

CAPÍTULO 7. EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DISEÑO PARA FUNDACIONES PROFUNDAS

En el presente capítulo se analizan algunos de los métodos de diseño disponibles y se seleccionan ecuaciones de diseño para realizar un análisis de confiabilidad y calcular factores de resistencia. Revisando la literatura existente con frecuencia se descubrió que muchos métodos de diseño tienen una base experimental y teórica incompleta. Bustamante y Ganeselli (1982) se ocuparon de este problema, expresando que “las discrepancias observadas entre las capacidades de carga reales y teóricas se explican por el hecho que los métodos de diseño actuales fueron desarrollados en base a datos experimentales cuestionables y muchas veces insuficientes.” En consecuencia, es dable esperar que muchos métodos de diseño produzcan desviaciones impredecibles entre las capacidades de carga medidas y las pronosticadas. Esto significa que para algunos de los métodos de diseño no es posible evaluar racionalmente la incertidumbre dentro del marco establecido en el Capítulo 3. En las secciones siguientes sólo se consideran aquellas ecuaciones de diseño con fuertes bases experimentales y desarrollos teóricos exhaustivos.

7.1 Diseño de pilotes mediante LRFD

En términos del diseño por estados límites (LSD), las fundaciones mediante pilotes típicamente se diseñan para un estado límite último (ULS). Para la resistencia friccional, muchas veces la capacidad de carga total del fuste se moviliza para desplazamientos pequeños del pilote. Franke (1993) sugirió que la resistencia lateral se moviliza totalmente mucho antes de alcanzar la máxima resistencia de punta. Por lo tanto, para verificar la resistencia friccional lo más pertinente es utilizar un ULS. Para la resistencia de punta es posible tener asentamientos relativamente importantes antes que el pilote ingrese en un modo de hundimiento. La carga unitaria en la base en el momento del hundimiento es q_{bL} . Sin embargo, muchas veces se adopta un criterio de capacidad de carga basado en las deformaciones. La mayoría de los métodos considerados en la presente sección utilizan la definición de capacidad de carga límite última basada en una relación asentamiento-diámetro del pilote igual a 10% ($s/B = 10\%$), $q_{b,10\%}$. Por lo tanto, aunque se define un estado límite último, los métodos de diseño contienen una verificación implícita del estado límite de servicio (SLS) que debería ser suficiente para la mayoría de los

proyectos. Para las fundaciones de edificios particularmente sensibles puede ser necesario imponer un criterio más estricto respecto del asentamiento admisible para garantizar así las condiciones de servicio.

La ecuación básica del Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD) es

$$(RF)R_n \geq \sum (LF)_i Q_i \quad (7.1.1)$$

En el diseño de pilotes, tanto la resistencia de punta como la resistencia friccional contribuyen a la capacidad de carga global del pilote. Para implementar una verificación de diseño para estado límite correspondiente a carga axial el LRFD permite dos enfoques:

$$(RF)(R_s + R_b) \geq \sum (LF)_i Q_i \quad (7.1.2)$$

o bien

$$(RF)_s R_s + (RF)_b R_b \geq \sum (LF)_i Q_i \quad (7.1.3)$$

donde R_s y R_b son las resistencias friccional y de punta, respectivamente, y $(RF)_s$ y $(RF)_b$ son los factores de resistencia para resistencia friccional y de punta, respectivamente. En realidad las resistencias friccional y de punta no son independientes. Sin embargo, dado que en la práctica efectivamente las calculamos en forma separada, hay que reconocer que las incertidumbres en su predicción son muy diferentes. Por lo tanto, la probabilidad de sobrestimar la resistencia friccional de un pilote es muy diferente a la probabilidad de sobrestimar su resistencia de punta. Consecuentemente, es más preciso aplicar $(RF)_s$ y $(RF)_b$ como factores de resistencia independientes como en la Ecuación (7.1.3), ya que la incertidumbre de las estimaciones de la resistencia friccional y de punta son muy diferentes. Sin embargo, en el caso de algunos métodos de diseño directos puede no ser posible calibrar factores de resistencia diferentes para la resistencia friccional y la de punta, dependiendo de los datos disponibles para validar el método. Por tanto, la Ecuación (7.1.2) es aplicable en algunas circunstancias, pero la (7.1.3) permite controlar mejor la confiabilidad del diseño.

Se utiliza un análisis de confiabilidad para hallar factores de resistencia adecuados para utilizar con las Ecuaciones (7.1.2) y (7.1.3). En el caso de la (7.1.3), las confiabilidades para la resistencia friccional y de punta se calculan de forma separada. Al hacerlo asumimos que ambas resistencias son independientes y, en consecuencia, la probabilidad de que el diseñador sobrestime una de las resistencias no se ve afectada por la probabilidad de que el diseñador

sobrestime la otra. Este enfoque es en parte similar a lo que ocurre en el diseño del hormigón armado, donde se utilizan verificaciones de diseño independientes para estados límites de corte y flexión, aunque ambas verificaciones dependen de las propiedades de resistencia del hormigón.

En términos generales los métodos para diseño de pilotes se pueden clasificar ya sea como métodos directos o métodos basados en las propiedades del suelo. Los métodos de diseño directos se basan en correlaciones directas entre ensayos in situ y la capacidad medida de pilotes. Los métodos de diseño basados en las propiedades del suelo calculan la capacidad de los pilotes usando como datos de partida diferentes parámetros del suelo. Estos parámetros se calculan a partir de ensayos realizados in situ o en laboratorio. Una diferencia importante entre los métodos basados en las propiedades del suelo y los métodos directos es que los primeros tienden a tener mayor incertidumbre (menor RF) pero son aplicables a casos generales, mientras que los métodos directos tienden a tener menor incertidumbre (mayor RF) pero se aplican sólo a casos que se asemejan a los pilotes y suelos específicos para los cuales fueron desarrollados. Una implicancia de esta diferencia es que puede resultar más riesgoso aplicar un método de diseño directo a una situación de diseño que sea diferente a la contempladas en la base de datos de pilotes sometidos a ensayos de carga a partir de la cual se desarrolló el método, aún cuando el método indique una excelente concordancia con los valores medidos en la base de datos.

En los Capítulos 8 y 9 evaluaremos la incertidumbre de los métodos de diseño seleccionados en el presente Capítulo para utilizar en el análisis de confiabilidad. En este análisis se determinarán factores de resistencia.

7.2 Diseño de pilotes en arena

Mecanismos fundamentales de respuesta a las cargas y diseño basado en las propiedades del suelo

En primer lugar se discuten los estudios publicados sobre diseño para capacidad friccional de pilotes. Tal vez el punto más controvertido relacionado con la capacidad friccional de los pilotes es la existencia de un valor límite de la resistencia friccional a una cierta profundidad límite. Un análisis de la literatura disponible revela lo siguiente:

- Vesic (1964, 1970, 1977), Meyerhof (1964, 1976) y Kerisel (1964) discutieron por primera vez el concepto de profundidad crítica;
- Kulhawy (1984) considera que la resistencia friccional unitaria límite es una falacia;

- Kraft (1991), Randolph (1994) y Kulhawy (1984) explican los factores que dieron origen al concepto de profundidad crítica de la siguiente manera:
 - a. Para la resistencia lateral: el aparente valor límite de la resistencia friccional se debe a disminución del coeficiente de empuje lateral del suelo en reposo (K_0) con la profundidad que se produce simultáneamente con la disminución de ϕ_p a medida que aumenta σ'_v .
 - b. Para la resistencia de punta: el aparente valor límite de la resistencia de punta se debe a los valores decrecientes de ϕ_p y el índice de rigidez a medida que aumenta σ'_v (índice de rigidez = rigidez/resistencia)
- Fellenius y Altaee (1995) sostienen que el concepto de profundidad crítica se originó a partir de una mala interpretación de resultados de ensayos donde se despreciaron los efectos de cargas residuales;
- Salgado (1995) muestra que no existe una profundidad crítica, sino que la capacidad de carga crece a menor velocidad a medida que aumenta la profundidad.

Revisando la literatura se encontraron algunos intentos notables de incorporar al diseño la aparente existencia de una resistencia friccional y de punta límites:

- Fleming et al. (1992) intentaron incorporar en su diseño el efecto de ϕ que disminuye a medida que σ aumenta. Definieron $K = 0.02 N_q$ con $\delta = \phi_c$. Este método sobrestima la resistencia friccional de pilotes largos pero se compara de forma favorable con el método presentado por Vesic (1970);
- Para tomar en cuenta la degradación de la fricción debida a la longitud de un pilote, Toolan et al. (1990) presentaron un método nuevo. Su objetivo era tomar en cuenta la observación ampliamente establecida de que la fricción local de un fuste a cualquier nivel fijo varía con la penetración del pilote, tal como lo discutieron Vesic (1970), Hanna y Tan (1973), Lehane et al. (1993). Ellos propusieron una función exponencial para la degradación de la fricción del fuste con la longitud del pilote en términos de su valor local;
- Randolph (1994), Kulhawy (1984), Toolan et al. (1990), Vesic (1967), Hettler (1982) y Kraft (1991) explicaron la tendencia de los valores límites mediante perfiles de K_0 en función de la profundidad, procesos de fatiga por fricción, distribuciones de tensiones de corte localizadas y dilatación de las arenas;

- Salgado (1995) muestra que la resistencia de punta unitaria límite q_{bL} aumenta de manera no lineal, a tasas decrecientes, a medida que aumenta σ'_v . La resistencia de punta límite q_{bL} es aproximadamente igual a la resistencia a la penetración con penetrómetro de cono q_c (Salgado 2004),

$$\frac{q_{bL}}{p_A} = C_1 \exp(C_2 D_R) \left(\frac{\sigma'_h}{p_A} \right)^{C_3} \quad (7.2.1)$$

donde p_A es la tensión de referencia (100 kPa), C_1 , C_2 y C_3 son constantes, D_R es la densidad relativa y σ'_h es la tensión efectiva horizontal.

En su estudio sobre la capacidad friccional de pilotes de punta abierta Paik y Salgado (2003) pudieron demostrar muy claramente que la capacidad friccional depende de K_0 para el caso de pilotes hincados. Además, es importante que el diseñador considere K_0 en los métodos basados en las propiedades del suelo. Por este motivo en la evaluación de la incertidumbre presentada en la siguiente sección las ecuaciones para estado límite se expresan en términos de K_0 .

La literatura investigada reveló una variedad de observaciones respecto del método de diseño de pilotes recomendado por el American Petroleum Institute (API). Los lineamientos del API son ampliamente utilizados y se apoyan en una cantidad considerable de investigaciones, de modo que una evaluación de estos lineamientos permite comprender la calidad del diseño de pilotes en arena. Usamos estos resultados para identificar temas claves en el diseño de pilotes en arena al considerar otras ecuaciones de diseño. Notar las siguientes observaciones con respecto al método del API:

- Toolan et al. (1990) describen un número de limitaciones de los códigos del API (falta de confiabilidad de varios de los ensayos en los que se apoyan, el método sobrestima la capacidad, el método no puede tomar en cuenta sitios de material suelto y muy denso);
- Randolph (1994) sostiene que los lineamientos del API limitan los valores de las resistencias friccionales y de punta a un nivel de tensión o profundidad absoluta independientemente del diámetro del pilote. Explica que los valores límites para la capacidad de punta y friccional son una idealización;

- Randolph (1994) concluye que “Se necesitan datos nuevos y de alta calidad obtenidos en obra sobre la hincabilidad y capacidad axial de pilotes en arena, particularmente de pilotes a escala real, a fin de poder resolver las incertidumbres que existen respecto de los valores límites de la resistencia friccional y de punta, el tratamiento de pilotes de desplazamiento parcial y las potenciales diferencias entre la capacidad friccional en tracción y en compresión.”;
- En cuanto a los “pilotes de desplazamiento parcial,” tradicionalmente el diseño de los pilotes de punta abierta se ha realizado usando recomendaciones generales para el coeficiente de empuje lateral del suelo del fuste K_s (por ejemplo, Kraft 1990) que no toman en cuenta el grado de taponamiento. Sin embargo, Paik y Salgado (2003) demostraron que la resistencia de los pilotes de punta abierta depende del grado de taponamiento durante el hincado, medido mediante la relación de llenado incremental (IFR^{*}). La IFR se define como:

$$IFR = \frac{dL_p}{dL} \quad (7.2.2)$$

donde L_p es la longitud del tapón y L es la longitud de penetración del pilote.

De estas observaciones se puede concluir que aún se debe avanzar mucho en los diseños en arena en términos de la precisión y el número y la calidad de los datos usados para justificar los métodos de diseño. La evaluación de la incertidumbre de las ecuaciones de diseño presentada en la siguiente sección deja al descubierto algunas áreas del diseño de pilotes que se beneficiarían de investigaciones más específicas y mejores datos.

El cúmulo de conocimientos disponible sobre la fricción en la interfase entre pilote y suelo es mucho mejor que el que existe para el diseño global de pilotes en arena. Se han realizado una gran cantidad de investigaciones sobre el tema de la fricción en la interfase entre acero y arena, incluyendo las recientes contribuciones de Kishida y Uesugi (1987), Jardine et al. (1993), Rao et al. (1998), y Jardine y Chow (1998).

La rugosidad superficial es un factor importante en la fricción en la interfase. En la literatura encontramos dos medidas diferentes de la rugosidad superficial: rugosidad media (R_a) y rugosidad máxima (R_{max}). La rugosidad media es un parámetro muy utilizado por la industria

* IFR: *Incremental Filling Ratio*

estadounidense y también una medida muy común. La rugosidad media (expresada en μm) se define como (Outokumpu Stainless, 2004)

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (7.2.3)$$

donde l es la longitud de evaluación de la medición (típicamente 8mm) y $z(x)$ es el perfil medido de la superficie. El perfil de la superficie $z(x)$ se expresa de manera tal que el área debajo del perfil por encima de la línea media sea igual al área por debajo de la misma. La rugosidad máxima es la máxima diferencia de altura entre un “pico” y un “valle” para un perfil de superficie sobre una longitud de referencia determinada. Por lo tanto R_{max} siempre se expresa para una cierta longitud de referencia. De acuerdo con la Asociación Japonesa de Normas (Kishida y Uesugi, 1987) R_{max} ($L = 2.5\text{mm}$) es una medida habitual. Sin embargo, R_a es una medida más común de la rugosidad superficial, y los resultados de Rao et al. (1998), los cuales se informan con referencia a R_a , se utilizan para apoyar el análisis de confiabilidad del presente capítulo.

Rao et al. (1998) y Kishida y Uesugi (1987) demostraron que tanto R_{max} ($L = D_{50}$) como R_a/D_{prom} son medidas de la rugosidad útiles para hallar correlaciones entre el ángulo de fricción en la interfase δ y la rugosidad de diferentes materiales usados para fabricar pilotes. D_{prom} es el área total debajo de la curva de distribución del tamaño de partícula dividida por 100%, cuando el tamaño de partícula se grafica en escala lineal. Los valores de D_{prom} fueron aproximadamente iguales a D_{50} para las arenas ensayadas por Rao et al. Los valores de R_a para pilotes de acero y D_{50} para arenas son fáciles de obtener en la práctica. Para los pilotes de acero R_a es típicamente igual a 8-10 μm .

Las arenas solicitadas a corte a lo largo de los laterales de un pilote alcanzan grandes deformaciones con lo cual se llega al estado crítico. Por lo tanto, el ángulo de fricción en estado crítico ϕ_c y el correspondiente ángulo de fricción en la interfase δ_c son valores relevantes del ángulo de fricción a utilizar en el diseño. En la siguiente sección se utilizan resultados de ensayos de fricción en la interfase realizados por Jardine et al. (1993), Rao et al. (1998), y Jardine y Chow (1998) para evaluar la incertidumbre de δ_c / ϕ_c .

Métodos de diseño directos

La mayor parte de los métodos de diseño directos se basan ya sea en el ensayo de penetración estándar (SPT) o en el ensayo de penetración con penetrómetro de cono (CPT). El

SPT no se correlaciona bien con los procesos de carga cuasi-estáticos de los pilotes. Por el contrario, el CPT se asemeja a un ensayo de carga de pilotes a pequeña escala (Lee y Salgado 1999). La principal diferencia entre el CPT y la base de un pilote de mayor diámetro es el tamaño de la zona de suelo que afecta la capacidad de punta. Por este motivo la variabilidad espacial de los parámetros del suelo es la principal fuente de incertidumbre en la comparación entre resistencias de punta q_c obtenidas mediante ensayos CPT y aquellas obtenidas mediante ensayos de carga en pilotes. White (2003) muestra que, en promedio, q_{bL} tiende a q_c .

Se han desarrollado métodos de diseño directos para la mayoría de los tipos de pilotes. Las curvas carga-asentamiento son diferentes dependiendo del procedimiento usado para instalar los pilotes (En términos generales, dependen de si el pilote es un pilote de desplazamiento o no. Sin embargo, q_{bL} se moviliza con grandes niveles de asentamiento y es idéntica tanto para pilotes de desplazamiento como para aquellos que no lo son).

Lee y Salgado (1999) desarrollaron un método de diseño basado en el análisis de pilotes que no son de desplazamiento. Estos investigadores observaron una buena concordancia entre ensayos de carga realizados sobre pilotes H de acero, pilotes de hormigón prefabricados, y pilotes perforados y los valores pronosticados usando el método de diseño por ellos propuesto. Sugieren que su método de diseño sea considerado un método de diseño directo para determinar la resistencia de punta de pilotes de desplazamiento (pilotes H y pilotes de punta cerrada) y pilotes que no son de desplazamiento (pilotes perforados). Lehane y Randolph (2002) recomendaron estimar la capacidad de punta de los pilotes de desplazamiento, conservadoramente, usando los valores de Lee y Salgado (1999) para pilotes que no son de desplazamiento.

La Tabla 7.2.1 resume los métodos de diseño seleccionados para el análisis de confiabilidad. Estos métodos se seleccionaron por lo exhaustivo de los datos en los cuales se apoyan. Para desarrollar métodos de diseño para pilotes de punta cerrada se utilizaron diferentes fuentes. La lista completa de referencias se incluye en el Capítulo 8.

Tabla 7.2.1 – Resumen de los métodos de diseño seleccionados para el análisis de confiabilidad en arenas

Pilotes hincados de punta cerrada		
	Resistencia de punta	Resistencia friccional
Métodos basados en las propiedades del suelo	$\frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} = 1.02 - 0.0051D_R(\%)$ (diversas fuentes)	$f_s = \frac{K_s}{K_0} K_0 \tan\left(\frac{\delta_c}{\phi_c}\right) \sigma'_v$ (diversas fuentes)
Métodos directos	$\frac{q_{b,10\%}}{q_c} = 1.02 - 0.0051D_R(\%)$ (diversas fuentes)	$f_s = \left(\frac{f_s}{q_c}\right) q_c = 0.002q_c$ (diversas fuentes)
Pilotes hincados de punta abierta		
	Resistencia de punta	Resistencia friccional
Métodos basados en las propiedades del suelo	$\frac{q_{b,10\%}}{\sigma'_h} = \alpha \left(326 - 295 \frac{IFR(\%)}{100} \right)$ (Paik y Salgado 2003)	$f_s = \frac{K_s}{K_0} K_0 \tan\left(\frac{\delta_c}{\phi_c}\right) \sigma'_v$ (Paik y Salgado 2003)
Métodos directos	$\frac{q_{b,10\%}}{q_c} = -0.00443 IFR(\%) + 0.557$ (Paik y Salgado 2003)	$f_s = \left(\frac{f_s}{q_c}\right) q_c = 0.002q_c$ (Paik y Salgado 2003)
Pilotes perforados		
	Resistencia de punta	Resistencia friccional
Métodos basados en las propiedades del suelo	$\frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} = 0.225 - 0.0011D_R(\%)$ (Lee y Salgado 1999)	
Métodos directos	$\left(\frac{q_{b,10\%}}{q_c}\right) = 0.225 - 0.0011D_R(\%)$ (Lee y Salgado 1999)	

Observar que los pilotes de hormigón prefabricado son iguales a los pilotes de punta cerrada (tubos cerrados) en términos de su capacidad de punta y resistencia friccional ya que ambos son pilotes de desplazamiento. La única diferencia es la posibilidad de que el valor de δ_c/ϕ_c sea mayor debido a la mayor rugosidad superficial del hormigón.

7.3 Diseño de pilotes en arcilla

En esta sección presentamos y explicamos los métodos y ecuaciones para diseño de pilotes de punta cerrada hincados en arcilla seleccionados para el análisis de confiabilidad y el cálculo de factores de resistencia. No evaluamos la incertidumbre de los métodos de diseño para pilotes de punta abierta, ya que los datos disponibles eran insuficientes para completar un análisis satisfactorio. Sin embargo, es importante observar que el uso de pilotes de punta abierta no es tan común en arcillas como lo es en arenas.

Al igual que en el caso de las arenas, es importante contar con una definición específica de la capacidad de punta última en arcillas. Para ello muchas veces se utiliza la definición de $q_{b,10\%}$ ($s/B = 10\%$). Para las arcillas de blandas a medianamente rígidas q_{bL} es prácticamente igual a $q_{b,10\%}$, ya que en estas arcillas la capacidad de carga de los pilotes se moviliza completamente con asentamientos pequeños, en la mayoría de los casos menores que $0.10B$. No evaluamos la incertidumbre de los métodos de diseño para arcillas rígidas ya que no hay suficientes datos de ensayos de carga disponibles.

La resistencia de punta de los pilotes perforados se podría comparar con la de los pilotes hincados de punta cerrada, ya que las curvas carga-asentamiento también llevarán a q_{bL} con asentamientos pequeños. Esto se debe al comportamiento carga-asentamiento de las arcillas en condición no drenada. De modo que tanto para pilotes hincados como para pilotes perforados en arcilla, la resistencia de punta es q_{bL} , la cual se determina usando las mismas ecuaciones para ambos tipos de pilotes. Consecuentemente la misma incertidumbre será aplicable a la resistencia de punta de los pilotes perforados. No evaluamos la incertidumbre de los métodos de diseño para capacidad friccional de pilotes perforados ya que los ensayos de carga sobre pilotes son relativamente nuevos, y son pocas las bases de datos de este tipo de ensayos que se encuentran en la literatura.

Tradicionalmente la capacidad de punta de los pilotes en arcilla se ha tomado igual a la capacidad de carga de hundimiento:

$$q_{bL} = N_c s_u = 9s_u \quad (7.3.1)$$

donde s_u es la resistencia al corte no drenada de la arcilla cerca de la base del pilote. Stark y Juhrend (1989) demostraron que el factor de capacidad de carga N_c probablemente será mayor

que 9 en base a la comparación de resultados presentados en diferentes estudios. Para analizar el valor esperado del factor N_c y su incertidumbre se utiliza el análisis de límites de fundaciones en arcilla realizado por Salgado et al. (2004). De acuerdo con Salgado et al. (2004) el valor de N_c está comprendido entre 11.0 y 13.7. Para el factor de resistencia propuesto se utiliza un valor promedio de N_c igual a 12.

El American Petroleum Institute (API 1991) recomienda la siguiente ecuación para determinar la resistencia friccional unitaria usando el método α para arcillas,

$$f_s = \alpha s_u \quad (7.3.2)$$

donde α es un factor empírico que se puede relacionar con las propiedades de la arcilla. Los valores de α se determinan usando las recomendaciones de Randolph y Murphy (1985), expresadas como una relación que depende de la relación de resistencias:

$$\alpha = \begin{cases} \left(\frac{s_u}{\sigma_v} \right)_{NC}^{0.5} \left(\frac{s_u}{\sigma_v} \right)^{-0.5}, & \text{para } \frac{s_u}{\sigma_v} \leq 1 \\ \left(\frac{s_u}{\sigma_v} \right)_{NC}^{0.5} \left(\frac{s_u}{\sigma_v} \right)^{-0.25}, & \text{para } \frac{s_u}{\sigma_v} > 1 \end{cases} \quad (7.3.3)$$

Al discutir este método Randolph y Murphy (1985) expresan que “la relación de resistencias se puede relacionar tanto con el valor del OCR para un suelo determinado, y también con el valor de K_0 . Sin embargo, α es una magnitud más fundamental (y directamente medible) que cualquiera de las otras dos, y además refleja la totalidad de la historia de tensiones del suelo.” Sabiendo que el uso del método α del API está ampliamente difundido y que toma en cuenta los factores que afectan la resistencia friccional, consideramos este método para el LRFD.

Para los métodos directos consideramos el método propuesto por Aoki y de Alencar Velloso (1975) basado en ensayos SPT para pilotes en una variedad de suelos que varían de arenas a arcillas. En este método la capacidad de punta se calcula como:

$$q_b = n_b N_{SPT} \quad (7.3.4a)$$

$$n_b = \frac{K}{F_1} \quad (7.3.4b)$$

para lo cual los factores empíricos K y F_1 se indican en las Tablas 7.3.1 y 7.3.2. Estos factores se basan en los resultados de 63 ensayos de carga realizados en pilotes Franki, pilotes Franki encamisados, pilotes prefabricados y pilotes de acero. Debido a su método de instalación, es dable esperar que todos estos pilotes se comporten como pilotes hincados de gran desplazamiento. La capacidad friccional se calcula como

$$f_s = n_{si} N_{SPT} \quad (7.3.5a)$$

$$n_{st} = \frac{\alpha_1 K}{F_2} \quad (7.3.5b)$$

para lo cual los factores empíricos K , α_1 y F_2 se indican en las Tablas 7.3.1 y 7.3.2.

Tabla 7.3.1 – Valores de α_1 y K para utilizar con el método de diseño directo de Aoki y Velloso (1975)

Tipo de suelo	$\frac{K}{P_A}$	α_1 (%)
Grava	-	-
Arena	10	1.4
Arena limosa	8.0	2.0
Arena limosa con arcilla	7.0	2.4
Arena arcillosa con limo	5.0	2.8
Arena arcillosa	6.0	3.0
Limo arenoso	5.5	2.2
Limo arenoso con arcilla	4.5	2.8
Limo	4.0	3.0
Limo arcilloso con arena	2.5	3.0
Limo arcilloso	2.3	3.4
Arcilla arenosa	3.5	2.4
Arcilla arenosa con limo	3.0	2.8
Arcilla limosa con arena	3.3	3.0
Arcilla limosa	2.2	4.0
Arcilla	2.0	6.0

Tabla 7.3.2 – Valores de F_1 y F_2 para utilizar con el método de diseño directo de Aoki y de Alentar Velloso (1975)

Tipo de pilote	F_1	F_2
Pilotes perforados	3.5	7.0
Franki	2.5	5.0
Acero	1.75	3.5
Hormigón prefabricado	1.75	3.5

La Figura 7.3.1 ilustra una comparación entre las capacidades totales medidas y aquellas calculadas usando las expresiones (7.3.4) y (7.3.5) [Aoki y de Alencar Velloso (1975)]. Al igual que para la mayoría de los métodos de diseño directos este conjunto de datos está formado por los mismos datos usados para calibrar el método. Los ejemplos de otros métodos incluyen el de Chow (1997) y el de Eslami y Fellenius (1997). El hecho de que estos métodos de diseño fueron desarrollados para situaciones de diseño particulares limita su aplicabilidad. Esta es una limitación de todos los métodos de diseño directos, no sólo del método que consideramos en nuestro análisis de confiabilidad. Por consiguiente, estos métodos sólo se pueden usar bajo las mismas condiciones del ensayo. Más adelante, en la Sección 9.2.1, demostraremos cómo seleccionar diferentes factores de resistencia para diferentes métodos de diseño en base a datos similares a los de la Figura 7.3.1.

La Tabla 7.3.3 resume las ecuaciones de diseño seleccionadas para arcillas.

Tabla 7.3.3 – Resumen de los métodos de diseño seleccionados para análisis de confiabilidad en arcillas

	Resistencia de punta	Resistencia friccional
Métodos basados en las propiedades del suelo	$q_{bL} = N_c s_u$ (Salgado et al. 2004)	$f_s = \alpha s_u$ (Randolph y Murphy 1985)
Métodos directos	$q_b = n_b N_{SPT}$ (Auki y de Alentar Velloso 1975)	$f_s = n_{si} N_{SPT}$ (Auki y de Alentar Velloso 1975)

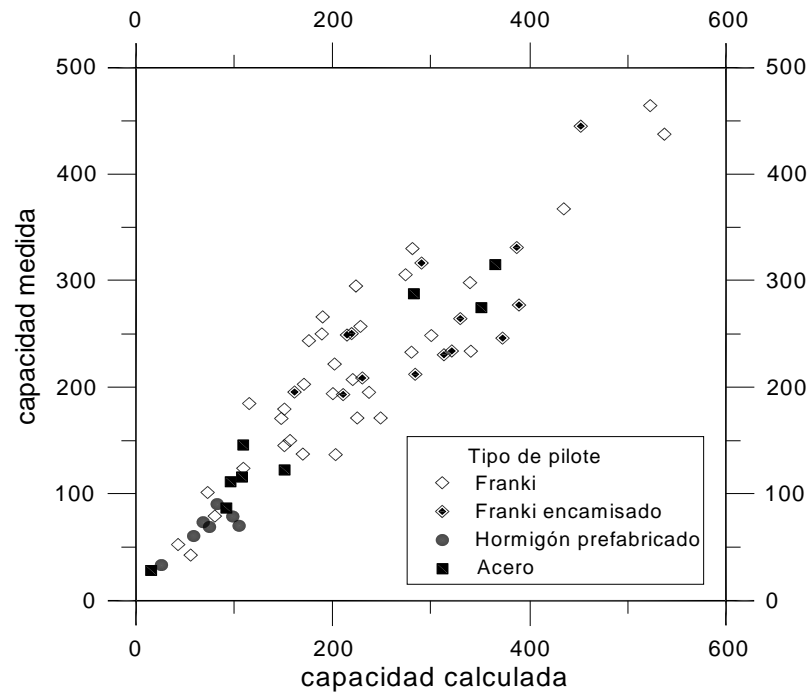


Figura 7.3.1 – Resistencia total de pilotes medida vs. calculada (según estudio de Aoki y Velloso (1975) para pilotes Franki, pilotes Franki encamisados, pilotes de hormigón prefabricado y pilotes de acero.