Presentazione didattica di geotecnica · Pali

Capacità portante dei pali in argilla

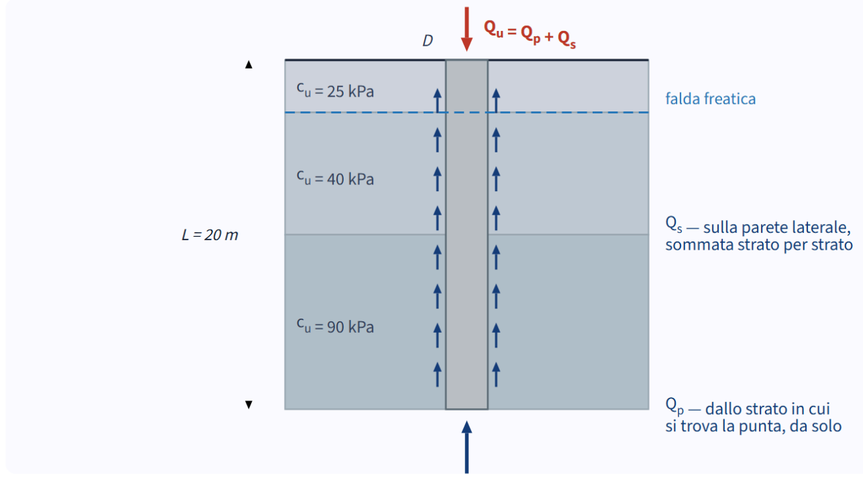
Lezione: resistenza alla punta non drenata, attrito laterale con i metodi α, λ e β, palo trivellato. La teoria di ciascun metodo, seguita da un esempio di calcolo.

Meyerhof · Vesic

metodi α · λ · β

Palo trivellato

Esempi di calcolo



Che cosa si impara in questa lezione?

- Saper spiegare perché l'argilla è trattata in condizioni **non drenate** ($\varphi = 0$) e dove la tensione efficace entra comunque in gioco
- Saper calcolare la **resistenza alla punta** con due metodi: Meyerhof ($N^*_c = 9$) e Vesic (rigidità)
- Saper calcolare l'attrito laterale con **tre approcci**: α, λ e β
- Poter applicare le regole specifiche del **palo trivellato**: $\alpha^* = 0$ in entrambe le lunghezze, espressione propria per la base
- Raggiungere la **capacità portante ammissibile** e interpretare insieme i risultati dei diversi approcci

SVOLGIMENTO DELLA LEZIONE

Ogni metodo è trattato in **tre passaggi**:

1 · **Teoria**: come funziona il metodo e perché

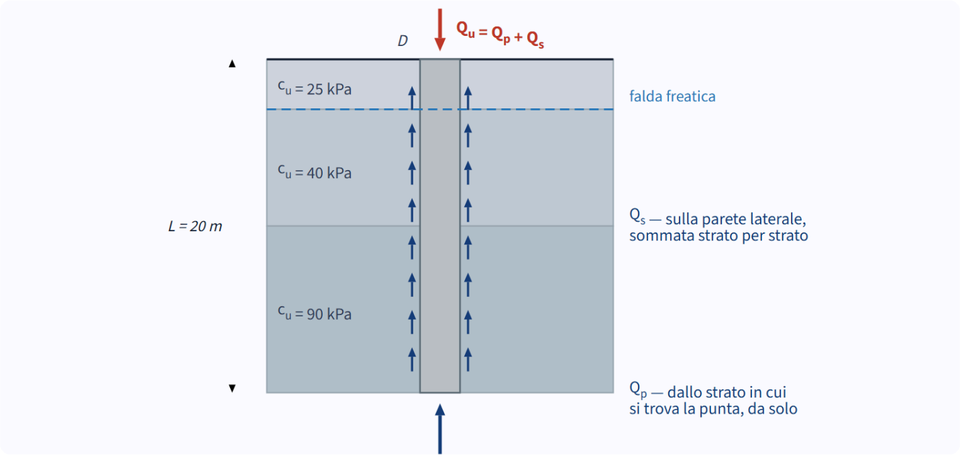
2 · **Traccia**: dati e richiesto

3 · **Soluzione**: passo per passo, con i numeri

La maggior parte degli esempi utilizza lo stesso palo: un palo tubolare lungo 20 m che attraversa tre strati di argilla.

Il carico si trasmette in due modi

TEORIA



Il palo trasferisce il carico al terreno **contemporaneamente per due vie**: l'argilla al di sotto della punta reagisce come una fondazione profonda con la **resistenza alla punta** (Q_p), mentre l'argilla lungo il fusto reagisce con l'**aderenza** (Q_s).

$$Q_u = Q_p + Q_s \qquad Q_{all} = \frac{Q_u}{FS}$$

In argilla la **resistenza laterale** si somma strato per strato; la **resistenza alla punta** proviene solo dallo strato in cui è ubicata la punta.

In un profilo tipico la punta è una parte molto piccola del totale: nel palo dell'esempio circa **un nono**; il fusto circa otto noni. L'incertezza risiede principalmente nel fusto.

In questa lezione: **palo singolo**, argilla, infisso o trivellato, sezione costante.

Perché l'argilla si tratta con φ = 0?

TEORIA

Nell'argilla satura il carico della struttura arriva **molto più rapidamente** di quanto l'acqua possa drenare; l'argilla è sottoposta a taglio **senza variazione di volume**. In questo caso la resistenza è un unico valore: la **resistenza al taglio non drenata** c_u, e l'angolo di attrito è nullo.

$$\varphi = 0 \qquad \tau_f = c_u$$

Differenza rilevante rispetto alla sabbia: la resistenza non aumenta più in proporzione alla tensione efficace. Un palo in argilla non è «un palo in sabbia con altri numeri».

Ciononostante, **due metodi** utilizzano la tensione efficace: il metodo λ (la sua media lungo lo sviluppo) e il metodo β (che si basa interamente su di essa). Pertanto anche la **falda freatica** riveste qui importanza; essa non influisce sulla resistenza alla punta né sul metodo α.

TENSIONE EFFICACE (PER λ E β)

$$\sigma' = \sum \gamma_i h_i \qquad \text{(Sopra la falda freatica)}$$

$$\sigma' = \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \qquad \text{(Sotto la falda freatica)}$$

γ_W = 9.81 kN/m³

Nel terreno stratificato la pendenza di σ′ varia in ogni strato e alla falda freatica

Traccia

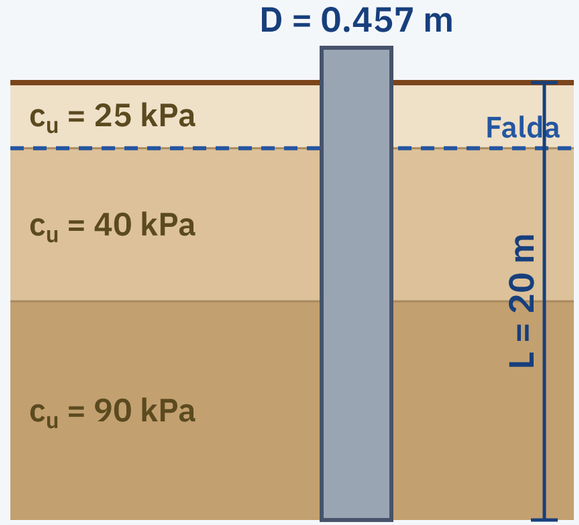
ESEMPIO

Dati

Argilla 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \text{kPa},\ \gamma = 16\ \text{kN/m}^3$
Argilla 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \text{kPa},\ \gamma = 17\ \text{kN/m}^3$
Argilla 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \text{kPa},\ \gamma = 18\ \text{kN/m}^3$
Falda freatica (YASS)	**alla profondità di 3.0 m**
Palo	**palo tubolare, D = 0.457 m, L = 20 m**
Peso dell'unità di volume dell'acqua	$\gamma_w = 9.81\ \text{kN/m}^3$

RICHIESTO

Ai confini degli strati (3, 10 e 20 m) determinare la **tensione verticale efficace** e lungo l'asta la **tensione efficace media** $\bar{\sigma}'_o$.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 3 m (falda freatica) e confini degli strati: sotto la falda freatica $\gamma' = \gamma - \gamma_w$

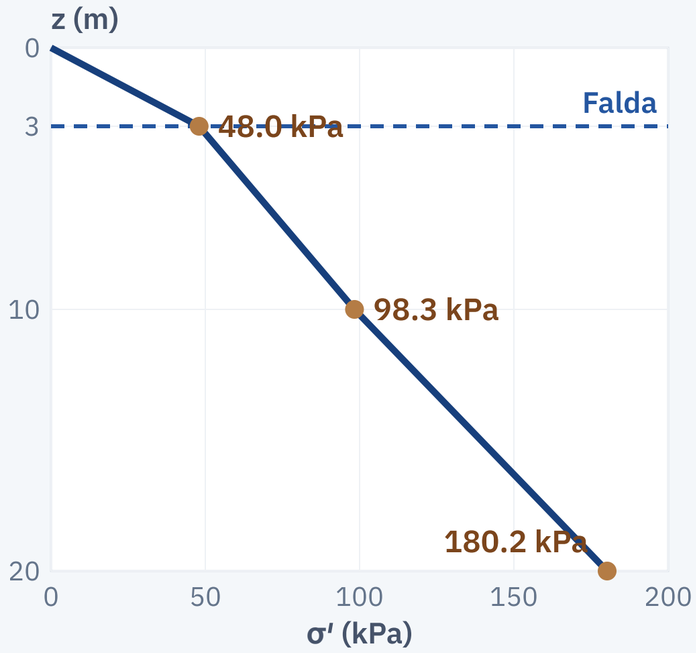
$$\sigma'(3) = 16(3) = \mathbf{48.0}\ \text{kPa}$$

2 Profondità 10 m (fine del secondo strato)

$$\sigma'(10) = 48.0 + (17 - 9.81)(7) = \mathbf{98.3}\ \text{kPa}$$

3 Profondità 20 m (punta del palo)

$$\sigma'(20) = 98.3 + (18 - 9.81)(10) = \mathbf{180.2}\ \text{kPa}$$



Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

4 Area del diagramma σ′ in ciascuno strato (trapezio)

$$A_1 = \tfrac{1}{2}(0 + 48.0)(3) = 72.0$$
$$A_2 = \tfrac{1}{2}(48.0 + 98.3)(7) = 512.2$$
$$A_3 = \tfrac{1}{2}(98.3 + 180.2)(10) = 1{,}392.8$$

5 Tensione efficace media: area totale / lunghezza

$$\bar{\sigma}'_o = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{L} = \frac{1{,}977.0}{20} = \mathbf{98.85}\ \mathrm{kPa}$$

La media è minore della metà del valore all'estremità (98.8 < 90.1): la tensione non cresce linearmente con la profondità, in corrispondenza della falda freatica la pendenza cambia. Questo valore σ̄′$_o$ sarà utilizzato nel metodo λ.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Resistenza alla punta: argilla sotto la punta del palo

TEORIA

Nell'argilla satura non drenata l'angolo di attrito è nullo; la **resistenza ultima netta alla punta** del palo è il prodotto della coesione non drenata dell'argilla sotto la punta per un coefficiente:

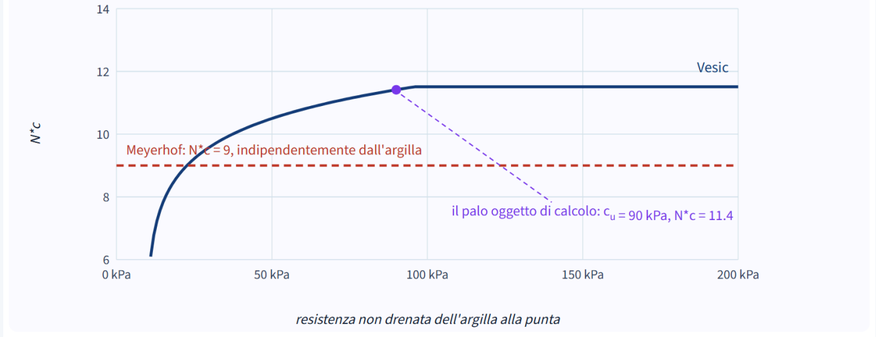
$$Q_p = A_p\, q_p = A_p\, c_u\, N_c^*$$

c_u : resistenza al taglio non drenata dell'argilla **sotto la punta**

N^*_c : fattore di capacità portante (due approcci di seguito)

A_p : area della punta del palo

> La resistenza dell'argilla **attraversata** dal palo non agisce sulla punta: quella resistenza è attribuita al fusto.



Due approcci: Meyerhof assume il coefficiente pari a **9**; Vesic lega il coefficiente alla **rigidità** dell'argilla.

Meyerhof: costante nove

TEORIA

In argilla satura, in condizioni non drenate, il carico limite netto nella forma di Meyerhof è dato dai **nove coefficienti classici**:

$$Q_p \approx N_c^* \, c_u \, A_p = 9 \, c_u \, A_p$$

c_u : coesione non drenata del terreno al di sotto della punta del palo

Non richiede altri dati di input; finché il palo è profondo (bastano alcuni diametri) non dipende dalla profondità.

La semplicità è il suo punto di forza; la debolezza è la stessa: non tiene conto della rigidezza dell'argilla.

La resistenza alla punta è piccola rispetto a quella del fusto, quindi influisce molto poco sulla capacità totale; per questo un valore semplice è spesso sufficiente.

Traccia

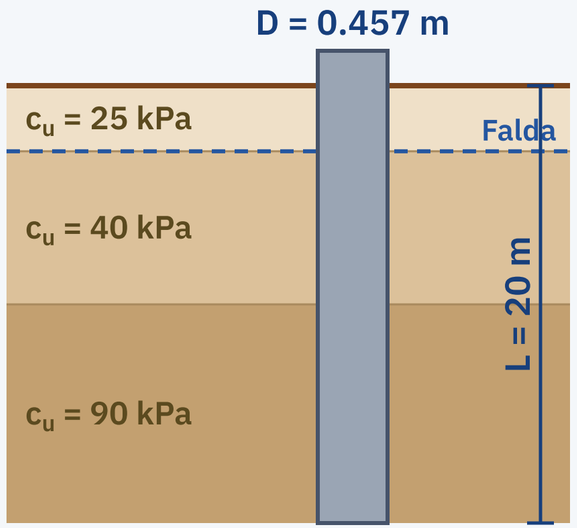
ESEMPIO

Dati

Palo	**palo tubolare, infisso**
Diametro	**D = 0.457 m**
Lunghezza	**L = 20 m**
Argilla sotto la punta	$c_u = 90\ \mathrm{kPa}$

RICHIESTO

Secondo il metodo di **Meyerhof**, determinare la **resistenza alla punta** Q_p del palo.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Area della punta del palo

$$A_p = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.457)^2}{4} = \mathbf{0.1640}\ \mathrm{m^2}$$

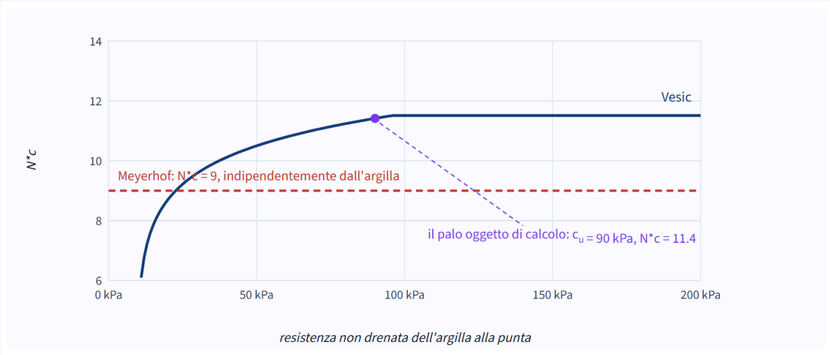
2 Resistenza unitaria alla punta (N*c = 9)

$$q_p = 9\, c_u = 9(90) = \mathbf{810}\ \mathrm{kPa}$$

3 Resistenza alla punta

$$Q_p = A_p\, q_p = 0.1640(810) = \mathbf{132.9}\ \mathrm{kN}$$

Il metodo non ha richiesto altri dati di input: solo c_u sotto la punta. Q_p = **132.9 kN**.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Vesic: la rigidezza entra in N*c

TEORIA

Vesic, dalla teoria dell'**espansione della cavità**: il coefficiente per il caso φ = 0 si ricava dall'indice di rigidezza ridotto dell'argilla. Nell'argilla satura la variazione di volume nella zona plastica è nulla; la riduzione viene meno e si ha $\mathbf{I_{rr} = I_r}$:

$$N_c^* = \frac{4}{3}\left(\ln I_{rr} + 1\right) + \frac{\pi}{2} + 1 \qquad I_r = \frac{E_s}{3\,c_u}$$

UNICO DATO DI INPUT: c_u sotto la punta

O'Neill e Reese (1999): $I_r \approx 50$ ($c_u/p_a = 0.24$), 150 (0.48), 250 – 300 (≥ 0.96). Il modulo approssima ciò nel modo seguente:

$$I_r = 347\,\frac{c_u}{p_a} - 33 \;\le\; 300$$

N^*_c — RELAZIONE I_{rr}

I_{rr}	N^*_c
10	6.97
20	7.90
40	8.82
60	9.36
80	9.75
100	10.04
200	10.97
300	11.51

Al crescere di I_{rr} il coefficiente aumenta lentamente: logaritmo

Traccia

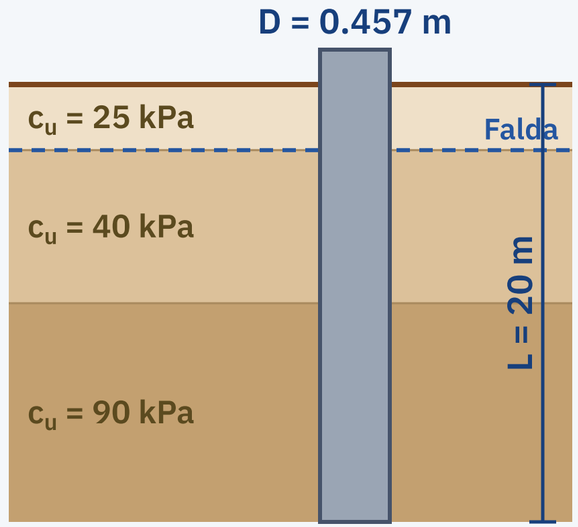
ESEMPIO

Dati

Palo	**Come nell'Esempio 2: D = 0.457 m, L = 20 m**
Argilla sotto la punta	$c_u = 90\ \mathrm{kPa}$
Pressione atmosferica	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$

RICHIESTO

Secondo il metodo di **Vesic (1977)**, determinare la **resistenza alla punta** Q_p del palo e confrontarla con quella di Meyerhof.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

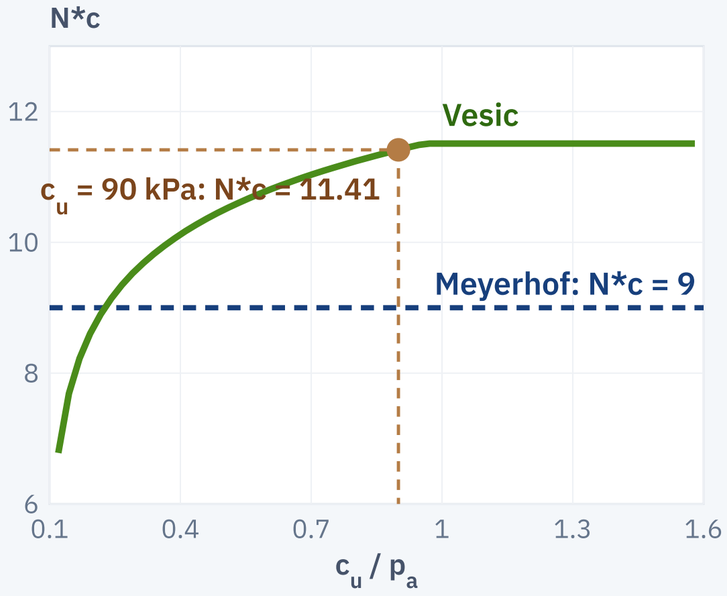
1 Indice di rigidezza ($I_{rr} = I_r$, poiché nell'argilla non vi è variazione di volume)

$$I_{rr} = I_r = 347\,\frac{90}{100} - 33 = \mathbf{279.3} \quad (\leq 300)$$

2 Coefficiente N*c

$$N_c^* = \frac{4}{3}\,(\ln 279.3 + 1) + \frac{\pi}{2} + 1 = \mathbf{11.41}$$

La curva verde nella figura è il fattore di Vesic: per c_u = 90 kPa, **N^*_c = 11.41**, circa il 27% in più rispetto al 9 di Meyerhof.



Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

3 Resistenza unitaria alla punta

$$q_p = c_u\, N_c^* = 90(11.41) = \mathbf{1{,}027}\ \mathrm{kPa}$$

4 Resistenza alla punta

$$Q_p = A_p\, q_p = 0.1640(1{,}027) = \mathbf{168.5}\ \mathrm{kN}$$

Meyerhof: 132.9 kN, **Vesic: 168.5 kN**; la differenza è di circa il 27%. Poiché la punta è una parte piccola del totale, questa differenza incide molto poco sulla capacità totale.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Attrito laterale: dove si determina principalmente la capacità

TEORIA

Nell'argilla la resistenza laterale è la somma dell'attrito unitario lungo la superficie del fusto:

$$Q_s = \sum f\, p\, \Delta L$$

Molte delle variabili che determinano l'attrito unitario non sono facilmente misurabili; pertanto si hanno **tre approcci**:

Metodo α: attrito solo dalla **resistenza non drenata** (tensione totale, breve termine)

Metodo λ: combinazione della **tensione efficace media** lungo la lunghezza con la resistenza media; un unico coefficiente per l'intero palo

Metodo β: **tensione efficace** e angolo di attrito consolidato (drenato, lungo termine)

Nel palo di esempio il fusto porta circa **nove decimi** del totale; anche l'incertezza risiede qui.

α: una frazione della resistenza

TEORIA

L'attrito laterale unitario è la resistenza non drenata moltiplicata per un **fattore di adesione sperimentale α**:

$$f = \alpha\, c_u \qquad Q_s = \sum \alpha\, c_u\, p\, \Delta L$$

α : fattore di adesione; **diminuisce** all'aumentare della consistenza dell'argilla (un'argilla più consistente mobilita una frazione minore della propria resistenza)

α è in realtà funzione anche della **tensione efficace**, oltre che di c_u (raccomandazioni di Sladen, Randolph–Murphy/API, NGI-99)

> Questo modulo interpola la **tabella (c_u/p_a – α)** riportata a lato; l'α dello strato può essere inserito anche manualmente.

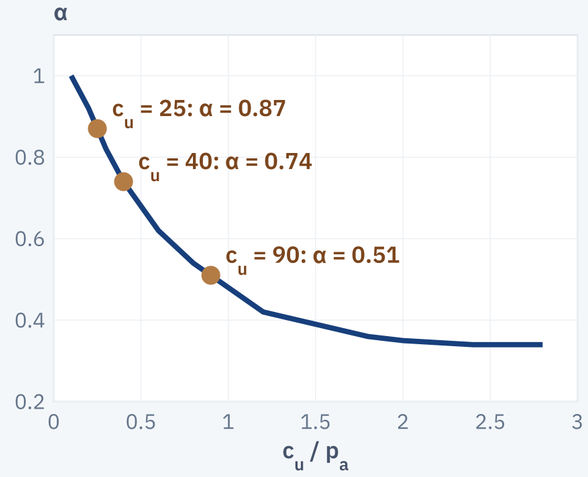


TABELLA α (SINTESI)

c_u / p_a	α

Traccia

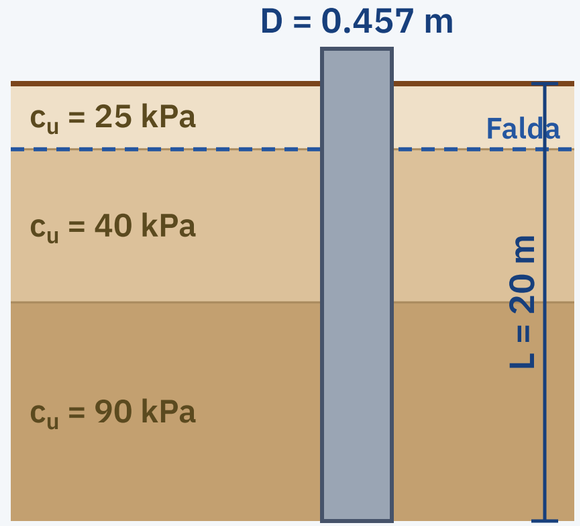
ESEMPIO

Dati

Argilla 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \text{kPa},\ \gamma = 16\ \text{kN/m}^3$
Argilla 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \text{kPa},\ \gamma = 17\ \text{kN/m}^3$
Argilla 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \text{kPa},\ \gamma = 18\ \text{kN/m}^3$
Falda freatica (YASS)	**alla profondità di 3.0 m**
Palo	**palo tubolare, D = 0.457 m, L = 20 m**
Perimetro	$p = \pi D = \pi(0.457) = 1.436\ \text{m}$

RICHIESTO

Con il **metodo α**, determinare la **resistenza laterale** Q_s del palo. (α per interpolazione lineare dalla tabella; p_a = 100 kPa)



Soluzione

SOLUZIONE

1 Valori di α: per c_u/p_a = 0.25; 0.40; 0.90 dalla tabella

$$\alpha_1 = 0.87,\ \alpha_2 = 0.74,\ \alpha_3 = 0.51$$

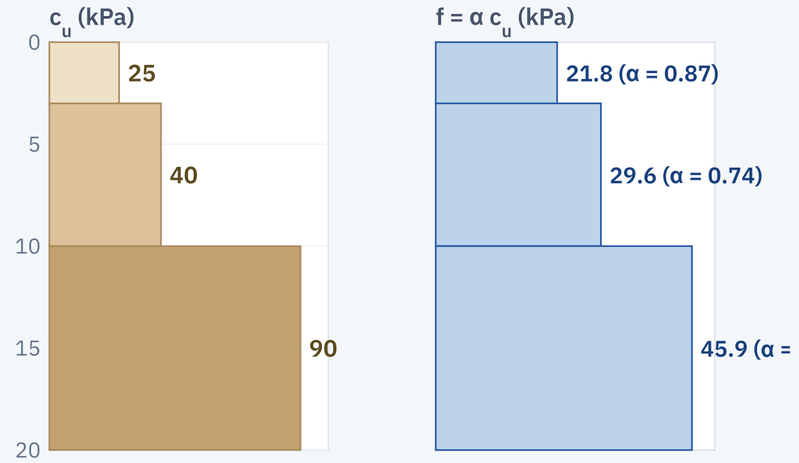
2 Attrito unitario in ogni strato $f = \alpha\, c_u$

$$f_1 = 21.8\ ,\ f_2 = 29.6\ ,\ f_3 = 45.9\ \text{kPa}$$

3 $Q_s = p\, \Sigma\, f\, H$

$$Q_s = 1.436\,[21.8(3) + 29.6(7) + 45.9(10)] = \mathbf{1{,}050}\ \text{kN}$$

Contributi: 94 + 297 + 659 = **1,050 kN**. L'argilla più resistente fornisce il f maggiore, ma con un rapporto minore di c_u (α = 0.51).



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

λ: un unico valore medio per l'intera lunghezza

TEORIA

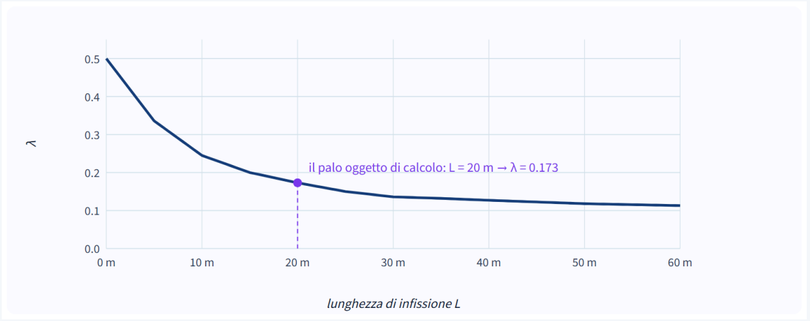
Vijayvergiya e Focht (1972): il **terreno spostato** dal palo genera una pressione laterale passiva a ogni profondità, e da questa deriva l'attrito unitario medio:

$$f_{av} = \lambda \left(\bar{\sigma}'_o + 2\,\bar{c}_u \right) \qquad Q_s = p\,L\,f_{av}$$

$\bar{\sigma}'_o$: **tensione efficace verticale media** lungo la lunghezza infissa (area del diagramma di σ′ / L)

$\bar{c}_u$: resistenza non drenata media, **pesata sugli spessori**: $(c_{u1}L_1 + c_{u2}L_2 + \ldots)/L$

λ : coefficiente dipendente dalla **lunghezza** del palo (a lato)



λ — LUNGHEZZA DI INFISSIONE

L (m)	λ
0	0.500
5	0.336
10	0.245
15	0.200
20	0.173
30	0.136
40	0.127

Traccia

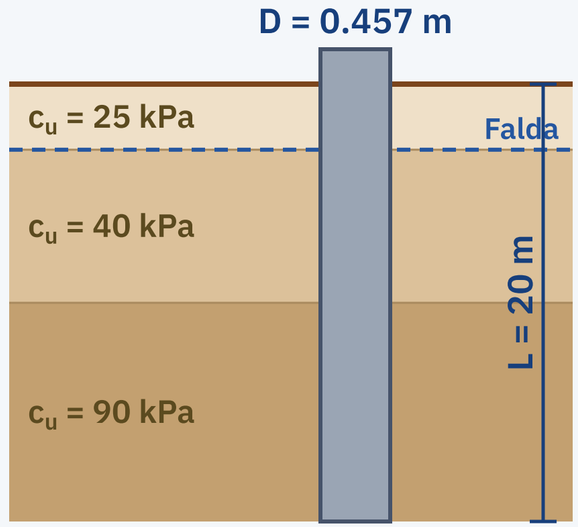
ESEMPIO

Dati

Argilla 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \text{kPa},\ \gamma = 16\ \text{kN/m}^3$
Argilla 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \text{kPa},\ \gamma = 17\ \text{kN/m}^3$
Argilla 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \text{kPa},\ \gamma = 18\ \text{kN/m}^3$
Falda freatica (YASS)	**alla profondità di 3.0 m**
Palo	**palo tubolare, D = 0.457 m, L = 20 m**
Tensione efficace media	$\bar{\sigma}'_o = 98.85\ \text{kPa}$ **(Esempio 1)**

RICHIESTO

Con il **metodo λ**, determinare l'**attrito laterale** Q_s del palo.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Resistenza media (pesata sullo spessore)

$$\bar{c}_u = \frac{25(3) + 40(7) + 90(10)}{20} = \mathbf{62.75}\ \text{kPa}$$

2 λ (L = 20 m, dalla tabella) e attrito unitario medio

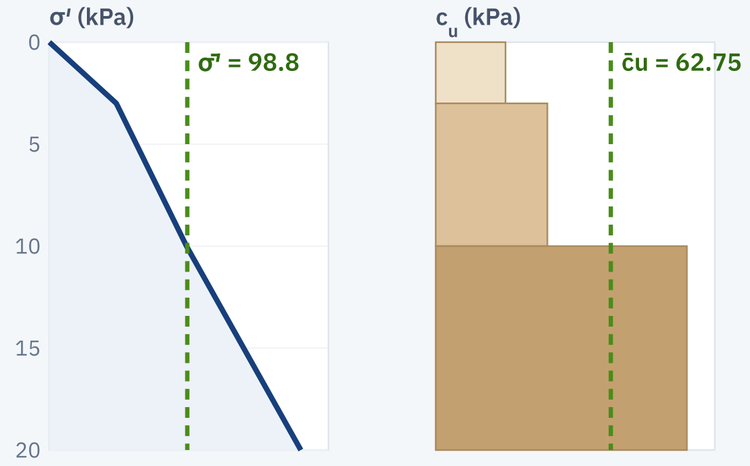
$$\lambda = 0.173$$

$$f_{av} = \lambda(\bar{\sigma}'_o + 2\bar{c}_u) = 0.173\,(98.85 + 2(62.75)) = \mathbf{38.81}\ \text{kPa}$$

3 Attrito laterale

$$Q_s = p\,L\,f_{av} = 1.436(20)(38.81) = \mathbf{1{,}114}\ \text{kN}$$

Il metodo λ combina le due medie: **1,114 kN**. Nella figura l'area a sinistra è $\bar{\sigma}'_o$, la linea a destra è $\bar{c}_u$.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

β: tensione efficace e crosta rimaneggiata

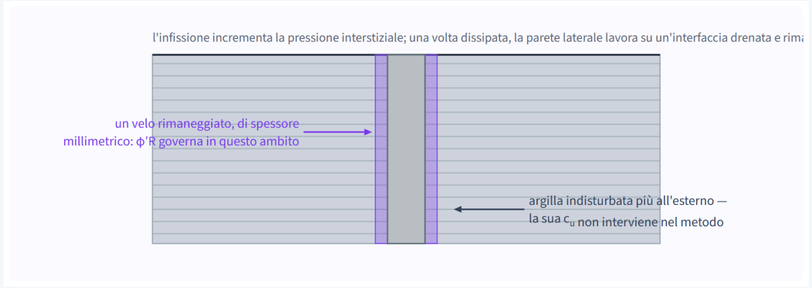
TEORIA

L'approccio di Burland in tensioni efficaci (con la correzione per sovraconsolidazione di Meyerhof): non considera affatto la resistenza non drenata; si ricava dalla **tensione verticale efficace** e dall'angolo di attrito drenato dell'argilla **rimaneggiata** (c′ = 0):

$$f = \beta\,\sigma'(z) \qquad \beta = K\tan\delta,\quad \delta = \varphi'_R$$

$$\beta = (1-\sin\varphi'_R)\tan\varphi'_R\sqrt{OCR}$$

K : coefficiente di spinta laterale; assunto cautelativamente **a riposo**, aumenta con √OCR per argilla sovraconsolidata
Per OCR = 1 l'espressione si riduce da sola alla forma normalconsolidata



φ′R e OCR **si inseriscono**, non si ricavano dal terreno mediante correlazione (nel modulo si apre con φ′R = 30°, OCR = 1).

f, insieme a σ′(z), **aumenta con la profondità** entro lo strato; presenta un salto al confine dove cambia β.

Traccia

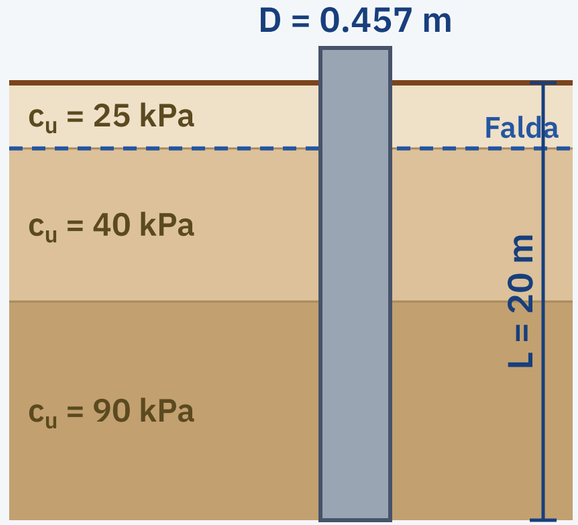
ESEMPIO

Dati

Argilla 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \text{kPa},\ \gamma = 16\ \text{kN/m}^3$
Argilla 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \text{kPa},\ \gamma = 17\ \text{kN/m}^3$
Argilla 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \text{kPa},\ \gamma = 18\ \text{kN/m}^3$
Falda freatica (YASS)	**alla profondità di 3.0 m**
Angolo di attrito rimaneggiato	$\varphi'_R = 30°$ **(tre strati)**
Rapporto di sovraconsolidazione	$OCR = 1;\ 1;\ 2$ **(strato 3 sovraconsolidato)**
Palo	**D = 0.457 m, L = 20 m**

RICHIESTO

Con il **metodo β**, determinare la **resistenza laterale** Q_S del palo. (Valori medi di σ′ per strato ricavati dalle aree dell'Esempio 1.)



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Coefficienti β

$$\beta_{1,2} = (1 - \sin 30^\circ)\tan 30^\circ = \mathbf{0.289} \qquad \beta_3 = 0.289\sqrt{2} = \mathbf{0.408}$$

2 Tensioni efficaci medie degli strati (area / spessore)

$$\bar{\sigma}'_1 = \frac{72}{3} = 24.0, \quad \bar{\sigma}'_2 = \frac{512.2}{7} = 73.2, \quad \bar{\sigma}'_3 = \frac{1{,}392.8}{10} = 139.3\ \text{kPa}$$

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

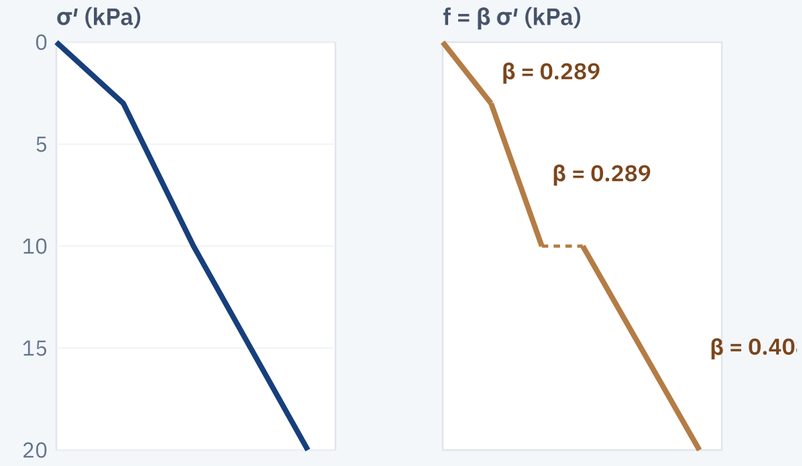
3 Attrito laterale unitario medio dello strato $\bar{f} = \beta\,\bar{\sigma}'$

$$\bar{f}_1 = 6.93, \quad \bar{f}_2 = 21.12, \quad \bar{f}_3 = 56.86\ \text{kPa}$$

4 Attrito laterale $Q_s = p\,\Sigma\,\bar{f}\,H$

$$Q_s = 1.436\,[6.93(3) + 21.12(7) + 56.86(10)] = \mathbf{1{,}058}\ \text{kN}$$

La media è l'**integrale reale** della tensione nello strato (non la media dei due estremi): se la falda freatica interseca lo strato, le due possono differire di oltre il 10%. Il risultato è **1,058 kN**.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Tre approcci, lo stesso palo

TEORIA



In questo profilo i tre valori sono tra loro vicini entro **qualche punto percentuale**. Ma **in linea di principio** non concordano; l'accordo è una proprietà di questo profilo.

Per un palo molto **lungo** λ diminuisce a causa del coefficiente

Nell'argilla **sovraconsolidata**, β aumenta con √OCR

Nell'argilla **morbida** normalconsolidata α cresce verso la resistenza piena del terreno

Lettura onesta: nell'argilla la resistenza laterale è nota con un'incertezza pari a circa **un quinto** del valore calcolato. Nelle grandi opere una **prova di carico** vale quindi il suo costo.

Il palo trivellato ha regole proprie

TEORIA

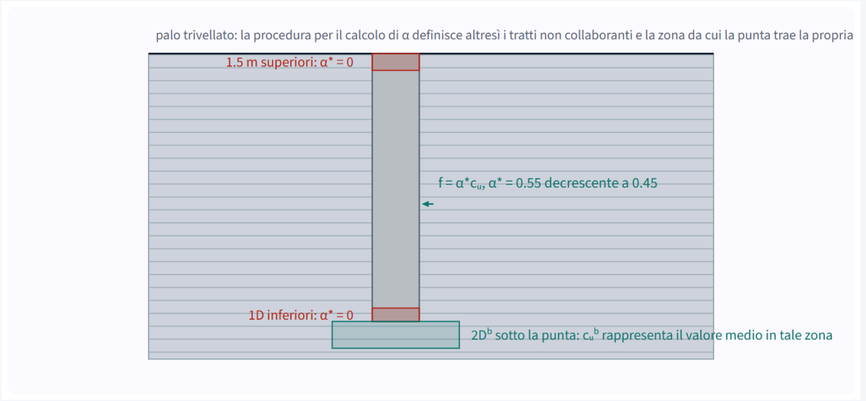
Si esegue il foro e si getta il calcestruzzo: il terreno non viene spostato; l'argilla sulla parete del foro richiama acqua e **si rammollisce**, sotto la base si accumulano detriti e per mobilitare la resistenza alla punta è necessario un **cedimento maggiore**. La procedura di O'Neill e Reese modifica entrambe le metà.

$$\alpha^* = 0 \;\; (\text{superiore } 1.5\text{ m e inferiori } 1D) \qquad \alpha^* = 0.55 \;\; (\text{altrove})$$

α* = 0.55 ($c_u/p_a \le 1.5$), decrescente fino a 0.45 a 2.5

I primi 1.5 m sono il terreno più rimaneggiato, il più soggetto al ritiro indotto dal fusto; il tratto inferiore pari a un diametro è la lunghezza lungo la quale la base mette già in movimento il terreno

Gli spessori degli strati non cambiano: la profondità e σ′ restano come nel profilo, cambia solo la lunghezza che mobilita l'attrito



$$q_p = \min\left[6c_{ub}\left(1 + 0.2\frac{L}{D_b}\right),\; 9c_{ub},\; 40p_a\right]$$

c_{ub}: c_u medio nella zona **$2D_b$** sotto la base. Se D_b > 1.91 m, q_p è ridotto con un fattore $F_r \le 1$.

Traccia

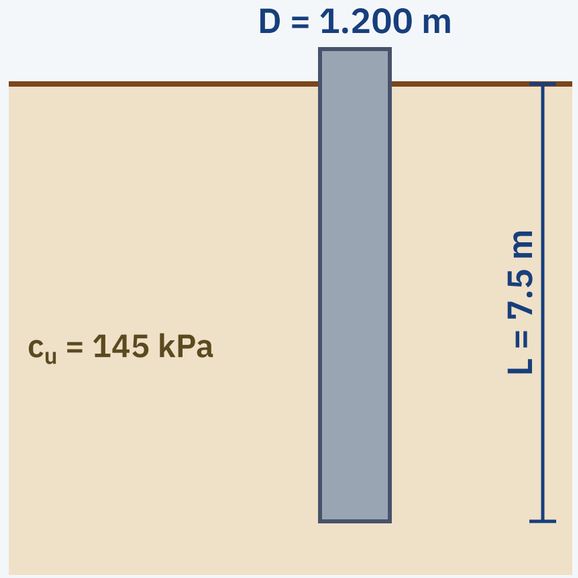
ESEMPIO

Dati

Palo	**palo trivellato, sezione circolare**
Diametro e lunghezza	**$D = D_b = 1.2$ m, $L = 7.5$ m**
Argilla (omogenea)	$c_u = 145\ \mathrm{kPa}$, $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$
Acqua sotterranea	**nessuno**
Fattore di sicurezza	**FS = 3**

RICHIESTO

Determinare la **resistenza alla punta**, l'**attrito laterale** e la **capacità portante ammissibile** del palo trivellato.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Resistenza media nella zona $2D_b$ sotto la base ed espressione della base

$$c_{ub} = 145\ \text{kPa} \qquad 6c_{ub}\left(1 + 0.2\frac{7.5}{1.2}\right) = 1{,}957.5\ ; \quad 9c_{ub} = 1{,}305\ ; \quad 40p_a = 4\,000$$

2 q_p = il minore dei tre; poiché $D_b = 1.2\ \text{m} \le 1.91\ \text{m}$, $F_r = 1$

$$q_p = \min(1{,}957.5;\ 1{,}305;\ 4\,000) = \mathbf{1{,}305}\ \text{kPa}$$

3 Area della base e resistenza alla punta

$$A_b = \frac{\pi(1.2)^2}{4} = 1.131\ \text{m}^2 \quad Q_p = A_b\, q_p = \mathbf{1{,}476}\ \text{kN}$$

Prevale $9c_{ub}$: la formula $6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b)$ dà un valore maggiore, ma entra in gioco il limite superiore $9c_u$. Q_p = **1,476 kN**.

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

4 α* e la lunghezza che contribuisce all'attrito laterale (si trascurano 1.5 m in sommità e 1D alla base)

$$\alpha^* = 0.55 \quad (c_u/p_a = 1.45 \le 1.5)$$

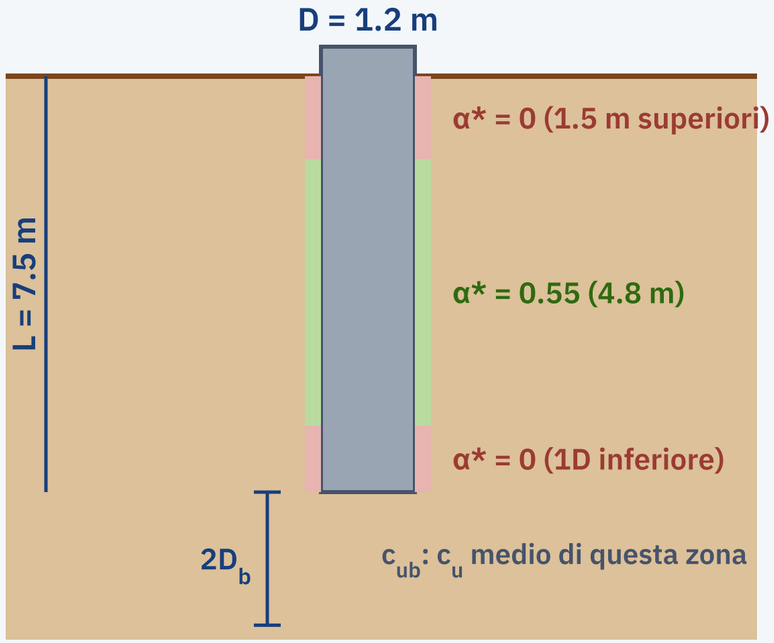
$$L_{eff} = 7.5 - 1.5 - 1.2 = \mathbf{4.8}\ \text{m}$$

5 Attrito laterale

$$Q_s = \pi D\, \alpha^* c_u\, L_{eff} = \pi(1.2)(0.55)(145)(4.8) = \mathbf{1{,}443}\ \text{kN}$$

6 Carico limite unitario e capacità portante ammissibile

$$Q_u = 1{,}476 + 1{,}443 = 2{,}919\ \text{kN} \qquad Q_{all} = \frac{Q_u}{3} = \mathbf{973}\ \text{kN}$$



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Totale con un unico fattore di sicurezza

TEORIA

La capacità limite è la somma delle due componenti; la capacità ammissibile si ottiene applicando **un unico fattore di sicurezza all'intera somma**:

$$Q_{all} = \frac{Q_p + Q_s}{FS}$$

Per un palo singolo si assume di norma **FS = 2.5 – 4**

Estremo superiore: quando il terreno è noto solo da pochi sondaggi, quando l'argilla è **dura e fessurata** oppure quando non è prevista una **prova di carico**

I metodi per la punta e per la laterale si possono scegliere **indipendentemente** l'uno dall'altro; i risultati si interpretano congiuntamente

Traccia

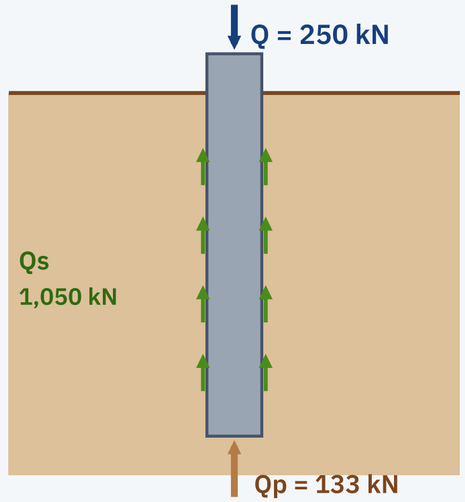
ESEMPIO

Dati

Resistenza alla punta	**Q_p = 132.9 kN (Meyerhof, Esempio 2)**
Attrito laterale	**Q_s = 1,050 kN (metodo α, Esempio 4)**
Fattore di sicurezza	**FS = 4**
Carico di esercizio sul palo	**Q = 250 kN**

RICHIESTO

Qual è la **capacità portante ammissibile** Q_{all} del palo? Il carico di esercizio è **sufficiente**?



Soluzione

SOLUZIONE

1 Carico limite unitario

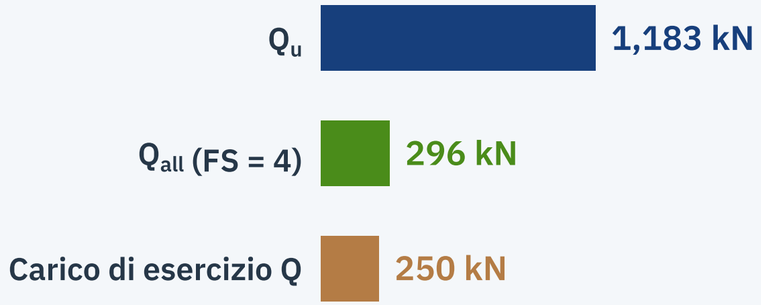
$$Q_u = Q_p + Q_s = 132.9 + 1{,}050.1 = \mathbf{1{,}183}\ \text{kN}$$

2 Capacità portante ammissibile

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{1{,}183}{4} = \mathbf{296}\ \text{kN}$$

3 Verifica

$$Q = 250\ \text{kN} \ \leq \ Q_{all} = 296\ \text{kN} \ \Rightarrow \ \text{sufficiente}$$



Rapporto di utilizzazione Q / Q_{all} = 250 / 296 = **0.85**. Il fusto porta circa l'89% del totale.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Lo stesso palo: Q_u e Q_{all} (FS = 4)

TEORIA

Q_u · Q_{all} (kN)

	Q_s: α 1,050 kN	Q_s: λ 1,114 kN	Q_s: β 1,058 kN
Q_p: Meyerhof 132.9 kN	1,183 · **296**	1,247 · **312**	1,191 · **298**
Q_p: Vesic 168.5 kN	1,219 · **305**	1,283 · **321**	1,227 · **307**

Nelle sei combinazioni Q_u varia solo tra **1,183 – 1,283 kN**: poiché la punta è piccola, la scelta influisce assai poco sul totale; la differenza sostanziale sta nell'attrito laterale.

Interpretare l'intervallo, non affidarsi a un unico valore

L'attrito laterale costituisce **circa nove decimi** del totale

Per le opere di maggiore importanza, verificare con una **prova di carico su palo**

Sintesi

Punti chiave

L'argilla è **non drenata** ($\varphi = 0$, $\tau_f = c_u$); la resistenza non è proporzionale alla tensione efficace

Punta: Meyerhof $N^*_c = 9$; Vesic $N^*_c = f(I_{rr})$, $I_r \approx 347c_u/p_a - 33$; la resistenza alla punta è una parte ridotta del totale

α: $f = \alpha c_u$ · **λ**: $f_{av} = \lambda(\bar{\sigma'} + 2\bar{c}_u)$ · **β**: $f = \beta\sigma'$, $\beta = (1 - \sin\varphi'_R)\tan\varphi'_R\sqrt{OCR}$

Palo trivellato: $\alpha^* = 0$ (superiore 1.5 m, inferiore 1D), $q_p = \min[6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b), 9c_{ub}, 40p_a]$

$Q_{amm} = (Q_p + Q_s)/FS$, $FS = 2.5 - 4$

Bibliografia

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning; questa pagina fa riferimento a tale testo.

Terzaghi, K., Peck, R.B. e Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3a ed. Wiley — valori di α della Tabella 2.

O’Neill, M.W. e Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025 — il metodo α per pali trivellati e l'indice di rigidezza dell'argilla.

Reese, L.C. e O’Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA — l'espressione di base per la punta di un palo trivellato in argilla.

Burland, J.B. (1973). Shaft friction of piles in clay — a simple fundamental approach. Ground Engineering, 6(3), 30–42.

Meyerhof, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT3), 197–228 — il correttivo √OCR nel metodo β.

Vijayvergiya, V.N. e Focht, J.A. (1972). A new way to predict the capacity of piles in clay. Offshore Technology Conference, Paper 1718, Houston.

Vesic, A.S. (1977). Design of Pile Foundations. NCHRP Synthesis of Highway Practice 42, Transportation Research Board.

NOTA

Le figure di questa presentazione sono tratte dalla pagina Teoria di GeoTerva; tutti gli esempi numerici sono stati prodotti con la libreria di calcolo del modulo stesso, e il modulo restituisce gli stessi valori.

GeoTerva

Calcoli geotecnici online

Dalla teoria alla pratica

Calcolare il palo dell'esempio di questa presentazione passo per passo in GeoTerva: i numeri sono gli stessi.

Aprire il modulo →

Pagina di teoria →

Aprire dallo smartphone

I moduli di prova non richiedono registrazione.

Se si desidera utilizzarli nelle proprie lezioni: info@geoterva.com