

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA

IV ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS
Y ESTRUCTURAS
FORO INTERNACIONAL SOBRE MICROZONIFICACION SISMICA

PUENTE DE TERCER NIVEL CALLE 92

Germán Escobar y Julio Moya

BOGOTA D. C.

Mayo 3, 4 y 5 de 2006

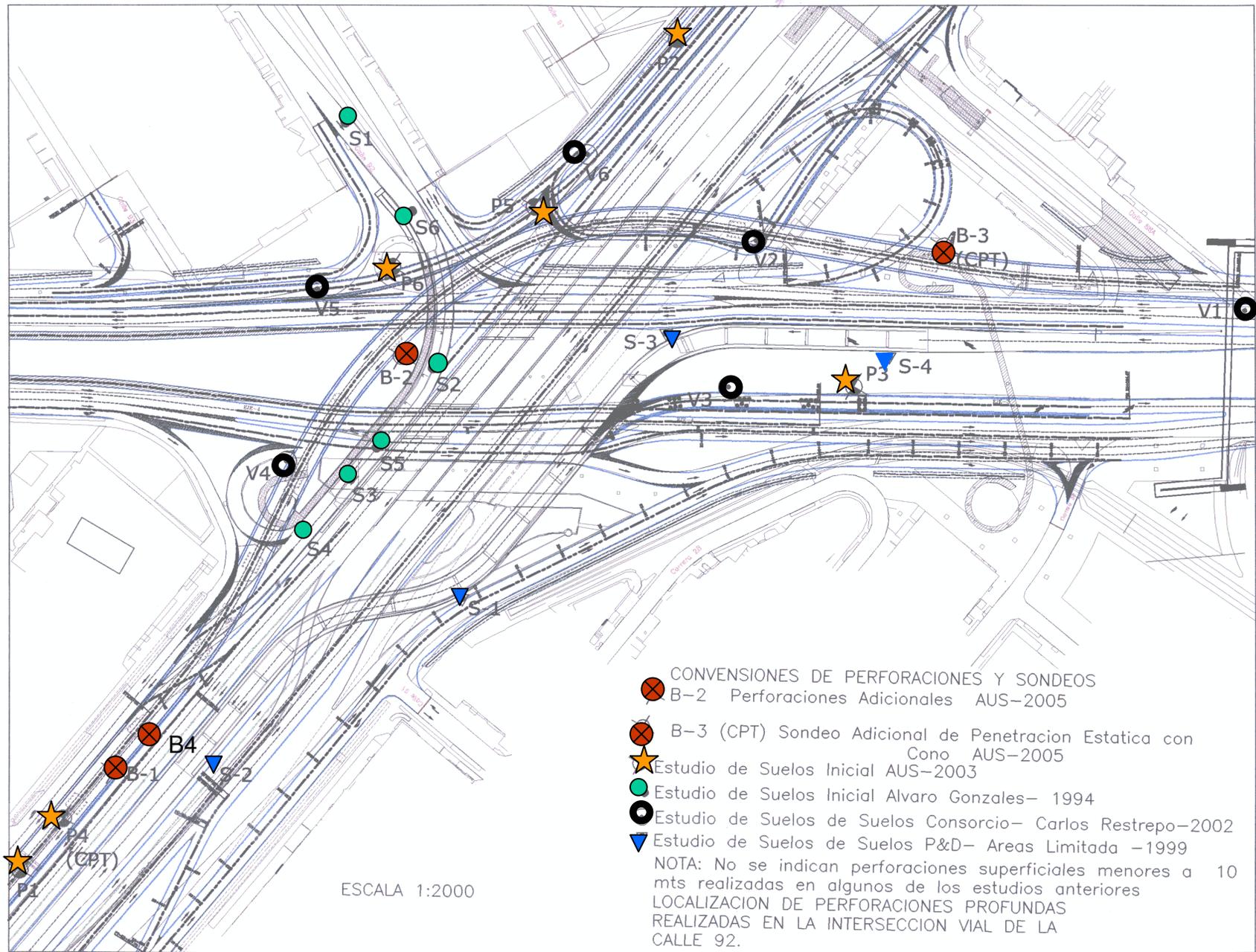


Figura 1

PLANTA

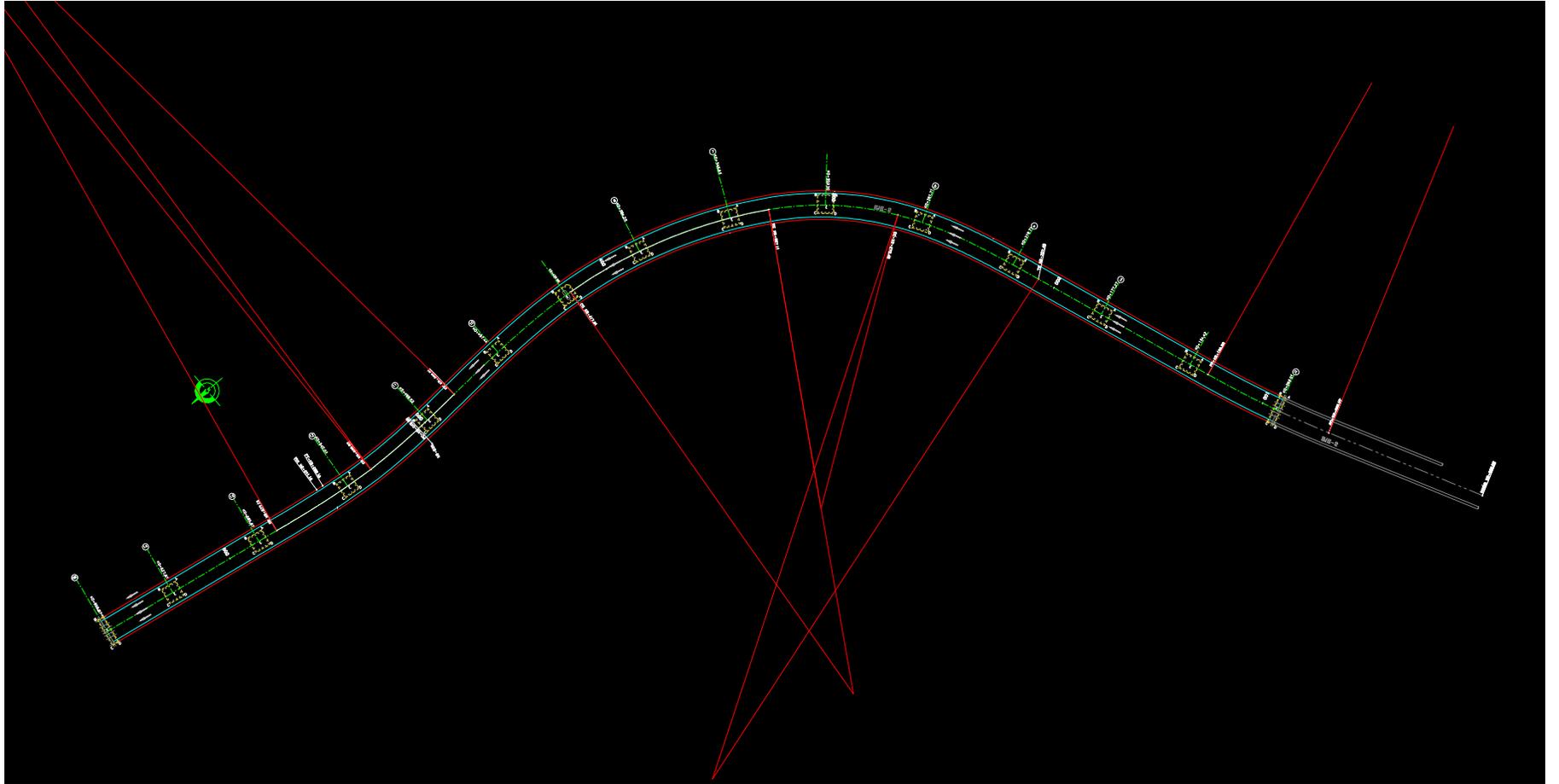


Figura 2

PERALTE



Figura 3

ELEVACION

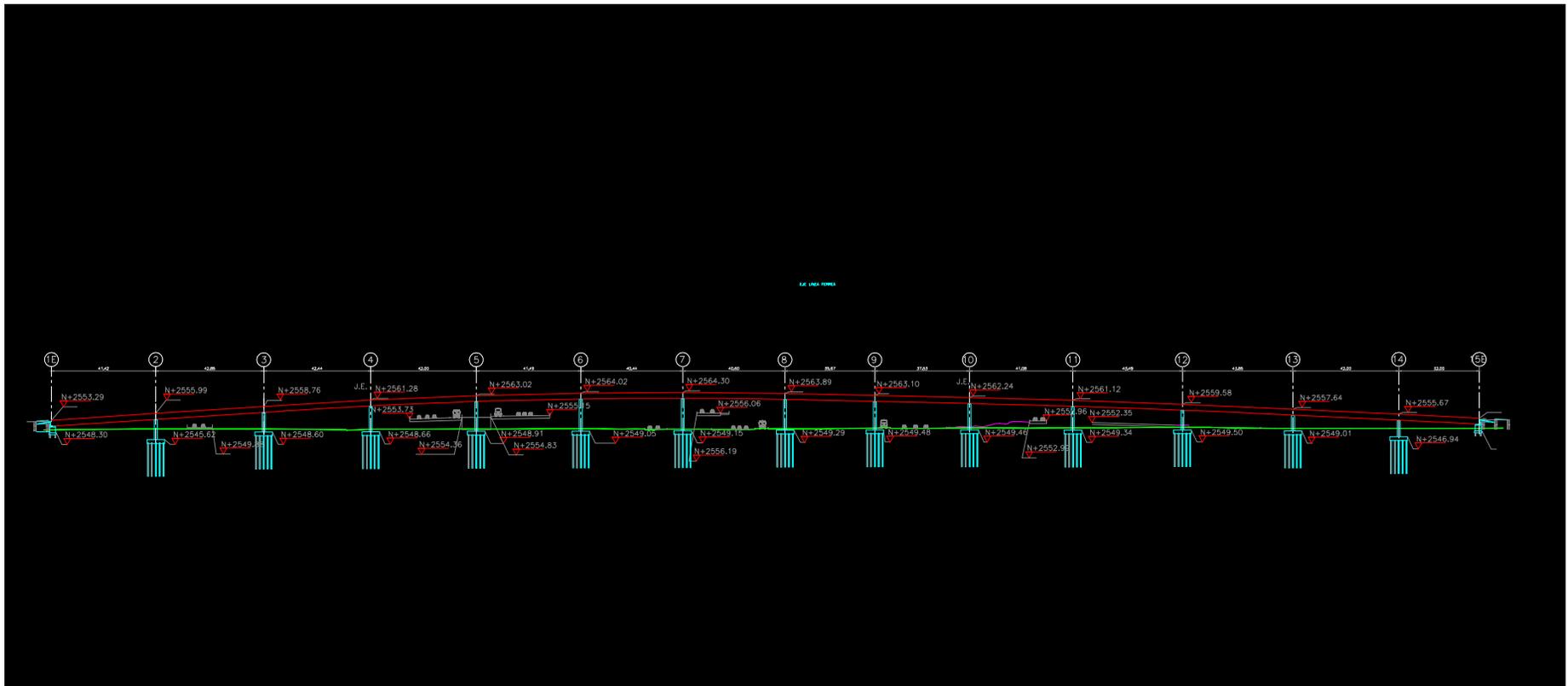


Figura 4

SECCION TIPICA



Figura 5

CAJON EN ACERO

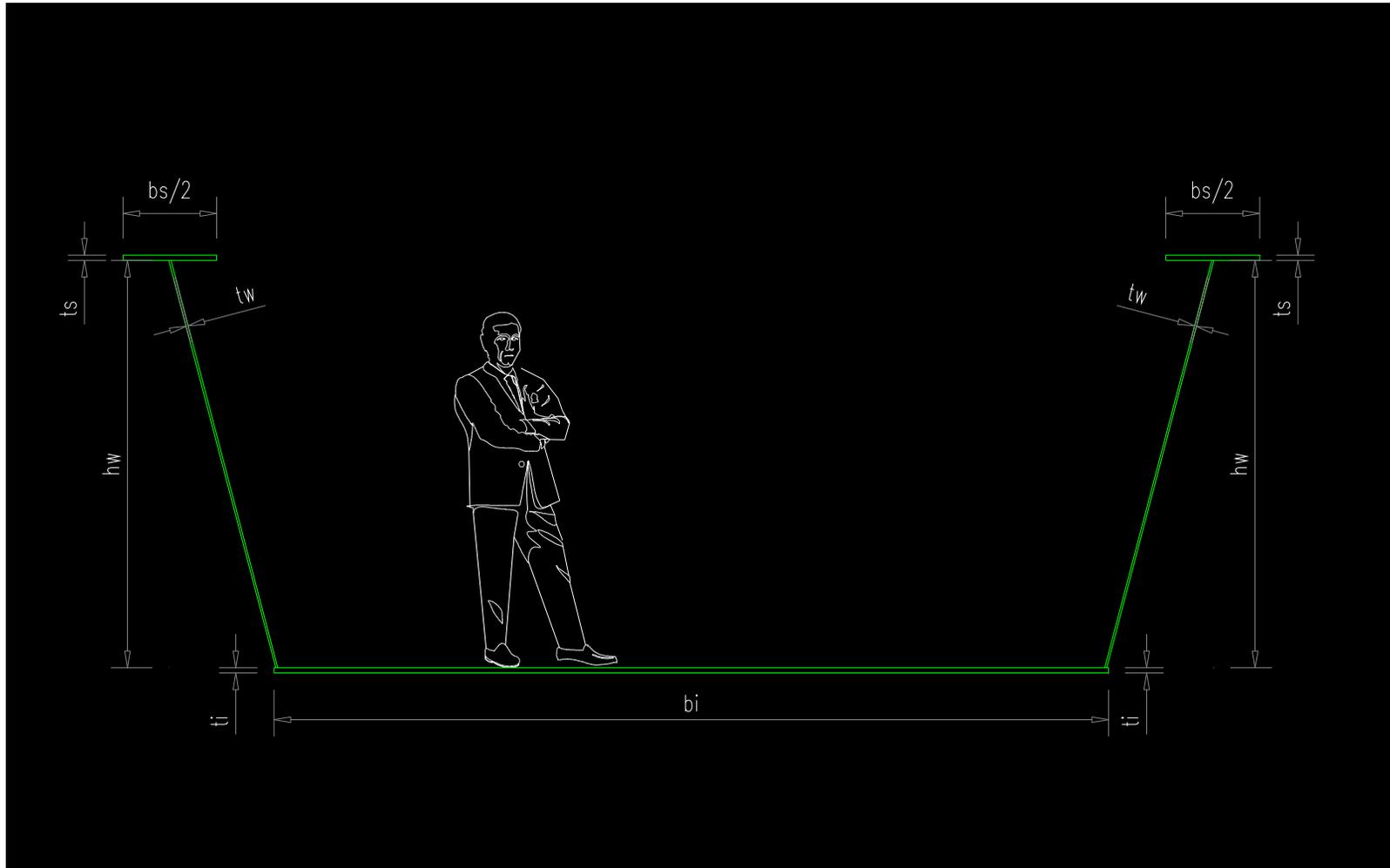


Figura 6



Figura 7



Figura 8

REFUERZO PASIVO LOSA

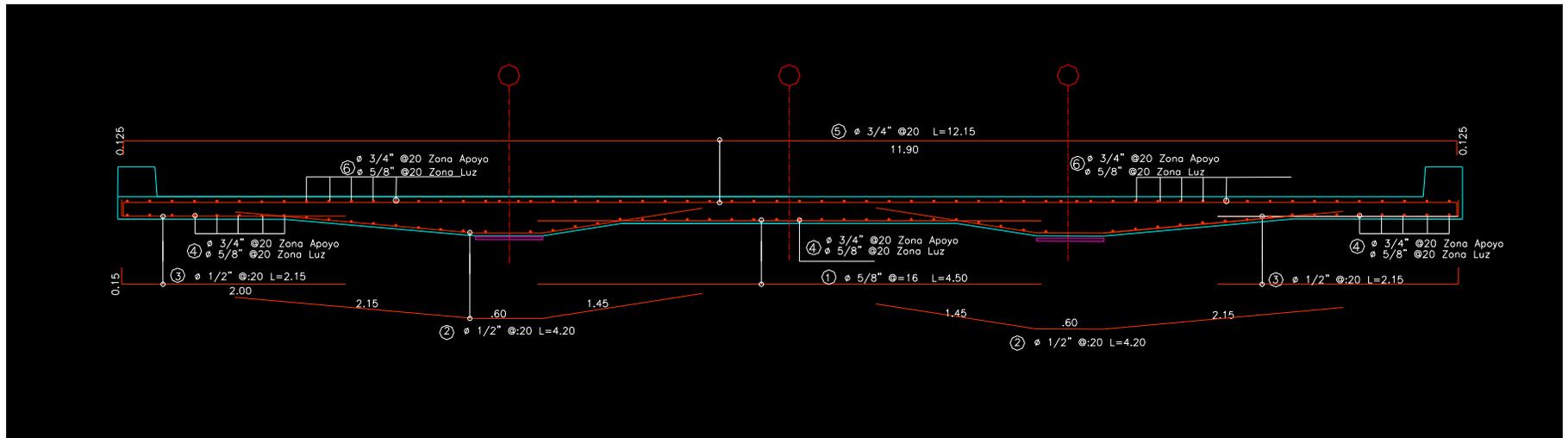


Figura 9



Figura 10

TRAZADO DE CABLES

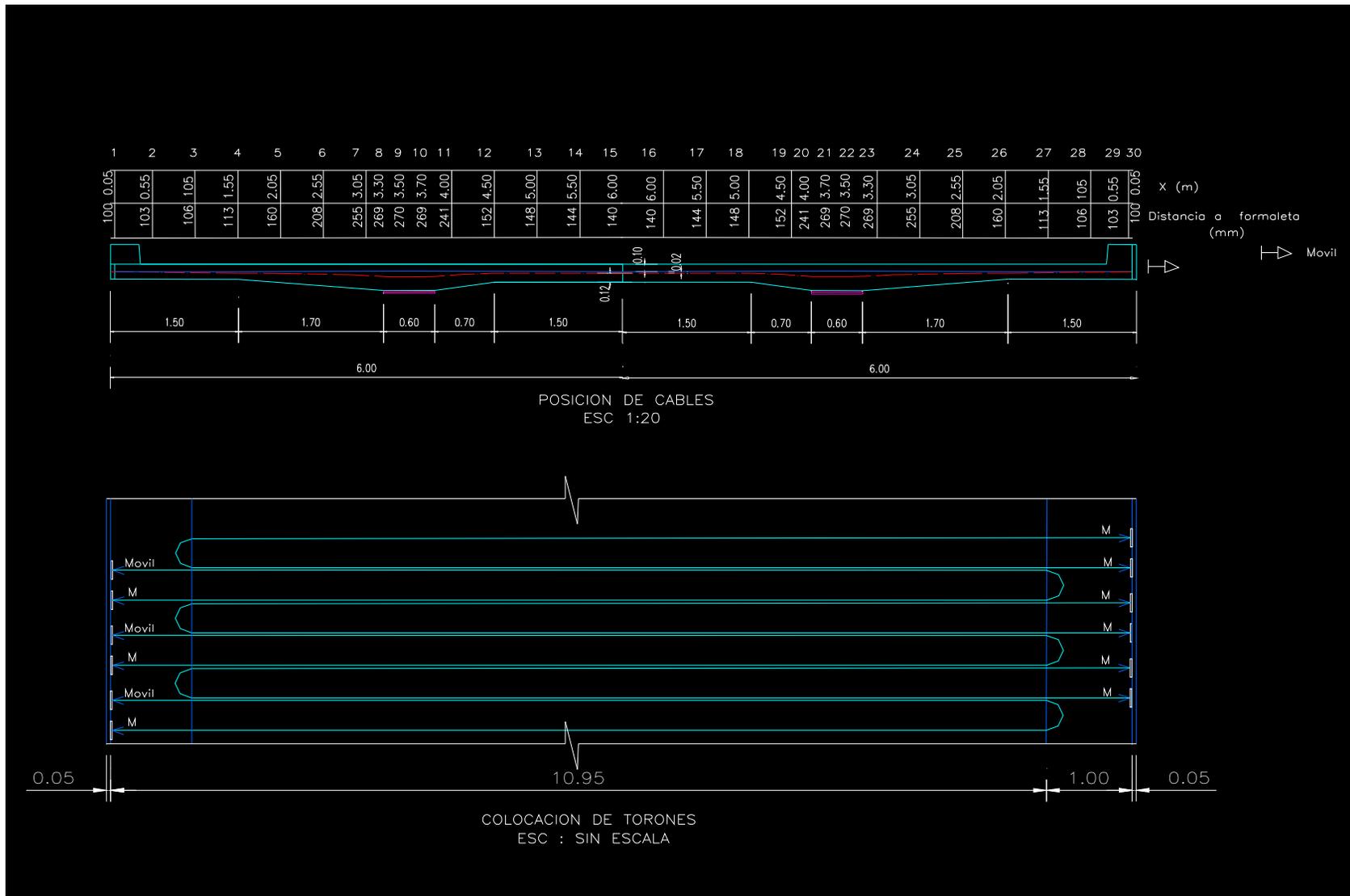


Figura 11



Figura 12

PILA TIPICA

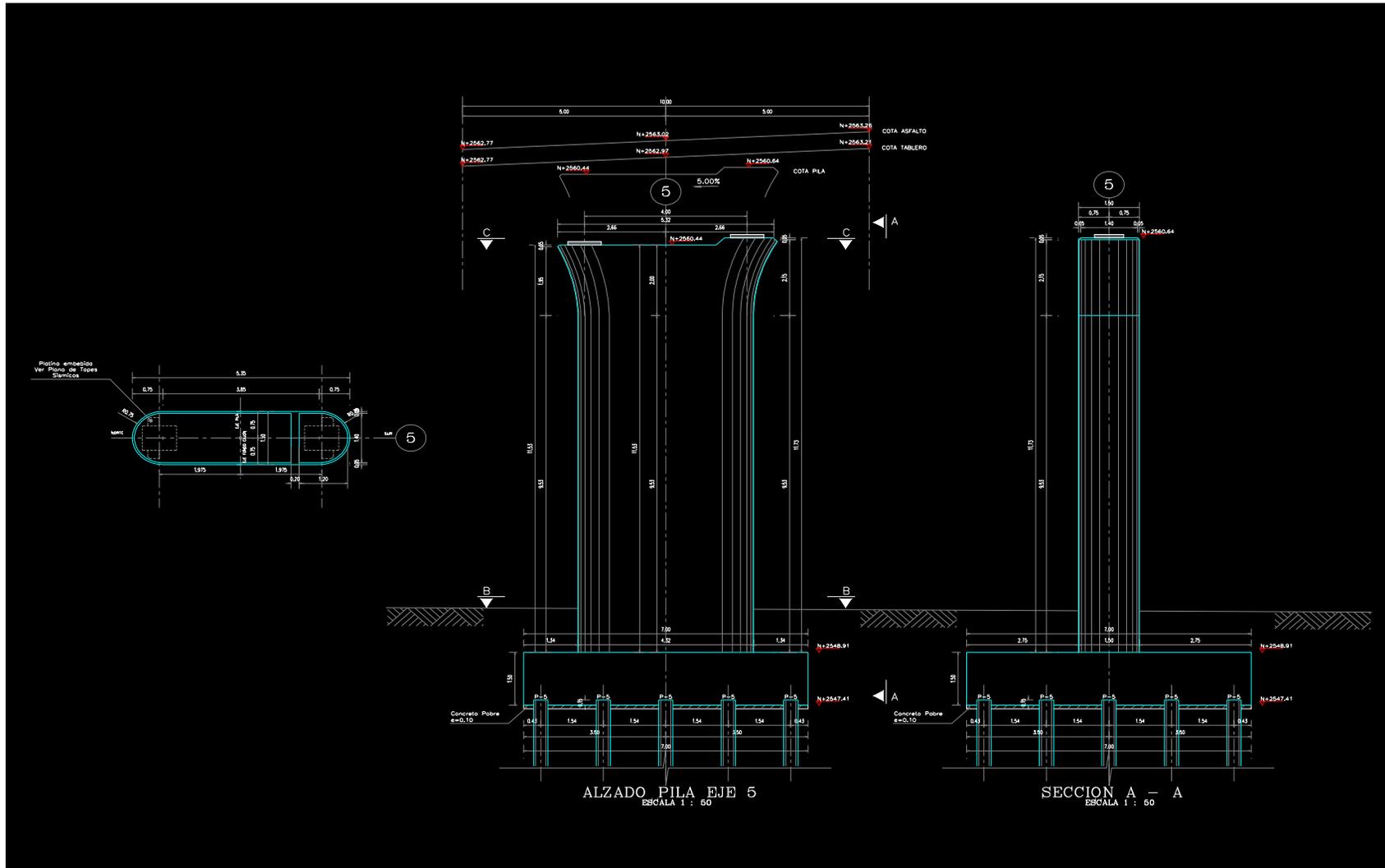


Figura 13



Figura 14



Figura 15

PILA 6 EXCENTRICA

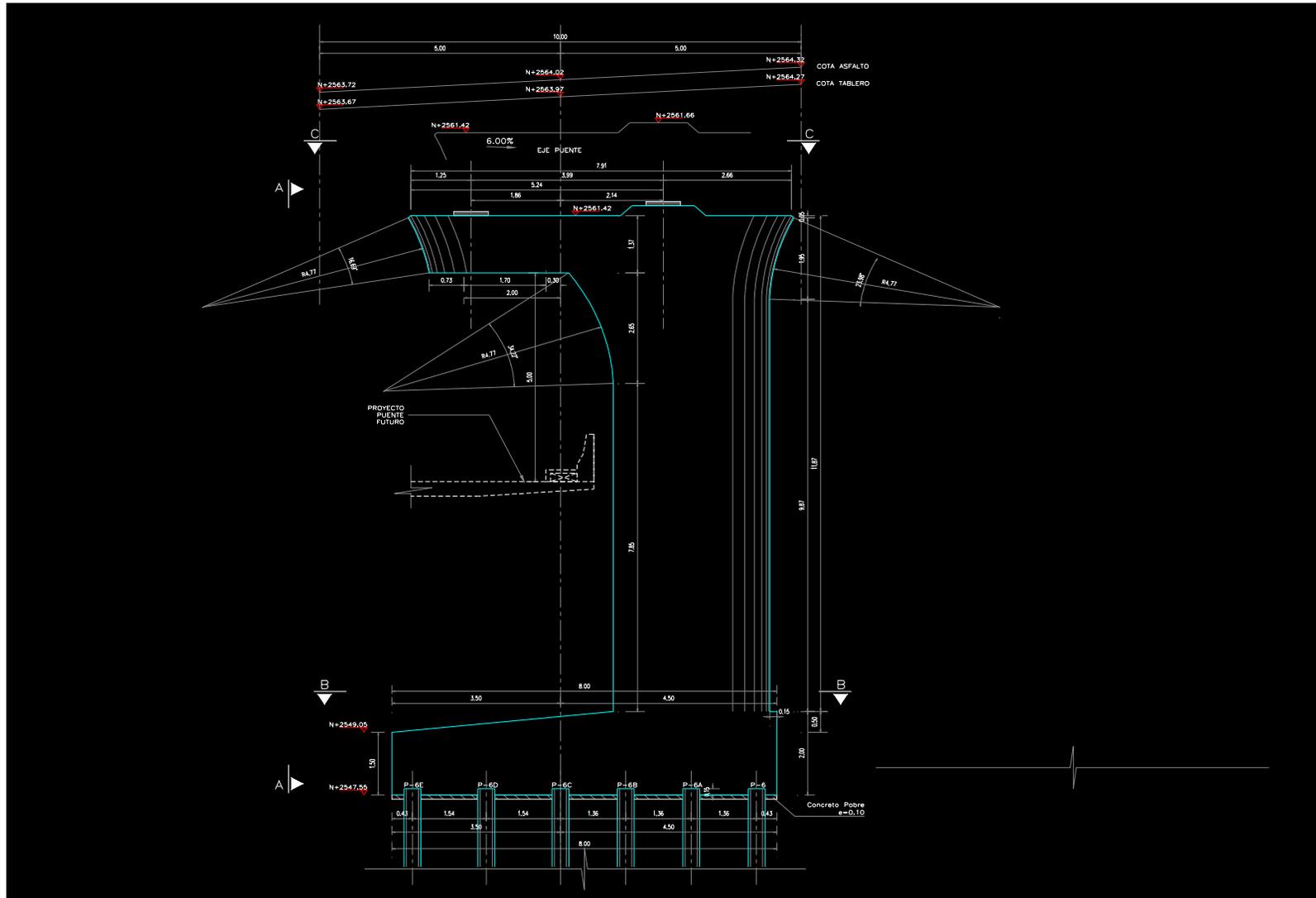


Figura 16



Figura 17

REFUERZO PILA 6

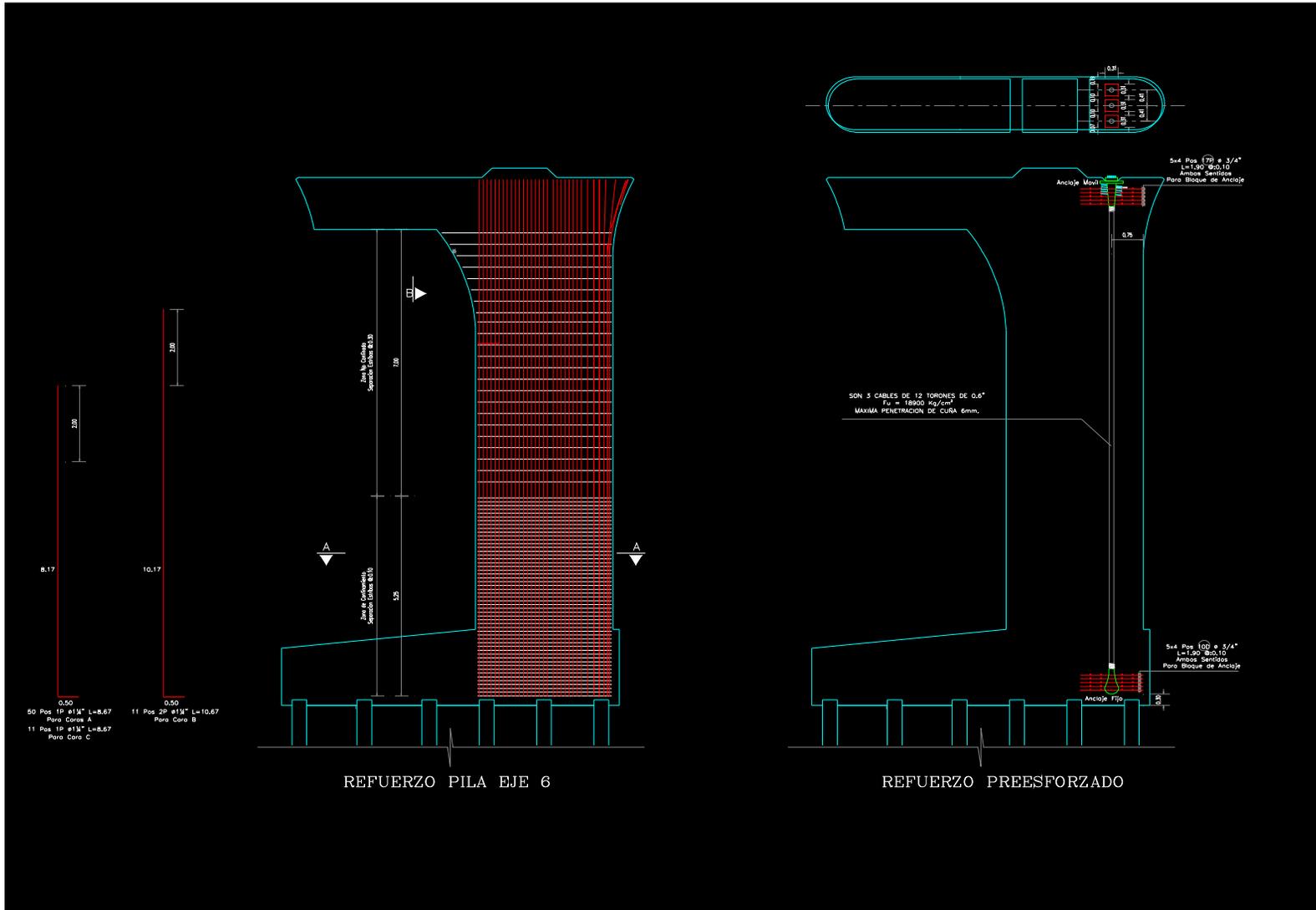


Figura 18



Figura 19

DADO PILA 6 REFUERZO 1

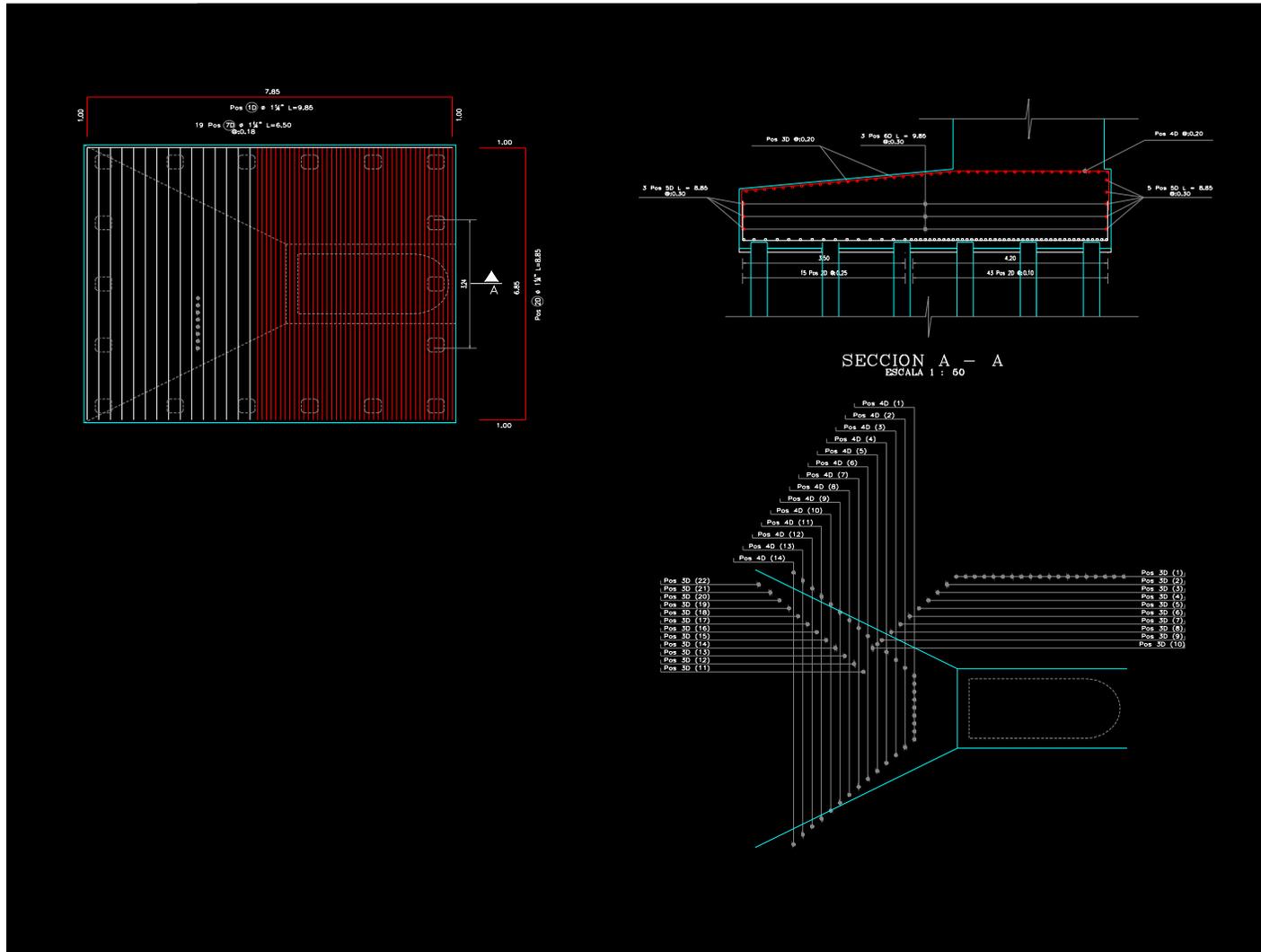


Figura 20

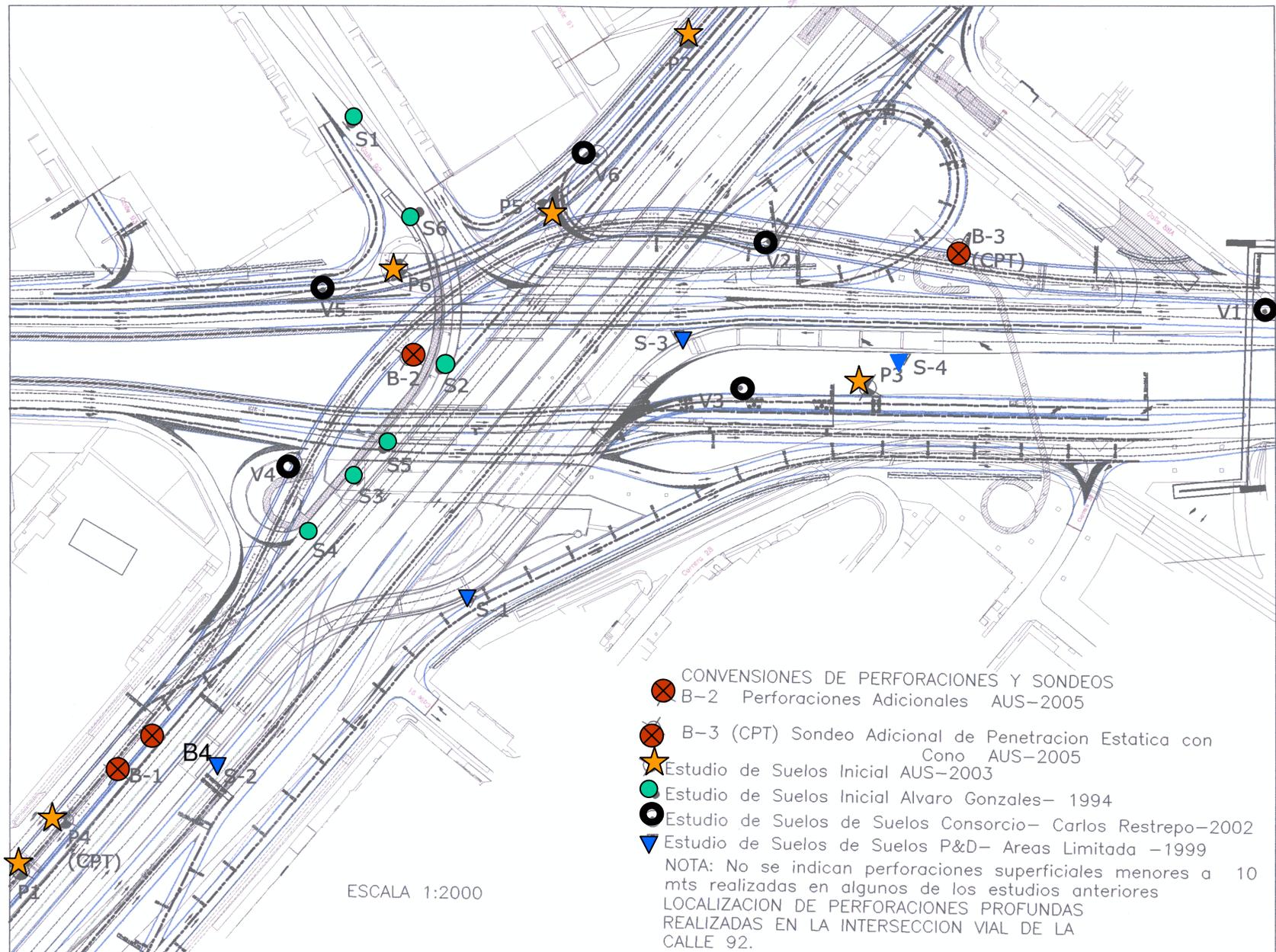
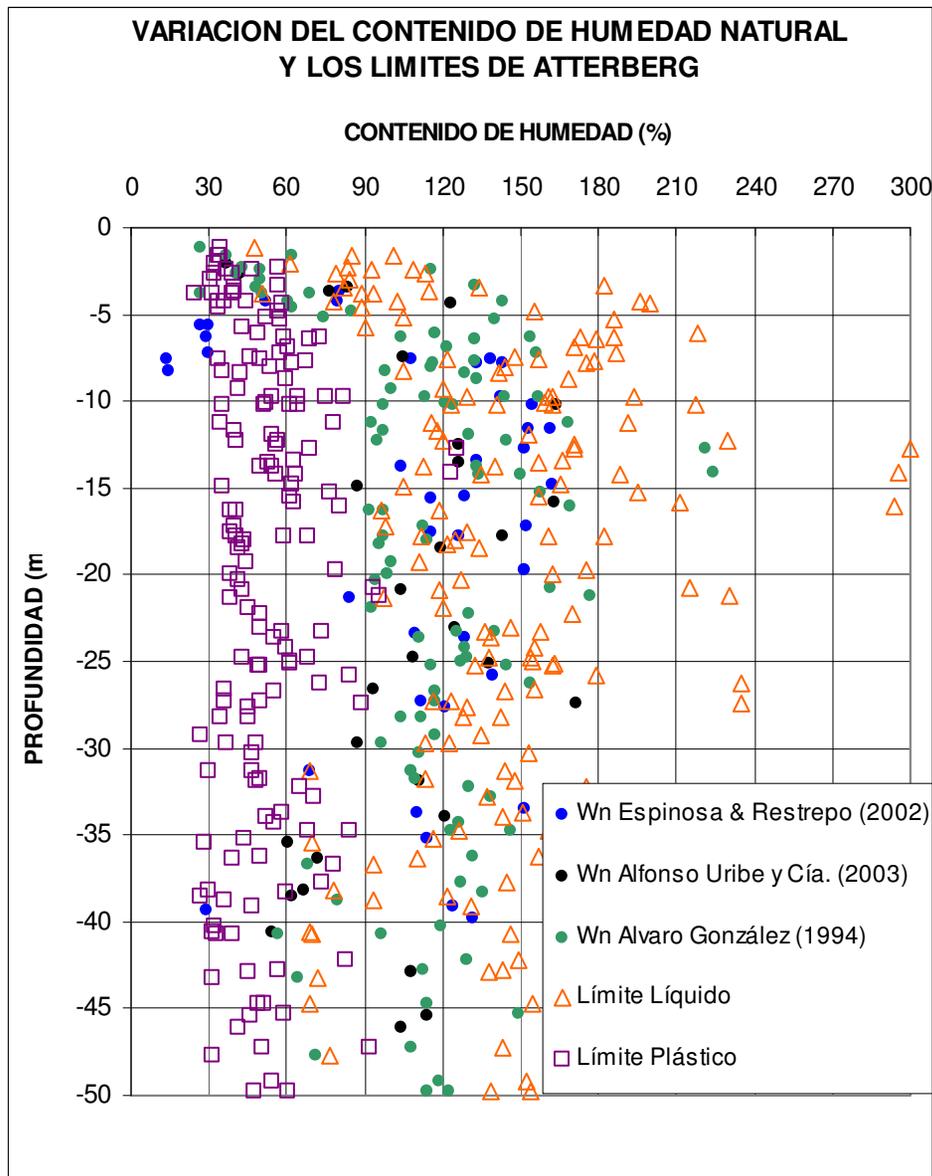


Figura 21

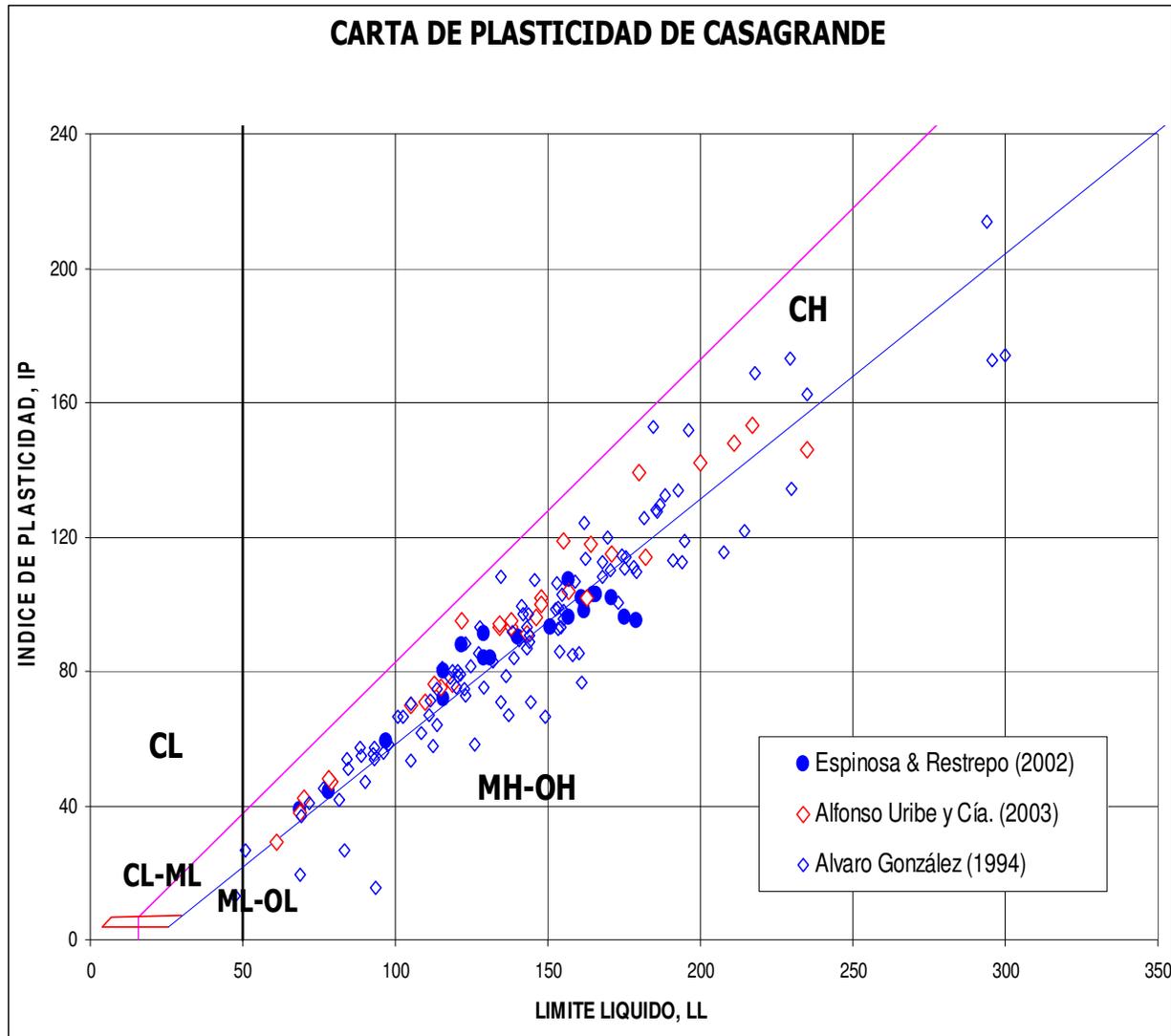


Por debajo de unos 3.0 m hasta la profundidad explorada de 50.0 m el subsuelo está formado por un depósito de arcillas de alta plasticidad de origen lacustre típicas de la Formación Sabana. Aparecen intercalados algunos estratos de turba de poco espesor y eventuales lentes de arena.

En el gráfico se muestra la variación de los límites de consistencia (líquido y plástico) y contenido de humedad con la profundidad.

Se observa un rango relativamente amplio de variación de estos parámetros a igual profundidad, lo cual permite anticipar variaciones en las características de resistencia y compresibilidad del subsuelo en dirección horizontal y en profundidad.

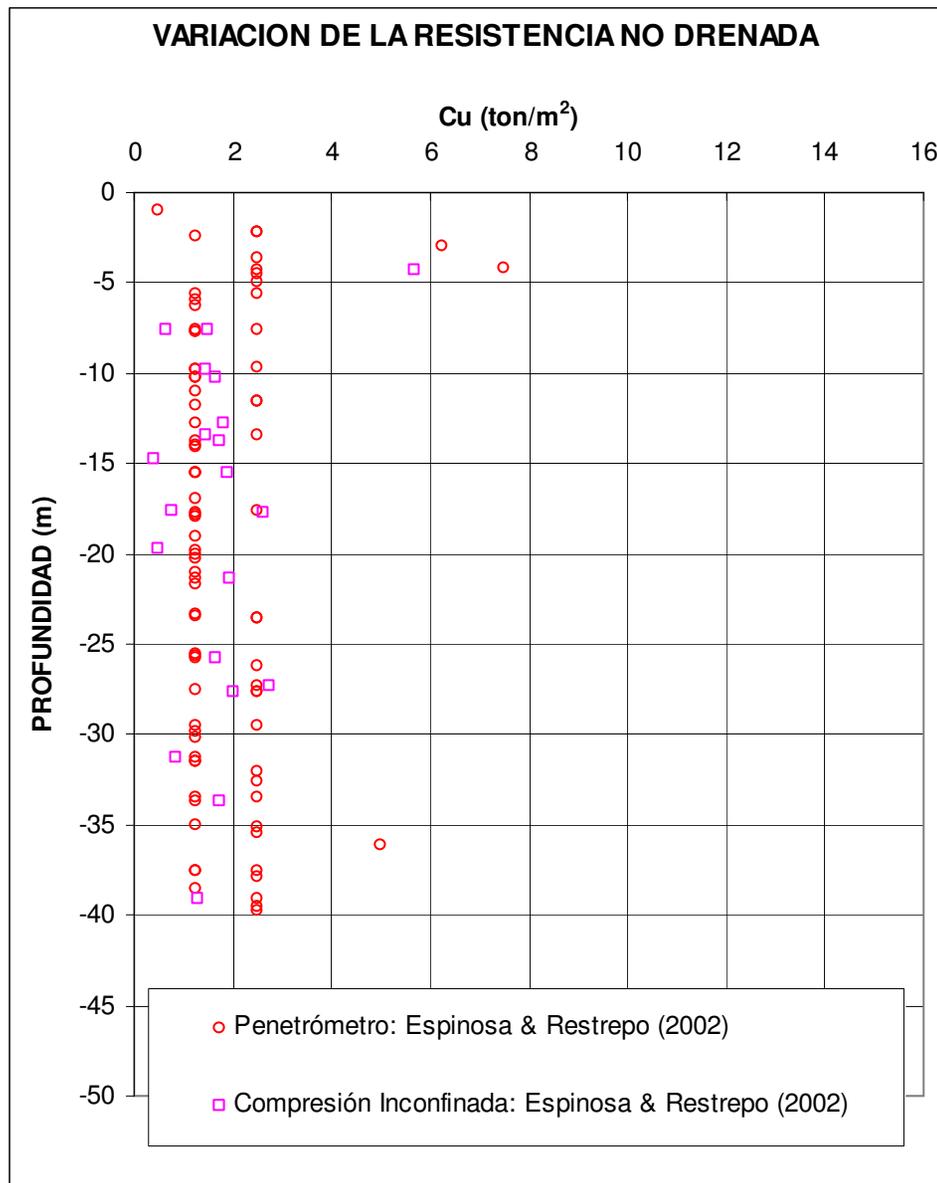
Figura 22



Se muestra la localización de los suelos arcillosos del depósito en la Carta de Plasticidad de Casagrande.

Los resultados indican que se trata de arcilla de alta plasticidad y de la misma historia geológica, con contenidos variables de materia orgánica, clasificadas como CH y OH.

Figura 23

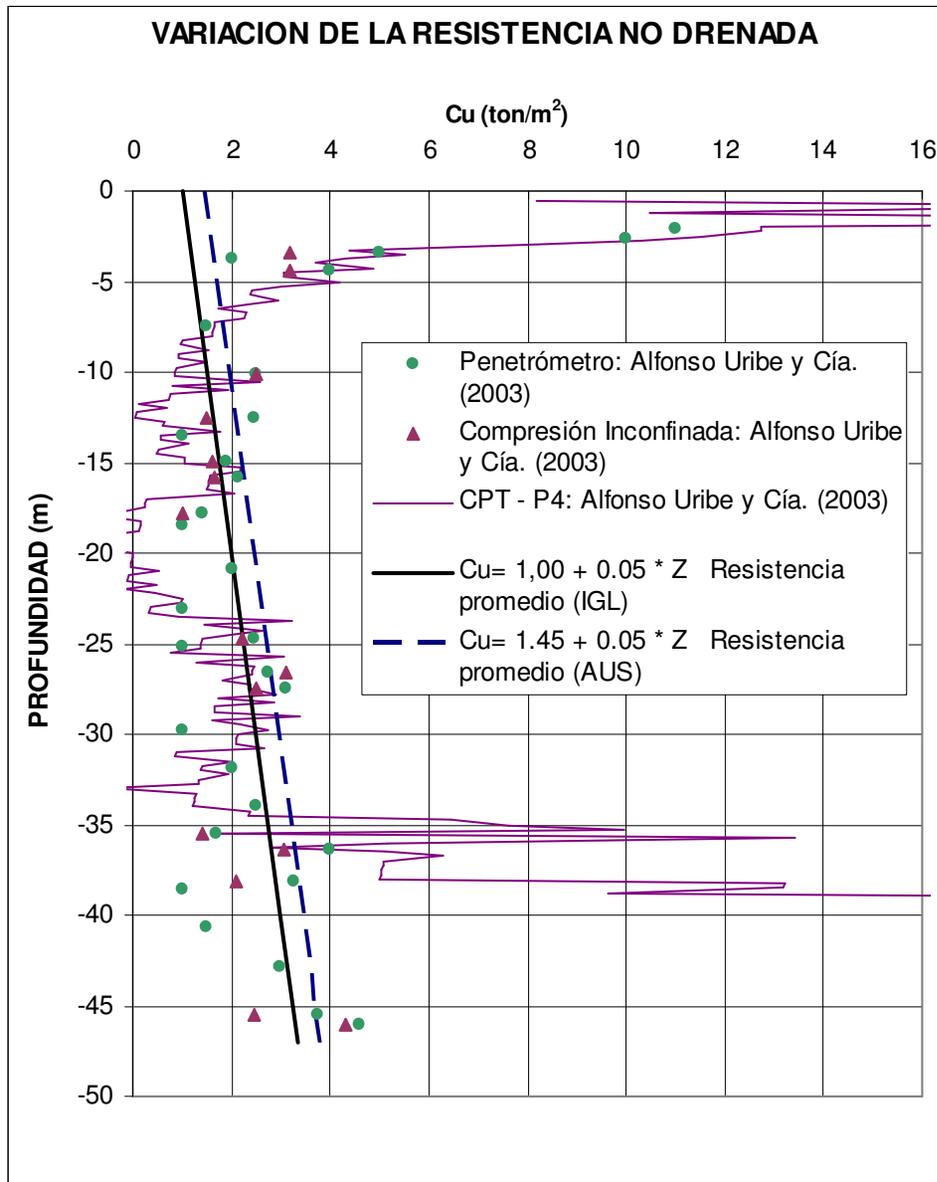


Los resultados de los ensayos sobre muestras tomadas durante el estudio dirigido por el Ingeniero Carlos Restrepo indican que la resistencia al corte no drenada c_u , varía entre 1.7 y 2.3 ton/m² y sin mayores cambios con la profundidad.

Este comportamiento es muy diferente del esperado para las arcillas de la Formación Sabana que sabemos por la experiencia acumulada que su resistencia aumenta gradualmente con la profundidad y que a unos 40 m de profundidad debemos esperar resistencias del orden de 5.0 ton/m².

Este comportamiento anormal solo se explica por la alteración del suelo durante el muestreo.

Figura 24



Los resultados de los ensayos tomados del Estudio de Suelos del Ingeniero Alfonso Uribe muestra una tendencia mejor definida de aumento gradual de la resistencia al corte no drenada con la profundidad.

La dispersión de los resultados puede atribuirse en parte a la alteración del suelo durante el muestreo.

Figura 25

DADO PILA 6 REFUERZO 2

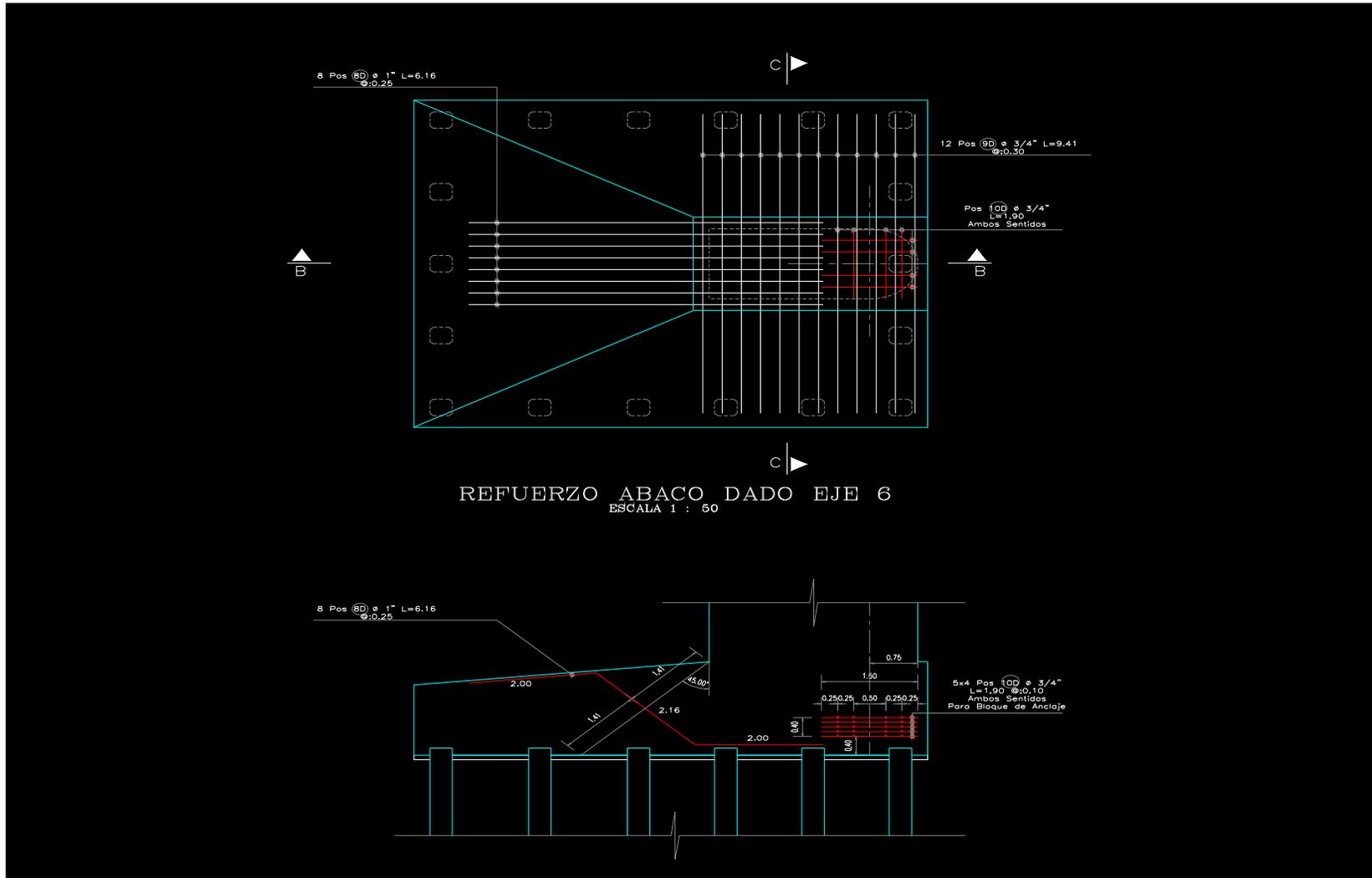
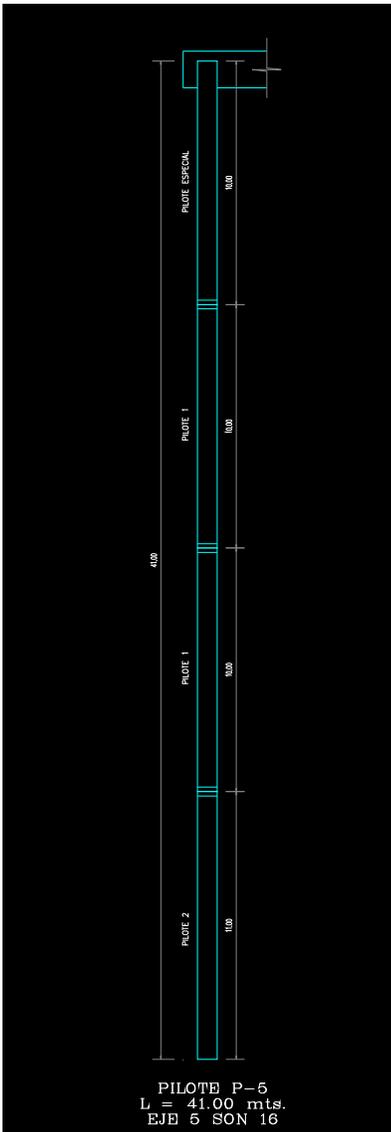


Figura 26

PILOTE



ACOPLE DE LOS PILOTES AL DADO

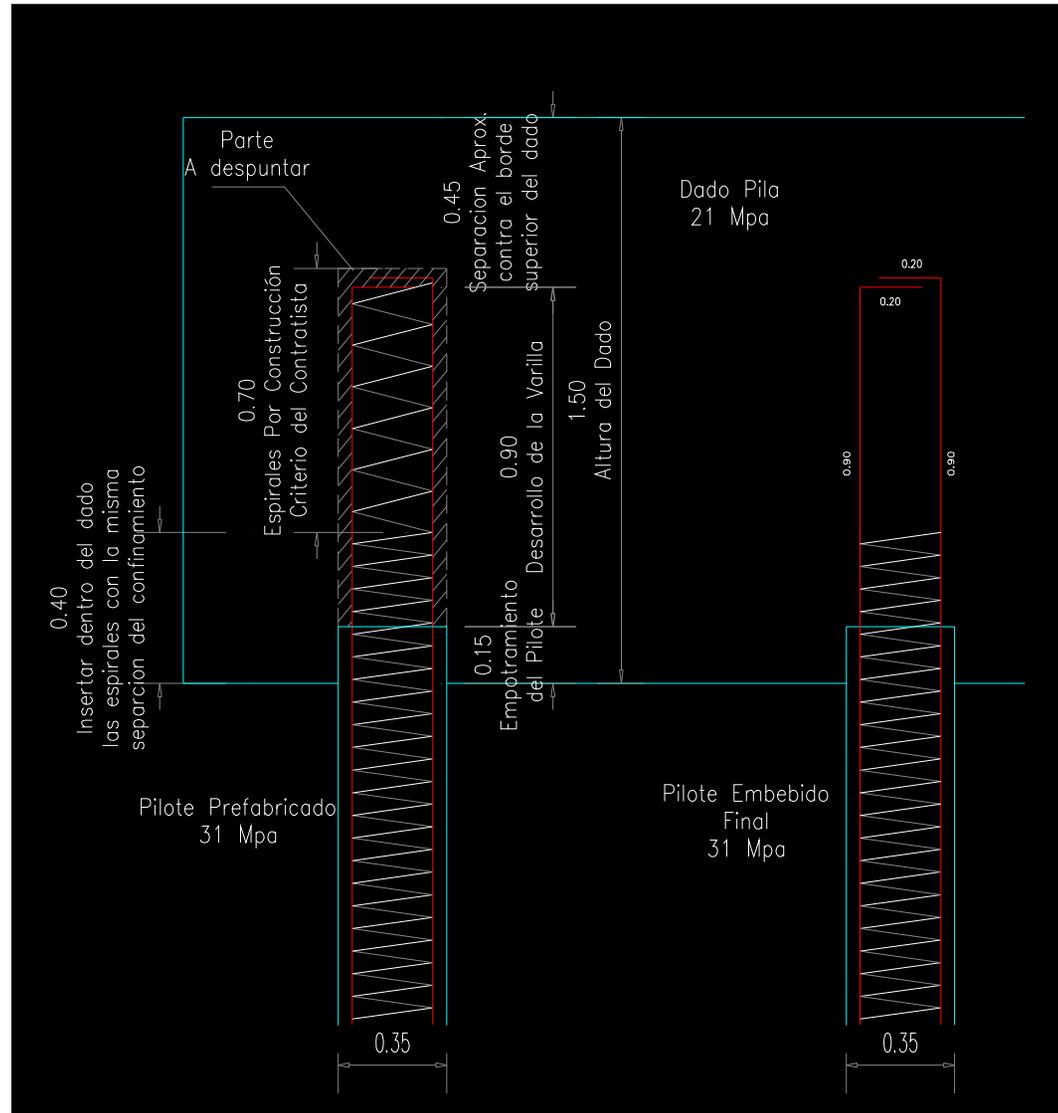


Figura 27

HINCA DE PILOTES



Figura 28

PILOTE CONEXION



Figura 29

ESTRIBO

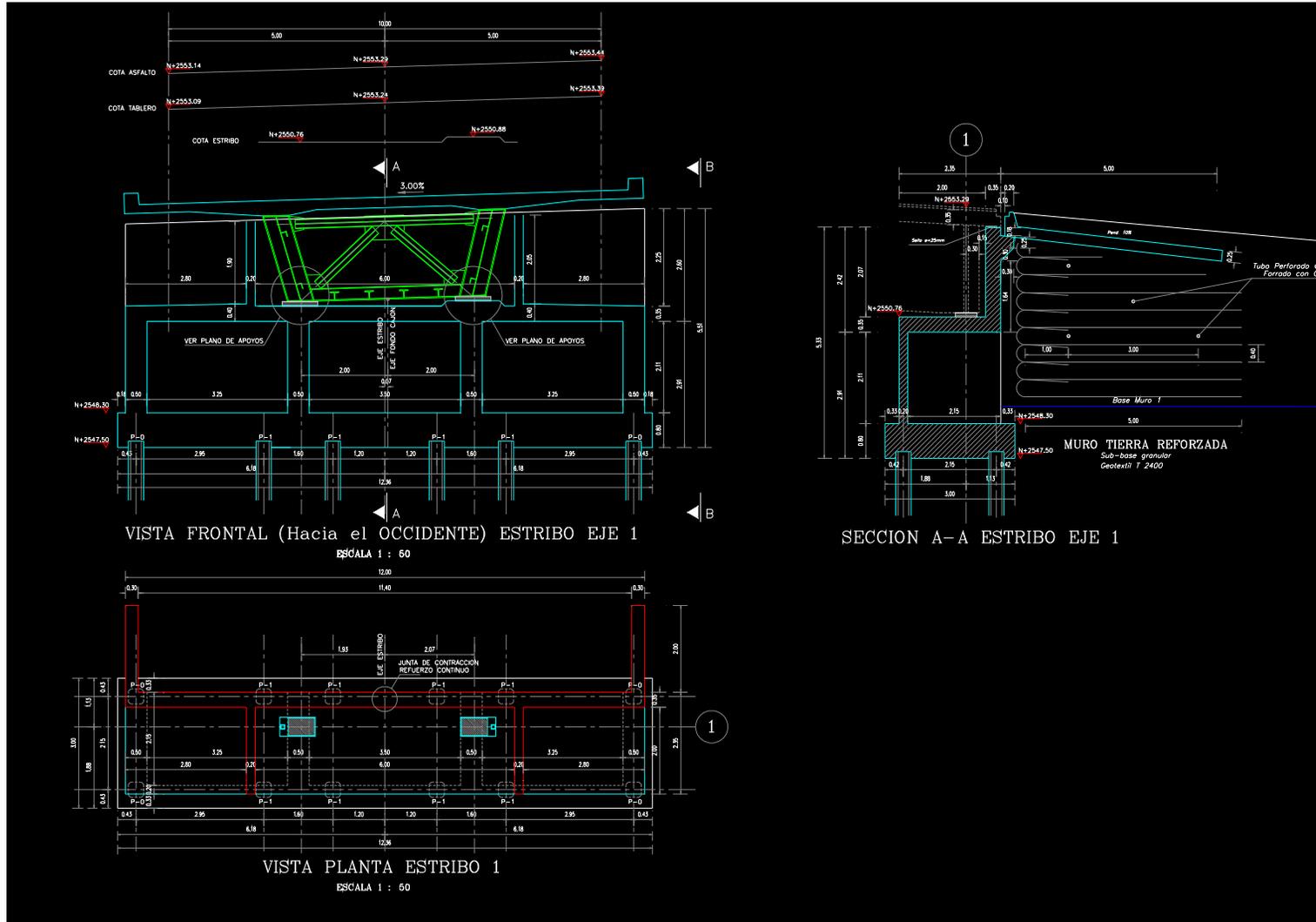


Figura 30

DADOS

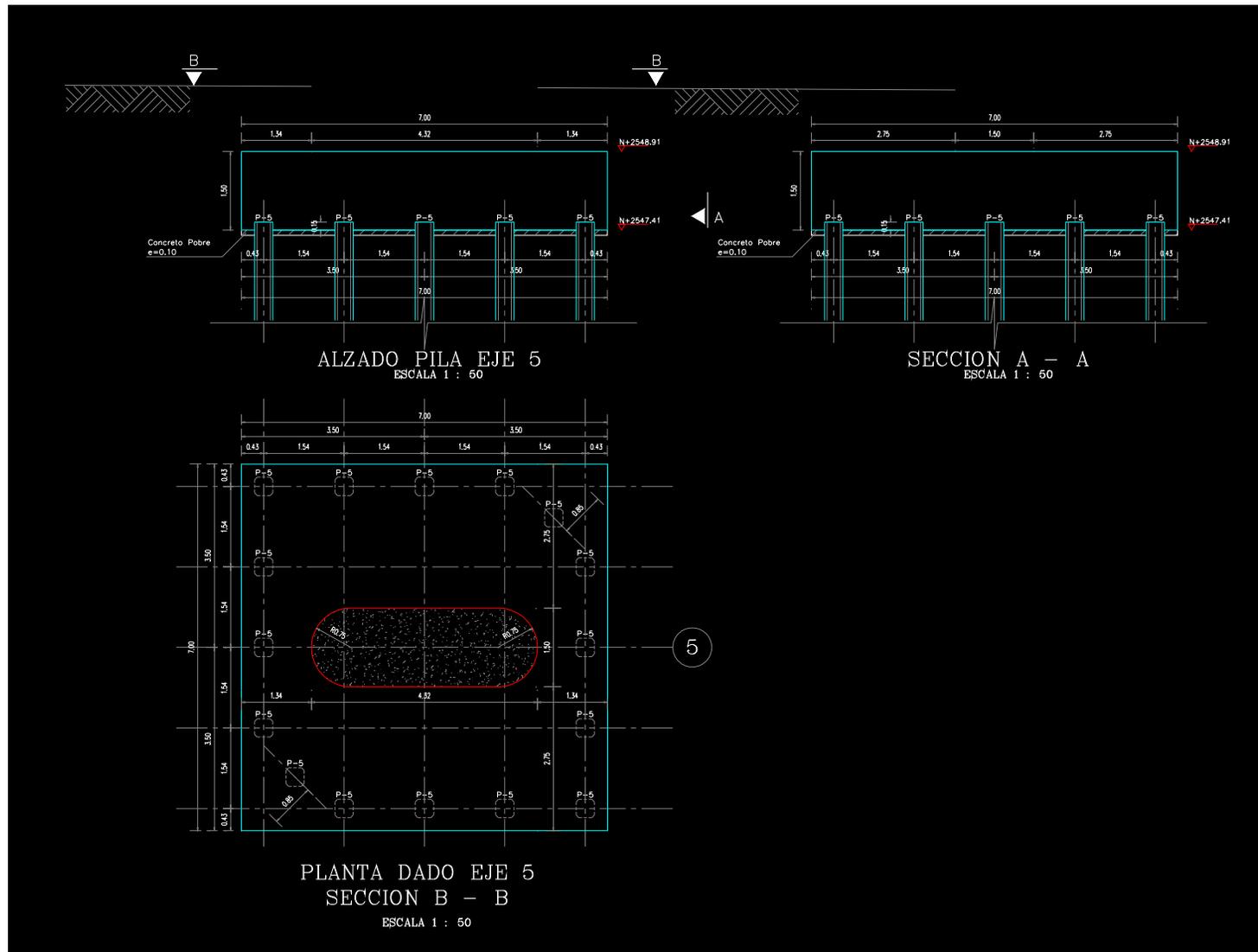


Figura 31

CABEZA DE PILOTES



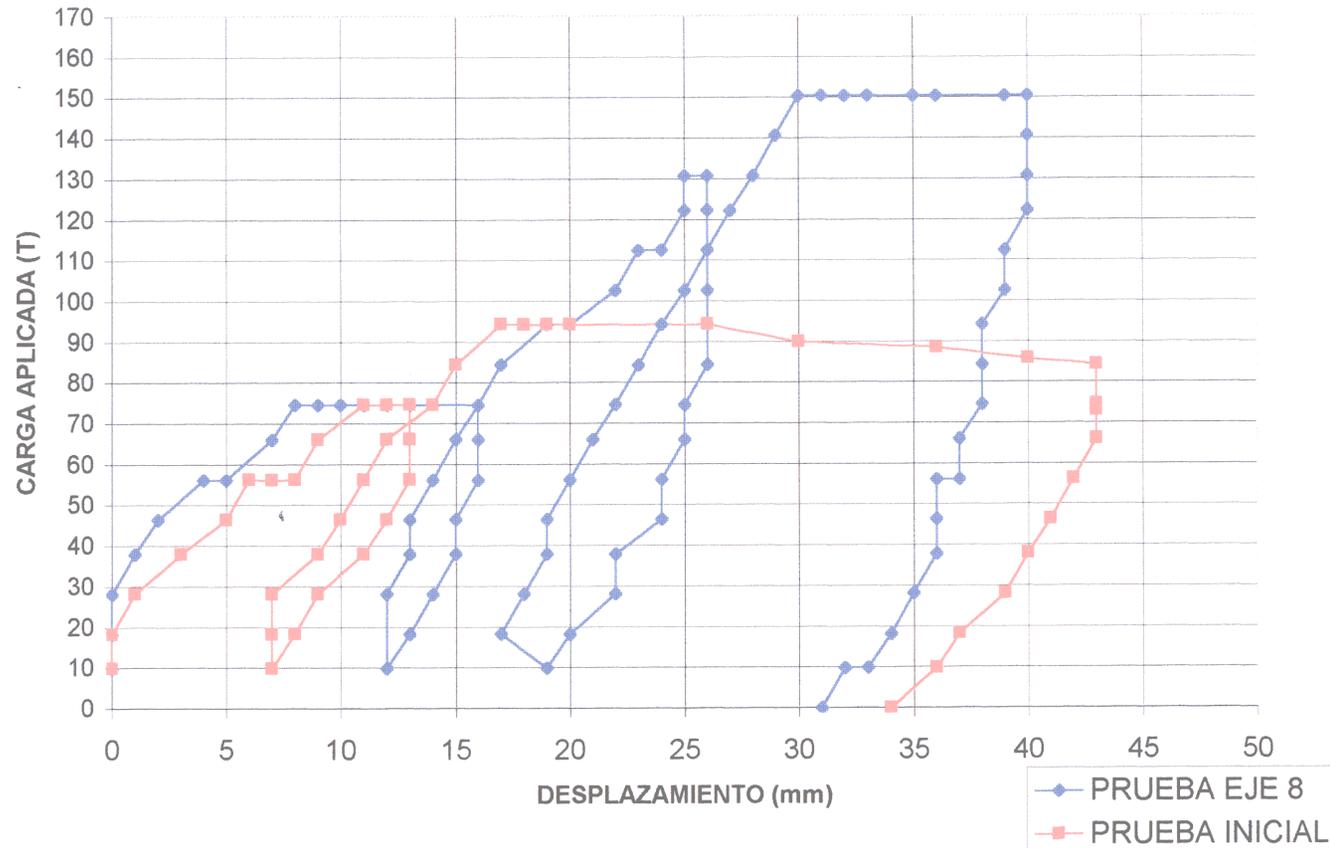
Figura 32

REFUERZO DADO PILA 6



Figura 33

COMPARACION PRUEBAS DE CARGA



Curvas Desplazamiento promedio vs. Carga aplicada correspondiente a las Pruebas de carga realizadas entre las Pilas 13 y 14 y en la Pila 8.

Prueba de Carga entre las Pilas 13 y 14:

Pun= 97 ton

Prueba de Carga en la Pila 8:

Pun= 150.5 ton

Figura 34

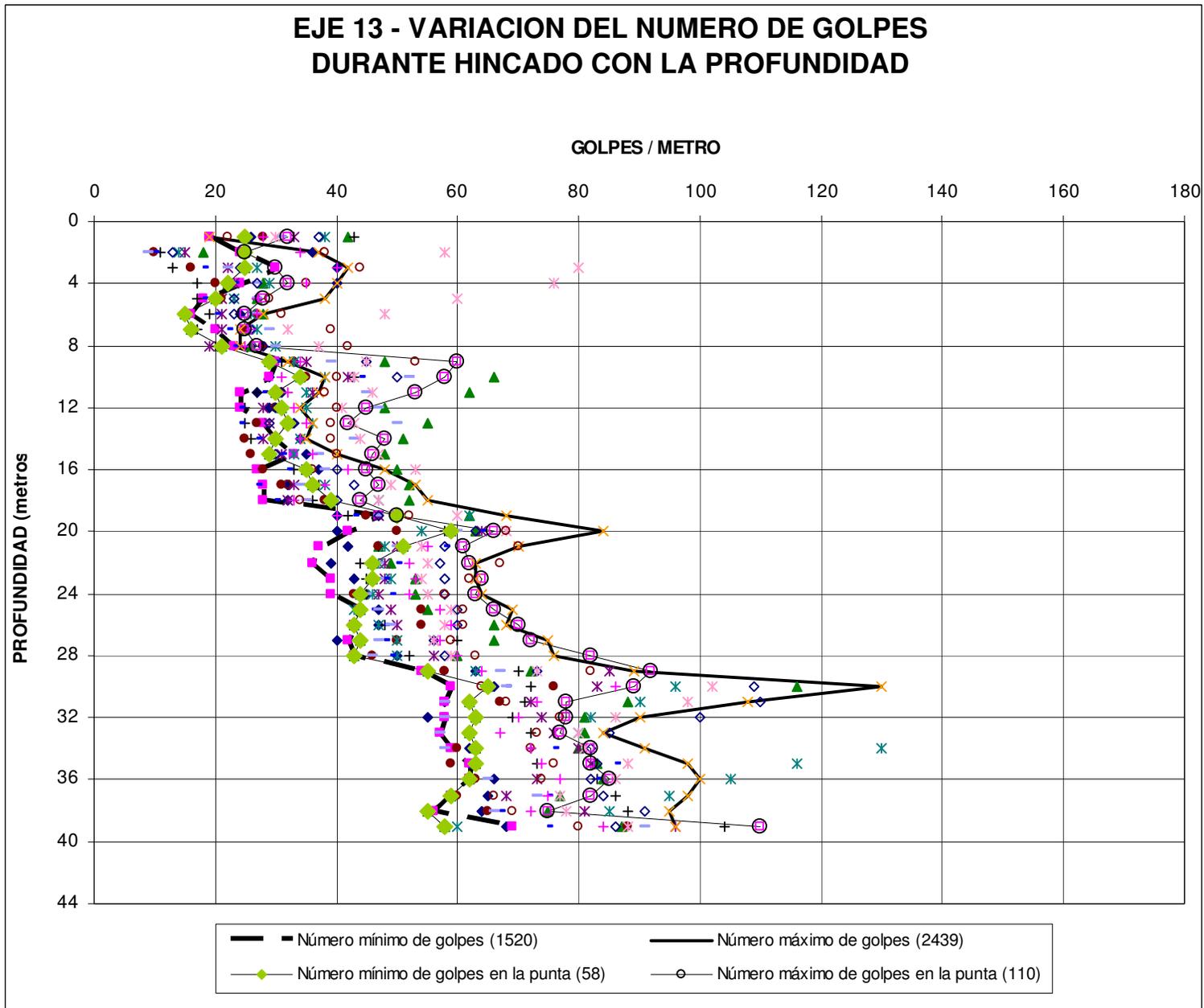


Figura 35

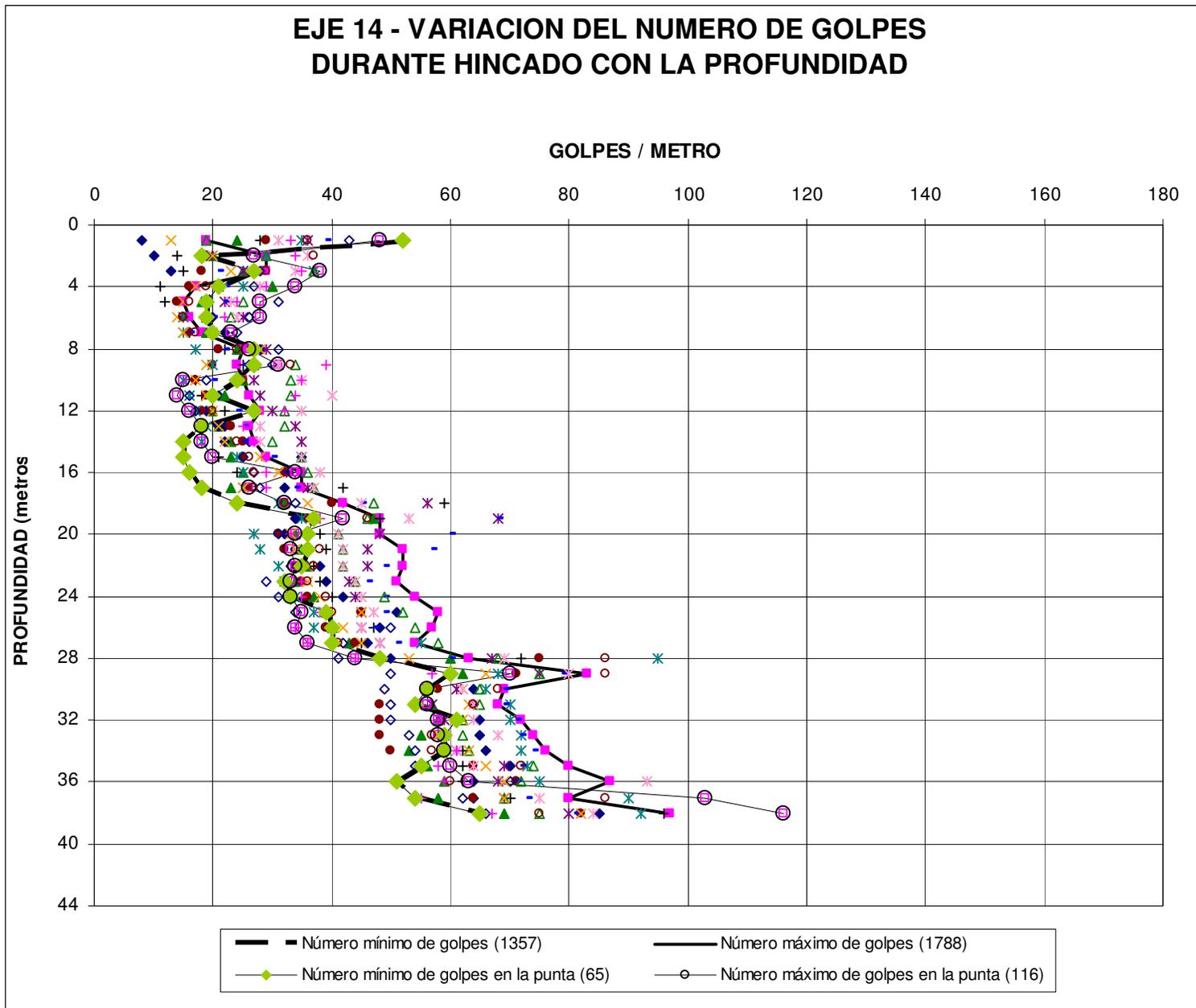


Figura 36

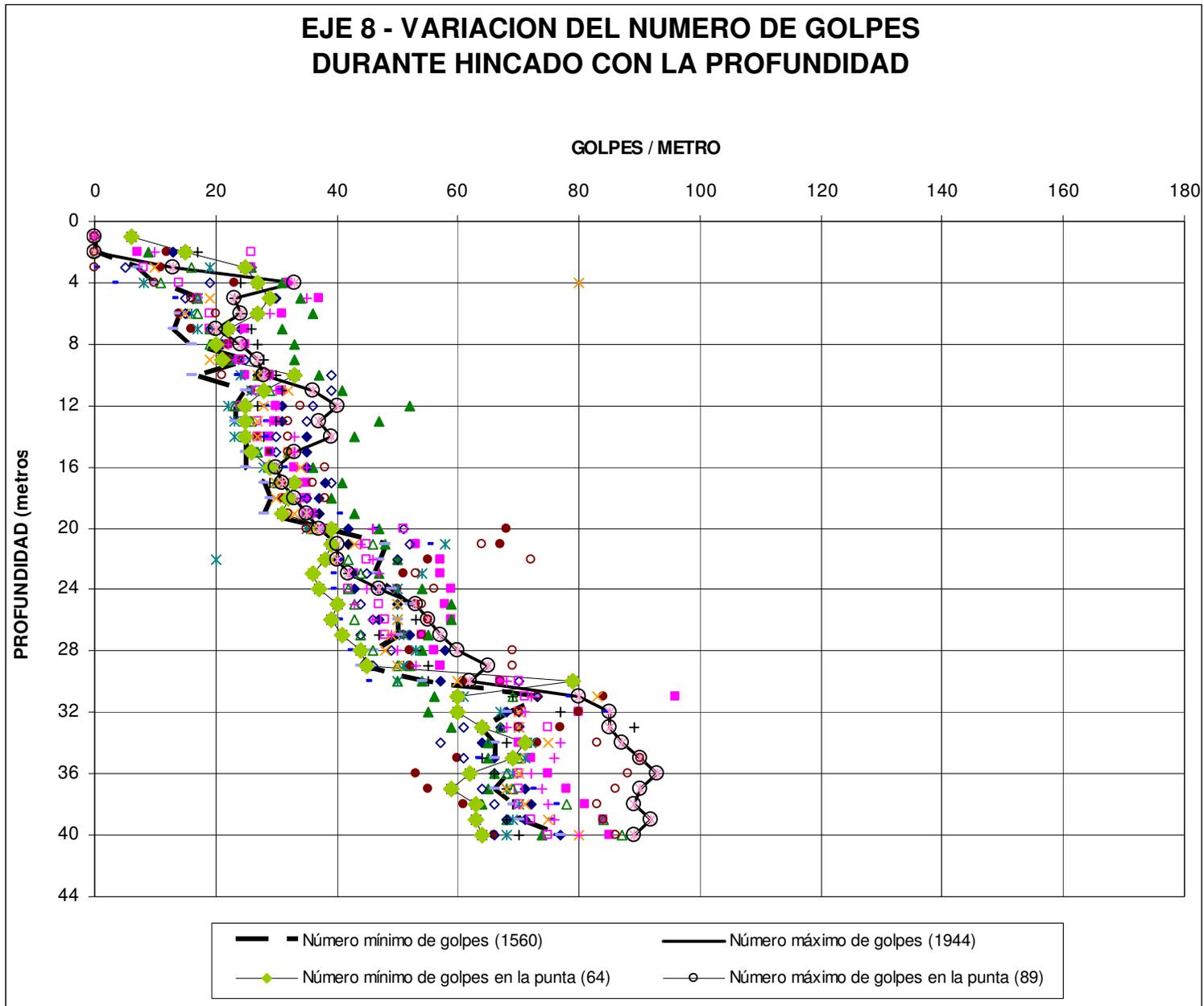


Figura 37

PRUEBA DE CARGA No. 1 (ENTRE PILAS 13 y 14)
VARIACION DEL NUMERO DE GOLPES DURANTE HINCADO CON LA PROFUNDIDAD

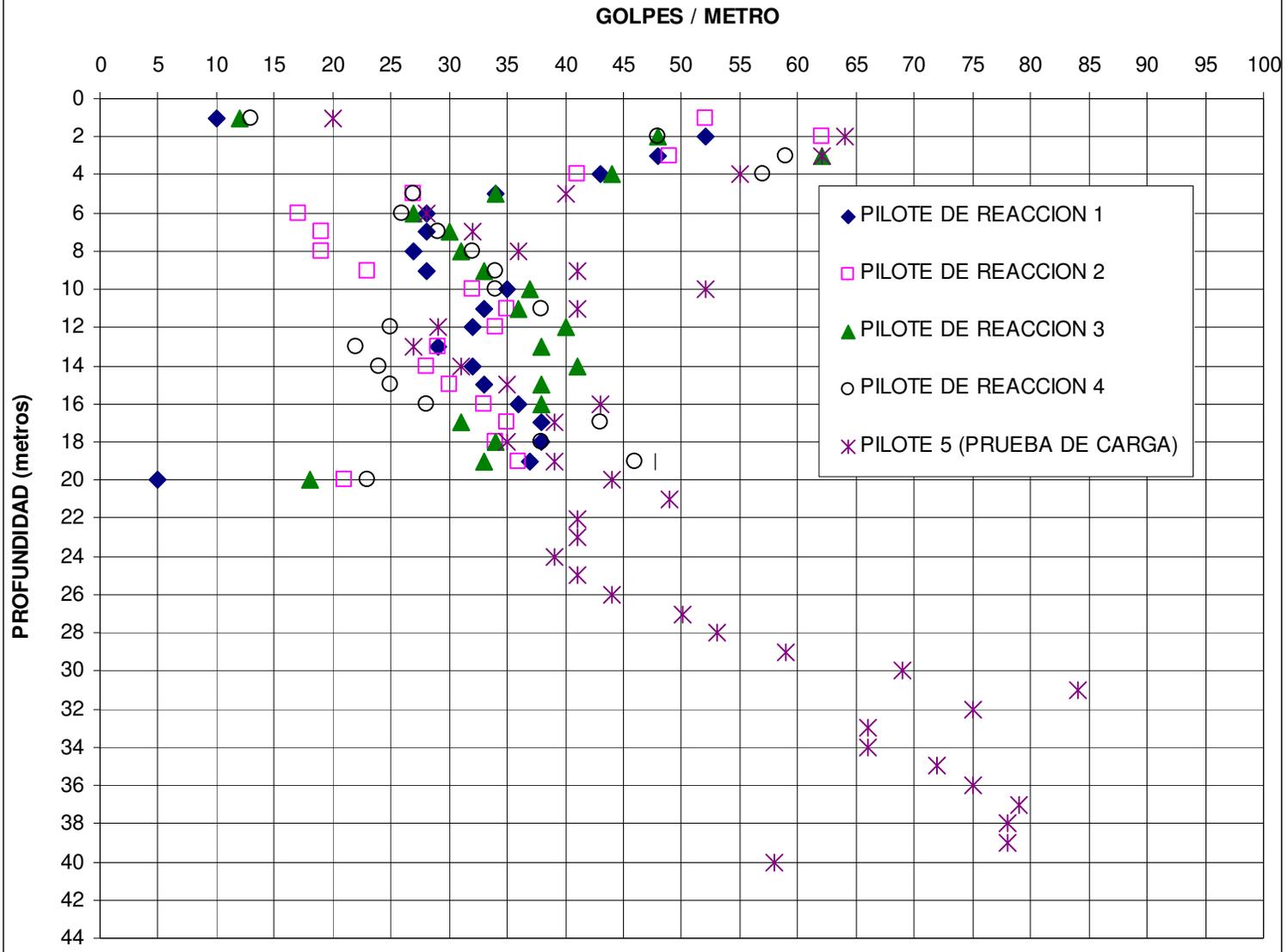


Figura 38

PRUEBA DE CARGA No. 3: PILAS 13 - 14 PROMEDIOS

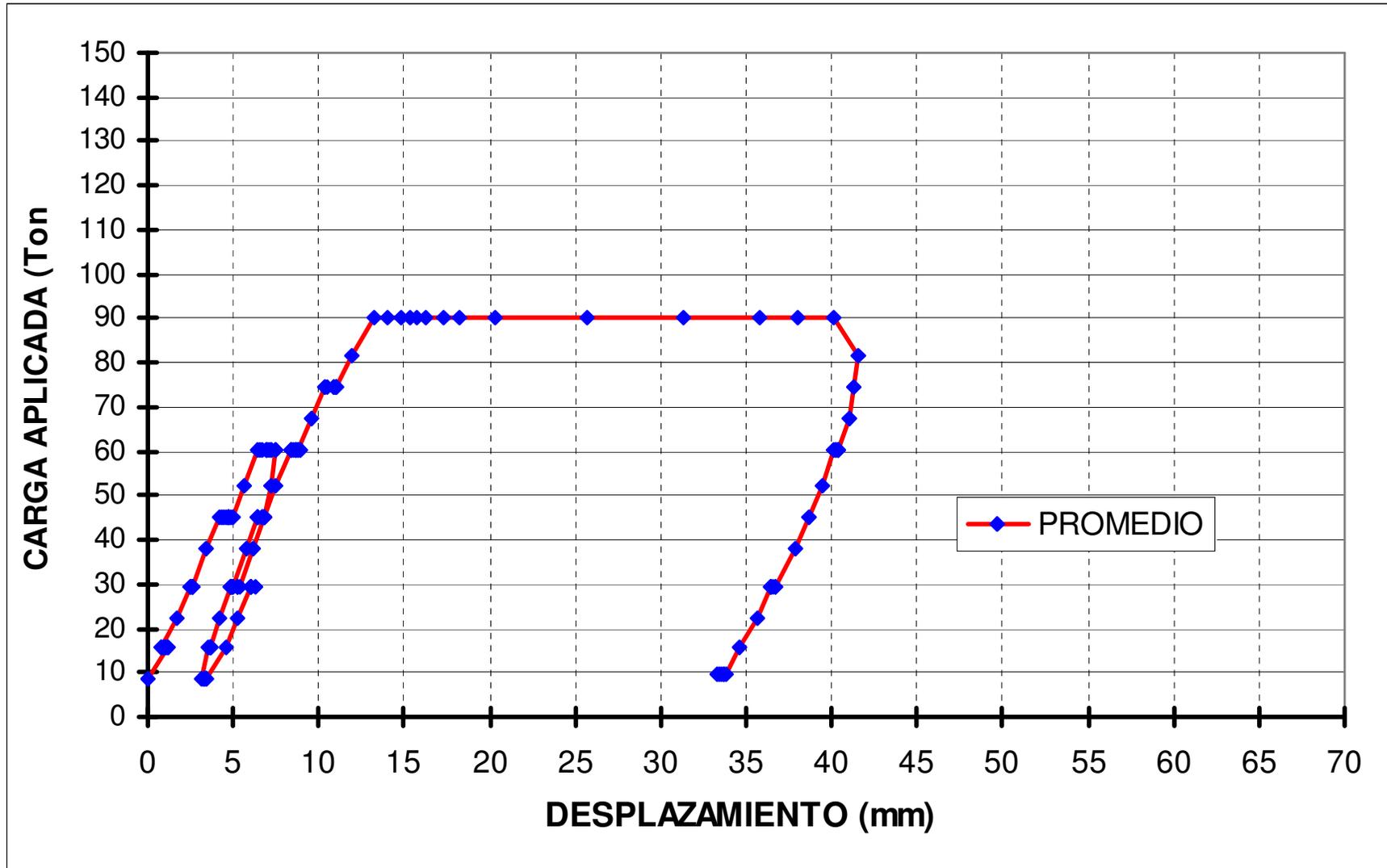


Figura 39

VARIACION DE CARGA DE HINCA CON PROFUNDIDAD

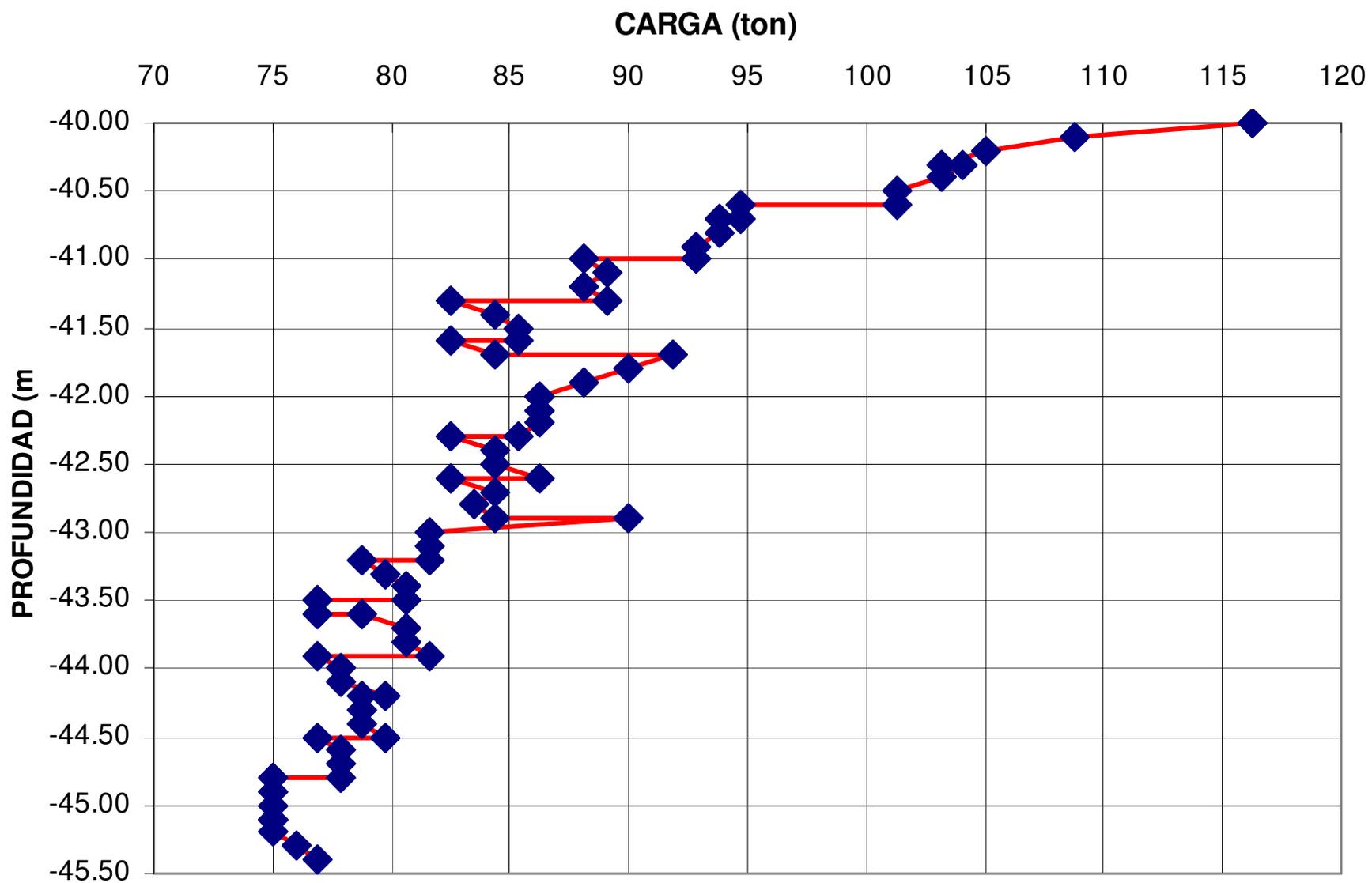


Figura 40

PRUEBA DE CARGA No. 4: PILAS 13-14 PROMEDIOS

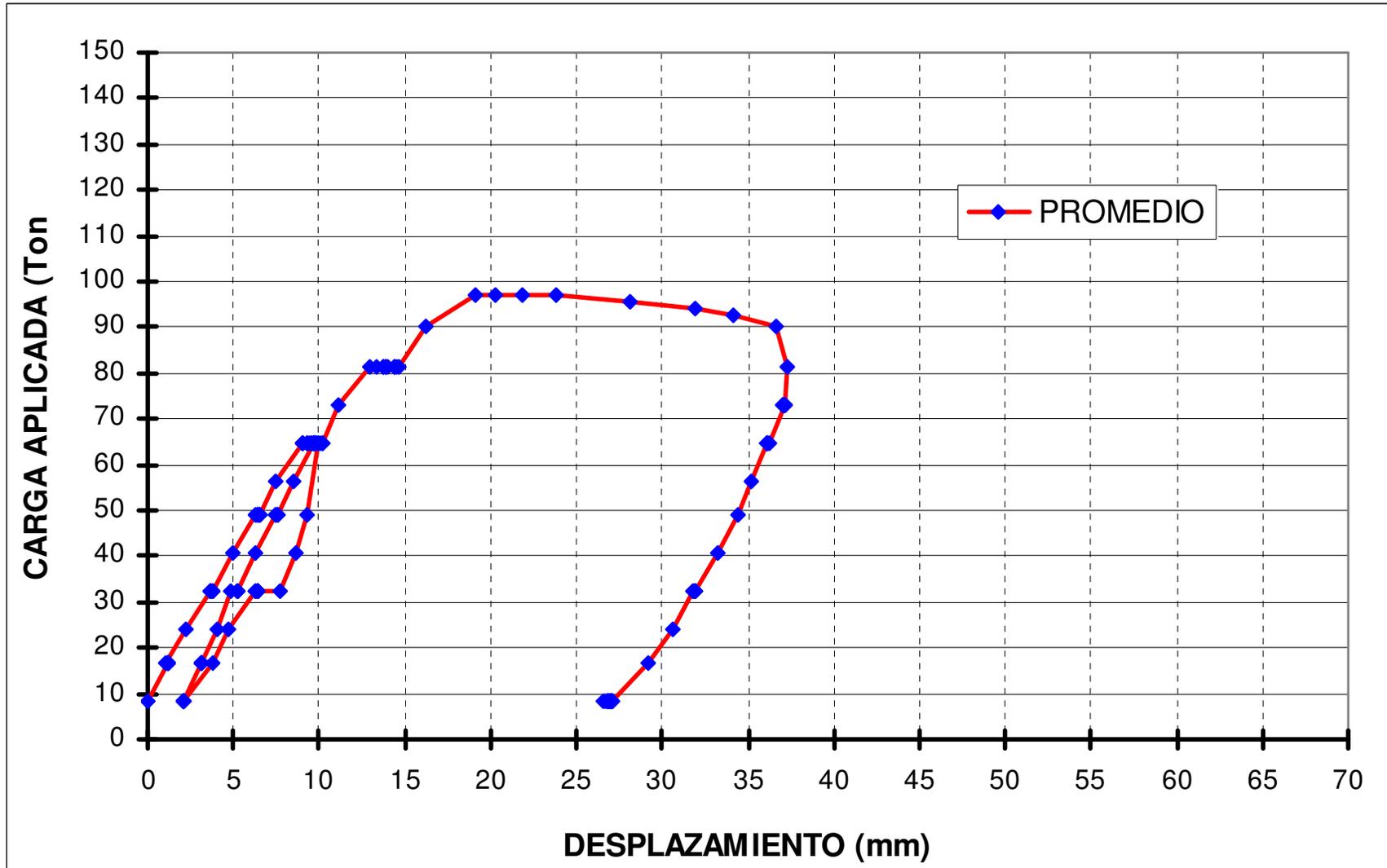


Figura 41

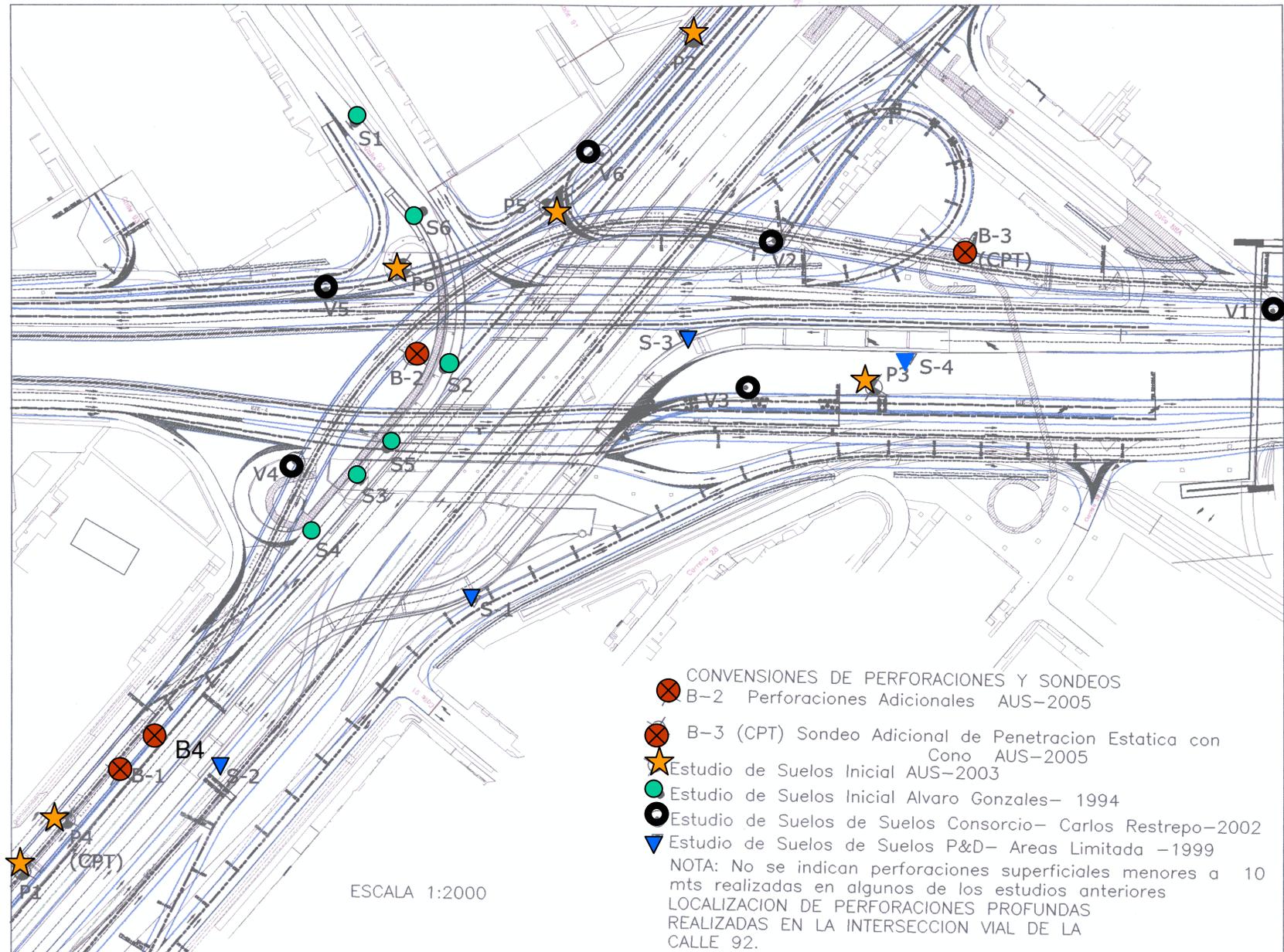


Figura 42

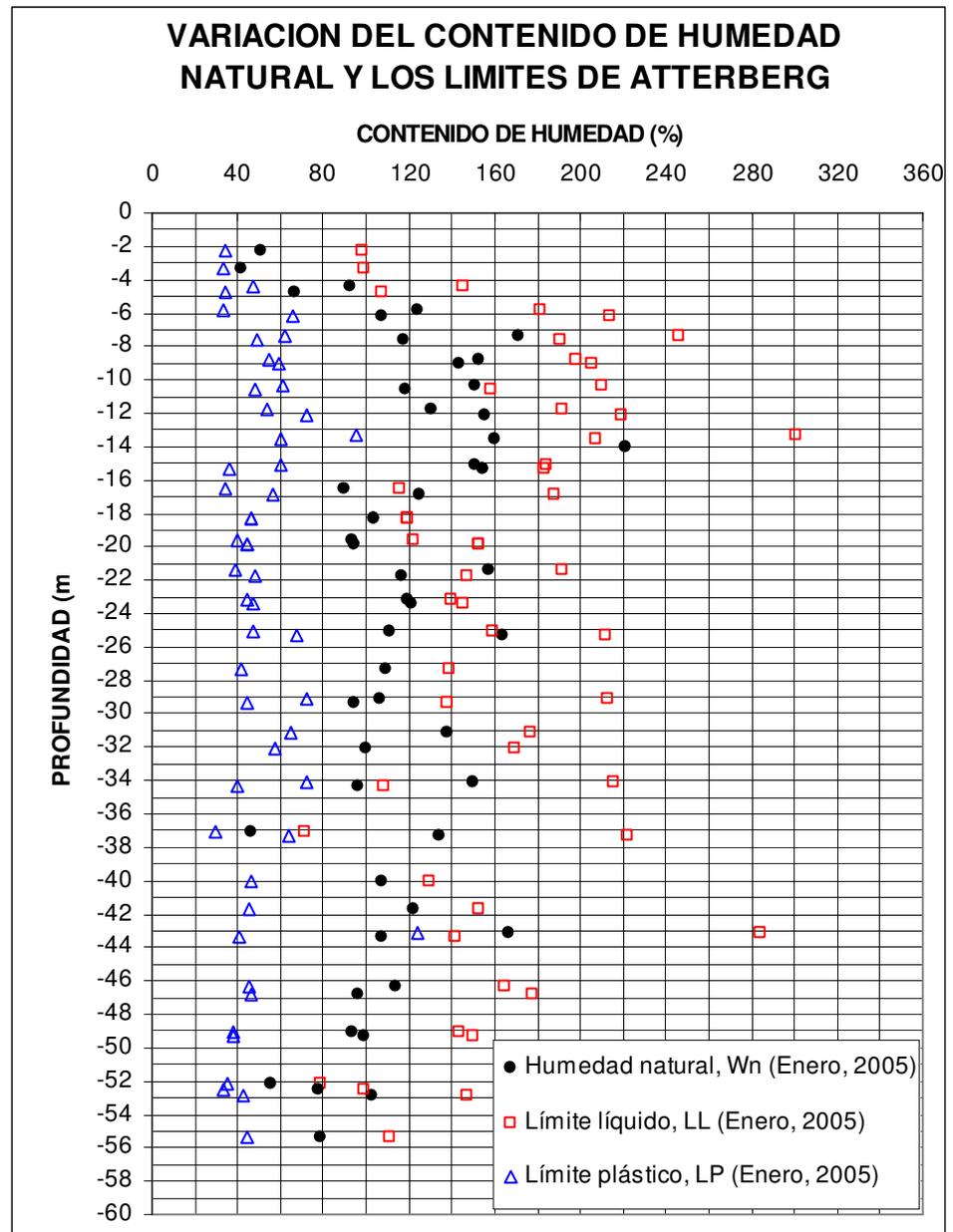
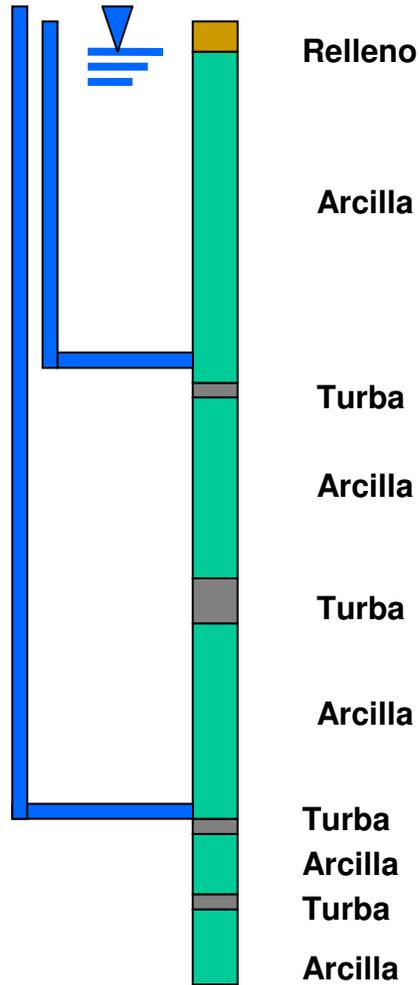


Figura 43

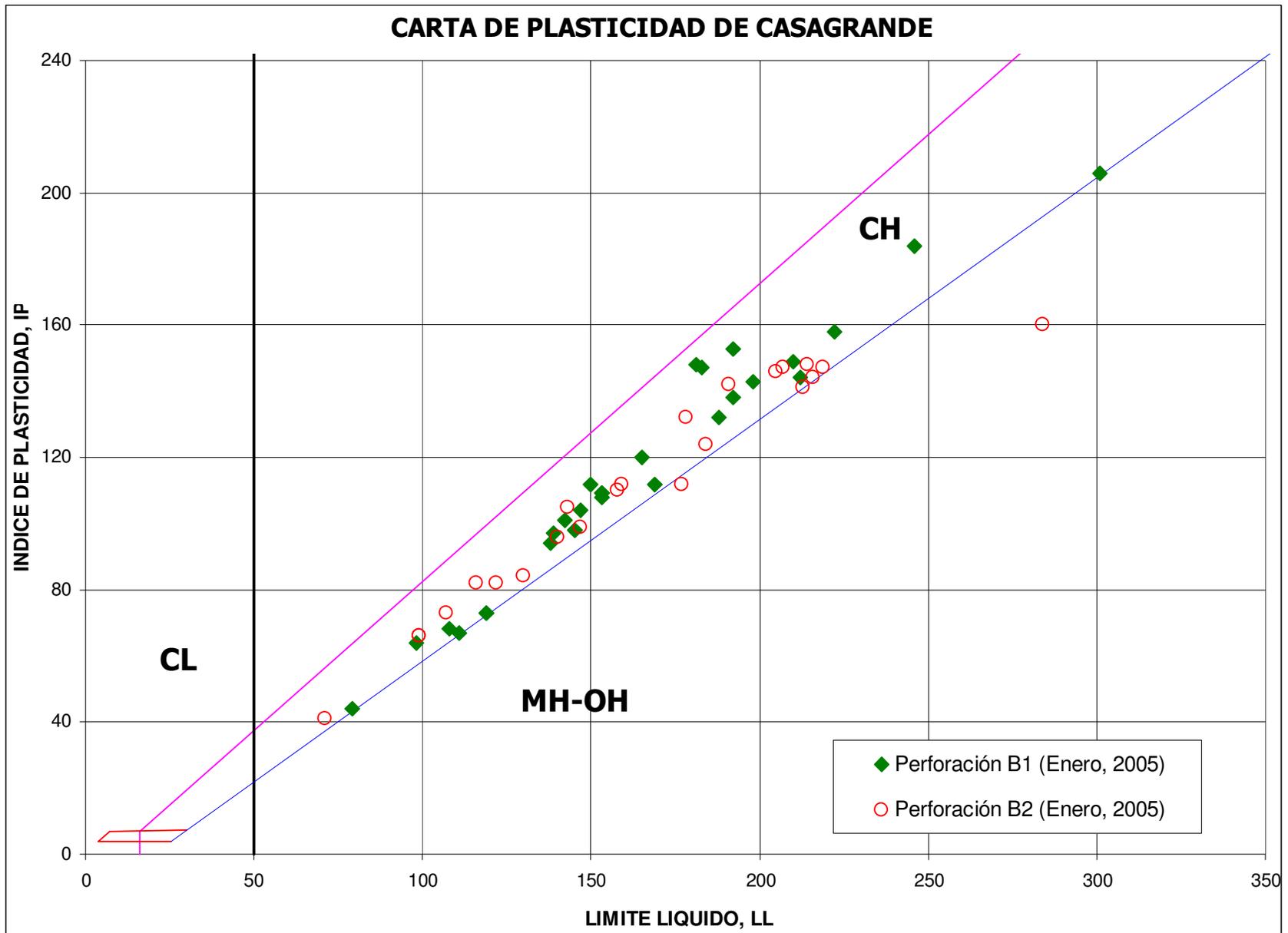


Figura 44

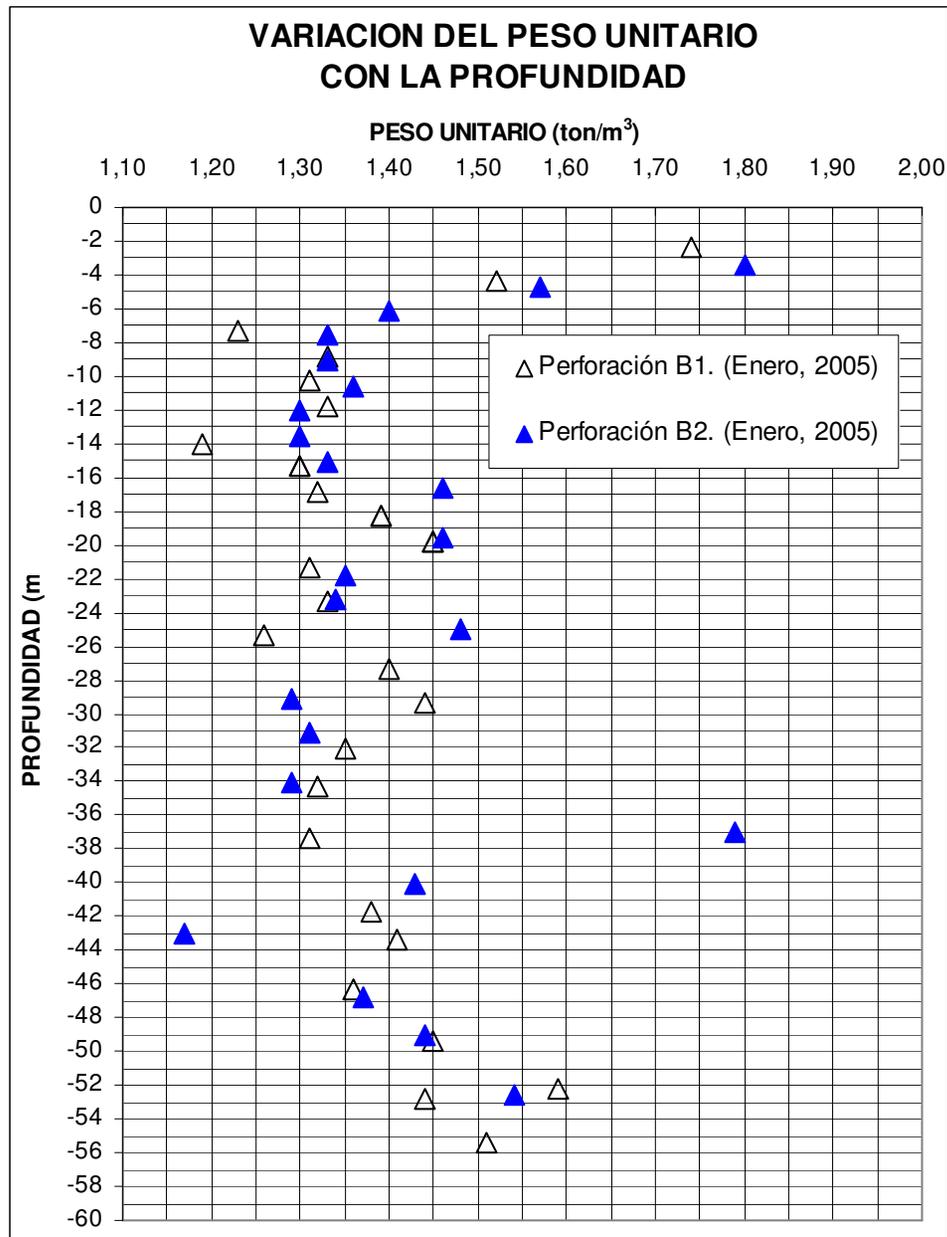


Figura 45

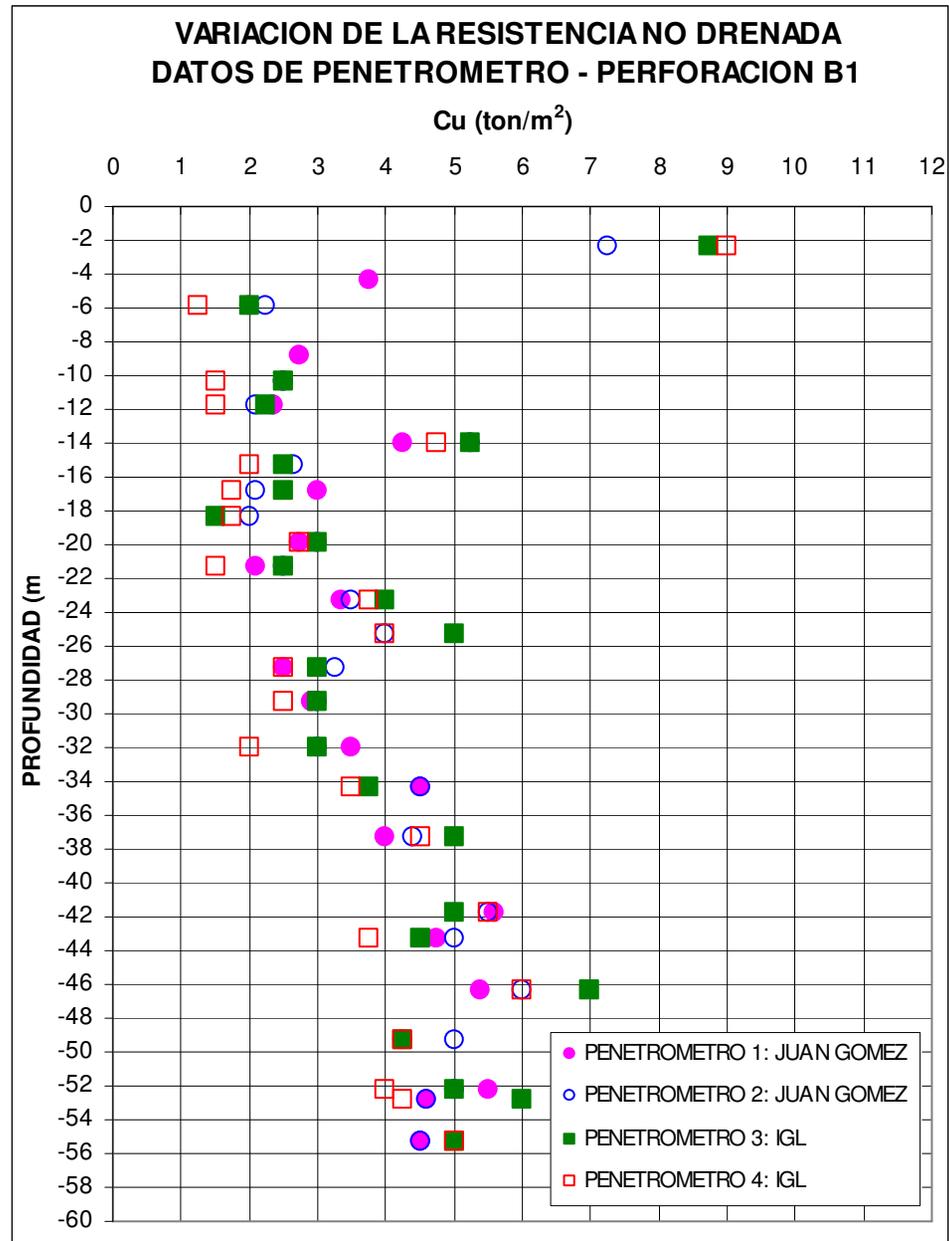


Figura 46

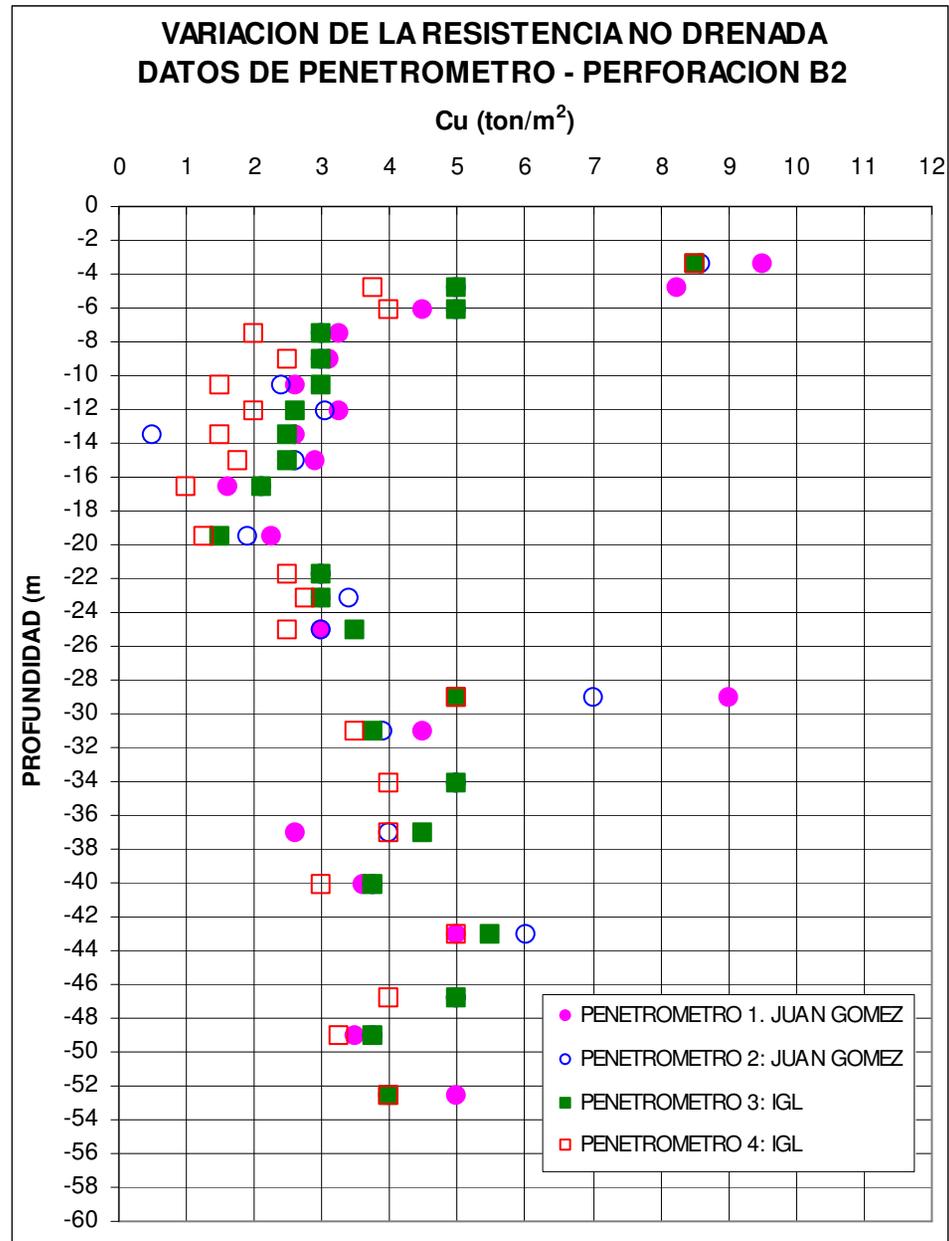


Figura 47

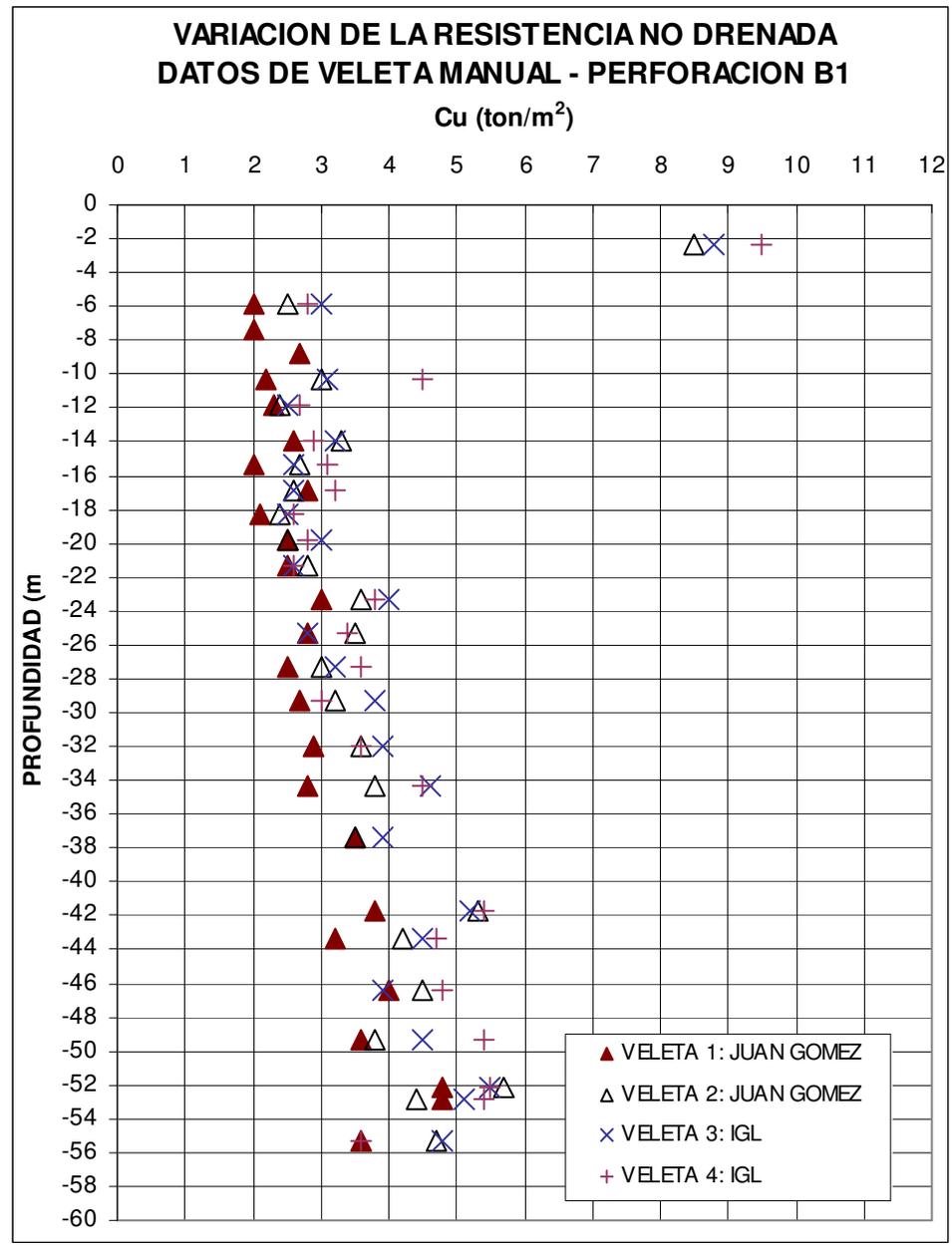


Figura 48

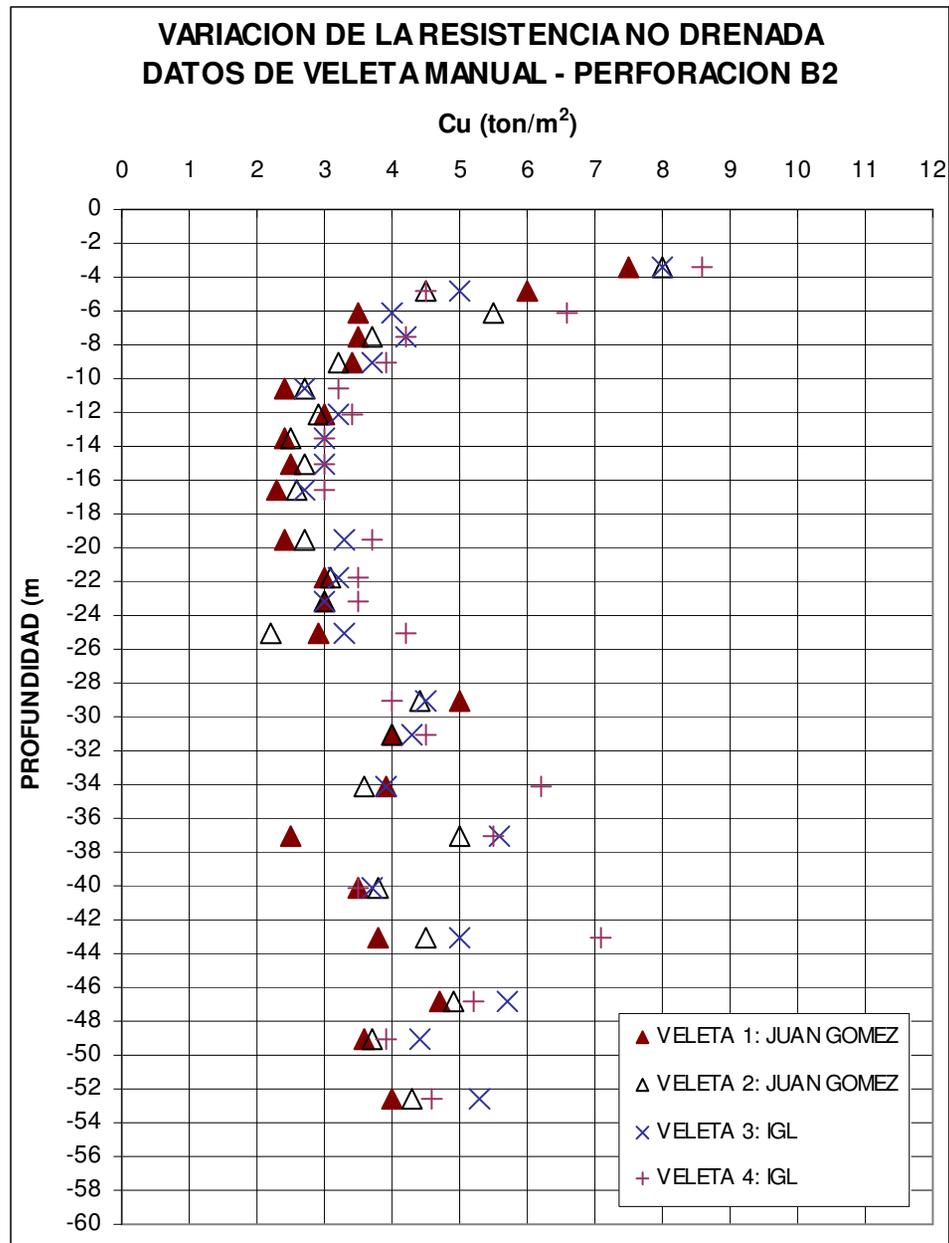


Figura 49

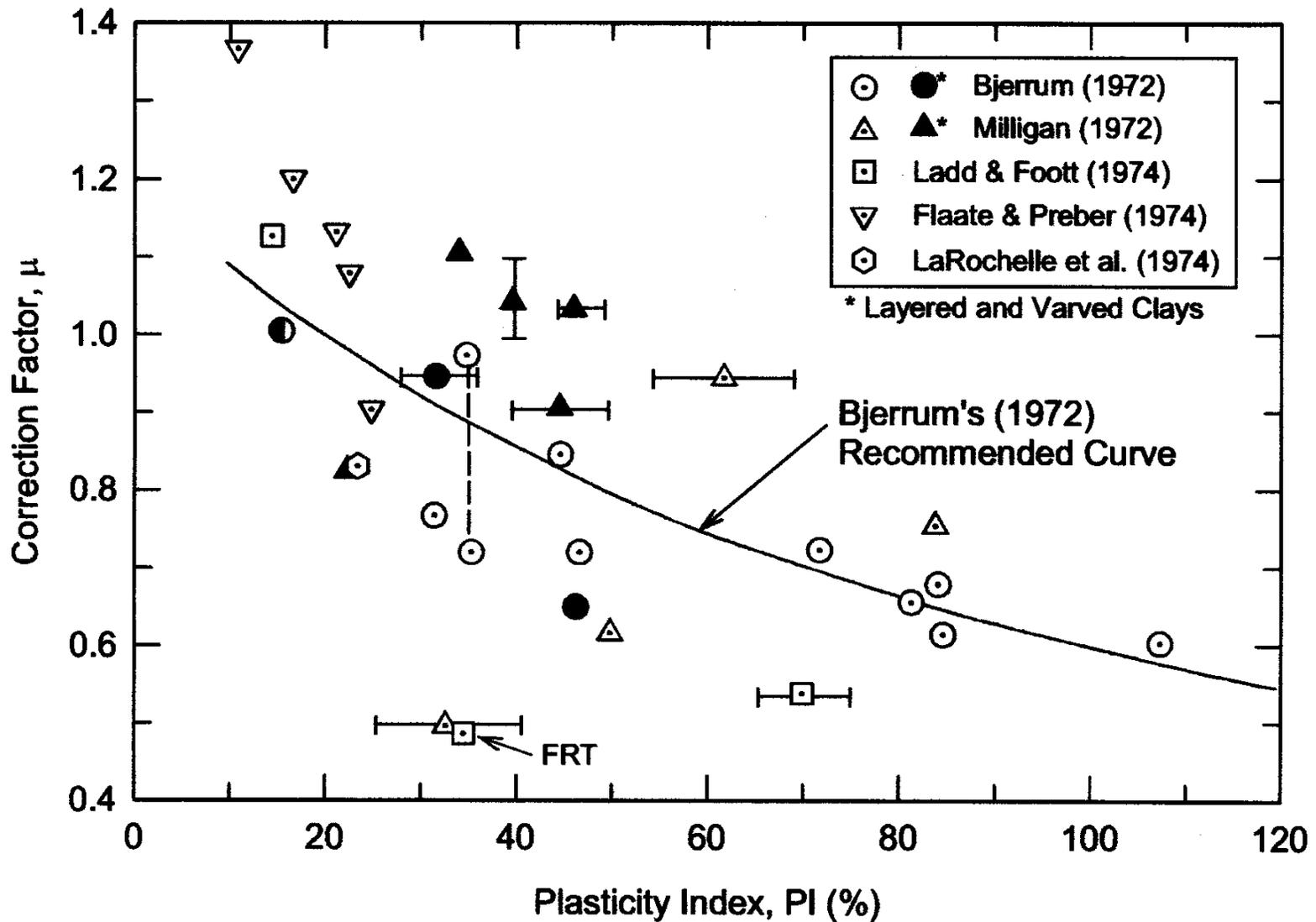


Figure 5.1 Field Vane Correction Factor vs. Plasticity Index Derived from Embankment Failures (after Ladd et al. 1977)

Figura 50

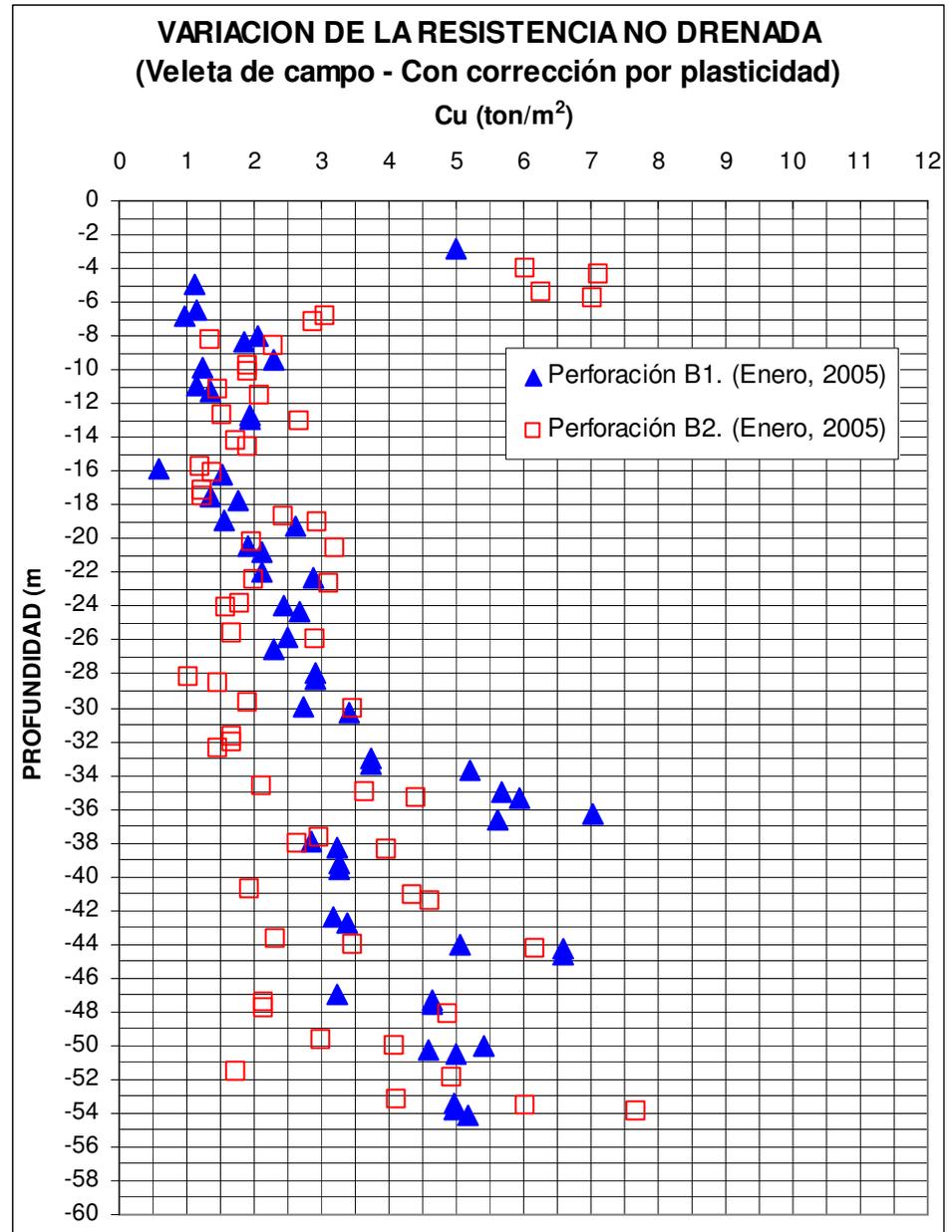
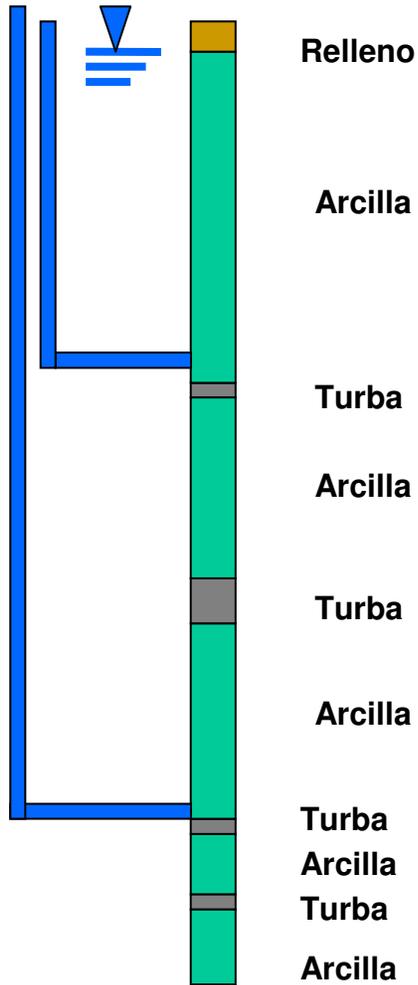
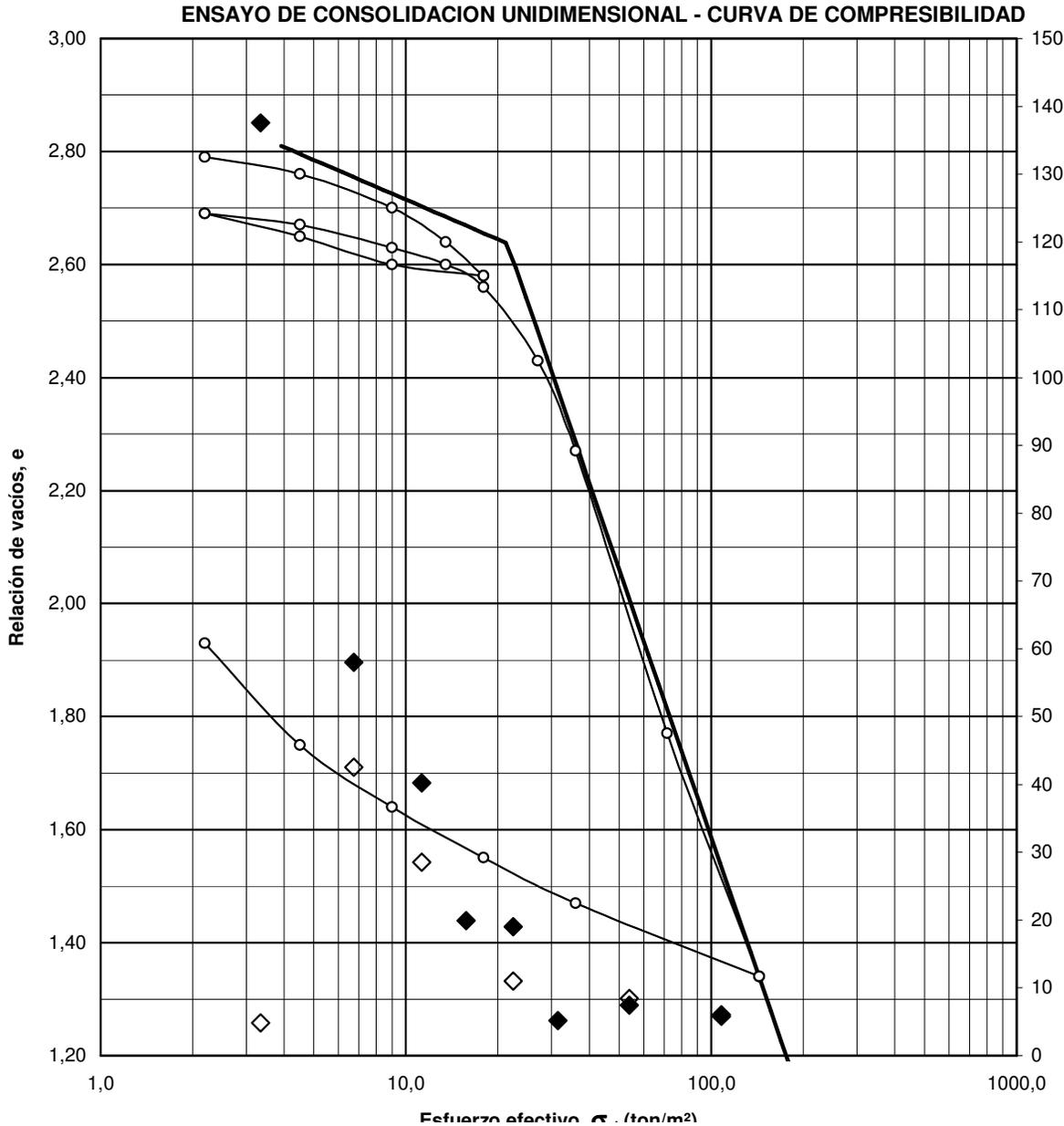
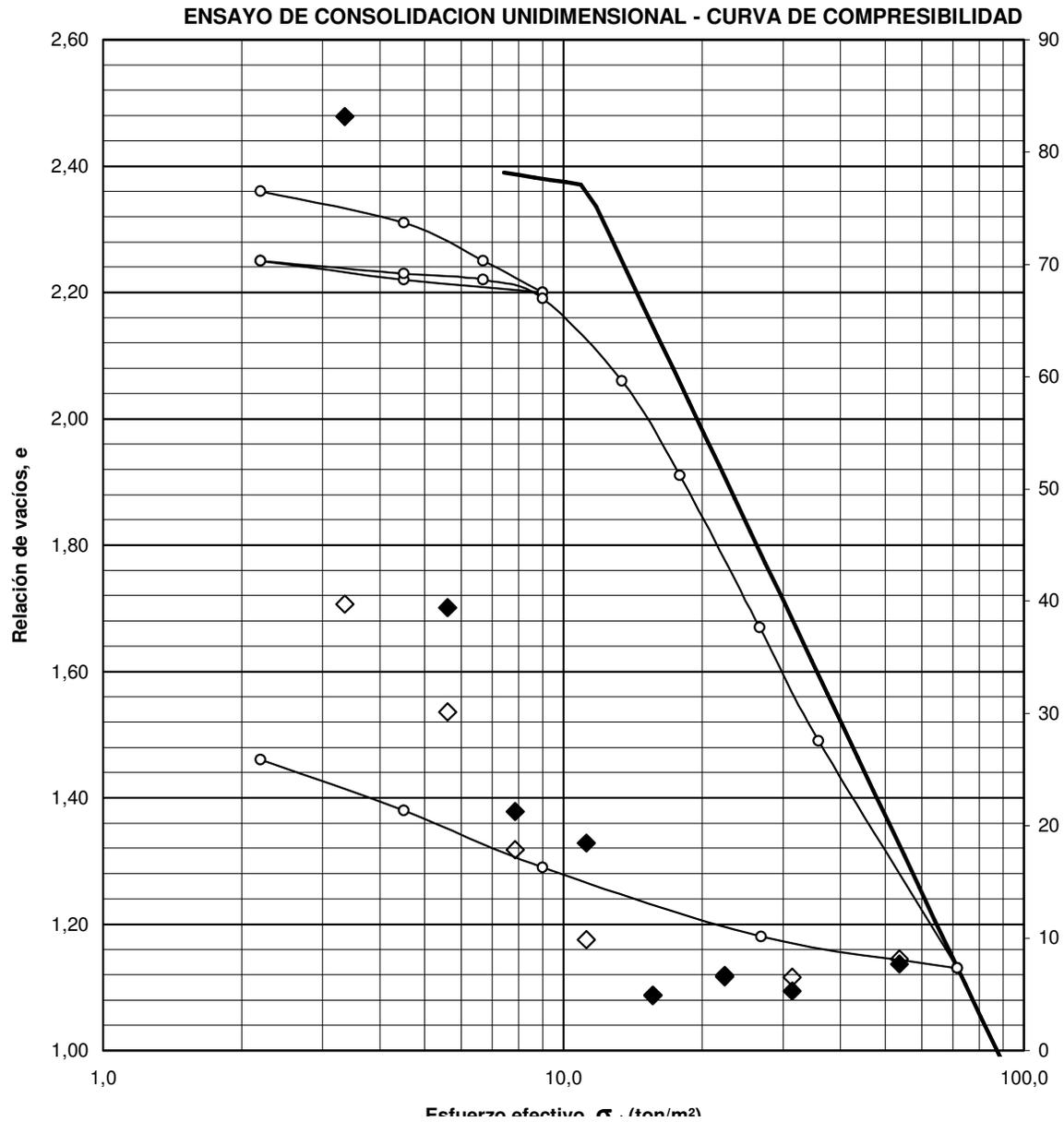


Figura 51



PERFORACION N° :	B-2
MUESTRA N° :	M-4
PROFUNDIDAD (m) :	5,00 - 5,8 m
DESCRIPCION :	ARCILLA café grisácea
HUMEDAD NATURAL (%) :	108
LIMITE LIQUIDO :	214
LIMITE PLASTICO :	66
INDICE DE LIQUIDEZ :	27,90
PESO UNITARIO (ton/m^3) :	1,400
RELACION DE VACIOS, e_0 :	2,810
PESO ESPECIFICO G_s :	2,580
ESFUERZO EFECTIVO VERTICAL INICIAL σ'_o (ton/m^2) :	3,90
ESFUERZO DE PRECONSOLIDACION σ'_p (ton/m^2) :	21,50
RELACION DE SOBRECONSOLIDACION (RSC) :	5,51
INDICE DE COMPRESION C_c :	1,575
INDICE DE RECOMPRESION C_r :	0,233
COEFICIENTE DE CONSOLIDACION (C_v [$\text{cm}^2/\text{día}$])	
Taylor - $C_v 90$: \blacklozenge	VALOR ZONA: NC: 7,5
Casagrande - $C_v 50$: \diamond	SC: 45,0
RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA, C_u (ton/m^2):	
Penetrómetro de bolsillo:	4,5
Veleta de laboratorio:	3,5

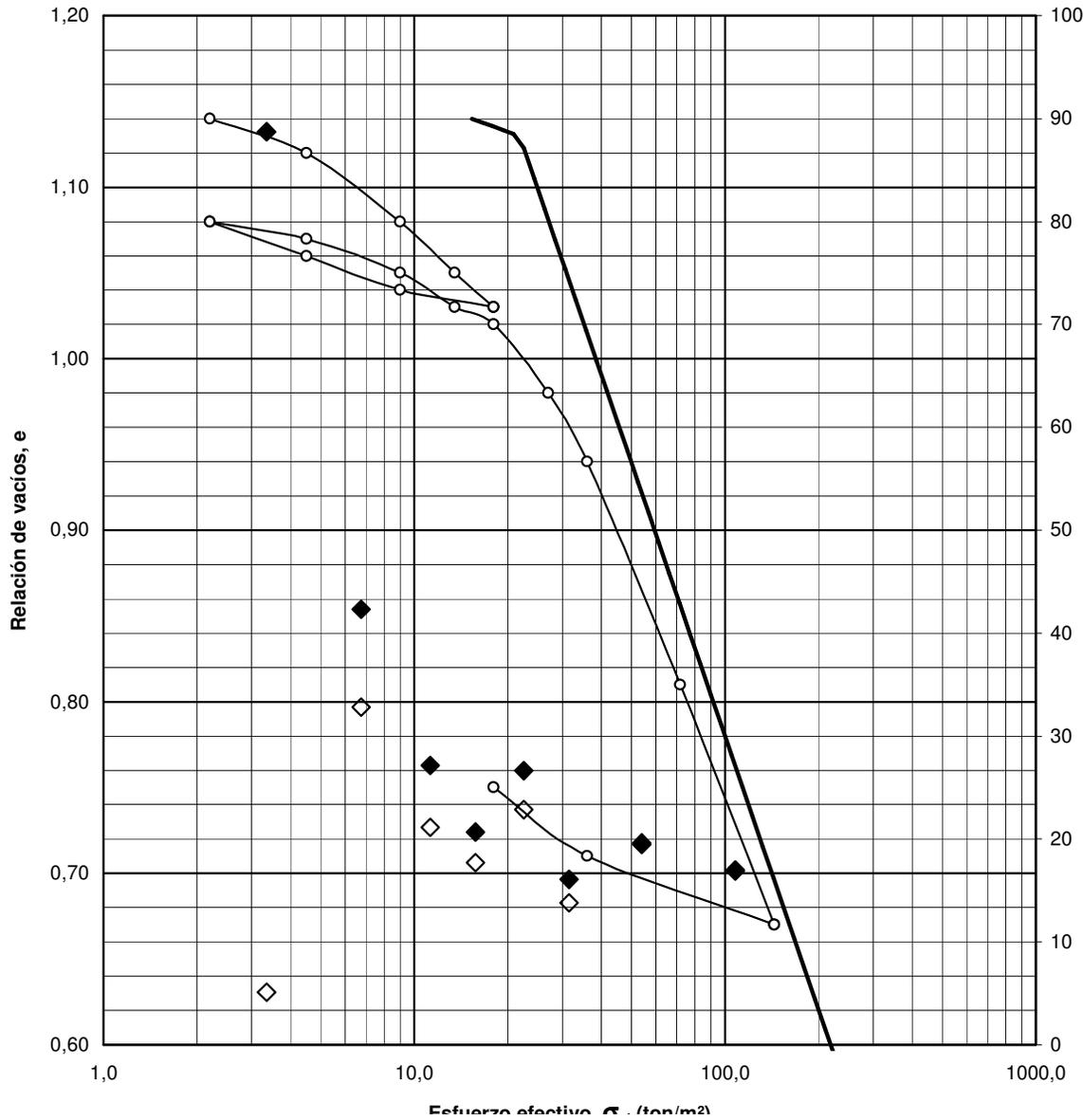
Figura 52



PERFORACION N° :	B-2
MUESTRA N° :	M-11
PROFUNDIDAD (m) :	15,50 - 16,2 m
DESCRIPCION :	ARCILLA café
HUMEDAD NATURAL (%) :	90
LIMITE LIQUIDO :	116
LIMITE PLASTICO :	34
INDICE DE LIQUIDEZ :	68,60
PESO UNITARIO (ton/m ³) :	1,460
RELACION DE VACIOS, e_0 :	2,390
PESO ESPECIFICO G_s :	2,600
ESFUERZO EFECTIVO VERTICAL INICIAL σ'_0 (ton/m ²) :	7,42
ESFUERZO DE PRECONSOLIDACION σ'_p (ton/m ²) :	11,20
RELACION DE SOBRECONSOLIDACION (RSC) :	1,51
INDICE DE COMPRESION C_c :	1,535
INDICE DE RECOMPRESION C_r :	0,118
COEFICIENTE DE CONSOLIDACION (C_v [cm ² /día])	
Taylor - $C_v 90$: \blacklozenge	VALOR ZONA: NC: 7,0
Casagrande - $C_v 50$: \diamond	SC: 30,0
RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA, C_u (ton/m ²):	
Penetrómetro de bolsillo:	1,6
Veleta de laboratorio:	2,3

Figura 53

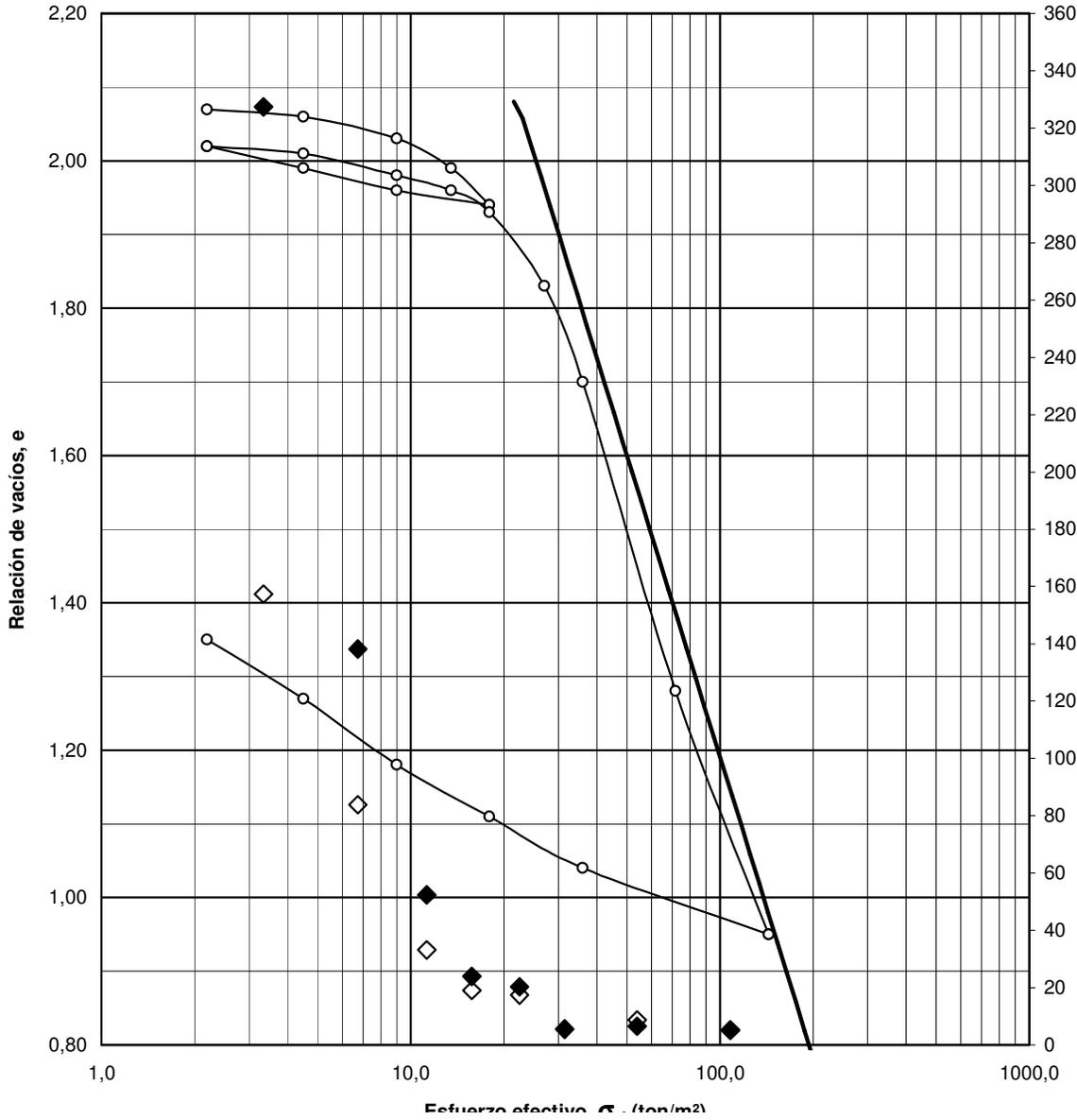
ENSAYO DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL - CURVA DE COMPRESIBILIDAD



PERFORACION N°:	B-2
MUESTRA N°:	M-19
PROFUNDIDAD (m):	36,00 - 36,70 m
DESCRIPCION:	ARCILLA café con planos grises
HUMEDAD NATURAL (%):	46
LIMITE LIQUIDO:	71
LIMITE PLASTICO:	30
INDICE DE LIQUIDEZ:	39,10
PESO UNITARIO (ton/m³):	1,790
RELACION DE VACIOS, e ₀ :	1,140
PESO ESPECIFICO G _s :	2,640
ESFUERZO EFECTIVO VERTICAL	
INICIAL σ' _o (ton/m²):	15,36
ESFUERZO DE PRECONSOLIDACION	
σ' _p (ton/m²):	21,90
RELACION DE SOBRECONSOLIDACION (RSC):	1,43
INDICE DE COMPRESION	
C _c :	0,530
INDICE DE RECOMPRESION	
Cr:	0,066
COEFICIENTE DE CONSOLIDACION (C _v [cm²/día])	
Taylor - C _v 90: ◆	VALOR ZONA: NC: 17,0
Casagrande - C _v 50: ◇	SC: 30,0
RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA, C _u (ton/m²):	
Penetrómetro de bolsillo:	2,6
Veleta de laboratorio:	2,5

Figura 54

ENSAYO DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL - CURVA DE COMPRESIBILIDAD



PERFORACION N° :	B-1
MUESTRA N° :	M-27
PROFUNDIDAD (m) :	55,00 - 55,7 m
DESCRIPCION :	ARCILLA limosa gris
HUMEDAD NATURAL (%) :	79
LIMITE LIQUIDO :	111
LIMITE PLASTICO :	44
INDICE DE LIQUIDEZ :	51,60
PESO UNITARIO (ton/m ³) :	1,510
RELACION DE VACIOS, e_0 :	2,080
PESO ESPECIFICO G_s :	2,600
ESFUERZO EFECTIVO VERTICAL	
INICIAL σ'_o (ton/m ²) :	21,54
ESFUERZO DE PRECONSOLIDACION	
σ'_p (ton/m ²) :	22,30
RELACION DE SOBRECONSOLIDACION (RSC) :	1,04
INDICE DE COMPRESION	
C_c :	1,360
INDICE DE RECOMPRESION	
C_r :	0,177
COEFICIENTE DE CONSOLIDACION (C_v [cm ² /día])	
Taylor - $C_v 90$: ◆	VALOR ZONA: NC: 8,0
Casagrande - $C_v 50$: ◇	SC: 100,0
RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA, C_u (ton/m ²):	
Penetrómetro de bolsillo:	4,5
Veleta de laboratorio:	3,6

Figura 55

VARIACION DE PARAMETROS DE COMPRESIBILIDAD

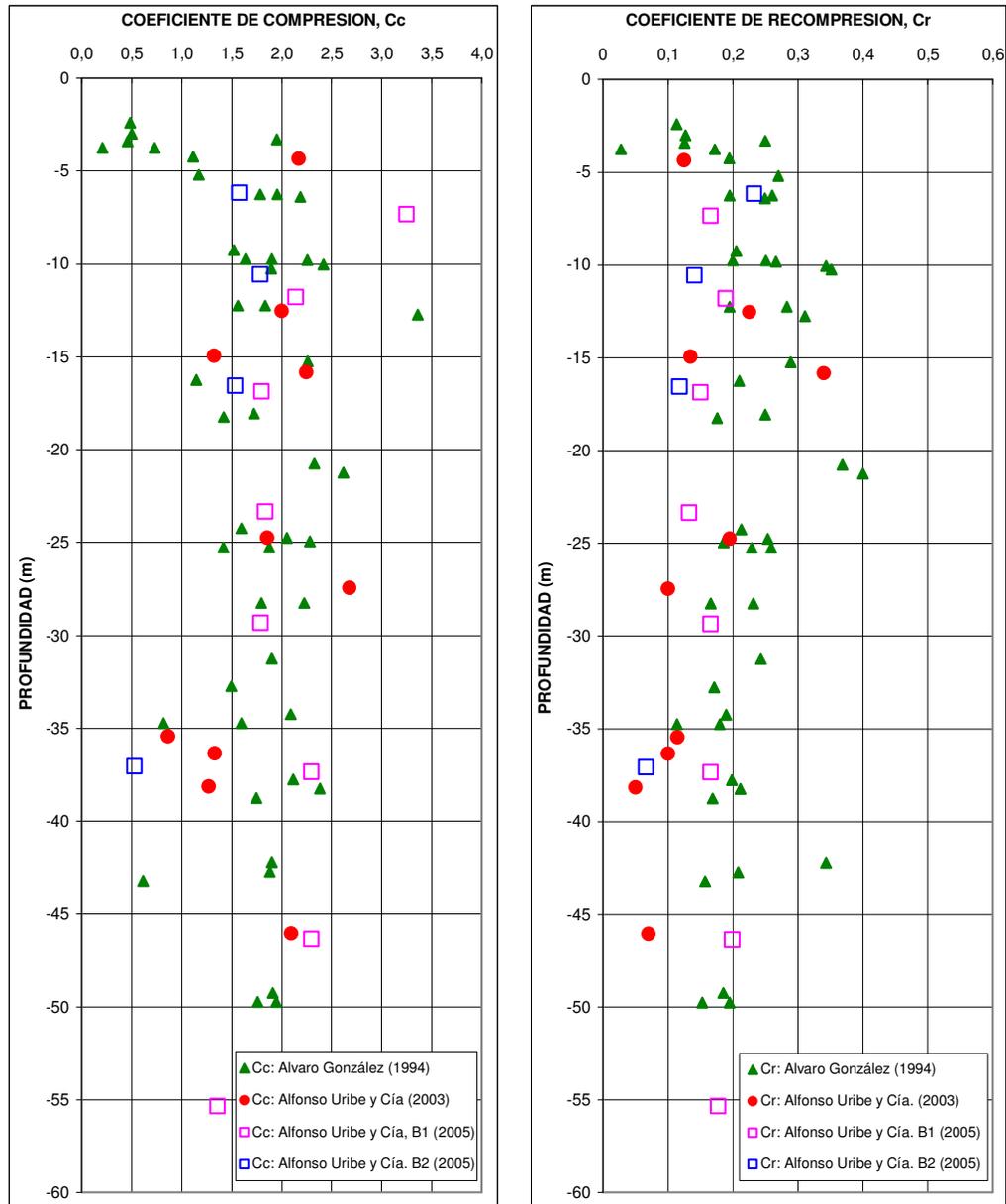


Figura 56

ENSAYOS DE PENETRACION ESTATICA CON CONO HOLANDES - CPT

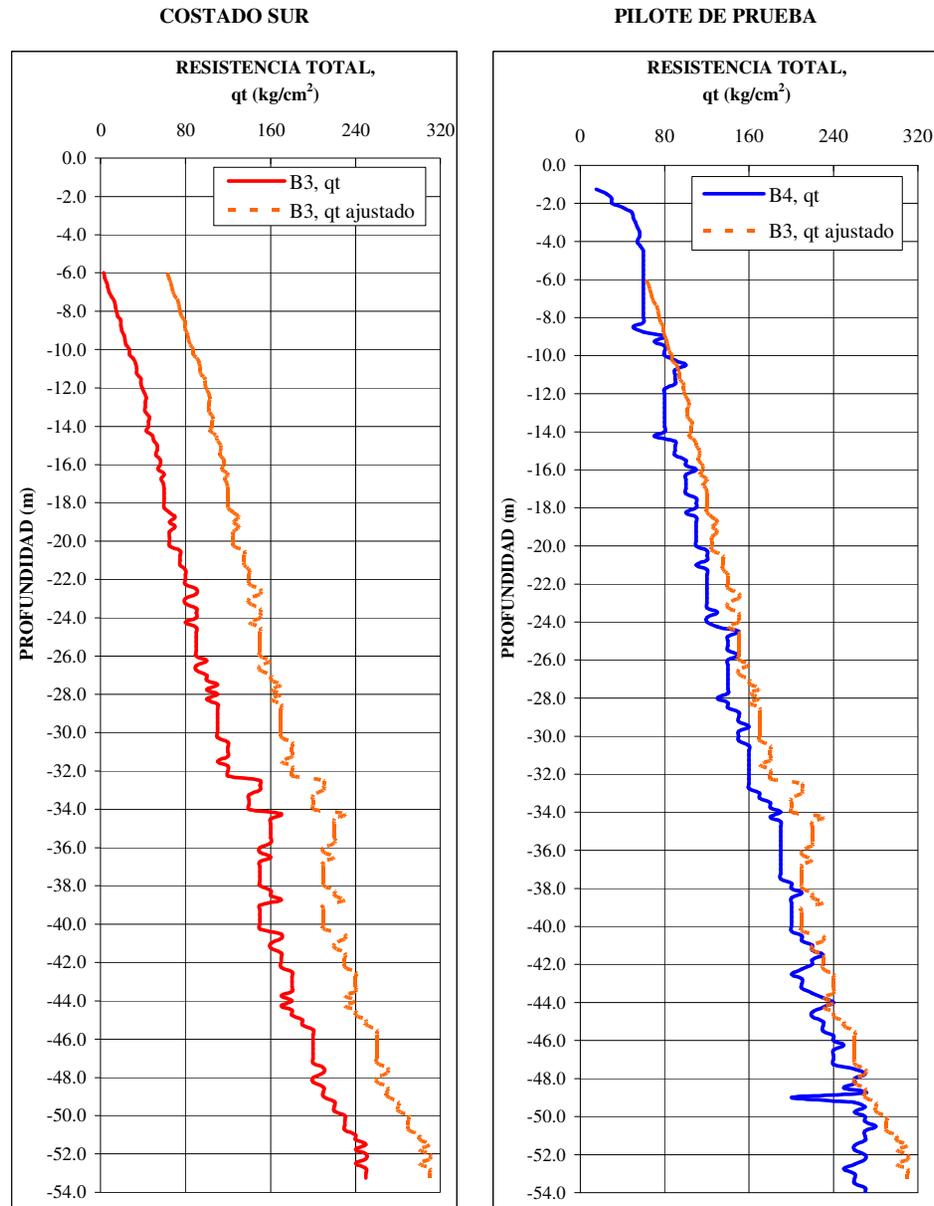


Figura 57

**CAPACIDAD PORTANTE DE PILOTES DE SECCION CUADRADA (HINCADOS)
(DATOS DE Cu ADOPTADOS PARA LA PERFORACION B1)**

B (m)	L_{EFFECTIVA} D (m)	P_{FU} (ton)	P_{BU} (ton)	W_{PILOTE} (ton)	P_{UN} (ton)
0,30	30	88,8	6,5	6,5	88,9
	35	106,7	8,1	7,6	107,2
	40	126,3	8,5	8,6	126,2
	45	146,0	9,9	9,7	146,2
0,35	30	103,6	8,9	8,8	103,7
	35	124,5	11,0	10,3	125,2
	40	147,4	11,6	11,8	147,2
	45	170,4	13,5	13,2	170,6

NOTAS:

$$P_{UN} = P_{FU} + (P_{BU} - W_{PILOTE})$$

Donde:

P_{UN} : Carga última neta del pilote

P_{FU} : Carga última por fricción (en el fuste) del pilote

P_{BU} : Carga última por la base del pilote

W_{PILOTE} : Peso propio del pilote

Figura 58

**CAPACIDAD PORTANTE DE PILOTES DE SECCION CUADRADA (HINCADOS)
(DATOS DE Cu ADOPTADOS PARA LA PERFORACION B2)**

B (m)	L_{EFFECTIVA} D (m)	P_{FU} (ton)	P_{BU} (ton)	W_{PILOTE} (ton)	P_{UN} (ton)
0,30	30	97,4	6,5	6,5	97,5
	35	116,4	8,4	7,6	117,3
	40	134,3	8,6	8,6	134,3
	45	154,6	9,7	9,7	154,5
0,35	30	113,7	8,9	8,8	113,8
	35	135,8	11,5	10,3	137,0
	40	156,7	11,8	11,8	156,7
	45	180,3	13,2	13,2	180,3

NOTAS:

$P_{UN} = P_{FU} + (P_{BU} - W_{PILOTE})$ Donde:

P_{UN} : Carga última neta del pilote

P_{FU} : Carga última por fricción (en el fuste) del pilote

P_{BU} : Carga última por la base del pilote

W_{PILOTE} : Peso propio del pilote

Figura 59

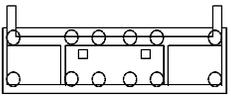
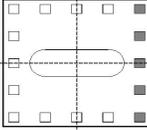
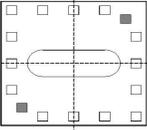
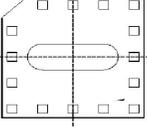
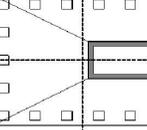
TIPO DE PILA	EJE	PILOTES				CARGAS DE LA SUPERESTRUCTURA												
		Total	Tipos			Cargas M y V		Cargas de Sismo										
			Total	B (m)	Le (m)	Estática		Combinación Crítica	Valores extremos		Promedio							
						Prom.	Total		Mayor	Menor	Máximos	Mínimos						
	1	12	4	0.35	19	52.2	316.6											
			8	0.35	41													
	15	12	4	0.35	19.00	59.4	255.1											
			8	0.35	36.00													
Estribo (Ejes 1 y 15)																		
	2	16	16	0.35	40.00	64.6	1034.2	3	CM	100%	X	97.6	-8.5	91.7	0.1			
	3	16	16	0.35	38.00	59.4	950.8	3	CM	100%	X	91.7	-11.0	87.2	-4.2			
	4	16	16	0.35	39.00	64.3	1029.1	3	CM	100%	X	93.4	-5.4	86.8	3.8			
	7	16	11	0.35	40.00	62.7	1002.9	6	CM	100%	Y	118.5	-30.9	105.1	-12.6			
			5	0.35	44.00													
	8	16	16	0.35	39.00	58.2	931.3	6	CM	100%	Y	105.1	-24.6	81.6	3.3			
	10	16	16	0.35	39.00	60.0	960.3	5	CM	100%	X	87.3	-4.9	81.6	3.2			
	11	16	16	0.35	39.00	61.7	986.5	3	CM	100%	X	88.2	-1.5	85.0	3.1			
	12	16	16	0.35	39.00	62.2	995.4	5	CM	100%	X	92.1	-7.7	84.5	2.3			
	13	16	16	0.35	38.00	60.0	959.9	5	CM	100%	X	84.8	-0.1	82.4	1.1			
Pilas 2 a 4, 7 a 8, 10 a 14	14	16	16	0.35	37.00	56.8	908.8	5	CM	100%	X	88.6	-10.8	80.7	-0.6			
	5	16	16	0.35	40.00	63.9	1022.1	6	CM	100%	Y	115.6	-16.4	110.0	-16.1			
Pila 5																		
	9	16	4	0.35	42.00	60.2	903.6	3	CM	100%	X	115.1	-32.3	81.0	6.9			
12			0.35	39.00														
Pila 9																		
	6	18	5	0.35	42.00	57.5	1034.7	4	CM	100%	X	104.4	-18.2	96.6	-9.9			
2			0.35	40.60														
2			0.35	39.20														
2			0.35	37.80														
2			0.35	36.40														
5			0.35	35.00														
Pila 6																		

Figura 60

DETERMINACION MODULOS DE ELASTICIDAD

Módulos no drenados

$$E_u = \alpha * C_u$$

(Simons, 1957)

Site	$\frac{E_u}{s_u}$	Reference
Test embankment	40	Wilkes (1974)
Oil tanks, Arabian Gulf	50 - 70 (depending on factor of safety)	Meigh & Corbett (1970)
Skabo Office Building, Oslo	150	Simons (1957)
Turnhallen (Heavy) Drammen	190	Simons (1957)
Tank, Shellhaven	220	Bjerrum (1964)
Northeast Test Embankment, Boston	240	Lambe (1973) ^a
Preload test, Lagunillas	250	Lambe (1973) ^a
Preload test, Amuay	250	Lambe (1973) ^a
Loading test, Skå Edeby	340	Bjerrum (1964)
Storage tanks, South Portland	400	Liu and Dugan (1974)
Satellite antenna tower Fucino plains	450	D'Elia and Grisolia (1974)
Loading test, Fornebu	500	Bjerrum (1964)
Loading test, Åsrum	1000	Heg, Andersland & Rolfsen (1969)
Økernbråten, Oslo	1500	Simons (1963)
Loading test, Mastemyr	3000	Frimann Clausen (1969, 1970)

Figura 61

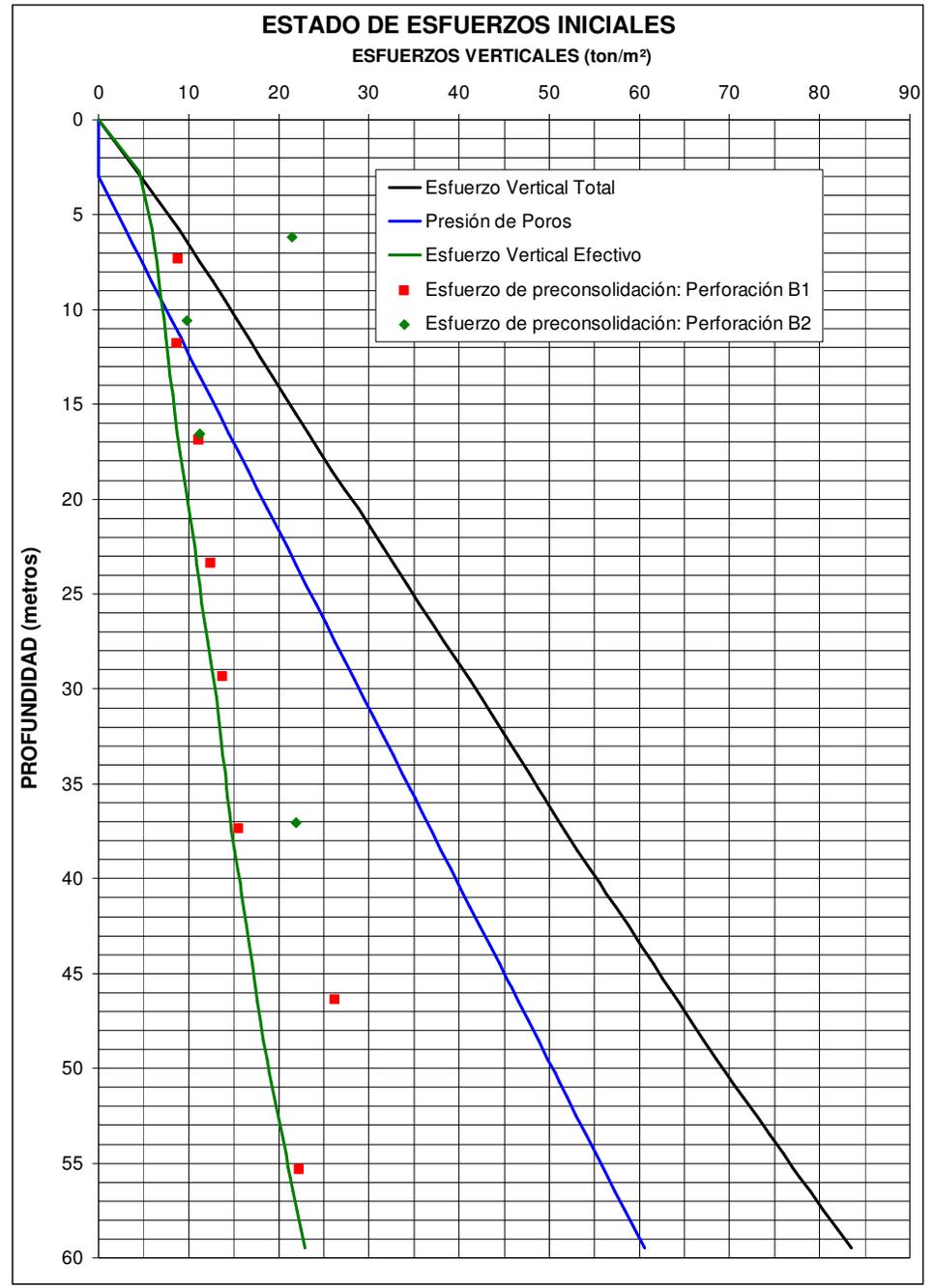
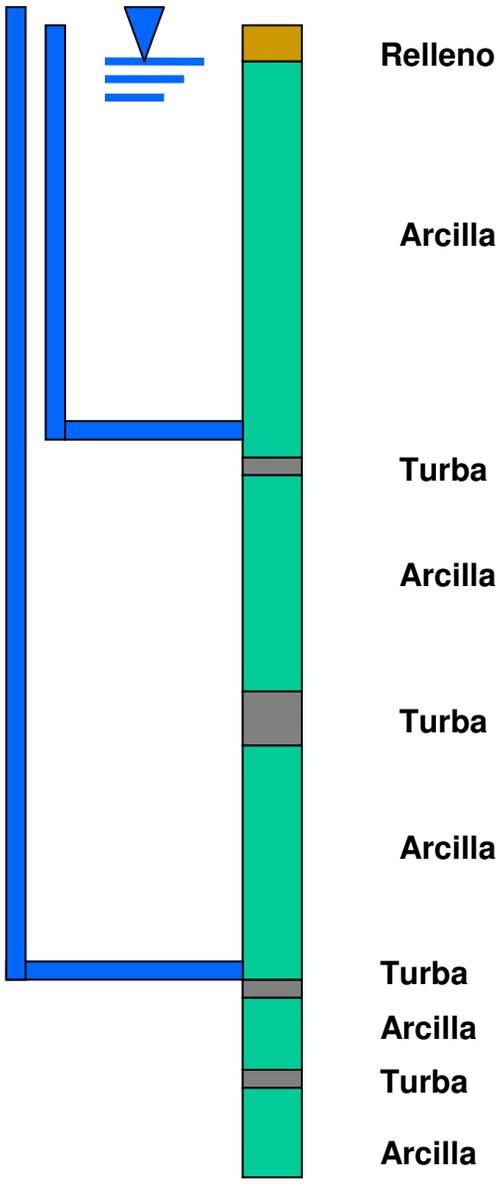


Figura 62

VARIACION DE PARAMETROS DE COMPRESIBILIDAD

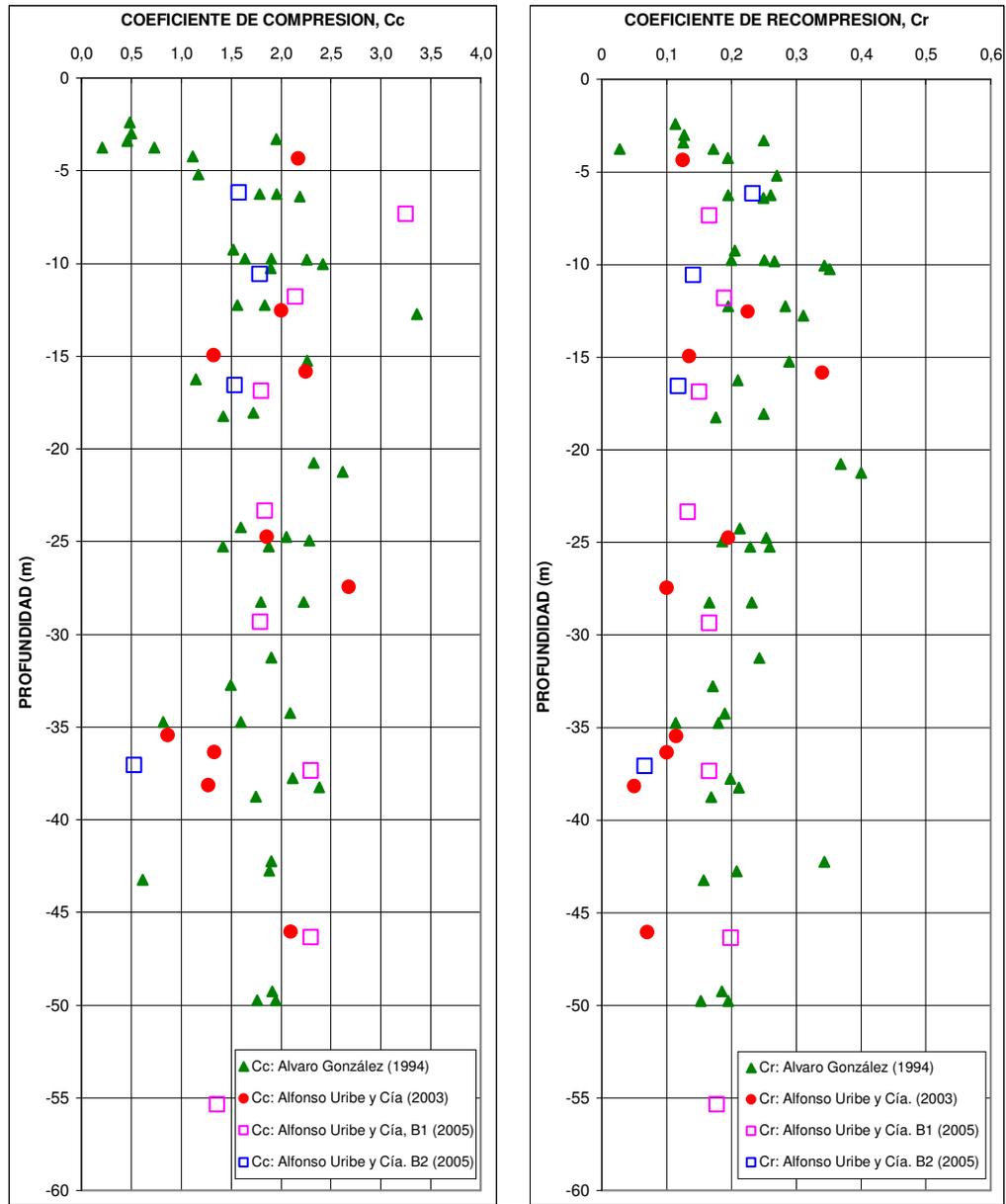


Figura 63

DETERMINACION MODULOS DE ELASTICIDAD

Módulos drenados obtenidos de ensayos de consolidación

$$m_{vSC} = \frac{0.434 * C_r}{(1+e_o) * \sigma'_{prom}} \quad m_{vNC} = \frac{0.434 * C_r}{(1+e_o) * \sigma'_{prom}}$$

$$\sigma'_{promSC} = \frac{\sigma'_p + \sigma'_{vf}}{2} \quad \sigma'_{promNC} = \frac{\sigma'_{vo} + \sigma'_p}{2}$$

$$E'_{1-D} = \frac{1}{m_v}$$

$$E'_{3-D} = E'_{1-D} \frac{(1-2\nu')(1+\nu')}{1-\nu'} \quad \nu' = 0.312$$

Figura 64

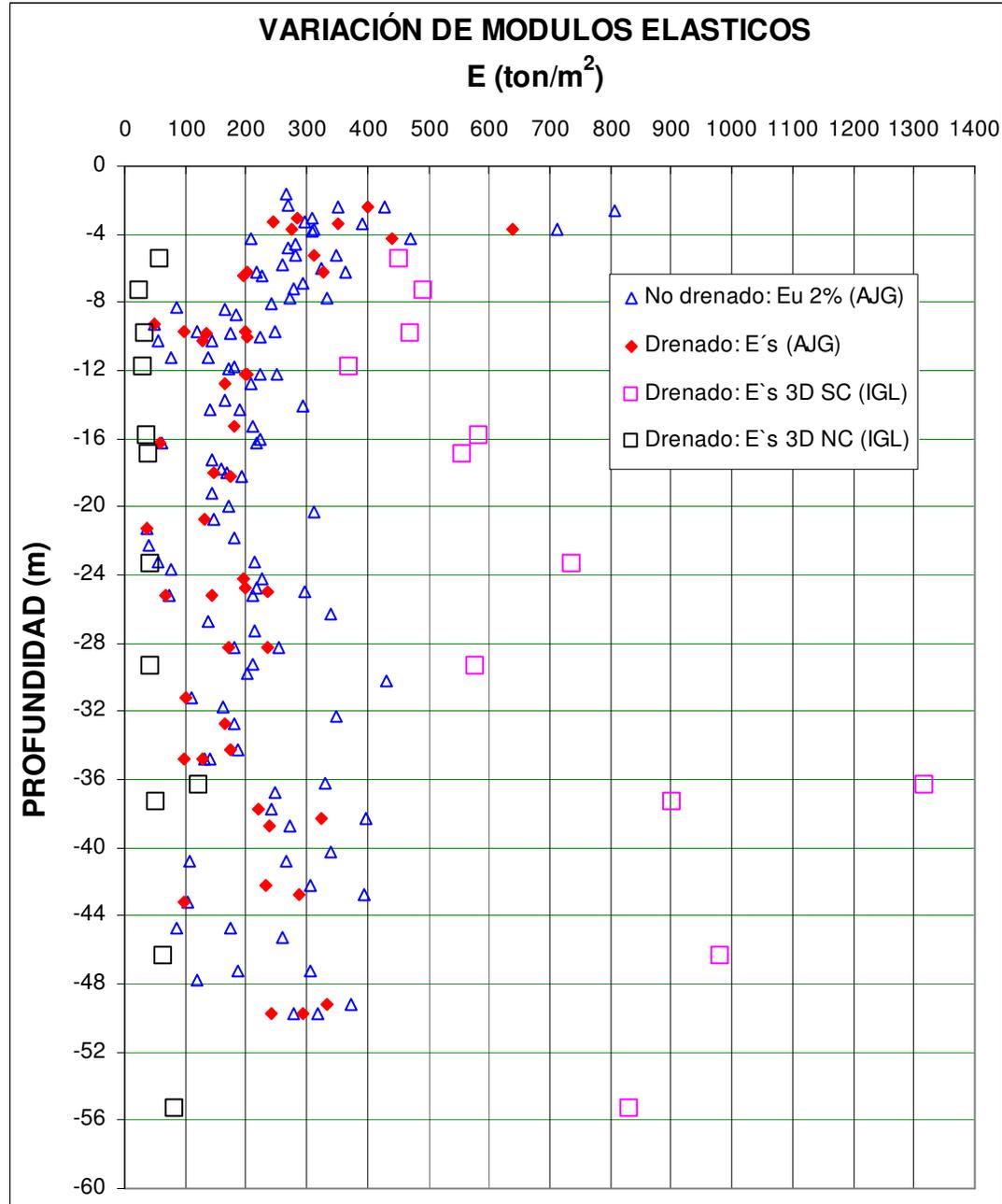


Figura 65

EVALUACION DEL SISTEMA CABEZAL - PILOTES

CASO 1 - PERFIL SOBRECONSOLIDADO CONSIDERANDO UNICAMENTE EL COEFICIENTE DE RECOMPRESION, Cr.

1. EVALUACION DE LA RIGIDEZ DE LA PLACA

ΔP_{NETO} (ton/m²) = 18,85

% PLACA	ΔP (ton/m ²)	δ_{INM} (mm)	δ_{TOTAL} (mm)	K_U (ton/m)	K_D (ton/m)
2,5	0,47	6,69	20,79	3452	1111
5,0	0,94	13,37	40,77	3454	1133
7,5	1,41	20,06	60,06	3453	1153
10,0	1,89	26,74	78,72	3454	1173
15,0	2,83	40,11	114,47	3454	1210
20,0	3,77	53,49	148,44	3454	1244
30,0	5,66	80,23	212,19	3454	1306
40,0	7,54	106,97	271,64	3454	1360
100,0	18,85	267,43	578,23	3454	1597

2. EVALUACION DE LA RIGIDEZ GRUPO DE PILOTES

% PILOTES	ΔP (ton/m ²)	ΔP_v (ton/m ²)	δ_{INM} (mm)	δ_{TOTAL} (mm)	$\delta_{INM CORR}$ (mm)	$\delta_{TOTAL CORR}$ (mm)	K_U (ton/m)	K_D (ton/m)
100,0	18,85	2,34	40,89	85,42	25,35	52,96	36433	17440
97,5	18,38	2,28	39,87	83,34	24,72	51,67	36431	17429
95,0	17,91	2,22	38,85	81,26	24,09	50,38	36429	17417
92,5	17,44	2,16	37,83	79,18	23,45	49,09	36427	17404
90,0	16,97	2,11	36,80	77,08	22,82	47,79	36434	17395
85,0	16,02	1,99	34,76	72,90	21,55	45,20	36430	17370
80,0	15,08	1,87	32,71	68,69	20,28	42,59	36436	17351
70,0	13,20	1,64	28,62	60,27	17,74	37,37	36437	17303
60,0	11,31	1,40	24,54	51,81	15,21	32,12	36424	17253

Figura 66

EVALUACION DEL SISTEMA CABEZAL - PILOTES

CASO 2 - PERFIL NORMALMENTE CONSOLIDADO (CURVA DE PRECONSOLIDACION ADOPTADA INICIALMENTE - VALORES MINIMOS DE RSC).

1. EVALUACION DE LA RIGIDEZ DE LA PLACA

$$\Delta P_{\text{NETO}} \text{ (ton/m}^2\text{)} = 18,85$$

% PLACA	ΔP (ton/m ²)	δ_{INM} (mm)	δ_{TOTAL} (mm)	K_{CU} (ton/m)	K_{CD} (ton/m)
2,5	0,47	6,69	14,18	3452	1628
5,0	0,94	13,37	28,04	3454	1647
7,5	1,41	20,06	55,25	3453	1254
10,0	1,89	26,74	92,98	3454	993
15,0	2,83	40,11	190,05	3454	729
20,0	3,77	53,49	300,29	3454	615
30,0	5,66	80,23	520,53	3454	532
40,0	7,54	106,97	751,46	3454	492
100,0	18,85	267,43	2037,32	3454	453

2. EVALUACION DE LA RIGIDEZ GRUPO DE PILOTES

% PILOTES	ΔP (ton/m ²)	ΔP_v (ton/m ²)	δ_{INM} (mm)	δ_{TOTAL} (mm)	$\delta_{\text{INM CORR}}$ (mm)	$\delta_{\text{TOTAL CORR}}$ (mm)	K_{PU} (ton/m)	K_{PD} (ton/m)
100,0	18,85	2,34	40,89	221,47	25,35	137,31	36433	6727
97,5	18,38	2,28	39,87	210,86	24,72	130,73	36431	6889
95,0	17,91	2,22	38,85	200,21	24,09	124,13	36429	7069
92,5	17,44	2,16	37,83	189,59	23,45	117,55	36427	7268
90,0	16,97	2,11	36,80	179,23	22,82	111,12	36434	7481
85,0	16,02	1,99	34,76	158,80	21,55	98,46	36430	7974
80,0	15,08	1,87	32,71	139,12	20,28	86,25	36436	8567
70,0	13,20	1,64	28,62	102,91	17,74	63,80	36437	10133
60,0	11,31	1,40	24,54	73,29	15,21	45,44	36424	12196

Figura 67

EVALUACION DEL SISTEMA CABEZAL - PILOTES

CASO 3 - PERFIL NORMALMENTE CONSOLIDADO CON CAPAS SOBRECONSOLIDADAS A PROFUNDIDADES INTERMEDIAS. VALORES MINIMOS Y MAXIMOS DE RSC OBTENIDOS DE ENSAYOS EN PERFORACIONES B1 Y B2.

1. EVALUACION DE LA RIGIDEZ DE LA PLACA

$$\Delta P_{\text{NETO}} \text{ (ton/m}^2\text{)} = 18,85$$

% PLACA	ΔP (ton/m ²)	δ_{INM} (mm)	δ_{TOTAL} (mm)	K_U (ton/m)	K_D (ton/m)
2,5	0,47	6,69	14,18	3452	1628
5,0	0,94	13,37	28,04	3454	1647
7,5	1,41	20,06	55,25	3453	1254
10,0	1,89	26,74	92,98	3454	993
15,0	2,83	40,11	190,05	3454	729
20,0	3,77	53,49	300,29	3454	615
30,0	5,66	80,23	520,53	3454	532
40,0	7,54	106,97	751,46	3454	492
100,0	18,85	267,43	2037,32	3454	453

2. EVALUACION DE LA RIGIDEZ GRUPO DE PILOTES

% PILOTES	ΔP (ton/m ²)	ΔP_v (ton/m ²)	δ_{INM} (mm)	δ_{TOTAL} (mm)	$\delta_{\text{INM CORR}}$ (mm)	$\delta_{\text{TOTAL CORR}}$ (mm)	K_U (ton/m)	K_D (ton/m)
100,0	18,85	2,34	40,89	192,08	25,35	119,09	36433	7756
97,5	18,38	2,28	39,87	183,24	24,72	113,61	36431	7927
95,0	17,91	2,22	38,85	174,37	24,09	108,11	36429	8116
92,5	17,44	2,16	37,83	165,52	23,45	102,62	36427	8325
90,0	16,97	2,11	36,80	156,94	22,82	97,30	36434	8543
85,0	16,02	1,99	34,76	140,10	21,55	86,86	36430	9039
80,0	15,08	1,87	32,71	124,02	20,28	76,89	36436	9610
70,0	13,20	1,64	28,62	95,08	17,74	58,95	36437	10968
60,0	11,31	1,40	24,54	71,37	15,21	44,25	36424	12524

Figura 68

ASENTAMIENTOS DEL SISTEMA DADO - PILOTES

Para estimar el comportamiento carga-asentamiento, se emplea el método de Randolph que permite estimar la distribución de carga entre pilotes y placa. Con esta aproximación, puede calcularse la rigidez de sistema cabezal-pilotes:

$$K_{cp} = \frac{K_p + K_c * (1 - \alpha_{cp})}{1 - \alpha_{cp}^2 * K_c / K_p}$$

donde:

K_{cp} = Rigidez del sistema cabezal pilotes

K_p = Rigidez del grupo de pilotes

K_c = Rigidez de la placa aislada

α_{cp} = Factor de interacción cabezal-pilotes.

Figura 69

DISTRIBUCION CARGA DADO - PILOTES

La proporción de la carga tomada por el dado P_c , con respecto a la carga total P_t , está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{P_c}{P_t} = \frac{K_r * (1 - \alpha_{cp})}{K_p + K_r (1 - \alpha_{cp})}$$

$$\alpha_{cp} = \frac{\ln(r_m / r_o)}{\ln(r_c / r_m)}$$

donde:

r_c = radio de la fracción de cabezal aferente al pilote.

r_o = radio del pilote

r_m = radio de influencia (aproximado a la longitud del pilote).

Figura 70

EVALUACION DEL SISTEMA CABEZAL - PILOTES

CASO 1 - PERFIL SOBRECONSOLIDADO CONSIDERANDO UNICAMENTE EL COEFICIENTE DE RECOMPRESION, Cr.

3. EVALUACION DE LA RIGIDEZ DEL SISTEMA

SUPOSICION		CORTO PLAZO			LARGO PLAZO		
% PLACA	% PILOTES	K_F (ton/m)	% PLACA	δ_{SISTEMA} (mm)	K_F (ton/m)	% PLACA	δ_{SISTEMA} (mm)
2,5	97,5	36763	2,98	25,12	17534	1,88	52,68
5,0	95,0	36761	2,98	25,13	17524	1,92	52,71
7,5	92,5	36759	2,98	25,13	17513	1,96	52,74
10,0	90,0	36766	2,98	25,12	17506	1,99	52,76
15,0	85,0	36762	2,98	25,12	17485	2,05	52,83
20,0	80,0	36768	2,98	25,12	17469	2,11	52,87
30,0	70,0	36769	2,98	25,12	17427	2,22	53,00
40,0	60,0	36756	2,98	25,13	17383	2,32	53,14

CONVENCIONES

- ΔP_{NETO} : Presión neta (máxima) para evaluación de asentamientos, aplicada a un cabezal cuadrado de 7 m de lado.
- % PLACA: Porcentaje de la presión aplicada que toma el cabezal cuadrado de 7 m de lado.
- ΔP : Presión aplicada a un cabezal cuadrado de 7 m de lado.
- δ_{INM} : Asentamiento inmediato calculado en el centro del cabezal o de la placa equivalente (grupo de pilotes).
- δ_{TOTAL} : Asentamiento total calculado en el centro del cabezal o de la placa equivalente (grupo de pilotes).
- K_{CU} : Rigidez del cabezal para una condición a corto plazo.
- K_{CD} : Rigidez del cabezal para una condición a largo plazo.
- % PILOTES: Porcentaje de la presión aplicada que toma el grupo de pilotes.
- ΔP_v : Presión virtual aplicada en una placa equivalente de 19,85 m de lado, a una profundidad igual a los 2/3 de la longitud efectiva de los pilotes.
- K_{PU} : Rigidez del grupo de pilotes para una condición a corto plazo.
- K_{PD} : Rigidez del grupo de pilotes para una condición a largo plazo.
- K_F : Rigidez combinada del sistema cabezal - pilotes.
- δ_{SISTEMA} : Asentamiento del sistema cabezal - pilotes.

Figura 71

EVALUACION DEL SISTEMA CABEZAL - PILOTES

CASO 2 - PERFIL NORMALMENTE CONSOLIDADO (CURVA DE PRECONSOLIDACION ADOPTADA INICIALMENTE - VALORES MINIMOS DE RSC).

3. EVALUACION DE LA RIGIDEZ DEL SISTEMA

SUPOSICION		CORTO PLAZO			LARGO PLAZO		
% PLACA	% PILOTES	K_F (ton/m)	% PLACA	$\delta_{SISTEMA}$ (mm)	K_F (ton/m)	% PLACA	$\delta_{SISTEMA}$ (mm)
2,5	97,5	36763	2,98	25,12	7058	6,55	130,87
5,0	95,0	36761	2,98	25,13	7240	6,47	127,58
7,5	92,5	36759	2,98	25,13	7394	4,90	124,92
10,0	90,0	36766	2,98	25,12	7578	3,82	121,88
15,0	85,0	36762	2,98	25,12	8044	2,67	114,82
20,0	80,0	36768	2,98	25,12	8626	2,12	107,08
30,0	70,0	36769	2,98	25,12	10183	1,56	90,70
40,0	60,0	36756	2,98	25,13	12242	1,20	75,45

CONVENCIONES

- ΔP_{NETO} : Presión neta (máxima) para evaluación de asentamientos, aplicada a un cabezal cuadrado de 7 m de lado.
- % PLACA: Porcentaje de la presión aplicada que toma el cabezal cuadrado de 7 m de lado.
- ΔP : Presión aplicada a un cabezal cuadrado de 7 m de lado.
- δ_{INM} : Asentamiento inmediato calculado en el centro del cabezal o de la placa equivalente (grupo de pilotes).
- δ_{TOTAL} : Asentamiento total calculado en el centro del cabezal o de la placa equivalente (grupo de pilotes).
- K_{CU} : Rigidez del cabezal para una condición a corto plazo.
- K_{CD} : Rigidez del cabezal para una condición a largo plazo.
- % PILOTES: Porcentaje de la presión aplicada que toma el grupo de pilotes.
- ΔP_v : Presión virtual aplicada en una placa equivalente de 19,85 m de lado, a una profundidad igual a los 2/3 de la longitud efectiva de los pilotes.
- K_{PU} : Rigidez del grupo de pilotes para una condición a corto plazo.
- K_{PD} : Rigidez del grupo de pilotes para una condición a largo plazo.
- K_F : Rigidez combinada del sistema cabezal - pilotes.
- $\delta_{SISTEMA}$: Asentamiento del sistema cabezal - pilotes.

Figura 72

EVALUACION DEL SISTEMA CABEZAL - PILOTES

CASO 3 - PERFIL NORMALMENTE CONSOLIDADO CON CAPAS SOBRECONSOLIDADAS A PROFUNDIDADES INTERMEDIAS. VALORES MINIMOS Y MAXIMOS DE RSC OBTENIDOS DE ENSAYOS EN PERFORACIONES B1 Y B2.

3. EVALUACION DE LA RIGIDEZ DEL SISTEMA

SUPOSICION		CORTO PLAZO			LARGO PLAZO		
% PLACA	% PILOTES	K_F (ton/m)	% PLACA	$\delta_{SISTEMA}$ (mm)	K_F (ton/m)	% PLACA	$\delta_{SISTEMA}$ (mm)
2,5	97,5	36763	2,98	25,12	8093	5,76	114,13
5,0	95,0	36761	2,98	25,13	8284	5,69	111,5
7,5	92,5	36759	2,98	25,13	8449	4,31	109,32
10,0	90,0	36766	2,98	25,12	8640	3,37	106,91
15,0	85,0	36762	2,98	25,12	9109	2,37	101,40
20,0	80,0	36768	2,98	25,12	9668	1,89	95,53
30,0	70,0	36769	2,98	25,12	11018	1,44	83,83
40,0	60,0	36756	2,98	25,13	12570	1,17	73,48

CONVENCIONES

- ΔP_{NETO} : Presión neta (máxima) para evaluación de asentamientos, aplicada a un cabezal cuadrado de 7 m de lado.
- % PLACA: Porcentaje de la presión aplicada que toma el cabezal cuadrado de 7 m de lado.
- ΔP : Presión aplicada a un cabezal cuadrado de 7 m de lado.
- δ_{INM} : Asentamiento inmediato calculado en el centro del cabezal o de la placa equivalente (grupo de pilotes).
- δ_{TOTAL} : Asentamiento total calculado en el centro del cabezal o de la placa equivalente (grupo de pilotes).
- K_{CU} : Rigidez del cabezal para una condición a corto plazo.
- K_{CD} : Rigidez del cabezal para una condición a largo plazo.
- % PILOTES: Porcentaje de la presión aplicada que toma el grupo de pilotes.
- ΔP_v : Presión virtual aplicada en una placa equivalente de 19,85 m de lado, a una profundidad igual a los 2/3 de la longitud efectiva de los pilotes.
- K_{PU} : Rigidez del grupo de pilotes para una condición a corto plazo.
- K_{PD} : Rigidez del grupo de pilotes para una condición a largo plazo.
- K_F : Rigidez combinada del sistema cabezal - pilotes.
- $\delta_{SISTEMA}$: Asentamiento del sistema cabezal - pilotes.

Figura 73

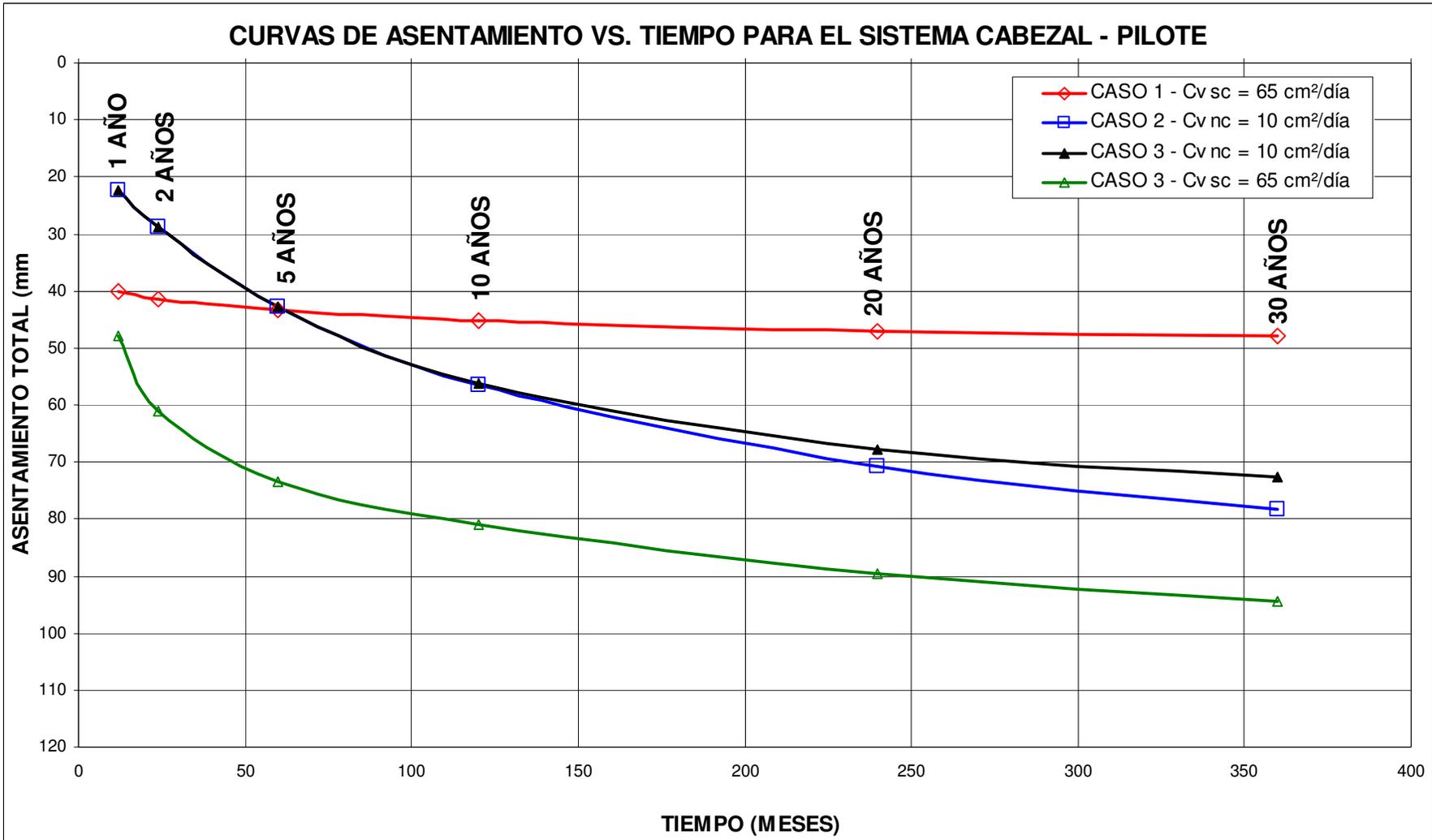


Figura 74

PRUEBA DE CARGA



Figura 75

PRUEBA DE CARGA



Figura 76

APOYO DE NEOPRENO



Figura 77

VISTA GENERAL



Figura 78

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1. El subsuelo del área de estudio es típico de la Formación Sabana. Está formado por un depósito de arcillas de alta plasticidad con intercalaciones de estratos orgánicos de poco espesor y eventuales lentes de arena hasta la profundidad explorada de 55 metros.**
- 2. El nivel freático aparece a una profundidad del orden de 2.0 metros. Las presiones de poros por debajo del nivel freático son superiores a la hidrostática debido a la presencia de acuíferos confinados que se encuentran a mayor profundidad de la explorada, con niveles piezométricos por encima de la superficie del terreno**
- 3. Los resultados de los ensayos de campo y laboratorio de los estudios iniciales y complementarios muestran variaciones significativas en dirección horizontal y vertical de las propiedades índice y parámetros de resistencia y compresibilidad. Los resultados de campo y laboratorio de la investigación complementaria del subsuelo permitieron reducir significativamente la alta dispersión de la información y adoptar una caracterización del subsuelo con parámetros más confiables. Sin embargo, deben esperarse algunas diferencias de comportamiento bajo las cargas de cimentaciones superficiales y profundas de estructuras localizadas en el área de estudio.**

4. Los registros de hinca de los pilotes de cimentación confirman los resultados de la variabilidad del subsuelo. Desafortunadamente no se llevó un registro de los niveles de energía utilizados durante la hinca y por lo tanto estos resultados no se pueden interpretar de una manera totalmente confiable.

5. Estudios anteriores realizados por diferentes Ingenieros Geotecnistas en el área conducen a valores similares de la capacidad portante admisible para los pilotes de cimentación adoptados.

6. Los criterios iniciales de diseño del puente y los análisis complementarios muestran que el sistema de cimentación adoptado cumple con los requisitos de estabilidad y deformación. Aunque el factor de seguridad obtenido para la condición más desfavorable del subsuelo se aparta de los criterios establecidos en el Código de Puentes, el sistema de cimentación adoptado presenta una reserva adicional de capacidad portante suministrada por el dado o cabezal de amarre del grupo de pilotes, la cual no fue tomada en cuenta en los diseños iniciales.

7. Los asentamientos medidos durante la etapa de construcción se encuentran dentro de los valores de los asentamientos inmediatos calculados.

8. Los resultados de los análisis de estabilidad y deformación del sistema combinado placa (cabezal) - pilotes se consideran dentro de los límites admisibles por la estructura. Para carga muerta más carga viva máxima y condiciones normales del suelo de fundación se obtuvieron factores de seguridad en el rango de 2.30 a 2.40 y para las condiciones más críticas encontradas en los estudios, el factor de seguridad se reduce a 1.60. Los resultados de los análisis de asentamientos indican asentamientos totales máximos en el rango de 50 a 110 mm y diferenciales entre pilas vecinas inferiores a 30 mm bajo condiciones normales y unos 40 mm bajo condiciones extremas más desfavorables y un tiempo de funcionamiento de 20 años.

9. Como resultado de todo lo anterior podemos concluir que el sistema de cimentación adoptado para los apoyos del puente de tercer nivel, cumple satisfactoriamente con los criterios de estabilidad y deformación para condiciones de carga muerta y carga viva máxima y para cargas extremas de sismo. El sistema inicialmente concebido para cada pila como un grupo de pilotes aislados unidos por un dado de amarre , en la realidad trabajará como un sistema combinado dado – pilotes interactuando con el suelo de fundación.

10. El criterio que controla el comportamiento de este sistema es el de asentamientos a corto y largo plazo, con una contribución de la placa relativamente pequeña, 3 a 6% de transmisión de las cargas estructurales directamente al suelo de fundación, en tanto que los pilotes transmitirán el 97 a 94% de las cargas a niveles más profundos del subsuelo. Bajo estas condiciones los pilotes trabajarán con factores de seguridad mas bajos, del orden de 2.3 a 2.4 para condiciones normales del suelo de fundación y de 1.6 para condiciones más desfavorables. Para el sistema se espera un asentamiento total máximo de unos 25 mm a corto plazo y de 50 a 110 mm a largo plazo. Los asentamientos diferenciales entre pilas vecinas son de unos 30 mm para condiciones normales del subsuelo y de unos 60 mm para condiciones extremas.

11. Sobre el comportamiento desfavorable del primer pilote de carga y que hasta el momento ha quedado sin una respuesta objetiva recomendamos agotar los últimos recursos, repitiendo la prueba de cono en la proximidad del pilote y realizando la prueba de integridad. Para alcanzar la cabeza del pilote recomendamos construir un caisson de 1.50 m de diámetro interno y de unos 6.0 m de profundidad. Para garantizar la estabilidad de la pared de la excavación se recomienda excavar tramos de 1.0 m por día y revestir con anillos de concreto reforzado ligeramente troncocónicos, de unos 0.10 m de espesor y del orden de 1.0 m de altura.

12. Sobre el comportamiento desfavorable del primer pilote de carga, hasta el momento ha quedado sin una respuesta. Si observamos el registro de hincas del pilote de prueba, en los últimos metros se presenta en dos niveles una reducción importante de los golpes por metro de penetración. Teniendo en cuenta que el subsuelo hasta la profundidad investigada de 55 m está formado predominantemente por una arcilla de origen lacustre cuya resistencia aumenta gradualmente con la profundidad, los cambios registrados al final de la hincas podrían indicar que el último tramo del pilote sufrió un desacople por algún defecto en la junta.

Los ensayos de integridad a partir del análisis de propagación de ondas de compresión indicaron que a 30 m de profundidad la onda no continuó propagándose. Sin embargo, por tratarse de las primeras experiencias en nuestro medio con pilotes seccionados y las limitaciones atribuibles al sistema, en particular una energía del impacto insuficiente para alcanzar los 40 m, el resultado no se consideró concluyente. Sin embargo el resultado de la primera prueba es el esperado para un pilote de la misma sección transversal pero de 30 m de longitud efectiva.

13. Se recomienda mantener un control de nivelaciones periódicas para medir los asentamientos inmediatos y retardados de cada una de las pilas. Es conveniente medir estos asentamientos en 4 puntos extremos de la sección transversal para evaluar también posibles desplomes. La mayor fuente de error en el caso actual está en la estabilidad del BM de referencia y en el error de cierre de las nivelaciones. Sugerimos aprovechar el primer pilote de prueba o los pilotes de reacción como BM's de referencia o de comprobación.

Durante construcción, las nivelaciones deben realizarse cada vez que se presente un cambio significativo en las cargas del puente y posteriormente, durante el funcionamiento del puente, las nivelaciones pueden hacerse más distanciadas. Los resultados de estas nivelaciones deben suministrarse en forma oportuna al ingeniero geotecnista para la interpretación de los resultados e informe correspondiente.