96.0	2	47.3	34.5	98.4	97.0	96.5
3	46.2	34.1	94.6	96.6	96.9	3	47.5	35.9	95.0	96.8	96.6
4	46.9	33.8	96.3	98.9	98.6	4	47.6	35.6	92.4	94.7	95.4
5	46.3	34.4	95.7	98.2	96.5	5	47.7	35.5	98.4	94.1	95.8
6	46.7	34.0	102.2	96.9	96.7	6	48.0	35.1	101.5	95.5	95.5
7	47.2	34.4	93.9	98.4	97.6	7	48.4	34.2	91.3	91.1	92.7
8	47.2	36.0	97.2	97.0	96.1	8	48.5	35.4	94.4	97.4	94.6
9	48.1	35.2	99.3	96.9	96.7	9	48.1	35.5	97.7	95.2	95.4
10	46.4	34.5	94.4	94.4	94.6	10	48.0	34.6	98.0	96.7	96.2
11	47.2	34.9	94.4	94.4	95.1	11	46.8	34.6	90.9	94.8	95.6
12	47.9	34.5	95.1	95.3	94.4	12	47.6	35.4	95.8	92.1	93.2
13	47.8	34.9	98.6	96.4	96.5	13	47.4	34.0	98.4	96.6	95.2
14	47.6	34.1	97.0	95.6	96.1	14	47.6	35.1	96.6	99.6	99.2
15	47.0	34.5	96.1	97.0	96.3	15	47.3	34.2	101.0	101.2	101.7

Nota: Las celdas sombreadas fueron seleccionadas para la detección de vacíos en la losa. Ver apartado 2.4.5.

Evaluación de pérdida de capacidad de soporte

Para cada uno de los puntos en estudio (estacionamientos donde se hicieron excavaciones en el pavimento), se valoró la existencia de cavidades bajo las juntas transversales. La evaluación se hace trazando gráficas de carga contra deflexión, y considerando que una recta de mejor ajuste que interseca el eje de abscisas, a una distancia grande del origen (mayor a 5.1 mm^{-2}), es evidencia de cavidades inferiores y pérdida en capacidad de soporte.

Para cada estacionamiento en estudio (6+000, 17+800 y 18+900), se seleccionaron los puntos de análisis. Ver Figuras N°8, N°9 y N°10.

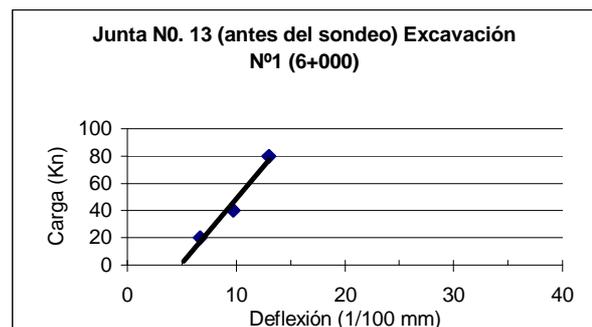
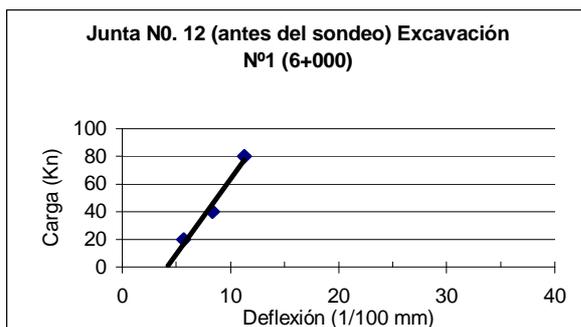
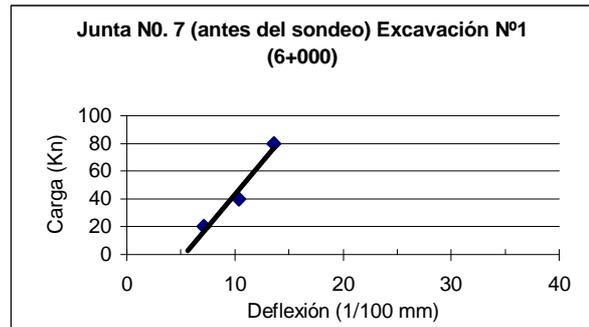
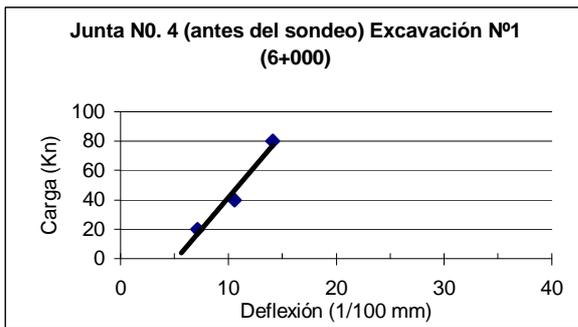


Figura N°8: Pérdida de capacidad de soporte, excavación N°1: 6+000

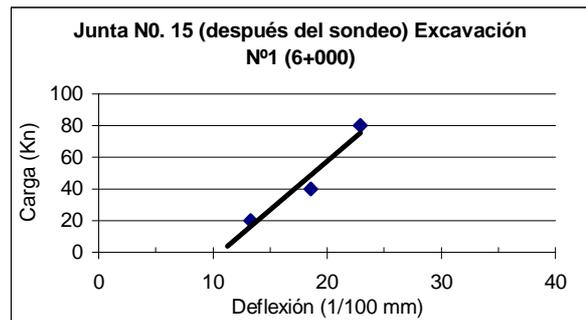
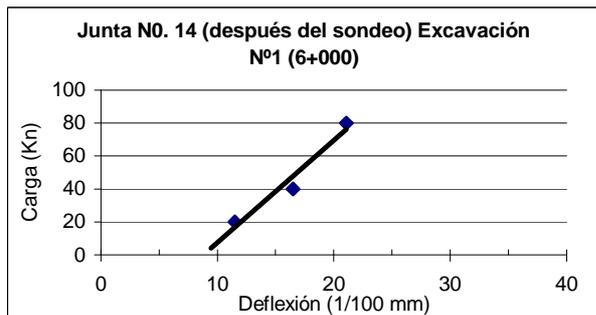
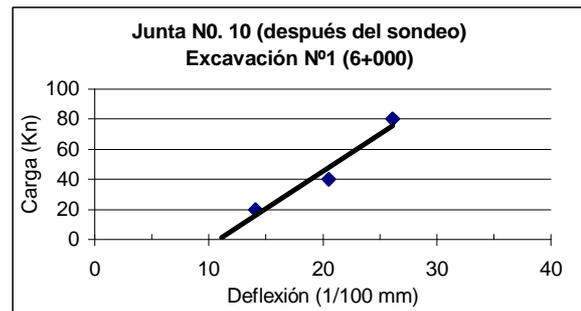
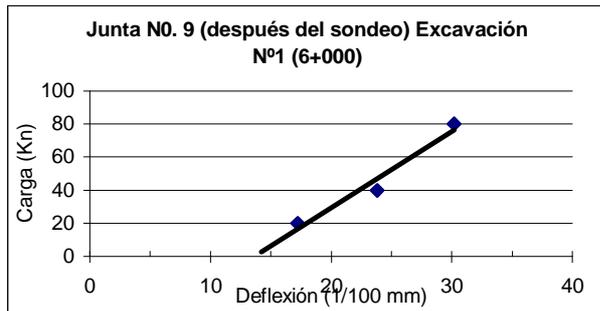
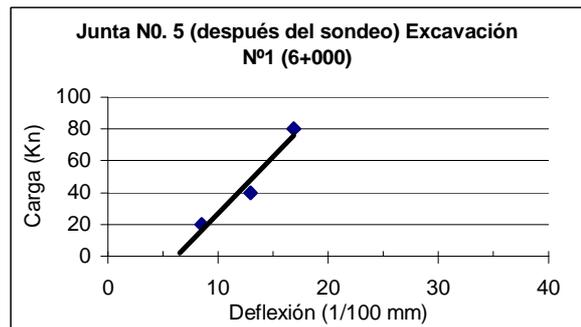
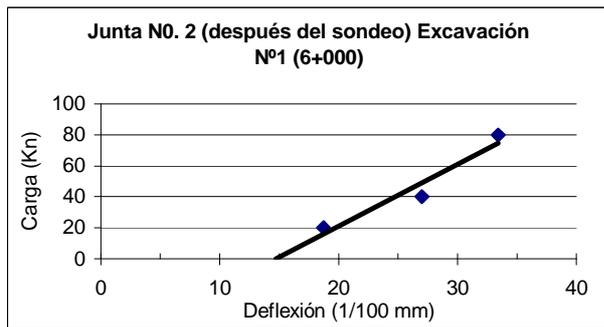


Figura N°8 (continuación): Pérdida de capacidad de soporte, excavación N°1: 6+000

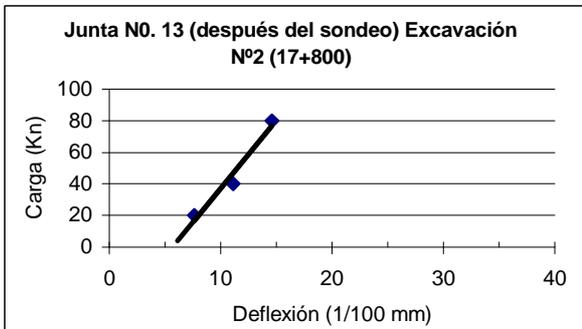
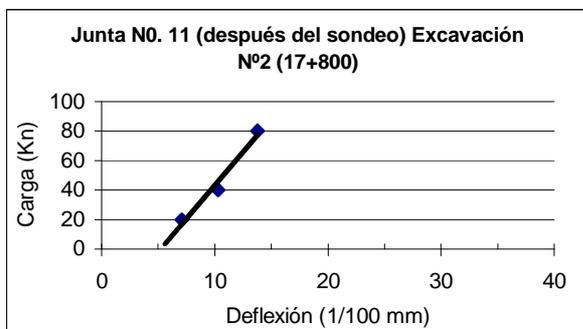
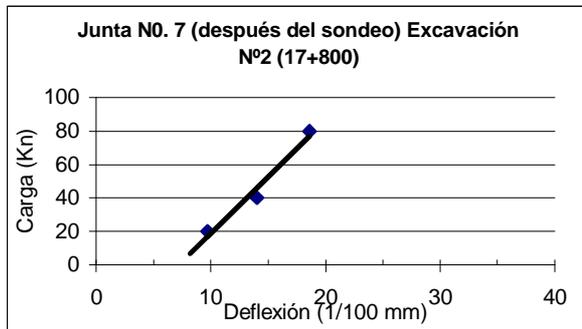
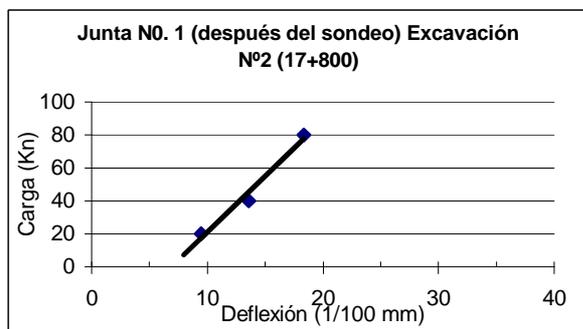
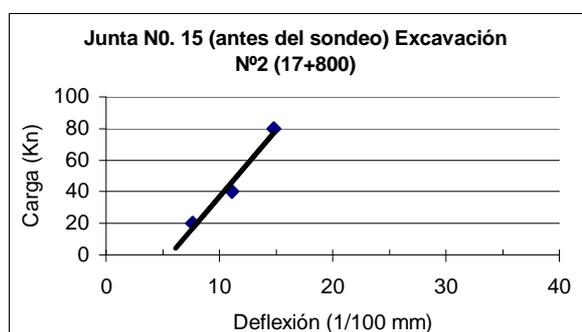
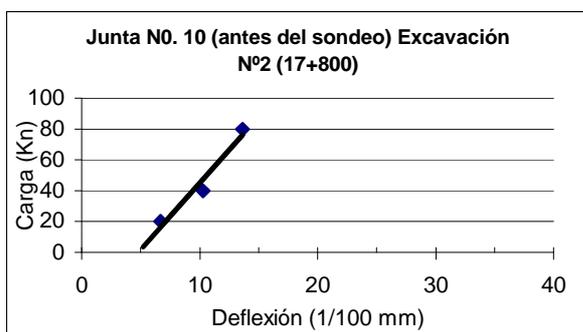
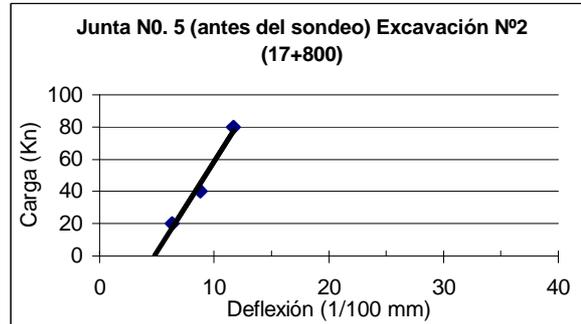
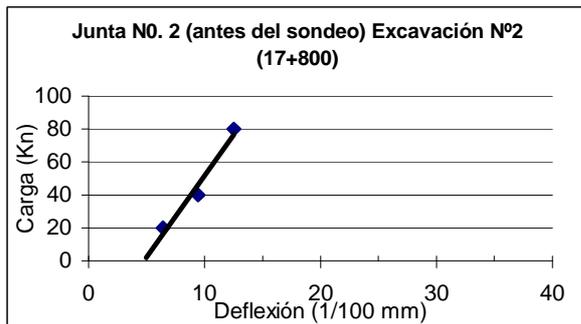


Figura N°9: Pérdida de capacidad de soporte, excavación N°2: 17+800

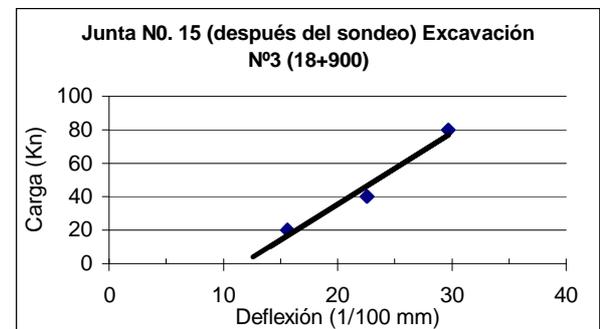
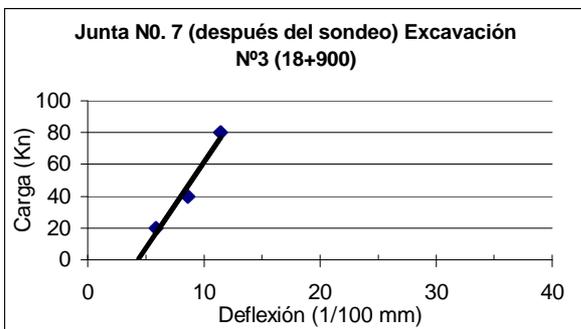
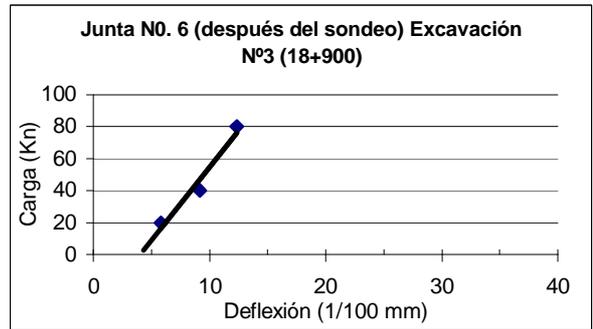
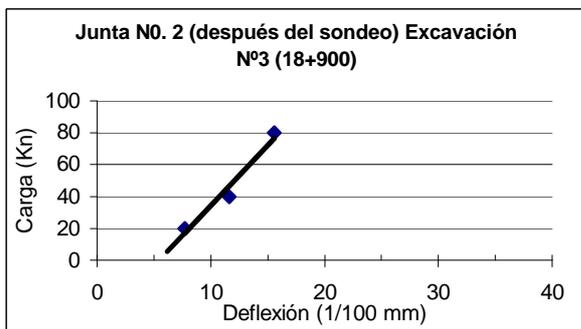
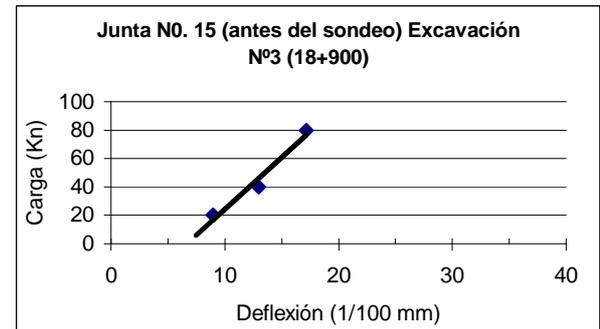
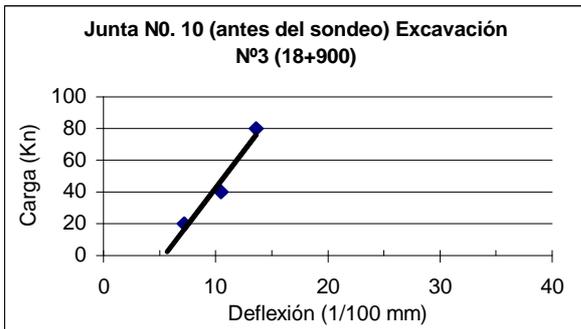
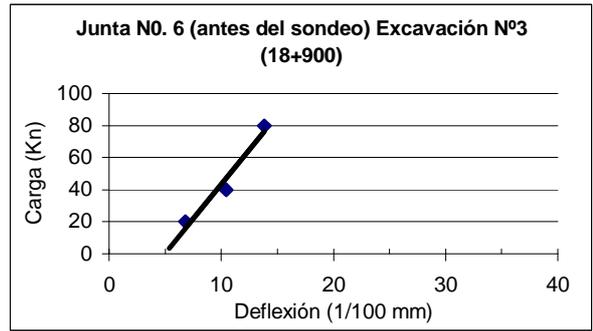
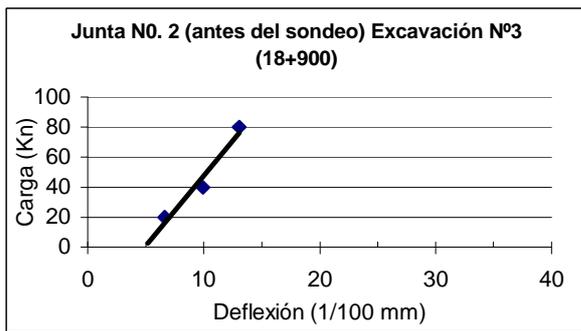


Figura N°10: Pérdida de capacidad de soporte, excavación N°3: 18+900

Análisis de resultados

El patrón de falla predominante y que presenta mayor severidad, en el pavimento rígido, corresponde a grietas longitudinales o circulares, producto de problemas geotécnicos.

En los sondeos realizados, se encontró que el material de relleno (ubicado debajo de la base estabilizada) presenta un contenido importante de material arcilloso. Son materiales que se clasifican como A-2-6 o A-6. Esto, aunado al tipo de subrasante existente, suelo arcillo con plasticidad y límite líquido altos, en la mayoría de los casos (clasificación A-6 y A-7-6); conforman un escenario apto para la presencia de cambios volumétricos en el material, que se manifiestan en fallas del pavimento.

La Tabla N°12 muestra la correlación de algunas propiedades de los suelos, con el potencial de expansión. Observando esta tabla, el material de apoyo tiene un potencial alto o muy alto de expansión.

Tabla N°12: Clasificación de suelos expansivos

Potencial de expansión	Expansión en consolidómetro, bajo presión vertical de 0.07 kg/cm ² (%)	Límite de contracción (%)	Índice de plasticidad (%)	Porcentaje de partículas menores que una micra (%)
Muy alto	> 30	< 10	> 32	> 37
Alto	20 – 30	6 – 12	23 – 45	18 – 37
Medio	10 – 20	8 – 18	12 – 34	12 – 27
Bajo	< 10	> 13	< 20	< 17

Fuente: Rico A., Castillo H.; "La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres", Volumen 2, Editorial Limusa, 1998.

Las fallas que presenta el pavimento:

- elevaciones o descensos de la superficie de rodamiento en una longitud importante,
- agrietamiento longitudinal y
- deformaciones significativas localizadas en puntos cercanos a alcantarillas;

son típicas de suelos expansivos. Estos suelos sufren contracción por secado, expansión por humedecimiento, desarrollo de presiones de expansión al estar confinados y disminución de la resistencia al esfuerzo cortante como consecuencia de la expansión.

Otros aspectos que han facilitado la rápida aparición de grietas, son la existencia de cambios de humedad (verano - invierno) y la rigidez de las capas (base estabilizada y losa) colocadas sobre estos suelos.

3 EVALUACIÓN PAVIMENTO FLEXIBLE

El pavimento flexible del proyecto Limonal - Tempisque (Ruta 18), tiene una extensión aproximada de 6.0 km. Inicia en el estacionamiento 19+200 (justo donde finaliza el pavimento rígido) y finaliza en el estacionamiento 25+200, en el Ferry a Nicoya. La intersección hacia el puente La Amistad, sobre el río Tempisque, se encuentra en el estacionamiento 23+000.

Este proyecto se construyó simultáneamente con el pavimento rígido. Consistió en la escarificación del material de base existente, la cual en algunos tramos era granular, mientras que en otros era base estabilizada. Al material escarificado se le adicionó material con el objetivo de conformar una base estabilizada BE-35 (40 kg/cm² a los 7 días) de 30 cm entre los tramos 19+200 al 23+000, y sobre ella una capa asfáltica de 6.0 cm. De la estación 23+000 al 25+200 se colocó una capa asfáltica de 3.0 cm.

Patrones de falla

El proyecto presenta dos tipos principales de falla: agrietamiento longitudinal y agrietamiento transversal, tal como se aprecia en la Figura N°11. Las grietas longitudinales se presentan en la mayor parte de proyecto, con diferentes niveles de severidad. Las grietas transversales se presentan en intervalos de 6 a 8 metros, en todo el proyecto.

Sondeos

En la parte flexible del proyecto, se realizaron tres excavaciones en el pavimento (octubre 2002) y un sondeo con SPT (ensayo de penetración normal), en enero del 2003. En la Tabla N°12 se presenta la ubicación de estos sondeos. En el Anexo 7 está la caracterización completa de los materiales encontrados, y en el Anexo 8 los resultados del ensayo con SPT.



Figura N°11 a: Grieta longitudinal



Figura N°11 b: Grieta transversal

Figura N°11: Patrones de falla, pavimento flexible.

Tabla N°12: Ubicación de los sondeos, pavimento flexible

N° Sondeo (excavación)	Estacionamiento	Sentido	Comentarios
4	19+514	Tempisque - Limonal	Excavación y SPT
5	23+300	Tempisque - Limonal	Excavación
6	23+894	Tempisque - Limonal	Excavación

Caracterización de materiales existentes

Capa asfáltica

En la Tabla N°13 aparecen los resultados de la evaluación de algunas propiedades de la mezcla asfáltica para el tramo 19+200 al 23+000.

Tabla N°13: Resultados de gravedad específica bruta, estabilidad y flujo (enero 2003)

Estacionamiento	Gravedad específica bruta	Vacíos (%)	Estabilidad (Kg)	Flujo (1/100 cm)
19+514	2.419	2.1	972	45.3
20+000	2.155	12.8	1442	28.8
20+500	2.369	4.1	1354	60.2
21+000	2.387	3.4	1127	40.4
21+500	2.399	2.9	1439	42.3
22+000	2.416	2.2	1389	91.6
22+500	2.432	1.6	1245	42.6

Promedio	2.368	4.2	1281	50.2
Desviación estándar	0.096	3.9	177	20.5

Los resultados de las evaluaciones de la mezcla asfáltica, para el tramo entre los estacionamientos 23+000 al 25+200, se muestran en las siguientes tablas.

Tabla N°14: Resultados de porcentaje de vacíos

Estacionamiento	% vacíos promedio	Desviación estándar
23+300	2.9	0.4

Tabla N°15: Resultados de resistencia retenida a la compresión uniaxial

Estacionamiento	Resistencia Retenida
19+514	92.0 %
23+300	80.8 %

Base estabilizada

En la excavación N°4 (19+514), se extrajeron tres núcleos de la base estabilizada, cuyos resultados a la compresión simple, se presentan en la Tabla N°16.

Tabla N°16: Resultados a la compresión simple (base estabilizada)

N° excavación	Estacionamiento	Núcleo	Esfuerzo (kg/cm²)
4	19+514	1	41
		2	53
		3	46

Promedio	47
Desviación Estándar	6

Materiales granulares y suelos

La caracterización completa de los materiales, se llevó a cabo mediante sondeos. La información completa se presentó en el apartado 3.2 de este documento.

Evaluación de capacidad estructural existente

Sección típica

Con base en la información recopilada en los sondeos, se determinaron las siguientes secciones típicas (ver Tabla N°17):

Tabla N°17: Secciones típicas (pavimento flexible).

Sección Típica N°	Estacionamiento	Capa asfáltica (cm)	Base estabilizada (cm)	Subbase (cm)	Relleno (cm)
1	19+200 – 23+000	5.8	30.0	-	80.0
2	23+000 – 25+200	3.5	12.5	35.0	35.0

Módulos de rigidez

A partir de los resultados del deflectómetro de impacto (octubre 2002), el pavimento flexible se separó en segmentos homogéneos, es decir, en trectos con una respuesta estructural diferenciada.

Se usaron tres parámetros de separación: la deflexión medida debajo del plato de carga (**D1**), la deflexión medida a 0.45 m del plato de carga (**D4**) y la deflexión medida a 1.80 m del plato de carga (**D9**). En el Anexo 9 se presentan los resultados del ensayo con el deflectómetro de impacto (FWD). De esta manera, los segmentos homogéneos contemplan la posibilidad de cambio por rigidez en cada una de las capas que integran la estructura del pavimento.

En la Tabla N°18 se presentan los segmentos homogéneos obtenidos con base en la deflexión **D1**. El nivel de confianza estadística para la separación es del 95%. La separación entre los puntos de medición fue de 100 m, en todos los casos.

Tabla N°18: Segmentos homogéneos con base en la deflexión debajo del plato de carga (**D1**, octubre 2002).

Segmento homogéneo	Estacionamiento		Deflexión bajo el plato de carga (mm ⁻²)	
	Inicio	Fin	Promedio	Desviación estándar
1	19+200	23+000	10.58	4.48
2	23+000	25+200	54.91	20.03

En la Tabla N°19 se presentan los segmentos homogéneos obtenidos con base en la deflexión **D4**. El nivel de confianza estadística para la separación es del 95%.

Tabla N°19: Segmentos homogéneos con base en la deflexión a 0.45 m del plato de carga (**D4**, octubre 2002).

Segmento homogéneo	Estacionamiento		Deflexión bajo el plato de carga (mm ⁻²)	
	Inicio	Fin	Promedio	Desviación estándar
1	19+200	23+000	7.97	3.74

2	23+000	24+100	29.37	8.26
3	24+100	25+200	23.86	5.14

En la Tabla N°20 se presentan los segmentos homogéneos obtenidos con base en la deflexión **D9**. El nivel de confianza estadística para la separación es del 95%.

Tabla N°20: Segmentos homogéneos con base en la deflexión a 1.8 m del plato de carga (**D9**, octubre 2002).

Segmento homogéneo	Estacionamiento		Deflexión bajo el plato de carga (mm ⁻²)	
	Inicio	Fin	Promedio	Desviación estándar
1	19+200	24+300	2.88	1.73
2	24+300	25+200	2.12	1.38

Con base en estos resultados, se plantea la separación de segmentos homogéneos con la que se realiza el estudio, ver la Tabla N°21.

Tabla N°21: Definición de segmentos homogéneos para pavimento flexible.

Segmento homogéneo	Estacionamiento		Deflexión bajo el plato de carga (mm ⁻²)	
	Inicio	Fin	Promedio	Desviación estándar
1	19+200	23+000	10.58	4.48
2	23+000	24+100	63.40	21.55
3	24+100	25+200	46.42	14.75

Una vez definidos los segmentos homogéneos, se determinaron los módulos de rigidez de las capas que forman el paquete estructural actual, aplicando la técnica de retrocálculo de módulos, y usando dos escenarios de curva deformada:

- Aquella definida por las deflexiones promedio más media desviación estándar (percentil 70).
- Aquella definida por las deflexiones promedio más una desviación estándar (percentil 85).

Los resultados se muestran en la Tabla N°22.

Tabla N°22: Módulos de rigidez retrocalculados, MPa (datos de deflexión de octubre 2002)

Tramo	Percentil 70 de deflexiones					Percentil 85 de deflexiones				
	Concreto asfáltico	Base granular	subbase	relleno	subrasante	Concreto asfáltico	Base granular	subbase	relleno	subrasante
1	3448	8276 (BE)	-	241	46	2759	5517 (BE)	-	241	46
2	2069	310	124	83	39	1724	241	124	76	32
3	1724	517	172	131	57	1379	414	138	124	53

Nota: Tramo 1: 19+200 – 23+000, Tramo 2: 23+00 – 24+100, Tramo 3: 24+100 – 25+200

BE: corresponde a una base estabilizada.

1MPa = 145 psi.

Valoración de capacidad estructural

La Tabla N°23 presenta los resultados de valoración de capacidad de carga, al considerar agrietamiento por fatiga y daño en la sub-rasante (deformación

plástica). La modelación multi-capa elástica se hizo con Everstress y con los módulos correspondientes al percentil 70 de las deflexiones.

Tabla N°23: Valoración de resistencia por criterios mecanísticos – empíricos (octubre 2002).

Tramo	Capa asfáltica		Base estabilizada con cemento			Sub-rasante	
	ϵ_t ($\times 10^{-6}$)	N_F (A)	σ_t (kg/cm^2)	σ_{resist} (kg/cm^2)	$\sigma_t/\sigma_{\text{resist}}$	ϵ_{vs} ($\times 10^{-6}$)	N_r (B)
1	-25	∞	3.45	3.6	0.96	-66	7000×10^6
2	144	7.3×10^6	-	-	-	-362	3.5×10^6
3	17	9700×10^6	-	-	-	-251	17.9×10^6

Nota: (A) Instituto del Asfalto, para un 20% del área total. (B) Instituto del Asfalto.

Tramo 1: 19+200 – 23+000, Tramo 2: 23+00 – 24+100, Tramo 3: 24+100 – 25+200

Análisis de resultados

El tramo construido con pavimento flexible, presenta un porcentaje de agrietamiento longitudinal y transversal importante. El agrietamiento longitudinal se asocia directamente con la falla del material de apoyo, que presenta altos índices de plasticidad y límites líquidos. El patrón de falla de este tramo, 19+200 al 23+000, es similar al que se observa en el tramo Puerto Moreno - Barra Honda, pero con un grado menor de severidad.

Por otra parte, el patrón de agrietamiento transversal (grietas transversales cada 6 ó 8 metros) se debe a la contracción de la base estabilizada.

4 CARGAS DE TRANSITO

A partir de la información recopilada en el Departamento de Planificación del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, se obtuvo la composición vehicular, en términos porcentuales, y el tránsito promedio diario en el año 2003. En la Tabla N°24 se presentan los factores de equivalencia utilizados para el cálculo, y en la Tabla N°25 los ejes equivalentes para períodos de diseño de 10, 15 y 20 años, con tres niveles de crecimiento: 4 %, 7% y 10%.

Tabla N°24: Ejes equivalentes por vehículo

Vehículo	Distribución vehicular (%)	Factor de carga	Ejes equivalentes por tipo de vehículo
automóviles	56.5	0.001	0.06
pick up	24.2	0.250	6.06
buses	2.9	1.100	3.20
2 ejes	7.9	1.000	7.85
3 ejes	3.2	1.600	5.14
5 ejes	5.3	2.500	13.28

Ejes equivalentes/vehículo

0.356

Tabla N°25: Crecimiento del flujo vehicular (análisis de ejes equivalentes)

Año	Tránsito promedio diario			Ejes equivalentes por vehículo	Ejes equivalentes por año			Ejes equivalentes acumulados		
	% crecimiento anual				% crecimiento anual			% crecimiento anual		
	4%	7%	10%		4%	7%	10%	4%	7%	10%
2003	1766	1766	1766	0.356	229474	229474	229474	229474	229474	229474
2004	1837	1890	1943	0.356	238653	245537	252421	468127	475011	481895
2005	1910	2022	2137	0.356	248199	262725	277664	716326	737736	759559
2006	1987	2163	2351	0.356	258127	281116	305430	974453	1018852	1064989
2007	2066	2315	2586	0.356	268452	300794	335973	1242905	1319645	1400962
2008	2149	2477	2844	0.356	279190	321849	369570	1522096	1641495	1770532
2009	2235	2650	3129	0.356	290358	344379	406527	1812454	1985873	2177059
2010	2324	2836	3441	0.356	301972	368485	447180	2114426	2354358	2624239
2011	2417	3034	3786	0.356	314051	394279	491898	2428477	2748637	3116137
2012	2514	3247	4164	0.356	326613	421879	541088	2755090	3170516	3657225
2013	2614	3474	4581	0.356	339678	451410	595197	3094768	3621926	4252422
2014	2719	3717	5039	0.356	353265	483009	654716	3448032	4104935	4907138
2015	2827	3977	5542	0.356	367395	516820	720188	3815428	4621755	5627326
2016	2941	4256	6097	0.356	382091	552997	792207	4197519	5174752	6419532
2017	3058	4554	6706	0.356	397375	591707	871427	4594894	5766458	7290960
2018	3180	4872	7377	0.356	413270	633126	958570	5008163	6399584	8249530
2019	3308	5214	8115	0.356	429801	677445	1054427	5437964	7077029	9303957
2020	3440	5578	8926	0.356	446993	724866	1159870	5884957	7801895	10463826
2021	3578	5969	9819	0.356	464872	775607	1275857	6349829	8577502	11739683
2022	3721	6387	10801	0.356	483467	829899	1403442	6833296	9407401	13143126

5 CONCLUSIONES (PENDIENTE)

- El agrietamiento anticipado que presenta el proyecto Limonal – Tempisque (el agrietamiento longitudinal o circular), tanto en la parte flexible como rígida, se deben a problemas geotécnicos. Básicamente a la presencia de material con potencial alto de expansión, en las capas de apoyo del pavimento.
- En el punto donde se realizó la excavación N°1, 6+000, se detectaron vacíos debajo de la losa.
- Ambos pavimentos, rígido y flexible, cumplen con los requerimientos de fatiga en la capa asfáltica y deformación permanente; excepto el tramo N°2 del pavimento flexible (23+000 al 24+100). Precisamente, este tramo presenta agrietamiento severo, debido en su mayoría, a fallas geotécnicas.

6 RECOMENDACIONES (PENDIENTE)

- Al tratarse de un proyecto construido y con una inversión importante, la opción de neutralización de la presión de expansión, se convierte en una opción para disminuir las consecuencias de este problema. Se puede estudiar la posibilidad de la estabilización química.
- Otra alternativa que se debe estudiar, es la reducción de cambios de humedad en el suelo activo. Hay que considerar que la mayor parte de los daños serios, en los pavimentos construidos sobre arcillas expansivas, ocurren por cambios en el contenido de agua en las partes laterales de los terraplenes. En este punto, los sub-drenajes o las cortinas, son opciones que se pueden analizar.
- Hacer un estudio detallado, para la detección de vacíos debajo de las losas.

