

ENSAYOS DE CARGA ESTÁTICOS DE COMPRESIÓN EN PILOTES DE HORMIGÓN MOLDEADOS EN SITIO.

Curva hiperbólica que mejor se ajusta a los valores medidos

Ingeniero Civil Arnoldo J. L. Bolognesi

La resistencia que ofrece el suelo a la carga (Q) aplicada en el pilote se desarrolla en la parte embebida del mismo por fricción lateral (R_F) y por reacción en la base (R_B). Para originar esta resistencia el pilote debe desplazarse. En un ensayo de carga con carga en la cabeza normalmente se miden la carga aplicada y el asentamiento en la cabeza. En las relaciones que se explican a continuación:

- 1) Si todo el pilote está embebido los valores así obtenidos se aplican directamente en las relaciones que se explican a continuación.
- 2) Cuando la parte superior del pilote no está soportada, como sucede, por ejemplo, en las fundaciones de los pilares de los puentes en el cauce de los ríos, la deformación elástica de esta longitud no soportada debe restarse de los valores de los asentamientos medidos en la cabeza para obtener los asentamientos a aplicar en las relaciones que se explican a continuación.
- 3) Los asentamientos en la base del pilote se calculan restando la deformación elástica de la longitud embebida ($L_{embebida}$) de los valores obtenidos en 1) o en 2) según corresponda y en pilotes no instrumentados estimando la reacción originada por dichos asentamientos. Para esta estimación es común utilizar la presión (q).

La relación entre el asentamiento relativo del pilote con respecto a la cota superior inicial del terreno en el cual está la parte embebida (δ_{se}) y la carga total aplicada a dicha cota (Q), o la resistencia creada por la fricción en las paredes laterales (R_F), se representa en ensayos de carga con un alto grado de precisión hasta la definición de la máxima resistencia utilizando la hipérbola adoptada por Kondner and Zelazko (1963) para la relación σ - ϵ .

$$\text{Asentamiento} / \text{Carga} = (a + b * \text{Asentamiento}) \quad (1)$$

o la resuelta para la Carga:

$$\text{Carga} = \text{Asentamiento} / (a + b * \text{Asentamiento}) \quad (2)$$

Estas mismas relaciones se aplican para la relación entre la reacción en la base (R_B) y los asentamientos relativos con respecto a la cota inferior inicial del terreno en el cual está la parte embebida.

$(a + b * \text{Asentamiento})$, es la ecuación de una línea recta $y = a + b * x$ en la que $x = \text{Asentamiento}$ e $y = (\text{Asentamiento} / \text{Carga})$. Si con los resultados de un ensayo de carga se obtiene aproximadamente una recta al representar la línea de los puntos que relacionan el **Asentamiento** de cada punto con el correspondiente valor del **Asentamiento / Carga**, la relación suelo pilote es hiperbólica. En caso contrario no lo es y para aceptarlo debe verificarse si no se ha cometido algún error en las mediciones.

La hipérbola es adecuada para el análisis de cargas y asentamientos hasta la carga de falla, en la cual comienza la fluencia. Las curvas carga – asentamiento de los pilotes moldeados en sitio definen dicha carga claramente en las arcillas que desarrollan la resistencia a la carga pero no lo hacen en las arenas, en las cuales es corriente establecerla arbitrariamente como la correspondiente a un asentamiento del 5% del diámetro (**D**). En la hipérbola para el asentamiento tendiendo a infinito es igual a $1/b$ (Kondner and Zelasko 1963).

Como ejemplo de la convergencia entre los valores medidos y los calculados mediante la ecuación 2 para la relación entre la carga total y el asentamiento relativo a la cota superior inicial del terreno en el cual está la parte embebida del pilote, se han elegido de publicaciones de la “American Society of Civil Engineers” y de la Sociedad Argentina de Ingeniería Geotécnica 6 ensayos de carga sobre pilotes en los que se utilizaron diferentes medios constructivos y en perfiles de suelo constituidos exclusivamente por arenas o por arcillas y en perfiles mixtos. En todos los casos hubo pequeñas diferencias entre los valores medidos y, en el rango en que las mismas son aplicables, los de las curvas hiperbólicas que mejor se ajustaron a dichos valores.

Los valores, para el análisis de estos 6 ensayos se obtuvieron, con la precisión que permite este proceder, de Figuras de artículos de los siguientes autores.

Brusey W. G. (2000). Figure 2, p. 26. Shaft DS-1 (non-grouted). *JFK International Airport*.

O’Neill Michael et al (2002). Figures 5 y 9, ps. 1294 y 1295. *Rosemberg test pile*.

Briaud J-L et al (2000). FIGs. 1(a), 5(b) y 7(a) ps. 640,642 y 644. *Pile 4. Texas A&M University*.

Bolognesi A. J. L. (2002). Figuras 1.1.1.1 y 1.1.1.2, p. 3. *Pilote 1 sin precarga. Chaco Corrientes*.

Briaud J-L et al (2000). FIGs. 1(b), 5(c) y 7(b) ps. 640,642 y 644. *Pile 7. Texas A&M University*.

Hay una diferencia entre las FIGs. 1(b) y 7(b). En 7(b) hay una capa de mínima resistencia entre los 4 m y algo más de los 8 m que no registra 1(b).

Thasnanipan N. et al (2002), Figures 1, 2, 6 y 7, ps. 1074, 1077, 1080 y 1081. *Bored Pile. Bangkok*.

Shaft DS-1 (non grouted). JFK International Airport

Shaft construido descendiendo y extrayendo camisa metálica por vibración.

Diámetro: 915 mm. Longitud: 18,30 m. Embebida: 18,30m. 3 a 5 m de arena refulada, 0-3 m de depósitos muy compresibles seguidos de arenas finas a medias, Dr promedio 40 a 60 %. Nivel del agua: 1,50m.

DATOS OBTENIDOS DE LA FIGURE 2 PARA SHAFT NUMBER : DS-1

Carga (kN)	0	1570	2450	2930	3250	3530	3784
Asent.(mm)	0	3,75	9,15	18,30	30,20	45,75	91,50

DETERMINACION DE COEFICIENTES a y b de SHAFT DS-1

A	B	C	D	E	F	G
Asent.(mm)	Asent. (%D)	As./Q(%D/kN) Medida	As./Q(%D/kN) Hiperbólica	Asent.(%D)	Carga (kN) Medida	Carga (kN) Hiperbólica
3,75	0,41	0,000261042	0,000276044	0,41	1570	1485
9,15	1,00	0,000408163	0,000422278	1,00	2450	2368
18,30	2,00	0,000682594	0,000670064	2,00	2930	2985
30,20	3,30	0,001015553	0,000992321	3,30	3250	3326
45,75	5,00	0,001416431	0,001413422	5,00	3530	3538
91,50	10,00	0,002642706	0,002652352	10,00	3784	3770

REGRESION LINEAL	b	0,000247786	a	0,000174492
COEF. DE CORRELACION ENTRE CARGA MEDIDA Y CARGA HIPERBÓLICA				0,9981181
Para asentamiento tendiendo a infinito el valor de la carga hiperbólica es: $1 / b = 4036$ kN				4036

El artículo no especifica que haya una longitud no soportada. Se estima que puede estimarse que es tan pequeña que su influencia puede despreciarse.

Los datos de la fila Asent. (mm) se reproducen en la columna **A** y los de la fila Carga (kN) en la columna **F**. En la columna **B** se transforma la unidad de medida de los asentamientos a % del diámetro del pilote. En la columna **C** se calculan los valores de (asentamiento / carga) para cada fila dividiendo los valores correspondientes de la columna **B** por los de la columna **F**. Con los datos de las columnas **C** y **B** se calculan los coeficientes **a** y **b** mediante una regresión lineal. Los valores de la columna **D** se obtienen mediante la aplicación de la fórmula (1). Los de la columna **G** mediante la aplicación de la fórmula (2) dividiendo los de la columna **E**, por los de la columna **D**.

La unidad %D se ha elegido por ser la generalmente adoptada en aplicaciones de estos cálculos y la kN por ser la de la mayoría de las publicaciones utilizadas. Es recomendable habituarse al uso indistinto de las unidades mm y %D para los asentamientos y kN y MN para las cargas.

El uso de abreviaciones, como As. o Asent. por Asentamiento o Q por Carga, se ha usado para poder presentar los cálculos en el ancho de una hoja.

La disposición de las columnas se estima la más conveniente para la marcha del cálculo y para la confección de las figuras para visualizar los resultados.

La Figura 1 se ha construido con los datos de las columnas B, C y D. La línea medida se ha calculado con los datos del ensayo de cargas (Columnas B y C). La de la hipérbolica (Columnas B y D) se ha calculado con la ecuación (1)

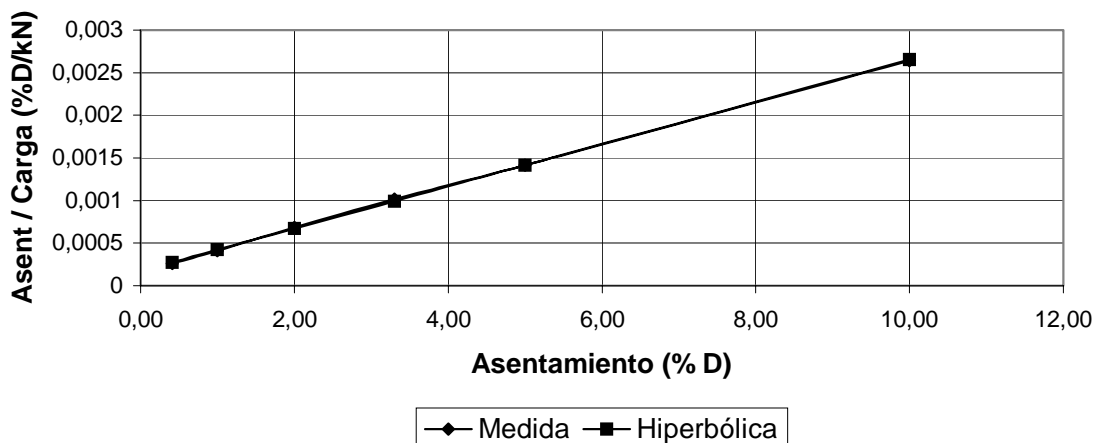


Figura 1. Shaft DS-1 (non-grouted). JFK International Airport. Líneas calculadas con valores medidos y con la hipérbola de la ecuación (1). Resultado: dos líneas rectas coincidentes.

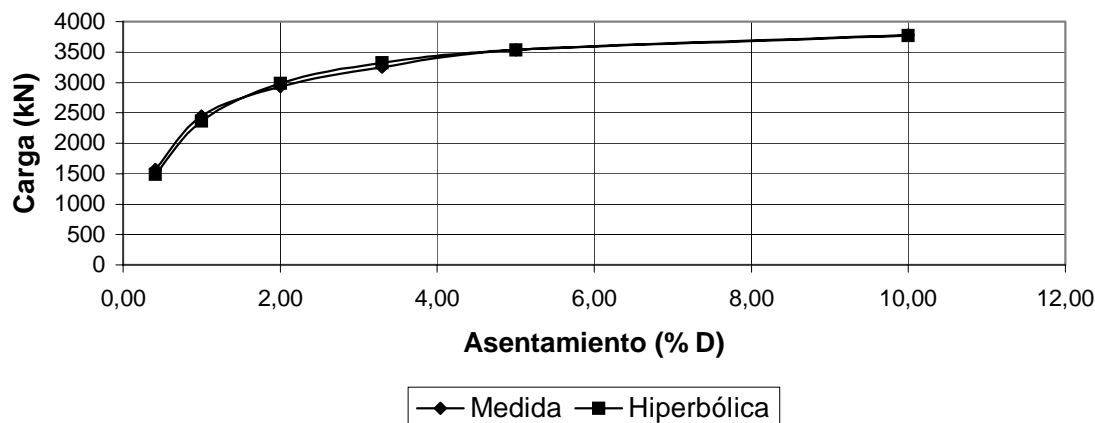


Figura 2. Shaft DS-1 (non-grouted). JFK International Airport. Curva medida, ensayo de carga, y calculada con la hipérbola de la ecuación (2). Resultado: Coeficiente de correlación entre la carga medida y la hiperbólica: 0.99811813.

La Figura 2. se ha construido con los datos de las columnas E, F y G. La curva medida es el ensayo de carga (Columnas E y F). La carga de la curva hiperbólica (Columnas E y G) se ha calculado con la ecuación (2)

Rosemberg test pile

Pile construida por el método "auger cast in place pile, ACIP".
 Diámetro: 456 mm. Longitud: 9,1 m. Embebida: 9,1m. 0 a 3 m arcilla rígida a dura.
 3 a 9,1 m arena media densa a densa, húmeda no saturada.

DATOS OBTENIDOS DE LA FIGURE 9 PARA ROSEMBERG TEST PILE

Carga (kN)	0	900	1070	1260	1390	1430	1480	1500
Asent. (mm)	0,0	2,5	5,0	10,0	20,0	30,0	40,0	45,0

DETERMINACION DE COEFICIENTES a y b de ROSEMBERG TEST PILE

A		B		C		D		E		F		G	
Asent.(mm)		Asent.(%D)		As./Q(%D/kN)		As./Q(%D/kN)		Asent.Cab.(%D)		Carga (kN)		Carga (kN)	
				Medida		Hiperbólica				Medida		Hiperbólica	
2,5		0,55		0,000609162		0,000669659		0,55		900		819	
5,0		1,10		0,001024758		0,001020562		1,10		1070		1074	
10,0		2,19		0,001740462		0,001722367		2,19		1260		1273	
20,0		4,39		0,00315537		0,003125976		4,39		1390		1403	
30,0		6,58		0,004600662		0,004529586		6,58		1430		1452	
40,0		8,77		0,00592698		0,005933196		8,77		1480		1478	
45,0		9,87		0,006578947		0,006635		9,87		1500		1487	

REGRESION LINEAL	b	0,000640046	a	0,000318757
COEF. DE CORRELACION ENTRE CARGA MEDIDA Y CARGA HIPERBÓLICA				0,9945846
Para asentamiento tendiendo a infinito el valor de la carga hiperbólica es: $1 / b = 1562$ kN				1562

El artículo no especifica que haya una longitud no soportada. Se estima que puede estimarse que es tan pequeña que su influencia puede despreciarse.

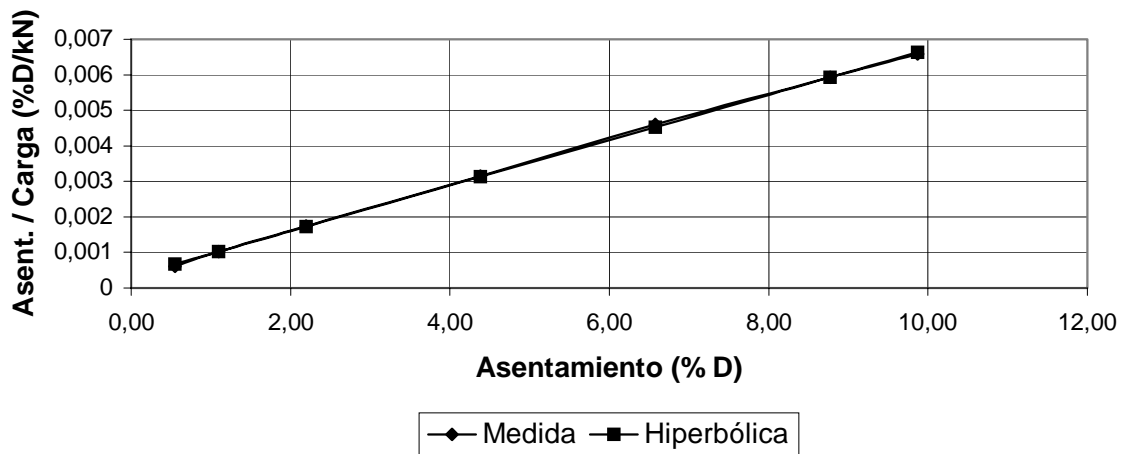


Figura 3. Rosenberg test pile. Líneas calculadas con valores medidos y con la hipérbola de la ecuación (1). Resultado: dos líneas rectas coincidentes.

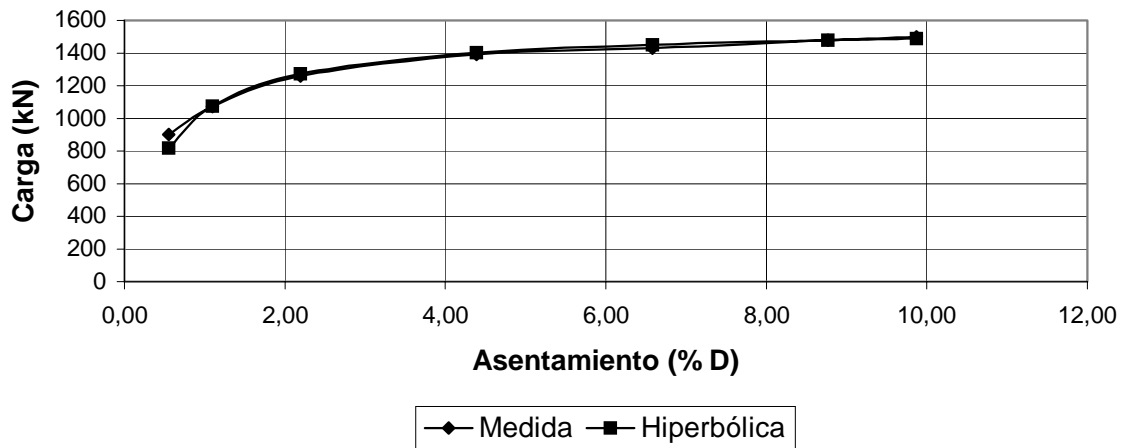


Figura 4. Rosenberg test pile. Curva medida, ensayo de carga, y calculada con la hipérbola de la ecuación (2). Resultado: Coeficiente de correlación entre la carga medida y la hiperbólica: 0.99458459

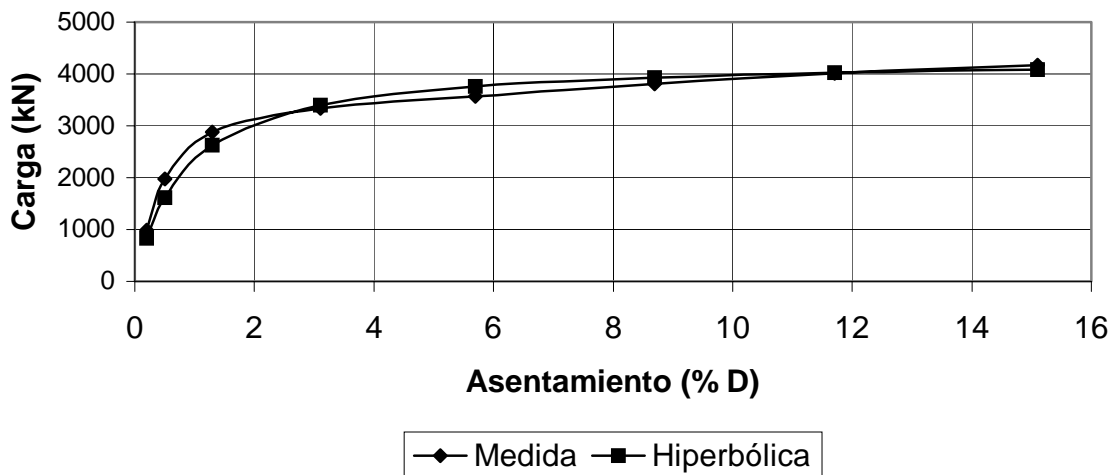


Figura 6. Pile 4 Texas A&M University. Curva medida, ensayo de carga, y calculada con la hipérbola de la ecuación (2). Resultado: Coeficiente de correlación entre la carga medida y la hiperbólica: 0,9880980

Pilote 1 sin precarga. Chaco Corrientes

Este caso es una utilización de las posibilidades de aplicar los valores **a** y **b** de la hipérbola elegida que mejor se adaptan a los valores medidos.

En pilotes (piles) o shafts del orden de 500 mm de diámetro es fácilmente posible llevar los ensayos de carga en arena a asentamientos del orden del 5% del diámetro, como es de práctica frecuente. Pero en pilotes de gran diámetro valores menores son suficientes para definir la hipérbola representativa del ensayo de carga en consideración. En este caso para un diámetro de 1800 mm lo fueron asentamientos del orden de 1,5% del diámetro. Para análisis que lo requieran, si el ensayo tiene un alto coeficiente de correlación entre la carga medida y la carga hiperbólica una vez calculados los valores de **a** y **b** puede determinarse la carga correspondiente a asentamientos interpolados entre y extrapolados menores y mayores que los representados en las Figuras 7 y 8. En este caso como se muestra en el cálculo presentado en la página 8 el ensayo terminó con un asentamiento del 1,44% del diámetro bajo una carga de 11346 kN. Extrapolando la hipérbola al 5% el valor correspondiente resultó 12995 kN.

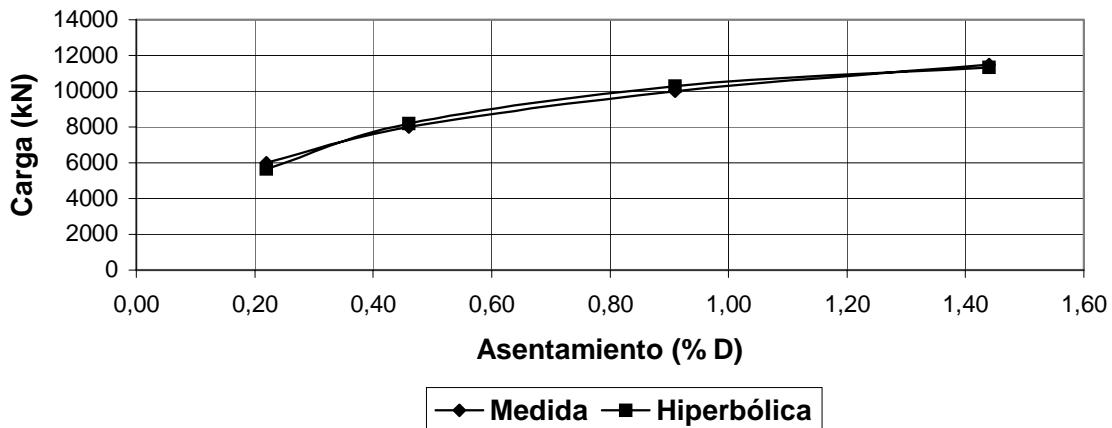


Figura 8. Pilote 1 sin precarga. Chaco Corrientes. Curva medida, ensayo de carga, y calculada con la hipérbola de la ecuación (2). Resultado: Coeficiente de correlación entre la carga medida y la hiperbólica:0,99394423

Pile 7. Texas A&M University

En este caso se presentan resultados en arcillas rígidas. Como ya se indicó en estas arcillas se define claramente la carga de falla. Utilizando los valores hasta dicha carga se calcularon los coeficientes **a** y **b** para la hipérbola. Existen valores medidos posteriores a la carga de falla y a los fines de comparaciones se extrapoló la hipérbola definida hasta dicha carga.

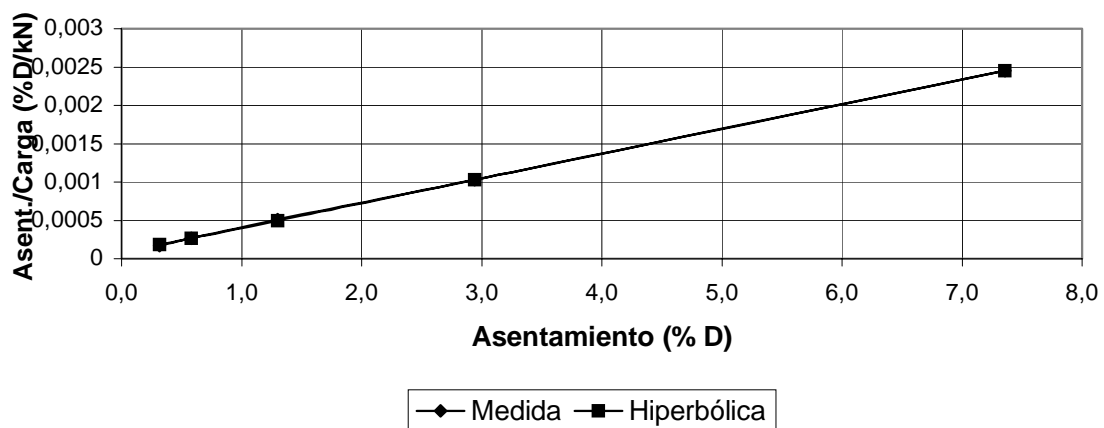


Figura 9. Pile 7. Texas A&M University. Líneas calculadas con valores medidos hasta el punto de falla y con la hipérbola de la ecuación (1). Resultado: dos líneas rectas coincidentes.

Pile construida excavando en seco.

Diámetro: 915 mm. Longitud: 10,70 m. Embebida: 9,50. Arcillas muy rígidas con una delgada capa de arena a 6 metros bajo el nivel del terreno natural, según Fig. 1. (b).

Nivel del agua: 6,00 m bajo el nivel del terreno.

DETERMINACION DE LOS ASENTAMIENTOS A APLICAR. Las cargas y asentamientos de las dos primeras columnas han sido obtenidos de la Figure 5 (c) para Pile 7.

Carga (kN)	Asent.Cab.(mm)	Defor.Elástica Asentamiento			Carga (kN)
		No soport.(mm)	Soportada(mm)	Soport. (% D)	
0	0	0	0	0	0
711	0,80	0,04	0,8	0,1	711
1836	3,01	0,11	2,9	0,3	1836
2171	5,42	0,13	5,3	0,6	2171
2546	12,05	0,15	11,9	1,3	2546
2862	27,11	0,17	26,9	2,9	2862
3000	67,47	0,18	67,3	7,4	3000

Las Cargas y Asentamientos de las dos primeras columnas ha sido obtenidos de la FIG. 5. (c)

Deformación elástica parte no soportada para 5000 kN:
(5000 kN / 0,658 m²) / 25 GPa * 1 m = 0,3 mm

DETERMINACION DE COEFICIENTES a y b de PILE 7

A	B	C	D	E	F	G
Asent.(mm)	Asent. (%D)	Ast./Q(%D/kN) Medida	Ast./Q(%D/kN) Hiperbólica	Asent. (%D)	Carga (kN) Medida	Carga (kN) Hiperbólica
2,9	0,3	0,000172625	0,000181986	0,3	1836	1742
5,3	0,6	0,000266806	0,000266618	0,6	2171	2173
11,9	1,3	0,00051082	0,000499355	1,3	2546	2604
26,9	2,9	0,001027215	0,001028302	2,9	2862	2859
67,3	7,4	0,00245173	0,002452935	7,4	3000	2999

REGRESION LINEAL: $b = 0,000322658$ $a = 7,97232E-05$
COEF. DE CORRELACIÓN ENTRE CARGA MEDIDA Y CARGA HIPERBÓLICA: 0,9963111

ASENTAMIENTOS Y CARGAS POSTERIORES A LA FALLA

93	10,2	0,003359198	2961	3026
136	14,9	0,004875514	2862	3049

Reproducción de valores para confección de la Figura 10

Asent.(mm)	Asent.(%D)	Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)
		Medida	Med.Post Falla	Hiperbólica	Hip. Post F.
2,9	0,3	1836		1742	
5,3	0,6	2171		2173	
11,9	1,3	2546		2604	
26,9	2,9	2862		2859	
67,3	7,4	3000	3000	2999	2999
93	10,2		2961		3026
136	14,9		2862		3049

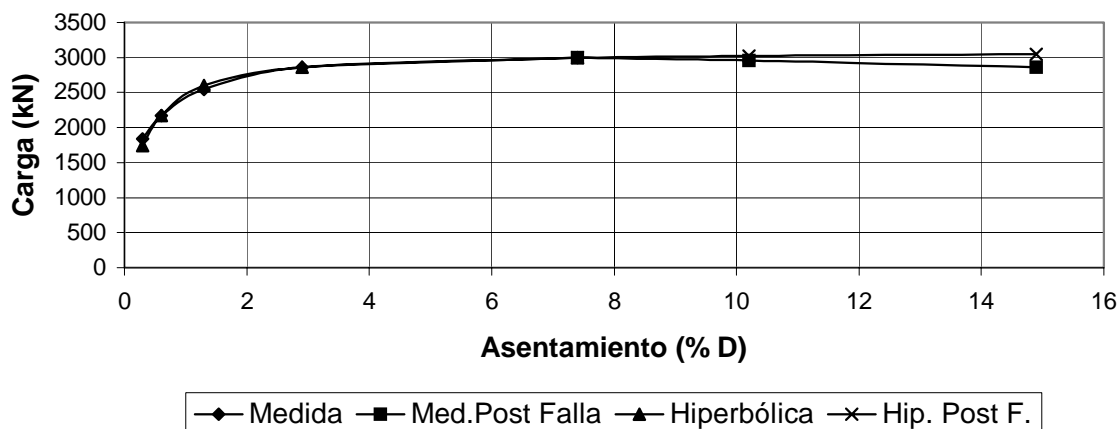


Figura 10. Pile 7. Texas A&M University. Curva medida, ensayo de cargas, y calculada con la hipérbola de la ecuación (2). Resultado: Coeficiente de correlación entre la carga medida y la hiperbólica hasta carga de falla: 0,99631105.

BORED PILE. Bangkok

En este caso se presentan resultados en un perfil mixto. El ensayo define claramente la carga de falla. Utilizando los valores hasta dicha carga se determinaron los coeficientes **a** y **b** para la hipérbola. Existen valores medidos posteriores a la carga de falla y a los fines de comparaciones se extrapola la hipérbola definida hasta dicha carga.

Pile construida excavando con lodo bentonítico. Con baja presión (20 kN/m²), precarga en la base en arena. Diámetro: 1500 mm Longitud: 57 m. Embebida en su totalidad con 13,5 m de arcilla blanda en su parte superior de mínima resistencia. Debajo, perfil mixto con aproximadamente 28,5 m de arcillas rígidas a duras y 15 m de arenas de densidad media a dura. Nivel de agua: aproximadamente 20 m.

DATOS OBTENIDOS DE LA FIGURE 6 PARA BORED PILE. Bangkok

Carga (kN)	8980	14701	20554	26275	26774	24778
Asent.(mm)	4,4	7,2	13,8	25,1	39,1	67,3

DETERMINACION DE COEFICIENTES **a** y **b** de BORED PILE. Bangkok

A	B	C	D	E	F	G
Asent.(mm)	Asent. (%D)	Medida	Hiperbólica	Asent. (%D)	Carga (kN) Medida	Carga (kN) Hiperbólica
4,4	0,29	3,26652E-05	3,04511E-05	0,29	8980	9633
7,2	0,48	3,26508E-05	3,4873E-05	0,48	14701	13764
13,8	0,92	4,47601E-05	4,5296E-05	0,92	20554	20311
25,1	1,67	6,36854E-05	6,31415E-05	1,67	26275	26501
		b	a			
REGRESION LINEAL:		2,36887E-05	2,35024E-05			
COEF. DE CORRELACION ENTRE CARGA MEDIDA Y CARGA HIPERBOLICA						0,9958183
ASENTAMIENTOS Y CARGAS POSTERIORES A LA FALLA						
39,1	2,61		8,52509E-05	2,61	26774	30576
67,3	4,49		0,000129786	4,49	24778	34570

Reproducción de valores para confección de la Figura 12

Asent.(mm)	Asent.(%D)	Carga (kN) Medida	Carga (kN) Med.Post Falla	Carga (kN) Hiperbólica	Carga (kN) Hip. Post F.
4,4	0,29	8980		9633	
7,2	0,48	14701		13764	
13,8	0,92	20554		20311	
25,1	1,67	26275	26275	26501	26501
39,1	2,61		26774		30576
67,3	4,49		24778		34570

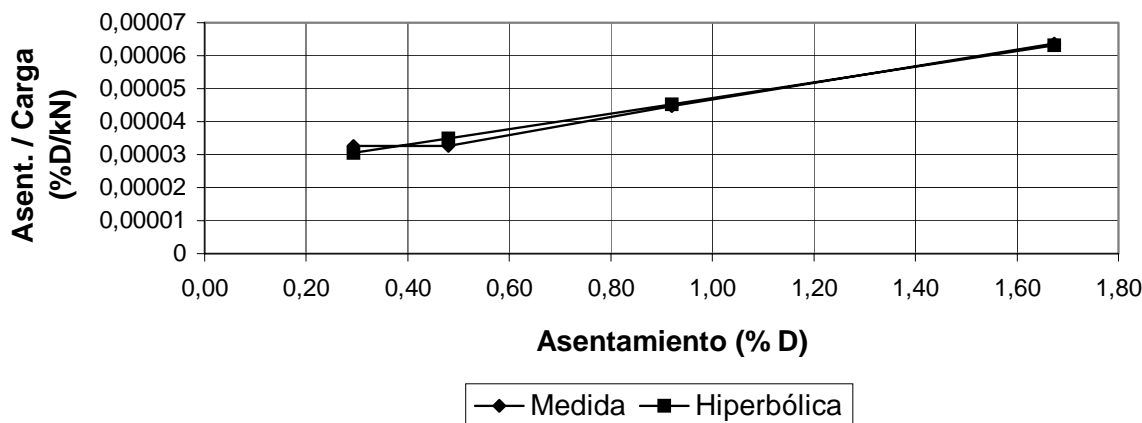


Figura 11. Bored Pile Bangkok. Líneas calculadas con valores medidos hasta el punto de falla y con la hipérbola de ecuación (1). Resultado: diferencia en los dos primeros valores. Ver las columnas F y G para precisar la magnitud de las diferencias en las cargas que la originaron.

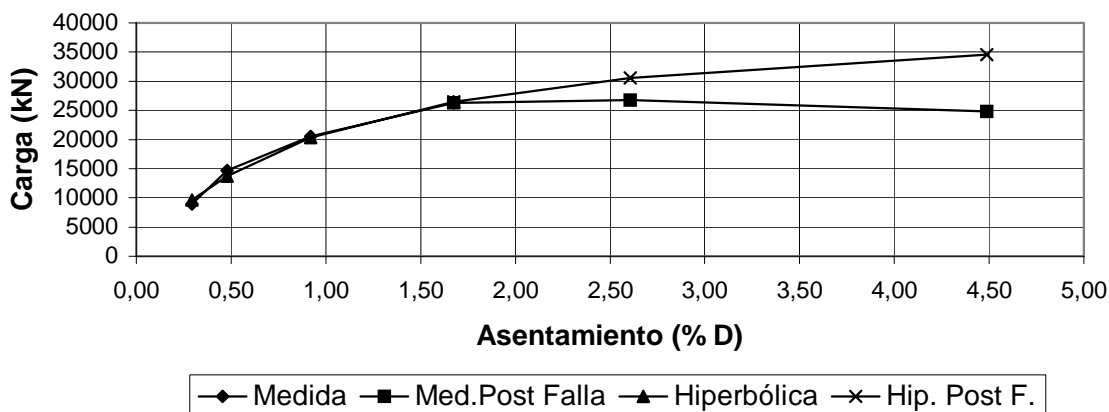


Figura 12. Bored Pile. Bangkok. Curva medida según ensayo de cargas y calculada con la hipérbola de la ecuación (2). Resultado: Coeficiente de correlación entre la carga medida y la hiperbólica hasta carga de falla: 0,9958183.

Resumen, Comentarios y Conclusiones

Si se opta por escribir las ecuaciones (1) y (2) de la página 1 utilizando las letras y símbolos indicados en la misma para representar las cargas y los asentamientos:

$$\delta_{se} / Q = a + b \delta_{se} \tag{1}$$

$$Q = \delta_{se} / (a + b \delta_{se}) \quad (2)$$

Para aplicar estas ecuaciones se han calculado los valores de **a** y **b** de 6 pilotes usando como unidad de δ_{se} el %D y de **Q** el kN. Si se desea efectuar los cálculos de aplicación usando mm como unidad de δ_{se} **b** no cambia y **a** debe multiplicarse por el número de mm que corresponden a 1% de D.

Si se desea efectuar los cálculos de aplicación usando MN como unidad de **Q**, **a** y **b**, calculados con **Q** en kN y δ_{se} en mm o %D según se haya optado se deben multiplicar por 1000.

O'Neill M. W. and Reese L. C (1999) han desarrollado todos los factores para la resistencia geotécnica bajo cargas axiales de compresión considerando como carga de falla para suelos granulares la correspondiente a un asentamiento del 5% del diámetro de la base. Esto es de aplicación en las arenas. En las arcillas la carga de falla se define con precisión y se alcanza con asentamientos no mayores de aproximadamente dicho 5%.

Este criterio se ha adoptado en las TABLAS 1 y 2, en las cuales todos los valores corresponden a la hipérbola que mejor se adapta a los medidos.

En la TABLA 1 se resumen los resultados obtenidos mediante los análisis presentados en este artículo.

TABLA 1. Resumen de resultados de análisis

	Shaft DS-1	Roseberg	Pile 4	Pilote 1	Pile 7	Bangkok
D (m)	0.915	0.456	0.915	1.800	0.915	1.500
L_{embecida} (m)	18.30	9.10	10.40	21.10	9.50	57.00
L_{embecida} / D	20.00	19.96	11.37	11.72	10.38	38.00
Perfil del suelo	Arena	Mixto	Arena	Arena	Arcilla	Mixto
δ_{se} ensayo (% D)	10.00	9.87	15.10	1.44	14.90	4.49
δ_{se} falla (% D)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	1.67
Q_{falla} (kN)	3538	1421	3663	12995	2953	26501
a	0.000174492	0.000318757	0.000188386	2.25944E-05	7.97232E-05	2.35024E-05
b	0.000247786	0.000640046	0.000235299	7.24334E-05	0.000322658	2.36887E-05
Coefic. de Correl.	0.9981181	0.9945846	0.9881523	0.9939442	0.9963111	0.9958183

En la TABLA 2 para cada uno de los ensayos y para cada valor de δ_{se} (% D) se presenta la resistencia que se desarrolla en función del % del **Q_{falla}** que se encuentra en la TABLA 1.

La hipérbola utilizada es una curva con incrementos decrecientes de **Q** para intervalos iguales de δ_{se} que se aproxima indefinidamente a un valor asintótico $Q_{asintótico} = 1/b$. No es aplicable cuando existen decrementos o incrementos nulos como sucede con las arcillas para deformaciones posteriores a la carga de falla.

TABLA 2. Relación entre Q en % de Q_{falla} y δ_{se} (% D)

δ_{se} (% D)	Q en % de Q_{falla}					
	Shaft DS-1	Rosemberg	Pile 4	Pilote 1	Pile 7	Bangkok
0,000	0	0	0	0	0	0
0,125	17	22	16	30	35	18
0,250	30	37	28	47	53	32
0,500	47	55	45	65	70	53
1,000	67	73	64	81	84	80
1,500	78	83	76	88	90	96
1,670	80	85	78	90	91	100
2,000	84	88	83	92	93	
2,500	89	92	88	94	96	
3,000	92	94	92	96	97	
4,000	97	98	97	99	99	
5,000	100	100	100	100	100	

En cambio en las arenas hay coincidencia verificada experimentalmente entre los valores medidos y los hiperbólicos hasta deformaciones elevadas. En este artículo hasta los máximos valores medidos, 10% D en la Figura 2 y 15% D en la Figura 6, valores hasta los cuales fueron calculados los coeficientes de correlación entre la carga medida y la hiperbólica en las páginas 2 y 6, reproducidos en la TABLA 1.

Definir Q_{falla} como Q que produce un $\delta_{se} = 5\% D$, significa que $\delta_{se\ falla} = 25$ mm para un “shaft” o pilote de 50 cm de diámetro, 50 mm para uno de 1 m y 100 mm para uno de 2 m. Si se adopta un coeficiente de seguridad de 3, $Q_{proyecto} = 33,33\% Q_{falla}$.

En la TABLA 3 se reproducen datos de la TABLA 2 ordenados para los comentarios siguientes. Se han elegido los valores de la columna 1 por ser la que tiene el coeficiente de correlación más alto en la TABLA 1 y $\delta_{se\ ensayo} = 10\% D$. El shaft de la columna 1 tiene un diámetro de 915 mm. Los de la columna 4 fueron elegidos porque el Q_{falla} se ha obtenido por extrapolación. El diámetro del pilote es 1800 mm.

TABLA 3. Relaciones entre δ_{se} (% D) y Q en % Q_{falla}

δ_{se} (% D)	0,125	0,250	0,500	1,000	1,500	2,000	3,000	4,00	5,000
% Q_{falla} (1)	17	30	47	67	78	84	92	97	100
% Q_{falla} (4)	30	47	65	81	88	92	96	99	100

% Q_{falla} (1): Los valores de esta fila son los de la columna 1 de la TABLA 2.

% Q_{falla} (4): Los de esta fila son los de la columna 4.

Para la columna 1 y un coeficiente de seguridad de 3, el $\delta_{se\ proycto}$ es del orden del 0.25 % del diámetro, es decir del orden de 2,3 mm. Valores mayores significan una reducción del coeficiente de seguridad y menores un aumento.

Duncan et al (1980) han señalado que si los datos de ensayos de suelos se representan en el diagrama transformado se encuentra frecuentemente que los puntos se desvían de la línea recta ideal y que se obtiene una curva que es ligeramente cóncava hacia arriba o hacia abajo. A esto debe agregarse imprecisiones resultantes de errores en las mediciones durante el ensayo de carga y en los que se producen al extraer datos de Figuras de publicaciones. Como conse-

cuencia de lo anterior, por ejemplo la hipérbola que se obtiene cuando se usan datos hasta $\delta_{se} = 2\% D$ difiere con la que se obtiene cuando se usan datos hasta $5\% D$. Si se identifica cada hipérbola de un ensayo de carga por el valor de $Q_{asintótico} = 1/b$, en el ensayo de la columna 1 de la TABLA 2. para $\delta_{se} = 2\% D$ se obtiene $Q_{asintótico} = 3759$ kN y para $5\% D$ 3950 kN, es decir se comete un error del orden del 5% .

Cuando en las arenas se dispone de datos hasta un valor menor del $5\% D$ y se extrapola la hipérbola obtenida hasta $5\% D$ se comete un error inevitable consecuencia de la ligera concavidad de la línea real que se aparta de la recta ideal y otro cuya magnitud depende de la precisión de los valores introducidos.

En la TABLA 3 se muestran los valores del $\% Q_{falla}$ para cada uno de los valores de δ_{se} , en el rango de los que se obtienen generalmente para el límite inferior (columna 1) y superior (columna 4).

Los resultados de los ensayos de los pilotes de las columnas 1 y 4 mostraron que los mismos no podían tomar las cargas de proyecto con un asentamiento aceptable para las estructuras que debían soportar y con un adecuado coeficiente de seguridad, por lo cual en ambos casos se procedió para pilotes de diámetros del orden de los de los ensayos a efectuar precargas (“post groutings”) lateral y de base para el caso de la columna 1 y de base con alta presión para el caso de la columna 4. En ninguno de los ensayos de verificación se llegó a $\delta_{se} = 5\% (D)$ y el límite fue establecido como un múltiplo de la carga de proyecto.

En las arcillas, columna 5 de las TABLAS 1 y 2, no se deben hacer extrapolaciones a valores mayores que los medidos. En esta caso, Figura 10, $\delta_{se\ falla} = 7,4\%$ con un aumento de Q del orden del 5% con respecto al Q correspondiente a $\delta_{se} = 2,9\%$, aumento del orden de la precisión de los valores medidos utilizados en los cálculos.

En los pilotes construidos en suelos con perfil mixto, columnas 2 y 6 de las TABLAS 1 y 2, se muestran dos comportamientos diferentes. El ensayo del pilote de la columna 2 se puede representar con una hipérbola hasta el $\delta_{se\ ensayo} = 9,87\% D$, mientras que el del pilote de la columna 6 puede hacerlo solamente hasta el $\delta_{se\ falla} = 1,67\% D$.

La hipérbola señala los posibles errores de medición y en el caso de ensayos con deficiencias de importancia muestra las que podrían pasar inadvertidas con métodos menos rigurosos. Es por ello recomendable que el primer paso del estudio de un ensayo de carga sea su representación en el diagrama transformado.

Cuando se logran altos coeficientes de correlación entre las cargas medidas y las de la hipérbola que mejor se ajusta a las mismas, las ventajas de tener una fórmula para cada ensayo de carga son evidentes. Permite interpolaciones y, con las limitaciones arriba comentadas, extrapolaciones. Al tener un procedimiento para calcular la progresiva degradación de los incrementos a medida que aumentan los asentamientos, se logra una clara visión de la evolución de la relación asentamiento reacción del terreno y hace innecesarias las tentativas de buscar puntos singulares para elegir las cargas permisibles.

Referencias

Bolognesi A. J. L. (2003), “Ensayos de Carga Estáticos de Compresión en Pilotes de Hormigón Moldeados en Sitio, Análisis y utilización de los resultados”, *Boletín de la Sociedad Argentina de Ingeniería Geotécnica* N° 43.

- Briaud J-L et al (2000), "Static Capacity Prediction by Dynamic Methods for Three Bored Piles", *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE 126 (7) 640-649.
- Brusey W. G. (2000), "Post-Grouted Test Shafts at JFK International Airport", *Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000*, ASCE Geotechnical Special Publication N° 100, 18-32.
- Duncan J. M. (1980), "Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analysis of Stresses and Movements in Soil Masses, Report N° UCB/GT/80-01, College of Engineering, University of California, Berkeley.
- Kondner R. L. and Zelasko J. S. (1963), "A Hyperbolic Stress-Strain Formulation for Sands." *Proceedings, 2nd Pan-American Conference On Soils Mechanics and Foundation Engineering. Brasil.* Vol. I, 289-324.
- O'Neil M. W. and Reese L. C. (1999), "Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods", *Publication N° FHWA-IF-99-025, Federal Highway Administration.*
- O'Neil M. W. et al (2002), "Axial Performance of ACIP Piles in Texas Coastal Soils", *Proceedings of the International Deep Foundations Congress 2002*, ASCE Geotechnical Special Publication N° 116, 1290-1304.
- Thasnanipan N. et al (2002), "Barrette of Over 50,000 kN Ultimate Capacity Constructed in the Multi-Layered Soil of Bangkok", *Proceedings of the International Deep Foundations Congress 2002*, ASCE Geotechnical Special Publication N° 116, 1073-1087.