

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE LAS VARIABLES PARA EL CASO DE LAS FUNDACIONES SUPERFICIALES

4.1 Evaluación de la incertidumbre en la capacidad de carga de las zapatas en arena

En esta sección se demuestran los pasos 1-6 del marco racional para evaluar factores de resistencia discutidos en el Capítulo 3 para el caso de fundaciones superficiales en arena.

Paso 1. Identificar la ecuación correspondiente al estado límite

Se considera la ecuación para arena en condición totalmente drenada. Para zapatas rectangulares en arena la ecuación de estado límite correspondiente a capacidad de carga es

$$\frac{DL + LL}{B \cdot L} - \left(\gamma \cdot D \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q + \frac{1}{2} \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \right) = 0 \quad (4.1.1)$$

donde DL es la carga permanente, LL es la sobrecarga viva, B y L son las dimensiones de la zapata en planta, γ es el peso unitario de diseño del suelo, D es la profundidad de la base de la zapata, N_q y N_γ son factores de capacidad de carga, y s_q , s_γ y d_q son factores de corrección que dependen de la geometría de la zapata y de su profundidad de empotramiento. La Ecuación (4.1.1) representa una verificación de diseño contra la posibilidad de que la fundación experimente una clásica falla por capacidad de carga. Un análisis de confiabilidad relevante para esta verificación de diseño debe considerar la probabilidad de que la capacidad de carga evaluada resulte menor que la requerida para soportar la carga aplicada sobre la fundación.

Paso 2. Identificar las variables que componen la ecuación

De las variables que aparecen en la Ecuación (4.1.1) podemos decir que B , L y D son seleccionadas por el diseñador, DL y LL se obtienen como resultado del diseño de la superestructura, γ se estima o se determina en base a mediciones, y los factores N_q , N_γ , s_q , s_γ y d_q se determinan usando transformaciones a partir del ángulo de fricción ϕ_P y las dimensiones B , L y D . El ángulo de fricción ϕ_P se puede calcular de acuerdo con Bolton (1986):

$$\phi_p = \phi_c + \xi \left[\frac{D_R}{100} \cdot \left(Q - \ln \left(\frac{1 + \sin \phi_p}{1 - \sin \phi_p} + 2 \right) \cdot \sigma'_h \right) \right] - R_Q \quad (4.1.2)$$

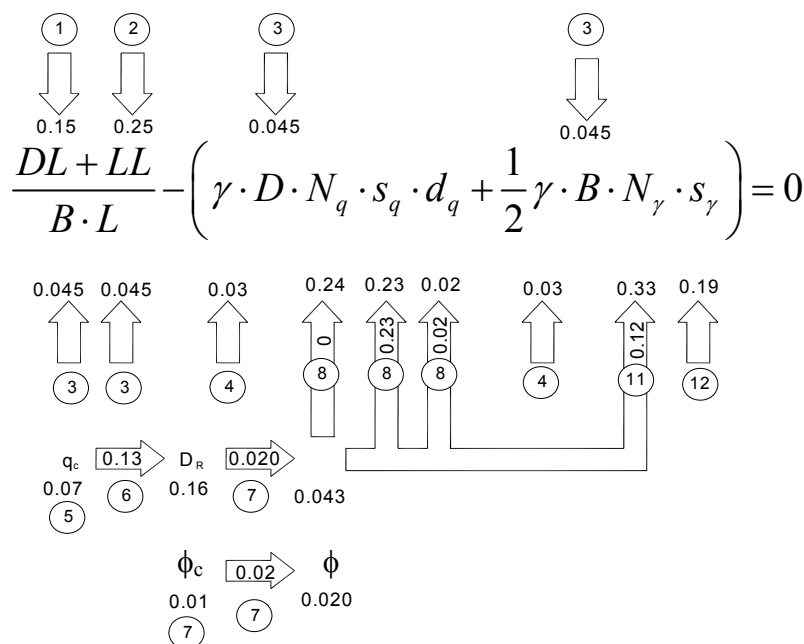
donde Q y R_Q son constantes (típicamente 10 y 1) y ϕ_c es el ángulo de fricción en estado crítico, una propiedad intrínseca de las arenas. En la Ecuación (4.1.2) el coeficiente ξ es igual a 5 para deformación en el plano e igual 3 para condiciones de compresión triaxial. La tensión efectiva horizontal σ'_h es un valor representativo estimado por el diseñador para una profundidad aproximadamente igual a $0.5B$ por debajo de la base de la zapata. La densidad relativa D_R se puede determinar usando correlaciones con ensayos CPT o SPT.

Paso 3. Identificar los ensayos geotécnicos asociados con cada variable

Se identificaron dos ensayos geotécnicos, el CPT y el SPT. Debido a las transformaciones identificadas en el Paso 2, las incertidumbres en la resistencia de punta q_c obtenida mediante CPT y el número de golpes N obtenido mediante SPT afectan la incertidumbre de los factores N_q , N_γ , s_q , s_γ y d_q en la Ecuación (4.1.1). En la Figura 4.1.1 se ilustra la influencia de q_c .

La Figura 4.1.1 es una representación esquemática de las variabilidades de la Ecuación (4.1.1), incluyendo los COV^* de cada variable. En la Figura 4.1.1 debajo de cada variable aparece un número. Este número representa el COV asociado con dicha variable. A las variables que son de entrada (no calculadas) se le ha asignado un número de referencia (número dentro de un círculo). En la Figura 4.1.1 una flecha entre dos variables representa una transformación. El número dentro de la flecha representa el COV de dicha transformación en particular, calculada con respecto a su resultado. El COV de una variable transformada (resultado) refleja tanto el COV de la variable original como el de la transformación. Por lo tanto, pasando secuencialmente de transformación en transformación, los COV presentados son valores compuestos que consideran las variabilidades introducidas por las variables originales y por las transformaciones que los preceden en la secuencia. En las siguientes subsecciones se detalla cómo se determinaron estos COV .

* COV : Coeficiente de variación



No.	Fuente	Uso de la Fuente
1	Nowak (1994) y Ellingwood (1999)	COV informado – carga permanente
2	Ellingwood (1999)	COV informado – sobrecarga viva
3	ACI (1990)	Tolerancias estándares – variabilidad de las dimensiones de la zapata
4	Hammitt (1966)	COV informado – peso unitario
5	Withiam et al. (1998), Univ. Purdue	COV informado y registros de ensayos CPT – variabilidad de q_c
6	Salgado y Mitchell (2003)	Datos sobre predicciones de q_c a partir de D_r – variabilidad de D_r
7	Bolton (1986)	Ecuación para calcular ϕ_p a partir de D_r
8	Reissner (1924)	Relación determinística para N_q
9	DeBeer (1970)	Datos sobre capacidad de carga – variabilidad de s_q
10	Bandini (2003)	Resultados del análisis de límites – variabilidad de d_q
11	Sloan y Yu (1994)	Resultados del análisis de límites – variabilidad de N_γ
12	DeBeer (1970)	Datos sobre capacidad de carga – variabilidad de s_γ

Figura 4.1.1 Fuentes de incertidumbre y sus coeficientes de variación (COV) para capacidad de carga en arena. Los números debajo de los símbolos que representan una variable corresponden a los COV de las variables. Los números dentro de las flechas representan los COV de las transformaciones (en términos del resultado). Los números dentro de un círculo indican referencias.

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

Para algunas variables la incertidumbre es muy pequeña, y la contribución de su incertidumbre a la variabilidad global de la capacidad de carga es despreciable en comparación con la de otras variables. Para estas variables, es decir para el peso unitario γ y

las dimensiones B , L y D de la zapata, se utilizaron valores de COV tomados de la literatura existente. En la Tabla 4.1.1 se informan los COV y tipos de distribución para dichas variables.

Tabla 4.1.1. Coeficientes de variación (COV), factores de sesgo y tipos de distribución para utilizar en un análisis probabilístico de la capacidad de carga sobre arena y arcilla

Variable	COV	Sesgo	Tipo distrib.
DL	0.15	1.05	normal
LL	0.25	1.15	lognormal
γ	0.03	1	normal
D_f	0.045	1	normal
B	0.045	1.05	normal
L	0.045	1.05	normal

La variabilidad del peso unitario fue analizada por Hammitt (1966) usando los resultados obtenidos por casi 100 laboratorios diferentes. El COV para el peso unitario se informó igual a 0.03. Aplicando el procedimiento de las seis desviaciones estándares (6σ) se ve que este valor se puede considerar razonable. Supongamos, por ejemplo, que para el peso unitario se estima un valor comprendido entre 15 y 22 kN/m³, un intervalo que casi con certeza contiene la totalidad de los valores de los pesos unitarios correspondientes a los suelos que van de arcilla a arena. Supongamos además que esta estimación del peso unitario sigue una distribución normal donde la media representa el valor real del peso unitario. Aplicando el procedimiento 6σ usando las Ecuaciones (3.2.3) y (3.2.4), el COV de γ se calcula como

$$COV = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{rango}{6\mu} = \frac{(22-15)\text{ kN/m}^3}{6 \times 18.5 \text{ kN/m}^3} = 0.06 \quad (4.1.3)$$

Es probable que incluso una medición sencilla sea más precisa que tal suposición, lo que valida el uso de un COV igual a 0.03.

La norma ACI 117 (ACI 1990) establece que la tolerancia para las dimensiones en planta (B , L) de una zapata no encofrada cuyo ancho está comprendido entre 2 ft. y 6 ft. es de $-1/2$ in. a $+6$ in. Se desea obtener una estimación conservadora del COV para las dimensiones de la zapata. En consecuencia, de acuerdo con la Ecuación (3.2.4), para μ se debería utilizar el menor valor aplicable (en este caso 2 ft.). Aplicando el procedimiento 6σ y usando 2 ft. como media, el COV para las dimensiones de la zapatas es 0.045. Este valor también se aplica

conservadoramente para zapatas encofradas, ya que la pequeña incertidumbre de B y L tiene un efecto mínimo sobre el análisis de confiabilidad.

Para una tolerancia de esta naturaleza especificada por ACI – donde el límite superior está mucho más alejado del valor de diseño que el límite inferior – es razonable asumir que los constructores van a tender a errar por exceso respecto de los valores de diseño. Para tomar en cuenta esta tendencia se puede aplicar un factor de sesgo [Ecuación (3.2.13)]. De acuerdo con la Ecuación (3.2.13), las dimensiones de las zapatas que una vez construidas son, en promedio, mayores que las dimensiones de diseño (dimensiones nominales) tendrán un factor de sesgo mayor que 1, como en el caso ilustrado en la Figura 4.1.2. Usando la norma ACI 117, 2.05 es una estimación conservadora del factor de sesgo para las dimensiones de las zapatas es. En la Tabla 4.1.1 también se presentan los factores de sesgo para B y L junto con sus COV .

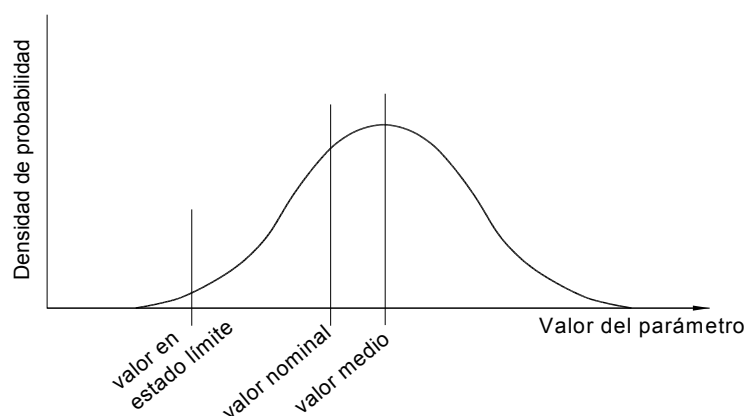


Figura 4.1.2. Valores medio, nominal y en estado límite de un parámetro de diseño distribuido normalmente. Aquí el valor en estado límite corresponde al valor para el cual se alcanza un estado límite tal como la falla por capacidad de carga. El valor medio es la media de la distribución considerada. El valor nominal es el valor del parámetro usado en el diseño. El valor medio se puede calcular multiplicando (valor nominal) * (factor de sesgo).

La variabilidad de la sobrecarga viva LL y la carga permanente DL tiene un importante impacto sobre la incertidumbre final de la capacidad de carga. Esto fue analizado exhaustivamente en el Capítulo 2. Para carga permanente Nowak (1994) y Ellingwood (1999) informan un COV y un factor de sesgo iguales a 0.15 y 1.05, respectivamente. Para sobrecarga viva Ellingwood (1999) informa un COV y un factor de sesgo iguales a 0.25 y

1.15, respectivamente. Estos COV y factores de sesgo son los que aparecen en la Tabla 4.1.1.

Como demostraremos luego en el Paso 5, la incertidumbre de los factores N_q , N_γ , s_q y d_q se determinará a partir de las incertidumbres de las mediciones de q_c o N y de las transformaciones de q_c a D_R , de D_R a ϕ_p y de ϕ_p a los factores de capacidad de carga. En la Figura 4.1.1 las flechas indican esta progresión. En consecuencia, en el Paso 4 es necesario hallar la incertidumbre de q_c y de cada una de estas transformaciones.

En primer lugar se presenta la evaluación de la incertidumbre de q_c . La estimación de las propiedades del suelo a partir de datos de ensayos in situ involucra incertidumbres introducidas por la variabilidad inherente del suelo, la incertidumbre de las mediciones, y la incertidumbre del modelo de transformación utilizado (Phoon y Kulhawy 1999). La resistencia de punta q_c hereda incertidumbre de la variabilidad de las propias mediciones del CPT, así como de la variabilidad del perfil del suelo. La variabilidad de los equipos de ensayo es difícil de determinar, ya que el ensayo tiene poco margen para error humano o aleatorio (Kulhawy y Trautmann 1996). Sin embargo, la variabilidad de la medición global es fácilmente observable a través del análisis de registros de ensayos CPT. El valor del coeficiente de variación de q_c presentado por Withiam et. al. (1997) es igual a 0.07. Es dable esperar que los valores sean ligeramente mayores para arenas más gruesas y ligeramente menores para arenas más finas; sin embargo, la presente investigación, considerando perfiles (gráficas) de resistencia de punta contra profundidad correspondientes a diferentes ensayos CPT en arena, confirmó que 0.07 es un valor razonable. En la Figura 4.1.3 se presenta uno de estos perfiles correspondiente a una capa de arena relativamente uniforme (mismo D_R). Sobre los datos se realizó una regresión de potencias de acuerdo con la relación propuesta por Salgado y Mitchell (2003), según la cual q_c varía como una función de potencias de la tensión efectiva horizontal. Esta función de potencias describe la línea media de la Figura 4.1.3. Los límites ilustrados en la Figura 4.1.3, los cuales también varían en función de la profundidad, se ajustaron a los puntos de datos reales respecto de la línea media. Usando el procedimiento 6σ el COV se puede calcular usando las ecuaciones (3.2.3) y (3.2.4) tal como describimos anteriormente.

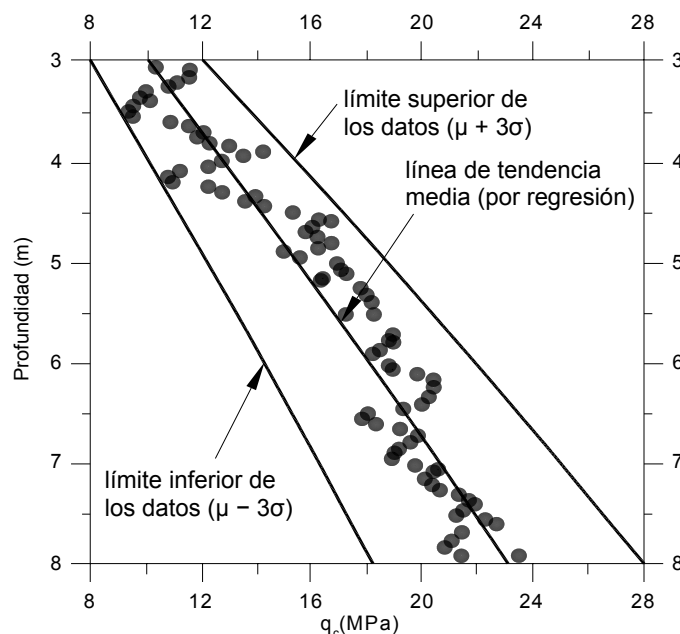


Figura 4.1.3. Línea de tendencia media (regresión de potencias) y límites para resistencia de punta en arena obtenidas mediante ensayos CPT. La media y los límites se pueden utilizar para calcular el COV para q_c usando el procedimiento 6σ .

El ensayo SPT está sujeto a mayor incertidumbre que el CPT (Kulhawy y Trautmann 1996). La incertidumbre adicional introducida por este ensayo se puede evaluar considerando una transformación de los valores de N en valores de q_c . La relación entre el número de golpes N del SPT y la resistencia de punta q_c del CPT en arena fue estudiada por Robertson et. al. (1983), Ismael y Jeragh (1986) y el grupo de ingeniería geotécnica de la Universidad de Purdue. Usando sus datos combinados (Figura 4.1.4) es posible aplicar el procedimiento 6σ modificado para calcular el COV de la transformación de N a q_c usando las Ecuaciones (3.2.5) y (3.2.4). Se utiliza el procedimiento 6σ modificado debido a que hay relativamente pocos puntos de datos disponibles. El objetivo de hallar la incertidumbre de esta transformación es poder utilizar la resistencia estimada por el SPT, $q_{c,SPT}$, en lugar de N para las transformaciones restantes ilustradas en la Figura 4.1.1. Por lo tanto, dentro del mismo marco se desarrollarán incertidumbres que representen diseños basados tanto en ensayos SPT como en ensayos CPT. Para ello se requiere una función de densidad de probabilidad que describa la incertidumbre de $q_{c,SPT}$. Observar que los resultados de los ensayos CPT y SPT realizados in situ, lado a lado, por Robertson et. al. (1983) e Ismael y Jeragh (1986) reflejan tanto la

incertidumbre de la arena in situ como de los ensayos individuales. Esto significa que se toman en cuenta tanto la variabilidad inherente del suelo como la incertidumbre de la medición del SPT. Así, para $q_{c,SPT}$ se selecciona una distribución normal con un COV igual a 0.16.

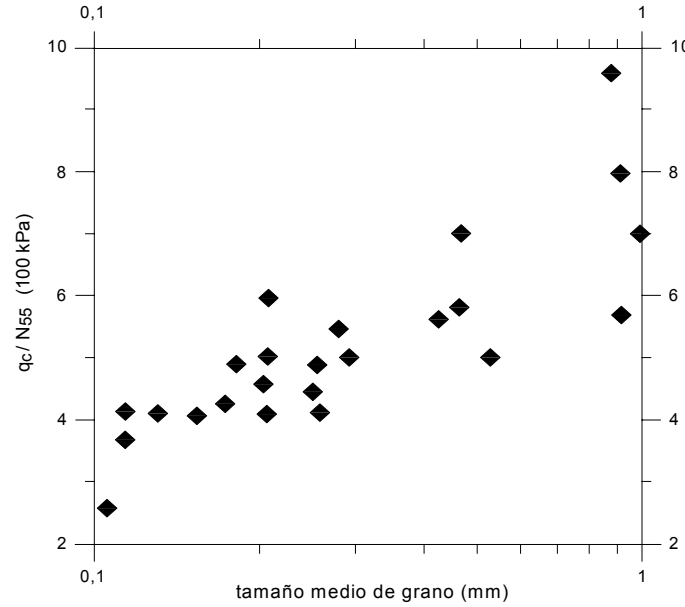


Figura 4.1.4. Correlación entre ensayos SPT y CPT (de acuerdo con Robertson et. al. 1983, Ismael y Jeragh 1986, y la Universidad de Purdue)

La transformación de q_c a D_R propuesta por Salgado y Mitchell (2003) en base a los resultados de la versión más reciente del programa CONPOINT (Salgado et al. 1997, Salgado 2003) es la siguiente:

$$D_R = \frac{1}{c_3} \ln \left[\frac{1}{c_1} \cdot \frac{q_c}{p_A} \cdot \left(\frac{p_A}{\sigma'_h} \right)^{c_2} \right] \quad (4.1.4)$$

donde p_A es una tensión de referencia, σ'_h es la tensión efectiva horizontal y las constantes c_1 , c_2 y c_3 se relacionan con propiedades intrínsecas de las arenas. La capacidad predictiva de una ecuación como la (4.1.4) para determinar valores de q_c a partir de un D_R conocido en laboratorio fue examinada por Salgado, Mitchell Jamiolkowski (1997). Se halló que los valores experimentales de q_c estaban comprendidos en una banda a $\pm 30\%$ de los valores pronosticados. Se aplicó el procedimiento 6σ para hallar el COV de esta q_c pronosticada,

obteniéndose un valor de 0.10. Considerando q_c como normalmente distribuida con un COV igual a 0.10, se puede usar la Ecuación (3.2.7) para hallar la función de densidad de probabilidad de D_R . Se halló que esta PDF*, la cual representa la incertidumbre de la transformación de q_c a D_R , era normalmente distribuida con una desviación estándar entre 3% y 6% dependiendo del valor específico de la densidad relativa. El COV de la Figura 4.1.1 que representa la incertidumbre de esta transformación corresponde a un caso representativo.

La transformación de D_R a ϕ_p (Ecuación 4.1.2) se calibró contra valores de D_R obtenidos en laboratorio (Bolton, 1986). Con respecto a la precisión de la Ecuación (4.1.2), Bolton informó que una banda a $\pm 1^\circ$ abarcaba todas las mediciones de ϕ_c y que una banda a $\pm 2^\circ$ capturaba todos los valores medidos de $\phi_p - \phi_c$ respecto de los valores pronosticados. Primero se aplicó el procedimiento 6σ para hallar el COV de ϕ_c y $\phi_p - \phi_c$. Luego mediante integración numérica de la Ecuación (3.2.9) se halló la PDF de la transformación de D_R a ϕ_p , tal como se hizo para la correlación entre N y q_c . Se halló que la PDF resultante para la transformación es una distribución normal con un COV de 0.020. El mismo COV determinado mediante simulación de Monte Carlo fue de 0.015.

Los factores de capacidad de carga N_γ , s_q , y d_q tienen incertidumbres debido a las transformaciones requeridas para calcularlos. La incertidumbre de estas transformaciones se ha examinado usando herramientas tales como análisis de límites y datos de ensayo. El factor N_q se calcula a partir de la relación exacta propuesta por Reissner (1924):

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \cdot \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (4.1.5)$$

Debido a que es exacta, en la Figura 4.1.1 la flecha que representa la transformación de ϕ_p a N_q tiene COV igual a cero.

El factor N_γ se halla usando la expresión de Brinch Hansen (1970):

$$N_\gamma = 1.5 \cdot \left(e^{\pi \tan \phi} \cdot \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right) \cdot \tan \phi \quad (4.1.6)$$

Para determinar el posible rango de valores de N_γ con respecto a ϕ_p se utilizaron los resultados del análisis de límites de Sloan y Yu (1996). Debido a que de hecho el análisis de límites

* PDF: Función de densidad de probabilidad

garantiza que para un ángulo de fricción dado el verdadero valor de N_γ estará comprendido dentro de los límites, la probabilidad de que N_γ tenga dichos límites es de 100%, no de 99.7% como se asocia con el procedimiento 6σ . Sin embargo, a los fines prácticos el procedimiento de las seis desviaciones estándares se puede utilizar de forma efectiva. Usando el procedimiento 6σ , se halló que el COV de la transformación de ϕ_p a N_γ es 0.12.

También se utilizó análisis de límites para determinar el posible rango de los valores de d_q con respecto a la relación D/B en base a los resultados de Bandini (2003). Usando el procedimiento, se halló que el COV de la transformación de ϕ_p a d_q es 0.02.

Los COV para los factores de forma s_q y s_γ se pueden determinar haciendo referencia a más de cincuenta ensayos realizados por DeBeer (1970). Se utiliza el procedimiento 6σ modificado, ya que hay relativamente pocos puntos de datos disponibles. Los COV resultantes son 0.23 y 0.19 para la transformación de ϕ_p a s_q y el factor s_γ , respectivamente.

Ahora ya se han descrito las incertidumbres correspondientes a todos los ensayos geotécnicos, transformaciones y otras variables de diseño relevantes. El siguiente paso será combinar estas incertidumbres para describir las funciones de densidad de probabilidad para cada una de las variables que aparecen en la Ecuación (4.1.1).

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 cada una de las variables transformadas D_R , ϕ_p , N_q , s_q , d_q y N_γ se aplicaron métodos de integración numérica a la Ecuación (3.2.9). Por ejemplo, para calcular el histograma que representa la incertidumbre de D_R usando la Ecuación (3.2.9), $p_X(x)$ se definió como una distribución normal con $COV = 0.07$, representando q_c , y $p_{Y|X}(y | x)$ se definió como una distribución normal con $\sigma = 0.06$, representando la Ecuación (4.1.4). El histograma resultante $p_Y(y)$ Δy representa la incertidumbre de D_R calculada usando q_c y la Ecuación (4.1.4). Los cálculos de las incertidumbres de ϕ_p , N_q , s_q , d_q y N_γ arrojaron resultados comparables usando simulación de Monte Carlo.

Los COV a utilizar en el análisis de confiabilidad son aquellos calculados a partir de los resultados de la integración numérica, ya que ésta es la técnica más exacta. En las Tablas 4.1.2 y 4.1.3 se informan los valores de los COV calculados para N_q , s_q , d_q y N_γ considerando diferentes valores de ϕ_p . La Tabla 4.1.2 se utiliza para realizar análisis de confiabilidad de

diseños que se basan en el CPT, mientras que la Tabla 4.1.3 es para el SPT. Los COV para N_q y N_γ varían significativamente con ϕ_p debido a que la pendiente de las Ecuaciones (4.1.5) y (4.1.6) crece a medida que aumenta ϕ_p . En la Figura 4.1.1 aparecen valores del COV representativos tomados de la Tabla 4.1.2.

La tarea final necesaria para describir plenamente la incertidumbre de cada variable consiste en seleccionar una función de densidad de probabilidad. Las formas de los histogramas generados mediante integración numérica de la Ecuación (3.2.9) y mediante simulación de Monte Carlo se utilizan para determinar funciones de densidad de probabilidad representativas que tienen formas bastante similares. En la Figura 4.1.5 se ilustran ejemplos de histogramas que representan las distribuciones de ϕ_p , N_q , s_q y N_γ . La forma de los histogramas para ϕ_p , s_q y d_q se asemejan a distribuciones normales. Por tanto, para representar estas variables se utilizan distribuciones normales. La forma de los histogramas para N_q y N_γ sugiere el uso de distribuciones lognormales. Las Tablas 4.1.2 y 4.1.3 también indican el tipo de distribución seleccionado para cada variable.

Tabla 4.1.2. Coeficientes de variación (COV), factores de sesgo y tipos de distribución para los factores de capacidad de carga a utilizar en el análisis de confiabilidad de zapatas en arena usando el CPT

Tipo de zapata	ϕ_p	N _q - lognormal		N _γ - lognormal		d _q - normal		s _q - normal	
		COV	sesgo	COV	sesgo	COV	sesgo	COV	sesgo
Cuadrada	36.5	0.21	1.12	0.30	1.17	0.02	1.00	0.23	1.00
	39.5	0.24	1.14	0.33	1.19	0.02	1.00	0.23	1.00
	42.8	0.31	1.16	0.41	1.22	0.03	1.00	0.23	1.00
Corrida	38.7	0.34	1.24	0.46	1.34	0.03	1.00		
	43.5	0.41	1.28	0.54	1.38	0.03	1.00		
	48.5	0.47	1.30	0.63	1.49	0.03	1.00		

Tabla 4.1.2. Coeficientes de variación (COV), factores de sesgo y tipos de distribución para los factores de capacidad de carga a utilizar en el análisis de confiabilidad de zapatas en arena usando el SPT

Tipo de zapata	ϕ_p	N_q - lognormal		N_γ - lognormal		d_q - normal		s_q - normal	
		COV	sesgo	COV	sesgo	COV	sesgo	COV	sesgo
Cuadrada	39.5	0.32	1.13	0.42	1.19	0.08	1.00	0.24	1.00
	42.8	.034	1.16	0.45	1.21	0.04	1.00	0.23	1.00
Corrida	43.5	0.55	1.33	0.70	1.47	0.06	1.00		
	48.5	0.61	1.38	0.72	1.50	0.04	1.00		

Ninguna de estas funciones de densidad de probabilidad está plenamente descrita sin analizar si se requiere un factor de sesgo. Como se mencionó en la subsección correspondiente al factor de sesgo, se necesitan factores de sesgo para N_q y N_γ debido al efecto de las transformaciones no lineales en las Ecuaciones (4.1.5) y (4.1.6). Como se puede ver en la Figura 4.1.1, en última instancia los valores de los factores de capacidad de carga dependen de los valores de q_c . En el Capítulo 5 sugerimos que el diseñador seleccione de manera conservadora un valor de q_c que sea 0.84 desviaciones estándares menor que la media. De este modo se introduce sesgo a todos los parámetros de diseño que son transformaciones de q_c . Como resultado, las medias de los factores de capacidad de carga difieren de los valores sesgados usados en el diseño (Figura 4.1.2). Por tanto los factores de sesgo se calculan usando la Ecuación (3.2.13). Los datos de entrada para la Ecuación (3.2.13) son las medias, calculadas a partir de los histogramas determinados aplicando métodos de integración numérica a la Ecuación (3.2.9), y los valores nominales, determinados usando las ecuaciones de diseño presentadas anteriormente con el valor conservador de q_c . Las Tablas 4.1.2 y 4.1.3 también incluyen estos factores de sesgo.

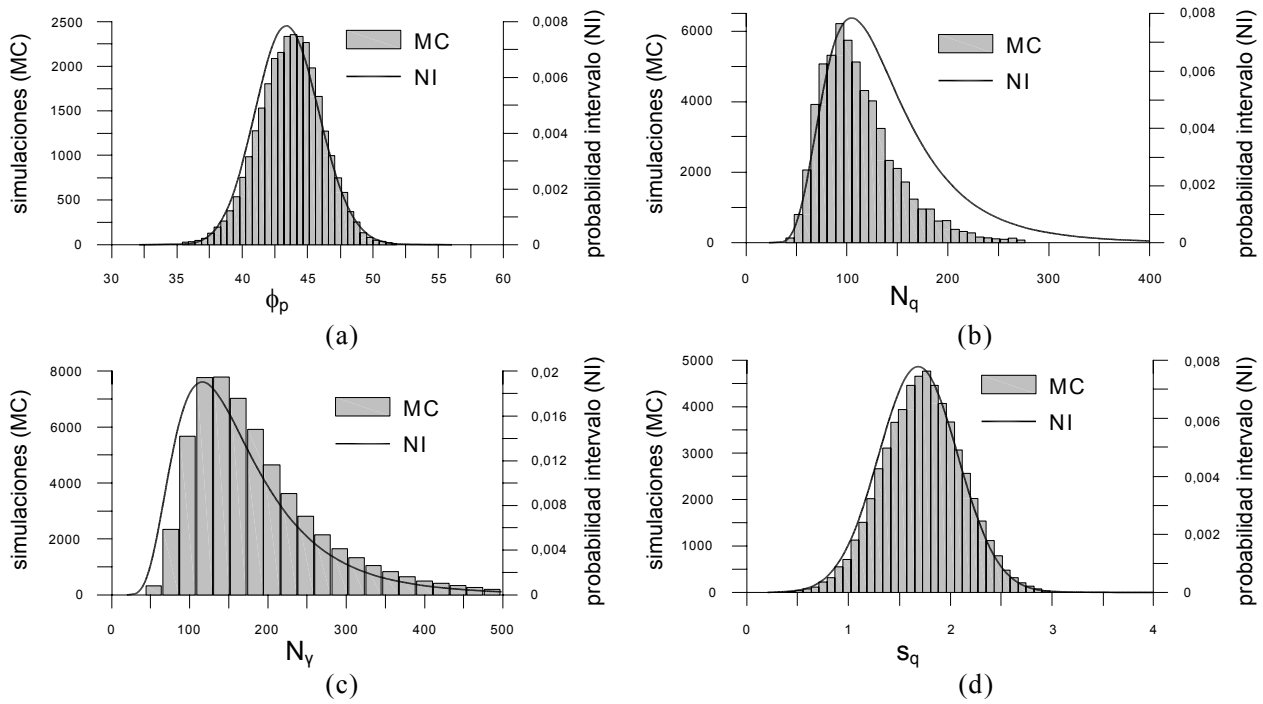


Figura 4.1.5. Ejemplos de histogramas de ϕ_p , N_q , N_γ y s_q obtenidos mediante simulación de Monte Carlo (MC) e integración numérica (NI)

4.2 Evaluación de la incertidumbre de la capacidad de carga de las zapatas en arcilla

Paso 1. Identificar la ecuación correspondiente al estado límite

Se considera la ecuación para arcilla en condición totalmente no drenada. La ecuación de estado límite correspondiente a capacidad de carga es

$$\frac{DL + LL}{B \cdot L} - (s_u \cdot N_c \cdot d_c \cdot s_c + \gamma \cdot D) = 0 \quad (4.2.1)$$

donde s_u es la resistencia al corte no drenada.

Paso 2. Identificar las variables que componen la ecuación

De las variables de la Ecuación (4.2.1) DL , LL , B , L , D y γ ya fueron analizadas en la sección correspondiente a fundaciones en arena (ver Tabla 4.1.1). N_c , d_c y s_c son factores que dependen de la geometría del problema (descrito por B , L y D). Las ecuaciones que definen s_c y d_c a utilizar en el diseño se tomaron de Salgado et al. (2004):

$$d_c = 1 + 0.27 \cdot \sqrt{\frac{D}{B}} \quad (4.2.2)$$

y

$$s_c = 1 + 0.12 \cdot \frac{B}{L} + 0.17 \sqrt{\frac{D}{B}} \quad (4.2.2)$$

La resistencia al corte no drenada s_u se puede determinar a partir de correlaciones entre ensayos en laboratorio e in situ.

Paso 3. Identificar los ensayos geotécnicos asociados con cada variable

Para hallar valores de s_u se pueden utilizar ensayos CPT o bien ensayos en laboratorio (por ejemplo, ensayos de compresión no confinada). De este modo, dependiendo del tipo de ensayos realizados, el valor de ensayo medido asociado con la Ecuación (4.2.1) será q_c o s_u .

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

La variabilidad de q_c en arcilla se estimó usando registros de ensayos CPT realizados en depósitos uniformes de arcilla conocidos tomados de la literatura existente. Seleccionando este grupo de datos es posible evaluar la variabilidad de q_c sólo en arcilla y no en un perfil compuesto por arcilla y otros materiales. Se analizaron diez registros publicados en dos trabajos diferentes – Jacobs y Coutts (1992) y Baligh et. al. (1980) – usando el procedimiento 6σ exactamente como se aplicó para los datos de q_c en arena (Figura 4.1.3). Al igual que en el caso anterior, sólo se consideraron registros o partes de registros correspondientes a una capa razonablemente uniforme. En base a estos datos se halló que el COV para q_c en arena era de 0.06.

En base a la resistencia de punta q_c es posible determinar s_u mediante la siguiente expresión

$$s_u = \frac{q_c - \sigma_v}{N_k} \quad (4.2.4)$$

donde σ_v es la tensión vertical y N_k es el factor de cono. Para analizar el valor esperado del factor de cono y su incertidumbre se utilizó el análisis de límites de fundaciones circulares en

arcilla propuesto por Salgado et al. (2004). De acuerdo con Salgado et al. (2004), el valor de N_k está comprendido entre 11.0 y 13.7. A diferencia de N_y , aquí no se utilizó ninguna otra información relacionada con el valor medio de N_k . Por lo tanto, la estimación menos sesgada (Harr 1987) de la función de densidad de probabilidad de N_k , la cual representa la incertidumbre de la transformación (4.2.4), es una distribución uniforme entre 11.0 y 13.7.

La incertidumbre de s_u determinada en el laboratorio se puede estimar considerando el caso extremo del ensayo de compresión no confinada, el cual debería presentar mayor incertidumbre que la mayor parte de los restantes ensayos en laboratorio que se utilizan actualmente, como por ejemplo el ensayo de compresión triaxial. Phoon (1995) publicó un informe sobre diferentes trabajos que analizaban la variabilidad de este ensayo. El autor presenta como valor representativo un COV de 0.30. Este valor fue confirmado por un trabajo sobre ensayos en condición no drenada preparado por Matsuo y Asaoka (1977). Matsuo y Asaoka (1977) examinaron la incertidumbre y variabilidad espacial de ensayos realizados en laboratorio sobre arcillas marinas no drenadas. Ellos atribuyen la incertidumbre de s_u a la variabilidad inherente del suelo y a la perturbación de las muestras ensayadas. Por lo tanto, resulta natural que la incertidumbre hallada para los ensayos en laboratorio realizados para determinar s_u sea mayor que para los ensayos CPT realizados in situ, ya que la dispersión de las mediciones de q_c es mayoritariamente controlada por la variabilidad local del suelo.

Debido a que el COV de la resistencia al corte no drenada obtenida de ensayos en laboratorio es mayor que el COV hallado para las determinaciones mediante ensayos CPT, probablemente no sea realista continuar usando para s_u una distribución normal. Una mejor función de densidad de probabilidad para la resistencia incluiría distribuciones tales como las distribuciones beta o lognormales. Es habitual observar en la literatura que para este parámetro se utilizan distribuciones lognormales. Por lo tanto, para representar la incertidumbre de s_u en el análisis de probabilidad se utiliza una distribución lognormal.

Se sabe que el valor de N_c es exactamente igual a $2 + \pi \approx 5.14$ y por lo tanto este factor no posee incertidumbre (Prandtl 1920). Sin embargo, los factores s_c y d_c no se conocen con exactitud. Las incertidumbres de estos factores se pueden considerar usando los resultados del análisis de límites. Salgado et al. (2004) publicaron límites inferiores y superiores para un factor de capacidad de carga combinado $N_c s_c d_c$ considerando diferentes relaciones de empotramiento para el caso de zapatas corridas y cuadradas. Aplicando el mismo principio

del menor sesgo que se aplicó para N_k , estos resultados se pueden usar directamente para definir un conjunto de distribuciones uniformes para $N_{cs}d_c$. Este tipo de función de densidad de probabilidad queda completamente definidas por los límites inferior y superior. Los límites de la distribución se indican en la Tabla 4.2.1.

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 s_u determinada a partir de q_c se aplicaron métodos de integración numérica a la Ecuación (3.2.9). Para calcular el histograma que representa la incertidumbre de s_u usando (3.2.9), $p_X(x)$ se definió como una distribución normal con $COV = 0.06$, representando q_c , y $p_{Y|X}(y | x)$ se definió como una distribución uniforme de límites 11.0 y 13.7, representando el factor N_k de la ecuación (4.2.4). El histograma resultante $p_Y(y)$ Δy representa la incertidumbre de s_u calculada usando q_c y la Ecuación (4.2.4). En base a este histograma se halló que s_u era normalmente distribuida con $COV = 0.09$.

Tabla 4.2.1. Límites para las distribuciones uniformes sobre $N_{cs}d_c$ correspondientes a diferentes relaciones de empotramiento para utilizar en un análisis probabilístico de la capacidad de carga en arcilla (Salgado et al. 2004)

D/B	Zapata Corrida		Zapata Cuadrada	
0.00	5.132	5.203	5.523	6.221
0.01	5.164	5.271	5.610	6.498
0.05	5.293	5.396	5.886	6.830
0.10	5.448	5.536	6.171	7.129
0.20	5.696	5.802	6.590	7.516
0.40	6.029	6.137	7.194	8.092
0.60	6.240	6.341	7.671	8.577
0.80	6.411	6.508	8.068	9.004
1.00	6.562	6.656	8.429	9.355
2.00	7.130	7.229	9.752	10.861
3.00	7.547	7.655	10.532	12.000
4.00	7.885	7.997	10.941	12.879
5.00	8.168	8.286	11.206	13.603

La función de densidad de probabilidad que representa a $N_{cs}d_c$ fue definida completamente en el paso 4. Los límites de la distribución uniforme que describe a $N_{cs}d_c$ se indican en la Tabla 4.2.1. Las funciones de densidad de probabilidad para DL , LL , B , L , D y γ fueron definidas en la sección correspondiente a fundaciones en arena y se informan en la Tabla 4.1.1.

4.3 Resumen

En este capítulo demostramos los pasos 1-6 del marco descrito aplicados a la determinación de las incertidumbres de las variables necesarias para las verificaciones de diseño en estado límite último de las fundaciones superficiales en arena y arcilla. En el próximo capítulo se demuestran los pasos 7-10 aplicados a la determinación de factores de resistencia para el diseño en estado límite último de las fundaciones superficiales.