

ESTUDIO DE INGENIERIA FORENSE PARA EL TRAMO PUERTO MORENO – BARRA HONDA

1. OBJETIVO

Caracterizar los materiales existentes en la estructura del pavimento y determinar las principales causas de su deterioro.

2. COMPOSICIÓN DE ESTRUCTURA EXISTENTE

A continuación se caracteriza la estructura de pavimento existente a la fecha (enero 2003).

2.1 Segmentos analizados

Con base en la evaluación visual del proyecto, se seleccionaron tres tramos de análisis:

Tabla 1: Descripción de tramos de análisis

Tramo	Referencia(A)	Características (B)
1	3+630	Condición de severidad media, agrietamiento por fatiga de severidad media, deformación plástica de severidad media, rellenos de aproximadamente 1.0 m
2	4+235	Condición de severidad alta, agrietamiento por fatiga de severidad media, grietas longitudinales de hasta 5.0 cm de ancho, rellenos de 2.0 m aproximadamente.
3	12+760	Condición de severidad alta, agrietamiento por fatiga de severidad alta con presencia de grietas longitudinales.

(A) El estacionamiento está referenciado (0+000) en el Ferry (Puerto Moreno).

(B) En el anexo III presentan fotografías representativas de los tramos de análisis.

En las fotografías N°1, N°2, N°3 y N°4 se presentan los principales patrones de falla de los tramos analizados.



Figura N°1: Sección típica de tramos analizados (relleno) con presencia de grietas longitudinales.



Figura N°2: Grietas longitudinales



Figura N°3: Sección típica de tramos analizados (relleno) con presencia de grietas longitudinales y agrietamiento por fatiga.



Figura N°4: Grietas longitudinales y agrietamiento por fatiga.

En cada uno de estos tramos de análisis se realizaron ensayos con el deflectómetro de impacto (FWD) con el fin de caracterizarlos con base en su respuesta estructural. La Tabla 2 presenta los resultados para cada tramo.

Tabla 2: Deflexiones bajo el plato de carga para cada tramo de análisis

Tramo	Deflexión Promedio (1/100 mm)	Desviación estándar (1/100 mm)	Percentil 70 de deflexiones (1/100 mm)	Percentil 85 de deflexiones (1/100 mm)
1	40.0	20.0	50.0	60.0
2	38.8	12.4	45.0	51.2
3	48.6	12.6	54.9	61.2

En el Anexo II se presentan los resultados de deflectometría más detallados.

2.2 Espesores

Los espesores de capa sondeados en el 2002, se presentan en la Tabla 3. En cada tramo de análisis se realizó un sondeo.

Tabla 3: Espesores de capa (A)

Tramo (B)	Capa (cm)		
	Concreto asfáltico	Base estabilizada	Relleno
Tramo 1	4.0	13.0	90.0 (C)
Tramo 2	6.0	15.0	92.0 (C)
Tramo 3	5.0	5.5 (D)	90.0 (C)

(A) Fuente: LANAMME, UCR; Estudio de laboratorio para el Proyecto Puerto Moreno-Barra Honda, febrero del 2003.

(B) El número de tramo coincide con el número de sondeo.

(C) El sondeo se detuvo a este nivel, sin perforar la subrasante.

(D) Este espesor no es característico del tramo, con base en el retrocálculo de módulos se determinó que para el percentil 70 de las deflexiones el espesor representativo para el tramo debe ser de 8.2 cm mientras que para el percentil 85 de las deflexiones el espesor representativo debe ser de 11.4 cm.

2.3 Módulos de rigidez

Para cada tramo de análisis se determinaron los módulos de rigidez para 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 correspondientes se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Módulos de rigidez retrocalculados para el paquete estructural existente

Tramo de análisis 1							
Percentil 70 de deflexiones				Percentil 85 de deflexiones			
concreto asfáltico	base estabilizada	relleno	subrasante	concreto asfáltico	base estabilizada	relleno	subrasante
250 000	150 000	20 000	5 000	200 000	120 000	15 000	4 300

Tramo de análisis 2							
Percentil 70 de deflexiones				Percentil 85 de deflexiones			
concreto asfáltico	base estabilizada	relleno	subrasante	concreto asfáltico	base estabilizada	relleno	subrasante
300 000	160 000	16 000	4 300	250 000	120 000	15 000	4 300

Tramo de análisis 3							
Percentil 70 de deflexiones				Percentil 85 de deflexiones			
concreto asfáltico	base estabilizada	relleno	subrasante	concreto asfáltico	base estabilizada	relleno	subrasante
250 000	150 000	20 000	5 000	200 000	120 000	15 000	4 300

En el Anexo I se presentan los perfiles del pavimento para cada uno de los sondeos realizados.

2.4 Valoración de capacidad estructural.

Tabla 5: Valoración de resistencia por criterios mecánico – empíricos.

Tramo	Capa asfáltica		Base estabilizada con cemento			Subrasante	
	ϵ_t ($\times 10^{-6}$)	N_F (*)	σ_t	σ_{resist}	σ_t/σ_{resist}	ϵ_{vs} ($\times 10^{-6}$)	N_r (**)
1	-74.80	∞	78.51	400	0.196	-219.15	32.9×10^6
2	36.14	696.9×10^6	67.71	400	0.169	-213.73	36.8×10^6
3	109.99	20.9×10^6	125.63	400	0.314	-264.40	14.2×10^6

(*) PDMAP al 45% de agrietamiento.

(**) Instituto del Asfalto.

3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES EXISTENTES

3.1 Capa asfáltica

La Tabla 6 presenta los valores de gravedad específica bruta y vacíos en la mezcla obtenidos a partir de la extracción de núcleos. En la Tabla 7 se muestran los valores para los parámetros de estabilidad y flujo Marshall.

Tabla 6: Valores de gravedad específica bruta y vacíos

Tramo	Gravedad específica bruta promedio	Gravedad específica máxima teórica	% de vacíos promedio
1	2.371	-	-
2	2.296 / (0.0864)	2.443	6.0 / (3.6)
3	2.285 / (0.0318)	2.391	4.4 / (1.3)

Nota: el valor entre paréntesis corresponde a la desviación estándar

Estos resultados muestran diferencias significativas en cuanto a los vacíos en la mezcla. La Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO 1993, pp. III-53, establece un rango de variación típico de 0.75 a 1.50 % .

Tabla 7: Valores de estabilidad y flujo Marshall

Tramo	Estabilidad (Kg)	Flujo indicador (1/100 mm)
1	1603	23.4
2	290	39.7
1	2557	34.2
Promedio	1483	32.4
Desviación estándar	1138	8.3

La tabla anterior evidencia la variabilidad existente en los parámetros Marshall. La Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO 1993, pp. III-53, establece un rango de variación típico para estabilidad de 91 a 181 Kg, mientras que para flujo el rango de variación típico es de 1 a 2.

3.2 Capas estabilizadas

La Tabla 8 presenta los resultados de la prueba de compresión de núcleos

Tabla 8: Resultados de la prueba de compresión de núcleos

Tramo	Esfuerzo a compresión (kg/cm ²)
1	126
3	79

3.3 Capas granulares y suelos

En la Tabla 9 se presenta un resumen de los resultados de los ensayos de caracterización del material existente.

En este proyecto se realizaron perforaciones con el Sistema de Penetración Estándar (SPT) en cada uno de los tramos de análisis. En cada tramo se realizaron 2 perforaciones, una en la carretera y otra en el espaldón (ver Anexo III de fotografías). El resultado de los ensayos se muestran en las Tablas 10 y 11.

Es importante mencionar que el material de relleno encontrado en los Tramos 1 y 2 es similar al del Tramo 3.

Tabla 9: Resumen de resultados de sondeos para capas de pavimento existente (2002).

Punto de sondeo	Capa	Límite Líquido	Índice Plástico	% de Humedad	% Ag. Pas. No. 4	% Ag. Pas. No. 200	Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO
Tramo 1	sub-rasante relleno							
Tramo 2	sub-rasante relleno	47.2%	25.4%		91	74	CL	A - 7 - 6
Tramo 3	sub-rasante relleno	48.8%	21.0%		100	92	CL	A - 7 - 6
		37.2%	15.2%	15.1%	42	13	GC	A - 1 a

Tabla 10 (continuación): Resumen de resultados de sondeos bajo pavimento existente (2003)

Tramo	Profundidad (*)	N _{SPT}	Límite Líquido	Índice Plástico	% de Humedad	Clasificación SUCS	% Ag. Pas. No. 4	% Ag. Pas. No. 200	Resistencia a la compresión simple (Kpa) (**)	Clasificación AASHTO	Índice de grupo AASHTO	Angulo de fricción interna (φ _{cd}) (***)
	0.00 - 0.50 m	X										
	0.50 - 1.00 m	23	31.7%	13.3%	18.3%	CL	80	50	322	A - 6	4.05	30.0 a 33.0
	1.00 - 1.50 m	16			18.5%		90	60	224			
	1.50 - 2.00 m	12	55.5%	31.1%	19.9%	CH	79	59	168	A - 7 - 6	14.72	22.0 a 27.0
3	2.00 - 2.50 m	16	59.2%	33.6%	30.6%	CH	100	97	224	A - 7 - 6	19.8	23.0 a 27.0
	2.50 - 3.00 m	15	52.1%	29.4%	32.9%	CH	100	92	210	A - 7 - 6	18	24.5 a 28.0
	3.00 - 3.50 m	X										
	3.50 - 4.00 m	X										
	4.00 - 4.50 m	X										

(*) Profundidad 0.00 m a nivel de sub-rasante.

(**) $q_u = k N_{70}$; usando $k = 12$, de acuerdo con Bowles, Joseph E., Foundation Analysis & Design.

(***) De acuerdo con correlaciones de Kenney (1959) y WES (1962), según Army Corps of Engineers.

Tabla 11 (continuación): Resumen de resultados de sondeos en la base del talud lateral (2003).

Tramo	Profundidad (*)	N _{SPT}	Límite Líquido	Índice Plástico	% de Humedad	Clasificación SUCS	% Ag. Pas. No. 4	% Ag. Pas. No. 200	Resistencia a la compresión simple (Kpa) (**)	Clasificación AASHTO	Índice de grupo AASHTO	Angulo de fricción interna (ϕ_{cd}) (***)
	0.00 - 0.50 m	13	49.4%	24.4%	17.1%	CH			182			30.0 a 33.0
	0.50 - 1.00 m	10	55.9%	31.8%	25.3%	CH			140			22.0 a 27.0
	1.00 - 1.50 m	7	50.9%	29.3%	29.7%	CH	99	93	98	A - 7 - 6	17.8	28.0 a 31.5
	1.50 - 2.00 m	7	46.4%	28.5%	30.4%	CL	100	90	98	A - 7 - 6	16.8	28.0 a 31.5
P7	2.00 - 2.50 m	10	48.5%	31.5%	36.9%	CL	99	95	140	A - 7 - 6	17.8	22.0 a 27.0
	2.50 - 3.00 m	10	86.0%	69.4%	35.6%	CH	100	94	140	A - 7 - 6	20	18.0 a 22.0
	3.00 - 3.50 m	13	63.9%	45.5%	24.4%	CH	99	78	182	A - 7 - 6	20	21.0 a 25.5
	3.50 - 4.00 m	19	91.7%	69.7%	24.6%	CH	98	70	266	A - 7 - 6	18.5	18.0 a 22.0
	4.00 - 4.50 m	X										

(*) Profundidad 0.00 m a nivel de sub-rasante.

(**) $q_u = k N_{70}$; usando $k = 12$, de acuerdo con Bowles, Joseph E., Foundation Analysis & Design.

(***) De acuerdo con correlaciones de Kenney (1959) y WES (1962), según Army Corps of Engineers.

RESULTADOS HASTA EL MOMENTO:

- Capa de base estabilizada de alta rigidez, pero fracturada (aparenta funcionar a partir de bloques independientes).
- Material de relleno de baja resistencia a la deformación plástica; sin embargo, no es arcilloso.
- Existencia de materiales arcillosos, de baja resistencia a la compresión, probablemente consolidados a lo largo del tiempo, en la estructura de sub-rasante (hasta 4.50 m de profundidad).
- Diferencial de humedad de sitio al contrastar el talud con la estructura de sub-rasante.

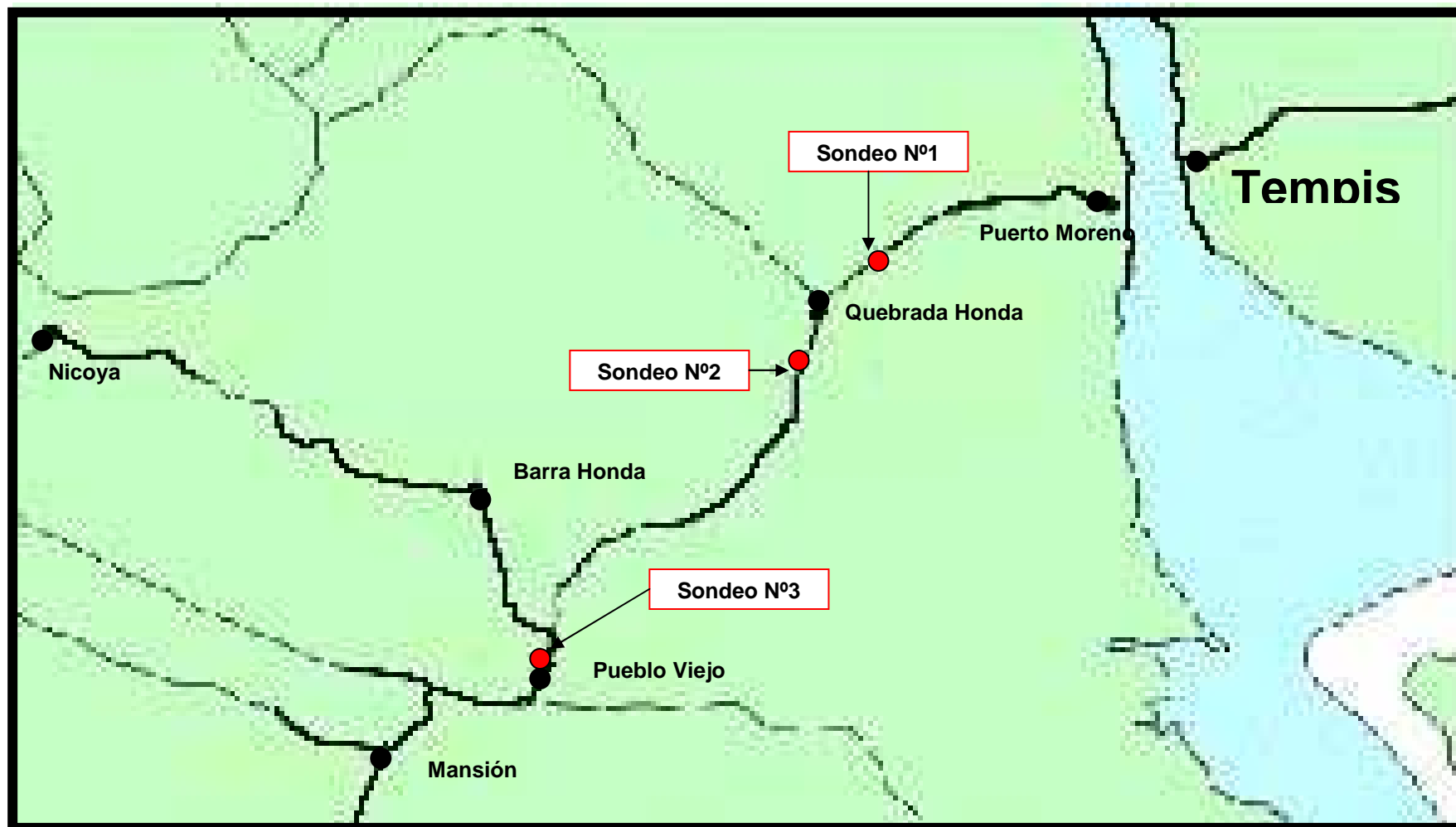


Figura N°3: Esquema de puntos de estudio en campo, Puerto Moreno – Barra Honda

ANEXO I

Perfiles del pavimento (sondeos a cielo abierto)

ANEXO II

Deflectometría de impacto (FWD)

ANEXO III

Materiales en pavimento existente

Tabla A1: Resultados de ensayos para granulometría de subrasante (2002)

Abertura (mm)	% Pasando (*)	
	EXC - 6	EXC - 7
50.8	100	100
38.1	100	100
25.4	100	100
19.0	100	100
9.5	97	100
No. 4	91	100
No. 10	89	100
No. 40	86	100
No. 200	74	92

(*) Por peso del material

Tabla A2: Resultados de ensayos de límites de Atterberg, Proctor y CBR para subrasante (2002)

Propiedad	Sondeos	
	EXC - 6	EXC - 7
Límite líquido	47.2%	48.8%
Índice de plasticidad	25.4%	21.0%
Densidad Máxima (*)	-	1466 kg/m ³
CBR 0.1* laboratorio	-	3.2%
CBR 0.2* laboratorio	-	4.2%
Humedad de sitio	-	-

(*) Ensayo Proctor estándar

Tabla A3: Clasificación para materiales de sub-rasante (2002)

Clasificación	Sondeos	
	EXC - 6	EXC - 7
SUCS	CL	CL
AASHTO	A - 7 - 6	A - 7 - 6

Tabla A4: Resultados de ensayos para granulometría de relleno (2002)

Abertura (mm)	% Pasando (*)
	EXC - 7
50.8	90
38.1	87
25.4	81
19.0	75
9.5	58
No. 4	42
No. 10	31
No. 40	19
No. 200	13

(*) Por peso del material

Tabla A5: Resultados de ensayos de límites de Atterberg, Proctor y CBR para relleno (2002)

Propiedad	Sondeos
	EXC - 7
Límite líquido	33.7%
Índice de plasticidad	15.2%
Densidad Máxima (*)	1792 kg/m ³
CBR 0.1* laboratorio	56.5%
CBR 0.2* laboratorio	68.5%
Humedad de sitio	15.1%

(*) Ensayo Proctor estándar

Tabla A6: Clasificación para materiales granulares y suelos para relleno (2002)

Clasificación	Sondeos
	EXC - 7
SUCS	GC
AASHTO	A - 1 a

Tabla A7: Resultados de granulometría en sondeos bajo pavimento existente (2003)

Abertura (mm)	% Pasando (*)												
	P5							P6					
	0.0-0.5 m	0.5-1.0 m	1.0-1.5 m	1.5-2.0 m	2.0-2.5 m	2.5-3.0 m	3.0-3.5 m	0.0-0.5 m	0.5-1.0 m	1.0-1.5 m	1.5-2.0 m	2.0-2.5 m	2.5-3.0 m
50.8	100	100	100	100	100	100	100		100	100	100	100	100
38.1	100	100	100	100	100	100	100		100	100	100	100	100
25.4	100	100	100	100	100	100	100		100	100	100	100	100
19.0	100	100	100	100	100	100	100		100	100	100	100	100
9.5	79	100	100	100	100	99	98		65	100	100	100	99
No. 4	70	100	99	100	100	99	97		47	100	100	99	83
No. 10	56	99	99	100	100	99	97		37	99	99	95	87
No. 40	40	99	97	99	99	98	96		25	93	98	89	80
No. 200	31	92	86	92	95	96	92		19	89	91	76	62

(*) Por peso de material.

Tabla A7 (continuación): Resultados de granulometría en sondeos bajo pavimento existente (2003)

Abertura (mm)	% Pasando (*)						
	P6		P7				
	3.0-3.5 m	3.5-4.0 m	0.5-1.0 m	1.0-1.5 m	1.5-2.0 m	2.0-2.5 m	2.5-3.0 m
50.8	100	100	100	100	100	100	100
38.1	100	100	100	100	100	100	100
25.4	100	100	100	100	100	100	100
19.0	100	100	100	100	100	100	100
9.5	98	100	86	98	82	100	100
No. 4	92	96	80	90	79	100	100
No. 10	85	92	74	84	75	100	100
No. 40	74	85	61	73	70	100	99
No. 200	59	79	50	60	59	97	92

(*) Por peso de material.

Tabla A8: Resultados de granulometría en la base del talud lateral (2003).

Abertura (mm)	% Pasando (*)													
	P5							P6						
	0.0-0.5 m	0.5-1.0 m	1.0-1.5 m	1.5-2.0 m	2.0-2.5 m	2.5-3.0 m	3.0-3.5 m	0.0-0.5 m	0.5-1.0 m	1.0-1.5 m	1.5-2.0 m	2.0-2.5 m	2.5-3.0 m	
50.8		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
38.1		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
25.4		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
19.0		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
9.5		100	100	100	100	100	100	100	100	93	99	100		
No. 4		100	100	100	98	100	99	98	97	88	95	97		
No. 10		100	100	100	93	100	95	97	92	81	88	91		
No. 40		96	99	95	89	97	90	95	87	72	81	83		
No. 200		73	88	86	84	86	79	87	73	58	63	74		

(*) Por peso de material.

Tabla A8 (continuación): Resultados de granulometría en la base del talud lateral (2003).

Abertura (mm)	% Pasando (*)									
	P6		P7							
	3.0-3.5 m	3.5-4.0 m	0.0-0.5 m	0.5-1.0 m	1.0-1.5 m	1.5-2.0 m	2.0-2.5 m	2.5-3.0 m	3.0-3.5 m	3.5-4.0 m
50.8	100	100			100	100	100	100	100	100
38.1	100	100			100	100	100	100	100	100
25.4	100	100			100	100	100	100	100	100
19.0	100	100			100	100	100	100	100	100
9.5	100	100			100	100	100	100	100	100
No. 4	99	99			99	100	99	100	99	98
No. 10	98	98			99	100	99	99	98	96
No. 40	95	97			99	100	98	98	91	87
No. 200	92	93			93	90	95	94	78	70

(*) Por peso de material.

Tabla A9: Resultados de límites de Atterberg y humedad de sitio en sondeos bajo pavimento existente (2003).

Propiedad	Sondeos												
	P5							P6					
	0.0-0.5 m	0.5-1.0 m	1.0-1.5 m	1.5-2.0 m	2.0-2.5 m	2.5-3.0 m	3.0-3.5 m	0.0-0.5 m	0.5-1.0 m	1.0-1.5 m	1.5-2.0 m	2.0-2.5 m	2.5-3.0 m
Límite líquido		42.3	47.9%	52.4%	59.4%	75.5%	65.6%		42.1%		81.3%	50.4%	34.9%
Índice de plasticidad		21.9%	23.1%	27.5%	38.1%	53.3%	42.0%		16.8%		59.7%	18.3%	14.3%
Humedad de sitio	14.3%	31.5%	26.7%	29.5%	31.3%	32.3%	30.7%	19.9%	36.5%	27.0%	22.6%	20.0%	23.9%

Tabla A9 (continuación): Resultados de límites de Atterberg y humedad de sitio en sondeos bajo pavimento existente (2003).

Propiedad	Sondeos				
	P7				
	0.5-1.0 m	1.0-1.5 m	1.5-2.0 m	2.0-2.5 m	2.5-3.0 m
Límite líquido					
Índice de plasticidad					
Humedad de sitio	18.3%	18.5%	19.9%	30.6%	32.9%

Tabla A10: Resultados de límites de Atterberg y humedad de sitio en sondeos en la base del talud lateral (2003).

Propiedad	Sondeos												
	P5							P6					
	0.0-0.5 m	0.5-1.0 m	1.0-1.5 m	1.5-2.0 m	2.0-2.5 m	2.5-3.0 m	3.0-3.5 m	0.0-0.5 m	0.5-1.0 m	1.0-1.5 m	1.5-2.0 m	2.0-2.5 m	2.5-3.0 m
Límite líquido		48.7%	55.1%		68.3%		50.2%						81.3%
Índice de plasticidad		21.6%	13.7%		20.0%		16.3%						21.3%
Humedad de sitio	16.5%	22.2%	25.0%	33.0%	30.2%	31.0%	24.0%	21.6%	18.8%	19.7%	22.3%	24.3%	31.7%

Tabla A10 (continuación): Resultados de límites de Atterberg y humedad de sitio en sondeos en la base del talud lateral (2003).

Propiedad	Sondeos							
	P7							
	0.0-0.5 m	0.5-1.0 m	1.0-1.5 m	1.5-2.0 m	2.0-2.5 m	2.5-3.0 m	3.0-3.5 m	3.5-4.0 m
Límite líquido								
Índice de plasticidad								
Humedad de sitio	17.1%	25.3%	29.7%	30.4%	36.9%	35.6%	24.4%	24.6%