

CAPÍTULO 10. EJEMPLOS DE DISEÑO PARA FUNDACIONES PROFUNDAS

Diseño usando LRFD

Al igual que el Capítulo 6 para fundaciones superficiales, el presente capítulo explica cómo utilizar los factores de resistencia hallados en los capítulos anteriores y aplicarlos al diseño de fundaciones. Se consideran dos ejemplos de diseño. En el primero diseñamos un pilote en un perfil de suelo fundamentalmente compuesto por arena medianamente densa. El segundo ejemplo muestra cómo seleccionar un factor de resistencia (RF) para utilizar con un método de diseño directo no incluido en este informe.

En ambos ejemplos se ilustra el procedimiento básico del diseño por factores de carga y resistencia (LRFD) de acuerdo con el diagrama de flujo ilustrado en la Figura 10.1.

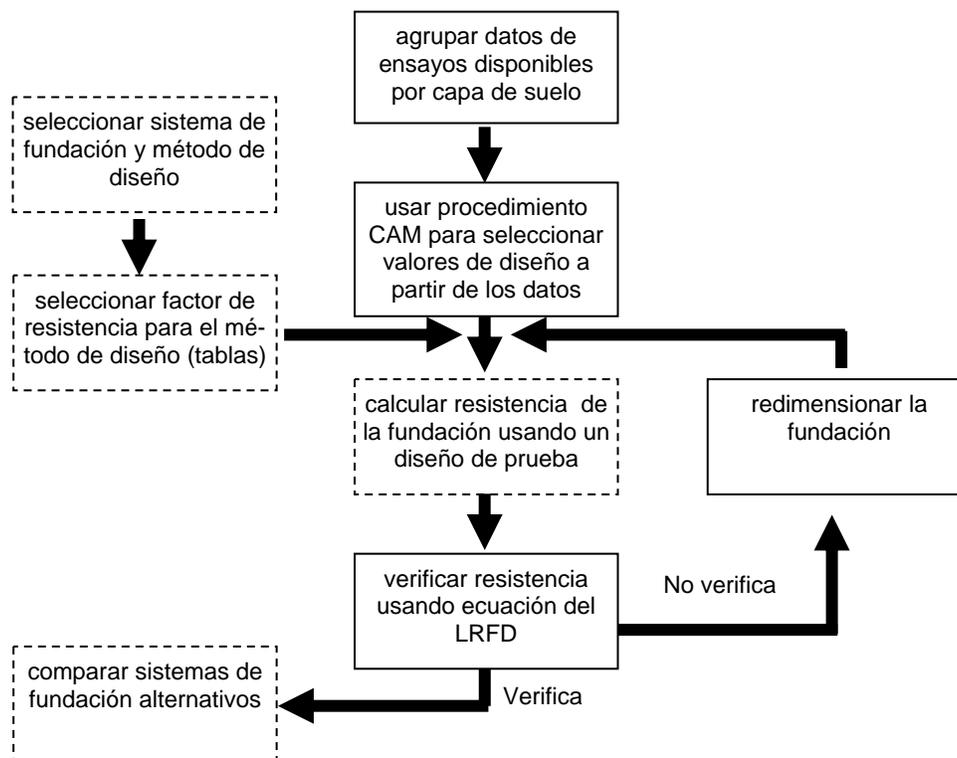


Figura 10.1. Diagrama de flujo del LRFD para verificaciones de estados límites últimos en el diseño de fundaciones. Las líneas de trazos indican pasos específicos de un método de diseño particular; las líneas llenas indican pasos comunes para todos los tipos de fundaciones.

Como se puede ver en la figura anterior, el primer paso en el diseño de un elemento de fundación consiste en agrupar los datos de ensayos relevantes de acuerdo con la capa de suelo a la cual corresponden a fin de considerarlos en el método CAM. Datos de ensayos relevantes se refiere a cualquier dato obtenido de ensayos realizados en el mismo suelo al cual el elemento de fundación transmitirá carga. Al agrupar las mediciones según el tipo de suelo podemos aprovechar la ventaja de tener varios ensayos, lo que nos permitirá conocer mejor el suelo. Luego se utiliza el procedimiento CAM¹ para hallar los valores de 80% de excedencia de los datos de ensayo como se ilustra tanto en los ejemplos a continuación como en el Capítulo 6. Con estos valores CAM de las mediciones obtenidas mediante ensayos el diseñador puede proceder a calcular las resistencias en base a un diseño de prueba de las fundaciones. En este punto es necesario seleccionar el valor correcto del factor de resistencia correspondiente al método de diseño empleado para calcular la resistencia. Esta dependencia se representa en la Figura 10.1 usando recuadros de líneas de trazos. Una vez hallado un valor de la resistencia para un diseño particular se puede verificar si éste es adecuado usando la ecuación básica del LRFD. Una resistencia de diseño minorada mayor que las cargas mayoradas representa un diseño que verifica, mientras que una resistencia minorada menor que las cargas de diseño no verifica. Trabajando con varios diseños de prueba es posible comparar diferentes alternativas de diseño. En los siguientes ejemplos se ilustra el proceso para seleccionar un valor CAM, seleccionar un factor de resistencia y realizar una verificación de acuerdo con el LRFD.

Diseño de pilotes de punta abierta hincados en arena usando un método de diseño directo

Se realizaron una serie de sondeos in situ mediante CPT; el perfil de resistencias de punta medidas (q_c) se ilustra en la Figura 10.2. Se diseñará un pilote con una sobrecarga viva de 150 kN (34 kip) y una carga permanente de 350 kN (79 kip) contra estados límites últimos. La cota del cabezal del pilote estará ubicada a una profundidad de 2.0 m (6.6 ft). Se hincará un pilote de punta abierta hasta una profundidad de 9 m (29.5 ft) en el predio de arena para aprovechar la capa de arena relativamente densa que yace sobre la arena más suelta por debajo de los 10m de profundidad. Usando para la sobrecarga viva y la carga permanente factores de carga de 1.6 y 1.2 (factores especificados por ASCE-7), respectivamente, la carga de diseño es

¹ CAM: Media evaluada conservadoramente (*Conservatively Assessed Mean*)

de 660 kN (148 kip). La napa freática es profunda.

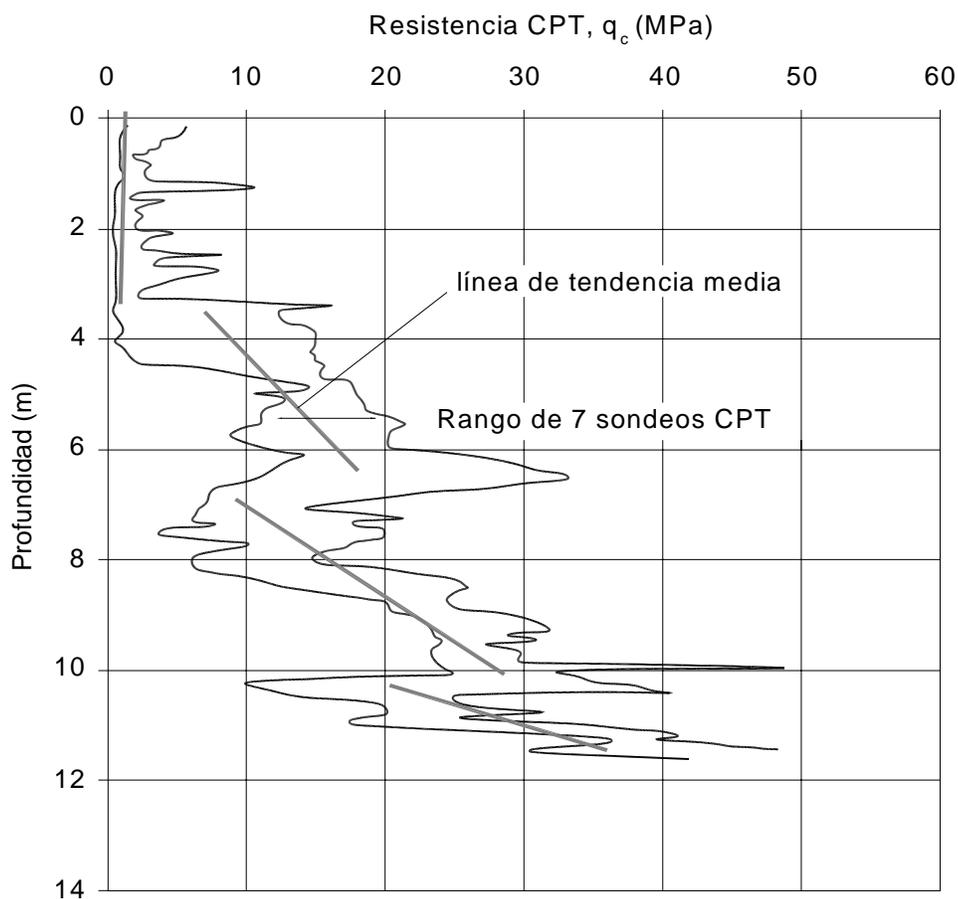


Figura 10.2 – Resultados de 7 registros de ensayos CPT en arena con indicación de líneas de tendencia (“mejor ajuste”) y líneas de rango (Comité BCP 1971)

El primer paso para diseñar la fundación consiste en establecer la línea de tendencia CAM para la combinación de los registros de ensayos CPT. Se ilustra un método CAM que utiliza un criterio del 80% de excedencia utilizando regresión lineal, una herramienta que los diseñadores pueden conseguir fácilmente en forma de aplicaciones de hoja de cálculo. Estas líneas representan la función media de un parámetro del suelo en función de la profundidad. También se pueden trazar líneas que limiten los puntos de datos de q_c , representando así la totalidad del rango de q_c para dichas profundidades. La Figura 10.2 incluye estos dos tipos de líneas. La Tabla 10.1 presenta los parámetros estadísticos usados para hallar la línea CAM correspondiente al criterio de 80% de excedencia usando el procedimiento 6σ para arena, con

lo cual las líneas medias se desplazan hacia la izquierda de la gráfica. Para las capas de arena del presente ejemplo las líneas CAM están dadas por la siguiente ecuación:

$$q_{c,CAM} = \begin{cases} 0.7(\text{MPa}) & 0 < z < 3.5\text{m} \\ 4(\text{MPa/m}) \cdot z - 8.9(\text{MPa}) & 3.5\text{m} < z < 6.5\text{m} \\ 6(\text{MPa/m}) \cdot z - 35.1(\text{MPa}) & 6.50 < z < 10\text{m} \\ 13(\text{MPa/m}) \cdot z - 115.5(\text{MPa}) & 10 < z < 11.5\text{m} \end{cases} \quad (10.1)$$

donde z es la profundidad.

Tabla 10.1. Parámetros estadísticos correspondientes a q_c (CPT) para hallar la línea CAM en las capas de arena de la Figura 10.2

Capa de arena	$0 < z < 3.5\text{m}$	$3.5\text{m} < z < 6.5\text{m}$	$6.5\text{m} < z < 10\text{m}$	$10\text{m} < z < 11.5\text{m}$
Rango (MPa) (R)	9	14	15	18
Una desviación estándar (MPa) ($\sigma = R / 6$)	1.5	2.3	2.5	3.0
Número de desviaciones estándares para 80% de excedencia	0.84	0.84	0.84	0.84
Valor a restar de la línea de tendencia media para obtener la línea CAM (MPa)	1.3	1.9	2.1	2.5

Para este ejemplo se utiliza el método de diseño directo derivado de los trabajos de Paik y Salgado (2003) y Lee et al. (2003). Primero se diseñará la resistencia friccional. Como sección de prueba para el pilote se elige un tubo de 305mm (12 in.) de diámetro. La superficie del fuste por unidad de longitud del pilote a_s es de $0.958\text{m}^2/\text{m}$ ($3.14\text{ft}^2/\text{ft}$). De acuerdo con este método de diseño la resistencia friccional R_s se calcula como

$$R_s = \int_L f_s a_s dL \quad (10.2a)$$

$$f_s = \left(\frac{f_s}{q_c} \right) q_c = 0.002 q_c \quad (10.2b)$$

A los fines del diseño rescribimos la Ecuación (10.2a) de la siguiente manera:

$$R_s = \sum f_{s,i} a_{s,i} dL_i \quad (10.3)$$

donde el subíndice i indica una sección de cierta longitud a lo largo del pilote. Al suponer que todas las secciones contribuyen a la resistencia podemos calcular la capacidad friccional total del pilote. En este ejemplo será necesario considerar varias secciones para lograr un diseño preciso en cada capa de arena. A los fines del ejemplo, consideramos una sección en la primera capa y tres secciones en la segunda y tercera. La Tabla 10.2 resume el análisis de la resistencia friccional.

Tabla 10.2 – Resumen del diseño de prueba para resistencia friccional en arena

sección no. #	profundidad inicial (m)	profundidad final (m)	profundidad media (m)	dL (m)	$q_{c,CAM}$ (MPa)*	f_s (kPa)	$f_s a_s dL$ (kN)
1	2	3.5	2.75	1.5	0.7	1.4	2.0
2	3.5	4	3.75	0.5	6.1	12.2	5.8
3	4	5	4.5	1	9.1	18.2	17.4
4	5	6	5.5	1	13.1	26.2	25.1
5	6	7	6.5	1	3.9	7.8	7.5
6	7	8	7.5	1	9.9	19.8	19.0
7	8	9	8.5	1	15.9	31.8	30.5

* $q_{c,CAM}$ calculada a la mitad de la profundidad usando la Ecuación (10.1)

La capacidad friccional total no minorada se calcula sumando la columna “ $f_s a_s dL$ ” de la Tabla 10.2, con lo cual se obtiene un valor de 107 kN (24 kip).

De acuerdo con este método de diseño, la resistencia de punta R_b está dada por las siguientes ecuaciones:

$$R_b = q_{b,10\%} A_b \quad (10.4a)$$

$$q_{b,10\%} = \left(\frac{q_{b,10\%}}{q_c} \right) q_c \quad (10.4b)$$

$$\frac{q_b}{q_c} = -0.00443 IFR(\%) + 0.557 \quad (10.4c)$$

Para estimar $q_{b,10\%}$ primero es necesario estimar $IFR(\%)$. La Figura 10.3 es una gráfica tomada de Lee et al. (2003) que se puede utilizar para estimar IFR antes de comenzar el hincado.

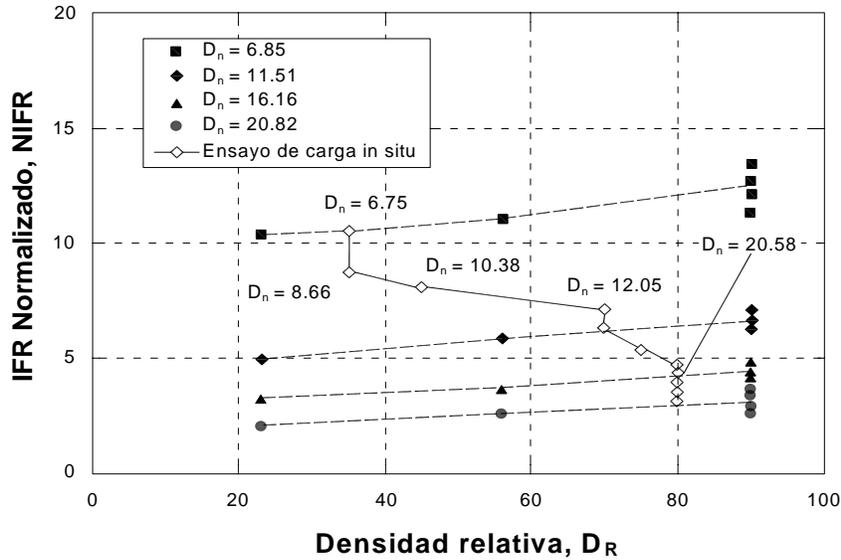


Figura 10.3 – Gráfica de *IFR* normalizado de acuerdo con Lee et al. (2003), usada para estimar *IFR*.

El IFR normalizado (NIFR) es

$$NIFR = \frac{IFR}{D_n} \tag{10.5}$$

donde D_n es

$$D_n = \frac{z_d}{d_i} \tag{10.6}$$

donde z_d es la profundidad de hincado y d_i es el diámetro interior del pilote. Para este caso, con $z_d = 9$ m (29.5 ft) y $d_i \approx 0.305$ m (1 ft), la Ecuación (10.6) da por resultado una D_n igual a 30. La Figura 10.3 indica un NIFR aproximadamente igual a 2% si suponemos D_R igual a 65% para la arena medianamente densa. Usando la Ecuación (10.5) $IFR(\%)$ se calcula como 59%. Por lo tanto, de la Ecuación (10.4c), $(q_{b,10\%}/q_c)$ se estima como 0.30. En base a la línea de tendencia CAM (10.1), un valor promedio de q_c conservador en la región de suelo próxima a la base del pilote es 18.9 MPa (395 ksf). Usando la Ecuación (10.4b) obtenemos un valor de 5580 kPa (117 ksf) para $q_{b,10\%}$.

El área de la base del pilote se calcula como

$$A_b = \pi \left(\frac{d_o}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{0.305\text{m}}{2} \right)^2 = 0.073\text{m}^2 \quad (10.7)$$

Finalmente, de la Ecuación (10.4a) obtenemos un valor de 407 kN (91.5 kip) para la resistencia de punta no minorada. De la Tabla 8.2.1, los factores de resistencia RF_s y RF_b para utilizar con los factores de carga de ASCE-7 son 0.37 y 0.66, respectivamente. Usando las ecuaciones del LRFD para pilotes,

$$(RF)_s R_s + (RF)_b R_b \geq \sum (LF)_i Q_i \quad (10.8)$$

la resistencia total, minorada, es 309 kN (69.5 kip), valor mucho menor que la carga mayorada de 660kN (148 kip). Esto significa que este diseño no es seguro. Usando cargas no mayoradas y resistencias no minoradas, para este diseño se calcula un factor de seguridad equivalente igual a 1.0.

Para la siguiente iteración, suponiendo que deseamos conservar la base del pilote a la misma cota, elegimos un pilote de 457mm (18 in.) de diámetro. Los cálculos correspondientes a la resistencia friccional son prácticamente iguales a excepción del valor de a_s . El valor calculado de la resistencia friccional no minorada es igual a 161 kN (36.2 kip). Para la resistencia de punta observar que como hemos variado el diámetro del pilote también cambiarán D_n e IFR . De la Ecuación (10.5) calculamos D_n y obtenemos un valor aproximadamente igual a 20. De la Figura 10.3 obtenemos un nuevo NIFR igual a 3%. De la Ecuación (10.5) se obtiene un IFR(%) de 59%, resultando en un $q_{b,10\%}$ y una resistencia de punta no minorada iguales a 5580 kPa (117 ksf) y 917 kN (206 kip), respectivamente. La capacidad total, minorada, calculada usando la Ecuación (10.8) es igual a 664 kN (149 kip), valor que representa un diseño aceptable. Para este diseño, en base a las cargas no mayoradas y las resistencias no minoradas, un factor de seguridad equivalente es igual a 2.2. Observar que este factor de seguridad sólo se aplica para este método de diseño y combinación de cargas y resistencias particulares.

Determinación de un RF para utilizar en el diseño de pilotes mediante métodos de diseño directos

En el Capítulo 9 presentamos el método de Aoki y de Alencar Velloso (1975) como un método de diseño directo general. Utilizaremos este ejemplo de diseño para demostrar cómo

se pueden emplear otros métodos directos para desarrollar factores de resistencia en base a los datos de ensayos de carga disponibles. Es importante observar que la base de datos de ensayos de carga utilizada para estos métodos de diseño debería contener numerosos casos de condiciones de suelo y tipos de pilotes similares. Esto es necesario para asegurar la aplicabilidad del método de diseño y su incertidumbre.

Para este diseño elegimos el método de Bustamante y Gianceselli (1982), ya que asumimos que nuestra empresa hipotética (la que está realizando estos cálculos) cuenta con datos de ensayos de carga que respaldan el uso de dicho método para tipos de suelos y pilotes similares. La Tabla 10.3 corresponde a la base de datos de ensayos de carga en poder de nuestra empresa hipotética.

En este ejemplo también deberemos determinar qué valores del factor de resistencia utilizar en el diseño. Observar de la discusión en los Capítulos 7, 8 y 9 que cuando se dispone de este tipo de datos de ensayos de carga (capacidad total medida vs. capacidad total pronosticada) se debe utilizar la siguiente ecuación del LRFD:

$$(RF)(R_s + R_b) \geq \sum (LF)_i Q_i \quad (10.9)$$

donde $(R_s + R_b)$ es la capacidad de carga total del pilote. Por lo tanto, debemos hallar un único valor de RF que se aplicará a la capacidad total del pilote. Debido a que en el ejemplo estamos utilizando los factores de carga de ASCE-7, para estimar RF debemos usar la Figura 10.3. Para utilizar esta figura necesitamos ingresar con un valor COV y el índice de confiabilidad β . En este ejemplo usaremos un índice de confiabilidad igual a 3.0, el valor convencional utilizado en el diseño estructural. El COV se debe determinar a partir de la base de datos de ensayos de carga de la Tabla 10.3. El primer paso consiste en calcular el “error” para cada ensayo de carga de la siguiente manera. La capacidad pronosticada se calcula usando el método de Bustamante y Gianceselli (1982). Observar que consideramos que la capacidad pronosticada es la media de los datos, ya que necesitamos evaluar la desviación de los valores reales respecto de este valor pronosticado. Para calcular el COV de $(R_s + R_b)$ aplicamos las Ecuaciones (3.2.1) y (3.2.2) a la columna (4) de la Tabla 10.3. El COV resultante es igual a 0.23. El paso final para evaluar un RF para este diseño consiste en ingresar a la Figura 10.4 con un COV de 0.23 y un β de 3.0. El RF resultante es 0.55.

Tabla 10.3 – Base de datos de ensayos de carga hipotéticos: La columna (1) es el número de ensayos de carga, la columna (2) es la capacidad de carga total (resistencia) del pilote pronosticada usando el método de Bustamante y Gianceselli (1982) para el pilote ensayado, la columna (3) es la capacidad de carga total del pilote medida mediante el ensayo de carga, y la columna (4) es la diferencia normalizada (“error”) entre la capacidad medida y la capacidad pronosticada. Los datos indican un *COV* de 0.23 para la capacidad de carga total.

(1) ensayo de carga	(2) cap. pronosticada (kN)	(3) cap. medida (kN)	(4) (cap. medida - cap. pronosticada) / cap. pronosticada
1	1142	1025	-0.102
2	956	1174	0.228
3	1378	1543	0.119
4	917	931	0.015
5	957	981	0.024
6	1014	1501	0.480
7	988	767	-0.223
8	864	1123	0.299
9	1095	1013	-0.075
10	1020	895	-0.123
11	924	740	-0.199
12	1341	1301	-0.030
13	863	840	-0.026
14	1374	1254	-0.087
15	1340	2074	0.547
16	1126	965	-0.143
17	1112	778	-0.300
18	1144	1338	0.170
19	1110	788	-0.290
20	1065	828	-0.222
21	902	823	-0.088
22	851	1005	0.181
23	880	589	-0.330
24	900	1273	0.415
25	1103	1856	0.683
26	1267	1250	-0.013
27	976	907	-0.071
28	917	1278	0.393
29	903	945	0.047
30	1012	1212	0.198
31	950	986	0.038
32	1252	1188	-0.051
33	867	1087	0.254
34	821	897	0.093
35	1291	1429	0.106

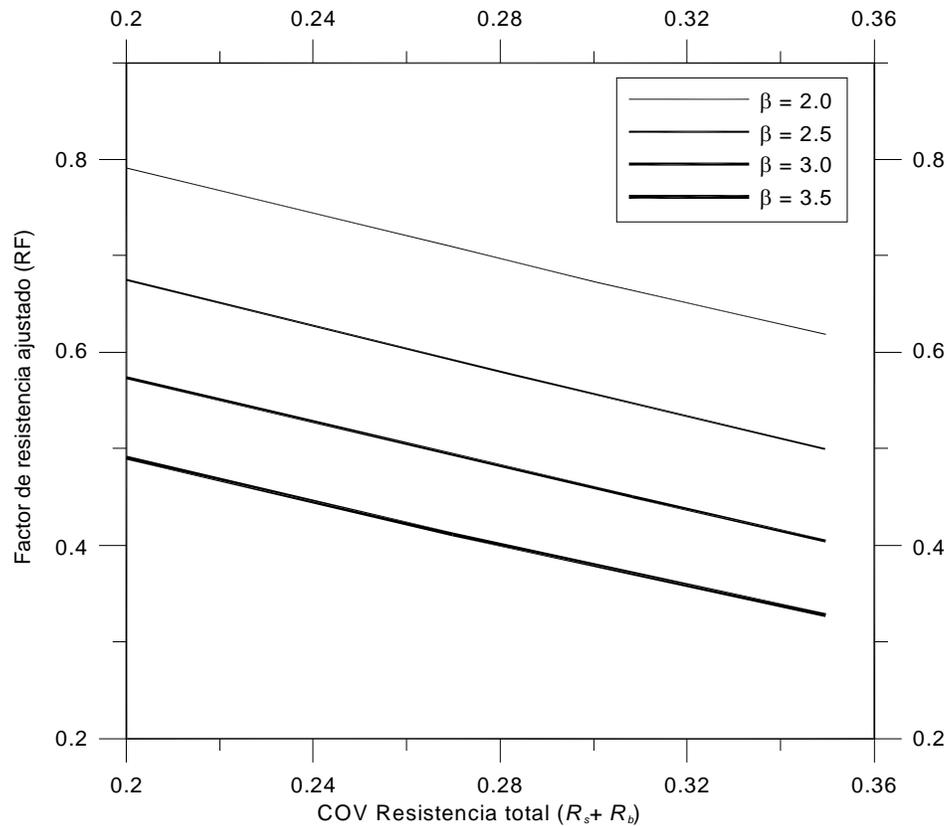


Figura 10.4 – Gráfica del factor de resistencia ajustado (RF) en función del COV de la resistencia total y el índice de confiabilidad objetivo β , a aplicar a la capacidad de carga total en el diseño de pilotes usando los factores de carga de ASCE-7. Se asume un factor de sesgo de 1.06 para una resistencia total con distribución log-normal, lo que implica que la resistencia se evalúa en forma conservadora de acuerdo con el procedimiento CAM.

Luego el RF hallado en este ejemplo se aplicaría junto con el método de Bustamante y Ganeselli (1982) para realizar verificaciones de diseño usando la Ecuación (10.9). El trabajo de Bandini y Salgado (1998) contiene resúmenes de diferentes métodos directos para diseño de pilotes, incluyendo el método de Bustamante y Ganeselli (1982).

Conclusiones

Del primer ejemplo de diseño observamos que los métodos de diseño de pilotes se pueden aplicar prácticamente del mismo modo que en el diseño por tensiones de trabajo, salvo que se aplican factores de resistencia en lugar de factores de seguridad, y se utilizan cargas mayoradas en lugar de cargas no mayoradas. En el ejemplo correspondiente a un pilote en arena, se demostró un método de diseño directo para pilotes de punta abierta que aprovecha los resultados de investigaciones recientemente realizadas por Paik and Salgado (2003) y Lee y Salgado (2003). En el segundo ejemplo se demostró una técnica que le permite al diseñador estimar factores de resistencia para utilizar en el diseño en base a datos de ensayos de carga realizados en suelos similares y el mismo tipo de pilote. De este modo es posible tratar específicamente la incertidumbre que probablemente se encontrará para un diseño particular. Esta técnica debería permitir ampliar el uso del LRFD a otros métodos de diseño diferentes a los mencionados en el presente informe.