



Universidad de
los Andes



**FACULTAD
DE INGENIERÍA
Y CIENCIAS
APLICADAS**

Resumen Control 2

Fundaciones

Profesor:

Felipe Saavedra

Ayudante:

Tomás Delgado

Alumnos:

Bernardo Caprile Canala-Echevarría

11 de mayo de 2025

1. Elasticidad

Introducción a la teoría de la elasticidad

La teoría de la elasticidad estudia la mecánica de los cuerpos sólidos, considerados como medios continuos.

- Bajo la acción de fuerzas aplicadas, los sólidos se deforman, es decir, cambian de forma y volumen en mayor o menor grado.
- En un cuerpo que no presenta deformación, la distribución de las moléculas corresponde a su estado de equilibrio, donde la resultante de las fuerzas que actúan es cero.

Supuestos del modelo elástico

- El suelo se modela como un medio continuo, homogéneo e isótropo.
- La relación tensión-deformación es lineal (Ley de Hooke).
- Las deformaciones son pequeñas.
- No se consideran fenómenos plásticos ni de fluencia.

Ley constitutiva en 1D

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

- σ : tensión normal (Pa)
- E : módulo de Young (Pa)
- ε : deformación unitaria (adimensional)

Ley constitutiva en 3D (forma tensorial)

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}$$

Relación esfuerzo-deformación en 2D (esfuerzo plano)

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

- ν : coeficiente de Poisson
- τ_{xy} : esfuerzo cortante (Pa)
- γ_{xy} : deformación cortante (adimensional)

Para estimar el módulo de elasticidad, se puede usar la siguiente relación:

$$E \approx 718(1 - \nu^2)N_{spt} \quad (1)$$

Para limos con arena hasta grava con arena:

$$E \approx \begin{cases} 4000 + 100C(N_{spt} - 6) & \text{for } N > 15 \\ 100C(N_{spt} - 6) & \text{for } N < 15 \end{cases} \quad (2)$$

Donde C=3 para limos con arena y C=12 para grava con arena.

2. Círculo de Mohr

Concepto

El Círculo de Mohr es una representación gráfica del estado de esfuerzos en un punto, que permite determinar de forma visual:

- Los esfuerzos principales.
- El esfuerzo cortante máximo.
- La orientación de los planos principales.

Estado de esfuerzo en 2D

- σ_x, σ_y : esfuerzos normales en las direcciones x e y .
- τ_{xy} : esfuerzo cortante sobre los planos x o y .

Centro y radio del círculo

$$C = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}, \quad R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Esfuerzos principales

$$\sigma_{1,2} = C \pm R$$

Esfuerzo cortante máximo

$$\tau_{\text{máx}} = R$$

Ángulo de orientación de los planos principales

El ángulo θ_p entre el eje x y el plano principal (en el espacio físico) se obtiene como:

$$\tan(2\theta_p) = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

Ecuaciones del círculo (paramétricas)

Para un ángulo θ dado:

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos(2\theta) + \tau_{xy} \sin(2\theta)$$

$$\tau_\theta = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin(2\theta) + \tau_{xy} \cos(2\theta)$$

Nota

En la representación gráfica, el ángulo 2θ se mide desde el eje horizontal del círculo (que representa a σ), y se gira en sentido antihorario.

2. Incrementos del esfuerzo vertical

Método de Cálculo empírico

Método de Cálculo Elástico

Carga Puntual

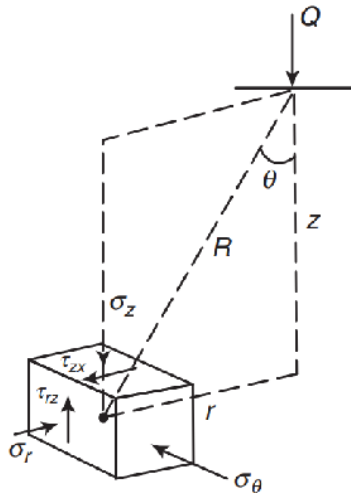


Figura 1: Esfuerzo vertical en un punto bajo una carga puntual.

El código de este caso se encuentra en el siguiente link: [Código esfuerzo puntual](#) En donde:

- Q : carga puntual (N)
- r : distancia radial al punto de interés (m)
- z : profundidad del punto de interés (m)

Carga Distribuida

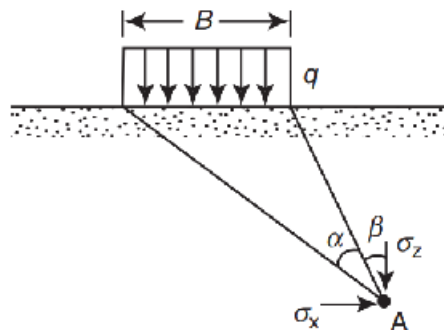


Figura 2: Esfuerzo vertical en un punto bajo una carga distribuida.

El código de este caso se encuentra en el siguiente link: [Código esfuerzo carga distribuida externa](#) En donde:

- q : carga distribuida (N/m)

Fundaciones

- a : distancia entre la carga y el punto de interés (m)
- z : profundidad del punto de interés (m)
- B : longitud de la carga distribuida (m)

En cuantos a la carga distribuida interna, el código se encuentra en el siguiente link: [Código esfuerzo carga distribuida interna](#)

En donde:

- q : carga distribuida (N/m)
- z : profundidad del punto de interés (m)
- B : longitud de la carga distribuida (m)

Distribución rectangular uniforme

Para este método, dependiendo de donde se encuentre el punto de interés, se debe dividir la fundación en partes iguales. Por ejemplo, si el punto es en el centro de la fundación, se divide en 4 partes iguales, y si el punto de interés es a un lado de la fundación, se divide en 2 partes iguales, como se muestra a continuación: Para poder calcular el esfuerzo en el punto A, se divide en 4 partes iguales, y se calcula

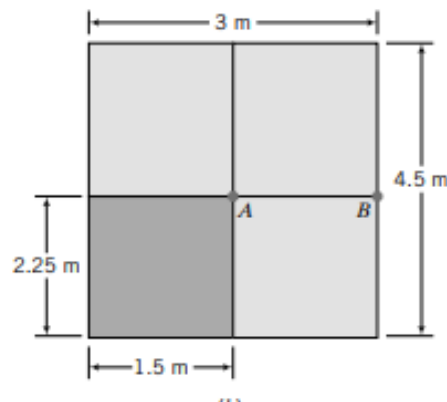


Figura 3: Esfuerzo vertical en un punto bajo una carga distribuida rectangular uniforme.

el esfuerzo en cada una de las partes, y luego se suman los esfuerzos. Mientras que en el punto B, se divide en 2 partes iguales, y se calcula el esfuerzo en cada una de las partes, y luego se suman los esfuerzos.

El código de este caso se encuentra en el siguiente link: [Código esfuerzo carga distribuida rectangular uniforme](#)

Distribución circular uniforme

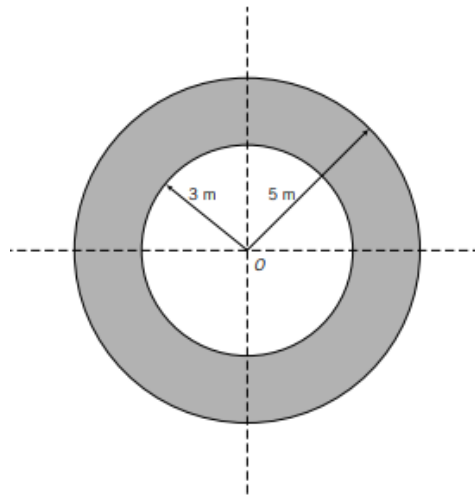


Figura 4: Esfuerzo vertical en un punto bajo una carga distribuida circular uniforme.

El código de este caso se encuentra en el siguiente link: [Código esfuerzo carga distribuida circular uniforme](#)

Terraplen

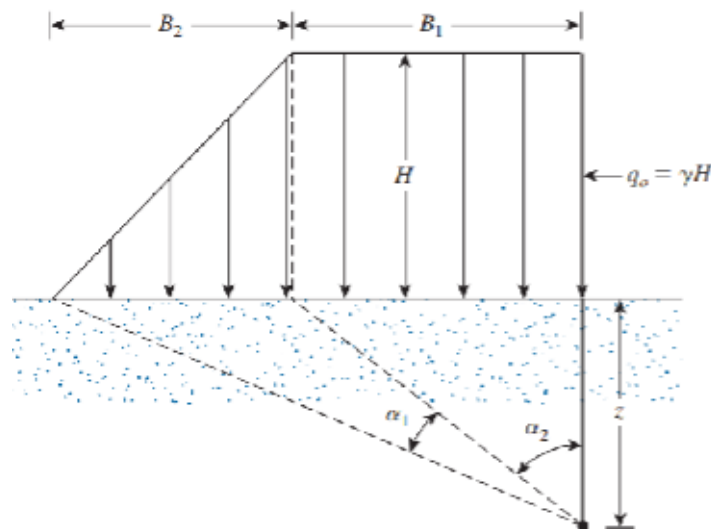


Figura 5: Esfuerzo vertical en un punto bajo una carga distribuida de terraplen.

Este código se encuentra en el siguiente link: [Código esfuerzo terraplen](#)
En donde:

- q : carga distribuida (N/m)
- z : profundidad del punto de interés (m)

- B_1 : longitud de la base del terraplen (m)
- B_2 : longitud de la carga triangular (m)

3. Asentamiento de la fundación

Tipos de asentamientos en arenas

- **Asentamiento inmediato (elástico)**
- **Asentamiento consolidado (primaria)**: Es instantánea
- **Asentamiento secundario**: Es muy baja en general

Tipos de asentamientos en arcillas

- **Asentamiento inmediato (elástico)**: Tería elástica
- **Asentamiento consolidado (primaria)**: Consolidación
- **Asentamiento secundario**: Creep

En arcillas también se presentan asentamientos elásticos. Sin embargo, los asentamientos por consolidación primaria son los más significativos y se estiman a través de la teoría de consolidación de Terzaghi. Además, para estimar la consolidación es necesario conocer los parámetros C_c y C_s , los cuales se obtienen del ensayo de tensión- deformación en el Odómetro.

Forma general

Según la forma general se ocupan 2 ábacos:

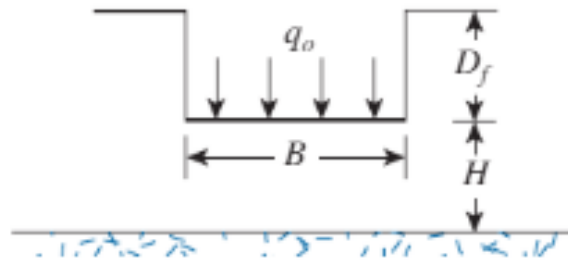


Figura 6: Figura de asentamiento.

Se tiene que utilizar la siguiente fórmula para poder calcular el asentamiento:

$$S_e = A_1 \cdot A_2 \frac{q_0 B}{E_s} \rightarrow S_e = A_1 \cdot A_2 \frac{q_0 B (1 - \mu^2)}{E_s} \rightarrow \mu_0 \cdot \mu_1 \cdot \frac{q B}{E_s} \cdot (1 - \mu^2)$$

- S_e : Asentamiento elástico (m)
- A_1 : Coeficiente de asentamiento (m)
- A_2 : Coeficiente de asentamiento (m)
- q_0 : Carga aplicada (kN/m²)
- B : Ancho de la fundación (m)
- E_s : Módulo de elasticidad del suelo (kN/m²)

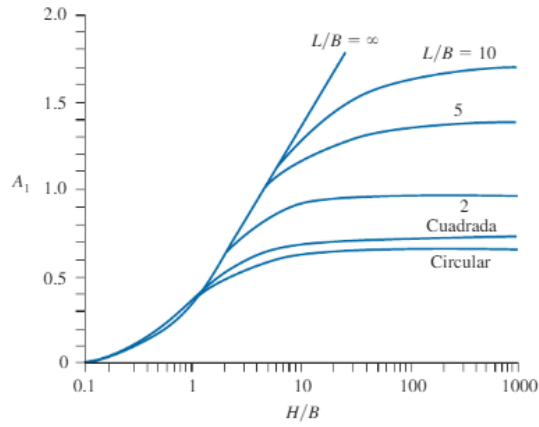


Figura 7: Ábaco de asentamiento A_1 y μ_1 .

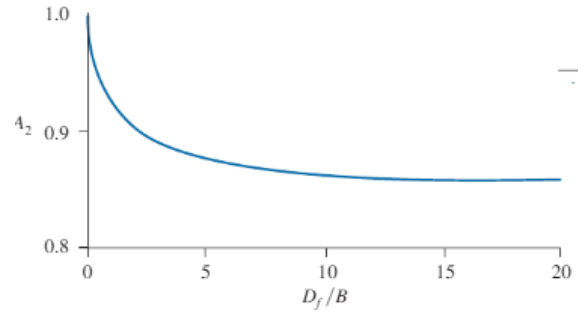


Figura 8: Ábaco de asentamiento A_2 .

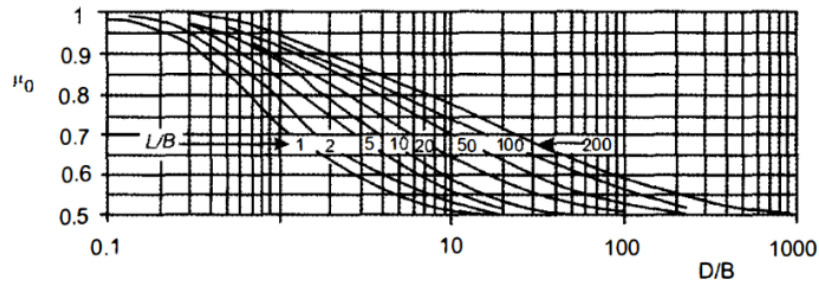


Figura 9: Ábaco de asentamiento μ_0 .

Además, de la teoría elástica, se sabe que:

$$\Delta l = \frac{q\alpha B}{E} \quad E_s = \frac{\sum E_{si} \cdot \Delta z}{z'} \rightarrow \text{Donde } z' \text{ es } H \text{ o } 5B, \text{ el que sea menor}$$

Donde α es el coeficiente de asentamiento, que depende del tipo de suelo y de la carga aplicada.

Shape	Flexible			Rigid
	Centre	Corner	Average	
Circle	1.00	0.64	0.85	0.80
Rectangle				—
1.0	1.12	0.56	0.95	0.90
1.5	1.36	0.68	1.20	1.09
2.0	1.53	0.77	1.31	1.22
5.0	2.10	1.05	1.83	1.68
10.0	2.52	1.26	2.25	2.02
100.0	3.38	1.69	2.96	2.70

Cuadro 1: Settlement influence factors for different footing shapes and rigidity conditions.

$$S_e = qB \frac{1 - \mu^2}{E_s} \cdot I_f \quad \text{Leonards(1962), Tabla 1}$$

4. Fundaciones superficiales

Cómo la relación entre profundidad de enterramiento y el ancho de zapata definen la manera en que se abordan los problemas de fundaciones en suelo?

- Cuando $D < B$: Fundación superficial
- Cuando $D > B$: Fundación no superficial

Ventajas:

- Menor costo
- Sencillas de construir
- Permiten inspección del terreno

Dónde NO usar fundaciones superficiales:

- Terrenos con alta compresibilidad
- Suelos orgánicos
- Terrenos expansivos
 - Asentamientos excesivos
 - Asentamientos diferenciales

Criterios para el diseño de una fundación

Los siguientes aspectos deben ser considerados al diseñar una cimentación adecuada:

- **Cargas estructurales:** magnitud, distribución y naturaleza de las cargas que la estructura transmitirá al suelo.
- **Características del suelo de fundación:** conocimiento del tipo de suelo, perfil estratigráfico, parámetros geotécnicos y nivel freático.
- **Asentamiento tolerable:** deformación vertical máxima admisible sin afectar el comportamiento estructural o funcional de la obra.
- **Capacidad de soporte del suelo:** verificación de que el suelo tiene resistencia al corte suficiente para evitar falla por hundimiento o deslizamiento.

Tipos de fundaciones superficiales

La elección entre una fundación u otra debe ser consultada por un ingeniero geotécnico, considerando la capacidad del suelo, el tipo de suelo, la susceptibilidad del suelo ante deflexiones, etc. Los tipos de fundaciones más comunes son continua, aislada y combinada.

- **Fundación continua ($L/B > 10$):** Se utiliza para estructuras lineales, como muros de contención o edificios con paredes continuas. Distribuye la carga a lo largo de una línea.
- **Vigas de amarre:** Se utilizan para columnas a más de 7 metros de distancia, cuando existen momentos grandes y asentamiento diferenciales grandes
- **Fundación combinada:** Se utiliza cuando las cargas de dos o más columnas son cercanas entre sí y se combinan en una sola base.
- **Losa de Fundación:** Se utiliza para estructuras grandes o pesadas, como edificios de varios pisos. Distribuye la carga en una gran área. Espesor no mayor a 1 metro.

Construcción de fundaciones superficiales

- **Excavación:** Se excava el terreno hasta la profundidad deseada, asegurando que el fondo de la excavación esté nivelado y libre de escombros.
- **Sello de fundación:** Se coloca un sello de fundación, que puede ser de hormigón pobre o de material granular, para proporcionar una base uniforme y estable.
- **Recubrimiento de hormigón pobre:** Se coloca una capa de hormigón pobre sobre el sello de fundación para protegerlo y proporcionar una superficie de apoyo.
- **Moldaje y enfierradura:** Se instalan los moldes y la armadura de acero según el diseño estructural. La armadura debe estar correctamente posicionada y anclada.
- **Hormigón y curado:** Se vierte el hormigón en los moldes y se compacta adecuadamente. Después de verter, se debe curar el hormigón para asegurar su resistencia y durabilidad.
- **Relleno estructural:** Una vez que el hormigón ha alcanzado la resistencia adecuada, se puede proceder a rellenar el área alrededor de la fundación con material adecuado, como tierra o grava.

A inspeccionar

- Aspectos Legales/Planos
- Profundidad de la base
- Tipo de suelo de fundación
- Limpiar antes de hormigonar
- Chequeo de dimensiones
- Chequeo de espesores
- Chequeo de conexiones
- Hormigoneo de fundaciones
- Tiempo de hormigones
- Integridad después de hormigonar

Criterios de desempeño

Para un buen desempeño, una fundación debe cumplir con los siguientes requisitos:

- No debe experimentar desplazamientos ni asentamientos excesivos que puedan comprometer la funcionalidad o estabilidad de la estructura.
- Debe ser segura frente a la falla general por corte del suelo que la sostiene, lo que se evalúa mediante la **capacidad de soporte** (resistencia al corte).

Naturaleza de la falla por capacidad de carga

Existen distintas formas de falla del suelo según sus características y condiciones de carga. Las principales son:

- **Falla general por corte:** ocurre en suelos densos o cementados, donde se forma una superficie de rotura bien definida. La carga-deformación presenta un claro pico.
- **Falla por punzonamiento:** se presenta en suelos muy rígidos o cuando el área de la zapata es pequeña; la fundación "perfora" el suelo sin generar desplazamientos laterales apreciables.

- **Falla local por corte:** típica en suelos sueltos o con baja cohesión. No se genera una superficie de falla bien definida y la deformación ocurre progresivamente.

Se denomina q_u a la **capacidad última de soporte**, es decir, la máxima carga por unidad de área que el suelo puede resistir antes de fallar. En suelos medianamente sueltos o sueltos, puede observarse una primera carga de falla conocida como $q_{u(1)}$, que representa el primer punto en que se manifiesta una inestabilidad localizada antes de alcanzar la carga última q_u .

Falla general por corte

Una **falla general** se caracteriza por el desarrollo completo de superficies de rotura, permitiendo que la falla alcance la superficie del terreno. Se produce un deslizamiento relativo a lo largo de todo el plano de falla.

En el contexto de fundaciones, este tipo de falla ocurre cuando se supera la **capacidad última de soporte** del suelo (q_u).

- Es típica en suelos de arena densa, cohesivos o firmes.
- La falla es repentina y catastrófica (comportamiento frágil), y se representa con un valor peak bien definido de q_u .
- El patrón de falla es claramente identificable, con las tres zonas de rotura bien desarrolladas.
- En la curva de asentamiento versus carga, el valor de q_u se distingue de forma clara como un máximo.

Falla local por corte

La **falla local** ocurre cuando se desarrolla parcialmente la superficie de rotura, generalmente acompañada de deformaciones plásticas en el suelo. A diferencia de la falla general, el plano de falla no alcanza la superficie, aunque puede existir cierto deslizamiento relativo entre planos internos del terreno.

- Es típica en suelos arenosos o arcillosos medianamente compactados.
- En la primera carga de falla ($q_{u(1)}$), se perciben sacudidas repentinas en el sistema.
- Representa un estado de transición entre la falla general y la falla por punzonamiento.
- El valor de q_u no se distingue claramente en el gráfico de asentamiento versus carga.

Falla por punzonamiento

La **falla por punzonamiento** se presenta cuando se produce una densificación localizada del suelo, acompañada de una distorsión vertical debido a la aplicación de la carga. No se desarrollan superficies de falla definidas. En fundaciones, este fenómeno se manifiesta como un desplazamiento vertical significativo sin una rotura completa del medio.

- Es típica en suelos muy sueltos o no cohesivos.
- En la primera carga de falla ($q_{u(1)}$), se generan asentamientos grandes; el gráfico carga-asentamiento es muy pronunciado y presenta una tendencia casi lineal.
- El patrón de falla es poco definido.
- El valor de $q_{u(1)}$ no se identifica con claridad. La curva es más suave en comparación con la falla local.

Teoría de la capacidad de carga de Terzaghi

La teoría de Terzaghi permite estimar la capacidad última de soporte (q_u) de fundaciones superficiales en suelos. Esta teoría es aplicable a zapatas apoyadas sobre suelos homogéneos, secos, sin estratificación significativa y con comportamiento plástico o friccional.

Supuestos principales

- El suelo es homogéneo, isotrópico y semiinfinito.
- El plano de falla es bien definido (falla general por corte).
- La fundación es superficial (zapata continua o rectangular).
- El contacto entre la fundación y el suelo es rugoso (adhesión completa).
- La carga es vertical, centrada y estática.

Fórmula general de Terzaghi (zapata continua)

$$q_u = c \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q + 0,5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

- q_u : capacidad última de soporte (kPa)
- c : cohesión del suelo (kPa)
- γ : peso unitario del suelo (kN/m³)
- D_f : profundidad de desplante de la zapata (m)
- B : ancho de la zapata (m)
- N_c, N_q, N_γ : factores de capacidad de carga (dependen de ϕ)

Factores de capacidad de carga (para $\phi > 0$)

Los factores de capacidad de carga N_c , N_q y N_γ se definen mediante las siguientes expresiones:

$$N_c = \cot \phi' \left[\frac{e^{2(3\pi/4 - \phi'/2) \tan \phi'} - 1}{2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} \right)} \right] = \cot \phi' (N_q - 1) \quad (3)$$

$$N_q = \frac{e^{2(3\pi/4 - \phi'/2) \tan \phi'}}{2 \cos^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right)} \quad (4)$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{K_{pry}}{\cos^2 \phi'} - 1 \right) \tan \phi' \quad (5)$$

Consideraciones prácticas

- En suelos puramente cohesivos ($\phi = 0$), se anulan los términos con N_q y N_γ .
- Para zapatas rectangulares o cuadradas, se aplican factores de forma.
- Para obtener la capacidad admisible (q_{adm}), se divide q_u por un factor de seguridad (FS):

$$q_{adm} = \frac{q_u}{FS}$$

Tabla de factores de capacidad de carga

Factores de Capacidad de Carga de Terzaghi

ϕ'	N_c	N_q	N_γ^a	ϕ'	N_c	N_q	N_γ^a
0	5.70	1.00	0.00	26	27.09	14.21	9.84
1	6.00	1.10	0.01	27	29.24	15.90	11.60
2	6.30	1.22	0.04	28	31.61	17.81	13.70
3	6.62	1.35	0.06	29	34.24	19.98	16.18
4	6.97	1.49	0.10	30	37.16	22.46	19.13
5	7.34	1.64	0.14	31	40.41	25.28	22.65
6	7.73	1.81	0.20	32	44.04	28.52	26.87
7	8.15	2.00	0.27	33	48.09	32.23	31.94
8	8.60	2.21	0.35	34	52.64	36.50	38.04
9	9.09	2.44	0.44	35	57.75	41.44	45.41
10	9.61	2.69	0.56	36	63.53	47.16	54.36
11	10.16	2.98	0.69	37	70.01	53.80	65.27
12	10.76	3.29	0.85	38	77.50	61.55	78.61
13	11.41	3.63	1.04	39	85.97	70.61	95.03
14	12.11	4.02	1.26	40	95.66	81.27	115.31
15	12.86	4.45	1.52	41	106.81	93.85	140.51
16	13.68	4.92	1.82	42	119.67	108.75	171.99
17	14.60	5.45	2.18	43	134.58	126.50	211.56
18	15.12	6.04	2.59	44	151.95	147.74	261.60
19	16.56	6.70	3.07	45	172.28	173.28	325.34
20	17.69	7.44	3.64	46	196.22	204.19	407.11
21	18.92	8.26	4.31	47	224.55	241.80	512.84
22	20.27	9.19	5.09	48	258.28	287.85	650.67
23	21.75	10.23	6.00	49	298.71	344.63	831.99
24	23.36	11.40	7.08	50	347.50	415.14	1072.80
25	25.13	12.72	8.34				

Figura 10: Factores de capacidad de carga de Terzaghi.