

Aplicación de metodologías de estimación de capacidad axial de pilotes basadas en ensayos CPTu para suelos chilenos

Application of methodologies for estimating the axial capacity of piles based on CPTu tests for Chilean soils

Dennis Raddatz, Laura Peña, Patricio Donoso & Oscar Taiba.

Ferrara, Santiago, Chile, dennis.raddatz@ferrara.cl

RESUMEN: De acuerdo con el diseño geotécnico de pilotes, actualmente, una de las normas más reconocidas para la estimación de capacidad es la norma alemana DIN 4014, la cual necesita de resultados de ensayos de penetración estándar "SPT" o de penetración con piezocono electrónico "CPTu". A partir de estos ensayos, existen correlaciones empíricas para determinar la capacidad axial de pilotes, los cuales dependen de las características y/o propiedades de los suelos. Conforme al avance de la creación de una normativa chilena, en la presente investigación se realiza una aplicación de 2 metodologías directas de estimación de capacidad axial de pilotes mediante ensayos CPTu: Bustamante y Gianselli y el método de Eslami y Fellenius y, por otro lado, se aplican 2 guías de diseño existentes: la norma DIN 4014 y la norma americana FHWA. Los suelos de estudio corresponden a una arena limpia a arena limosa (Viña del Mar) y dos estratigrafías con intercalaciones de arcilla, limo y arena (Concepción y Valdivia). Se busca conocer la variabilidad que pueda existir entre las metodologías aplicadas y a la vez, comparar con guías de diseños presentadas. Los resultados se muestran de forma gráfica comparativa.

PALABRAS CLAVE: pilote, capacidad axial, CPTu.

ABSTRACT: According to piles geotechnical design, currently, one of the most recognized standards for bearing capacity estimation is the German standard DIN 4014, which requires results from standard penetration tests "SPT" or electronic cone penetration tests "CPTu". Based on these tests, there are empirical correlations to determine the axial capacity of piles, which depend on the characteristics and/or properties of the soils. As part of the development of a Chilean standard, this research applies two direct methodologies for estimating the axial capacity of piles through CPTu tests: Bustamante and Gianselli and the method of Eslami and Fellenius. Additionally, two existing design guides are applied: the DIN 4014 standard and the American FHWA standard. The studied soils are a clean sand to silty sand (Viña del Mar) and two stratigraphies with intercalations of clay, silt and sand (Concepción and Valdivia). The main objective is to understand the variability that may exist between the applied methodologies and, at the same time, compare them with presented design guides. The results are shown comparatively graphically.

KEYWORDS: pile, bearing axial capacity, CPTu.

1 MARCO TEORICO

1.1 Capacidad axial última

La capacidad total axial última de un pilote (Q_u) queda definida, en términos generales, como la carga que genera un asentamiento en la cabeza del pilote igual al 10 % del diámetro del pilote. Ésta se puede expresar a través de la Ecuación (1), indicada a continuación (Braja M. Das, 2015):

$$Q_u = Q_b + Q_s \quad (1)$$

Donde Q_b es la capacidad de la base o punta del pilote y Q_s la capacidad por fuste del pilote, definidas en términos generales en las Ecuaciones (2) y (3), respectivamente.

$$Q_b = q_b A_b \quad (2)$$

$$Q_s = \sum A_{si} q_{si} \quad (3)$$

Con q_b definida como la resistencia unitaria en la base o punta del pilote, q_{si} la resistencia unitaria por fuste del pilote en el estrato i , A_b el área de la base del pilote y A_{si} el área superficial del fuste del pilote en el estrato i .

1.2 Métodos empíricos para el cálculo de la capacidad axial de pilotes mediante CPTu

Los ensayos de penetración con cono (CPT) y los ensayos de penetración con cono con medición de presión de agua intersticial (CPTu) han sido aplicados con éxito durante décadas en investigaciones geotécnicas de campo. Permiten la determinación de una serie de propiedades físicas y mecánicas del suelo y son actualmente un elemento importante de los ensayos in situ. Sin embargo, la mayor dificultad radica en la interpretación de las mediciones obtenidas (Tankiewicz & Bagińska, 2021). Debido a las similitudes entre los mecanismos de penetración y la geometría de los pilotes y el ensayo CPT, se han propuesto varias correlaciones empíricas entre la resistencia en punta q_c del CPT y q_b (Gavin, Kovacevic & Iggoe, 2021). Entonces, el ensayo CPT se

puede considerar como un pequeño pilote de fundación penetrando el suelo (Bandini & Salgado, 1998). Existe una propuesta de norma chilena donde se regularán los ensayos de CPT (PrNCh, 2022).

Dentro de los métodos actuales para la estimación de la capacidad axial de pilotes, existen modelos directos como indirectos. Si se quieren obtener resultados directos mediante datos de ensayos CPTu, pueden ser utilizados ciertos métodos empíricos. En esta investigación se elige aplicar 2 métodos en particular. El primero es el de Bustamante y Ganeselli (1982), y el segundo lugar, el método de Eslami y Fellenius (1997).

1.2.1 Bustamante y Ganeselli (1982)

El método de Bustamante y Ganeselli, también conocido como método LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) o método francés, está basado en el análisis de 197 ensayos de carga (y extracción) en distintas condiciones geométricas y geotécnicas. Por consecuencia, este método incluye una amplia gama de tipos de fundaciones y tipos de suelo.

El método LCPC proporciona un proceso de cálculo directo utilizando exclusivamente los valores medidos de la resistencia en la punta del cono q_c (Mahler, 2003). Se obtiene la resistencia de pilotes aislados sometidos a compresión axial. Además, éste define las resistencias unitarias en punta, q_b , y en fuste, q_s , según las Ecuaciones (4) y (5), respectivamente.

$$q_b = k_b q_{c,prom} \quad (4)$$

$$q_s = \sum \frac{q_{ci}}{a_i} \quad (5)$$

Las que deben ser multiplicada por el área correspondiente para la obtención de capacidades totales, y donde k_b y a_i son factores adimensionales; el primer factor asociado a la capacidad de soporte en punta y el segundo factor asociado a la fricción del estrato i , los cuales se obtienen de acuerdo con el tipo de suelo y valor de resistencia por punta del ensayo CPT, q_{ci} , según la Tabla 1.

Tabla 1. Valores para k_b y α , según tipo de suelo, resistencia en punta, q_c , y tipo de instalación del pilote. Fuente: Bustamante y Ganeselli (1982).

Suelo Natural	q_c [10 ⁶ Pa]	k_b [-]		α [-]			
		I	II	IA	IB	IIA	IIB
Arcilla blanda y/o barro	< 1	0.40	0.50	30	30	30	30
Arcilla semi compacta	1 a 5	0.35	0.45	40	80	40	80
Limo y arena suelta	≤ 5	0.40	0.50	60	150	60	120
Arcilla y limo compactos	> 5	0.45	0.55	60	120	60	120
Caliza blanda	≤ 5	0.20	0.30	100	120	100	120
Arena y grava semi compactas	5 a 12	0.40	0.50	100	200	100	200
Caliza degradada a fragmentada	> 5	0.20	0.40	60	80	60	80
Arena y grava compacta a muy compacta	> 12	0.30	0.40	150	300	150	200

Los grupos I y II, junto con las categorías IA, IB, IIA y IIB, se exponen a continuación:

- **Grupo I:** Pilotes perforados - Pilotes perforados encamisados - Pilotes perforados con lodo - Pilotes perforados con taladro hueco - Micropilotes tipo I - Pilares - Barretes.
- **Grupo II:** Pilotes hincados - Pilotes inyectados hincados - Pilotes prefabricados hincados - Pilotes metálicos hincados - Pilotes tubulares pretensados - Pilotes colados hincados - Pilotes de hormigón hincados - Pilotes inyectados de gran diámetro a alta presión - Micropilotes tipo II.
- **Categoría IA:** Pilotes perforados - Pilotes perforados con lodo - Pilotes perforados con taladro hueco - Micropilotes tipo I - Pilares - Barretes.
- **Categoría IB:** Pilotes perforados revestidos - Pilotes inyectados hincados.
- **Categoría IIA:** Pilotes prefabricados hincados - Pilotes tubulares pretensados - Pilotes de hormigón hincados
- **Categoría IIB:** Pilotes metálicos hincados.

El cálculo de $q_{c,prom}$ se realiza siguiendo el procedimiento indicado en la Figura 1, el cual se puede representar en 3 pasos:

1. Calcular la resistencia q'_{ca} en la punta del pilote promediando los valores de q_c obtenidos desde 3/2 diámetros por encima de la punta hasta 3/2 diámetros por debajo.
2. Eliminar los valores de q_c fuera del rango $[0.7q'_{ca} - 1.3q'_{ca}]$ sobre la punta del pilote. Bajo la punta del pilote, solo se restringe por el límite superior del rango anteriormente indicado.
3. Obtener $q_{c,prom}$ promediando la resistencia q_c de la zona que no se eliminó.

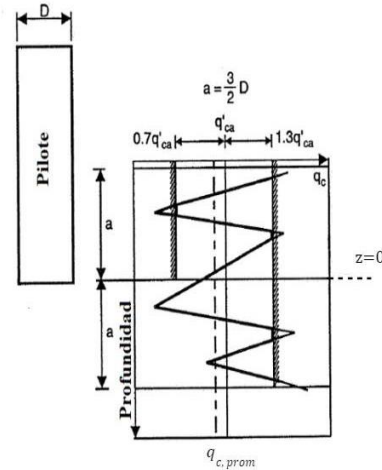


Figura 1. Ilustración para el cálculo de $q_{c,prom}$. Fuente: Bustamante y Ganeselli (1982). Modificada.

1.2.2 Eslami y Fellenius (1997)

El método de Eslami y Fellenius (1997) entrega resultados directos a partir de datos de ensayos CPTu, al igual que el método LCPC. Éste está basado en 102 ensayos de carga de pilote. Los ensayos analizados fueron realizados alrededor de todo el mundo; en su mayoría países europeos y localidades en Norteamérica, pero también en Centroamérica, Sudamérica y Asia.

En cuanto a la resistencia unitaria en punta del pilote, q_b , se calcula según la Ecuación (6),

$$q_b = \frac{1}{3D} q_{e,prom} \quad (6)$$

Con D el diámetro del pilote en metros, y $q_{e,prom}$, se define como el promedio geométrico dentro de la zona de influencia $ZI(z)$ especificada a continuación:

$$ZI(z) = \begin{cases} (-4D;8D) & \text{Si la base del pilote se encuentra en un estrato ascendente en resistencia.} \\ (0;2D) & \text{Si la base del pilote se encuentra en un estrato descendente en resistencia.} \end{cases}$$

Donde q_e es la resistencia efectiva, es decir se calcula con la resistencia en punta corregida q_t y la presión de poros u_2 como se muestra en la ecuación (7).

$$q_e = q_t - u_2 \quad (7)$$

La resistencia unitaria por fuste, q_s , queda definida según la Ecuación (8), con el factor adimensional C_s , que depende del tipo de suelo según Figura 2, y es obtenido de la Tabla 2.

$$q_s = C_s q_e \quad (8)$$

Tabla 2. Valores para C_s según tipo de suelo. Fuente: Eslami y Fellenius (1997).

Tipo de Suelo	C_s [%]
1. Suelos blandos o sensitivos	8.0
2. Arcilla o Limo	5.0
3. Limo arcilloso y/o Arcilla limosa	2.5
4a. Limo arenoso	1.5
4b. Arena limosa	1.0
5. Arena y grava arenosa	0.4

El método propone una clasificación para los suelos a partir de la relación entre resistencia q_e en MPa y la resistencia por fricción en kPa, como se muestra en la Figura 2.

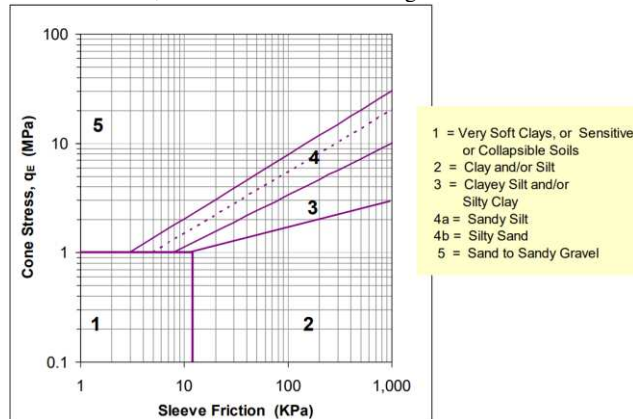


Figura 2. Clasificación de suelos según resistencia en punta efectiva y resistencia por fuste de ensayo CPT. Fuente: Fellenius, 2016.

1.3 Normativas extranjeras

Las normas por aplicar se describen a continuación:

1.3.1 DIN 4014 (1990)

La norma DIN 4014, originada en Alemania el año 1990, estima la capacidad a compresión y asentamiento de pilotes perforados de acuerdo con una curva empírica de carga-asentamiento sobre una base de ensayos de carga de pilotes. La resistencia última total Q_u se calcula según ecuación (1) donde las resistencias unitarias son obtenidas a partir de tablas que son provistas en la norma, en función de la resistencia por punta obtenida en ensayos de penetración en el suelo para resistencias unitarias por punta y fuste en suelo granular, y en base al ensayo de resistencia al corte no drenado para resistencias unitarias por punta y fuste en suelo cohesivo. Para la resistencia por punta, además de la resistencia unitaria última asociada a un asentamiento del 10% del diámetro, se entregan resistencias unitarias para el 2 y 3%. Por otro lado, la capacidad última por fuste se asocia a un valor de asentamiento que depende del diámetro del pilote y de la misma capacidad última por fuste. Con los valores de resistencia última de punta y fuste, los valores de resistencia por punta intermedios y los asentamientos asociados a estas resistencias se puede construir una curva carga-asentamiento (ver Figura 3).

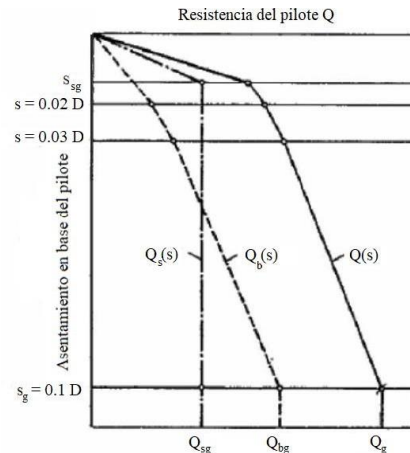


Figura 3. Curvas de carga v/s asentamiento según incisos 4.4.1 y 4.4.2. Fuente: DIN 4014 (1990). Modificada.

La capacidad axial del pilote en función del asentamiento, $Q(s)$, queda expresada como:

$$Q(s) = Q_b(s) + Q_s(s) \quad (9)$$

Donde Q_b es la resistencia de punta y Q_s es la resistencia del fuste, ambas en función del asentamiento. Los valores se obtienen interpolando de las resistencias y asentamientos previamente definidos.

1.3.2 FHWA (1999)

La normativa FHWA (O'Neill y Reese, 1999), originada en Estados Unidos, estima la capacidad total a compresión axial de pilotes, Q , según la suma de la componente por fuste, Q_s , y punta, Q_b , como se muestra en la Ecuación (1), donde las componentes de

resistencia por fuste y punta se obtienen por medio de formulaciones entregadas por la normativa; estas están en función de parámetros resistentes del suelo obtenidos mediante ensayos in situ, CPTu o SPT y conociendo el tipo de suelo: cohesivo o no cohesivo.

La resistencia de un pilote asociada a cualquier desplazamiento vertical y que es sometido a cargas de compresión, puede ser encontrada usando las relaciones de carga y asentamiento para fuste y punta dependiendo del tipo de suelo, que se muestran en la Figura 4. En este caso, el criterio de falla corresponde a la carga que genere un asentamiento total del 5% del diámetro en la base del pilote para suelos cohesivos, y del 10% del diámetro para suelos no cohesivos.

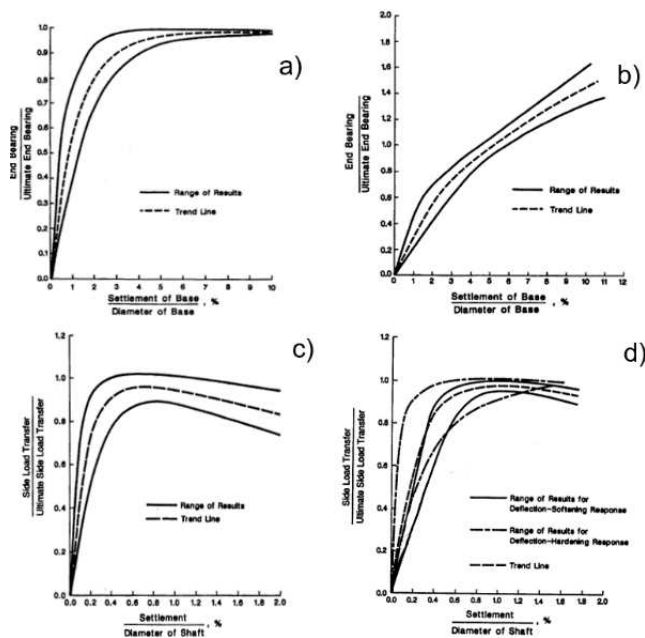


Figura 4. Carga normalizada por carga última versus asentamiento normalizado por diámetro de la base, a) carga por punta para suelo cohesivo, b) carga por punta para suelo no cohesivo, c) carga por fuste para suelo cohesivo y d) carga por fuste para suelo no cohesivo (Reese y O'Neill, 1989).

2 ANTECEDENTES

Este estudio abarca la aplicación de 4 metodologías directas para la estimación de la capacidad axial de un pilote pre-excavado a construirse en 3 suelos chilenos de variadas características geotécnicas, ubicados en las ciudades de Viña del Mar, Concepción y Valdivia, respectivamente. En los últimos años, ha habido un aumento en el uso de pilotes perforados de gran diámetro (diámetro superior a 60 cm) como alternativa a grupos de pilotes de diámetro pequeño (Abdel-Rahman, Rabie & Awad-Allah, 2006). Entonces, se decidió aplicar 3 diámetros distintos: 88, 100 y 150 centímetros, los cuales son los diámetros más usados en Chile, dado los equipos y herramientas disponibles comercialmente para ejecución de pilotes. La caracterización de los suelos, para mayor consistencia, se realiza según la propuesta del método de Eslami y Fellenius (1997) descrita en la Figura 2, resultando en lo siguiente:

Tabla 3. Clasificación del suelo de estudio de Viña del Mar a partir de CPTu.

Unidad	Desde	Hasta	q_c [MPa]	f_s [MPa] = c_u [MPa]	Índice	Tipo de Suelo
E1	0	2.3	8.0	0.078	4b	Arena limosa
E2	2.3	5.3	15.6	0.096	5	Arena gravosa
E3	5.3	6.9	13.7	0.058	5	Arena
E4	6.9	10.5	22.2	0.087	5	Arena gravosa
E5	10.5	21.8	17.1	0.142	5	Arena
E6	21.8	26	17.8	0.146	5	Arena
E7	26	27.4	34.0	0.211	5	Arena gravosa

Tabla 4. Clasificación del suelo de estudio de Concepción a partir de CPTu.

Unidad	Desde	Hasta	q_c [MPa]	f_s [MPa] = c_u [MPa]	Índice	Tipo de Suelo
E1	0	2	4.5	0.067	4a	Limo arenoso
E2	2	4	2.2	0.062	3	Arcilla limosa
E3	4	5	1.1	0.037	2	Arcilla
E4	5	6.2	7.8	0.380	4a	Limo arenoso
E5	6.2	7.2	0.9	0.023	2	Arcilla
E6	7.2	11.3	8.7	0.132	4b	Arena limosa
E7	11.3	12.4	33.9	0.401	5	Arena gravosa
E8	12.4	15.5	5.2	0.056	4b	Arena limosa
E9	15.5	19.4	39.4	0.332	5	Arena gravosa
E10	19.4	23	3.7	0.045	4a	Limo arenoso
E11	23	25.5	38.0	0.341	5	Arena gravosa
E12	25.5	28	7.4	0.068	4b	Arena limosa
E13	28	30.5	18.6	0.188	5	Arena gravosa
E14	30.5	33	8.8	0.097	4b	Arena limosa

Tabla 5. Clasificación del suelo de estudio de Valdivia a partir de CPTu.

Unidad	Desde	Hasta	q_c [MPa]	f_s [MPa] = c_u [MPa]	Índice	Tipo de Suelo
E1	0	5	1.0	0.025	2	Arcilla
E2	5	10	4.0	0.067	4a	Limo arenoso
E3	10	12.5	14.4	0.232	4b	Arena limosa
E4	12.5	17.5	2.9	0.025	3	Arcilla limosa
E5	17.5	19	4.1	0.074	2	Arcilla
E6	19	20	10.7	0.082	4b	Arena limosa

También se puede visualizar la estratigrafía en conjunto con los resultados de los ensayos CPTu en las Figuras 5, 6 y 7. Se sigue el mismo formato de colores de las Tablas 3, 4 y 5.

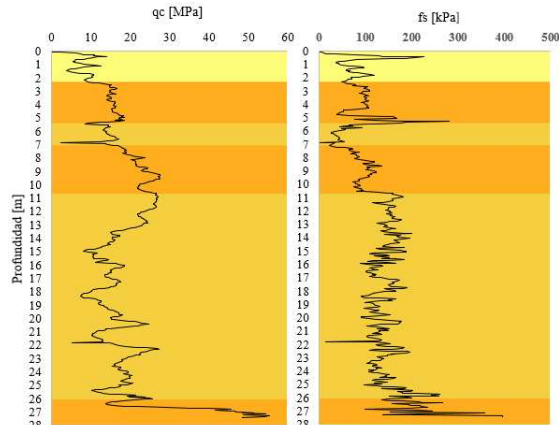


Figura 5. Resultados CPTu para suelo de Viña del Mar.

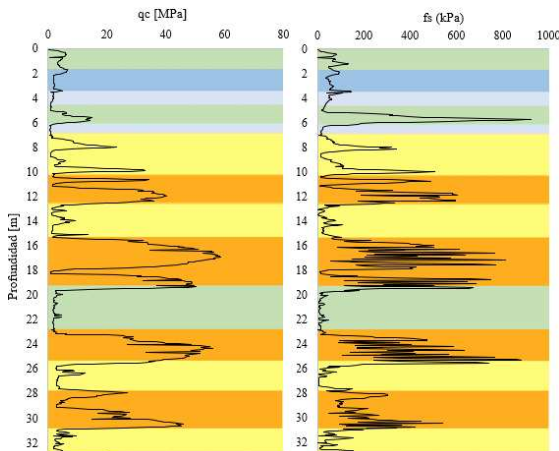


Figura 6. Resultados CPTu para suelo de Concepción.

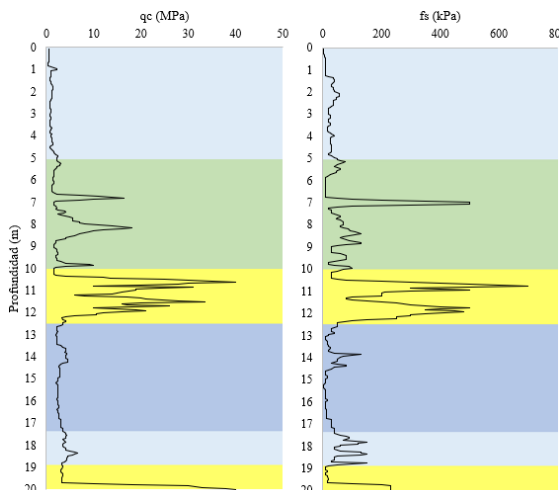


Figura 7. Resultados CPTu para suelo de Valdivia.

Según la información recién mencionada, se aplicaron criterios ingenieriles de diseño de pilotes, para optimizar capacidad respecto a la profundidad de los pilotes, definiéndose los largos de pilotes indicados en la Tabla 6.

Tabla 6. Propiedades de casos de estudio.

Aplicaciones	Suelos de Estudio		
	Viña del Mar	Concepción	Valdivia
Métodos Empíricos	Bustamante y Ganeselli (1982)		
	Eslami y Fellenius (1997)		
Normas Extranjeras	DIN 4014 (1990)		
	FHWA (1999)		
Diámetro Pilote [cm]	88		
	100		
	150		
Largo Pilote [m]	27	18	20

Por lo tanto, se obtendrán 12 capacidades por cada tipo de suelo; esto resulta de las 4 metodologías multiplicado por 3, el número de diámetros distintos. Al ser 3 suelos distintos, el total de casos de estudio es de 36.

3 RESULTADOS

Luego del cálculo y posterior aplicación de las metodologías antes descritas, se obtienen las resistencias por fuste, por punta y resistencias últimas presentes en la Tabla 7, para los distintos diámetros, largos de pilote y suelos.

Es importante tener en cuenta que las capacidades en punta, en el contexto de los métodos empíricos, incluyen factores de reducción directa. En el método propuesto por Bustamante y Ganeselli (1982) se emplea únicamente el 30% de esta capacidad (valor constante). Por otro lado, en el método desarrollado por Eslami y Fellenius (1997) dicho factor de reducción varía en función del diámetro del pilote como se indica en la Ecuación (7). Con dicho método los factores de reducción quedan en 0.42, 0.33 y 0.22 para los diámetros 0.88, 1.00 y 1.50 m, respectivamente.

Tabla 7. Capacidades axiales resultantes de pilotes de suelos de estudio [Tf].

Ciudad /Suelo /Largo Pilote [m]	Diámetro [cm]	B&G (1982) Q_s/Q_b Q_u	E&F (1997) Q_s/Q_b Q_u	DIN 4014 (1990) Q_s/Q_b Q_u	FHWA (1999) Q_s/Q_b Q_u
Viña del Mar /Arenas /27	88	924/482 1406	545/540 1085	889/304 1193	1545/113 1658
	100	1050/622 1672	620/613 1233	1010/393 1403	1756/146 1902
	150	1575/1400 2975	930/920 1849	1515/883 2399	2633/329 2962
		286/732 1018	453/676 1129	371/337 708	897/141 1038
Concepción /Arena y finos /18	88	325/946 1270	515/582 1097	422/435 857	1019/182 1201
	100	487/2127 2615	773/640 1412	633/979 1612	1529/409 1938
	150	216/138 355	321/139 460	227/133 360	223/111 333
		246/179 425	365/215 580	258/172 430	253/143 396
Valdivia /Arena y finos /20	88	369/402 771	548/290 837	386/387 773	379/321 701
	150				

Adicionalmente, se presentan los resultados mediante gráficos compuestos que muestran los valores de capacidad axial última, Q_u , junto con el desglose de capacidad en punta, Q_b , y por fuste, Q_s , para cada aplicación de los métodos de estudio (Figuras 8, 9 y 10). La normativa de la FHWA (1999) queda representada por el color verde, la normativa DIN 4014 (1990) por el color anaranjado y los métodos empíricos por los colores amarillo y azul, para Eslami y Fellenius (1997) y Bustamante y Ganeselli (1982), respectivamente.

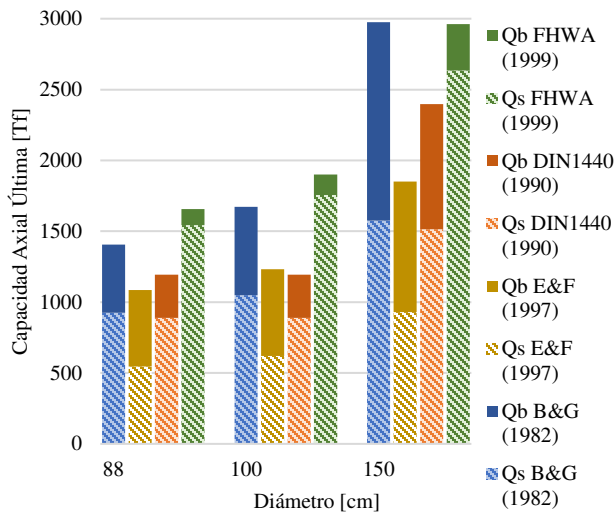


Figura 8. Capacidades axiales últimas según métodos de estudio para pilote de 27 [m] ubicado en suelo de estudio de Viña del Mar.

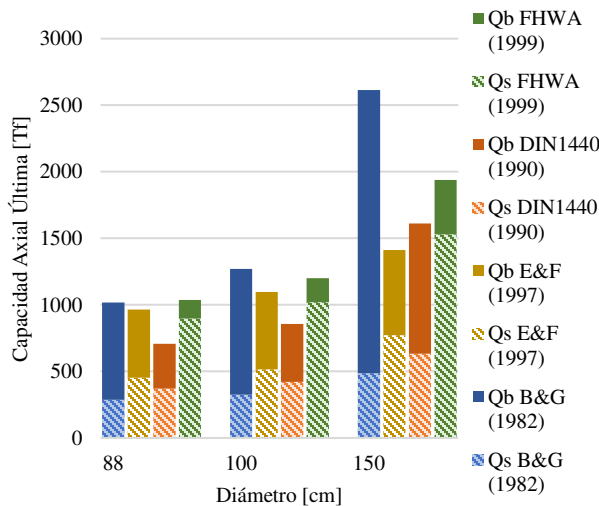


Figura 9. Capacidades axiales últimas según métodos de estudio para pilote de 18 [m] ubicado en suelo de estudio de Concepción.

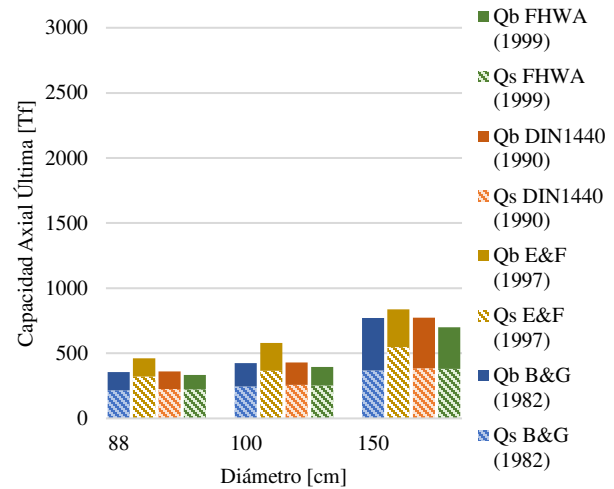


Figura 10. Capacidades axiales últimas según métodos de estudio para pilote de 20 [m] ubicado en suelo de estudio de Valdivia.

Otro análisis realizado, corresponde al análisis de capacidad de punta, fuste y total v/s profundidad de pilote, de manera de mostrar la variabilidad que se puede tener en cuanto a los resultados, dependiendo de las condiciones estratigráficas. Este análisis se realizó con las capacidades obtenidas aplicando los criterios la normativa DIN 4014 (1990), hasta las longitudes de diseño de los pilotes, y para los mismos 3 diámetros distintos: 88, 100 y 150 centímetros. Los resultados de este análisis se presentan gráficamente en las Figuras 11, 12 y 13.

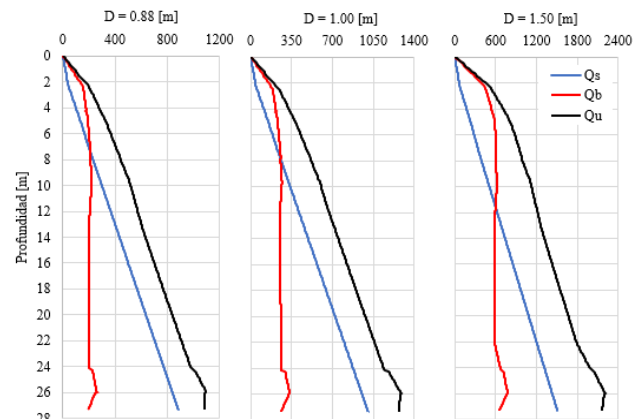


Figura 11. Curvas de capacidad en punta (Q_b), capacidad por fuste (Q_s) y capacidad total última (Q_u) para suelo de estudio de Viña del Mar según norma DIN4014 (1990).

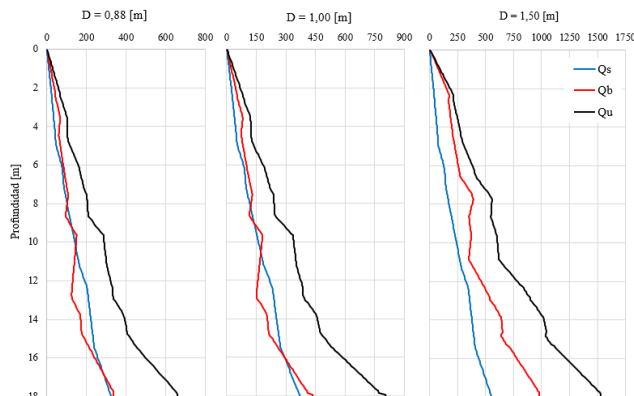


Figura 12. Curvas de capacidad en punta (Q_b), capacidad por fuste (Q_s) y capacidad total última (Q_u) para suelo de estudio de Concepción según norma DIN4014 (1990).

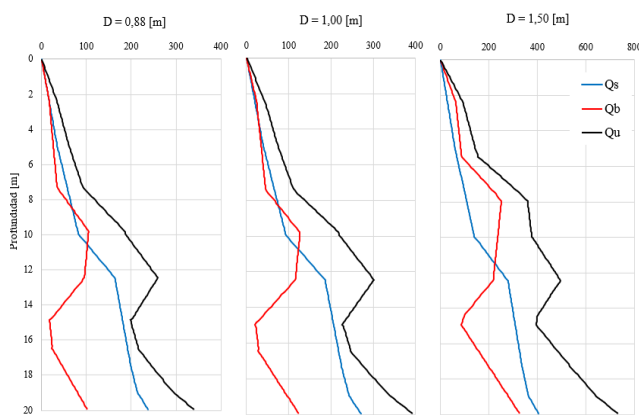


Figura 13. Curvas de capacidad en punta (Q_b), capacidad por fuste (Q_s) y capacidad total última (Q_u) para suelo de estudio de Valdivia según norma DIN4014 (1990).

4 CONCLUSIONES

La resistencia en punta unitaria obtenida por los métodos de estimación de capacidad presentes en este estudio se multiplica por el área transversal del pilote (en este caso circular), y la resistencia por fuste unitaria se multiplica por el área del manto, es decir por el perímetro del pilote multiplicado por su altura. Entonces la capacidad por punta crece de forma cuadrática con el diámetro y la capacidad por fuste crece de forma lineal con el diámetro. Por otro lado, la capacidad por fuste crece con el largo del pilote, mientras que en la capacidad por punta el largo de pilote no es parte su cálculo. Por esta razón, en los tres tipos de suelos estudiados, se puede apreciar que cuando se aplica el diámetro mayor a los cálculos se dan valores mucho mayores de capacidad con respecto a los diámetros menores, existiendo un mayor aporte por punta a la capacidad total respecto al fuste mientras se aumenta el diámetro. Además, la capacidad por fuste crece y es siempre ascendente con profundidad, mientras que la capacidad por punta depende exclusivamente del estrato en que queda la punta.

En general, las capacidades totales obtenidas con el método de Bustamante y Ganeselli (1982) son mayores a las del método de Eslami y Fellenius (1997), y las capacidades obtenidas con la norma FHWA (1999) son mayores a las obtenidas por la norma DIN 4014 (1990). La excepción es el caso del suelo de Valdivia, donde la estratigrafía está compuesta en su mayoría por arcillas y limos y se tienen mayoritariamente menores valores resistentes en el ensayo CPTu, acá el método que entrega mayores resultados de resistencia es el de Eslami y Fellenius (1997). Con respecto al comportamiento de los métodos relativo a capacidad de punta y fuste, podemos ver que presentan características similares en todos los suelos de estudio y para las geometrías de los distintos pilotes, siendo el método de Bustamante y Ganeselli (1982) el que mayor capacidad por punta entrega, y siendo la norma FHWA (1999) la que mayor capacidad por fuste entrega, esto último con excepción de Valdivia, donde la mayor capacidad de fuste es obtenida con el método de Eslami y Fellenius (1997). Respecto a la proporción entre las capacidades, los extremos son Bustamante y Ganeselli (1982) con mayor capacidad de punta respecto al fuste, y la norma FHWA (1999), con mayor capacidad de fuste respecto a la punta. La notoria menor capacidad obtenida por punta de la norma FHWA (1999), se puede explicar con el menor asentamiento asociado a la capacidad ultima en suelos granulares, lo que se aprecia gráficamente en otro trabajo de estimación de capacidad realizado previamente (Raddatz, Miranda y Taiba, 2014).

Los resultados pueden variar mucho con respecto a la discretización inicial por estratos, de manera que con una discretización más detallada, es decir, en más estratos, se daría la oportunidad para reducir errores por simplificación de resultados de los ensayos, ya que a fin de cuentas los resultados que entregan los ensayos CPTu están discretizados casi de forma continua, pero esto complicaría el proceso de análisis y de cálculo, ya que la mayoría de los cálculos con estas metodologías incluyen factores que provienen de tablas, los cuales deben ser elegidos manualmente (uno a uno) de acuerdo a los antecedentes presentes.

Respecto a la elección del largo de diseño de pilotes usado en el análisis comparativo de resistencias por los diferentes métodos de cálculo, se puede concluir que fueron los correctos al analizar las curvas obtenida de capacidad versus profundidad. Se aprecia que a esas profundidades se maximiza el aporte por punta y fuste respecto a la variable profundidad. Un largo alternativo de diseño, que también es eficiente al analizar profundidad, es en Valdivia para un pilote de 12 m aproximadamente.

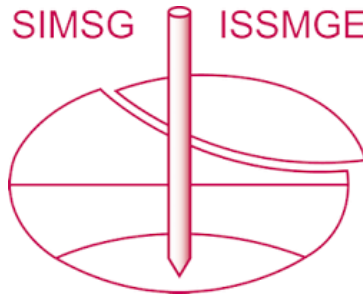
En caso de contar con resultados de algún ensayo de capacidad en pilote en suelo chileno, sería de gran aporte repetir el análisis con las 4 metodologías acá descritas y comparar con esos resultados, de manera de comparar capacidades estimadas y reales, distinguiendo con qué metodologías se obtiene mejor estimación para capacidades por punta, fuste y total.

5 REFERENCIAS

- Abdel-Rahman, A. H., Rabie, M., & Awad-Allah, M. F. (2006). Comparison between Egyptian code, DIN 4014, and AASHTO Methods of Predicting Ultimate Bearing Capacity of Large Diameter Bored Piles. El-Azher University Engineering Journal.
- Bandini, P. y Salgado, R. (1998). Methods of Pile Design based on CPT and SPT Results. Geotechnical Site Characterization.
- Braja M. Das. (2015). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, CENGAGE Learning, México.

- Bustamante, M. y Gianceselli, L. (1982). Pile Bearing Capacity Prediction by Means of Static Penetrometer CPT. En Proceedings of the 2-nd European Symposium on Penetration Testing, pp. 493–500.
- DIN 4014 (1990). Bored Cast-in-Place Piles. Formation, Design and Bearing Capacity.
- Eslami, A., & Fellenius, B.H. (1997). Pile Capacity by Direct CPT and CPTu Methods Applied to 102 Case Histories. Canadian Geotechnical Journal, 34(6), 886-904.
- Fellenius, B.H. (2016). Basics of Foundation Design. Gran Bretaña. www.fellenius.net.
- Gavin, K., Kovacevic, M. S., & Igoe, D. (2021). A Review of CPT based Axial Pile Design in the Netherlands. Underground Space, 6(1), 85-99.
- Mahler, A. (2003). Use of Cone Penetration Test in Pile Design. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 47(2), 189-197.
- Moshfeghi, S., & Eslami, A. (2018). Study on Pile Ultimate Capacity Criteria and CPT-based Direct Methods. International Journal of Geotechnical Engineering, 12(1), 28-39.
- O'Neill, M. W. and Reese, L. C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. Report No. FHWA-IF-99-025. Federal Highway Administration, Washington DC.
- PrNCh (2022). Geotecnia. Ensayo de Penetración con Piezocono Electrónico de Fricción (CPTu).
- Raddatz, D., Miranda, R. & Taiba, O. (2014). Diseño y aplicación de pilotes CFA para una central eléctrica en Coronel, Chile. Obras y proyectos, (15), 8-18.
- Tankiewicz, M. & Bagińska, I. (2021). Assessment and Verification of Correlations in CPTu Testing on the Example of Soil from the Wrocław Surroundings (Poland). Arch. Min. Sci. 66 (2021), 2, 313-327.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.