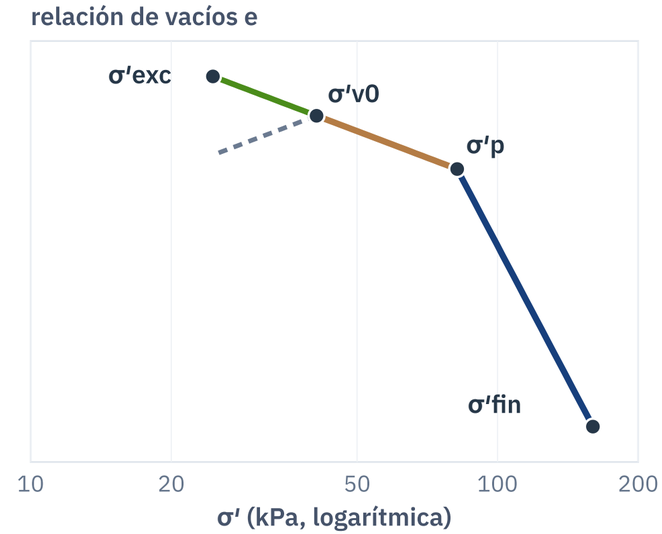
Presentación de clase de geotecnia · Asentamientos

Asentamiento por consolidación

Clase: asentamiento por consolidación unidimensional de un estrato de arcilla; trayectoria de tensiones, preconsolidación, excavación y levantamiento, tensiones de Boussinesq, método mv y tiempo; ejemplo resuelto en cada tema.

- Trayectoria de tensiones
- $C_c \cdot C_r \cdot C_s$
- Excavación y levantamiento
- Boussinesq
- Método de m_v
- Asentamiento en función del tiempo



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

Introducción

¿Qué aprenderemos en esta clase?

Seguir la **trayectoria de tensiones** de la arcilla: $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{p} \rightarrow \sigma'_{fin}$ (C_s, C_r, C_c)

Determinar las tensiones iniciales (σ_{v0}, u_0, σ'_{v0}) y la **tensión de preconsolidación** ($\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$)

Distinguir el efecto de descarga y de hinchamiento de la **excavación** y **a partir de qué referencia** se mide el asentamiento

Calcular el incremento de tensión de **Boussinesq** y la **profundidad de influencia**

Aplicar los **cuatro regímenes** de compresión de los subestratos (recompresión, compresión virgen); compararlo con el método de $\mathbf{m_v}$

Calcular la consolidación **dependiente del tiempo** (T_v, U, t_{50}, t_{90}) y trazar la curva asentamiento–tiempo del perfil estratificado

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

Suelo de ejemplo: arcilla de 6 m de espesor, nivel freático en la superficie del terreno ($\sigma'_{v0} = 8.19\ z$), $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $C_r = 0.06$; cimentación de 4 × 6 m, q = 150 kPa. Los asentamientos se expresan en mm.

¿Qué calcula este módulo?

TEORÍA

Todos los estratos del perfil son de arcilla; no puede introducirse ningún otro suelo. El módulo calcula la **consolidación primaria** de la arcilla: al aplicar la carga, el agua sale lentamente y la arcilla se comprime a lo largo de la trayectoria de tensiones.

El asentamiento inmediato (elástico) corresponde a los módulos de Asentamiento elástico; la suma de ambos corresponde al módulo Asentamiento total (2D).

La solución es **analítica**: incremento de tensión de Boussinesq, trayectoria de tensiones subestrato a subestrato y teoría de Terzaghi; presión intersticial hidrostática; no hay elementos finitos.

Fuera del alcance: estratos granulares, compresión secundaria (C_α), asentamiento de arenas por SPT/CPT, asentamiento en roca, consolidación 2D/3D, capacidad portante, licuefacción.

CONVENCIÓN DE SIGNOS

El asentamiento es **positivo** y el levantamiento, **negativo**. Deformación neta $S_{net} = S_c + S_{lev}$.

No en un solo paso de la tensión inicial a la final

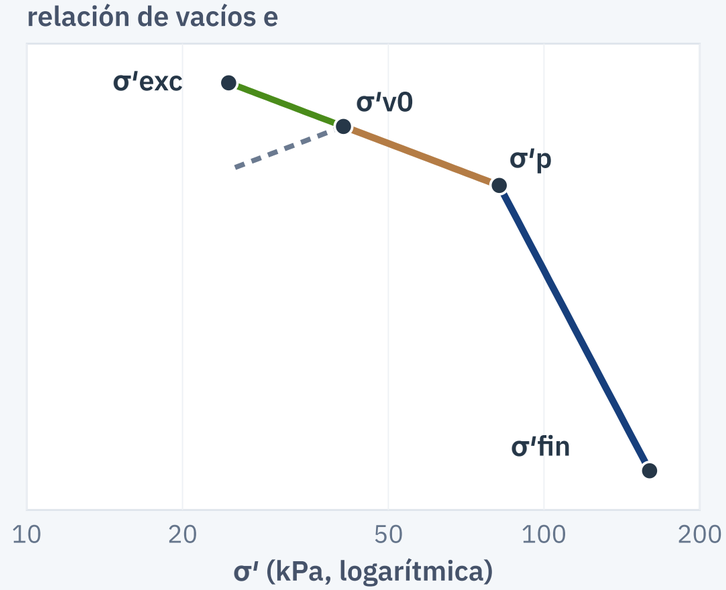
TEORÍA

El cálculo nunca pasa de la tensión inicial a la tensión final **en un solo paso**. La excavación reduce la tensión efectiva y la arcilla **se hincha** a lo largo de la recta de descarga (C_s). Cuando la estructura vuelve a cargarla, la arcilla sigue primero la misma recta de vuelta hasta σ'_{v0} (se recupera el levantamiento); después se recomprime con C_r hasta σ'_p y, si la tensión final supera σ'_p, se comprime a lo largo de la recta virgen (C_c):

$$\sigma'_{v0} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{exc} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{v0} \xrightarrow{C_r} \sigma'_p \xrightarrow{C_c} \sigma'_{final}$$

σ'_p es la tensión máxima pasada; **no se reduce con la excavación**.

El ciclo de carga y descarga **se cierra** en σ'_{v0}: una carga que se limita a devolver el terreno suprayacente retirado no produce asentamiento respecto al estado inicial, sean cuales sean C_s y C_r.



Esquema: la línea discontinua indica la descarga; la verde, la recarga (C_s); la naranja, la recompresión (C_r); la azul, la compresión virgen (C_c).

En el punto medio de cada dovela

TEORÍA

Cada estrato comprendido entre el nivel de cimentación y la profundidad de cálculo z_{lim} se divide en **subestratos** de espesor máximo Δz (se corta en el nivel freático); cada tensión se calcula en el punto medio del subestrato:

$$\sigma_{v0} = \sum \gamma_i h_i \qquad u_0 = \gamma_w (z - z_w) \qquad \sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$$

γ se emplea por encima del nivel freático y γ_{sat} por debajo; γ_w = 9.81 kN/m³.

Las tensiones iniciales del terreno son la **referencia** para cada fase posterior.

Cuanto más delgada es la dovela, más exacto es el resultado; en el cálculo a mano, una sola dovela da un resultado aproximado.

NIVEL FREÁTICO EN LA SUPERFICIE DEL TERRENO

Para γ_{sat} = 18, γ′ = 18 − 9.81 = 8.19 kN/m³ y σ'_{v0} = 8.19 z. Todos los ejemplos siguientes utilizan este suelo.

Enunciado

EJEMPLO

Datos

Suelo	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$ **(sobre el nivel freático),** $\gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(bajo él)**
NF	**1.5 m desde la superficie del terreno**
Profundidades	**z = 1.5; 3.0; 4.5; 6.0 m**

SE PIDE

Determinar los valores de **σ_{v0}, u_0, σ'_{v0}** a cada profundidad.

Solución

SOLUCIÓN

1 z = 3.0 m (nivel freático a 1.5 m)

$$\sigma_{v0} = 17(1.5) + 18(1.5) = 52.50 \text{ kPa}$$

$$u_0 = 9.81(3.0 - 1.5) = 14.715 \text{ kPa} \qquad \sigma'_{v0} = 52.50 - 14.715 = \mathbf{37.785} \text{ kPa}$$

z (m)	σ_{v0} (kPa)	u_0 (kPa)	σ'_{v0} (kPa)
1.5	25.50	0.00	**25.50**
3.0	52.50	14.71	**37.78**
4.5	79.50	29.43	**50.07**
6.0	106.50	44.15	**62.35**

Por debajo del nivel freático, σ'_{v0} aumenta más **lentamente** (pendiente $\gamma' = 8.19$ kN/m³): a z = 6 m la tensión total es 106.5 y la tensión efectiva solo 62.4 kPa.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$ o el valor de laboratorio

TEORÍA

Para cada modelo se emplea una **única definición**: o bien la razón de sobreconsolidación OCR o bien el valor de laboratorio σ'_p:

$$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0} \qquad \text{o} \qquad \sigma'_p = \sigma'_{p,lab} \ \ (\geq \sigma'_{v0})$$

OCR = 1: arcilla normalmente consolidada; $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$ y toda carga por encima de la tensión inicial es compresión virgen.

Si el valor de laboratorio de σ'_p es inferior a σ'_{v0}, se eleva a σ'_{v0} con una advertencia: **la arcilla subconsolidada queda fuera del alcance**.

σ'_p representa la tensión máxima pasada y no disminuye con la excavación.

¿QUÉ INDICA EL OCR?

OCR = σ'_p/σ'_{v0}. Un OCR grande significa una amplia zona de recompresión en la que la arcilla se comprimirá primero bajo carga con un **C_r pequeño**.

Enunciado

EJEMPLO

Datos

Dovela	**punto medio $z = 3\ \mathrm{m}$: $\sigma'_{v0} = 24.57\ \mathrm{kPa}$ (nivel freático en la superficie, $\gamma_{sat} = 18$)**
Casos	**(a) $OCR = 3$ · (b) laboratorio $\sigma'_p = 60\ \mathrm{kPa}$ · (c) laboratorio $\sigma'_p = 20\ \mathrm{kPa}$**

SE PIDE

En cada caso **σ′p** y **OCR**; interpretar la situación.

Solución

SOLUCIÓN

1 (a) OCR dado y (b) valor de laboratorio

$$(\text{a}):\ \sigma'_p = 3(24.57) = \mathbf{73.71}\ \text{kPa} \qquad (\text{b}):\ OCR = \frac{60}{24.57} = \mathbf{2.44}$$

2 (c) valor de laboratorio por debajo de σ′v0

$$\sigma'_{p,lab} = 20 < \sigma'_{v0} \ \Rightarrow\ \sigma'_p = \mathbf{24.57}\ \text{kPa},\ OCR = 1$$

(a) y (b) arcilla sobreconsolidada (σ′p > σ′v0); para (c) el módulo emite una advertencia y considera la arcilla **normalmente consolidada** (σ′p = σ′v0 = 24.57 kPa): la arcilla subconsolidada queda fuera del alcance.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Descarga y levantamiento

TEORÍA

La carga retirada es la **tensión vertical efectiva inicial debida al peso del terreno** a nivel del fondo de la excavación (el nivel freático no cambia; bajo el agua el peso retirado se calcula con γ′). La descarga se distribuye según la influencia de Boussinesq de la planta de la excavación, I_{exc} (en una excavación ancha $I_{exc} = 1$):

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(D_{exc}) \qquad \Delta\sigma_{exc} = -q_{lift}\, I_{exc}(z') \qquad \sigma'_{exc} = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma_{exc}$$

$$\Delta H_{heave} = -\frac{C_s\, \Delta H}{1 + e_0}\, \log_{10} \frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{exc}}$$

El hinchamiento es **negativo** (asentamiento +, hinchamiento –). Si no se da C_s, se toma $C_s = C_r$ y se indica en el informe.

La presión neta $q_{net} = q_{bruta} - q_{sub}$ solo se informa; el cálculo no se hace en un solo paso con la presión neta, se sigue la trayectoria de tensiones.

NEDEN KABARMA?

Con la excavación, la tensión efectiva disminuye y la arcilla se hincha. Cuando la estructura vuelve a cargar, el hinchamiento se recupera: es la **recompresión del suelo hinchado**.

Δσ bajo el centro de la zapata

TEORÍA

$$\Delta\sigma_{load} = q_{gross}\, I_z(z') \qquad z' = z - D_f$$

Rectángulo B × L, bajo su centro: con el coeficiente de esquina de Newmark, $I_z = 4 \cdot I_{esq}$(m = B/2z′, n = L/2z′):

$$I_{köşe} = \frac{1}{4\pi}\left[\frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2n^2}\cdot\frac{V+1}{V} + \tan^{-1}\frac{2mn\sqrt{V}}{V - m^2n^2}\right] \qquad V = m^2 + n^2 + 1$$

(Si V < m²n², el término de la arcotangente se aumenta en π). **Franja** (ancho B), bajo su eje central: $I_z = (\alpha + \sin\alpha)/\pi$, $\alpha = 2\tan^{-1}(B/2z')$. Para z′ = 0, $I_z = 1$.

$$\sigma'_{final} = \sigma'_{exc} + \Delta\sigma_{load}$$

NOTA

El incremento de tensión se toma a lo largo de la vertical bajo el centro de la cimentación (subestratos y análisis temporal); en las zonas de bandas de color, para los puntos fuera de la cimentación, se descompone en rectángulos de esquina.

Enunciado

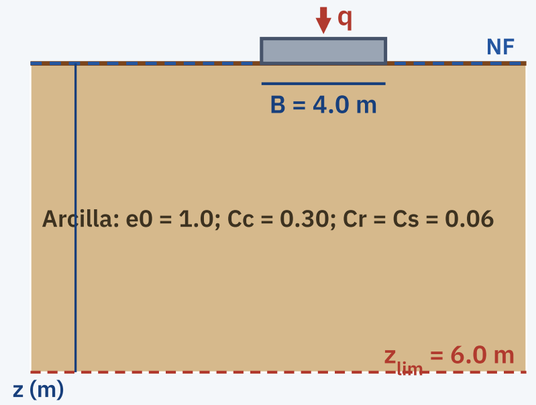
EJEMPLO

Datos

Cimentación	**Rectángulo de 4 × 6 m, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, en la superficie del terreno ($D_f = 0$)**
Punto	**punto medio de la dovela z′ = 3 m, bajo el centro**
Comparación	**Franja de ancho B = 4 m**

SE PIDE

I_z y **$\Delta\sigma$**; los mismos valores para la franja.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Rectángulo: m = B/2z′ = 2/3 = 0.667; n = L/2z′ = 1.0

$$V = m^2 + n^2 + 1 = 2.4444, \quad m^2 n^2 = 0.4444, \quad \sqrt{V} = 1.5635$$

$$T_1 = \frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2 n^2} \cdot \frac{V+1}{V} = \frac{2.0846}{2.8889} \cdot \frac{3.4444}{2.4444} = 1.0168$$

$$T_2 = \tan^{-1} \frac{2.0846}{2.0000} = 0.8061 \qquad I_{köşe} = \frac{T_1 + T_2}{4\pi} = 0.1451$$

2 Rectángulo y franja

$$\text{rectangular} : I;_z = 4(0.1451) = \mathbf{0.5803} \;\Rightarrow\; \Delta\sigma = 150(0.5803) = \mathbf{87.04}\ \text{kPa}$$

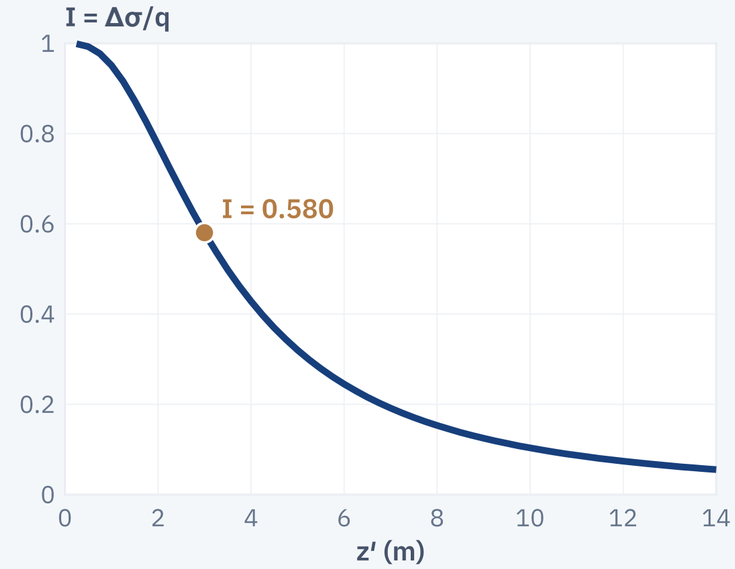
$$\text{franja} : \alpha = 2\tan^{-1}\tfrac{4}{6} = 1.1760 \;\Rightarrow\; I_z = \frac{1.1760 + 0.9231}{\pi} = 0.6682$$

$$\Delta\sigma = 150(0.6682) = \mathbf{100.22}\ \text{kPa}$$

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

z′ (m)	I_z	Δσ (kPa)
0.5	0.9927	148.9
1.0	0.9513	142.7
2.0	0.7746	116.2
3.0	0.5803	87.0
4.0	0.4283	64.2
6.0	0.2449	36.7
8.0	0.1532	23.0
10.0	0.1034	15.5



En el centro del subestrato Δσ = **87.0 kPa** (el 58% de q); una franja estrecha (el mismo B) da 100.2 kPa: **una cimentación larga actúa a mayor profundidad**. El incremento de tensión es todavía del 10% incluso a z′ = 10 m.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Profundidad de influencia: I(z′) = p

TEORÍA

El incremento de tensión disminuye con la profundidad pero nunca se anula; la suma de las compresiones de los subestratos necesita un límite inferior: la **profundidad de cálculo z_{lim}**. En la regla de la profundidad de influencia, la arcilla se comprime hasta que el incremento de Boussinesq bajo el centro desciende a **p** veces la presión aplicada (habitualmente p = 10%):

$$I_z(z') = p \;\Rightarrow\; z_{lim} = D_f + z'$$

El mismo factor de influencia rige también la descarga de una excavación de igual planta; por eso la profundidad es la misma tanto si se lee en función de q_{br} como de q_{net}.

Si el perfil termina por encima de z_{lim}, el último estrato continúa con las mismas propiedades hasta z_{lim}; si termina por debajo, el suelo situado bajo z_{lim} no se comprime.

La regla alternativa es la **base del perfil**: se supone una base rígida. (El criterio $\Delta\sigma = 0.2\ \sigma'_{v0}$ llega a mayor profundidad en una zapata pequeña situada a gran profundidad; la regla del módulo depende únicamente de la geometría.)

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

Cimentaciones	**(a) 4 × 6 m, p = 10% y 20% · (b) losa de cimentación de 20 × 30 m, p = 10% y 20%**
Regla	**profundidad de influencia; $D_f = 0$**

SE PIDE

En cada caso **z′** y z_{lim}; comprobación de I(z′) para 4 × 6 m.

Solución

SOLUCIÓN

1 Comprobación: 4 × 6 m, p = 10% ⇒ z′ = 10.19 m

$$m = \frac{2}{10.19} = 0.1963,\ n = \frac{3}{10.19} = 0.2945 \ \Rightarrow\ I_z = 4(0.0250) = \mathbf{0.1000}$$

Cimentación	p = %10: z′ (m)	p = %20: z′ (m)
4 × 6 m (L/B = 1.5)	10.19 (2.55 B)	6.82 (1.70 B)
Losa de cimentación de 20 × 30 m	50.9 (2.55 B)	34.1 (1.70 B)

z′ es **proporcional a las dimensiones de la cimentación**: en una zapata de 4 × 6 m, z_{lim} = 10.19 m; en una losa de 20 × 30 m, **50.9 m**. La losa tiene en cuenta la arcilla que se comprime hasta una profundidad de unos 51 m.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Compresión del subestrato en la recarga

TEORÍA

f = ΔH/(1 + e_0) para el subestrato; con $\sigma'_{exc} \le \sigma'_{v0} \le \sigma'_p$, la compresión del subestrato según la posición de la tensión final:

Condición	Compresión del subestrato en la recarga
$\sigma'_{exc} \le \sigma'_{fin} \le \sigma'_{v0}$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{fin}/\sigma'_{exc})$: se recupera una parte del hinchamiento
$\sigma'_{v0} < \sigma'_{fin} \le \sigma'_p$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc}) + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_{fin}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{v0} < \sigma'_p < \sigma'_{fin}$	$S_b + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_p/\sigma'_{v0}) + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{fin}/\sigma'_p)$
$\sigma'_p = \sigma'_{v0} < \sigma'_{fin}$ (NC)	$S_b + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{fin}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{fin} < \sigma'_{exc}$	Hinchamiento adicional con C_s (negativo)

SI NO HAY EXCAVACIÓN

$\sigma'_{exc} = \sigma'_{v0}$ y $S_b = 0$: recompresión clásica y compresión virgen, a partir de la tensión inicial.

$$S_c = \sum (S_b + S_r + S_v) \qquad S_{net} = S_c + S_{heave}$$

Enunciado

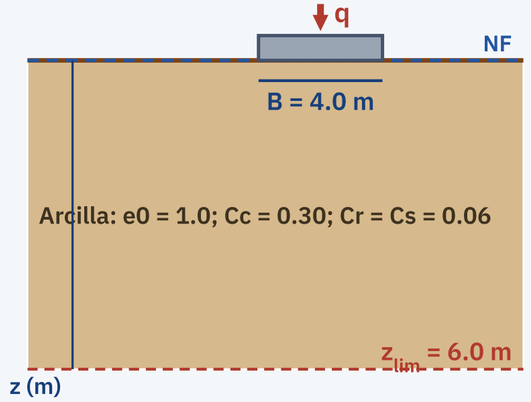
EJEMPLO

Datos

Suelo	**un solo estrato de arcilla, 6 m de espesor; $\gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$; nivel freático en la superficie del terreno; $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$**
Cimentación	**Rectángulo de 4 × 6 m, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, en la superficie del terreno (sin excavación)**
Dovela	**dovela única, H = 6 m, punto medio $z = 3\ \mathrm{m}$: $\sigma'_{v0} = 8.19\,z = 24.57\ \mathrm{kPa}$**
Sobreconsolidación	**(a) OCR = 1 (NC) · (b) OCR = 6 · (c) OCR = 3**
Incremento de tensión	$\Delta\sigma = 150\,I_z(3) = 87.04\ \mathrm{kPa}$ **(Ejemplo 3)** ⇒ $\sigma'_{final} = 111.61\ \mathrm{kPa}$

SE PIDE

El **régimen** y el asentamiento por consolidación $\mathbf{S_c}$ de cada arcilla.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Común: f = H/(1 + e_0) = 6/2 = 3 m; log($\sigma'_{fin}/\sigma'_{v0}$) = log(111.61/24.57) = 0.6573

$$\text{(a) NC}: \quad S_v = C_c f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.30(3)(0.6573) = \mathbf{591.6\ mm}$$

2 (b) OCR = 6: σ'_p = 6(24.57) = 147.4 kPa > σ'_{fin} ⇒ solo recompresión

$$S_r = C_r f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.06(3)(0.6573) = \mathbf{118.3\ mm}$$

La misma arcilla, la misma carga: la arcilla normalmente consolidada asienta **591.6 mm** y la de OCR = 6 asienta **118.3 mm**; la diferencia procede de la relación C_c/C_r = 5.

Solución (2/2)

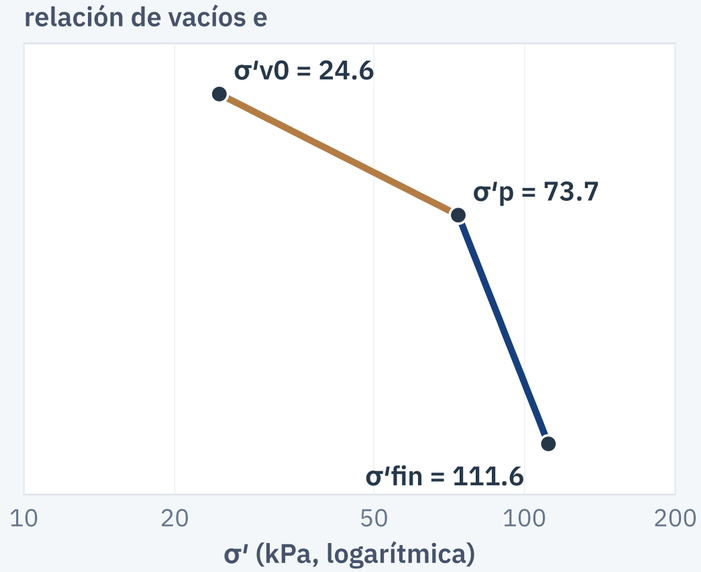
SOLUCIÓN

3 (c) OCR = 3: $\sigma'_p = 3(24.57) = 73.71$ kPa < $\sigma'_{fin} = 111.61$ ⇒ recompresión + compresión virgen

$$S_r = 0.06(3)\log\frac{73.71}{24.57} = 85.9\ \text{mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{111.61}{73.71} = 162.2\ \text{mm} \qquad S_c = \mathbf{248.0\ mm}$$

OCR	σ'_p (kPa)	régimen	S_r (mm)	S_v (mm)	S_c (mm)
1	24.6	virgen	0	591.6	**591.6**
6	147.4	recompresión	118.3	0	**118.3**
3	73.7	recompresión + virgen	85.9	162.2	**248.0**



Comprobar la solución en GeoTerva ↗

¿Desde el terreno original o desde el fondo levantado?

TEORÍA

Tras la excavación viene la cimentación: el asentamiento depende de **la referencia** desde la que se midan los desplazamientos (opción *desplazamientos tras la excavación* en la fase de excavación):

Se conserva: a partir del terreno original (valor predeterminado): el levantamiento se muestra además por separado; el asentamiento de la cimentación es la deformación neta al final de la carga: **$S = S_c + S_{lev}$** = compresión total más allá de σ'_{v0}. Una carga no mayor que el terreno suprayacente retirado da S = 0; si es menor, el terreno queda por encima del nivel original (se indica en el informe; asentamiento 0).

Se pone a cero antes de la carga: los desplazamientos de la fase de excavación se ponen a cero; el asentamiento se mide a partir del fondo de excavación levantado: **$S = S_c = S_b + S_r + S_v$**. La recompresión del levantamiento se computa como asentamiento: una cimentación totalmente compensada se asienta tanto como se levantó el fondo. Si la excavación permaneció abierta hasta construir la estructura y se desarrolló el levantamiento, esta es la respuesta correcta.

Ambas medidas se imprimen siempre; la elección determina cuál se indica como asentamiento de la cimentación, la curva de tiempo y el resultado.

RESUMEN

Se conserva: $S = S_c + S_{hinch}$ (pequeño). Se anula: $S = S_c$ (grande).

Enunciado

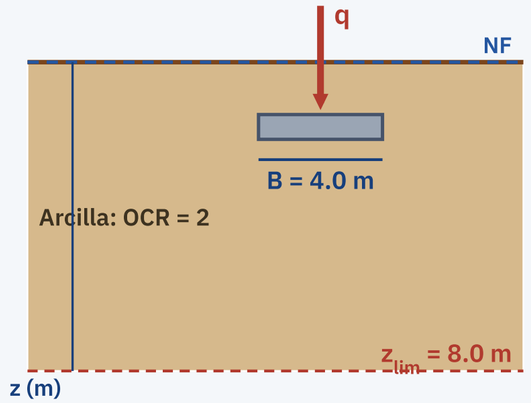
EJEMPLO

Datos

Suelo	**arcilla 0–8 m, $\gamma_{sat} = 18$, nivel freático en la superficie; $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$; $OCR = 2$**
Excavación	**excavación amplia ($I_{exc} = 1$), profundidad 2 m; cimentación en el fondo de la excavación**
Cimentación	**4 × 6 m, $q_{gross} = 100\ \mathrm{kPa}$**
Dovela	**una sola dovela 2–8 m, $H = 6$ m, $z = 5$ m, $f = 3$ m: $\sigma'_{v0} = 8.19(5) = 40.95\ \mathrm{kPa}$**

SE PIDE

σ'_{exc}, hinchamiento, S_b, S_r, S_v, S_c; asentamiento de la cimentación (a partir del terreno original y tras reiniciar).



Solución (1/3)

SOLUCIÓN

1 Excavación: carga retirada, descarga y levantamiento

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(2) = 8.19(2) = 16.38 \text{ kPa} \qquad \sigma'_{exc} = 40.95 - 16.38 = \mathbf{24.57} \text{ kPa}$$

$$\Delta H_{heave} = -0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = -0.06(3)(0.2218) = \mathbf{-39.9 \text{ mm}}$$

2 Carga: $I_z(z' = 3) = 0.5803$ (Ejemplo 3); $\sigma'_p = 2(40.95) = 81.9$ kPa

$$\Delta\sigma = 100(0.5803) = 58.03 \text{ kPa} \quad \sigma'_{final} = 24.57 + 58.03 = \mathbf{82.60} \text{ kPa}$$

Solución (2/3)

SOLUCIÓN

3 Régimen: $\sigma'_{v0} < \sigma'_p = 81.9 < \sigma'_{fin} = 82.60$

$$S_b = 0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = 39.9\ \text{mm} \qquad S_r = 0.06(3)\log\frac{81.9}{40.95} = 54.2\ \text{mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{82.60}{81.9} = 3.3\ \text{mm} \qquad S_c = \mathbf{97.4\ mm}$$

En la recarga, primero se recupera el hinchamiento (S_b = 39.9 mm = todo el hinchamiento); después se producen 54.2 mm de recompresión con C_r y 3.3 mm de compresión virgen que supera ligeramente σ'_p.

Solución (3/3)

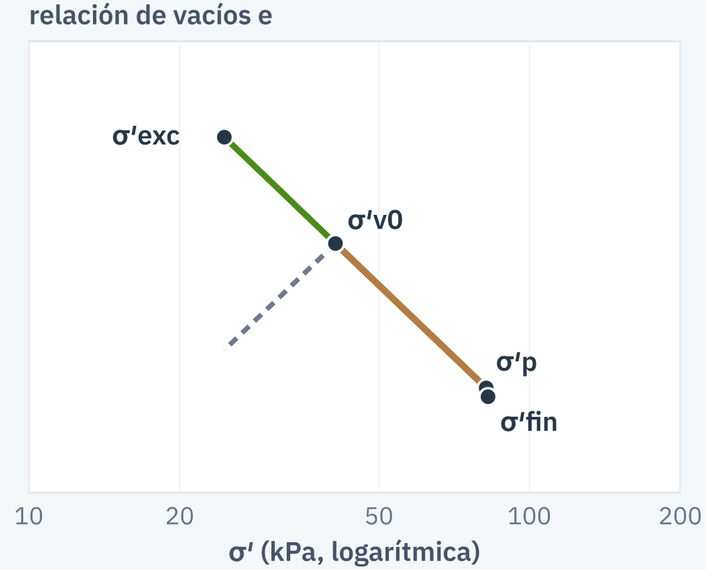
SOLUCIÓN

4 Asentamiento de la cimentación

$$\text{se conserva}: \quad S = S_c + S_{heave} = 97.4 - 39.9 = \mathbf{57.5\ mm}$$

$$\text{se anula}: \quad S = S_c = \mathbf{97.4\ mm}$$

El asentamiento medido desde el terreno original es de **57.5 mm**; medido desde el fondo levantado, **97.4 mm**. La diferencia es igual al levantamiento (39.9 mm): la elección de la referencia modifica el resultado en un 69 %.



Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Trayectoria lineal: $\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H$

TEORÍA

Es una vía de cálculo independiente y **lineal**: el mismo m_v se emplea tanto en la descarga como en la recarga; C_c, C_r, C_s y e_0 no intervienen:

$$\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H_{slice}$$

$$\text{levantamiento} = -m_v\,(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc})\,H \qquad S_c = m_v\,\left(\sigma'_{final} - \sigma'_{exc}\right)H$$

La parte de S_c hasta σ'_{v0} es el hinchamiento recuperado (S_b).

Al ser lineal, el ciclo se cierra por sí solo.

La unidad de m_v es 1/kPa (coeficiente de compresibilidad volumétrica); debe elegirse según el intervalo de tensiones.

DIFERENCIA RESPECTO A e – log σ′

El método de m_v no tiene en cuenta el nivel de tensión (no interviene σ'_p): cada incremento de tensión produce la misma compresión.

Enunciado

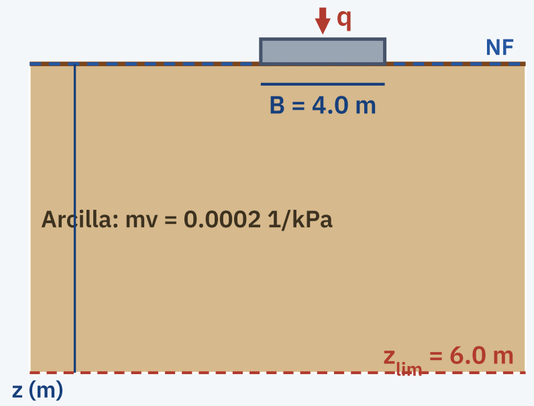
EJEMPLO

Datos

Suelo	**6 m de arcilla, $m_v = 0.0002\ 1/\text{kPa}$, nivel freático en la superficie**
Caso (a)	**sin excavación: 4×6 m, $q = 150$ kPa, $\Delta\sigma = 87.04$ kPa (Ejemplo 3)**
Caso (b)	**La excavación y la cimentación del Ejemplo 6 (excavación de 2 m, $q = 100$ kPa, subestrato de 2–8 m)**

SE PIDE

S_c en cada caso; para (b), levantamiento, S_b y asentamiento neto.



Solución

SOLUCIÓN

1 (a) Sin excavación

$$S_c = m_v\,\Delta\sigma'\,H = 0.0002(87.04)(6) = \mathbf{104.4\ mm}$$

2 (b) Con excavación: σ'_{v0} = 40.95; σ'_{exc} = 24.57; $\Delta\sigma_{carga}$ = 58.03; σ'_{fin} = 82.60 kPa

$$\text{levantamiento} = -0.0002(40.95 - 24.57)(6) = -19.7\ \text{mm} = -S_b$$

$$S_r = 0.0002(82.60 - 40.95)(6) = 50.0\ \text{mm} \qquad S_c = S_b + S_r = \mathbf{69.6\ mm}$$

Asentamiento neto (respecto del terreno original) S = S_c + hinchamiento = **50.0 mm**; solo el incremento de 41.65 kPa que supera σ'_{v0} produce asentamiento. En la trayectoria lineal, el método e – log σ′ no incluye el efecto de σ'_p.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Terzaghi: T_v, U y t

TEORÍA

$$T_v = \frac{C_v\, t}{H_{dr}^2} \qquad U(T_v) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \qquad M = \frac{\pi(2m+1)}{2}$$

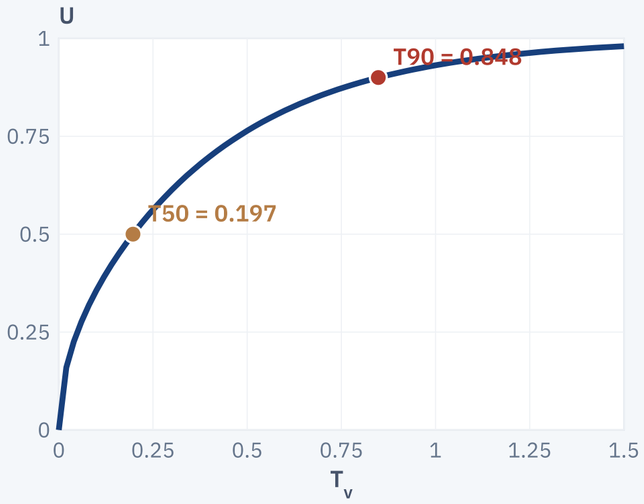
$$S_i(t) = U_i(t)\, S_{c,i} \qquad S(t) = \sum S_i(t) \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

H_{dr} = H (drenaje en un sentido) o H/2 (en dos sentidos); H es el espesor del estrato por debajo del nivel de cimentación (hasta z_{lim} para el último estrato, que sobrepasa el perfil).

$T_{v,50}$ = 0.197; $T_{v,90}$ = 0.848. Para T_v < 0.05 se utiliza la solución de tiempos cortos U = $2\sqrt{(T_v/\pi)}$.

Los estratos con distintos valores de C_v y H_{dr} consolidan a velocidades diferentes: la curva del perfil es la **suma de las curvas de los estratos**; sus propios valores de t_{50} y t_{90} se leen en esa suma.

La curva corresponde al asentamiento de carga S_c; se supone que el hinchamiento se completa antes de la carga.



Enunciado

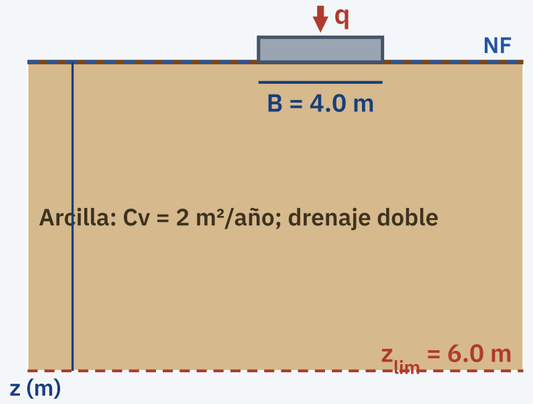
EJEMPLO

Datos

Arcilla	**6 m, normalmente consolidada (Ejemplo 5a): $S_c = 591.6$ mm**
Consolidación	**$C_v = 2\ \mathrm{m}^2/\mathrm{año}$; drenaje por arriba y por abajo (doble)**
Tiempos	**t = 0.25; 0.5; 1; 2; 4; 8 años**

SE PIDE

H_{dr}, t_{50}, t_{90} y S(t); t_{90} con drenaje unidireccional.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Longitud de drenaje y tiempos característicos

$$H_{dr} = \frac{H}{2} = 3\ \text{m} \qquad t_{50} = \frac{0.197(3^2)}{2} = \mathbf{0.89}\ \text{año} \qquad t_{90} = \frac{0.848(3^2)}{2} = \mathbf{3.82}\ \text{año}$$

2 Drenaje por una sola cara (H_{dr} = 6 m)

$$t_{90} = \frac{0.848(6^2)}{2} = \mathbf{15.3}\ \text{año}$$

Con drenaje doble la longitud de drenaje se reduce a la mitad y el tiempo baja a **una cuarta parte**: t_{90} = 3.82 años, frente a 15.3 años con drenaje simple.

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

t (año)	$T_v = C_v t/H_{dr}^2$	U	S(t) = U S_c (mm)
0.25	0.056	0.266	**157**
0.50	0.111	0.376	**222**
1.00	0.222	0.531	**314**
2.00	0.444	0.729	**431**
4.00	0.889	0.910	**538**
8.00	1.778	0.990	**586**

En 1 año se completa solo el 53% del asentamiento, y en 4 años el 91% (S_c = 592 mm); en 8 años, U = 0.990. Para valores pequeños de T_v (< 0.05) se emplea $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Enunciado

EJEMPLO

Datos

Cimentación	**4 × 6 m, q = 150 kPa, en la superficie del terreno; nivel freático en la superficie (γ_{sat} = 18)**
Estrato A (0–4 m)	**blanda, NC: $e_0 = 1.10,\ C_c = 0.35,\ C_r = 0.07$; $C_v = 1$; drenaje doble**
Estrato B (4–8 m)	**firme, $OCR = 2$: $e_0 = 0.80,\ C_c = 0.20,\ C_r = 0.04$; $C_v = 3$; drenaje por una sola cara**
Cálculo	**base del perfil (8 m); cada estrato es un único subestrato (A: z = 2 m, B: z = 6 m)**

SE PIDE

El valor de S_c, t_{50} y t_{90} de cada estrato; la curva S(t) del sistema.

Solución (1/3)

SOLUCIÓN

1 A: z = 2 m, σ'_{v0} = 16.38; $I_z(2)$ = 0.7746 ⇒ Δσ = 116.19; σ'_{fin} = 132.57; f = 4/2.10 = 1.9048 m; NC

$$S_{c,A} = C_c f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.35(1.9048) \log \frac{132.57}{16.38} = \mathbf{605.4\ mm}$$

2 B: z = 6 m, σ'_{v0} = 49.14; σ'_p = 98.28; $I_z(6)$ = 0.2449 ⇒ Δσ = 36.74; σ'_{fin} = 85.88 < σ'_p; f = 4/1.80 = 2.2222 m

$$S_{c,B} = C_r f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.04(2.2222) \log \frac{85.88}{49.14} = \mathbf{21.6\ mm}$$

Asentamiento total por consolidación **627.0 mm**: el estrato superior blando NC aporta el 97% del total; el estrato inferior rígido y sobreconsolidado solo 21.6 mm.

Solución (2/3)

SOLUCIÓN

3 Longitud de drenaje y tiempos ($t = 0.197\ H_{dr}^2/C_v$; $0.848\ H_{dr}^2/C_v$)

$$A:\ H_{dr} = 2\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(4)}{1} = 0.788,\ t_{90} = \frac{0.848(4)}{1} = 3.39\ \text{año}$$

$$B:\ H_{dr} = 4\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(16)}{3} = 1.051,\ t_{90} = \frac{0.848(16)}{3} = 4.52\ \text{año}$$

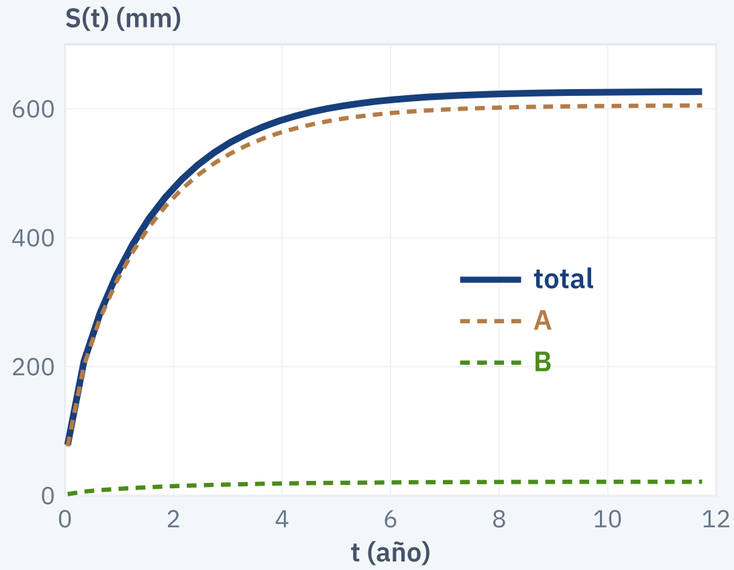
La curva del sistema es la suma $S(t) = U_A(t)\ S_A + U_B(t)\ S_B$; sus propios tiempos se leen de esta suma: **t_{50} = 0.794 años, t_{90} = 3.43 años** (próximos a los del estrato dominante A).

Solución (3/3)

SOLUCIÓN

t (año)	S_A (mm)	S_B (mm)	S(t) (mm)	U
0.5	242	7.4	**249**	0.397
1.0	340	10.5	**351**	0.560
2.0	463	14.6	**477**	0.761
5.0	583	19.8	**603**	0.961
10.0	604	21.4	**626**	0.998
20.0	605	21.6	**627**	1.000

En 1 año se completa el 56% del asentamiento y en 5 años el 96%; termina en unos 10 años (627 mm). La curva está determinada por el **estrato blando A**.



Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Aspectos que conviene tener presentes al leer los resultados

TEORÍA

Nivel de cimentación = fondo de excavación (superficie del terreno si no hay excavación); presión intersticial **hidrostática**; el nivel freático no se ve afectado por la excavación.

El incremento de tensión se toma **en la vertical bajo el centro de la cimentación** (subestratos y análisis temporal); las zonas de color siguen la misma trayectoria de tensiones en cada punto.

e_0 es la relación de vacíos inicial de cada fase; **no hay compresión secundaria (C_α)**.

El asentamiento es positivo y el levantamiento negativo; el selector de la cabecera invierte el signo y pasa a la representación con positivo hacia arriba (el motor de cálculo sigue siendo el clásico).

Bandas de color: las zonas que disminuyen rápidamente con la profundidad, como el asentamiento, el hinchamiento y la deformación, se colorean con las clases $1 \cdot 1.5 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \times 10^n$; unas bandas iguales comprimirían la zona inferior en un solo color.

Resumen

Puntos clave

Trayectoria de tensiones: $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0}$ (C_s) $\rightarrow \sigma'_p$ (C_r) $\rightarrow \sigma'_{fin}$ (C_c); $\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$, no disminuye con la excavación

Compresión del subestrato $f = \Delta H/(1 + e_0)$: NC: $C_c\ f \log(\sigma'_{fin}/\sigma'_{v0})$; OC y $\sigma'_{fin} \leq \sigma'_p$: $C_r\ f \log(\ldots)$; $\sigma'_{fin} > \sigma'_p$: partes $C_r + C_c$

Excavación: $q_{sub} = \sigma'_{v0}(D_{exc})$, levantamiento = $-C_s\ f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc})$; $S = S_c + S_{lev}$ (terreno original) o S_c (puesto a cero)

Boussinesq: $\Delta\sigma = q\ I_z(z')$; centro del rectángulo $4\ I_{esq}$, franja $(\alpha + \sin\alpha)/\pi$; $\mathbf{z_{lim}}$: $I(z') = p$ (cuadrada 2.09 B, L = 1.5 B 2.55 B, franja 6.34 B)

Método $\mathbf{m_v}$: $\Delta H = m_v\ \Delta\sigma'\ H$, lineal; levantamiento = $-m_v(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc})\ H$

Tiempo: $T_v = C_v\ t/H_{dr}^2$; $T_{v,50} = 0.197$, $T_{v,90} = 0.848$; $H_{dr} = H$ (una cara) o $H/2$ (dos caras); $S(t) = \Sigma\ U_i\ S_{c,i}$

Referencias bibliográficas

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley.

Newmark, N.M. (1935). Simplified computation of vertical pressures in elastic foundations. Univ. of Illinois Bulletin 429.

Das, B.M. (2016). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage.

Holtz, R.D., Kovacs, W.D., Sheahan, T.C. (2011). An Introduction to Geotechnical Engineering, 2nd ed. Pearson.

Craig, R.F., Knappett, J.A. (2012). Craig’s Soil Mechanics, 8th ed. Spon.

NOTA

Todos los ejemplos numéricos se han obtenido con el propio motor de cálculo del módulo y el módulo da los mismos valores (subestratos del ejemplo: dz = espesor del estrato).

GeoTerva

Cálculos geotécnicos en línea

De la teoría a la práctica

Calcular paso a paso los ejemplos de esta presentación en GeoTerva; en el módulo, el número de estratos y la excavación se introducen libremente.

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