

CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN DE LOS FACTORES DE RESISTENCIA PARA FUNDACIONES SUPERFICIALES

5.1 Cálculo de factores de resistencia (RF)

Variables de entrada

Antes de poder realizar cualquier cálculo es necesario definir la ecuación de estado límite determinante y establecer los COV y factores de sesgo para cada variable de la ecuación. Este procedimiento se demostró en el Capítulo 4. Una vez definidos los COV , el β objetivo y el método de análisis de confiabilidad a utilizar es posible calcular los RF .

En el diseño de fundaciones existe una gran cantidad de parámetros de diseño posibles. También existen numerosos métodos de diseño y ensayos. Debido a que cada uno de ellos generará diferentes incertidumbres en el problema global, un análisis completo del problema deberá considerar un rango de parámetros de diseño. Se consideran ocho conjuntos de condiciones de diseño – fundaciones corridas y cuadradas en arena usando ensayos CPT y SPT, y fundaciones corridas y cuadradas en arcilla usando los factores de forma y profundidad de Salgado et al. (2004) y Meyerhof (1951). Se calculan factores de resistencia para diferentes valores de la relación sobrecarga viva / carga permanente (LL/DL), parámetro de resistencia (expresado ya sea como ángulo de fricción ϕ o resistencia al corte no drenada s_u) y empotramiento relativo (D/B).

La sobrecarga viva tiene mayor incertidumbre que la carga permanente. Las tendencias observadas por Galambos et al. (1982), Milford (1987) y Tabsh (1997) indican que la influencia de la sobrecarga adicional introducida por la sobrecarga viva es mayor cuando los valores de LL/DL son pequeños y disminuye a medida que aumenta LL/DL . Esta influencia se vuelve despreciables para $LL/DL \geq 4$. Además, los resultados presentados por Ellingwood et al. (1982) indican que, en la calibración, los factores de resistencia también efectivamente dejan de cambiar para $LL/DL \geq 4$. Por lo tanto, este límite superior permitirá tanto un análisis exhaustivo como valores seguros de RF para el diseño. El límite inferior se toma como $LL/DL = 0.5$.

Para el caso de zapatas en arena se consideraron valores del ángulo de fricción ϕ comprendidos entre 35° y 42° y entre 37° y 48° para zapatas cuadradas y corridas, respectivamente. Para arcilla, los valores que se consideraron para la resistencia al corte no

drenada fueron $s_u = 150\text{kPa}$ y $s_u = 800\text{kPa}$. Se consideraron relaciones de empotramiento comprendidas entre $D/B = 0$ y $D/B = 1$, ya que las fundaciones superficiales generalmente se definen como aquellas en las cuales $D/B \leq 1$.

Los códigos para diseño estructural que utilizan los factores de carga de ASCE-7 (1996) incluyen el ACI 318-02 (ACI, 2002) y la tercera edición del Código AISC (AISC 2001). Para las combinaciones de carga permanente y sobrecarga viva estos factores de carga son $(LF)_{DL} = 1.2$ y $(LF)_{LL} = 1.6$. Los factores de carga especificados por AASHTO (1998) son $(LF)_{DL} = 1.25$ y $(LF)_{LL} = 1.75$.

Arena

En la Figura 5.1.1 (CPT) y la Figura 5.1.2 (SPT) se ilustran los resultados de los cálculos de factores de resistencia para zapatas en arena considerando los factores de carga de ASCE-7. En las cinco gráficas correspondientes a zapatas cuadradas se observa de inmediato una tendencia: un fuerte incremento del factor de resistencia entre $D/B = 0$ y $D/B = 0.1$. Esta tendencia se debe fundamentalmente a la diferencia de COV entre N_q y N_γ . Para $D/B = 0$, el término ' γ ' de la ecuación de capacidad de carga es el único término que contribuye a la resistencia. Para valores de D/B más elevados el término ' q ' (que tiene menor incertidumbre que el término ' γ ') contribuye más a la resistencia. En consecuencia, para estos valores de D/B más elevados la incertidumbre de la ecuación global es menor que para $D/B = 0$, y esto hace que el RF aumente.

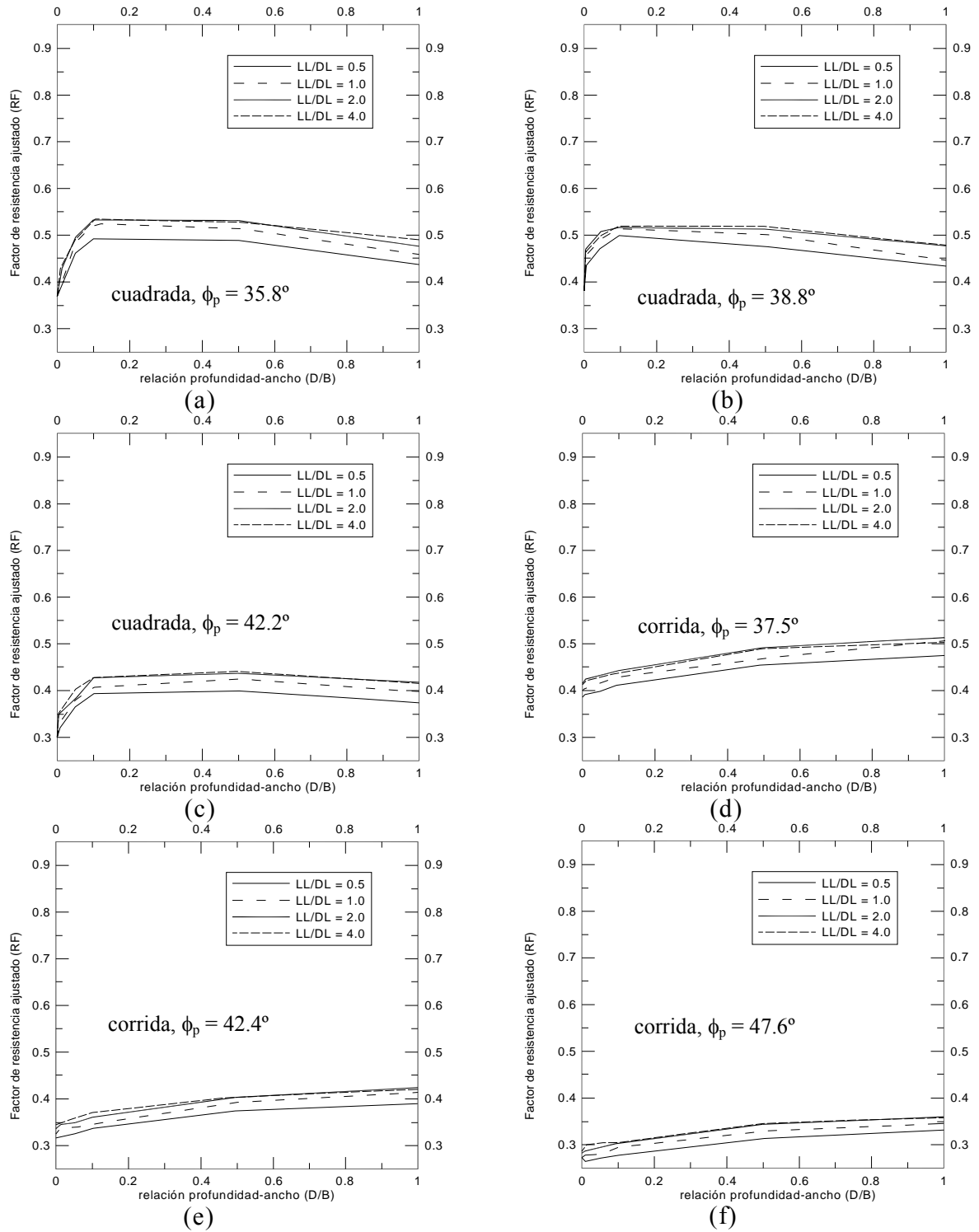


Figura 5.1.1. Factores de resistencia ajustados para zapatas en arena usando CPT: Zapatas cuadradas: (a) $\phi_p = 35.8^\circ$, (b) $\phi_p = 38.8^\circ$, (c) $\phi_p = 42.2^\circ$; Zapatas corridas: (d) $\phi_p = 37.5^\circ$, (e) $\phi_p = 42.4^\circ$, (f) $\phi_p = 47.6^\circ$

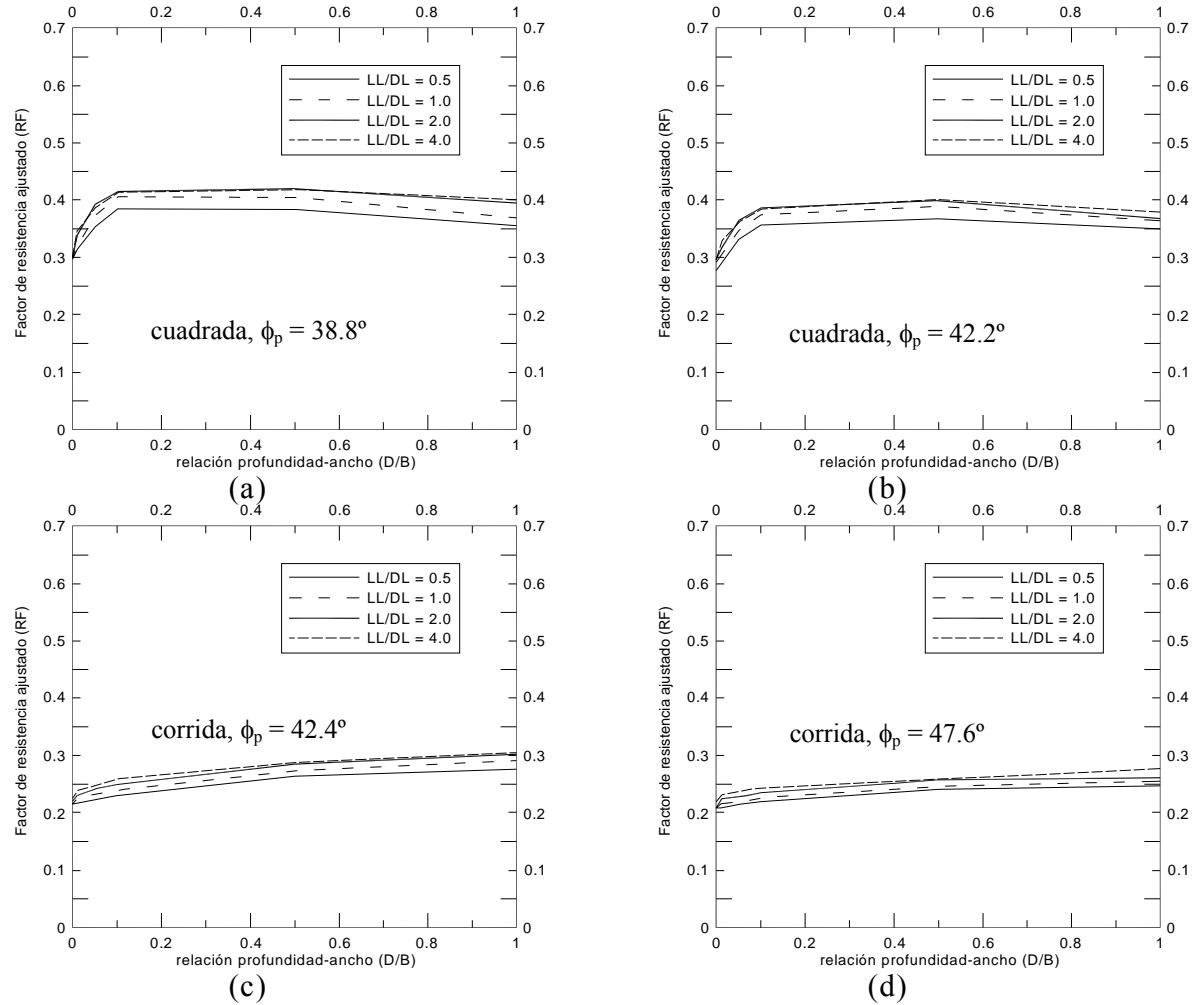


Figura 5.1.2. Factores de resistencia ajustados para zapatas en arena usando SPT: Zapatas cuadradas: (a) $\phi_p = 38.8^\circ$, (b) $\phi_p = 42.2^\circ$; Zapatas corridas: (c) $\phi_p = 42.4^\circ$, (d) $\phi_p = 47.6^\circ$

Para las zapatas cuadradas la notoria tendencia que tiene RF de decrecer luego de aproximadamente $D/B = 0.5$ ilustra otra influencia en los cálculos de RF . La optimización de (3.3.4) dará por resultado un punto sobre la superficie en estado límite tangente a alguna curva de nivel de densidad de probabilidad respecto de los valores medios. La Figura 5.1.3 ilustra un ejemplo de dos variables donde un cambio de la pendiente de la curva en estado límite afectará el factor de resistencia calculado. Considerando la relación entre la capacidad de carga y el factor de capacidad de carga N_q se puede definir una pendiente para la relación entre N_q y la carga para una condición de diseño dada (valores de D , B , s_q , d_q , s_γ). A medida que D/B aumenta, los valores de D y d_q aumentan para un valor de B dado, indicando un aumento

de la pendiente de la superficie en estado límite en el espacio N_q -carga. Observar que σ_{dq} y σ_D también aumentarán pero μ_{sq} y σ_{sq} permanecerán constantes, lo cual afecta la optimización de (3.3.4). Este cambio en la pendiente de la curva N_q vs. carga trasladará la ubicación del punto de tangencia entre la superficie en estado límite y la distribución probabilística respecto de la media de N_q . Como se ilustra en la Figura 5.1.3, este aumento de la pendiente provocará un aumento de la separación entre los valores medio y en estado límite de N_q y por lo tanto una disminución de RF .

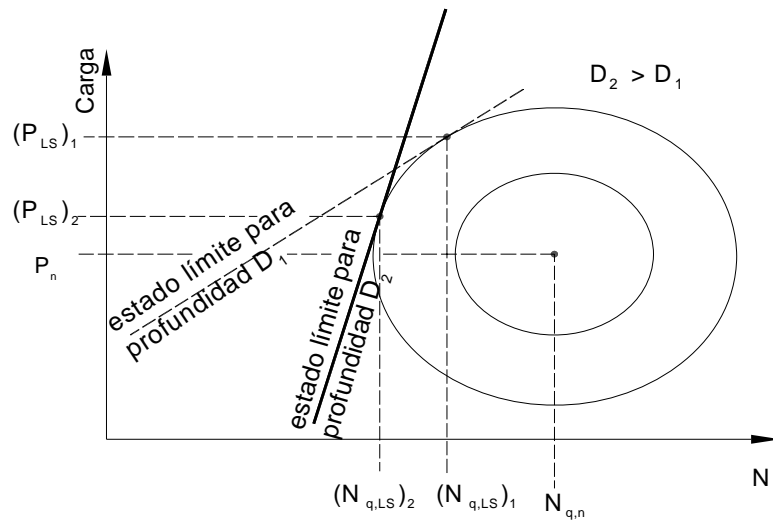


Figura 5.1.3. Explicación bidimensional (similar a la Figura 3.2.1c) de las geometrías de las curvas de RF en laa Figuraa 5.1.1(a-c) y 5.1.2(a-b) – cuando varían las otras variables que afectan la capacidad de carga, la pendiente de la superficie en estado límite en el punto considerado entre la profundidad 1 y la profundidad 2 también cambia – la distancia relativa óptima entre los valores nominales y en estado límite se ve afectada.

Un resultado muy importante presentado en las Figuras 5.1.1 y 5.1.2 es el efecto de los diferentes ángulos de fricción ϕ sobre el valor de RF calculado. Debido a que los valores de los factores de capacidad de carga aumentan exponencialmente a medida que aumenta ϕ , una sobrestimación de ϕ provocará una sobrestimación significativa de la resistencia nominal de la zapata. Esta posibilidad es considerada correctamente en los análisis de confiabilidad, mostrando valores decrecientes de RF para valores nominales de ϕ más elevados.

Otro elemento interesante de las Figuras 5.1.1 y 5.1.2 son las curvas para diferentes relaciones LL/DL . Debido a la elevada incertidumbre de la sobrecarga viva en comparación

con la carga permanente, ingenuamente se podría esperar que las gráficas presentaran una secuencia decreciente de factores de resistencia (RF) para una secuencia creciente de relaciones LL/DL . Sin embargo, esto no es así. La respuesta yace en el hecho de que los RF no se pueden considerar en forma aislada sino que siempre se deben considerar en combinación con los factores de carga. Como se presentan diferentes relaciones LL/DL , una evaluación del ajuste global debe considerar conjuntamente LL/DL , los factores de carga (LF) y los factores de resistencia (RF). Estos valores se pueden agrupar en forma de un factor de seguridad:

$$FS = \frac{(LF)_{DL} + (LF)_{LL} \left(\frac{LL}{DL} \right)}{\left(\frac{LL}{DL} + 1 \right) (RF)} \quad (5.1.1)$$

Con referencia, por ejemplo, a la Figura 5.1.2(a), con una relación D/B igual a 0.5, las curvas informan un RF de 0.49 para $LL/DL = 0.5$ y 0.53 para $LL/DL = 4.0$. Considerando también los valores de LF ($LF_{DL} = 1.2$ y $LF_{DL} = 1.6$) y LL/DL , la Ecuación (5.1.1) da por resultado factores de seguridad de 2.72 y 2.87, respectivamente. Este resultado indica que el factor de seguridad es mayor para el caso de $LL/DL = 4.0$ a pesar del mayor RF , y por lo tanto la mayor incertidumbre de la carga está adecuadamente considerada.

Agregamos dos observaciones adicionales. En primer lugar, debido a la incertidumbre introducida por el procedimiento del ensayo SPT, los factores de resistencia para diseños que utilizan el SPT son menores que para aquellos que utilizan el CPT. Para finalizar, en todos los casos para zapatas cuadradas, la variación del factor de resistencia con la relación de empotramiento es mayor entre $D/B = 0$ y $D/B = 0.10$. Por este motivo los valores recomendados de RF para zapatas en arena se dividen en dos categorías: $D/B < 0.10$ y $D/B \geq 0.10$. La Tabla 5.1.1 muestra los valores de RF recomendados.

Tabla 5.1.1. Factores de resistencia recomendados para capacidad de carga en arena y arcilla, aplicables para $D/B \leq 1$.

Caso de diseño		Factores de carga de ASCE-7		Factores de carga de AASHTO (1998)	
		$D/B < 0.10$	$D/B \geq 0.10$	$D/B < 0.10$	$D/B \geq 0.10$
Zapatas en arena					
Zapatas corridas usando CPT	$\phi \leq 38^\circ$	0.40		0.42	
	$\phi > 38^\circ$	0.25		0.26	
Zapatas corridas usando SPT		0.20		0.21	
Zapatas rectangulares usando CPT	$\phi \leq 39^\circ$	0.40	0.45	0.42	0.47
	$\phi > 39^\circ$	0.30	0.35	0.31	0.36
Zapatas rectangulares usando SPT		0.30	0.35	0.31	0.36
Zapatas en arcilla					
Zapatas corridas usando factores de Salgado et al. (2003) (CPT)		0.70		0.73	
Zapatas corridas usando factores de Meyerhof (1951) (CPT)		0.72	0.75	0.75	0.78
Zapatas rectangulares usando factores de Salgado et al. (2003) (CPT)		0.73		0.76	
Zapatas rectangulares usando factores de Meyerhof (1951) (CPT)		0.70	0.78	0.73	0.81
Zapatas corridas usando factores de Salgado et al. (2003) (ensayos en laboratorio)		0.52		0.54	
Zapatas corridas usando factores de Meyerhof (1951) (ensayos en laboratorio)		0.52	0.55	0.54	0.57
Zapatas rectangulares usando factores de Salgado et al. (2003) (ensayos en laboratorio)		0.52		0.54	
Zapatas rectangulares usando factores de Meyerhof (1951) (ensayos en laboratorio)		0.48	0.54	0.50	0.56

Arcilla

En la Figura 5.1.4 se ilustran los resultados de los cálculos del factor de resistencia para zapatas en arcilla diseñadas usando el CPT. En el Capítulo 3 se presentaron el concepto de sesgo y factor de sesgo. Uno de los usos del factor de sesgo mencionados fue para corregir ecuaciones de diseño de manera que permitan obtener valores iguales a los valores medios observados en análisis y ensayos. En la Figura 5.1.4 se ilustra el sesgo introducido por los factores de forma y profundidad de Meyerhof (1951) y el efecto resultante sobre los factores de resistencia. Aparece una diferencia entre los RF calculados usando los factores de Salgado et al. (2004) y los de Meyerhof (1951). Las funciones de densidad de probabilidad (PDF) del

factor de capacidad de carga compuesto ($N_{cs}d_c$) para arcilla presentadas en el Capítulo 4 fueron desarrolladas en base a los resultados del análisis de límites publicado por Salgado et al. (2004). Por lo tanto, el valor medio de $N_{cs}d_c$ puede ser muy diferente del valor de diseño nominal obtenido utilizando los factores de Meyerhof (1951). El resultado final es que los factores de resistencia aquí presentados se comportan parcialmente como factores de ajuste. En el presente estudio se aplicaron factores de sesgo a diseños tanto en arena como en arcilla, pero su uso tiene un efecto particularmente prominente en este ejemplo.

Se agregan tres observaciones importantes. En primer lugar, RF disminuye a medida que aumenta LL/DL . En segundo lugar, a diferencia de las arenas, las gráficas de RF para arcillas no muestran un cambio pronunciado de RF en un rango particular de D/B (excluyendo la corrección para factores de forma y profundidad de Meyerhof (1951) antes mencionada). Finalmente, en sorprendente contraste con lo que ocurre en las arenas, el efecto de diferentes valores de resistencia (s_u) es despreciable, tal como se puede ver comparando las Figuras 5.1.4(a) y 5.1.4(c).

Efecto del índice de confiabilidad objetivo

Una consideración importante en la selección de valores de RF para utilizar en el diseño es determinar cuál es el valor apropiado para el índice de confiabilidad objetivo a utilizar. Anteriormente se habló de β igual a 3.0 como valor más apropiado para el diseño de fundaciones superficiales en estado límite último. La Figura 5.1.5 presenta los resultados de los cálculos de RF antes descritos usando diferentes valores de β . Tal como se podía esperar, tanto en arena como en arcilla el efecto de cambiar β es bastante significativo. Este tipo de gráficas pueden ser herramientas valiosas para evaluar la probabilidad aceptable de una falla clásica en estado límite último por comparación con las metodologías de diseño y factores ya establecidos. En la Figura 5.1.5 también es de observar que existe la posibilidad de que RF sea mayor que 1.0. Esta condición se debe a los motivos discutidos en la sección siguiente.

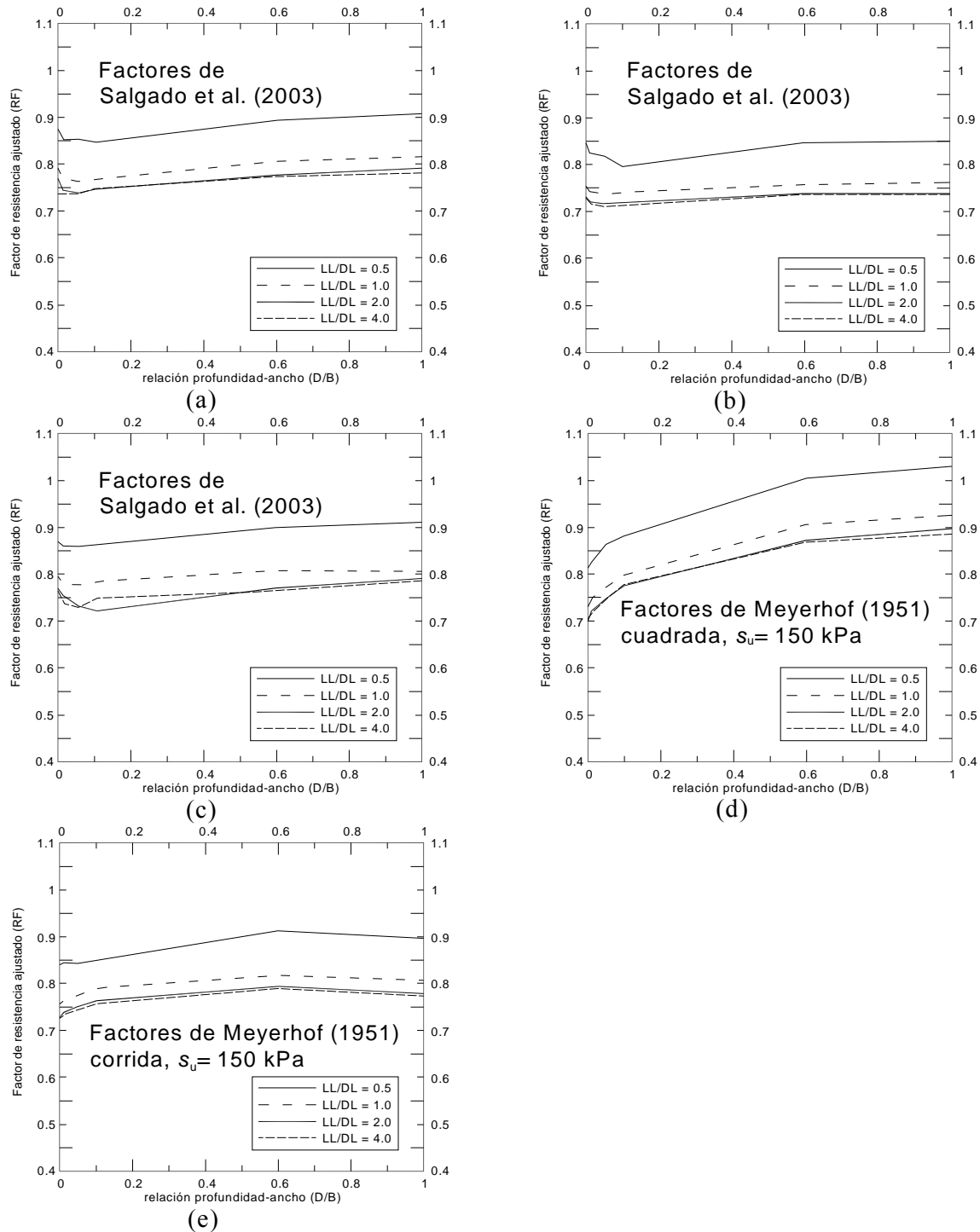


Figura 5.1.4. Factores de resistencia ajustados para zapatas en arcilla usando CPT: Factores de forma y profundidad de Salgado et al. (2003): (a) Zapatas cuadradas, $s_u = 150$ kPa, (b) Zapatas corridas, $s_u = 150$ kPa, (c) Zapatas cuadradas, $s_u = 800$ kPa; Factores de Meyerhof (1951): (d) Zapatas cuadradas, $s_u = 150$ kPa, (e) Zapatas corridas, $s_u = 150$ kPa

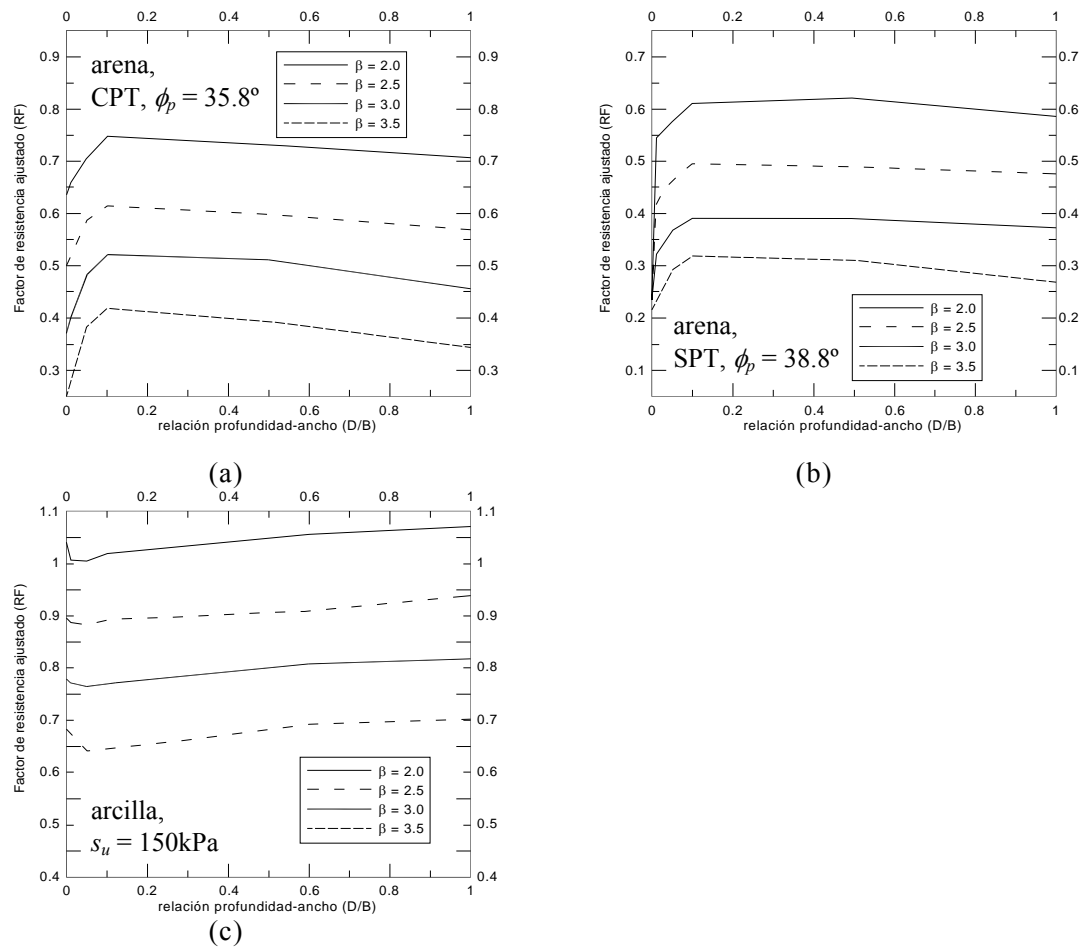


Figura 5.1.5. Factores de resistencia ajustados para una zapata cuadrada, $LL/DL = 1.0$, β variable: (a) arena usando CPT, $\phi_p = 35.8^\circ$, (b) arena usando SPT, $\phi_p = 38.8^\circ$, (c) arcilla usando factores de Salgado et al. (2003), $s_u = 150\text{ kPa}$

5.2 Resistencia característica

Para evaluar el ángulo de fricción de las arenas se utilizan ensayos in situ tales como el CPT o el SPT. Para estimar la resistencia al corte no drenada de las arcillas se puede utilizar el ensayo CPT o bien ensayos en laboratorio. Luego de recolectar los datos correspondientes a la resistencia del suelo, la tarea del ingeniero consiste en seleccionar un valor de resistencia adecuado para el diseño. Este valor de la resistencia se conoce como resistencia característica. A su vez, la resistencia característica se utiliza para determinar la resistencia de diseño en los análisis de capacidad de carga.

Las incertidumbres de las correlaciones de los ensayos son cuantificables. Para poder

usar el LRFD se requiere un enfoque de diseño estadísticamente consistente. En este sentido puede resultar útil determinar la resistencia al corte característica como una media evaluada conservadoramente (CAM¹). El primer paso para determinar la CAM consiste en determinar el valor medio de los datos. Como la resistencia al corte tiende a aumentar con la profundidad debido a las mayores tensiones de confinamiento efectivas, es posible hallar una tendencia media de los datos en función de la profundidad. Una vez determinada la función, ésta se debe reducir para evaluar la media en forma conservadora. Un posible método de reducción es aplicar un criterio de porcentaje de excedencia (Becker 1996), según el cual se determina el valor por encima del cual se encuentran el 80% de los datos.

Valores característicos en arena

Se pueden determinar valores característicos para el ángulo de fricción en arena usando tanto el CPT como el SPT. Por cada CPT realizado primero se identifican las capas de suelo individuales. En este contexto una capa se define como un volumen de suelo que tiene aproximadamente la misma densidad relativa. Para cada suelo de interés los valores de q_c se normalizan usando la siguiente relación de Salgado y Mitchell (2003):

$$\frac{q_c}{p_A} = e^{c_3 D_R} \cdot c_1 \left(\frac{\sigma'_h}{p_A} \right)^{c_2} \quad (5.2.1)$$

donde p_A es una tensión de referencia de 100 kPa, D_R es la densidad relativa, σ'_h es la tensión lateral efectiva y c_1 , c_2 y c_3 son coeficientes relacionados con propiedades intrínsecas de las arenas. La ecuación también se puede describir usando la profundidad en lugar de σ'_h . Usando una regresión de potencias, la ecuación resultante será consistente con (5.2.1), donde q_c es función de la profundidad elevada a una potencia.

A menos que se disponga de una gran cantidad de puntos de datos, la muestra (datos) es relativamente pequeña comparada con el tamaño de la población (todos los valores posibles). Por lo tanto, el procedimiento 6σ modificado (Capítulo 3) es una herramienta estadística que se puede aplicar para determinar la desviación estándar. Tomando la media de la muestra (una línea de regresión con la profundidad) como una representación cercana a la media de la población, la línea correspondiente al 80% de excedencia se puede determinar

¹ CAM = *Conservatively assessed mean*

como un valor 0.84 desviaciones estándares por debajo de la línea de regresión. Este valor se puede determinar operando sobre datos a los cuales se les ha eliminado la tendencia. Cuando hay una gran cantidad de puntos de datos disponibles también es posible realizar una aproximación visual. La Figura 5.2.1 ilustra un ejemplo en el cual la línea que representa la función CAM para un perfil de q_c aproximadamente lineal se puede determinar visualmente de manera tal que el 80% de los puntos de datos se encuentren por encima de dicha recta.

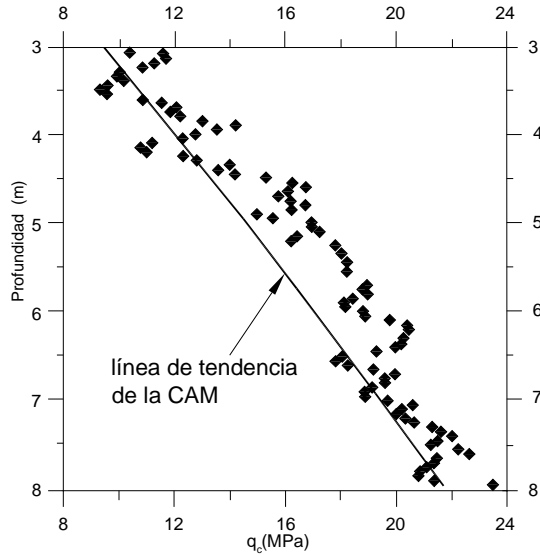


Figura 5.2.1. Aproximación visual de la función CAM para un perfil obtenido mediante CPT – La línea de tendencia se traza de manera que el 80% de los puntos de datos se encuentren a la derecha de la línea.

Ahora debemos evaluar la validez del criterio del 80% de excedencia. Considerando la Ecuación (1.1.1) es necesario que la evaluación de $(RF)R_n$ corresponda a un nivel de confiabilidad consistente independientemente del valor del COV de q_c que exista in situ. Por lo tanto, ya sea RF o R_n deben variar con $COVq_c$ de modo que siempre se logre el índice de confiabilidad objetivo β . En el presente capítulo ya se ha demostrado que para un índice de confiabilidad objetivo y una incertidumbre de q_c dados es posible hallar un RF óptimo. Consecuentemente es necesario que, si R_n ha de ser una función de $COVq_c$,

$$[RF(COV_{q_c})][R_{n,media}] = [RF][R_{n,CAM}(COV_{q_c})] \quad (5.2.2)$$

donde $RF(COV_{q_c})$ es el factor de resistencia óptimo que varía con COV_{q_c} y se multiplica por

una resistencia nominal $R_{n,media}$ determinada usando la tendencia media de q_c en función de la profundidad; y $R_{n,CAM}(COV_{qc})$ es una resistencia nominal R_n que varía en función de COV_{qc} . En el enfoque seguido en el presente informe la variación de R_n en función de COV_{qc} se captura definiendo R_n como una CAM de la resistencia. Esta resistencia nominal luego se multiplica por un valor de RF constante (el valor determinado usando análisis de confiabilidad).

En la práctica, los ingenieros geotécnicos habitualmente determinan valores de R_n representativos. Los valores de RF generalmente se seleccionan de acuerdo con códigos de diseño existentes o con las prácticas establecidas. En el momento de desarrollar un código o para proyectos específicos se suelen utilizar análisis de confiabilidad detallados para determinar valores de RF . Sin embargo, es muy poco habitual utilizar análisis de confiabilidad detallados para proyectos específicos. Por lo tanto, es mucho más razonable establecer un valor de RF para un tipo de diseño que especificar el uso de $RF(COV_{qc})$.

Observar que el código ACI para hormigón armado (ACI 1999) utiliza $R_{n,CAM}(COV)$ en lugar de $RF(COV)$. En este código ACI especifica una excedencia del 95% como criterio para evaluar la resistencia a la compresión del hormigón. Sin embargo, en vista de los valores de COV que aparecen en el diseño geotécnico, este criterio daría por resultado valores físicamente poco realistas si se lo aplicara a q_c . Fue por este motivo que se seleccionó el criterio del 80%.

Para evaluar la capacidad que tiene esta resistencia $R_{n,CAM}$ basada en el criterio del 80% para satisfacer la Ecuación (5.2.2) se determinaron valores de $RF(COV_{qc})$ y RF para una fundación cuadrada en arena y en arcilla para diferentes valores de COV_{qc} . En la Figura 5.2.2 se ilustran los resultados de esta evaluación. Para destacar la influencia relativa del COV de q_c , estas gráficas se presentan utilizando para RF la misma escala relativa utilizada en las Figuras 5.1.1, 5.1.2 y 5.1.4. Observar en la Figura 5.2.2(b) el cambio despreciable de RF en función del COV . Por tanto, en este caso la aplicación de $R_{n,CAM}(COV_{qc})$ es exitosa, ya que se desea un RF constante. La aplicación de este método de la CAM es menos exitosa en el caso de las arenas. Con referencia a la Figura 5.2.2(a), aunque la disminución de RF (que se basa en la CAM de q_c) con el aumento del COV de q_c es menor que la disminución de $RF(COV_{qc})$ (que se basa en la q_c media), esta disminución es aún significativa. Por lo tanto, en el caso de las arenas, el método de la CAM propuesto sólo toma en cuenta parcialmente una mayor

incertidumbre que la supuesta en el desarrollo de los valores de RF propuestos.

Tomando el valor CAM después de normalizar los datos obtenidos de sondeos se toma en cuenta la desviación de los datos respecto de la tendencia media con la profundidad – la variabilidad espacial del suelo en dirección vertical. Para tomar en cuenta la variabilidad lateral del suelo la mejor solución pareciera ser el enfoque tradicional consistente en utilizar el peor sondeo aplicable. Un tratamiento estadístico de la variabilidad del suelo en la dirección lateral es demasiado complicado y en la mayoría de los casos ni siquiera es factible en base a la información disponible.

En resumen, el procedimiento de la media conservadoramente evaluada (CAM) es una herramienta valiosa para seleccionar valores de diseño por dos motivos: primero y más importante, proporciona un método estadísticamente consistente para analizar datos de una capa de suelo en particular, reemplazando la selección arbitraria por un procedimiento consistente; segundo, el procedimiento de la CAM tiende a estabilizar la confiabilidad de las verificaciones de diseño realizadas usando valores particulares de RF . Este método no reemplaza la responsabilidad que tiene el ingeniero de determinar cuáles datos son relevantes para el problema de diseño, sino que suplementa las herramientas disponibles para analizarlos.

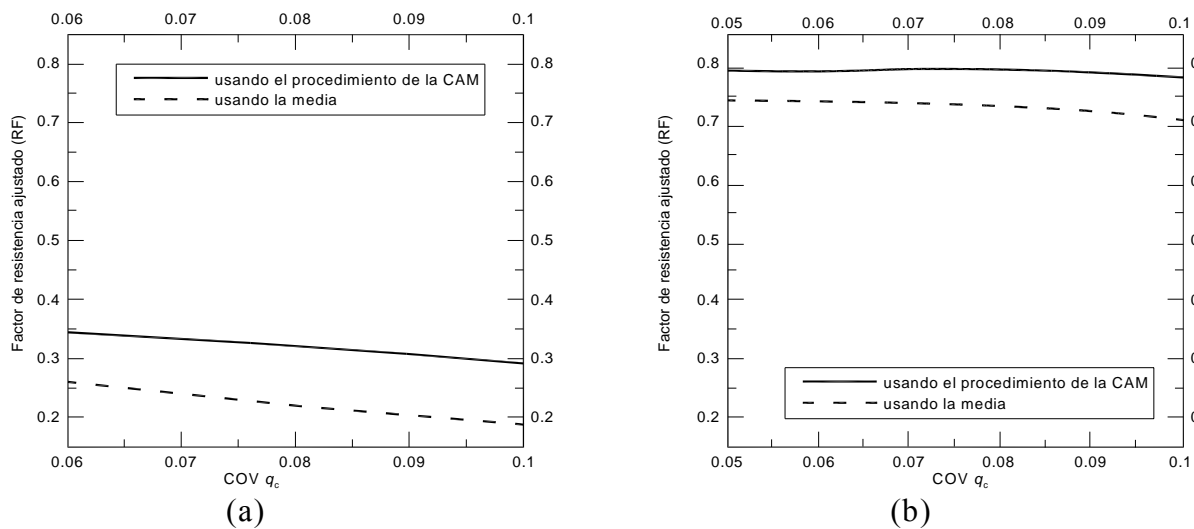


Figura 5.2.2. Factores de resistencia ajustados calculados usando perfiles obtenidos mediante CPT con diferentes variabilidades, con y sin el procedimiento de la CAM, $LL/DL = 1.0$: (a) zapata corrida en arena, $\phi_p = 42.4^\circ$, (b) Zapata cuadrada en arcilla usando factores de Salgado et al. (2003), $s_u = 150$ kPa, $D/B = 0.4$