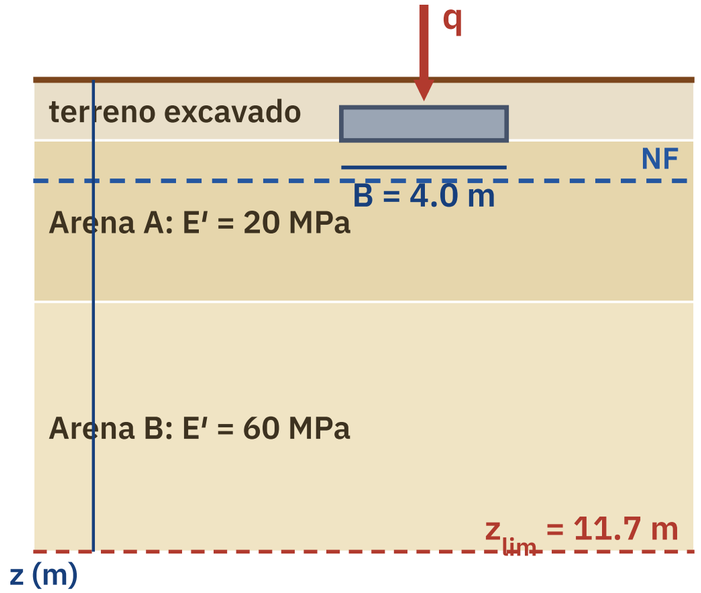
Presentación de clase de geotecnia · Asentamientos

Asentamiento elástico: suelo granular

Clase: de la teoría de la elasticidad a los coeficientes de Steinbrenner, del perfil estratificado a la cimentación flexible y rígida; los estratos de arena y grava se comportan en condiciones drenadas (E′, ν′); ejemplo resuelto en cada tema.

- Ley de Hooke
- Coeficientes de Steinbrenner
- Perfil estratificado
- Presión neta
- Cimentación flexible y rígida
- Ejemplos resueltos



Se basa en la página de teoría de GeoTerva · geoterva.com

Introducción

¿Qué aprenderemos en esta clase?

De la ley de Hooke a la integral del asentamiento: $\varepsilon_z = [\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)]/E$ y $S = \int \varepsilon_z \, dz$

Calcular los **coeficientes de Steinbrenner** (F_1, F_2, I_s) y determinar el asentamiento en el **centro** y en la **esquina** de una zapata rectangular

Tratar los estratos granulares como **drenados**: $E'/p_a = \alpha \, N_{60}$, $\nu' \approx 0.25–0.35$

Sumar el **perfil estratificado** mediante la diferencia $I_s(z_{inf}) - I_s(z_{sup})$

Determinar la **presión neta** (efecto de la excavación) y la **profundidad de cálculo** (profundidad de influencia)

Distinguir el asentamiento de una cimentación **flexible** y el de una **rígida** (rígida ≈ 0.93 × centro de la flexible)

DESARROLLO DE LA CLASE

Cada tema se desarrolla en **tres pasos**:

1 · **Teoría**: ¿cuál es la regla y por qué es así?

2 · **Enunciado**: datos y se pide

3 · **Solución**: paso a paso, con números

Cimentación del ejemplo: zapata rectangular flexible de 4 m × 6 m, q = 180 kPa, profundidad de excavación 1.5 m, nivel freático a 2.5 m; estrato de arena. Los asentamientos se dan en mm.

¿Qué calcula este módulo?

TEORÍA

Este módulo trata **solo los estratos granulares** (arena, grava) y calcula el **asentamiento elástico**: como la arena expulsa el agua de inmediato, todo su asentamiento es elástico.

A partir de las tensiones de **Boussinesq** del terreno bajo carga se obtiene la deformación **mediante la ley de Hooke**, y la integral de la deformación es el asentamiento.

El asentamiento inmediato de los estratos de arcilla se encuentra en el módulo Asentamiento elástico: suelos cohesivos, la consolidación en el módulo Consolidación y la suma de todos en el módulo Asentamiento total.

La solución es **analítica**: factores de influencia en forma cerrada y suma estrato a estrato; no hay elementos finitos.

Fuera de su alcance: método de Schmertmann, ábacos SPT/CPT, módulo creciente con la profundidad (Mayne–Poulos), rigidez de la cimentación e interacción suelo–estructura.

TIPO DE ESTRATO

	Granular
Comportamiento	drenado
E	E' (p. ej., αN_{60})
v	0.25 – 0.35

Ley de Hooke e integral del asentamiento

TEORÍA

Bajo una cimentación **perfectamente flexible** que transmite una presión neta q_{net}, el terreno es un medio elástico homogéneo semiinfinito (tensiones de Boussinesq). La ley de Hooke da la deformación vertical y su integral, el asentamiento:

$$S = \int \varepsilon_z \, dz = \int \frac{\Delta\sigma_z - \nu\,(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E}\, dz$$

Las tensiones laterales dependen de ν; por ello la deformación y el asentamiento varían con **E y con ν**.

Cuanto mayor es ν, las tensiones laterales **reducen** la deformación vertical: con el mismo E, un suelo con ν = 0.5 se asienta menos que otro con ν = 0.3.

El asentamiento es **inversamente proporcional** a E: duplicar el módulo de elasticidad reduce el asentamiento a la mitad.

NOTACIÓN

q_{net}: presión neta (aplicada tras la excavación)

$\Delta\sigma_z$, $\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_y$: incrementos de tensión

E, ν: constantes elásticas del estrato

ε_z: deformación vertical (compresión +)

Enunciado

EJEMPLO

Datos

Incremento de tensión	$\Delta\sigma_z = 100\ \text{kPa},\ \Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = 40\ \text{kPa}$
Suelo	$E' = 20\ \text{MPa},\ \nu' = 0.30$
Dovela	**espesor 1.0 m**

SE PIDE

Determinar la deformación vertical y la compresión del subestrato; compararlas con la hipótesis v = 0 (unidimensional).

Solución

SOLUCIÓN

1 Deformación vertical

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E} = \frac{100 - 0.30(40 + 40)}{20{,}000} = \frac{76.0}{20{,}000} = \mathbf{0.00380}$$

2 Compresión del subestrato (H = 1.0 m)

$$\Delta S = \varepsilon_z H = 0.00380(1.0) = \mathbf{3.80}\ \text{mm}$$

3 Comparación: v = 0

$$\varepsilon_z = \frac{100}{20{,}000} = 0.00500 \ \Rightarrow\ \Delta S = 5.00\ \text{mm}$$

Las tensiones laterales (v = 0.30) reducen la deformación un **24%**: 3.80 mm, frente a 5.00 mm del caso unidimensional.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Solución cerrada para la esquina

TEORÍA

Para la **esquina** de un rectángulo con carga uniforme la integral tiene solución cerrada (Steinbrenner):

$$S = q_{net}\,\alpha\,B'\,\frac{1-\nu^2}{E}\,I_s \qquad I_s = F_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu}\,F_2$$

$$F_1 = \frac{A_0 + A_1}{\pi} \qquad F_2 = \frac{n'}{2\pi}\tan^{-1} A_2$$

m′ = L′/B′ y n′ = z/B′ (B′ es el lado corto del rectángulo de esquina). El **centro** es la esquina de cuatro rectángulos (B/2 × L/2): α = 4, B′ = B/2. La **esquina** es la esquina del rectángulo completo: α = 1, B′ = B. Cualquier otro punto es la suma con signo de los cuatro rectángulos que tienen una esquina en ese punto.

> Para v = 0.5, (1 − 2v) = 0: **$I_s = F_1$** y (1 − v²) = 0.75.

NOTACIÓN

α: número de rectángulos de esquina (4 en el centro, 1 en la esquina)
B′: lado corto del rectángulo de esquina
m′ = L′/B′, n′ = z/B′
z: profundidad desde el nivel de la cimentación
I_s: factor de forma

A_0, A_1, A_2 y el límite de la franja

TEORÍA

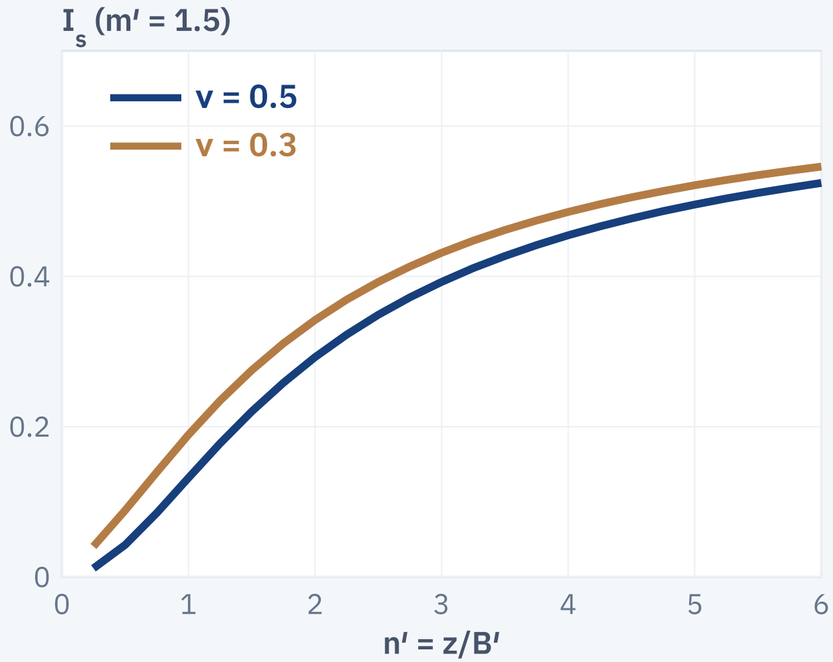
$$A_0 = m' \ln \frac{\left(1+\sqrt{m'^2+1}\right)\sqrt{m'^2+n'^2}}{m'\left(1+\sqrt{m'^2+n'^2+1}\right)}$$

$$A_1 = \ln \frac{\left(m'+\sqrt{m'^2+1}\right)\sqrt{1+n'^2}}{m'+\sqrt{m'^2+n'^2+1}} \qquad A_2 = \frac{m'}{n'\sqrt{m'^2+n'^2+1}}$$

Franja ($m' \to \infty$): $F_1 = \ln(1+n'^2)/2\pi$ y $F_2 = (n'/2\pi)\tan^{-1}(1/n')$; en su borde $\alpha = 2$, $B' = B$.

El motor calcula directamente las fórmulas; no se necesitan ábacos ni tablas redondeadas.

I_s aumenta con la profundidad y **se satura lentamente**: la contribución de los estratos profundos es limitada (en el lateral $m' = 1.5$).



Enunciado

EJEMPLO

Datos

Cimentación	**B × L = 4 × 6 m, a una profundidad z′ = 4 m bajo el centro (desde el nivel de la cimentación)**
Rectángulo de esquina	**B/2 × L/2 = 2 × 3 m ⇒ B′ = 2 m, m′ = 1.5, n′ = z′/B′ = 2.0**
Suelo	$\nu' = 0.30$

SE PIDE

Determinar los valores de **A_0, A_1, A_2, F_1, F_2** e **I_s**.

Solución

SOLUCIÓN

1 A_0, A_1, A_2 (raíces cuadradas: $\sqrt{(m'^2+1)} = 1.8028$; $\sqrt{(m'^2+n'^2)} = 2.5000$; $\sqrt{(m'^2+n'^2+1)} = 2.6926$)

$$A_0 = 1.5 \ln \frac{(1+1.8028)(2.5000)}{1.5(1+2.6926)} = \mathbf{0.3527} \qquad A_1 = \ln \frac{(1.5+1.8028)\sqrt{5}}{1.5+2.6926} = \mathbf{0.5662}$$

$$A_2 = \frac{1.5}{2(2.6926)} = \mathbf{0.2785}$$

2 F_1, F_2 e I_s

$$F_1 = \frac{0.3527+0.5662}{\pi} = \mathbf{0.2925} \qquad F_2 = \frac{2}{2\pi}\tan^{-1}(0.2785) = \mathbf{0.0865}$$

$$I_s = F_1 + \frac{1-2(0.30)}{1-0.30} F_2 = \mathbf{0.3419}$$

$I_s = F_1 + 0.5714\, F_2 =$ **0.3419**; si $\nu' = 0.5$, quedaría $F_1 = 0.2925$ (un 14% menos).

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Módulo de elasticidad drenado E′ y ν′

TEORÍA

Como la arena libera su agua de inmediato, se comporta de forma drenada; su asentamiento es íntegramente elástico. En la fuente (Das), el módulo de elasticidad de la arena se obtiene del SPT con **$E'/p_a = \alpha\, N_{60}$** ($p_a \approx 100$ kPa):

$$\frac{E'}{p_a} = \alpha\, N_{60} \qquad \alpha = 5\ \text{(arena de grano fino)}\ \ 10\ \text{(NC limpia)}\ \ 15\ \text{(SC limpia)}$$

El módulo de la arena **aumenta** con la profundidad: dividir un estrato grueso en varios estratos con E′ creciente.

ν′ suele tomar valores de 0.25–0.35; debe cumplirse ν′ < 0.5 (en un estrato granular no puede introducirse ν′ ≥ 0.5).

El asentamiento elástico también varía con ν′: disminuye al aumentar ν′.

α PARA ARENA

α	E′ (N_{60} = 20)
5	10 MPa
10	20 MPa
15	30 MPa

Enunciado

EJEMPLO

Datos

Arena	$N_{60} = 20$, $p_a = 100$ kPa; $\alpha = 5,\ 10,\ 15$
Coeficiente de Poisson	$\nu' = 0.25;\ 0.30;\ 0.35$ **(E′ = 20 MPa)**
Referencia	**Asentamiento de un solo estrato para α = 10, v′ = 0.30: S = 29.0 mm (Ejemplo 6)**

SE PIDE

Para cada α, **E′**; asentamiento para v′ = 0.25, 0.30, 0.35 y 0.5.

Solución

SOLUCIÓN

1 $E' = \alpha N_{60} p_a$ ($N_{60} = 20$; $p_a = 100$ kPa)

$$E' = \alpha N_{60} p_a: \quad 5(20)(0.1) = \mathbf{10}\ \text{MPa},\ \ 10(20)(0.1) = \mathbf{20},\ \ 15(20)(0.1) = \mathbf{30}\ \text{MPa}$$

v′	0.25	0.30	0.35	0.50
S (mm)	30.1	29.0	27.7	22.8
$S / S_{v'=0.30}$	1.038	1.000	0.955	0.786

Cuando E′ pasa de 10 → 30 MPa, el asentamiento pasa de 58 → 19 mm (inversamente proporcional). Con v′ de 0.25 → 0.35 el asentamiento solo cambia un 8%; con v′ = 0.5 sería un 21% menor.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Primero, la excavación elimina la carga

TEORÍA

La excavación elimina la **tensión vertical efectiva debida al peso del terreno** a nivel del fondo (el nivel freático no cambia). Cuando se emplea un único módulo de elasticidad tanto para la descarga como para la recarga, el levantamiento elástico de la excavación se recupera en la recarga; el asentamiento inmediato lo determina la **presión neta**:

$$q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$$

$\sigma'_{v0}(D_{exc})$: tensión efectiva inicial en la base de la excavación (γ por encima del nivel freático, $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ por debajo).

Si $q_{net} \leq 0$ no se produce asentamiento (un valor negativo corresponde a un levantamiento elástico).

Si no hay excavación, $q_{net} = q_{gross}$ (la presión se aplica en la superficie del terreno).

NEDEN NET?

Una carga igual al peso del suelo retirado en la excavación se **devuelve** al construir la cimentación. El asentamiento del suelo se debe únicamente a la presión **añadida sobre** esta carga.

Enunciado

EJEMPLO

Datos

Carga	$q_{gross} = 180\ \mathrm{kPa}$; **profundidad de excavación** $D_{exc} = 1.5\ \mathrm{m}$
Suelo	$\gamma = 18.5\ \mathrm{kN/m^3},\ \gamma_{sat} = 19.5\ \mathrm{kN/m^3}$
NF	**(a) 2.5 m (por debajo del fondo de la excavación) · (b) 1.0 m (por encima del fondo de la excavación)**

SE PIDE

Determinar los valores de $\sigma'_{v0}(D_{exc})$ y q_{net} en cada caso.

Solución

SOLUCIÓN

1. (a) NF 2.5 m > 1.5 m: no hay agua en el fondo de la excavación

$$\sigma'_{v0} = \gamma D_{exc} = 18.5(1.5) = 27.75\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ q_{net} = 180 - 27.75 = \mathbf{152.25}\ \text{kPa}$$

2. (b) nivel freático a 1.0 m: el fondo de la excavación está 0.5 m por debajo del agua (γ′ = 19.5 − 9.81 = 9.69 kN/m³)

$$\sigma'_{v0} = 18.5(1.0) + 9.69(0.5) = 23.345\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ q_{net} = 180 - 23.345 = \mathbf{156.66}\ \text{kPa}$$

Si el agua se encuentra por encima de la base de la excavación, la tensión efectiva retirada disminuye y la presión neta **aumenta** (152.2 → 156.7 kPa): un nivel freático alto incrementa el asentamiento inmediato.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Profundidad de influencia: Δσ = p · q

TEORÍA

El incremento de tensión bajo la carga disminuye con la profundidad, pero no se anula; la suma requiere un límite inferior: la **profundidad de cálculo z_{lim}**. El módulo ofrece dos criterios:

Profundidad de influencia: la profundidad bajo el centro a la que el incremento de tensión de Boussinesq desciende hasta **p** de la presión aplicada (habitualmente p = 10%): I(z′) = p y $z_{lim} = D_f + z'$.

Base del perfil: el cálculo termina en el último estrato (una base rígida, como roca o grava densa; el estrato con base rígida de Steinbrenner).

Si el perfil termina por encima de z_{lim}, el último estrato continúa hasta z_{lim} con las mismas propiedades.

$$I = \frac{\Delta\sigma_z}{q} = 4\, I_{corner}(m, n) \qquad m = \frac{B}{2z'},\ n = \frac{L}{2z'}$$

z′/B (p = %10 | %20)

L/B	p = %10	p = %20
1.0	2.09 B	1.40 B
1.5	2.55 B	1.70 B
2.0	2.92 B	1.94 B
5.0	4.33 B	2.68 B
franja	6.34 B	3.13 B

Enunciado

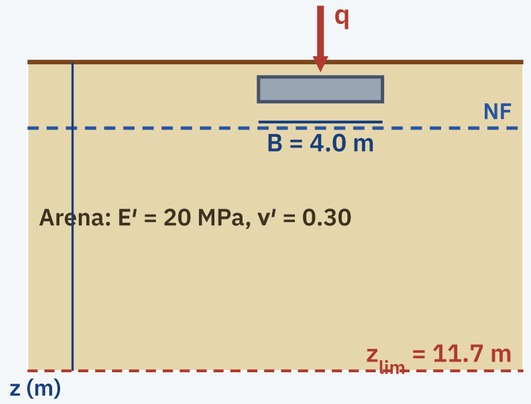
EJEMPLO

Datos

Cimentación	**B × L = 4 × 6 m (L/B = 1.5), en el fondo de la excavación; D_f = 1.5 m**
Regla	**profundidad de influencia, p = 10 % (I = 0.10)**
Fórmula	$I = 4\, I_{corner}(m, n),\ m = B/2z',\ n = L/2z'$

SE PIDE

z′ y **z_{lim}**; valor de I para z′ = 4 m y 10.19 m.



Solución

SOLUCIÓN

1 z′ = 4 m: m = 2/4 = 0.5; n = 3/4 = 0.75

$$I = 4\,I_{corner}(0.5;\ 0.75) = 4(0.1071) = \mathbf{0.4283}$$

2 Condición I = 0.10: por bisección

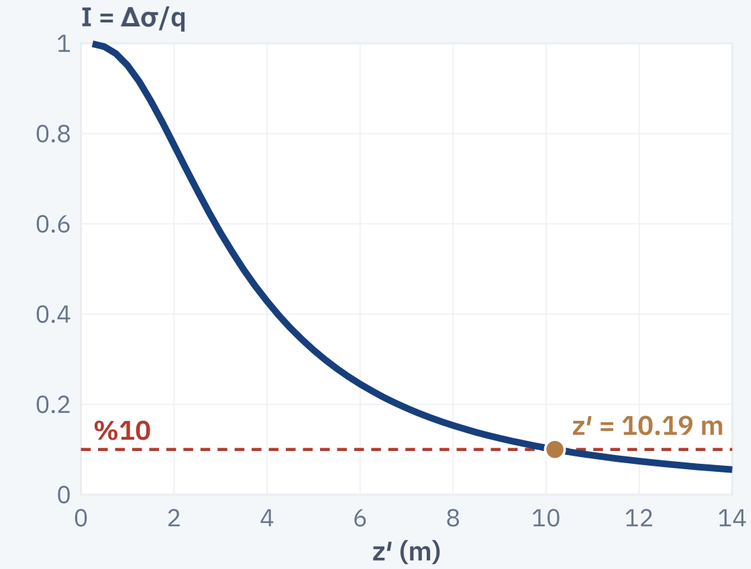
$$z' = \mathbf{10.19}\ \mathrm{m} \quad (= 2.55\,B)$$

$$z_{lim} = D_f + z' = 1.5 + 10.19 = \mathbf{11.69}\ \mathrm{m}$$

3 Comprobación: z′ = 10.19 m ⇒ m = 2/z′, n = 3/z′

$$m = 0.1963,\ n = 0.2945$$

$$I = 4(0.0250) = \mathbf{0.1000}$$



Se suma hasta una profundidad de 10.19 m (2.55 B); más abajo se halla la zona con menos del 10 % de la presión. En la zapata cuadrada, 2.09 B; en la corrida, 6.34 B: **una cimentación ancha influye a mayor profundidad**.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Contribución del estrato: diferencia de I_s

TEORÍA

Un estrato situado entre z_{sup} y z_{inf} (medidos desde el nivel de cimentación) aporta la **diferencia entre dos profundidades** de la solución del medio semiinfinito, con su propio E y v:

$$\Delta S = q_{net}\,\alpha\,B'\,\frac{1-\nu^2}{E}\,\left[I_s(z_{bottom}) - I_s(z_{üst})\right]$$

Esta es la integral de la deformación de Hooke sobre el estrato (con las tensiones del semiespacio homogéneo): para esta hipótesis es **exacta**; el resultado no depende del espesor del subestrato Δz (los subestratos solo sirven para las tablas y las zonas de color).

Sustituye al **módulo medio ponderado** de la fórmula de un solo estrato.

Un estrato cuya rigidez aumenta con la profundidad debe dividirse en varios estratos.

TOTAL

El asentamiento del perfil es la **suma** de las contribuciones de los estratos hasta z_{lim}: S = Σ ΔS_i. De cada estrato solo se cuenta la parte comprendida entre el nivel de cimentación y z_{lim}.

Enunciado

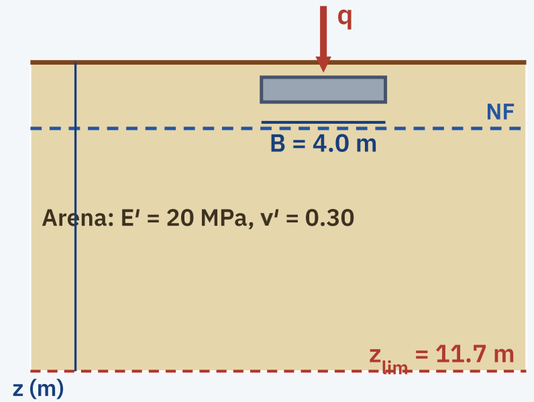
EJEMPLO

Datos

Cimentación	**rectangular, B × L = 4 × 6 m, profundidad de cimentación D_f = 1.5 m (fondo de la excavación)**
Carga	$q_{gross} = 180\ \mathrm{kPa}$ **(zapata flexible, presión uniforme)**
Suelo	**arena de un solo estrato:** $E' = 20\ \mathrm{MPa}$, $\nu' = 0.30$, $\gamma = 18.5\ \mathrm{kN/m^3}$; **nivel freático a 2.5 m**
Profundidad de cálculo	**profundidad de influencia, p = 10 % (Ejemplo 5): z′ = 10.19 m, z_{lim} = 11.69 m; el estrato continúa hasta esta profundidad**

SE PIDE

Asentamiento **central S** de la cimentación flexible.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Presión neta (Ejemplo 4a) y coeficiente k = $q_{net}(1 - \nu^2)/E$

$$q_{net} = 152.25\ \text{kPa} \qquad k = \frac{q_{net}(1-\nu^2)}{E} = \frac{152.25(0.91)}{20{,}000} = 0.006927\ (\text{adimensional})$$

2 Centro: α = 4, B′ = B/2 = 2 m, m′ = 1.5; z′ = 10.19 m ⇒ n′ = z′/B′ = 5.094

$$A_0 = 0.6569,\ A_1 = 0.9097,\ A_2 = 0.0545$$

$$F_1 = 0.4986,\ F_2 = 0.0441 \ \Rightarrow\ I_s = \mathbf{0.5239}$$

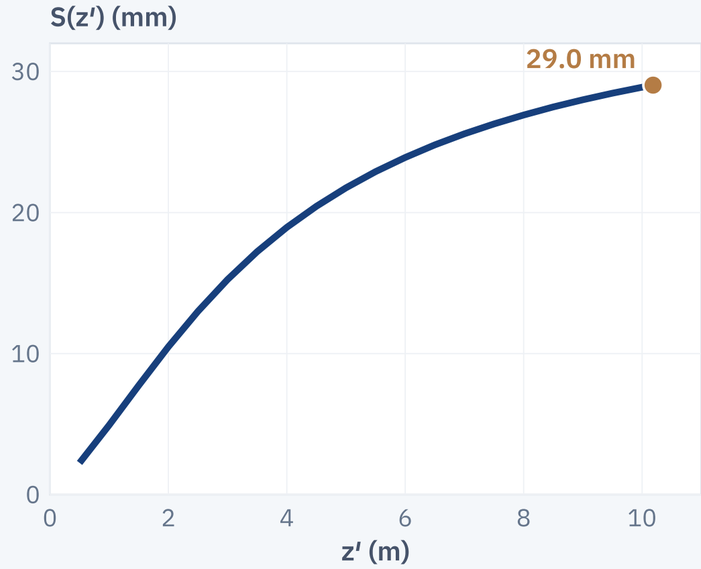
Solución (2/2)

SOLUCIÓN

3 Asentamiento: $S = k \cdot \alpha\, B' \cdot I_s$

$$S = 0.006927\,(4)(2)(0.5239) = 0.006927(4.1909)$$
$$= 0.02903\ \text{m} = \mathbf{29.0\ mm}$$

Asentamiento en el centro: **29.0 mm**. En el gráfico de S(z′): la mayor parte del asentamiento se produce dentro de los 2B superiores (8 m); la contribución de los estratos profundos es pequeña.



Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Enunciado

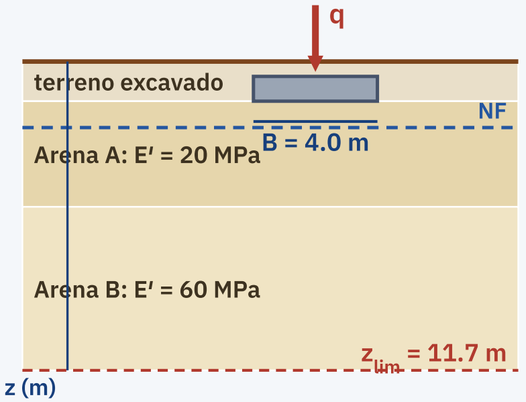
EJEMPLO

Datos

Cimentación, carga	**B × L = 4 × 6 m, q_{gross} = 180 kPa, D_f = 1.5 m ⇒ q_{net} = 152.25 kPa**
Estrato A	**espesor de 4 m a partir del nivel de cimentación: $E' = 20\ \mathrm{MPa}$**
Estrato B	**por debajo, hasta z_{lim}: $E' = 60\ \mathrm{MPa}$**
Profundidad de cálculo	**z'_{lim} = 10.19 m**

SE PIDE

Determinar el asentamiento **central** de cada estrato y el total; compararlo con el de un solo estrato.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Coeficientes del estrato k = $q_{net}(1 - \nu^2)/E$ y $\alpha\, B'\, I_s$ (centro; Ejemplos 2 y 6)

$$k_A = \frac{152.25(0.91)}{20{,}000} = 0.006927 \qquad k_B = \frac{152.25(0.91)}{60{,}000} = 0.002309$$

$$8\, I_s(z' = 4) = 8(0.3419) = 2.7351 \qquad 8\, I_s(z'_{lim}) = 4.1909$$

Al dividir el perfil en dos estratos, cada estrato se suma **con su propio módulo**, mediante el incremento de I_s en su propio intervalo.

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

2 Asentamientos por estrato y total

$$\Delta S_A = k_A (8I_s)_4 = 0.006927(2.7351) = 18.9 \text{ mm}$$

$$\Delta S_B = k_B \left[(8I_s)_{lim} - (8I_s)_4\right] = 0.002309(4.1909 - 2.7351) = 3.4 \text{ mm}$$

$$S = \Delta S_A + \Delta S_B = \mathbf{22.3 \text{ mm}}$$

El asentamiento total en el centro es de **22.3 mm** (motor: 22.3 mm). El caso de un solo estrato (E = 20 MPa) daba 29.0 mm: como el estrato inferior es **más rígido**, el asentamiento disminuyó un **23 %**; el estrato A aporta el 85 % del total.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Asentamiento en el centro, en la esquina y rígido

TEORÍA

Las fórmulas dan el asentamiento de una cimentación **perfectamente flexible**: **máximo en el centro**, mínimo en la esquina; su diferencia es el **asentamiento diferencial** de la cimentación flexible. Una cimentación rígida se asienta **de manera uniforme**: aproximadamente 0.93 veces el valor en el centro de la flexible:

$$S_{rigid} \approx 0.93\, S_{center} \qquad S_{diff} = S_{center} - S_{köşe}$$

Centro: α = 4, B′ = B/2. Esquina: α = 1, B′ = B (esquina del rectángulo completo).

Embebimiento: el factor de profundidad de Fox I_f (que depende de D_f/B, B/L y ν) reduce el asentamiento de una cimentación embebida. El módulo toma I_f = 1: sin corrección, **del lado de la seguridad**.

NOTA

Una cimentación real se sitúa entre la flexible y la rígida. El módulo proporciona los dos valores extremos; la rigidez intermedia y la interacción suelo–estructura quedan fuera de su alcance.

Enunciado

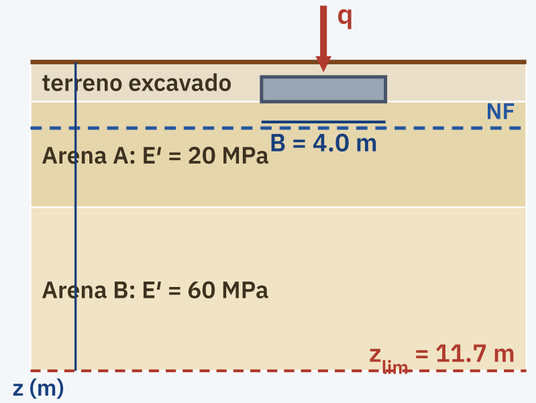
EJEMPLO

Datos

Perfil	**Ejemplo 7: estrato A (4 m) y estrato B; z'_{lim} = 10.19 m**
Cimentación	**flexible, 4 × 6 m**
Esquina	**α = 1, B′ = B = 4 m ⇒ m′ = L/B = 1.5; n′ = z′/4**

SE PIDE

Asentamiento en la **esquina**, asentamiento de la cimentación **rígida** y asentamiento **diferencial** de la cimentación flexible.



Solución

SOLUCIÓN

1 Valores de $4 \cdot I_s$ para la esquina ($n' = z'/4$)

$$z' = 4 \; (n' = 1): \; 4\,I_s = 0.7565$$

$$z'_{lim} = 10.19 \; (n' = 2.547): \; 4\,I_s = 1.5865$$

2 Asentamiento en la esquina

$$S_{köşe} = k_A(0.7565) + k_B(1.5865 - 0.7565) = 5.2 + 1.9 = \mathbf{7.2\ mm}$$

3 Rígido y diferencial

$$S_{rigid} = 0.93(22.3) = \mathbf{20.7\ mm} \qquad S_{diff} = 22.3 - 7.2 = \mathbf{15.2\ mm}$$

Centro 22.3, esquina 7.2, cimentación rígida 20.7 mm; asentamiento diferencial de la cimentación flexible: **15.2 mm**. La esquina se asienta solo el 32% del centro.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Enunciado

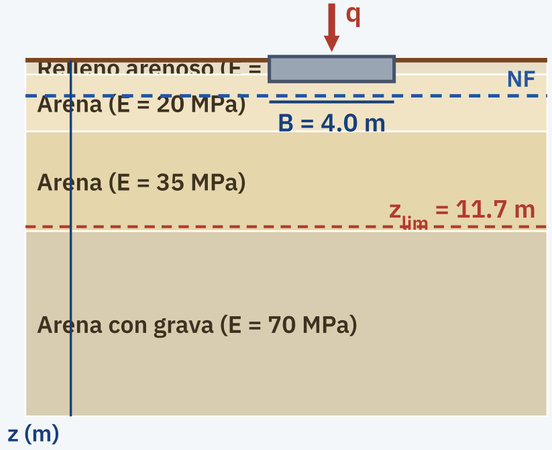
EJEMPLO

Datos

Cimentación	**B × L = 4 × 6 m, q_{gross} = 180 kPa, profundidad de excavación 1.5 m, nivel freático a 2.5 m**
Perfil	**Relleno arenoso 0–1 m: E′ = 8 MPa; Arena 1–5 m: E′ = 20 MPa; Arena 5–12 m: E′ = 35 MPa; Arena con grava 12–25 m: E′ = 70 MPa**
Profundidad de cálculo	**profundidad de influencia, p = 10%**

SE PIDE

Asentamiento en el **centro** y en la **esquina**, estrato a estrato; asentamiento flexible en el centro y en la esquina, rígido y diferencial.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Presión neta (fondo de la excavación a 1.5 m)

$$\sigma'_{v0}(1.5) = 27.25\ \text{kPa} \quad \Rightarrow \quad q_{net} = 180 - 27.25 = \mathbf{152.75}\ \text{kPa}$$

2 Profundidad de cálculo y estratos

$z_{lim} = 1.5 + 10.19 = \mathbf{11.69}\ \text{m}$ se retira el estrato por encima del fondo de excavación

El nivel de excavación (1.5 m) se encuentra dentro del estrato de arena: solo se cuenta la parte de los estratos situada por debajo de 1.5 m. z_{lim} = 11.69 m, que queda dentro del estrato de arena, por lo que ese estrato se trunca.

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

Estrato	z (m)	H (m)	E (MPa)	k (×10⁻³)	ΔS centro (mm)	ΔS esquina (mm)
Arena (SM, suelta–medianamente densa)	1.50 – 5.00	3.50	20	6.950	17.3	4.6
Arena (SM, medianamente densa)	5.00 – 11.69	6.69	35	3.972	6.8	3.7
Total					**24.1**	**8.3**

Centro **24.1 mm**, esquina 8.3 mm, rígido 22.4 mm, diferencial 15.8 mm. El módulo da los mismos valores.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Aspectos que conviene tener presentes al leer los resultados

TEORÍA

Hipótesis:

- Nivel de cimentación = fondo de la excavación; presión uniforme en una zapata totalmente flexible.
- En cada estrato, las tensiones de un **semiespacio homogéneo** (con el v de ese estrato).
- Todos los estratos son granulares y se asientan en condiciones **drenadas** (E′, v′).
- Sin corrección por profundidad de cimentación; cimentación rígida ≈ 0.93 × el centro de la flexible.
- Convenio de signos: el asentamiento es **positivo**; el selector del encabezado pasa al convenio en que el asentamiento hacia arriba es positivo.

Fuera del alcance: estratos de arcilla; Schmertmann, ábacos SPT/CPT, módulo creciente con la profundidad, rigidez de la cimentación e interacción suelo–estructura, elementos finitos.

ZONAS DE COLOR

Las vistas de sección muestran con bandas de color el incremento de tensión, el módulo de elasticidad, la deformación y el asentamiento S(z); el valor en el centro, a nivel de la cimentación, es el asentamiento resultante.

Resumen

Puntos clave

Hooke: $\varepsilon_z = [\Delta\sigma_z - v(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)]/E$; $\mathbf{S = \int \varepsilon_z\, dz}$; inversamente proporcional a E

Steinbrenner: $S = q_{net}\, \alpha\, B'\, (1 - v^2)/E \cdot I_s$; $I_s = F_1 + (1 - 2v)/(1 - v)\, F_2$; centro $\alpha = 4$, $B' = B/2$; esquina $\alpha = 1$, $B' = B$

Arena: $E'/p_a = \alpha\, N_{60}$ ($\alpha = 5, 10, 15$), $v' \approx 0.25$–0.35; al aumentar v' el asentamiento disminuye

Estratificado: $\Delta S = q_{net}\, \alpha\, B'\, (1 - v^2)/E \cdot [I_s(z_{inf}) - I_s(z_{sup})]$; independiente del espesor del subestrato

Presión neta $q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$; **profundidad de cálculo** $I(z') = p$ (2.09 B para zapata cuadrada, 2.55 B para L = 1.5 B, 6.34 B para zapata corrida)

Flexible: centro > esquina (asentamiento diferencial); **rígida** ≈ 0.93 × centro; sin corrección por empotramiento ($I_f = 1$)

Referencias bibliográficas

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage.

Steinbrenner, W. (1934). Tafeln zur Setzungsberechnung. Die Strasse, 1, 121–124.

Fox, E.N. (1948). The mean elastic settlement of a uniformly loaded area at a depth below the ground surface. Proc. 2nd ICSMFE, Rotterdam, 1, 129–132.

Bowles, J.E. (1996). Foundation Analysis and Design, 5th ed. McGraw-Hill.

Duncan, J.M. & Buchignani, A.L. (1976). An engineering manual for settlement studies. University of California, Berkeley.

Kulhawy, F.H. & Mayne, P.W. (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. EPRI EL-6800.

NOTA

Todos los ejemplos numéricos se han obtenido con el propio motor de cálculo del módulo; el módulo da los mismos valores.

GeoTerva

Cálculos geotécnicos en línea

De la teoría a la práctica

Calcular paso a paso en GeoTerva el proyecto de ejemplo de esta presentación: el módulo se abre con este modelo.

Abrir el módulo →

Página de teoría →

Abrir en el teléfono
Los módulos de prueba no requieren registro.

Si desea utilizarlas en sus clases: info@geoterva.com