

CAPÍTULO 8. FACTORES DE RESISTENCIA PARA FUNDACIONES PROFUNDAS EN ARENA

8.1 Evaluación de las incertidumbres de las variables para fundaciones profundas en arena

Aunque existen numerosos métodos de diseño, en la presente sección hemos seleccionado algunas ecuaciones de diseño publicadas en la literatura o deducidas a partir de una base de datos de ensayos de carga en pilotes. En todos los casos la ecuación considerada cuantifica una verificación en estado límite último, y dicha ecuación se expresa en términos de la carga aplicada y las variables de diseño correspondientes. Cada ecuación para estado límite contiene la expresión para la resistencia de diseño, y por lo tanto refleja directamente la ecuación de diseño a utilizar.

Con frecuencia los pilotes se diseñan en base a ensayos in situ realizados antes de iniciar cualquier actividad de hincado. Ocasionalmente el diseño de un proyecto particular se verifica realizando ensayos de carga dinámicos o estáticos sobre un pilote ya instalado. En estos casos se está midiendo la capacidad del pilote para un conjunto particular de circunstancias de diseño: longitud y sección transversal del pilote y perfil del suelo. Con esta medición el diseñador tiene un mejor conocimiento de la capacidad real del pilote, con lo cual se reduce la incertidumbre. Por todo lo dicho es posible considerar dos casos: 1) la incertidumbre de la capacidad de un pilote pronosticada en ausencia de mediciones que la confirmen, y 2) la incertidumbre de la capacidad de un pilote pronosticada después que se ha ensayado un pilote similar en el mismo predio. En los párrafos siguientes se considera el primero de los casos descritos. Por lo tanto, los factores de resistencia desarrollados en el presente capítulo son aplicables al caso de diseño habitual, donde el diseñador no podrá revisar el diseño en base a un programa de ensayos de verificación. Esta evaluación se basa en ensayos in situ o propiedades del suelo y datos de ensayos de capacidad de carga de pilotes, considerados de a pares. En base a este conjunto de datos se intenta determinar la relación que existe entre las mediciones obtenidas mediante ensayos del suelo y la probable capacidad de los pilotes.

8.1.1 Diseño de pilotes de punta cerrada hincados en arena

Diseño de la capacidad friccional en base a las propiedades del suelo

Paso 1. Identificar la ecuación correspondiente al estado límite

La ecuación correspondiente a estado límite para capacidad friccional se expresa como:

$$\left[\frac{K_s}{K_0} K_0 \tan \left(\frac{\delta_c}{\phi_c} \phi_c \right) \sigma_v' \right] a_s dL - DL - LL = 0 \quad (8.1.1)$$

donde (K_s/K_0) es la relación entre el coeficiente de empuje del suelo que actúa sobre el pilote hincado y el coeficiente en reposo K_0 , (δ_c/ϕ_c) es la relación entre el ángulo de fricción superficial en la interfase y el ángulo de fricción del suelo medido en estado crítico ϕ_c , σ_v' es la presión geostática efectiva a la profundidad a la cual se estima la fricción superficial unitaria, a_s es el área del fuste por unidad de longitud del pilote, dL es una unidad de longitud del pilote, DL es la carga permanente que actúa sobre la unidad de longitud del pilote, y LL es la sobrecarga viva que actúa sobre la unidad de longitud del pilote.

Paso 2. Identificar las variables que componen la ecuación

De las variables de la Ecuación (8.1.1), K_0 , σ_v' y a_s son seleccionadas por el diseñador; DL y LL se obtienen como resultado del diseño de la superestructura; ϕ_c se estima o se mide; y las relaciones (K_s/K_0) y (δ_c/ϕ_c) se basan en resultados publicados (es decir, son valores recomendados para el diseño).

Paso 3. Identificar los ensayos geotécnicos asociados con cada variable

De las variables identificadas sólo ϕ_c se puede medir en la práctica habitual. La variable K_0 no se puede medir en obra independientemente de D_R o ϕ_p , por lo cual no es posible definir una incertidumbre sistemática en su determinación. Esto significa que el diseñador debe contar con información adicional, como por ejemplo una historia geológica, a partir de la cual estimar K_0 . Debido a que no se realiza ninguna medición, cualquier incertidumbre asignada a esta variable será arbitraria y no reflejará las circunstancias de diseño específicas.

Paso 4. Identificar todas las incertidumbres que componen cada variable, incluyendo las transformaciones

Las incertidumbres de las variables ϕ_c , DL y LL ya fueron identificadas anteriormente (ver Tabla 4.1.1). La variable a_s es especificada por el diseñador y su incertidumbre es despreciable debido a que las tolerancias en las dimensiones de los pilotes hincados son relativamente pequeñas. La variable dL se utiliza sólo para los propósitos del diseño y no afecta el resultado final. La variable K_0 es estimada por el diseñador, pero no es posible determinar para ella una incertidumbre sistemática.

Para seleccionar valores de la relación (K_s/K_0) a utilizar en el diseño utilizamos la relación de Paik y Salgado (2003). Una de las ventajas de esta relación es el hecho de que ha sido validada por un estudio en cámara de calibración en el cual la mayoría de las variables fueron controladas estrictamente. Por lo tanto, la naturaleza de la relación no se ve oscurecida por errores de ensayo u otras inferencias erróneas respecto de los estados tensionales o las propiedades del suelo alrededor del fuste del pilote – errores que son redundantes a los que ya han sido considerados en otros aspectos del diseño. En la Figura 8.1.1 se grafica esta relación para pilotes de punta cerrada ($PLR^* = 0$) y pilotes de punta abierta completamente libres de taponamiento ($PLR = 1$).

Observar que la gráfica confirma la tendencia intuitiva de que la variación del coeficiente de empuje lateral del suelo será mayor para pilotes instalados en arena densa que para aquellos en arena suelta. Esta tendencia ha sido corroborada por algunos de los resultados de los ensayos de carga de pilotes realizados por Vesic (1970), Comité BCP (1971), Gregersen et al. (1973), Beringen et al. (1979), Briaud et al. (1989), Altaee et al. (1992, 1993), Paik et al. (2003), y Lee et al. (2003), también graficados en la Figura 8.1.1. Sin embargo se debe observar que, debido a la naturaleza altamente sensible de los parámetros que estamos intentando calcular a partir de estos resultados, los puntos graficados deberían presentar una gran dispersión, la cual se puede observar en la figura. Las desviaciones más severas respecto de la tendencia calculada corresponden a Briaud et al. (1989), Paik et al. (2003), y Lee et al. (2003), lo cual se puede observar en la figura. Estos tres estudios incorporaron ajustes para considerar cargas residuales, lo cual excede el alcance del presente estudio. Este tipo de ajuste provocará una reducción de las capacidades friccionales

* PLR: Relación de longitud de taponamiento (*Plug Length Ratio*)

estimadas, lo cual también se puede observar en la figura.

La incertidumbre de la relación (K_s/K_0) se puede evaluar considerando los resultados de ensayos de carga de alta calidad realizados sobre pilotes en cámara de calibración por Paik Salgado (2003), tal como se hace en la sección correspondiente a pilotes de punta abierta (Sección 8.1.2). Suponiendo que (K_s/K_0) es normalmente distribuida, la PDF para (K_s/K_0) se define como una distribución normal con $COV = 0.22$.

La incertidumbre de la relación (δ_c/ϕ_c) se puede valorar considerando los resultados de los ensayos de corte directo de alta calidad en la interfase realizados por Lehane et al. (1993), Jardine y Chow (1998), y Rao et al. (1998). La Figura 8.1.2 muestra una gráfica de la relación (δ_c/ϕ_c) para superficies de acero y hormigón con diferentes rugosidades medias R_a en contacto con diferentes arenas. Observar que para valores de R_a mayores que $4\mu\text{m}$ no hay una variación apreciable de (δ_c/ϕ_c) . Los valores típicos de R_a para pilotes de acero son superiores a $8\mu\text{m}$. La Figura 8.1.3 es un histograma de los datos de la Figura 8.1.2 para valores de R_a mayores que $2\mu\text{m}$. En base a estos resultados, la incertidumbre de (δ_c/ϕ_c) se puede representar mediante una distribución normal con una media igual a 0.9 y un COV igual a 0.10.

Pasos 5 y 6. Evaluar las incertidumbres compuestas y seleccionar funciones de densidad de probabilidad para el análisis de confiabilidad

La Ecuación (8.1.1) no incluye variables calculadas a partir de otras variables. Por lo tanto, no es necesario incluir en la incertidumbre compuesta ninguna incertidumbre relacionada con las transformaciones. Las funciones de densidad de probabilidad para (K_s/K_0) y (δ_c/ϕ_c) ya fueron seleccionadas en el Paso 4; la función de densidad de probabilidad de ϕ_c se halló en la Sección 4.1. Estas PDF se pueden usar directamente con la Ecuación (8.1.1) en el análisis de confiabilidad.

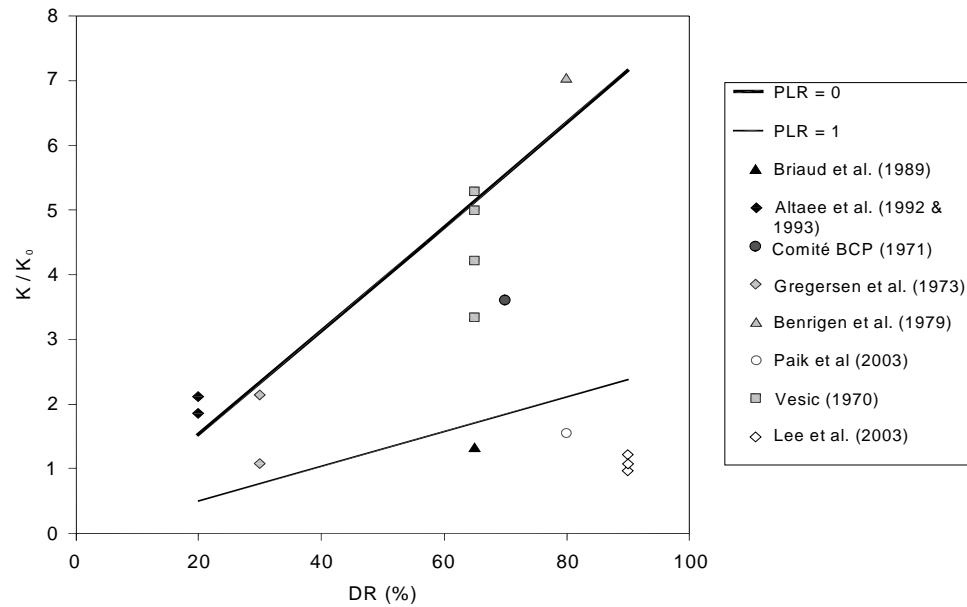


Figura 8.1.1. Relación de Paik y Salgado (2003) para pilotes de punta cerrada (PLR = 0) y pilotes de punta abierta completamente libres de taponamiento (PLR = 1). A título comparativo, también se grafican los resultados de diversos ensayos de carga de alta calidad realizados sobre pilotes de punta cerrada.

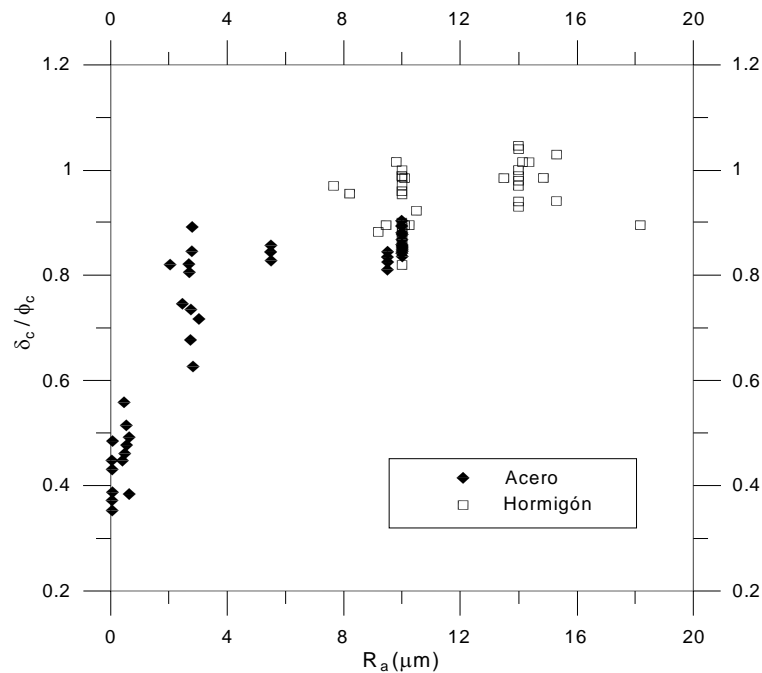


Figura 8.1.2 – Valores de δ_c/ϕ_c en base a resultados de ensayos de corte directo de alta calidad en la interfase

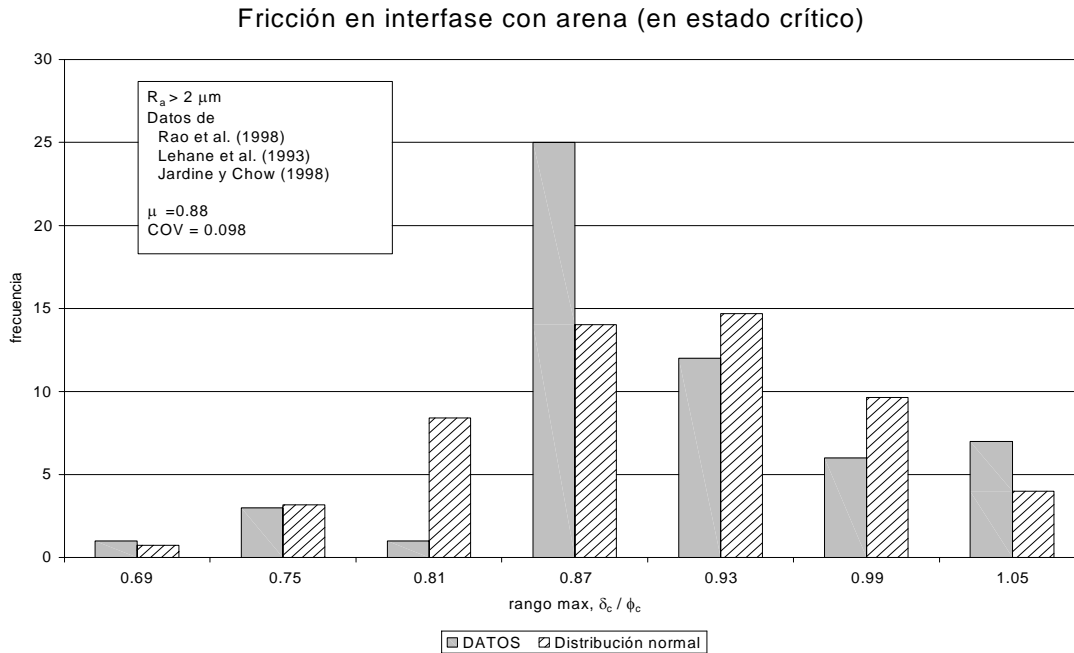


Figura 8.1.3 – Histograma de los valores de δ_c / ϕ_c para $R_a > 2\mu\text{m}$, en base a resultados de ensayos de corte directo de alta calidad en la interfase

Diseño de la capacidad de punta en base a las propiedades del suelo

Paso 1. Identificar la ecuación correspondiente al estado límite

La ecuación correspondiente a estado límite para capacidad de punta se expresa como

$$\left(\frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} \right) q_{bL} A_b - DL - LL = 0 \quad (8.1.2)$$

donde $(q_{b,10\%}/q_{bL})$ es la relación entre la presión en la base cuando $s/B = 10\%$ y la resistencia al hundimiento de la base q_{bL} , A_b es el área de la base del pilote, DL es la carga permanente que actúa sobre la base del pilote, y LL es la sobrecarga viva que actúa sobre la base del pilote.

Paso 2. Identificar las variables que componen la ecuación

De las variables de la Ecuación (8.1.2), A_b es seleccionada por el diseñador; DL y LL se obtienen como resultado del diseño de la superestructura; q_{bL} se calcula a partir de la densidad relativa D_R ; y la relación $(q_{b,10\%}/q_c)$ se basa en resultados publicados.

Paso 3. Identificar los ensayos geotécnicos asociados con cada variable

De las variables identificadas, q_{bL} se calcula a partir de D_R , y D_R se puede estimar usando ensayos CPT, SPT, o muestreo in situ (aunque para obtener una estimación de D_R confiable sería necesario utilizar procedimientos de muestreo especiales). La presión límite q_{bL} se calcula a partir de D_R de acuerdo con Salgado y Mitchell (2003):

$$\frac{q_{bL}}{p_A} = C_1 \exp(C_2 D_R) \left(\frac{\sigma'_h}{p_A} \right)^{C_3} \quad (8.1.3)$$

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.

Paso 4. Identificar todas las incertidumbres que componen cada variable, incluyendo las transformaciones

Las incertidumbres de las variables DL y LL ya fueron identificadas anteriormente (ver Tabla 4.1.1). La variable A_b es especificada por el diseñador y su incertidumbre es despreciable debido a que las tolerancias en las dimensiones de los pilotes hincados son relativamente pequeñas. La incertidumbre de la relación $(q_{b,10\%}/q_{bL})$ se puede evaluar considerando los resultados de ensayos de carga de alta calidad realizados sobre pilotes por Vesic (1970), Comité BCP (1971), Gregersen et al. (1973), Beringen et al. (1979), Briaud et al. (1989), Altaee et al. (1992, 1993), Paik et al. (2003) y Lee et al. (2003). En la Figura 8.1.4 se grafica la relación $(q_{b,10\%}/q_c)$ para capas de arena con diferentes densidades relativas. La incertidumbre de la relación $(q_{b,10\%}/q_{bL})$ se puede inferir de la Figura 8.1.4, ya que en promedio la carga de hundimiento q_{bL} es igual a la resistencia a la penetración con penetrómetro de cono q_c (ver discusión en el Capítulo 7). A partir de estos resultados se observa una tendencia significativa de disminución de $(q_{b,10\%}/q_c)$ a medida que aumenta D_R . Para la relación $(q_{b,10\%}/q_c)$ se ha hallado la siguiente tendencia, la cual se grafica en la Figura 8.1.4:

$$\frac{q_{b,10\%}}{q_c} = 1.02 - 0.0051 D_R \% \quad (8.1.4)$$

La dispersión de la relación $(q_{b,10\%}/q_c)$ se puede evaluar considerando los datos una vez eliminada la tendencia y normalizados con respecto a la Ecuación (8.1.4). La tendencia se

elimina de la siguiente manera:

$$error_{q_{b,10\%}/q_c} = \frac{\left(\frac{q_{b,10\%}}{q_c} \right)_{\text{datos}} - \frac{q_{b,10\%}}{q_c}(D_R)}{\frac{q_{b,10\%}}{q_c}(D_R)} \quad (8.1.5)$$

donde $error_{q_{b,10\%}/q_c}$ expresa la posición relativa de un punto de datos particular respecto de la línea de tendencia y la función $q_{b,10\%}/q_c(D_R)$ representa la línea de tendencia (8.1.4) evaluada para D_R igual que para el punto de datos $q_{b,10\%}/q_c$. Si se calcula $error_{q_{b,10\%}/q_c}$ para todos los puntos de datos, la distribución de los puntos de datos respecto de la línea de tendencia se puede graficar usando el histograma de la Figura 8.1.5. Debido a que en la Ecuación (8.1.5) dividimos por el valor medio, la desviación estándar de $error_{q_{b,10\%}/q_c}$ es igual al COV de $q_{b,10\%}/q_c$. Suponiendo que $(q_{b,10\%}/q_c)$ es normalmente distribuida, los datos de la Figura 8.1.4 indican un COV de 0.17 cuando se aplica la Ecuación (3.2.1) a los datos luego de eliminar la tendencia. Esta distribución normal también se grafica en la Figura 8.1.5 usando un histograma. Como la Ecuación (8.1.4) define un valor medio para $(q_{b,10\%}/q_{bL})$, una distribución normal con COV igual a 0.17 es una función de densidad de probabilidad que representa la incertidumbre de $(q_{b,10\%}/q_{bL})$.

Salgado et al. (1997) estudiaron la capacidad predictiva de una ecuación como la (8.1.3) para determinar valores de q_{bL} a partir de una D_R determinada en laboratorio. Se halló que los valores experimentales de q_{bL} estaban comprendidos en una franja de $\pm 30\%$ respecto de los valores pronosticados. Se aplicó el procedimiento 6σ para hallar el COV de este q_{bL} pronosticado, obteniéndose un valor de 0.10. En ausencia de datos adicionales, consideramos la incertidumbre de las mediciones de D_R usando la incertidumbre de D_R determinada mediante el CPT. En la Sección 4.1 se determinó que la desviación estándar de D_R era menor o igual que 8%.

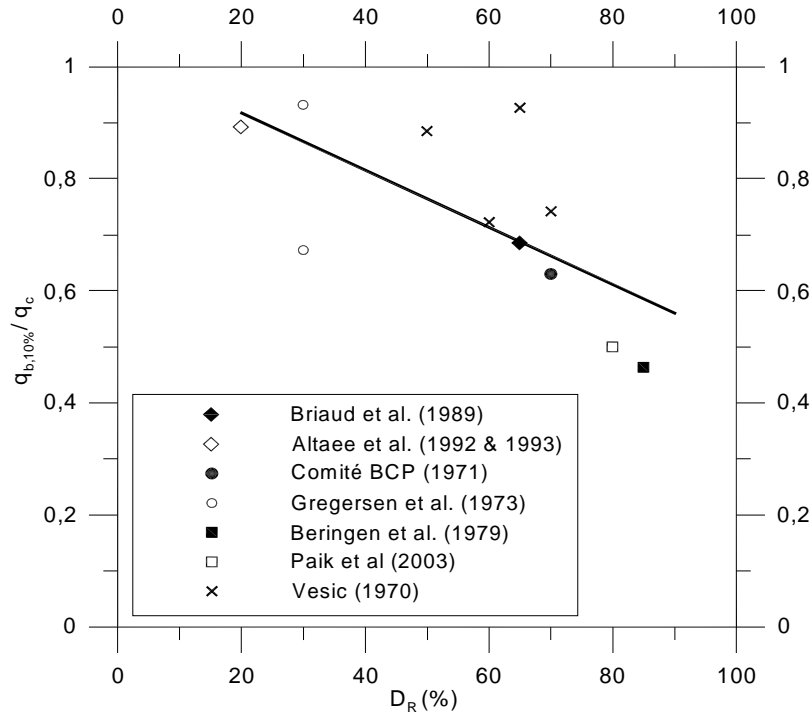


Figura 8.1.4 – Valores de $q_{b,10\%}/q_c$ en base a resultados de ensayos de capacidad de carga de alta calidad realizados sobre pilotes de tamaño real hincados en arena. Los valores de q_c se midieron usando el CPT; $q_{b,10\%}$ se determinó a partir de curvas carga-asentamiento obtenidas mediante ensayos de compresión; q_b se midió directamente colocando sensores de deformación en los pilotes; todos los pilotes eran pilotes de punta cerrada de acero u hormigón prefabricado; la línea de tendencia ilustrada es $q_{b,10\%}/q_c = -0.0051D_R(\%) + 1.02$

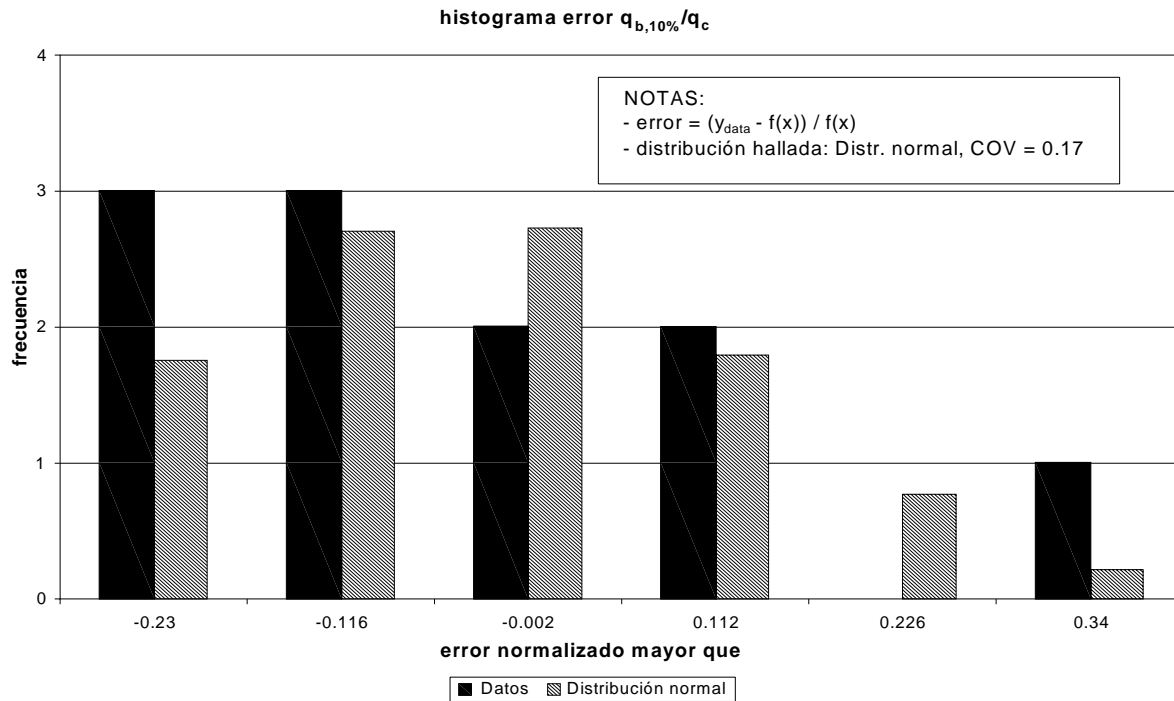


Figura 8.1.5 – Histograma de $error_{q_{b,10\%}/q_c}$ (valores de $q_{b,10\%}/q_c$ a los cuales se les ha eliminado la tendencia) para pilotes de punta cerrada en arena

Pasos 5 y 6. Evaluar las incertidumbres compuestas y seleccionar funciones de densidad de probabilidad para el análisis de confiabilidad

Para hallar la incertidumbre de la variable transformada q_{bL} se aplicaron métodos de integración numérica a la Ecuación (3.2.7). Para calcular el histograma que representa la incertidumbre de q_{bL} usando la Ecuación (3.2.7), $p_X(x)$ se definió como una distribución normal con $\sigma = 8\%$, representando $D_R(\%)$, y la transformación $y = f(x)$ es la Ecuación (8.1.3). Observar que aquí no se aplica integración numérica a la Ecuación (3.2.9); por lo tanto, la incertidumbre de la transformación (8.1.3) sólo se incluye una vez (ya fue considerada en la incertidumbre de D_R). La alternativa hubiera sido integrar la incertidumbre de (8.1.3) dos veces, lo cual no es razonable porque se está usando el mismo modelo y por lo tanto su uso para hallar q_{bL} no introduce incertidumbre adicional. El histograma de q_{bL} resultante se puede aproximar mediante una distribución normal con $COV = 0.16$. Este histograma se ilustra en la Figura 8.1.6 para el caso de $D_R = 80\%$. Para q_{bL} se requiere un factor de sesgo, ya que depende del método CAM usado para hallar D_R . Por ejemplo, si para hallar D_R se utiliza el CPT, el factor de sesgo para q_{bL} será 1.06.

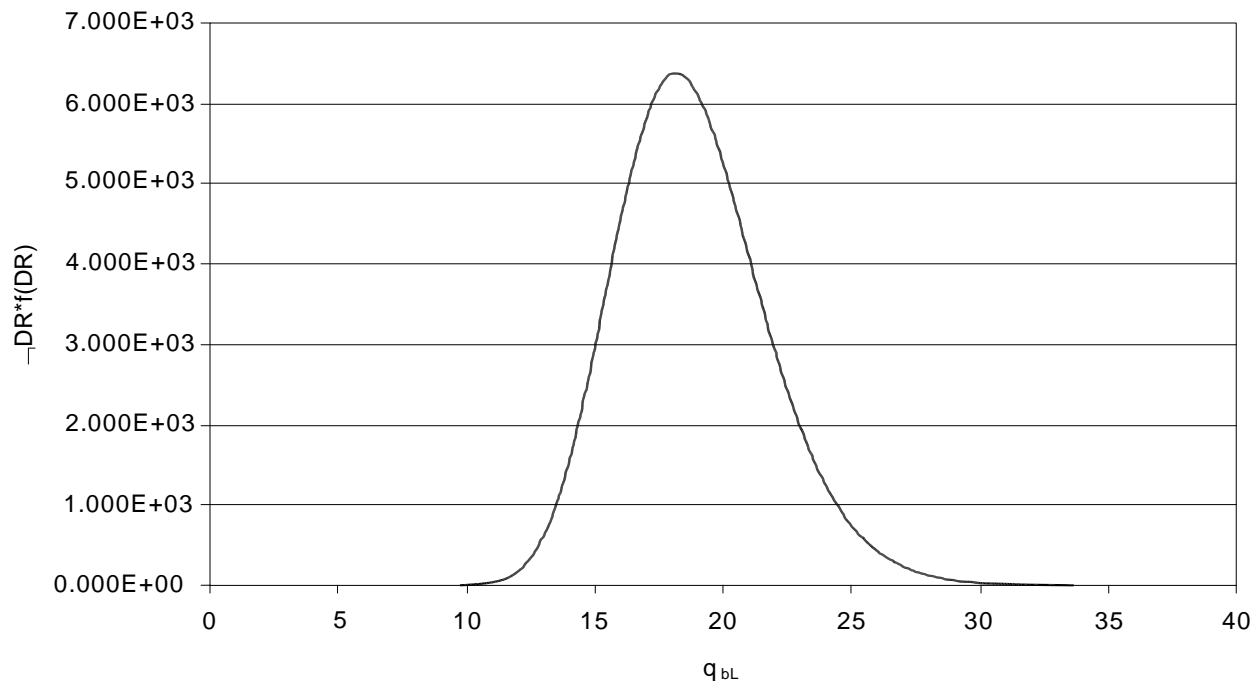


Figure 8.1.6 – Histograma de q_{bL} para $D_R = 80\%$ para pilotes de punta cerrada en arena

Diseño directo de la capacidad friccional

No se evaluó la incertidumbre para el diseño directo de la capacidad friccional ya que los datos disponibles eran insuficientes para completar un análisis satisfactorio. En la Sección 8.2 los factores de resistencia para el diseño de la capacidad friccional en base a las propiedades del suelo se adoptan de forma conservadora.

Diseño directo de la capacidad de punta

Paso 1. Identificar la ecuación correspondiente al estado límite

La ecuación correspondiente a estado límite para capacidad de punta se expresa como:

$$\left(\frac{q_{b,10\%}}{q_c} \right) q_c A_b - DL - LL = 0 \quad (8.1.6)$$

donde $(q_{b,10\%}/q_c)$ es la relación entre la presión en la base para $s/B = 10\%$ y la resistencia a la penetración con penetrómetro de cono q_c , A_b es el área de la base del pilote, DL es la carga permanente que actúa sobre la base del pilote y LL es la sobrecarga viva que actúa sobre la base del pilote.

Paso 2. Identificar las variables que componen la ecuación

De las variables de la Ecuación (8.1.6), A_b es seleccionada por el diseñador, DL y LL se obtienen como resultado del diseño de la superestructura, q_c se mide directamente, y la relación $(q_{b,10\%}/q_c)$ se basa en resultados publicados.

Paso 3. Identificar los ensayos geotécnicos asociados con cada variable

De las variables identificadas, q_c se puede medir en la práctica habitual. La incertidumbre de q_c ya fue analizada en la Sección 4.1.

Paso 4. Identificar todas las incertidumbres que componen cada variable, incluyendo las transformaciones

Las incertidumbres de las variables q_c , DL y LL ya fueron identificadas anteriormente (ver Tabla 4.1.1). La variable A_b es especificada por el diseñador y su incertidumbre es despreciable debido a que las tolerancias en las dimensiones de los pilotes hincados son relativamente pequeñas. La incertidumbre de la relación $(q_{b,10\%}/q_c)$ ya fue evaluada al analizar el diseño de pilotes de punta cerrada en base a las propiedades del suelo y se halló que era normalmente distribuida, con un COV de 0.14 y una media igual a la Ecuación (8.1.4).

Pasos 5 y 6. Evaluar las incertidumbres compuestas y seleccionar funciones de densidad de probabilidad para el análisis de confiabilidad

A excepción de $(q_{b,10\%}/q_c)$, la Ecuación (8.1.6) no incluye variables calculadas a partir de otras variables ya que D_R aparece en la Ecuación (8.1.4). La Figura 8.1.4 incluye de manera inherente la incertidumbre de D_R , ya que estos valores fueron estimados a partir de datos de campo. Por lo tanto, no es necesario incluir en la incertidumbre compuesta ninguna incertidumbre relacionada con las transformaciones. Las funciones de densidad de probabilidad para $(q_{b,10\%}/q_c)$ y q_c se seleccionaron en el Paso 4 y la Sección 4.1, respectivamente, y se pueden utilizar directamente con la Ecuación (8.1.6) en el análisis de confiabilidad.

8.1.2 Diseño de pilotes de punta abierta hincados en arena

Diseño de la capacidad friccional en base a las propiedades del suelo

Paso 1. Identificar la ecuación correspondiente al estado límite

La ecuación correspondiente a estado límite para capacidad friccional se expresa como:

$$\left[\frac{K_s}{K_0} K_0 \tan \left(\frac{\delta_c}{\phi_c} \right) \sigma_v' \right] a_s dL - DL - LL = 0 \quad (8.1.7)$$

donde (K_s/K_0) es la relación entre el coeficiente de empuje del suelo que actúa sobre el pilote hincado y el coeficiente en reposo K_0 , (δ_c/ϕ_c) es la relación entre el ángulo de fricción superficial en la interfase y el ángulo de fricción del suelo medido en estado crítico ϕ_c , σ_v' es la presión geostática efectiva a la profundidad a la cual se estima la fricción superficial unitaria, a_s es el área del fuste por unidad de longitud del pilote, dL es una unidad de longitud del pilote, DL es la carga permanente que actúa sobre la unidad de longitud del pilote, y LL es la sobrecarga viva que actúa sobre la unidad de longitud del pilote.

Paso 2. Identificar las variables que componen la ecuación

De las variables de la Ecuación (8.1.7), K_0 , σ_v' y a_s son seleccionadas por el diseñador; DL y LL se obtienen como resultado del diseño de la superestructura; ϕ_c se estima o se mide; y las relaciones (K_s/K_0) y (δ_c/ϕ_c) se basan en resultados publicados. El valor de (K_s/K_0) a utilizar en el diseño se determina de acuerdo con Paik y Salgado (2003):

$$\frac{K}{K_0} = \beta (7.2 - 4.8 PLR) \quad (8.1.8a)$$

$$\beta = 0.0002 D_R^2 (\%) - 0.0089 D_R + 0.329, \quad 20\% < D_R (\%) < 90\% \quad (8.1.8b)$$

donde PLR es la relación de longitud de taponamiento, la cual se puede medir o estimar.

Paso 3. Identificar los ensayos geotécnicos asociados con cada variable

De las variables identificadas sólo ϕ_c y PLR se pueden medir en la práctica habitual. La variable K_0 no se puede medir in situ independientemente de D_R o ϕ_p , por lo cual no es posible definir una incertidumbre sistemática en su determinación. Esto significa que el diseñador debe contar con información adicional, como por ejemplo una historia geológica, a partir de la cual

estimar K_0 . Sin embargo, debido a que no se realiza ninguna medición, cualquier incertidumbre asignada a esta variable será arbitraria y no reflejará las circunstancias de diseño específicas. La relación de longitud de taponamiento PLR se puede medir para un pilote de prueba antes de iniciar la producción de pilotes o bien se puede estimar en base a las gráficas presentadas por Lee et al. (2003).

Paso 4. Identificar todas las incertidumbres que componen cada variable, incluyendo las transformaciones

Las incertidumbres de las variables ϕ_c , DL y LL ya fueron identificadas anteriormente (ver Tabla 4.1.1). La variable a_s es especificada por el diseñador y su incertidumbre es despreciable debido a que las tolerancias en las dimensiones de los pilotes hincados son relativamente pequeñas. La variable dL se utiliza sólo para los propósitos del diseño y no afecta el resultado final. La variable K_0 es estimada por el diseñador, pero no es posible determinar para ella una incertidumbre sistemática.

La incertidumbre de la relación (K_s/K_0) se puede evaluar considerando los resultados de ensayos de carga de alta calidad realizados sobre pilotes en cámara de calibración por Paik Salgado (2003). La Figura 8.1.7 ilustra una gráfica de la relación (K_s/K_0) para arena con diferentes densidades relativas. Observar que, a diferencia de lo que ocurre para los pilotes de punta cerrada, K_s/K_0 tiende a aumentar a medida que aumenta D_R . Esto se debe al efecto del taponamiento. Las arenas más densas evidencian mayor grado de taponamiento, con lo cual aumenta el desplazamiento del suelo circundante durante el hincado. El mayor desplazamiento provocado por el hincado del pilote aumenta la tensión contra el fuste, y en consecuencia se observan valores de K_s/K_0 más elevados. Los pilotes de punta cerrada se comportan como pilotes de punta abierta totalmente taponados cualquiera sea la densidad relativa. Por lo tanto, para los pilotes de punta cerrada el desplazamiento no varía con la densidad relativa. La dispersión de la relación K_s/K_0 se puede evaluar considerando los datos una vez eliminada la tendencia y normalizados con respecto a la Ecuación (8.1.8). La tendencia se elimina de la siguiente manera:

$$error_{k_s/k_0} = \frac{\left(\frac{k_s}{k_0} \right)_{datos} - \frac{k_s}{k_0}(PLR, D_R)}{\frac{k_s}{k_0}(PLR, D_R)} \quad (8.1.9)$$

donde $error_{K_s/K_0}$ expresa la posición relativa de un punto de datos particular respecto de la línea de tendencia y la función $K_s/K_0(PLR, D_R)$ representa la línea de tendencia (8.1.8) evaluada para PLR y D_R iguales que para el punto de datos K_s/K_0 . Si se calcula $error_{K_s/K_0}$ para todos los puntos de datos, la distribución de los puntos de datos respecto de la línea de tendencia se puede graficar usando el histograma de la Figura 8.1.8. Debido a que en la Ecuación (8.1.9) dividimos por el valor medio, la desviación estándar de $error_{K_s/K_0}$ es igual al COV de K_s/K_0 . Suponiendo que (K_s/K_0) es normalmente distribuida, los datos de la Figura 8.1.7 indican un COV de 0.22 cuando se aplica la Ecuación (3.2.1) a los datos luego de eliminar la tendencia. Esta distribución normal también se grafica en la Figura 8.1.8 usando un histograma.

La incertidumbre de la relación (δ_c/ϕ_c) ya fue determinada en la Sección 8.1.1.

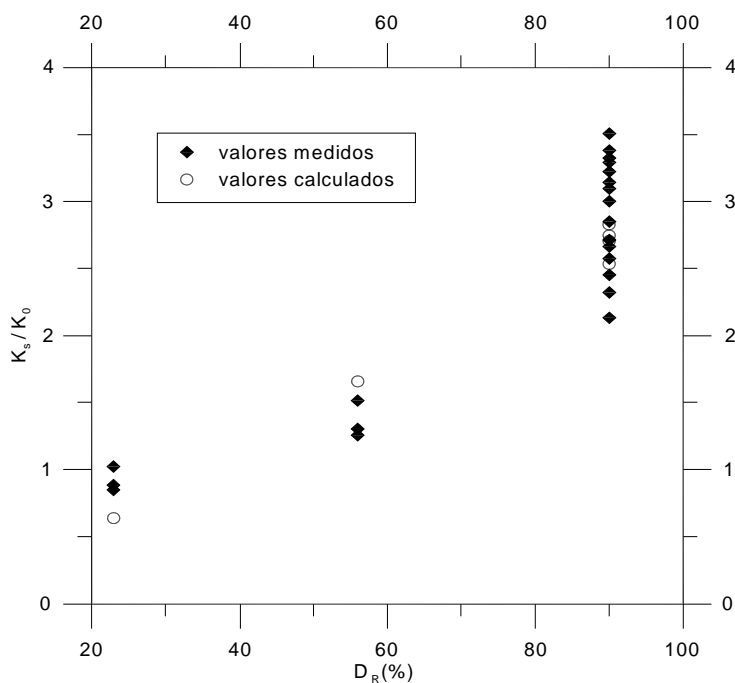


Figura 8.1.7 – Valores promedio de K_s/K_0 de acuerdo con Paik y Salgado (2003) para pilotes de punta abierta en arena; valores calculados se refiere a valores calculados usando la Ecuación (8.1.8).

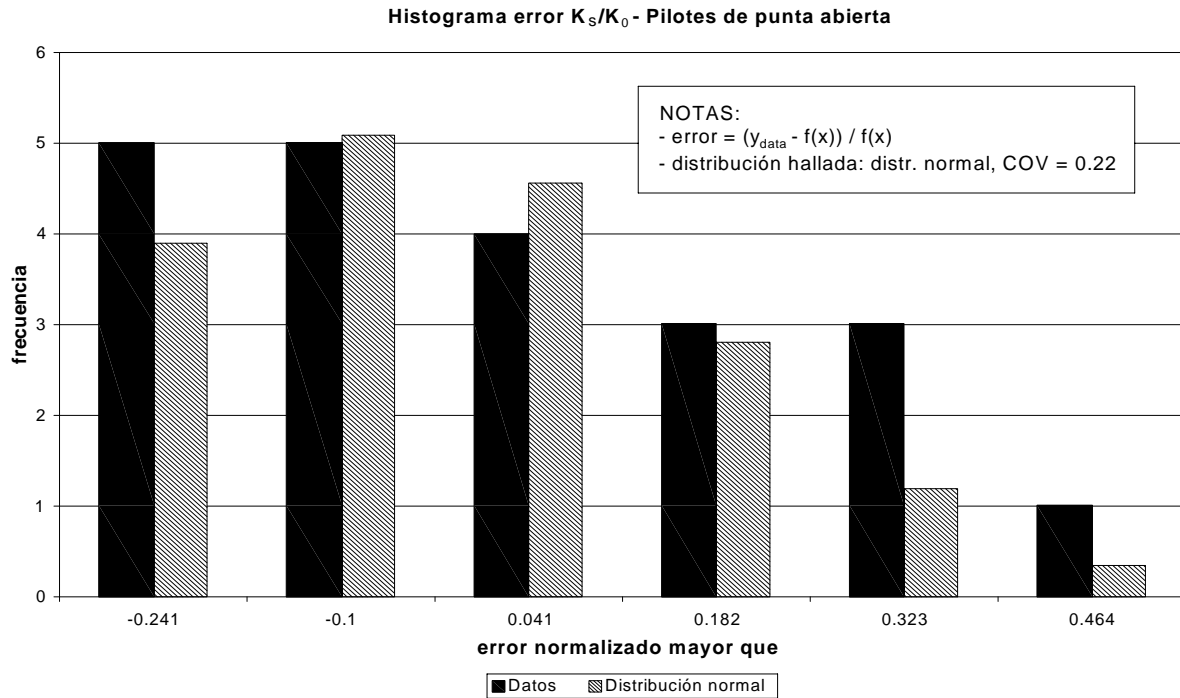


Figura 8.1.8 – Histograma de $error_{K_s/K_0}$ (valores de K_s/K_0 a los cuales se les ha eliminado la tendencia) para pilotes de punta abierta en arena

Pasos 5 y 6. Evaluar las incertidumbres compuestas y seleccionar funciones de densidad de probabilidad para el análisis de confiabilidad

La Ecuación (8.1.7) no incluye variables calculadas a partir de otras variables. Por lo tanto, no es necesario incluir en la incertidumbre compuesta ninguna incertidumbre relacionada con las transformaciones. Las funciones de densidad de probabilidad para (K_s/K_0) y (δ_c/ϕ_c) ya fueron seleccionadas en el Paso 4; la función de densidad de probabilidad de ϕ_c se halló en la Sección 4.1. Estas PDF se pueden usar directamente con la Ecuación (8.1.7) en el análisis de confiabilidad..

Diseño de la capacidad de punta en base a las propiedades del suelo

Paso 1. Identificar la ecuación correspondiente al estado límite

La ecuación correspondiente a estado límite para capacidad de punta se expresa como:

$$\left(\frac{q_{b,10\%}}{\sigma'_h} \right) \sigma'_h A_b - DL - LL = 0 \quad (8.1.10)$$

donde $(q_{b,10\%}/\sigma'_h)$ es la relación entre la presión en la base para $s/B = 10\%$ y la tensión efectiva horizontal σ'_h , A_b es el área de la base del pilote, DL es la carga permanente que actúa sobre la base del pilote y LL es la sobrecarga viva que actúa sobre la base del pilote.

Paso 2. Identificar las variables que componen la ecuación

De las variables de la Ecuación (8.1.10), DL y LL se obtienen como resultado del diseño de la superestructura; σ'_h es estimada por el diseñador, A_b se calcula usando el diámetro exterior del pilote d_o ,

$$A_b = \pi(d_o)^2 / 4 \quad (8.1.11)$$

y la relación $(q_{b,10\%}/\sigma'_h)$ se basa en resultados publicados por Paik y Salgado (2003):

$$\frac{q_{b,10\%}}{\sigma'_h} = \alpha \left(326 - 295 \frac{IFR(\%)}{100} \right) \quad (8.1.12a)$$

$$\alpha = 0.0112D_R(\%) - 0.0141, \quad 20\% < D_R(\%) < 90\% \quad (8.1.12b)$$

donde $IFR(\%)$ es la relación de llenado incremental, la cual se puede medir o estima.

Paso 3. Identificar los ensayos geotécnicos asociados con cada variable

Los valores de $(q_{b,10\%}/\sigma'_h)$ dependen de D_R , valor que se puede estimar usando el CPT, el SPT, o muestreos in situ. La relación de llenado incremental $IFR(\%)$ se puede medir o estimar en base a gráficas presentadas por Lee et al. (2003).

Paso 4. Identificar todas las incertidumbres que componen cada variable, incluyendo las transformaciones

Las incertidumbres de las variables DL y LL ya fueron identificadas anteriormente (ver Tabla 4.1.1). La variable A_b es especificada por el diseñador y su incertidumbre es despreciable debido a que las tolerancias en las dimensiones de los pilotes hincados son relativamente pequeñas.

La incertidumbre de la relación $(q_{b,10\%}/\sigma'_h)$ se puede evaluar considerando los resultados de ensayos de carga de alta calidad realizados sobre pilotes en cámara de calibración por Paik Salgado (2003). La dispersión de la relación $(q_{b,10\%}/\sigma'_h)$ se puede evaluar considerando los datos

una vez eliminada la tendencia y normalizados con respecto a la Ecuación (8.1.12). La tendencia se elimina de la siguiente manera:

$$error_{q_{b,10\%}/\sigma'_h} = \frac{\left(\frac{q_{b,10\%}}{\sigma'_h} \right)_{\text{datos}} - \frac{q_{b,10\%}}{\sigma'_h}(IFR, D_R)}{\frac{q_{b,10\%}}{\sigma'_h}(IFR, D_R)} \quad (8.1.13)$$

donde $error_{q_{b,10\%}/\sigma'_h}$ expresa la posición relativa de un punto de datos particular respecto de la línea de tendencia y la función $q_{b,10\%}/\sigma'_h (IFR, D_R)$ representa la línea de tendencia (8.1.12) evaluada para $IFR(\%)$ y D_R iguales que para el punto de datos $q_{b,10\%}/\sigma'_h$. Si se calcula $error_{q_{b,10\%}/\sigma'_h}$ para todos los puntos de datos, la distribución de los puntos de datos respecto de la línea de tendencia se puede graficar usando el histograma de la Figura 8.1.9. Debido a que en la Ecuación (8.1.12) dividimos por el valor medio, la desviación estándar de $error_{q_{b,10\%}/\sigma'_h}$ es igual al COV de $q_{b,10\%}/\sigma'_h$. Suponiendo que la transformación $(q_{b,10\%}/\sigma'_h)$ es normalmente distribuida, los datos indican un COV de 0.11 cuando se aplica la Ecuación (3.2.1) a los datos a los cuales se ha eliminado la tendencia. Esta función de densidad de probabilidad representa la variabilidad de los valores corregidos de $q_{b,10\%}$ para un valor de σ'_h dado. Esta distribución normal también se grafica en la Figura 8.1.9 usando un histograma.

Debido a los efectos de la relación entre los tamaños de los pilotes ensayados en la cámara de calibración y los tamaños de los pilotes in situ, $q_{b,10\%}$ se corrigió de acuerdo con Paik y Salgado (2003) en base a los resultados de Salgado et al. (1998). Este trabajo se basa en el análisis de resistencia a la penetración descrita por Salgado et al. (1997). Salgado et al. (1997) examinaron la capacidad predictiva de este análisis para determinar valores de q_c a partir de una D_R determinada en laboratorio. Se halló que los valores experimentales de q_c caían en una franja a $\pm 30\%$ de los valores pronosticados. Para hallar el COV de este q_c pronosticado se aplicó el procedimiento 6σ , hallándose un valor de 0.10. Por lo tanto, una distribución normal con $COV = 0.10$ representa la incertidumbre de los valores corregidos de $q_{b,10\%}$ ya que para realizar la corrección se utilizó el mismo modelo teórico evaluado en el estudio de Salgado et al. (1997).

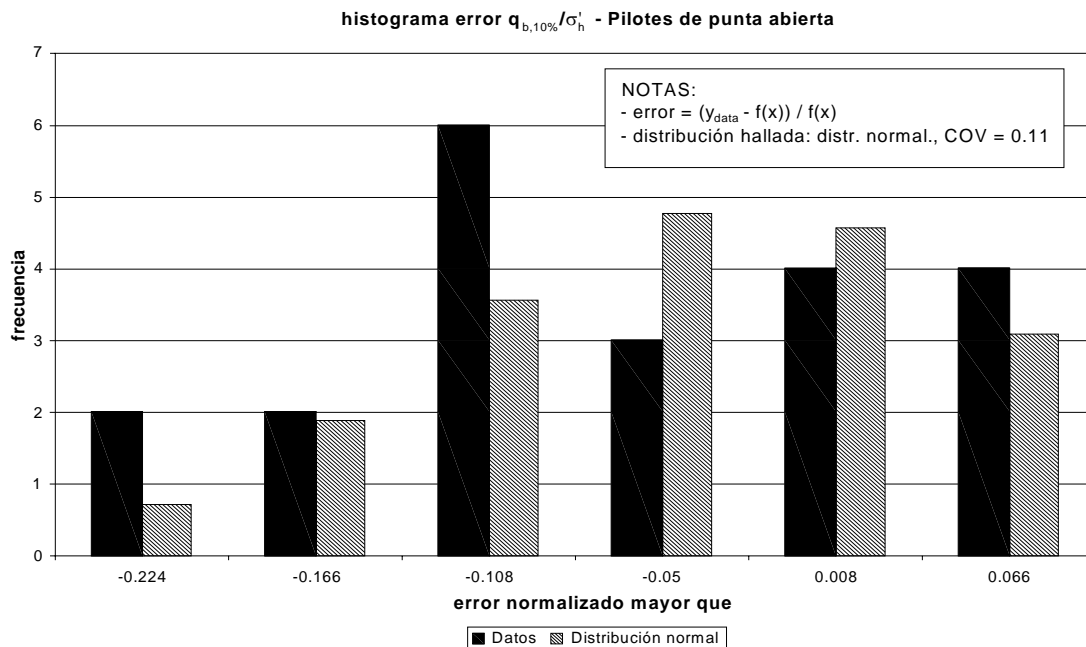


Figura 8.1.9 – Histograma de $error_{q_{b,10\%}/\sigma'_h}$ (valores de $q_{b,10\%}/\sigma'_h$ a los cuales se les ha eliminado la tendencia) para pilotes de punta abierta en arena

Pasos 5 y 6. Evaluar las incertidumbres compuestas y seleccionar funciones de densidad de probabilidad para el análisis de confiabilidad

Es necesario evaluar la incertidumbre compuesta de $(q_{b,10\%}/\sigma'_h)$ debida a la incertidumbre de la transformación y la incertidumbre de la corrección a valores de $q_{b,10\%}$ de campo. Para ello se aplicaron métodos de integración numérica a la Ecuación (3.2.9). Para calcular el histograma que representa la incertidumbre compuesta de $(q_{b,10\%}/\sigma'_h)$, $p_X(x)$ se definió como una distribución normal con $COV = 0.10$, representando $q_{b,10\%}$, y $p_{Y|X}(y|x)$ se definió como una distribución normal con $COV = 0.11$, representando la incertidumbre de la transformación $(q_{b,10\%}/\sigma'_h)$. El histograma $p_Y(y)\Delta y$ resultante representa la incertidumbre de $(q_{b,10\%}/\sigma'_h)$ evaluada por Paik y Salgado (2003) en base a ensayos en cámara de calibración. En la Figura 8.1.10 se ilustra este histograma. Una PDF concordante es una distribución normal con $COV = 0.15$. Observar que esta PDF considera la incertidumbre de D_R introducida por la correlación de los ensayos in situ con $(q_{b,10\%}/\sigma'_h)$ mediante el uso de la Ecuación (8.1.12). Esto se debe a que el modelo usado para evaluar la correlación de $q_{b,10\%}$ con los ensayos in situ es el mismo modelo que se utiliza para correlacionar los valores de q_c obtenidos mediante CPT con D_R . Por lo tanto, cualquier variación en la predicción del modelo para un caso específico ya ha sido considerada. Por ejemplo,

supongamos que para una D_R determinada el modelo de Salgado et al. (1998) predice un valor in situ de $q_{b,10\%}$ que es demasiado elevado. En ese caso, si se lo aplica a una medición de q_c , el modelo también predecirá una D_R demasiado baja. Por lo tanto, la variabilidad de este modelo sólo se debe integrar una vez en la incertidumbre compuesta de $(q_{b,10\%}/\sigma'_h)$. Si esta incertidumbre se integra de manera redundante se sobrestimaré la incertidumbre de $(q_{b,10\%}/\sigma'_h)$.

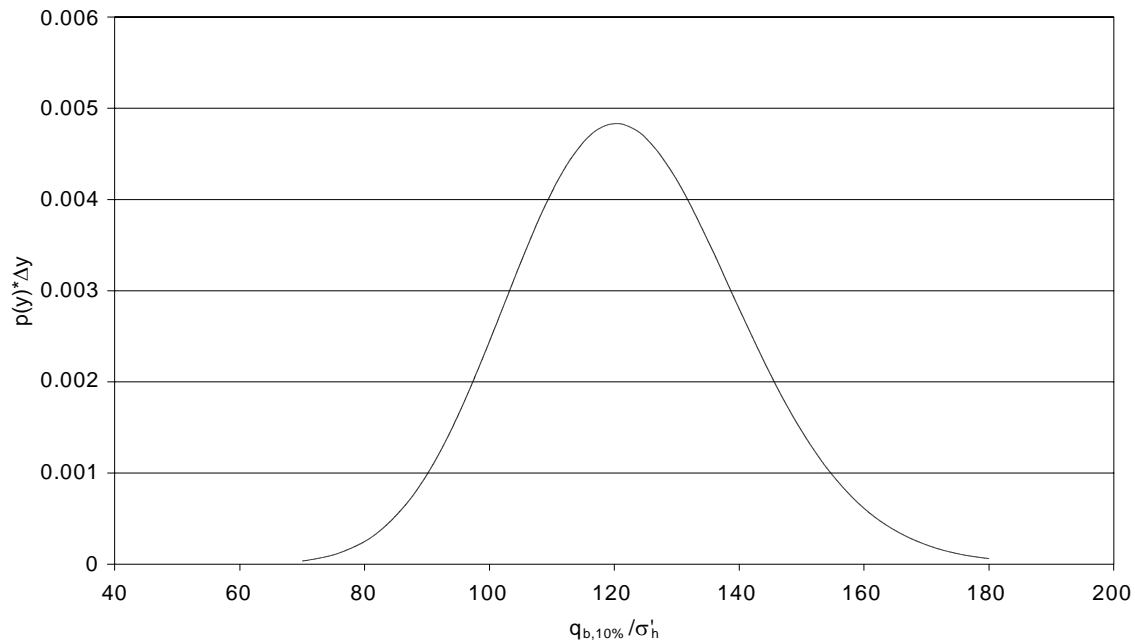


Figura 8.1.10 – Histograma que representa la incertidumbre compuesta para $q_{b,10\%}/\sigma'_h$ cuando $D_R = 90\%$ e $IFR = 70\%$ para pilotes de punta abierta en arena

Diseño directo de la capacidad friccional

Paso 1. Identificar la ecuación correspondiente al estado límite

La ecuación correspondiente a estado límite para capacidad friccional se expresa como:

$$\left(\frac{f_s}{q_c} \right) q_c a_s dL - DL - LL = 0 \quad (8.1.14)$$

donde (f_s/q_c) es la relación entre la capacidad friccional unitaria y la resistencia de punta mediante CPT q_c , a_s es el área del fuste por unidad de longitud del pilote, dL es una unidad de longitud del pilote, DL es la carga permanente que actúa sobre la unidad de longitud del pilote, y LL es la sobrecarga viva que actúa sobre la unidad de longitud del pilote.

Paso 2. Identificar las variables que componen la ecuación

De las variables de la Ecuación (8.1.14), a_s es seleccionada por el diseñador; DL y LL se obtienen como resultado del diseño de la superestructura; q_c se mide; y la relación (f_s/q_c) se basa en resultados publicados. Lee et al. (2003) recomiendan usar para (f_s/q_c) un valor comprendido entre 0.0015 y 0.004. Un análisis de los datos de Paik y Salgado (2003) indica un valor medio de 0.002.

Paso 3. Identificar los ensayos geotécnicos asociados con cada variable

De las variables identificadas sólo q_c se puede medir en la práctica habitual. La incertidumbre de q_c ya fue analizada en la Sección 4.1.

Paso 4. Identificar todas las incertidumbres que componen cada variable, incluyendo las transformaciones

Las incertidumbres de las variables DL y LL ya fueron identificadas anteriormente (ver Tabla 4.1.1). La variable a_s es especificada por el diseñador y su incertidumbre es despreciable debido a que las tolerancias en las dimensiones de los pilotes hincados son relativamente pequeñas. La variable dL se utiliza sólo para los propósitos del diseño y no afecta el resultado final.

La incertidumbre de la relación (f_s/q_c) se puede evaluar considerando los resultados de ensayos de carga de alta calidad realizados sobre pilotes en cámara de calibración por Paik Salgado (2003). Suponiendo que (K_s/K_0) es normalmente distribuida, los datos de Paik y Salgado (2003) indican una media de 0.002 y un COV de 0.23 al aplicar la Ecuación (3.2.1).

Pasos 5 y 6. Evaluar las incertidumbres compuestas y seleccionar funciones de densidad de probabilidad para el análisis de confiabilidad

La Ecuación (8.1.14) no incluye variables calculadas a partir de otras variables. Por lo tanto, no es necesario incluir en la incertidumbre compuesta ninguna incertidumbre relacionada con las transformaciones. Las funciones de densidad de probabilidad para (f_s/q_c) y q_c fueron seleccionadas en el Paso 4 y la Sección 4.1, respectivamente, y se pueden usar directamente con la Ecuación (8.1.14) en el análisis de confiabilidad.

Diseño directo de la capacidad de punta

Paso 1. Identificar la ecuación correspondiente al estado límite

La ecuación correspondiente a estado límite para capacidad de punta se expresa como:

$$\left(\frac{q_{b,10\%}}{q_c} \right) q_c A_b - DL - LL = 0 \quad (8.1.15)$$

donde $(q_{b,10\%}/q_c)$ es la relación entre la presión en la base para $s/B = 10\%$ y la resistencia a la penetración con penetrómetro de cono q_c , A_b es el área de la base del pilote, DL es la carga permanente que actúa sobre la base del pilote y LL es la sobrecarga viva que actúa sobre la base del pilote..

Paso 2. Identificar las variables que componen la ecuación

De las variables de la Ecuación (8.1.15), DL y LL se obtienen como resultado del diseño de la superestructura, q_c se mide directamente, A_b se calcula usando el diámetro exterior del pilote (8.1.11), y la relación $(q_{b,10\%}/q_c)$ se basa en resultados publicados por Paik y Salgado (2003) y Lee et al. (2003). El valor de $q_{b,10\%}/q_c$ a utilizar en el diseño se determina de acuerdo con Lee et al. (2003):

$$\frac{q_b}{q_c} = -0.00443 IFR(\%) + 0.557 \quad (8.1.16)$$

donde $IFR(\%)$ es la relación de llenado incremental, la cual se puede medir o estimar.

Paso 3. Identificar los ensayos geotécnicos asociados con cada variable

De las variables identificadas, q_c se puede medir en la práctica habitual. La incertidumbre de q_c ya fue analizada en la Sección 4.1. La relación de llenado incremental $IFR(\%)$ se puede medir o estimar en base a gráficas presentadas por Lee et al. (2003).

Paso 4. Identificar todas las incertidumbres que componen cada variable, incluyendo las transformaciones

Las incertidumbres de las variables DL y LL ya fueron identificadas anteriormente (ver Tabla 4.1.1). La variable A_b es especificada por el diseñador y su incertidumbre es despreciable debido a que las tolerancias en las dimensiones de los pilotes hincados son relativamente

pequeñas.

La incertidumbre de la relación $(q_{b,10\%}/q_c)$ se puede evaluar considerando los resultados de ensayos de carga de alta calidad realizados sobre pilotes en cámara de calibración por Paik Salgado (2003). En la Figura 8.1.11 se grafica la relación $(q_{b,10\%}/q_c)$ para diferentes valores de la relación de llenado incremental $IFR(\%)$. En estos resultados se observa una tendencia significativa de disminución de $(q_{b,10\%}/q_c)$ a medida que aumenta $IFR(\%)$. Además de los datos, en la Figura 8.1.11 se grafica la línea de tendencia definida por la Ecuación (8.1.16). La dispersión de la relación $(q_{b,10\%}/q_c)$ se puede evaluar considerando los datos una vez eliminada la tendencia y normalizados con respecto a la Ecuación (8.1.16). La tendencia se elimina de la siguiente manera:

$$error_{q_{b,10\%}/q_c} = \frac{\left(\frac{q_{b,10\%}}{q_c} \right)_{\text{datos}} - \frac{q_{b,10\%}}{q_c}(IFR)}{\frac{q_{b,10\%}}{q_c}(IFR)} \quad (8.1.17)$$

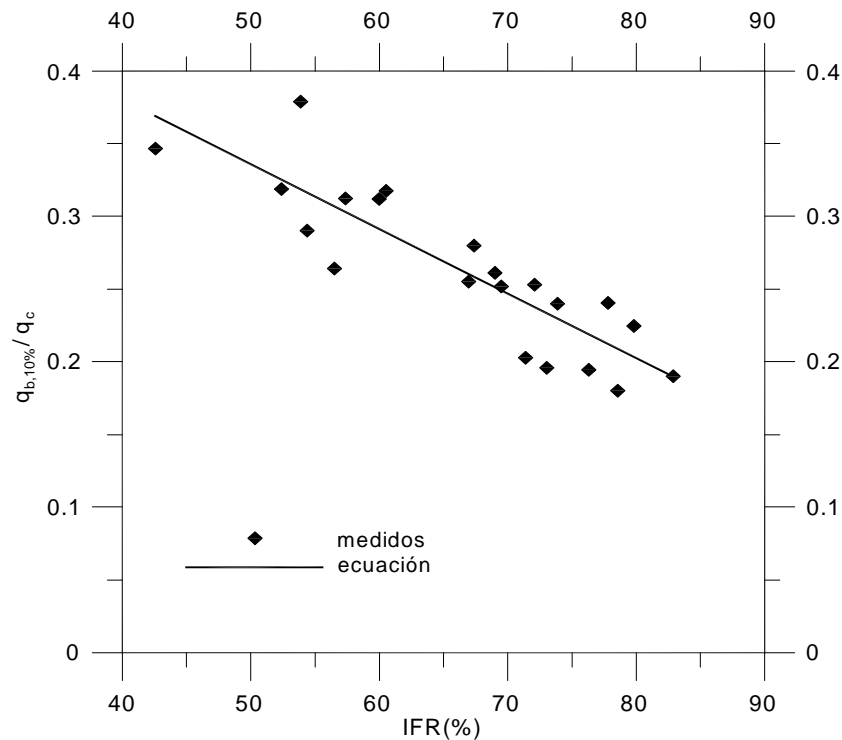


Figura 8.1.11 – $q_{b,10\%}/q_c$ en función de $IFR(\%)$ para pilotes de punta abierta de acuerdo con Paik y Salgado (2003) y línea de tendencia propuesta por Lee et al. (2003)

donde $error_{qb,10\%/q_c}$ expresa la posición relativa de un punto de datos particular respecto de la línea de tendencia y la función $q_{b,10\%/q_c}(IFR)$ representa la línea de tendencia (8.1.16) evaluada para $IFR(\%)$ igual que para el punto de datos $q_{b,10\%/q_c}$. Si se calcula $error_{qb,10\%/q_c}$ para todos los puntos de datos, la distribución de los puntos de datos respecto de la línea de tendencia se puede graficar usando el histograma de la Figura 8.1.12. Debido a que en la Ecuación (8.1.17) dividimos por el valor medio, la desviación estándar de $error_{qb,10\%/q_c}$ es igual al COV de $q_{b,10\%/q_c}$. Suponiendo que $(q_{b,10\%/q_c})$ es normalmente distribuida, los datos de la Figura 8.1.11 indican un COV de 0.10 cuando se aplica la Ecuación (3.2.1) a los datos a los cuales se les ha eliminado la tendencia. Esta distribución normal también se grafica en la Figura 8.1.12 usando un histograma.

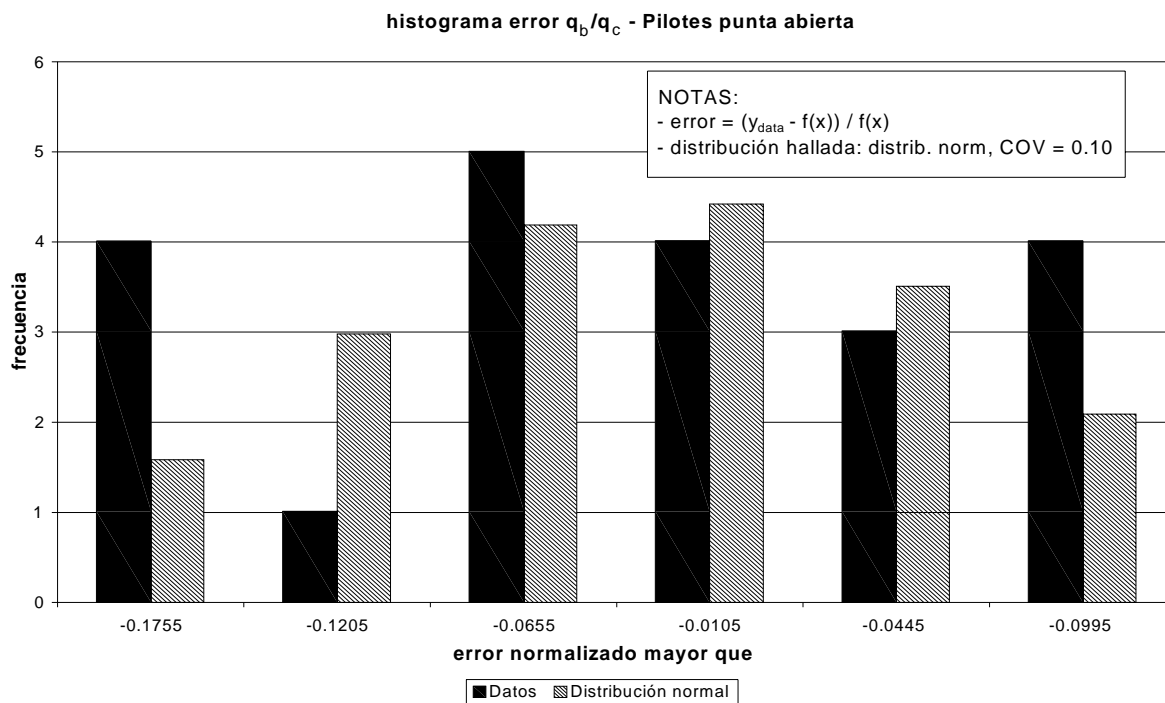


Figura 8.1.12 – Histograma de $error_{qb,10\%/q_c}$ (valores de $q_{b,10\%/q_c}$ a los cuales se les ha eliminado la tendencia) para pilotes de punta abierta en arena

Pasos 5 y 6. Evaluar las incertidumbres compuestas y seleccionar funciones de densidad de probabilidad para el análisis de confiabilidad

La incertidumbre de los valores de $IFR(\%)$, los cuales dependen de σ_h' y D_R , está presente tanto en la estimación del diseñador como en los datos usados para evaluar la incertidumbre de la relación $(q_{b,10\%/q_c})$. Por lo tanto una PDF normal con $COV = 0.10$ representa la incertidumbre de

la transformación de (8.1.16) e $IFR(\%)$. Las PDF para q_c , DL y LL ya fueron definidas anteriormente.

8.1.3 Diseño de pilotes perforados en arena

Diseño de la capacidad friccional en base a las propiedades del suelo

No se evaluó la incertidumbre en el diseño de la capacidad friccional en base a las propiedades del suelo ya que los datos disponibles eran insuficientes para completar un análisis satisfactorio.

Diseño de la capacidad de punta en base a las propiedades del suelo

Paso 1. Identificar la ecuación correspondiente al estado límite

La ecuación correspondiente a estado límite para capacidad de punta se expresa como:

$$\left(\frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} \right) q_{bL} A_b - DL - LL = 0 \quad (8.1.18)$$

donde $(q_{b,10\%}/q_{bL})$ es la relación entre la presión en la base cuando $s/B = 10\%$ y la resistencia al hundimiento de la base q_{bL} , A_b es el área de la base del pilote, DL es la carga permanente que actúa sobre la base del pilote, y LL es la sobrecarga viva que actúa sobre la base del pilote.

Paso 2. Identificar las variables que componen la ecuación

De las variables de la Ecuación (8.1.18), A_b es seleccionada por el diseñador; DL y LL se obtienen como resultado del diseño de la superestructura; q_{bL} se estima a partir de la densidad relativa D_R y de un valor estimado de σ'_h usando la Ecuación (8.1.3); D_R se puede estimar en base al CPT, el SPT o muestreos in situ; y la relación $(q_{b,10\%}/q_{bL})$ se basa en resultados publicados por Lee y Salgado (1999).

La respuesta carga-asentamiento de la base de un pilote se puede expresar simplemente como

$$w = \frac{q_b D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_p \quad (8.1.19)$$

donde w es el asentamiento, q_b es la carga unitaria en la base, E_s y μ_s son el módulo de Young y

el coeficiente de Poisson del suelo, respectivamente, e I_p es un factor de influencia. Aunque no se puede esperar que la respuesta del suelo sea elástica lineal como implica la Ecuación (8.1.19), si el módulo se ajusta para el nivel de deformación ésta es una aproximación aceptable. Para usar en circunstancias de diseño, E_s en la Ecuación (8.1.19) se puede calibrar con los resultados de ABAQUS como lo hicieron Lee y Salgado (1999, 2002). Si se realizan suficientes verificaciones de convergencia, la calibración efectuada usando ABAQUS introduce poca incertidumbre más allá de la del modelo material. Por lo tanto, si se puede hallar la incertidumbre para E_s en (8.1.19), será posible hallar la incertidumbre de q_b . Rescribiendo la Ecuación (8.1.19) considerando la evaluación de la incertidumbre para q_b se obtiene la siguiente expresión:

$$q_b = \frac{E_s w}{D} c_s \quad (8.1.20)$$

donde c_s es una constante que considera la mecánica y la geometría del problema. La Ecuación (8.1.20) muestra claramente que q_b es directamente proporcional a E_s . Por lo tanto, la incertidumbre de q_b es directamente proporcional a la de E_s .

Lee y Salgado (1999) desarrollaron un modelo constitutivo elástico no lineal para investigar la respuesta carga-asentamiento en la base de un pilote perforado. Con este modelo carga-asentamiento, se puede usar la Ecuación (8.1.20) para estimar E_s usando D_R como parámetro de entrada. Por lo tanto, para evaluar la incertidumbre de E_s se debe considerar la incertidumbre del modelo constitutivo usado por Lee y Salgado (1999). La Figura 8.1.13 ilustra la serie completa de transformaciones requeridas para pasar de la densidad relativa al módulo E_s . Los números debajo de cada variable representan el COV para dicha variable. Los números en cada flecha representan la incertidumbre para dicha transformación en términos de la variable resultante.

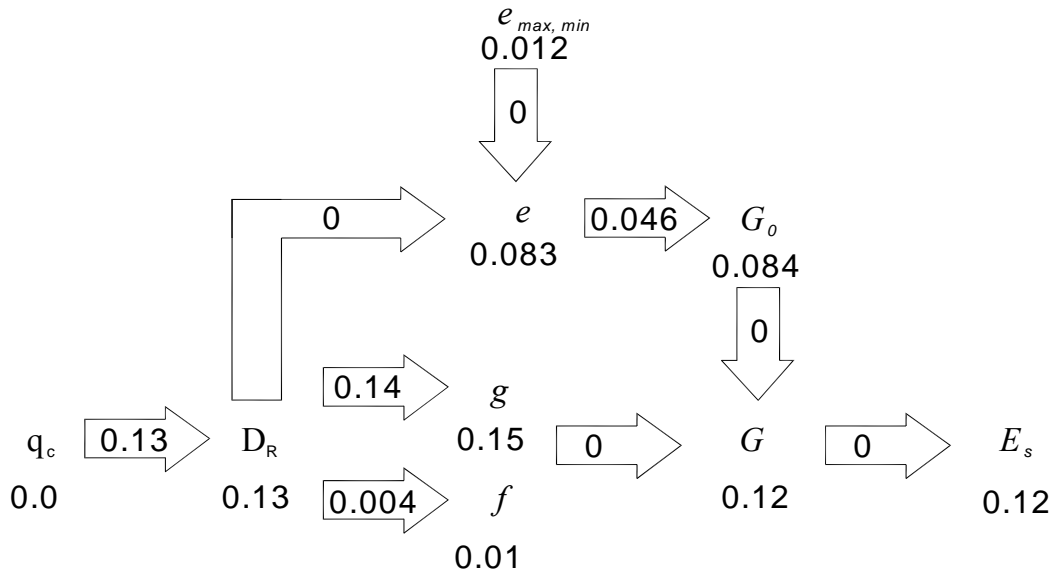


Figura 8.1.13 – Propagación de la incertidumbre para modelar el movimiento de la base de pilotes perforados al pasar de valores de D_R estimados usando CONPOINT al módulo E_s

El trabajo de Hardin y Black (1966) llevó a la siguiente relación empírica para G_0 ,

$$G_0 = C_g \frac{(e_g - e_0)^2}{1 + e_0} P_a^{(1-n_g)} (\sigma'_m)^{n_g} \quad (8.1.21)$$

donde C_g , n_g y e_g son variables intrínsecas del material; e_0 es la relación de vacíos inicial; P_a es una presión de referencia (100 kPa); y σ'_m es la tensión efectiva media inicial en las mismas unidades que P_a . La relación de vacíos inicial se puede determinar a partir de la densidad relativa usando la ecuación fundamental

$$D_R = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (8.1.22)$$

La degradación del módulo en función del nivel de tensión se modela mediante la siguiente expresión

$$\frac{G}{G_0} = \left[1 - f \left(\frac{\sqrt{J_2} - \sqrt{J_{2o}}}{\sqrt{J_{2\max}} - \sqrt{J_{2o}}} \right)^g \right] \left(\frac{I_1}{I_{1o}} \right)^{n_g} \quad (8.1.23)$$

donde J_2 = segundo invariante del tensor de tensiones deviatoricas, f y g son parámetros de ajuste

de la curva, e I_1 e I_{1o} son los primeros variantes del tensor de tensiones en los estados actual e inicial, respectivamente.

Paso 3. Identificar los ensayos geotécnicos asociados con cada variable

De las variables identificadas, D_R se puede estimar usando el CPT, el SPT o el peso unitario obtenido de muestreos in situ. El CPT, SPT o peso unitario se pueden medir en la práctica habitual. Las incertidumbres de q_c y N_{SPT} ya fueron examinadas en la Sección 4.1.

Paso 4. Identificar todas las incertidumbres que componen cada variable, incluyendo las transformaciones

Lo primero a considerar es la incertidumbre de la relación ($q_{b,10\%}/q_{bL}$). La incertidumbre de esta relación se debe a las incertidumbres del modelo numérico usado para representar el suelo. Comenzando por el lazo izquierdo de la Figura 8.1.13, consideramos la influencia de la incertidumbre de D_R . Debido a que las curvas presentadas por Lee y Salgado (1999) utilizan como parámetro de entrada la resistencia obtenida con penetrómetro de cono, la capacidad de CONPOINT de predecir q_c a partir de D_R es una medida pertinente de la variabilidad de D_R en el análisis. Los valores de q_c en este punto no se miden sino que se calculan usando CONPOINT, de modo que en esta etapa no se introduce la variabilidad inherente del suelo medida mediante el CPT.

Para hallar valores de G_0 para utilizar en el análisis se determina e_0 usando la Ecuación (8.1.22) en base a D_R , e_{min} y e_{max} . La incertidumbre de las relaciones de vacíos e_{min} y e_{max} se pueden aproximar a partir de las tolerancias indicadas en la norma ASTM. La incertidumbre de la transformación representada por la Ecuación (8.1.21) se puede evaluar considerando los datos presentados por Hardin y Black (1966).

Los parámetros de ajuste f y g de la Ecuación (8.1.23) varían fundamentalmente con la densidad relativa de la arena ensayada. Por lo tanto, la incertidumbre de la densidad relativa de la arena – un parámetro de estado reflejado en los resultados tanto del modelo CONPOINT como del modelo ABAQUS – es una fuente de incertidumbre para los parámetros f y g y también para G_0 .

Las gráficas de la Figura 8.1.14 ilustran la incertidumbre de los parámetros f y g para casos en los cuales se conoce la densidad relativa. Esta incertidumbre representa la

incertidumbre de la transformación de densidad relativa a los parámetros f y g .

Las incertidumbres de las variables DL y LL ya fueron identificadas anteriormente (ver Tabla 4.1.1). La variable A_b es especificada por el diseñador, pero en realidad el área real de la base depende de las medidas de control de calidad que se implementen en obra. Como el control de calidad varía de obra en obra, no es posible evaluar sistemáticamente la incertidumbre de A_b . Se recomienda al diseñador tomar precauciones razonables con respecto al valor de A_b empleado para predecir la capacidad de punta.

Pasos 5 y 6. Evaluar las incertidumbres compuestas y seleccionar funciones de densidad de probabilidad para el análisis de confiabilidad

El efecto compuesto de todas las incertidumbres introducidas por CONPOINT, las mediciones de e_{max} y e_{min} , las transformaciones para llegar a f y g , y las transformaciones (8.1.21) y (8.1.23) ya fueron evaluadas paso a paso en la Figura 8.1.13 mediante integración numérica de una forma modificada de la Ecuación (3.2.9). Por ejemplo, para calcular el histograma que representa la incertidumbre compuesta del módulo G , $p_x(x)$ se definió como una distribución normal con $COV = 0.084$, representando G_0 , $p_y(y)$ se definió como una distribución normal con $COV = 0.15$, representando f , y $p_z(z)$ se definió como una distribución normal con $COV = 0.01$, representando g . No se utilizó la PDF condicional $p_{w|xyz}(w|xyz)$ debido a que cualquier inexactitud de la Ecuación (8.1.23) depende totalmente de los parámetros de ajuste f y g . El histograma que representa la incertidumbre de G se generó para una serie de deformaciones verticales y densidades relativas diferentes. En base a este relevamiento de las incertidumbres para G , se tomó como representativo un COV de 0.12. En la Tabla 8.1.1 se resumen los resultados de este relevamiento. Por lo tanto, de acuerdo con la relación en la Ecuación (8.1.20) el COV para q_b es 0.12. Lee y Salgado (1999) calcularon valores de $q_{b,10\%}$ usando este modelo y luego normalizaron los resultados para obtener $q_{b,10\%}/q_{bL}$. Los valores de q_{bL} se determinaron usando CONPOINT y las propiedades del suelo usadas para el modelo. Observar que la incertidumbre de CONPOINT fue incorporada al comienzo de la Figura 8.1.13. En consecuencia, la incertidumbre de $q_{b,10\%}/q_{bL}$ es la misma que para los valores de q_b determinados según el modelo.

La incertidumbre de q_{bL} ya fue examinada en la Sección 8.1.1. La función de densidad de probabilidad resultante es una distribución normal con $COV = 0.16$ y factor de sesgo = 1.06.

Tabla 8.1.1 – Resumen de los parámetros estadísticos para la evaluación de la incertidumbre compuesta del modulo G en el modelo de Lee y Salgado (1999) para diferentes valores de la densidad relativa y deformación vertical en un punto del modelo del suelo.

DR	deformación vertical	media (μG)	desviación estándar (σ_G)	COV _G
50	0.1%	21.63364	2.695234	0.124585
60	0.1%	22.95865	2.79628	0.121796
80	0.1%	25.47008	2.93825	0.115361
50	0.5%	9.182838	1.122245	0.122211
60	0.5%	9.687383	1.073985	0.110864
80	0.5%	10.62515	1.092017	0.102777
50	1.0%	6.039453	0.859287	0.142279
60	1.0%	6.361194	0.774608	0.121771
80	1.0%	6.94989	0.771959	0.111075

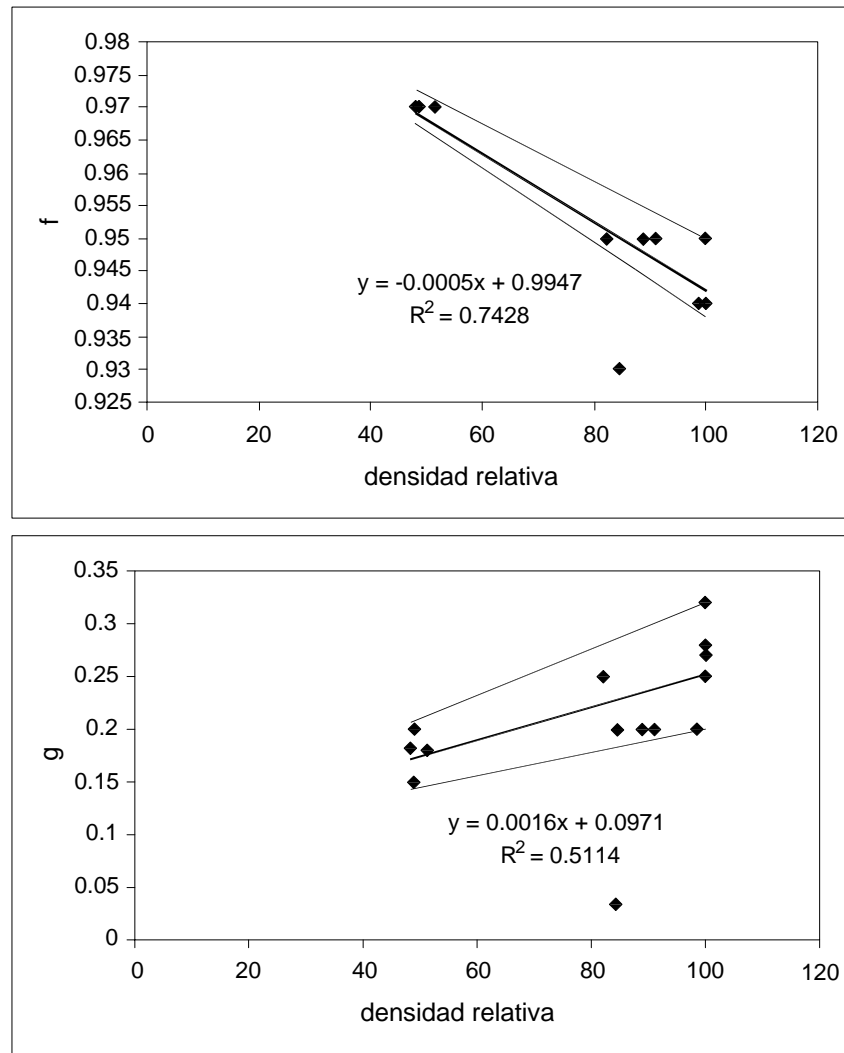


Figura 8.1.14 – Variación de los factores de ajuste f y g en función de D_R (Lee y Salgado 1999)

Diseño directo de la capacidad friccional

No se evaluó la incertidumbre para el diseño directo de la capacidad friccional ya que los datos disponibles eran insuficientes para completar un análisis satisfactorio.

Diseño directo de la capacidad de punta

Paso 1. Identificar la ecuación correspondiente al estado límite

La ecuación correspondiente a estado límite para capacidad de punta se expresa como:

$$\left(\frac{q_{b,10\%}}{q_c} \right) q_c A_b - DL - LL = 0 \quad (8.1.24)$$

donde $(q_{b,10\%}/q_c)$ es la relación entre la presión en la base cuando $s/B = 10\%$ y la resistencia a la penetración con penetrómetro de cono q_c , A_b es el área de la base del pilote, DL es la carga permanente que actúa sobre la base del pilote, y LL es la sobrecarga viva que actúa sobre la base del pilote.

Paso 2. Identificar las variables que componen la ecuación

De las variables de la Ecuación (8.1.24), A_b es seleccionada por el diseñador; DL y LL se obtienen como resultado del diseño de la superestructura; q_c se mide directamente; y la relación $(q_{b,10\%}/q_c)$ se basa en resultados publicados por Lee y Salgado (1999).

Paso 3. Identificar los ensayos geotécnicos asociados con cada variable

De las variables identificadas en la Ecuación (8.1.24), q_c se puede medir en la práctica habitual. La incertidumbre de q_c ya fue analizada en la Sección 4.1.

Paso 4. Identificar todas las incertidumbres que componen cada variable, incluyendo las transformaciones

La incertidumbre de $(q_{b,10\%}/q_c)$ ya fue analizada al discutir el diseño de pilotes perforados en base a las propiedades del suelo. La función de densidad de probabilidad resultante es una distribución normal con $COV = 0.12$. La incertidumbre de q_c ya fue analizada en la Sección 4.1. La función de densidad de probabilidad resultante es una distribución normal con $COV = 0.07$ y factor de sesgo = 1.06.

Pasos 5 y 6. Evaluar las incertidumbres compuestas y seleccionar funciones de densidad de probabilidad para el análisis de confiabilidad

Las funciones de densidad de probabilidad para $(q_{b,10\%}/q_c)$ y q_c ya fueron seleccionadas en el Paso 4 y la Sección 4.1, respectivamente, y se pueden usar directamente con la Ecuación (8.1.24) en el análisis de confiabilidad.

8.2 Evaluación de los factores de resistencia

En la presente sección evaluaremos los factores de resistencia para los métodos de diseño directos y basados en las propiedades del suelo para los diferentes tipos de pilotes discutidos en la

Sección 8.1. Para facilitar la discusión resumiremos todas las ecuaciones de diseño en la Tabla 8.2.1. La Tabla 8.2.1 también incluye los factores de resistencia (RF) que se utilizarían en el diseño junto con los factores de carga de ASCE-7 y AASHTO. Como referencia calculamos un factor de seguridad (FS) equivalente que se usaría en el Diseño por Tensiones Admisibles (WSD). El factor de seguridad FS se toma como la relación entre un factor de carga representativo y el factor de resistencia.

Para los métodos de diseño que no se mencionan en este Capítulo el diseñador tiene la opción de evaluar el factor de resistencia para la capacidad total obtenida a partir de métodos de diseño directos. Este procedimiento se discute detalladamente en la Sección 9.2.1.

Para cada cálculo de RF verificaremos diferentes relaciones de LL/DL, ya que la sobrecarga viva tiene mayor incertidumbre que la carga permanente y diferentes relaciones de LL/DL darán por resultado diferentes factores de carga. Como se vio en el Capítulo 5, dependiendo de la incertidumbre relativa de la resistencia y la carga, menores relaciones LL/DL ocasionalmente darán por resultado menores factores de resistencia. Por lo tanto se verifican relaciones LL/DL tanto elevadas como bajas.

Como observamos en el Capítulo 5, los factores de resistencia varían con los valores de las variables de diseño. Por este motivo también analizamos el efecto que tienen los valores de las diferentes variables de diseño sobre las ecuaciones de diseño para los diferentes tipos de pilotes considerados. En general, para las ecuaciones que hemos seleccionado el valor específico de las variables de diseño tiene poca influencia sobre el factor de resistencia final.

Tabla 8.2.1 – Tabla resumen para el diseño de fundaciones profundas en arena. Se indican los factores de resistencia (RF) a utilizar con los factores de carga de ASCE-7 y AASHTO. FS indica un valor aproximado del factor de seguridad del WSD correspondiente al factor de resistencia indicado.

Diseño de pilotes hincados de punta cerrada en base a las propiedades del suelo

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

Capacidad friccional:

$$R_s = \int_L f_s a_s dL$$

$$f_s = \frac{K_s}{K_0} K_0 \tan \left(\frac{\delta_c}{\phi_c} \phi_c \right) \sigma'_v$$

$$(RF)_s = 0.37 \quad (\text{ASCE-7})$$

$$(RF)_s = 0.40 \quad (\text{AASHTO})$$

$$\frac{K_s}{K_0} = 7.2 (0.0112 D_R (\%) - 0.0141), \quad 20\% < D_R < 90\%$$

$$FS = 3.9$$

$$\frac{\delta_c}{\phi_c} = 0.85$$

Capacidad de punta:

$$R_b = q_{b,10\%} A_b$$

$$q_{b,10\%} = \left(\frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} \right) q_{bL}$$

$$(RF)_b = 0.50 \quad (\text{ASCE-7})$$

$$(RF)_b = 0.52 \quad (\text{AASHTO})$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} = 1.02 - 0.0051 D_R (\%)$$

$$FS = 3.0$$

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

Diseño directo de pilotes hincados de punta cerrada

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

Capacidad friccional:

$$R_s = \int_L f_s a_s dL$$

$$(RF)_s = 0.51 \quad (\text{ASCE-7})$$

$$(RF)_s = 0.53 \quad (\text{AASHTO})$$

$$f_s = \left(\frac{f_s}{q_c} \right) q_c = 0.002 q_c$$

$$FS = 2.9$$

Capacidad de punta:

$$R_b = q_{b,10\%} A_b$$

$$q_{b,10\%} = \left(\frac{q_{b,10\%}}{q_c} \right) q_c$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{q_c} = 1.02 - 0.0051 D_R (\%)$$

$$(RF)_b = 0.56 \quad (\text{ASCE-7})$$

$$(RF)_b = 0.59 \quad (\text{AASHTO})$$

$$FS = 2.6$$

Diseño de pilotes hincados de punta abierta en base a las propiedades del suelo

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

Capacidad friccional:

$$R_s = \int_L f_s a_s dL$$

$$f_s = \frac{K_s}{K_0} K_0 \tan \left(\frac{\delta_c}{\phi_c} \phi_c \right) \sigma'_v$$

$$\frac{K}{K_0} = \beta (7.2 - 4.8 PLR)$$

$$\frac{\delta_c}{\phi_c} = 0.85$$

$$\beta = 0.0112 D_R (\%) - 0.0141, \quad 20\% < D_R (\%) < 90\%$$

$$(RF)_s = 0.37 \quad (\text{ASCE-7})$$

$$(RF)_s = 0.40 \quad (\text{AASHTO})$$

$$FS = 3.9$$

Capacidad de punta:

$$R_b = q_{b,10\%} A_b$$

$$q_{b,10\%} = \left(\frac{q_{b,10\%}}{\sigma'_h} \right) \sigma'_h$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{\sigma'_h} = \alpha \left(326 - 295 \frac{IFR(\%)}{100} \right)$$

$$\alpha = 0.0112 D_R (\%) - 0.0141, \quad 20\% < D_R (\%) < 90\%$$

$$A_b = \pi \left(\frac{d_o}{2} \right)^2$$

$$(RF)_b = 0.58 \quad (\text{ASCE-7})$$

$$(RF)_b = 0.60 \quad (\text{AASHTO})$$

$$FS = 2.6$$

Diseño directo de pilotes hincados de punta abierta (CPT)

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

Capacidad friccional:

$$R_s = \int_L f_s a_s dL$$

$$f_s = \left(\frac{f_s}{q_c} \right) q_c = 0.002 q_c$$

$$(RF)_s = 0.37 \quad (\text{ASCE-7})$$

$$(RF)_s = 0.40 \quad (\text{AASHTO})$$

$$FS = 3.9$$

Capacidad de punta:

$$R_b = q_{b,10\%} A_b$$

$$q_{b,10\%} = \left(\frac{q_{b,10\%}}{q_c} \right) q_c$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{q_c} = -0.00443 IFR(\%) + 0.557$$

$$A_b = \pi \left(\frac{d_o}{2} \right)^2$$

$$(RF)_b = 0.66 \quad (\text{ASCE-7})$$

$$(RF)_b = 0.69 \quad (\text{AASHTO})$$

$$FS = 2.3$$

Diseño directo de pilotes perforados en base a las propiedades del suelo

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

Capacidad de punta:

$$R_b = q_{b,10\%} A_b$$

$$q_{b,10\%} = \left(\frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} \right) q_{bL}$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{q_{bL}} = 0.225 - 0.0011 D_R(\%)$$

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

$$(RF)_b = 0.56 \quad (\text{ASCE-7})$$

$$(RF)_s = 0.58 \quad (\text{AASHTO})$$

$$FS = 2.7$$

Diseño directo de pilotes perforados (CPT)

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

Capacidad de punta:

$$R_b = q_{b,10\%} A_b$$

$$q_{b,10\%} = \left(\frac{q_{b,10\%}}{q_c} \right) q_c$$

$$\frac{q_{b,10\%}}{q_c} = 0.225 - 0.0011 D_R(\%)$$

$$(RF)_b = 0.64 \quad (\text{ASCE-7})$$

$$(RF)_b = 0.67 \quad (\text{AASHTO})$$

$$FS = 2.3$$

8.2.1 Pilotes de punta cerrada hincados en arena**Diseño de la capacidad friccional en base a las propiedades del suelo**

La Tabla 8.2.2 es un resumen de las PDF relevantes y sus correspondientes *COV* determinados en la Sección 8.1 para el método de diseño de la capacidad friccional en base a las

propiedades del suelo. Los factores de resistencia RF ajustados se calcularon usando un índice de confiabilidad objetivo β igual a 3.0. La Tabla 8.2.2 resume los resultados obtenidos. Observar que los valores de RF no dependen de los valores de K_0 y ϕ_c . Observar también que el valor de K_0 a utilizar en el diseño se tomó como determinístico, tal como se explicó en la Sección 8.1. Sin embargo, si se hubiera introducido alguna incertidumbre para K_0 , el valor de RF habría sido menor. Observar además que las PDF y ecuaciones de diseño evaluadas para el diseño de pilotes de punta cerrada son iguales que para los pilotes de punta abierta. En consecuencia, el factor de resistencia hallado coincide con el caso del pilote de punta abierta. Debido a la complicación adicional que introduce el taponamiento parcial, la resistencia friccional de los pilotes de punta abierta inherentemente posee más incertidumbre que la de los pilotes de punta cerrada; esto significa que la incertidumbre de la resistencia friccional de los pilotes de punta abierta es un límite superior razonable para la incertidumbre de los pilotes de punta cerrada. Por lo tanto estos factores de resistencia son conservadores.

En base a los resultados de los cálculos de factores de resistencia presentados en la Tabla 8.2.2, un valor representativo de RF a utilizar en el diseño es 0.37.

Tabla 8.2.2 – Resultados de la evaluación de los factores de resistencia para la capacidad friccional de pilotes de punta cerrada en arena - Diseño en base a las propiedades del suelo, Factores de Carga de ASCE-7

Principales variables aleatorias y funciones de densidad de probabilidad asociadas			
Variable	PDF		COV
K/K_0	normal, factor de sesgo = 1.0		0.22
δ_c/ϕ_c	normal, $\mu = 0.9$		0.10
ϕ_c	normal, factor de sesgo = 1.0		0.01
Factores de resistencia resultantes, $\beta = 3.0$			
K_0	ϕ_c	LL/DL	RF
0.4	33	1	0.37
0.4	33	4	0.41
1.0	33	1	0.38
1.0	33	4	0.41
1.0	30	1	0.38
1.0	30	4	0.41

Diseño de la capacidad de punta en base a las propiedades del suelo

La Tabla 8.2.3 es un resumen de las PDF relevantes y sus correspondientes COV determinados en la Sección 8.1 para el método de diseño de la capacidad de punta en base a las propiedades del suelo. Los factores de resistencia RF ajustados se calcularon usando un índice de confiabilidad objetivo β igual a 3.0. La Tabla 8.2.3 resume los resultados obtenidos. Observar que los valores de RF no dependen del valor de D_R . Un valor representativo de RF a utilizar en el diseño es 0.50.

Tabla 8.2.3 – Resultados de la evaluación de los factores de resistencia para la capacidad de punta de pilotes de punta cerrada en arena - Diseño en base a las propiedades de suelo, Factores de Carga de ASCE-7

Principales variables aleatorias y funciones de densidad de probabilidad asociadas		
Variable	PDF	COV
$q_{b,10\%}/q_c$	normal, factor de sesgo = 1.0	0.17
q_{bL}	normal, factor de sesgo = 1.06	0.16
Factores de resistencia resultantes, $\beta = 3.0$		
$D_R(\%)$	LL/DL	RF
80	1	0.52
80	4	0.50
60	1	0.52
60	4	0.51

Diseño directo de la capacidad friccional

Aunque existen diferentes métodos disponibles para estimar la capacidad friccional de los pilotes de punta cerrada a partir de resultados de ensayos in situ tales como el CPT, los datos recolectados son insuficientes para evaluar con precisión la incertidumbre de las diversas técnicas. Sin embargo, se pueden extraer algunas conclusiones respecto de los valores probables de RF si se conoce la naturaleza mecánica del problema. En primer lugar, tanto los pilotes de punta cerrada como los de punta abierta desplazan una cierta cantidad de arena al ser hincados. En el caso de los pilotes de punta abierta la cantidad de arena desplazada es altamente variable, dependiendo de las condiciones del suelo in situ y las condiciones de hincado que afectan la cantidad de suelo que ingresa al pilote. Por el contrario, la cantidad de suelo desplazado por un

pilote de punta cerrada varía relativamente poco. Por lo tanto, se anticipa que la variabilidad de la capacidad friccional de los pilotes cerrados será menor que la de los pilotes abiertos. Esta observación implica que los FR para los pilotes de punta cerrada deberían ser mayores que para los pilotes de punta abierta. En segundo lugar, la mayoría de los métodos de diseño directos evitan el dilema al cual se enfrentan los métodos basados en las propiedades del suelo, es decir inferir varias propiedades a partir de uno o dos tipos de mediciones. Al correlacionar el comportamiento del pilote directamente con una medición in situ, es esperable que se pueda reducir la incertidumbre asociada con la predicción de la capacidad de los pilotes. Esto es válido cuando los métodos de diseño directos se aplican a los mismos suelos y bajo las mismas condiciones que se usaron para calibrarlos. Por lo tanto, para un mismo tipo de pilote, muchas veces los RF deberían ser iguales o mayores si se utiliza un método de diseño directo que si se utiliza un método de diseño basado en las propiedades del suelo.

Estas observaciones son útiles a la hora de inferir un valor de RF razonable para utilizar en el diseño directo de la capacidad friccional de los pilotes de punta cerrada. En base a la primera observación se deduce que RF probablemente será mayor que 0.37, el valor de RF correspondiente a pilotes de punta abierta, los cuales presentan mayor incertidumbre. En base a la segunda observación se deduce que RF podría ser mayor que 0.51, valor hallado para el diseño de la resistencia friccional de pilotes de punta cerrada en base a las propiedades del suelo. Suponiendo que el RF para el método basado en las propiedades del suelo es un valor representativo, 0.51 es una estimación conservadora de RF para el diseño directo de la resistencia friccional de los pilotes de punta cerrada.

Diseño directo de la capacidad de punta

En base a los datos de ensayos de carga de alta calidad reunidos en el Capítulo 7 se utilizó la correlación entre mediciones mediante ensayos CPT y la capacidad de punta para $s/B = 10\%$. La Tabla 8.2.4 es un resumen de las PDF relevantes y sus correspondientes COV para estos datos. Los factores de resistencia (RF) ajustados se calcularon para un índice de confiabilidad objetivo $\beta = 3.0$ y diferentes valores de D_R y LL/DL . La Tabla 8.2.4 resume los resultados obtenidos. Observar que diferentes valores de la densidad relativa no modifican el RF calculado. En base a estos resultados, para este método de diseño se considera que $RF = 0.56$ es un valor representativo.

Tabla 8.2.4 – Resultados de la evaluación de los factores de resistencia para la capacidad de punta de pilotes de punta cerrada en arena - Diseño directo, Factores de Carga de ASCE-7

Principales variables aleatorias y funciones de densidad de probabilidad asociadas		
Variable	PDF	COV
$q_{b,10\%}/q_c$	normal, factor de sesgo = 1.0	0.17
q_c	normal, factor de sesgo = 1.06	0.07
Factores de resistencia resultantes, $\beta = 3.0$		
$D_R(\%)$	LL/DL	RF
80	1	0.59
80	4	0.57
60	1	0.59
60	4	0.56

8.2.2 Pilotes de punta abierta hincados en arena

Diseño de la capacidad friccional en base a las propiedades del suelo

La Tabla 8.2.5 es un resumen de las PDF relevantes y sus correspondientes COV determinados para las variables de diseño relevantes del método de diseño de la capacidad friccional en base a las propiedades del suelo. Los factores de resistencia RF ajustados se determinaron usando un índice de confiabilidad objetivo β igual a 3.0. La Tabla 8.2.5 resume los resultados obtenidos. Observar que variar K_0 y ϕ_c prácticamente no afecta el valor de RF obtenido. Un valor representativo de RF a utilizar en el diseño es 0.37. Observar que el valor de K_0 a utilizar en el diseño se tomó como determinístico, tal como se explicó en la Sección 8.1. Sin embargo, si se hubiera introducido alguna incertidumbre para K_0 , el valor de RF habría sido menor.

Tabla 8.2.5 – Resultados de la evaluación de los factores de resistencia para la capacidad friccional de pilotes de punta abierta en arena - Diseño en base a las propiedades del suelo, Factores de Carga de ASCE-7

Principales variables aleatorias y funciones de densidad de probabilidad asociadas			
Variable	PDF		COV
K/K_0	normal, factor de sesgo = 1.0		0.22
δ_c/ϕ_c	normal, $\mu = 0.9$		0.10
ϕ_c	normal, factor de sesgo = 1.0		0.01
Factores de resistencia resultantes, $\beta = 3.0$			
K_0	ϕ_c	LL/DL	RF
0.4	33	1	0.37
0.4	33	4	0.41
1.0	33	1	0.38
1.0	33	4	0.41
1.0	30	1	0.38
1.0	30	4	0.41

Diseño de la capacidad de punta en base a las propiedades del suelo

La Tabla 8.2.6 es un resumen de las PDF relevantes y sus correspondientes COV determinados para las variables de diseño relevantes del método de diseño de la capacidad de punta en base a las propiedades del suelo. Los factores de resistencia RF ajustados se determinaron usando un índice de confiabilidad objetivo β igual a 3.0. La Tabla 8.2.6 resume los resultados obtenidos. Observar que RF no varía con la densidad relativa. Un valor representativo de RF para utilizar en el diseño es 0.58.

Tabla 8.2.6 – Resultados de la evaluación de los factores de resistencia para la capacidad de punta de pilotes de punta abierta en arena - Diseño en base a las propiedades del suelo, Factores de Carga de ASCE-7

Principales variables aleatorias y funciones de densidad de probabilidad asociadas		
Variable	PDF	COV
$q_{b,10\%}/\sigma'_h$	normal, factor de sesgo = 1.0	0.15
Factores de resistencia resultantes, $\beta = 3.0$		
$D_R(\%)$	LL/DL	RF
90	1	0.61
90	4	0.58
60	1	0.61
60	4	0.58

Diseño directo de la capacidad friccional

La Tabla 8.2.7 es un resumen de las PDF relevantes y sus correspondientes *COV* para el método de diseño directo de la capacidad friccional como se determinaron en la Sección 8.1. Los factores de resistencia *RF* ajustados se determinaron para un índice de confiabilidad objetivo β igual a 3.0. La Tabla 8.2.7 resume los resultados obtenidos. En base a este análisis, un valor razonable de *RF* para utilizar en el diseño es 0.37.

Tabla 8.2.7 – Resultados de la evaluación de los factores de resistencia para la capacidad friccional de pilotes de punta abierta en arena - Diseño directo, Factores de Carga de ASCE-7

Principales variables aleatorias y funciones de densidad de probabilidad asociadas		
Variable	PDF	COV
f_s/q_c	normal, $\mu = 0.002$	0.23
q_c	normal, factor de sesgo = 1.06	0.07
Factores de resistencia resultantes, $\beta = 3.0$		
	LL/DL	RF
	1	0.37
	4	0.40

Observar que el RF obtenido para la predicción de la capacidad del pilote en base a las propiedades del suelo no difiere del obtenido para diseño directo. Considerando la fuente de los datos, esto probablemente se debe al hecho de que la principal fuente de incertidumbre para los pilotes de punta abierta es el grado de taponamiento durante el hincado. Por lo tanto se minimizan los efectos de las incertidumbres adicionales que se introducen al intentar estimar las propiedades del suelo.

Diseño directo de la capacidad de punta

La Tabla 8.2.8 es un resumen de las PDF relevantes y sus correspondientes COV seleccionados para modelar la incertidumbre de $(q_{b,10\%}/q_c)$ y (q_c) discutidos en la Sección 8.1. Los factores de resistencia RF ajustados se calcularon usando un índice de confiabilidad objetivo β igual a 3.0. La Tabla 8.2.8 resume los resultados obtenidos. Observar que aunque para calcular RF se utilizaron diferentes valores de $IFR(\%)$ esto no afectó el valor resultante. Los diferentes valores de la relación LL/DL sí tienen un efecto, el cual ha sido tomado en cuenta considerando dos valores diferentes para la relación sobrecarga viva-carga permanente. Un valor razonable de RF para utilizar en el diseño es 0.66.

Tabla 8.2.8 – Resultados de la evaluación de los factores de resistencia para la capacidad de punta de pilotes de punta abierta en arena - Diseño directo, Factores de Carga de ASCE-7

Principales variables aleatorias y funciones de densidad de probabilidad asociadas		
Variable	PDF	COV
$q_{b,10\%}/q_c$	normal, factor de sesgo = 1.0	0.10
q_c	normal, factor de sesgo = 1.06	0.07
Factores de resistencia resultantes, $\beta = 3.0$		
IFR(%)	LL/DL	RF
60	1	0.66
60	4	0.69
20	1	0.66
20	4	0.69

8.2.3 Pilotes perforados en arena

Diseño de la capacidad friccional en base a las propiedades del suelo

No se calcularon factores de resistencia para el diseño de la capacidad friccional en base a las propiedades del suelo ya que los datos disponibles eran insuficientes para completar un análisis satisfactorio.

Diseño de la capacidad de punta en base a las propiedades del suelo

La Tabla 8.2.9 es un resumen de las PDF y sus correspondientes COV para el método de diseño de la capacidad de punta en base a las propiedades del suelo determinados en la Sección 8.1. Los factores de resistencia RF ajustados se calcularon usando un índice de confiabilidad objetivo β igual a 3.0. La Tabla 8.2.9 resume los resultados obtenidos. Observar que los valores de RF no dependen del valor de D_R . Un valor representativo de RF para utilizar en el diseño es 0.56.

Tabla 8.2.9 – Resultados de la evaluación de los factores de resistencia para la capacidad de punta de pilotes perforados en arena - Diseño en base a las propiedades del suelo, Factores de Carga de ASCE-7

Principales variables aleatorias y funciones de densidad de probabilidad asociadas		
Variable	PDF	COV
$q_{b,10\%}/q_{bL}$	normal, factor de sesgo = 1.0	0.12
q_{bL}	normal, factor de sesgo = 1.06	0.16
Factores de resistencia resultantes, $\beta = 3.0$		
$D_R(\%)$	LL/DL	RF
60	1	0.59
60	4	0.56
80	1	0.59
80	4	0.56

Diseño directo de la capacidad friccional

No se calcularon factores de resistencia para el diseño directo de la capacidad friccional ya que los datos disponibles eran insuficientes para completar un análisis satisfactorio.

Diseño directo de la capacidad de punta

La Tabla 8.2.10 es un resumen de las PDF y sus correspondientes COV seleccionados en la Sección 8.1 para el diseño directo de la capacidad de punta de los pilotes perforados. Los factores de resistencia RF ajustados se calcularon usando un índice de confiabilidad objetivo β igual a 3.0. La Tabla 8.2.10 resume los resultados obtenidos. Observar que los valores de RF no dependen del valor de D_R . En base a estos resultados, un valor representativo de RF para utilizar en el diseño es 0.64. Observar que en la práctica la confiabilidad de la base de un pilote perforado depende fuertemente del control de calidad ejercido durante la construcción.

Tabla 8.2.10 – Resultados de la evaluación de los factores de resistencia para la capacidad de punta de pilotes perforados en arena - Diseño directo, Factores de Carga de ASCE-7

Principales variables aleatorias y funciones de densidad de probabilidad asociadas		
Variable	PDF	COV
$q_{b,10\%}/q_c$	normal, factor de sesgo = 1.0	0.12
q_c	normal, factor de sesgo = 1.06	0.07
Factores de resistencia resultantes, $\beta = 3.0$		
$D_R(\%)$	LL/DL	RF
60	1	0.67
60	4	0.64
80	1	0.67
80	4	0.64