



CAPACIDAD DE CARGA DEL SUELO

Cimentaciones Superficiales

GEOTECNIA II

Elaboró: José Saturnino Pérez Fajardo



Septiembre 2025



Objetivo

Determinar la capacidad de carga del suelo con las soluciones teóricas para cimentaciones superficiales propuestas por *Karl von Terzaghi* y *George G. Meyerhof*.



Contenido

- ✓ Introducción.
- ✓ Cimentaciones superficiales y profundas.
- ✓ Capacidad de carga.
- ✓ Tipos de falla en el suelo
- ✓ Teoría de Terzaghi
- ✓ Teoría Meyerhof
- ✓ Ejemplo
- ✓ Conclusiones



Introducción

Los cimientos son la base de cualquier estructura, su estabilidad es crucial para garantizar la seguridad y durabilidad de la construcción (Crespo Villalaz, 2008).

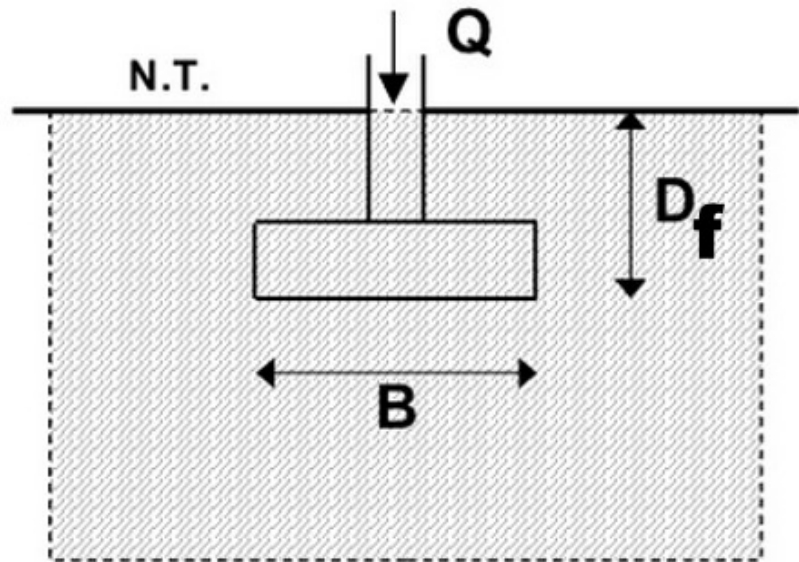
La capacidad de carga del suelo se refiere a la máxima presión (esfuerzo) que el suelo puede soportar sin fallar por corte o por asentamiento excesivo (Braja, 2012); también se puede expresar como la resistencia que opone el suelo a ser deformado o desplazado por las cargas aplicadas a través de la cimentación.

Cimentaciones superficiales y profundas

Un criterio para clasificar una cimentación superficial y una profunda es el cociente D_f/B , donde:

B : es el ancho de la cimentación.

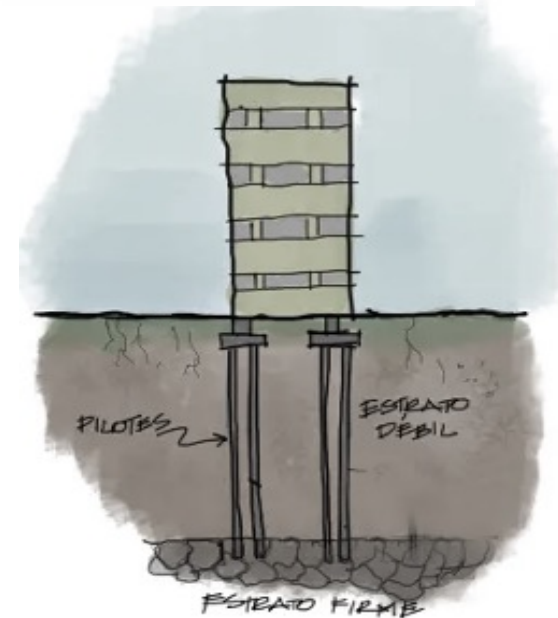
D_f : es la profundidad de desplante de esta, entendida como la distancia entre la superficie del suelo y el nivel en el que se apoyará la cimentación.



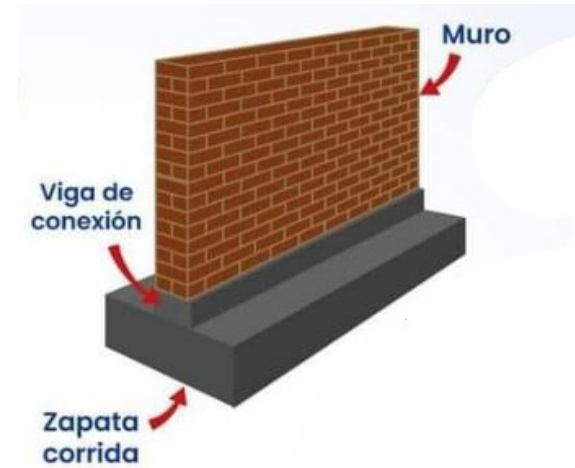
Si $D_f/B < 4$, cimentación superficial (Braja, 2012).



Si $D_f/B \geq 4$, cimentación profunda.

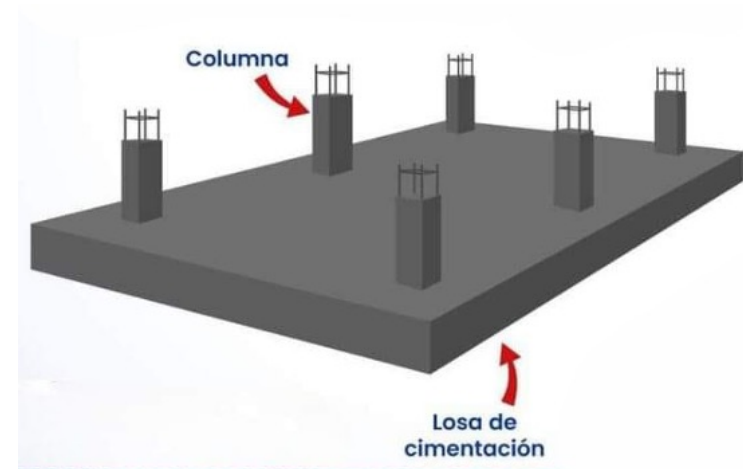


Tipos de cimentaciones superficiales



Para que las cimentaciones superficiales tengan un desempeño satisfactorio deben tener dos características principales:

1. Tienen que ser **seguras contra la falla general** por corte del suelo que las soporta.
2. **No** pueden experimentar un desplazamiento, o un **asentamiento excesivo**.



Capacidad de Carga

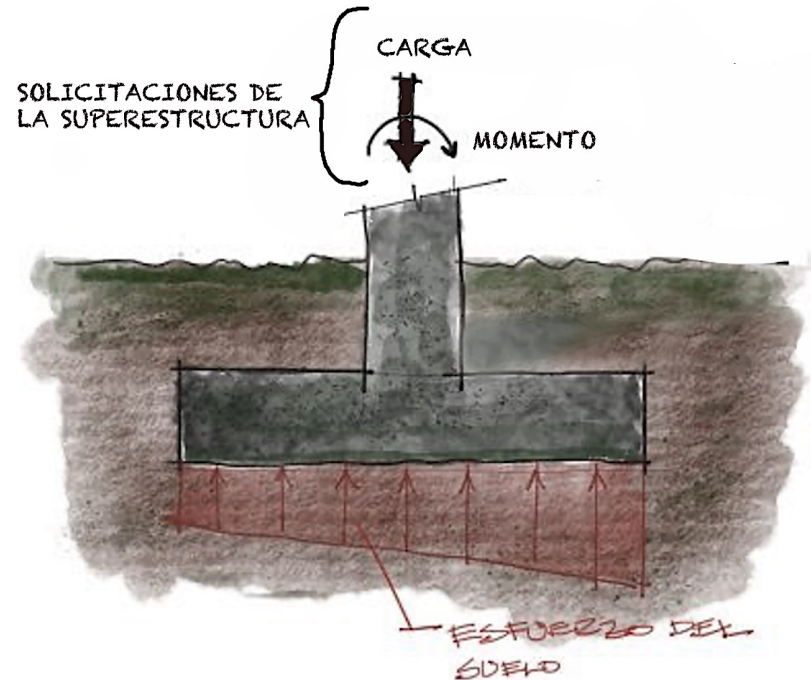
Existen dos tipos principales de capacidad de carga:

a. Capacidad de carga última (q_u o q_c):

Es la presión (carga por área unitaria de la cimentación) máxima teórica que el suelo puede soportar antes de fallar por corte (Braja, 2012).

b. Capacidad de carga permisible (q_a):

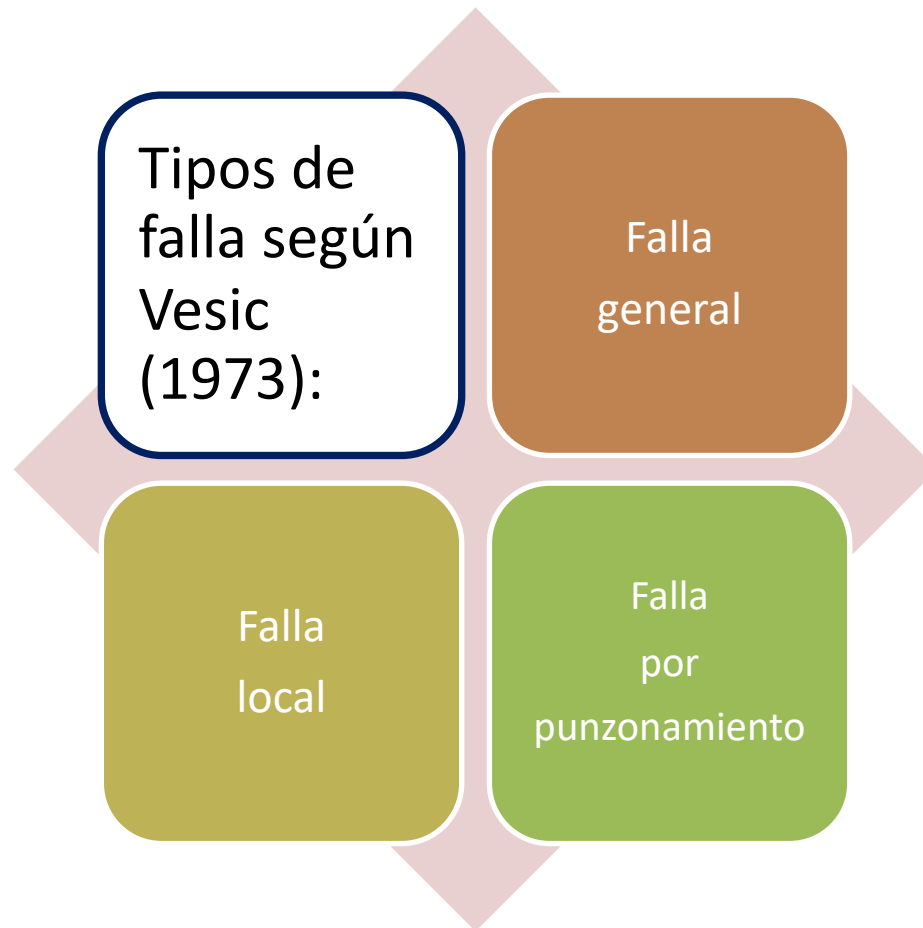
Es la presión que se permite aplicar al suelo, considerando un factor de seguridad para evitar fallas y asentamientos excesivos. Se obtiene dividiendo la capacidad de carga última por un factor de seguridad.

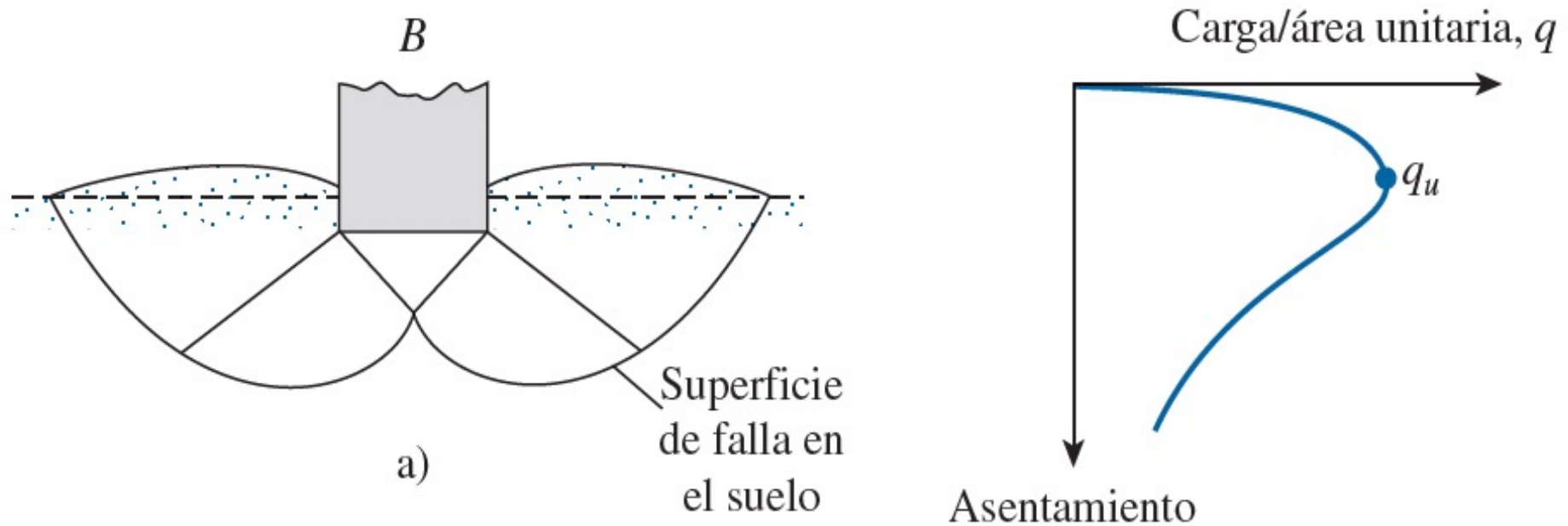


$$FS = \frac{RESISTENCIA (q_u)}{SOLICITACIONES (q_a)}$$



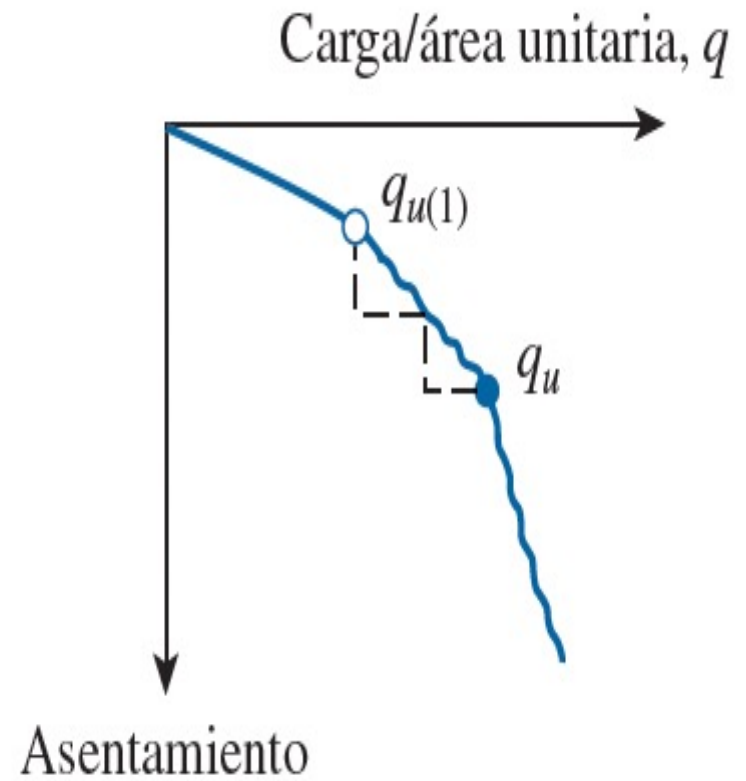
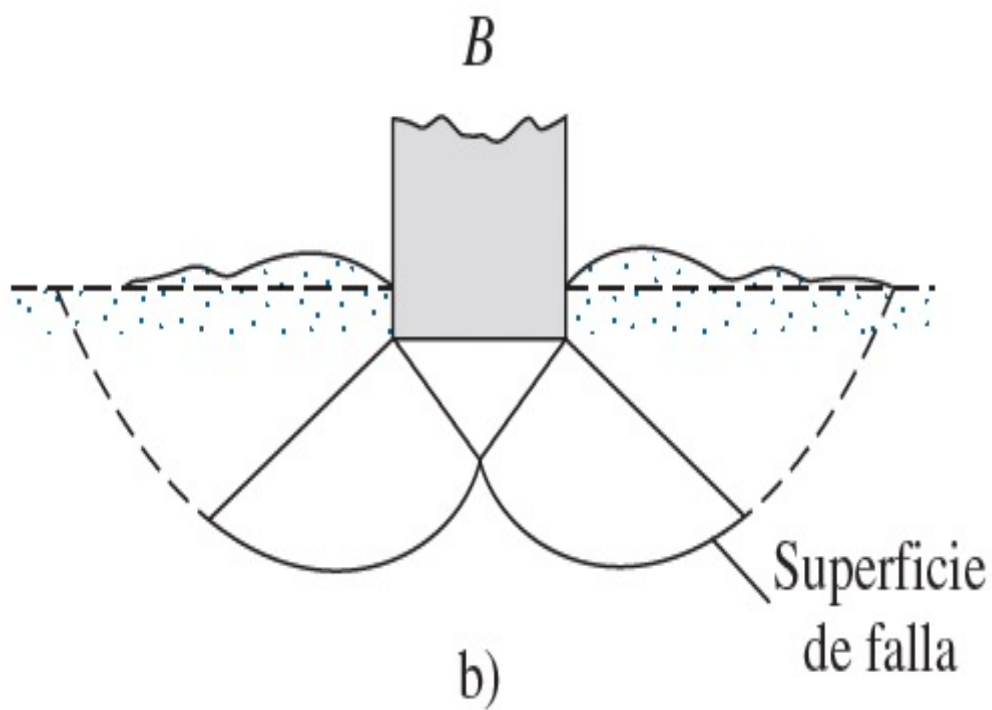
Tipos de falla en el suelo





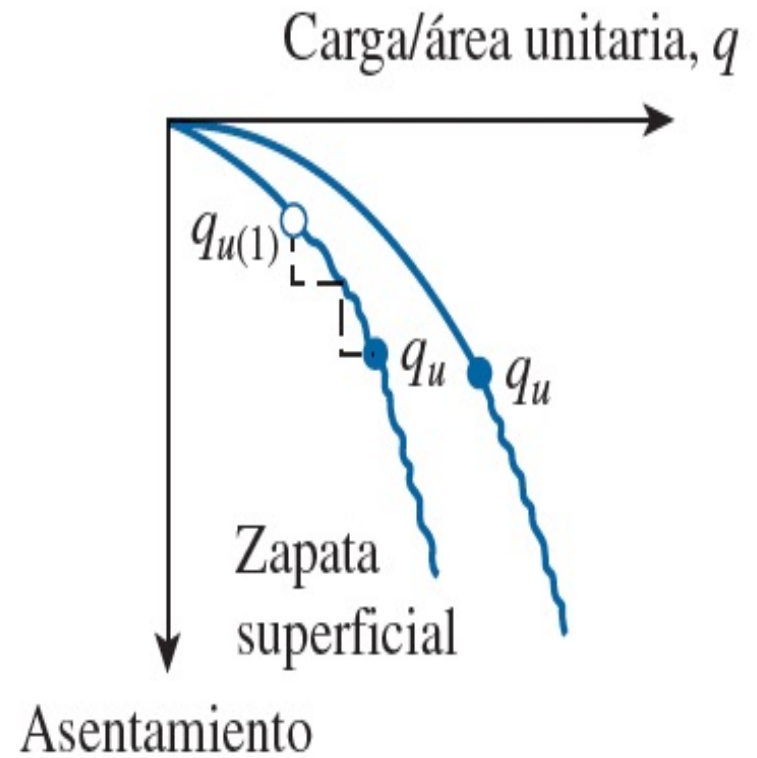
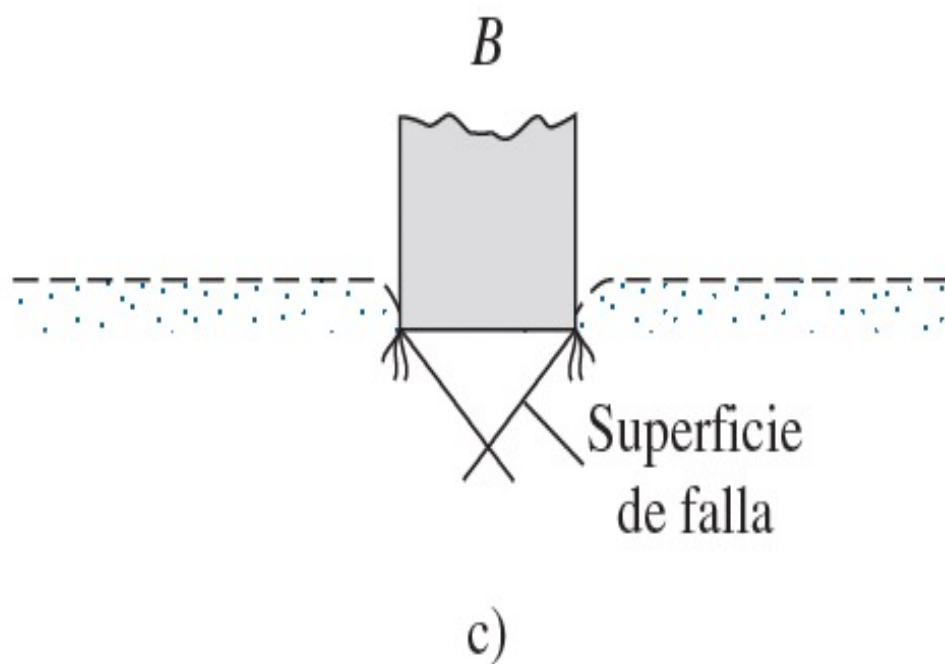
Falla general por corte

- Este tipo de falla se caracteriza por la formación de una superficie de deslizamiento bien definida que se extiende desde la base de la cimentación hasta la superficie del suelo.
- Ocurre en suelos rígidos o densos, como arenas compactas o arcillas firmes.
- La falla es repentina y puede ser catastrófica, con un colapso repentino de la cimentación.



Falla local por corte

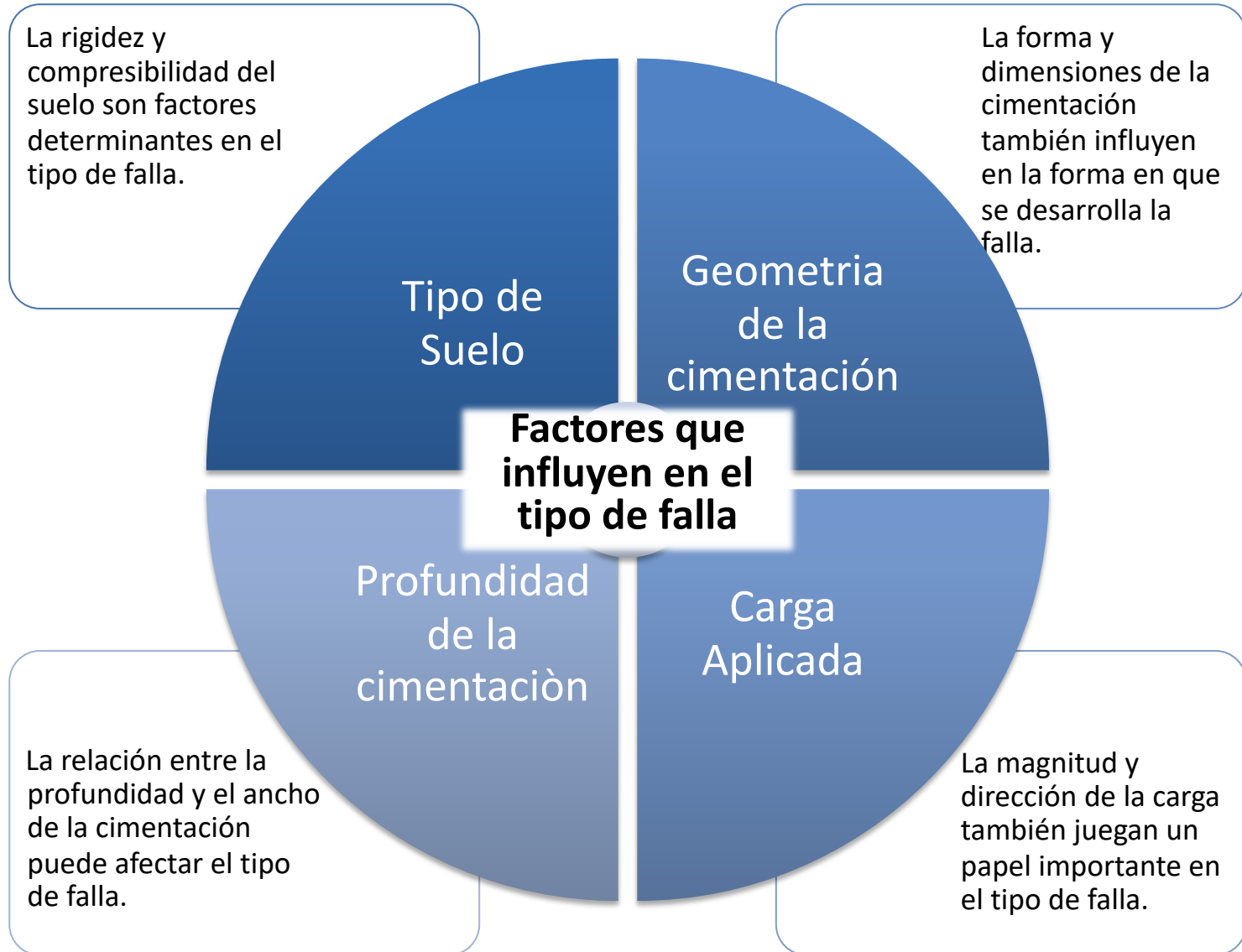
- En este caso, la superficie de deslizamiento no se extiende hasta la superficie del suelo, sino que se desarrolla solo debajo de la cimentación.
- Es común en suelos con una compresibilidad intermedia, como arenas sueltas o arcillas blandas.
- La falla no es tan brusca como la falla general, y puede haber asentamientos graduales antes del colapso.



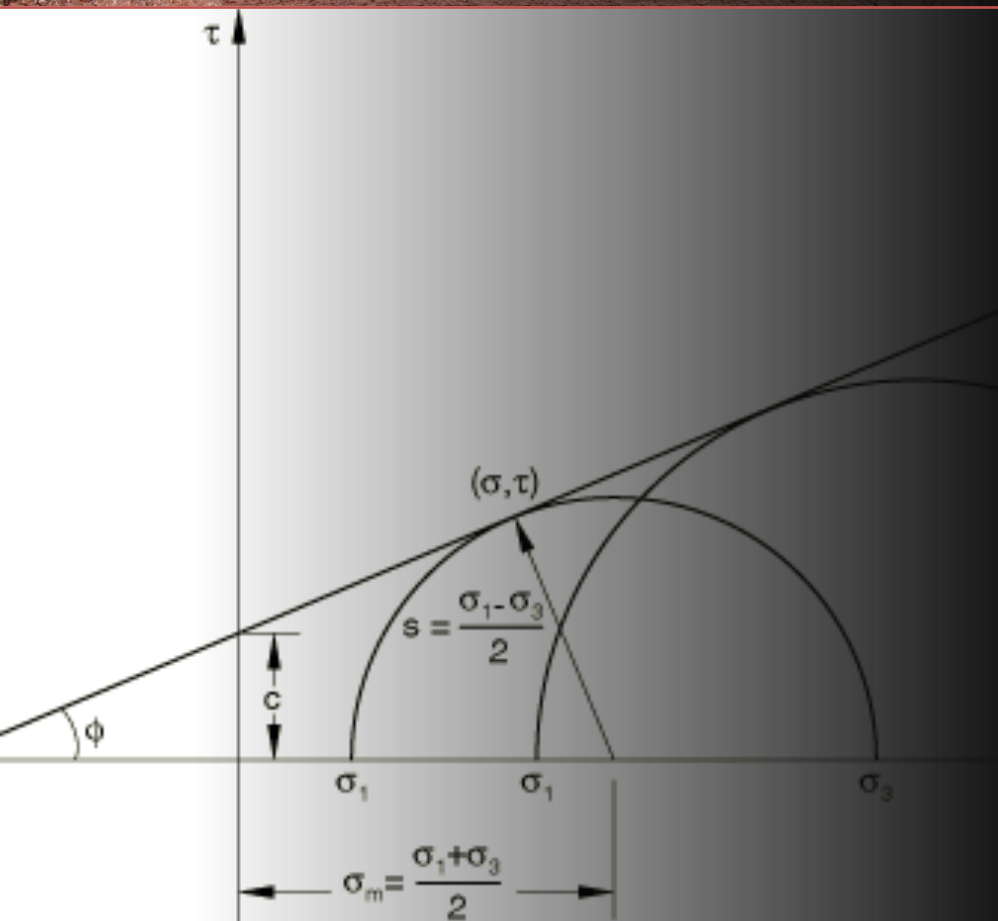
Falla por punzonamiento

- Este tipo de falla se produce cuando la cimentación se hunde en el suelo, comprimiéndolo y desplazándolo lateralmente.
- Es típica de suelos muy blandos o sueltos, como arenas muy sueltas o arcillas blandas.
- No se forma una superficie de deslizamiento bien definida, y la falla se manifiesta como un asentamiento gradual y continuo de la cimentación.

Factores

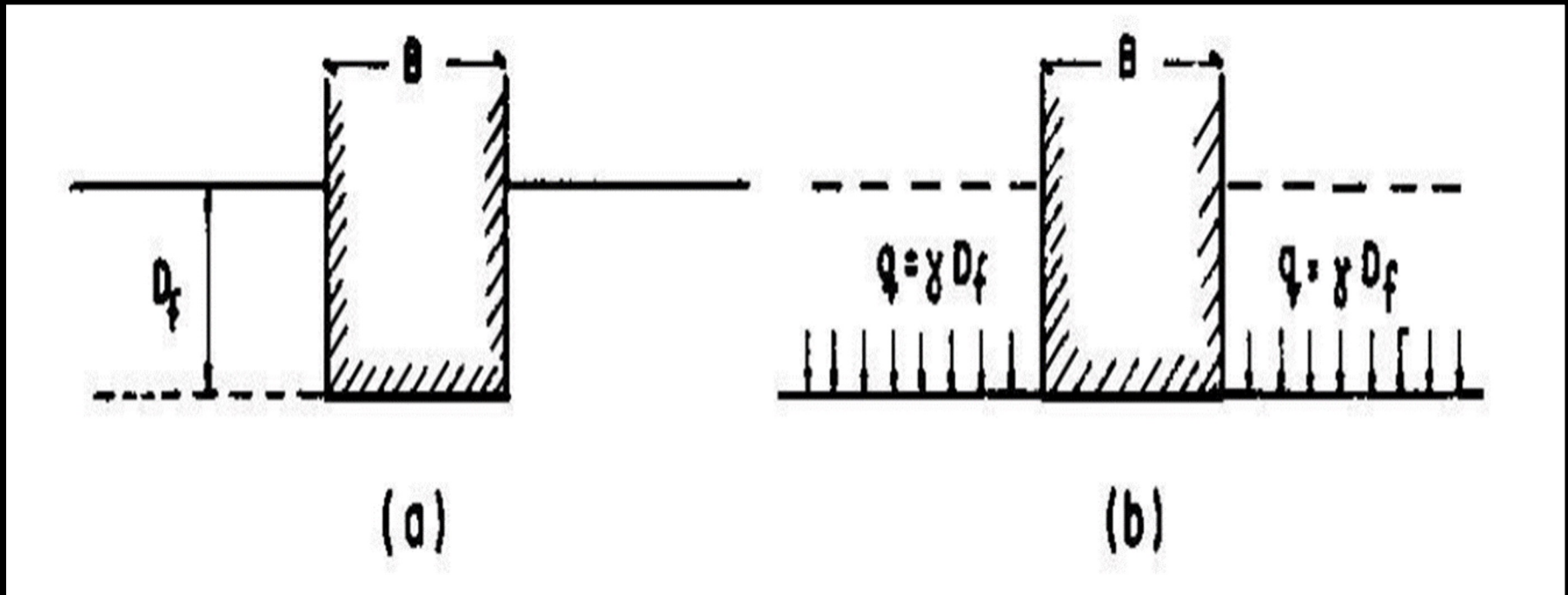


Teoría de Terzaghi (1943)

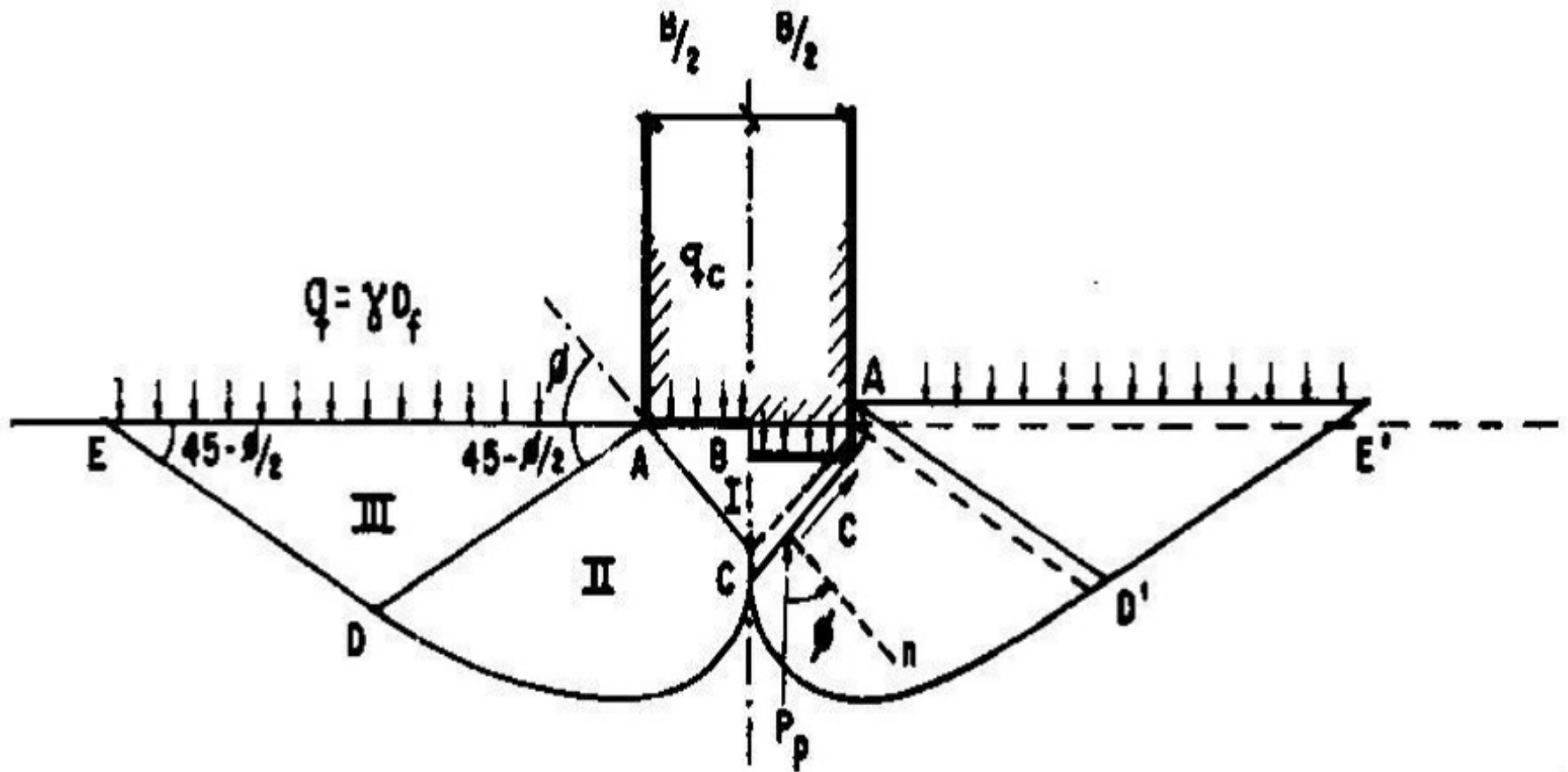


Es uno de los primeros intentos exitosos en adaptar los principios de la mecánica del medio continuo al comportamiento de los suelos, que son materiales complejos y heterogéneos.

Terzaghi abordó el caso general de suelos que poseen cohesión y fricción en cimientos poco profundos para falla general. (Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. 2001).



Terzaghi, basándose en los trabajos de **Prandtl**, propuso un mecanismo de falla para cimientos poco profundos de longitud infinita (condición de deformación plana), despreció la resistencia al esfuerzo cortante arriba del nivel del desplante del cimiento, supuso que el terreno sobre la base del cimiento produce un efecto que representa con una sobrecarga.



El mecanismo de falla de Terzaghi para una cimentación rígida continua poco profunda se caracteriza por tres zonas distintas.



Zonas

I: Es una zona de forma triangular que se desplaza verticalmente junto con el cimiento. Esta zona se comporta como un cuerpo rígido y se mueve hacia abajo sin deformarse.

II: Son dos zonas de forma logarítmica espiral que se extienden desde los bordes de la Zona I hacia afuera y hacia arriba. En estas zonas, el suelo experimenta una deformación plástica significativa y se produce un movimiento de corte.

III: Son dos zonas de forma triangular que se encuentran en la superficie del suelo, más allá de las Zonas II. En estas zonas, el suelo se levanta y se deforma pasivamente.

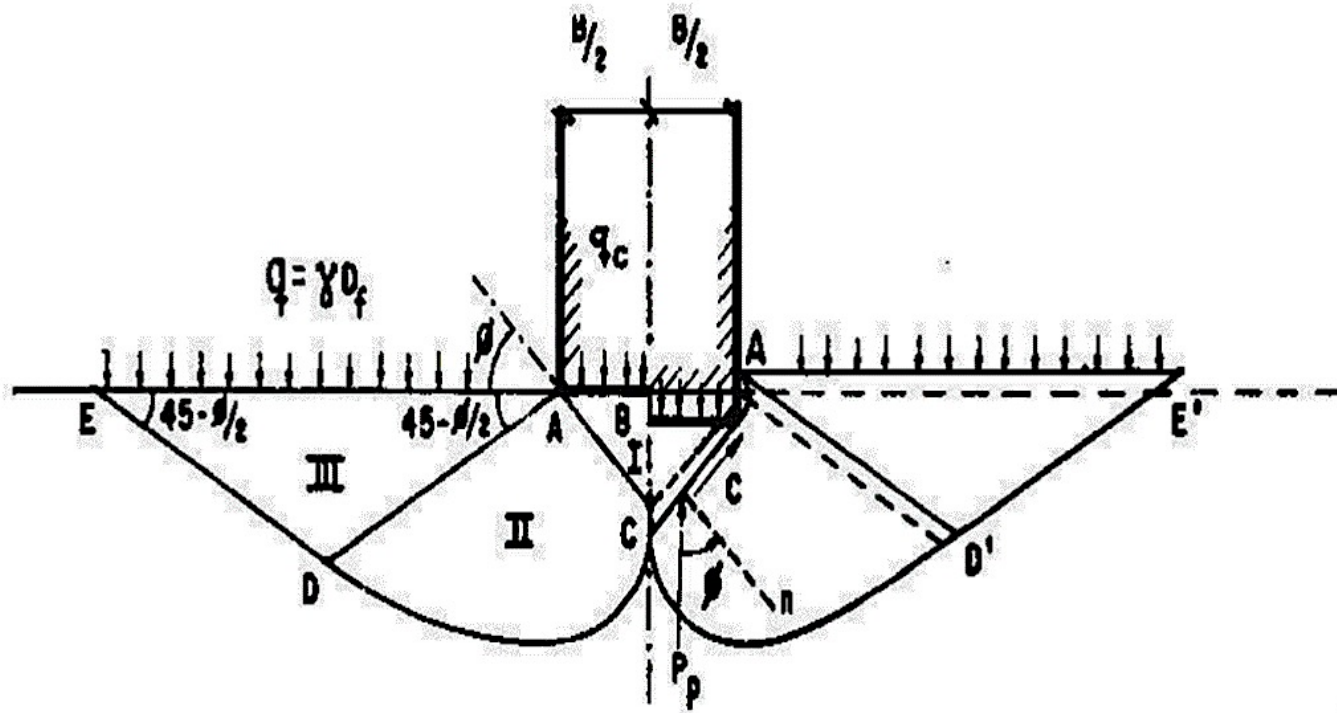


Características principales

Falla por corte: La falla del suelo ocurre principalmente por corte a lo largo de las superficies de deslizamiento que se desarrollan dentro de las Zonas II.

Deformación plástica: El suelo en las Zonas II experimenta una deformación plástica significativa antes de que se produzca la falla total.

Levantamiento del suelo: El levantamiento del suelo en las Zonas III es una indicación visible de que se está produciendo la falla.



La **zona I** es una cuña que se mueve como cuerpo rígido con el cimiento, verticalmente hacia abajo. La **zona II** es de deformación tangencial radial; la frontera AC de esta zona forma con la horizontal el ángulo ϕ , cuando la base del cimiento es rugosa; si fuera idealmente lisa, dicho ángulo sería $45 + \phi/2$. La frontera AD forma un ángulo de $45 - \phi/2$ con la horizontal, en cualquiera de los dos casos. La **zona III** es una zona de estado plástico pasivo de *Rankine*.

La penetración del cimiento en el terreno solo será posible si se vencen las fuerzas resistentes que se oponen a dicha penetración; éstas comprenden al efecto de la cohesión en la superficie **AC** y la resistencia pasiva del suelo desplazado, actuante en dichas superficies.

Despreciando el peso de la **cuña I** y considerando el equilibrio de fuerzas verticales, **Terzaghi** dedujo una expresión para determinar la presión máxima que puede aplicarse al cimiento por unidad de longitud, sin provocar su falla;

$$q_c B = 2P_p + 2C \operatorname{sen} \varphi$$

$$C = c B / 2 \operatorname{cos} \varphi$$

es decir, la capacidad de carga última del cimiento (*continuo o corrido*):

$$q_c = c N_c + \gamma D_f N_q + 1/2 \gamma B N_\gamma$$

q_c : carga de falla en el cimiento por unidad de longitud

P_p : empuje pasivo actuante en la superficie AC

C : fuerza de cohesión actuante en la superficie AC

N_c, N_q, N_γ : factores de capacidad de carga

B : ancho del cimiento

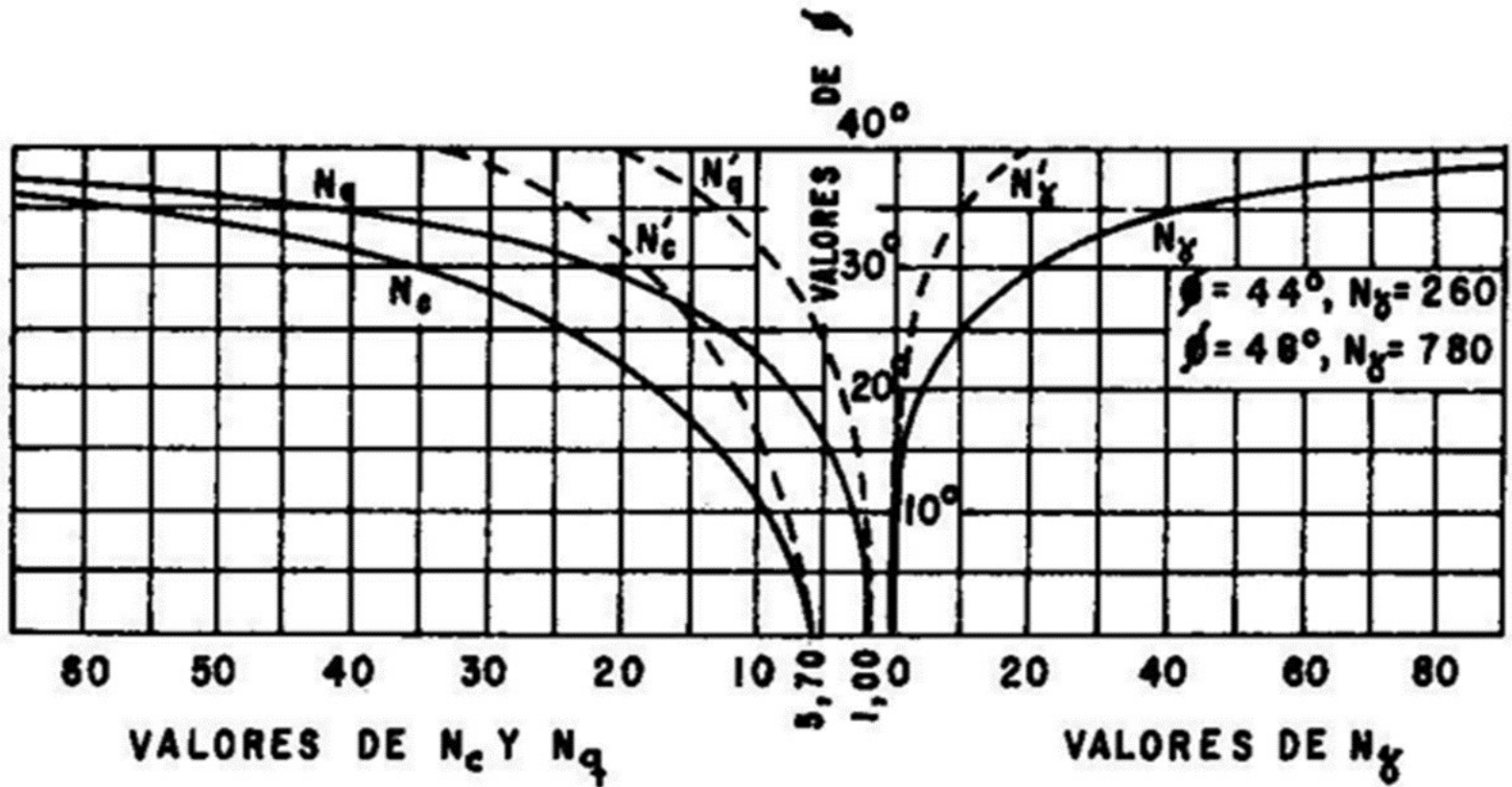
D_f : profundidad de desplante

γ : peso volumétrico del suelo

φ : ángulo de fricción del suelo

c : cohesión del suelo

Deducción



Factores de capacidad de carga

También están los factores para falla local (Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. 2001).

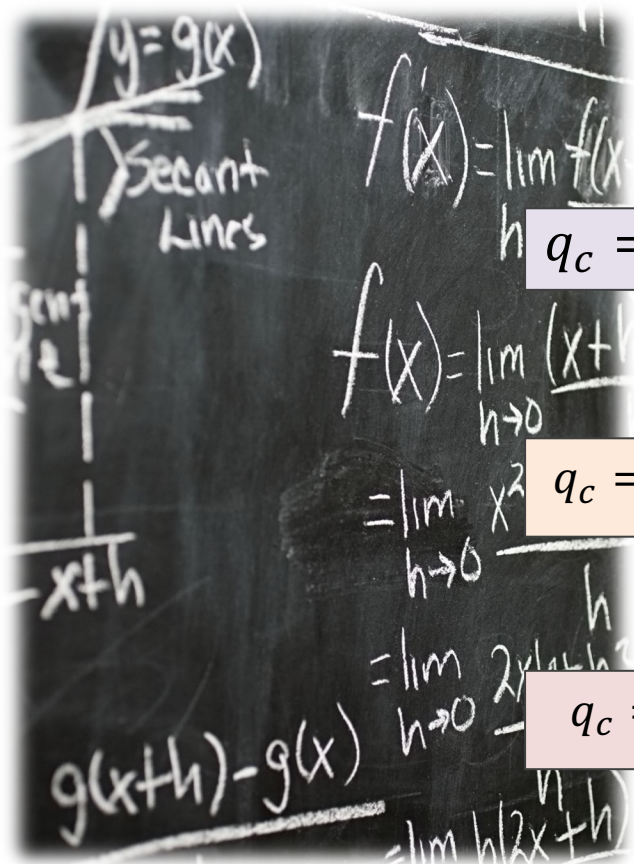
$$N_c = \cot\varphi(N_q - 1)$$

$$N_q = \frac{e^{2(3\pi/4 - \varphi/2)\tan\varphi}}{2\cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)}$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{K_{p\gamma}}{\cos^2\varphi} - 1 \right) \tan\varphi$$

$K_{p\gamma}$: coeficiente de empuje pasivo

Expresiones matemáticas para factores de carga



$$q_c = cN_c + \gamma D_f N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \text{ (cimentación continua)}$$

$$q_c = 1.3cN_c + \gamma D_f N_q + 0.4\gamma B N_\gamma \text{ (cimentación cuadrada)}$$

$$q_c = 1.3cN_c + \gamma D_f N_q + 0.3\gamma B N_\gamma \text{ (cimentación circular)}$$



Expresiones para falla general

$$q_c = \frac{2}{3}cN'_c + \gamma D_f N'_q + \frac{1}{2}\gamma B N'_\gamma \text{ (cimentación continua)}$$

$$q_c = 0.867cN'_c + \gamma D_f N'_q + 0.4\gamma B N'_\gamma \text{ (cimentación cuadrada)}$$

$$q_c = 0.867cN'_c + \gamma D_f N'_q + 0.3\gamma B N'_\gamma \text{ (cimentación circular)}$$

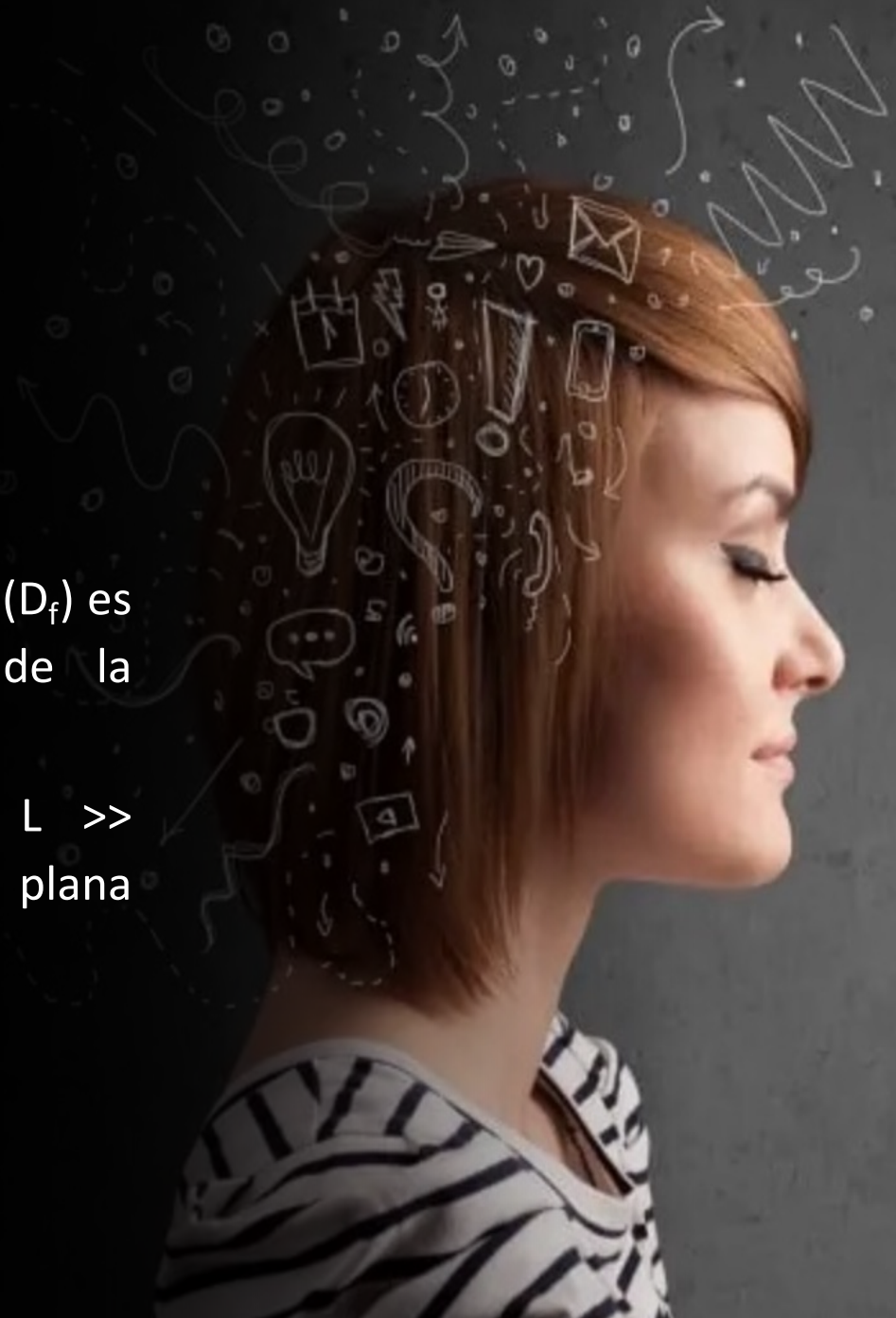
Los factores de capacidad de carga se obtienen con las mismas expresiones modificando el ángulo

$$\varphi' = \text{ang } \tan\left(\frac{2}{3} \tan\varphi\right)$$

Expresiones para falla local

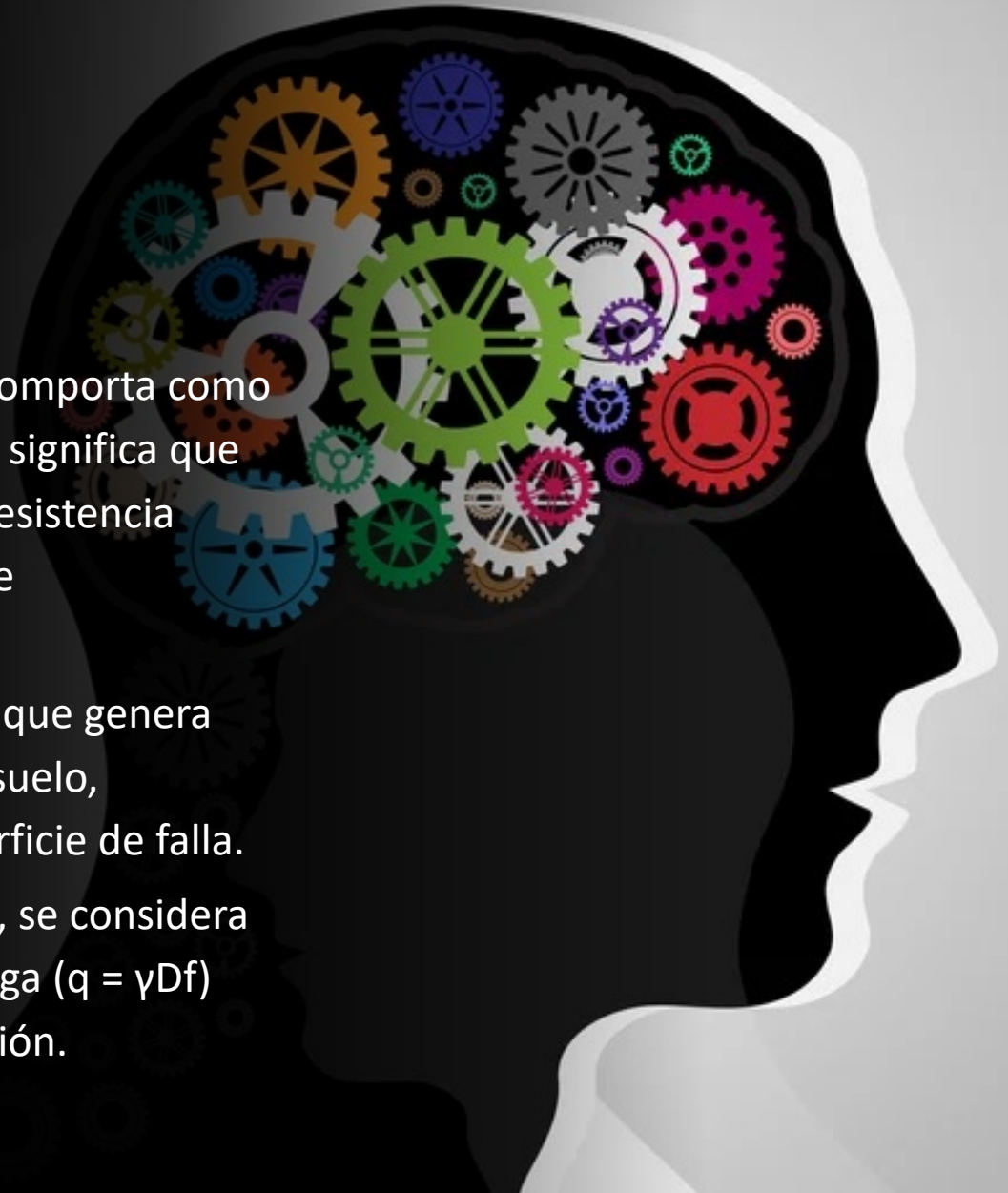
Supuestos Teóricos

1. Suelo Homogéneo e Isótropo
2. La profundidad de despante (D_f) es menor o igual al ancho de la cimentación (B).
3. Cimentación larga longitud $L \gg$ ancho B , asumiendo una falla plana en el suelo.
4. Falla por corte generalizada



Supuestos Teóricos

5. Suelo rígido-plástico, el suelo se comporta como un material rígido-plástico, lo que significa que no se deforma hasta alcanzar su resistencia máxima, momento en el cual fluye plásticamente.
6. Base de la cimentación rugosa, lo que genera fricción entre la cimentación y el suelo, influyendo en la forma de la superficie de falla.
7. Efecto del esfuerzo de sobrecarga, se considera el efecto del esfuerzo de sobrecarga ($q = \gamma D_f$) del suelo adyacente a la cimentación.

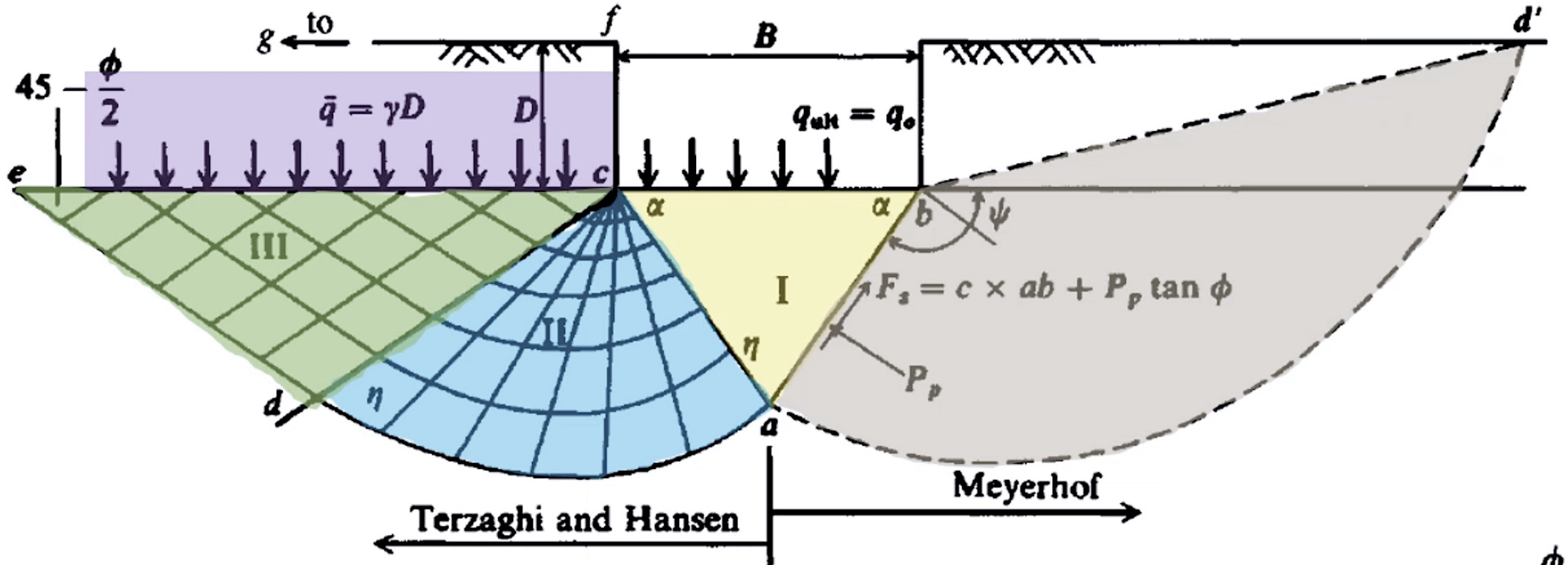


Teoría Meyerhof (1963)

Es una extensión de la teoría Terzagui, Meyerhof introdujo **factores de forma, profundidad e inclinación** de la carga en la ecuación de capacidad de carga, lo que la hace aplicable a una gama más amplia de condiciones de cimentación.



Mecanismo de falla



Foundation Analysis and Design
Joseph E. Bowles

$$\theta = \angle ace \text{ or } \angle abd'$$

$$\Psi = \angle acd \text{ or } \angle abd'$$

$$\widehat{ad} \text{ or } \widehat{ad}' = \text{log spiral for } \phi > 0$$

$$\eta = 90^\circ - \phi$$

For Hansen, Meyerhof: $\alpha = 45 + \frac{\phi}{2}$

Terzaghi: $\alpha = \phi$

Meyerhof consideró que la superficie de falla se extiende por encima del nivel de la base de la cimentación, lo que implica que la resistencia al corte del suelo ubicado encima de este nivel contribuye a la capacidad de carga

Ecuación general de capacidad de carga última

$$q_u = cN_cF_{cs}F_{cd}F_{ci} + qN_qF_{qs}F_{qd}F_{qi} + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma F_{\gamma s}F_{\gamma d}F_{\gamma i}$$

Donde:

q_u : capacidad de carga última del suelo.

c : cohesión del suelo.

q : esfuerzo de sobrecarga a nivel de la base de la cimentación. $q = \gamma D_f$

γ : peso unitario del suelo.

B : ancho de la cimentación.

D_f : profundidad de desplante



Factores ecuación general

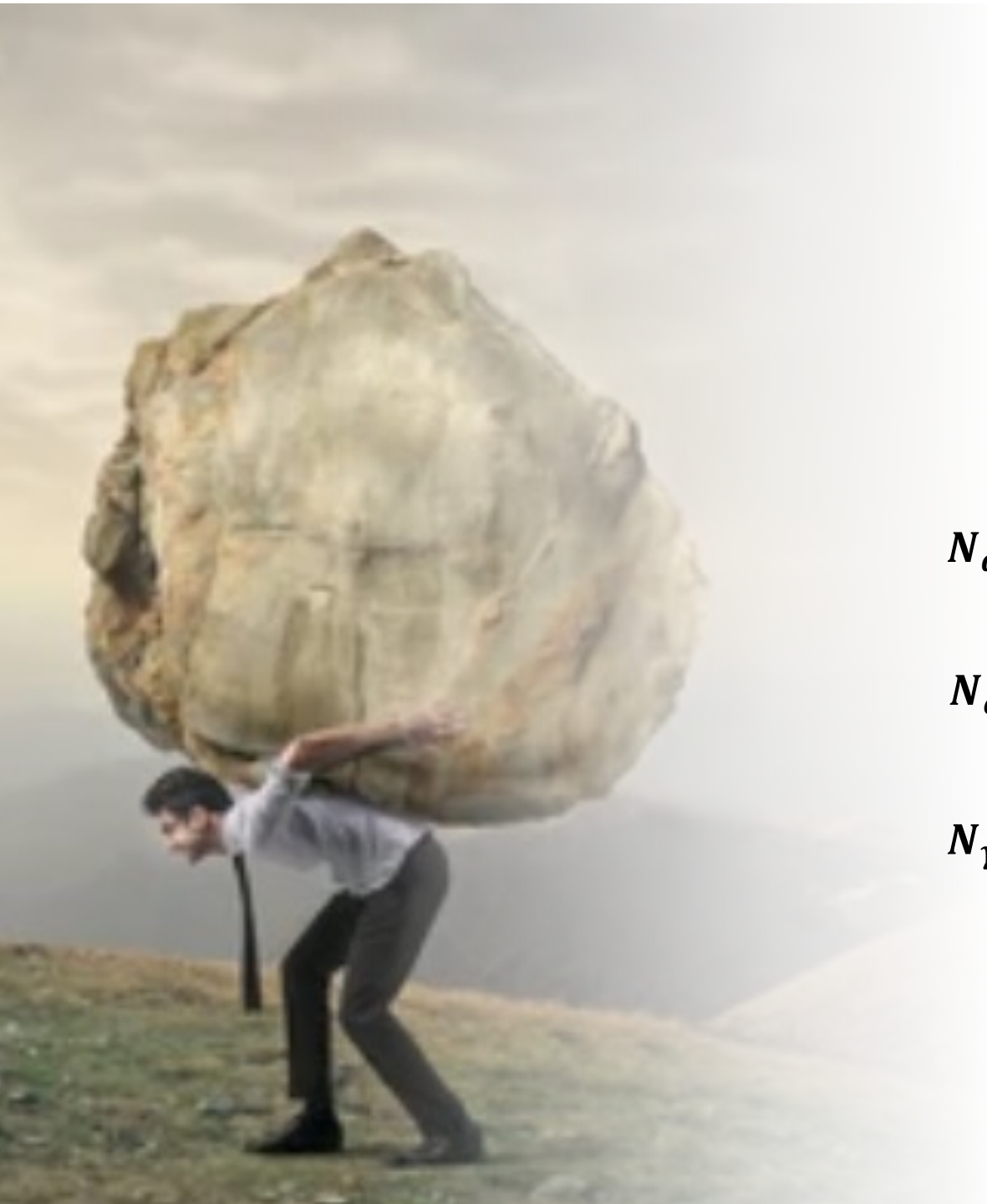
N_c, N_q, N_γ : Factores de capacidad de carga de Meyerhof, que dependen del ángulo de fricción interna del suelo (φ).

$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$: Factores de forma, que dependen de la relación largo/ancho de la cimentación (L/B).

$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$: Factores de profundidad, que dependen de la relación profundidad de desplante/ancho de la cimentación (D_f/B).

$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$: Factores de inclinación de la carga, que dependen de la inclinación de la carga aplicada.





Factores de capacidad de carga

$$N_q = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) e^{\pi \tan \varphi}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi$$

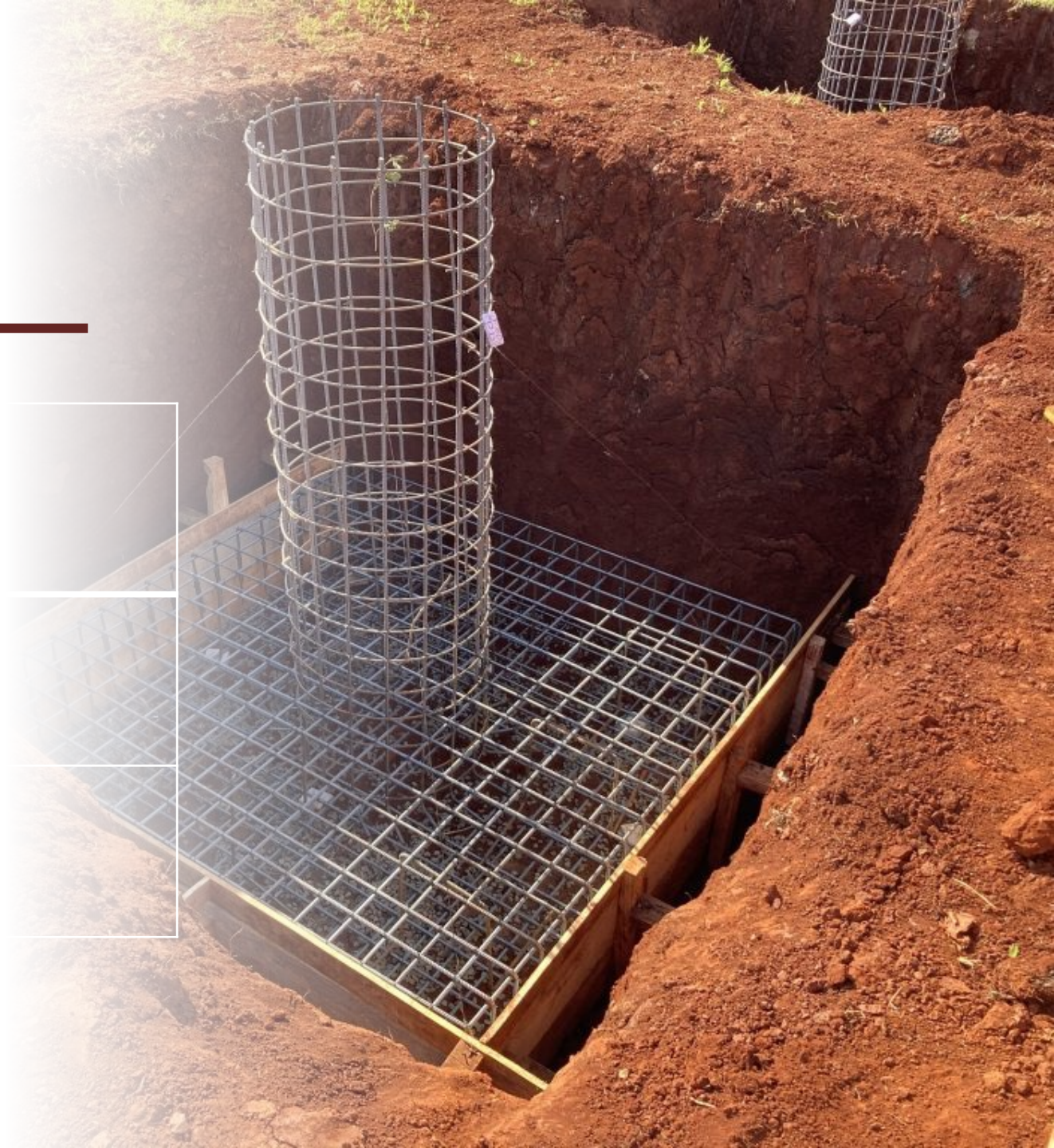
$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \varphi$$

Factores de forma

$$F_{cs} = 1 + \frac{B N_q}{L N_c}$$

$$F_{qs} = 1 + \frac{B}{L} \tan \varphi$$

$$F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \frac{B}{L}$$



$$\frac{D_f}{B} \leq 1, \quad \varphi = 0$$

$$F_{cd} = 1 + 0.4 \frac{D_f}{B}$$

$$F_{qd} = 1$$

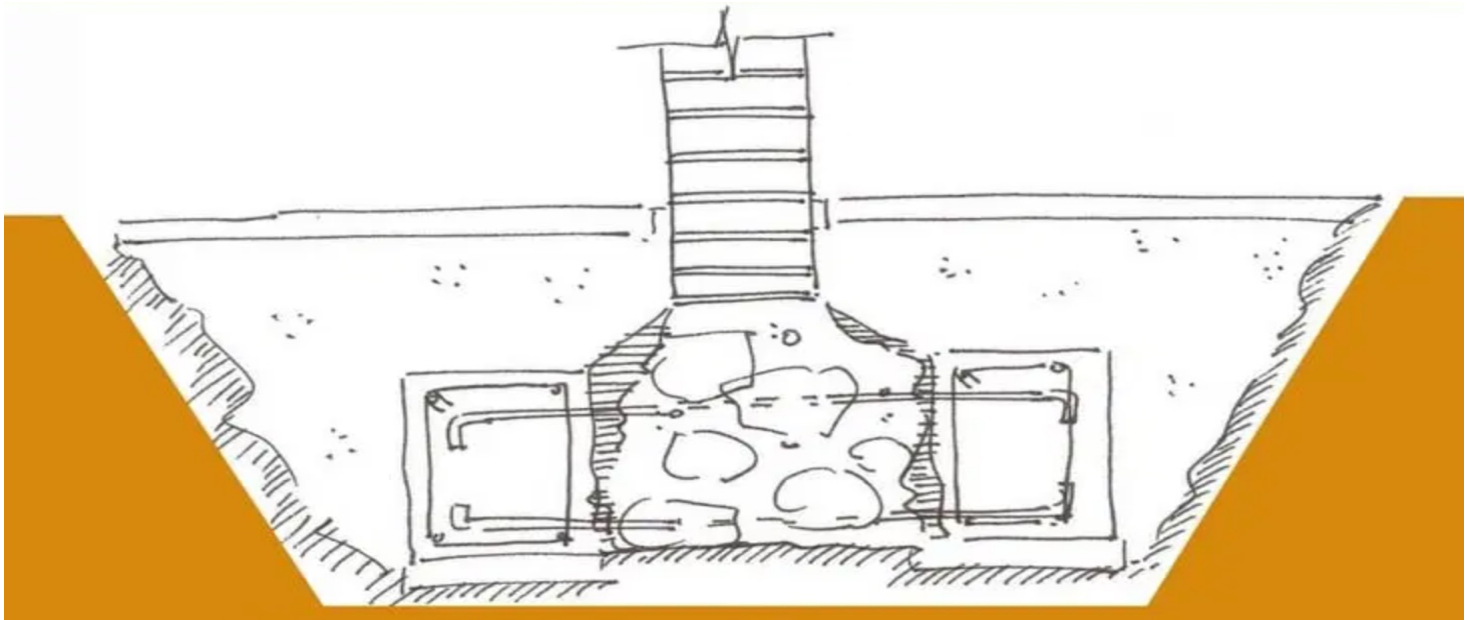
$$F_{\gamma d} = 1$$

$$\frac{D_f}{B} \leq 1, \quad \varphi > 0$$

$$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan \varphi}$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi)^2 \left(\frac{D_f}{B} \right)$$

$$F_{\gamma d} = 1$$



$$\frac{D_f}{B} > 1, \quad \varphi = 0$$

$$F_{cd} = 1 + 0.4 \tan^{-1} \left(\frac{D_f}{B} \right)$$

$$F_{qd} = 1$$

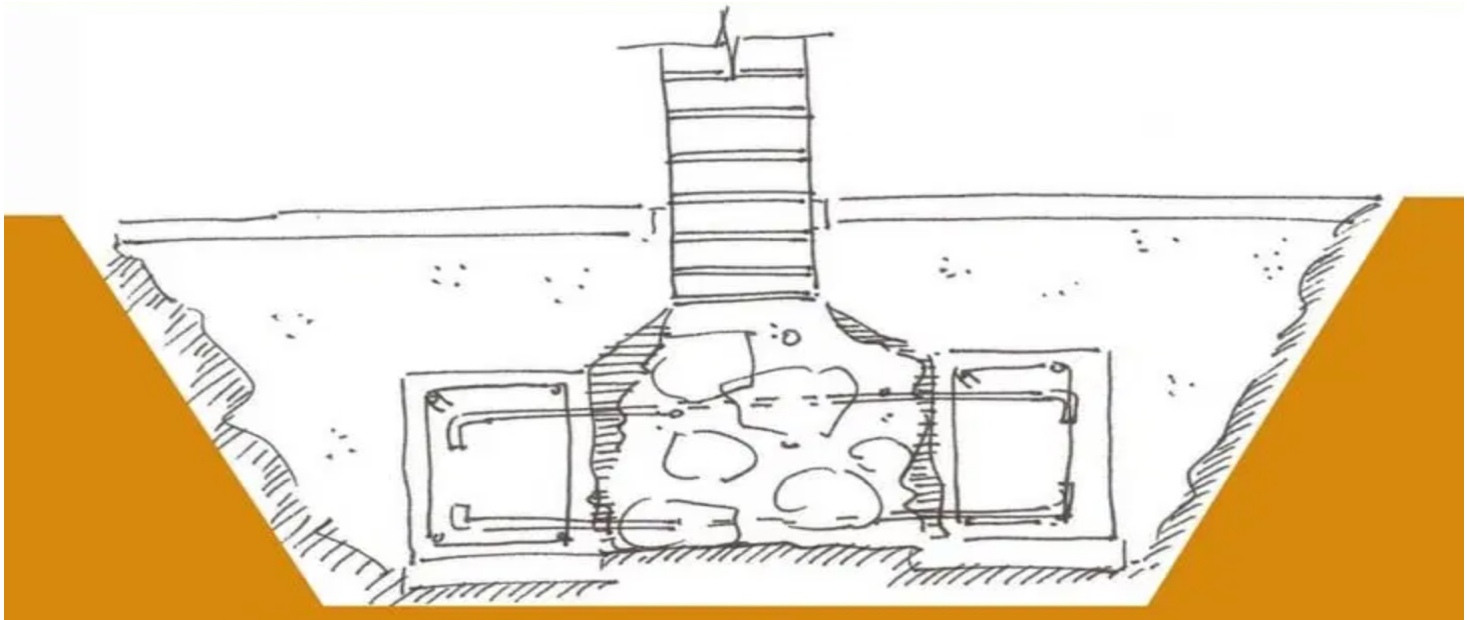
$$F_{\gamma d} = 1$$

$$\frac{D_f}{B} > 1, \quad \varphi > 0$$

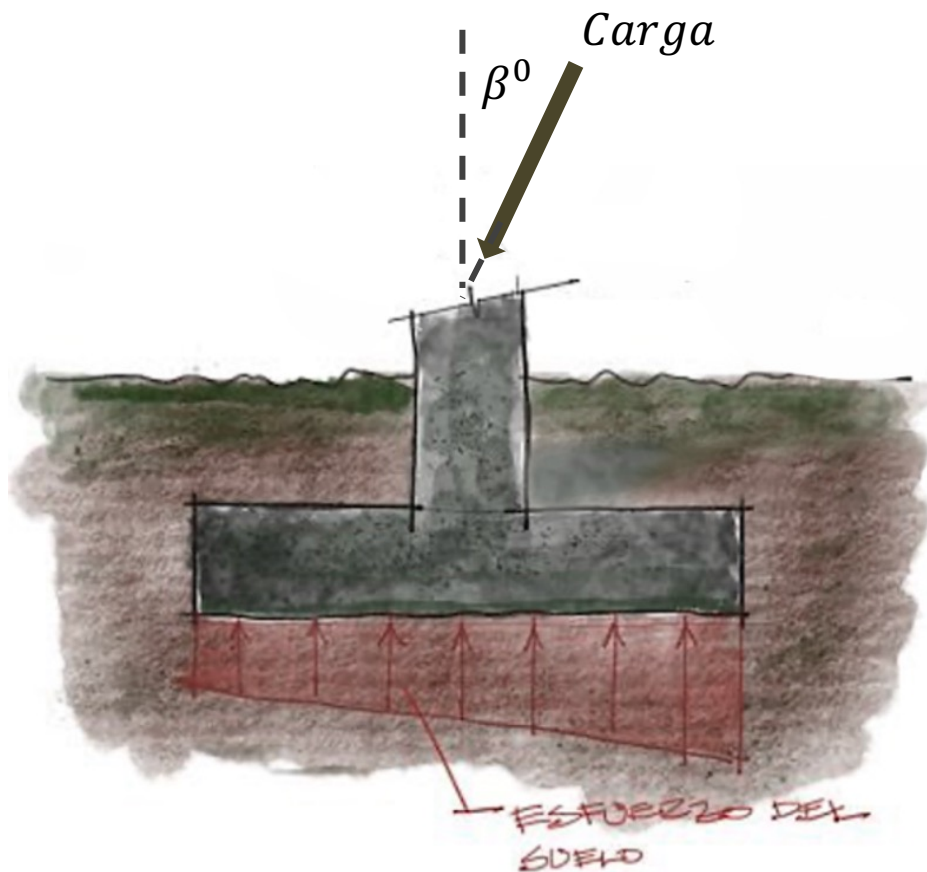
$$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan \varphi}$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi)^2 \tan^{-1} \left(\frac{D_f}{B} \right)$$

$$F_{\gamma d} = 1$$



Factores de inclinación de carga



$$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta^0}{90^0}\right)^2$$

$$F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta^0}{\varphi}\right)^2$$

β^0 : inclinación de la carga respecto a la vertical

Supuestos teóricos

- Suelo homogéneo e isótropo
- La falla del suelo ocurre por corte general, donde se desarrolla una superficie de deslizamiento continua desde los bordes de la cimentación hasta la superficie del suelo.
- La cimentación es rígida y se asienta uniformemente.
- El efecto del suelo sobre el nivel de la base de la cimentación se reemplaza por una sobrecarga vertical uniforme.
- El ángulo de fricción interna del suelo (ϕ) es constante en toda la zona de falla.



Una cimentación cuadrada tiene 1.5 m x 1.5 m en planta. El suelo que soporta la cimentación tiene un ángulo de fricción $\phi = 20$ grados y $c = 15$ kN/m². El peso específico del suelo $\gamma = 16.8$ kN/m³. La profundidad de desplante $D_f = 1.0$ m.

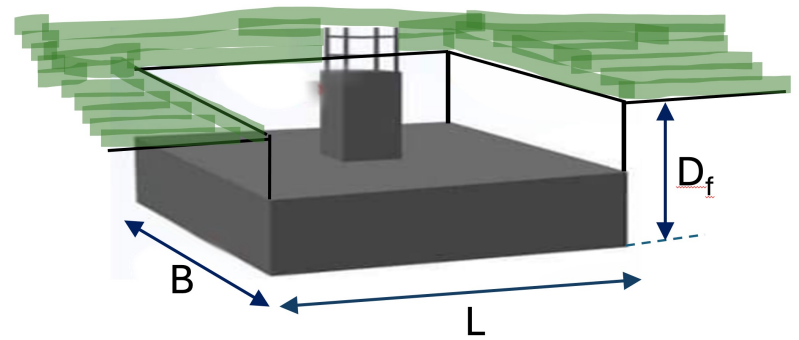
Determine:

- La capacidad de carga última por falla general del suelo (Terzagui y Meyerhof).
- La capacidad de carga última por falla local del suelo (Terzagui).
- La capacidad permisible del suelo considerando FS=4.
- Comentar lo referente a la diferencia de valores encontrados.

Ejemplo

Desarrollo del Ejemplo

Con Terzagui.



Datos del suelo

$$\gamma = 16.8 \text{ kN/m}^3$$

$$c = 15 \text{ kN/m}^2$$

$$\phi = 20^\circ$$

Datos de la cimentación

$$B = L = 1.5 \text{ m}$$

$$D_f = 1.0 \text{ m}$$

$$FS = 4$$

Para $\phi = 20^\circ$

$$N_c = 17.69 \quad N'_c = 11.85$$

$$N_q = 7.44 \quad N'_q = 3.88$$

$$N_\gamma = 3.64 \quad N'_\gamma = 1.12$$

Tabla 3.1 y 3.2. Pág. 139 y 140. (Braja, 2012).

$$q_u = 1.3cN_c + \gamma D_f N_q + 0.4\gamma B N_\gamma \text{ falla general}$$

$$q_c = 506.63 \text{ kN/m}^2$$

$$q_a = 126.65 \text{ kN/m}^2 \left(12.914 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \right)$$

$$q_u = 0.867cN'_c + \gamma D_f N'_q + 0.4\gamma B N'_\gamma \text{ falla local}$$

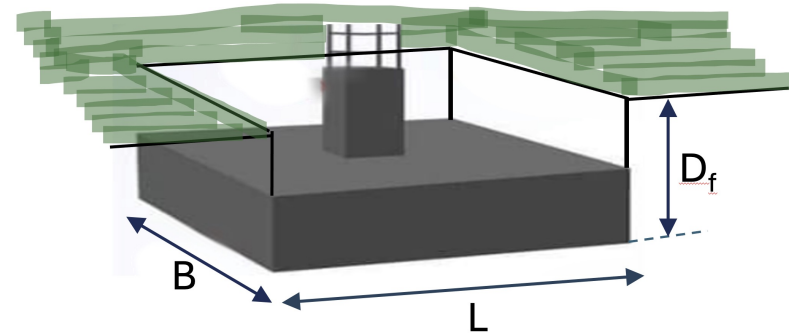
$$q_c = 230.35 \text{ kN/m}^2$$

$$q_a = 57.64 \text{ kN/m}^2 \left(5.87 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \right)$$

Desarrollo del Ejemplo

$N_c = 14.83$
 $N_q = 6.40$
 $N_\gamma = 5.39$

Con Meyerhof, falla general.



Datos del suelo

$$\gamma = 16.8 \text{ kN/m}^3$$

$$c = 15 \text{ kN/m}^2$$

$$\phi = 20^\circ$$

Datos de la cimentación

$$B = L = 1.5 \text{ m}$$

$$D_f = 1.0 \text{ m}$$

$$F_s = 4$$

Para $\phi = 20^\circ$

$$N_c = 14.83$$

$$N_q = 6.40$$

$$N_\gamma = 5.39$$

Tabla 3.3, página 144 (Braja, 2012).

$$F_{cs} = 1.4315, \quad F_{qs} = 1.3639, \quad F_{\gamma s} = 0.6.$$

$$F_{cd} = 1.2490, \quad F_{qd} = 1.2101, \quad F_{\gamma d} = 1.$$

$$F_{ci} = 1, \quad F_{qi} = 1, \quad F_{\gamma i} = 1.$$

Tabla 3.4, Factores de forma, profundidad e inclinación, página 145 (Braja, 2012).

$$q_u = c N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

Sustituyendo:

$$q_u = 615.93 \text{ kN/m}^2$$

$$q_d = 153.98 \text{ kN/m}^2 \text{ (15.69 ton/m}^2\text{)}$$

- *Causas de la diferencia en la capacidad de carga de la falla general y local*
- *Que valor seleccionarían para diseñar*
- *Valores que sean factibles en la zona del estudio de mecánica de suelos.*

El juicio experto del ingeniero geotecnista es fundamental. Para priorizar la seguridad, se considera inicialmente el menor valor de capacidad de carga admisible resultante de las teorías de Meyerhof y Terzaghi para falla general (ej., **126.65 kN/m²**). Sin embargo, este valor debe compararse con la capacidad admisible por falla local según Terzaghi; si esta última es menor (ej., **57.64 kN/m²**) y las condiciones del suelo la hacen probable, la capacidad por falla local debe regir el diseño.

Es indispensable analizar las propiedades del suelo (si es friccionante o cohesivo, su compresibilidad y densidad) para discernir el tipo de falla más probable, utilizando metodologías como las de Vesic. Aunque algunos profesionales se centren en la falla general, un diseño geotécnico integral y seguro requiere analizar la posibilidad de otros mecanismos de falla críticos.

Comentarios



Conclusiones

Juicio Experto Indispensable: La interpretación y aplicación de resultados teóricos sobre la capacidad de carga del suelo dependen crucialmente del juicio experto del ingeniero geotecnista, forjado a través de la experiencia.

Priorizar Seguridad con Criterio Conservador: Para garantizar la seguridad estructural, se debe adoptar el valor de capacidad de carga admisible más conservador que resulte de comparar diversas teorías (ej. Meyerhof y Terzaghi para falla general).

Falla Local como Condicionante Crítica: Es vital comparar la capacidad de carga por falla general con la de falla local. Si esta última es significativamente menor y las condiciones del suelo la hacen probable, la capacidad por falla local debe regir el diseño.



Conclusiones

Análisis Geotécnico Exhaustivo: Determinar el tipo de falla más probable (general, local o punzonamiento) requiere un análisis detallado de las propiedades del suelo (tipo, compresibilidad, densidad). Herramientas como las de Vesic son valiosas para esta predicción.

Diseño Integral Más Allá de Falla General: Aunque la falla general es comúnmente evaluada, un diseño geotécnico seguro y completo exige analizar todos los posibles mecanismos de falla críticos, adaptándose a las condiciones específicas del subsuelo.

BIBLIOGRAFÍA

Braja, M. D., 2012. Principios de ingeniería de cimentaciones. 7 ed. México: Cengage Learning.

Bowles, J. E., 1988. Foundation analysis and design. 4 ed. USA: McGraw-Hill.

Crespo Villalaz, C., 2008. Mecánica de suelos y cimentaciones. 6 ed. México: Limusa.

Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2001). Mecánica de suelos, (Tomo I). Limusa, México.

Meyerhof, G. G., 1963. Some recent research on the bearing capacity of foundations. Canadian Geotechnical Journal, 1(1), pp. 16-30

Terzaghi, K. V., 1943. Theoretical Soil Mechanics. 1 ed. New York: John Wiley & Sons.

Vesic, A. S., 1973. Analysis of Ultimate Loads on Shallow Foundations. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, 99(SM1), pp. 45-73.





Gracias

