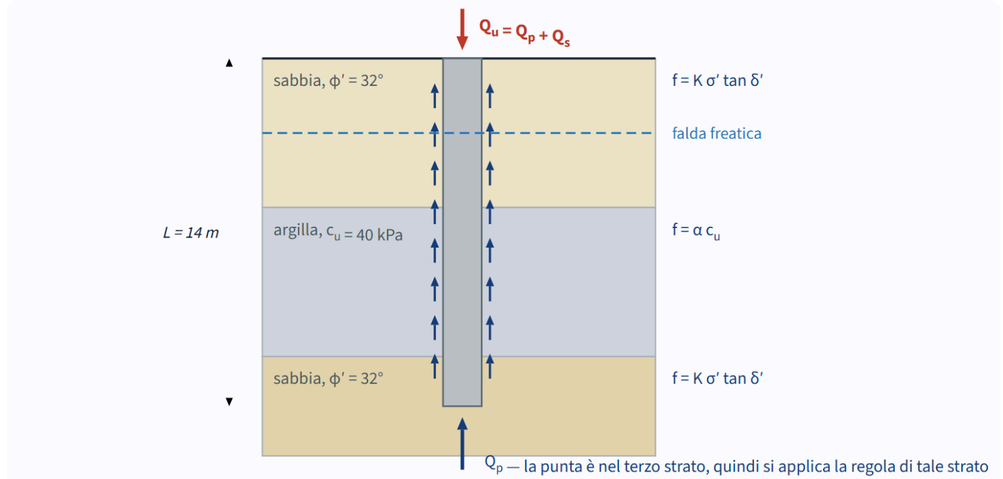
Presentazione didattica di geotecnica · Pali

Capacità portante del palo in terreno stratificato

Lezione: capacità di un palo che attraversa strati di sabbia e argilla. Quale regola vale e dove, come si accumula la tensione efficace attraverso gli strati; per ogni argomento un esempio di calcolo.

- Calcolo strato per strato
- Punta: strato alla punta
- Regole per sabbia + argilla
- Palo trivellato
- Esempi di calcolo



Introduzione

Che cosa si impara in questa lezione?

Accumulare la tensione efficace strato per strato; vedere come uno strato di argilla, anche se la sua resistenza non si estende nella sabbia, ne influenzi la sabbia sottostante con il proprio peso

Sapere che la **resistenza alla punta** dipende solo dallo strato in cui si trova la punta ed è calcolata con la regola di quello strato

Applicare la regola K–δ **nello strato di sabbia** (la profondità critica L′ = 15D è riferita all'intero palo) e le regole α, λ e β **nello strato di argilla**

Sommare la resistenza laterale attraverso gli strati; interpretare i salti di attrito ai confini degli strati e l'effetto della lunghezza del palo

Comprendere che **in un palo trivellato** la finestra di α* e c_{ub} possono derivare da più strati

SVOLGIMENTO DELLA LEZIONE

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

1 · **Teoria**: qual è la regola e perché è così?

2 · **Traccia**: dati e richiesto

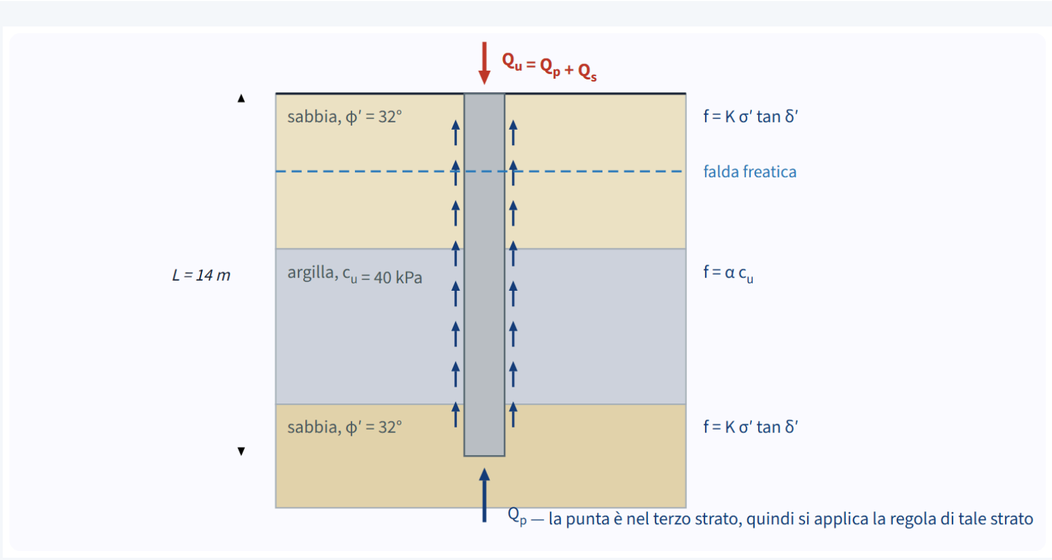
3 · **Soluzione**: passo per passo, con i numeri

La maggior parte degli esempi utilizza lo stesso palo: un palo di 0.4 m di diametro, lungo 14 m, che attraversa un profilo sabbia–argilla–sabbia.

Questa lezione si basa sulle lezioni relative ai **pali in sabbia** e ai **pali in argilla**: le regole sono state apprese lì; qui si esamina quale di esse si applichi e dove.

Ogni strato risponde secondo la propria legge

TEORIA



Raramente un palo attraversa un unico terreno. Il profilo è **costituito da più strati**; ciascuno è definito come sabbia o argilla e si applica **la regola del proprio materiale**. La capacità è ancora composta da due parti, ma non si legge più da un'unica formula: viene **costruita pezzo per pezzo**:

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

Nessuna nuova teoria: le regole per la sabbia appartengono al modulo sabbia, quelle per l'argilla al modulo argilla.

L'elemento nuovo è lo **schema di calcolo**: quale regola vale in quale parte del fusto e come la tensione efficace si accumula dagli strati sovrastanti.

La resistenza alla punta deriva da **un singolo strato**, la resistenza laterale dalla **somma di tutti gli strati**.

Tensione continua, attrito a gradoni

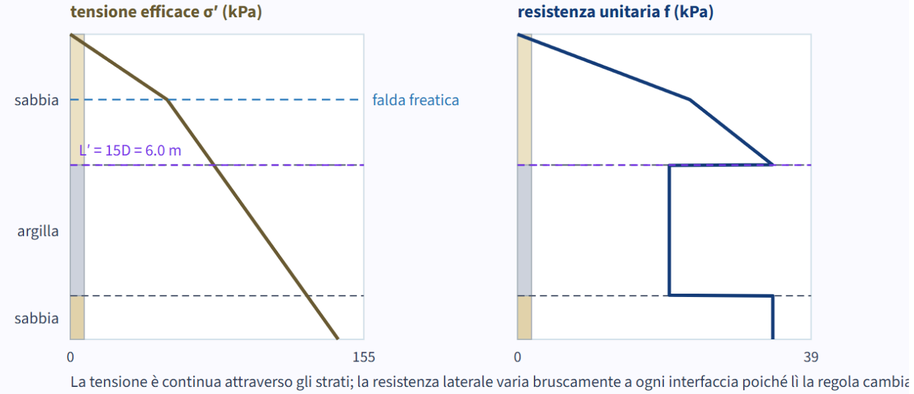
TEORIA

La tensione verticale efficace è ciò che collega gli strati tra loro: **il peso di ogni strato sovrastante** si accumula; sopra la falda freatica si usa il peso dell'unità di volume umido, sotto quella immerso.

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

Lo strato di argilla non conferisce alla sabbia una propria resistenza; tuttavia, **con il suo peso**, modifica la resistenza offerta dalla sabbia sottostante.

L'attrito invece non è continuo: al confine sabbia–argilla **cambia la regola stessa** e l'attrito unitario può presentare un forte salto. Questo salto non è un errore del calcolo ma la **firma** del profilo stratificato.



La tensione è continua attraverso gli strati; la resistenza laterale varia bruscamente a ogni interfaccia poiché lì la regola cambia

Traccia

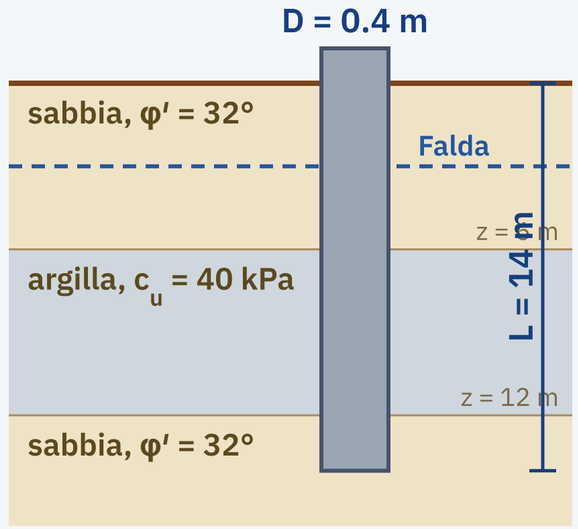
ESEMPIO

Dati

Sabbia 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argilla (6–12 m)	$c_u = 40\ \text{kPa}$
Sabbia 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso dell'unità di volume	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \text{kN/m}^3$ **(tre strati)**
Acqua sotterranea	**alla profondità di 3.0 m**
Palo	**infisso, D = 0.4 m, L = 14 m**
Peso dell'unità di volume dell'acqua	$\gamma_w = 9.81\ \text{kN/m}^3$

RICHIESTO

Determinare la tensione verticale efficace alle profondità di **3, 6, 12 e 14 m** (14 m = punta del palo).



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Fino alla falda freatica (3 m): l'intero strato è umido, $\gamma = 17$

$$\sigma'(3) = 17(3) = \mathbf{51.0}\ \text{kPa}$$

2 6 m (confine sabbia–argilla): sotto la falda freatica, $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 18 - 9.81$

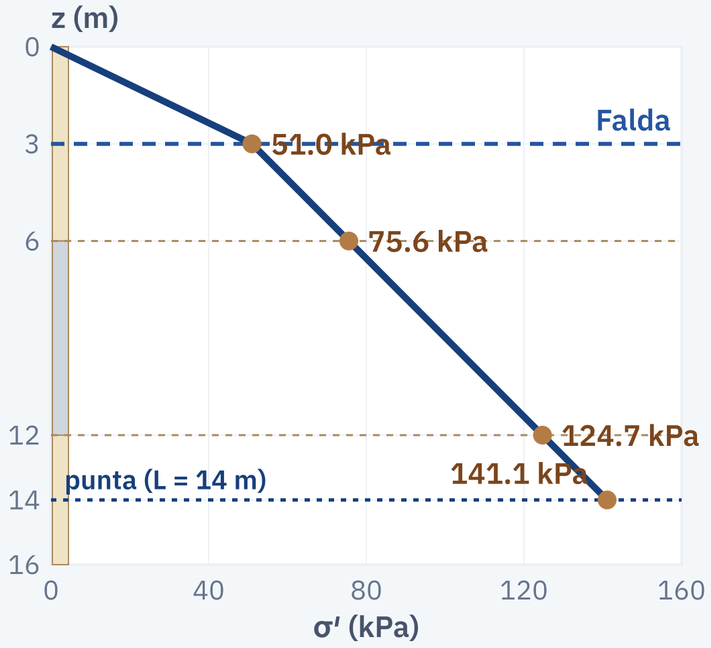
$$\sigma'(6) = 51.0 + (18 - 9.81)(3) = \mathbf{75.6}\ \text{kPa}$$

3 12 m (confine argilla–sabbia): anche il γ_{sat} dell'argilla vale 18

$$\sigma'(12) = 75.6 + (18 - 9.81)(6) = \mathbf{124.7}\ \text{kPa}$$

4 14 m (punta del palo)

$$\sigma'(14) = 124.7 + (18 - 9.81)(2) = \mathbf{141.1}\ \text{kPa}$$



Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

5 In ogni tratto l'area del diagramma di σ′ (trapezio); queste forniranno la tensione media nel calcolo della resistenza laterale

$$A_{0-6} = \tfrac{1}{2}(0 + 51.0)(3) + \tfrac{1}{2}(51.0 + 75.6)(3) = 266.4$$
$$A_{6-12} = \tfrac{1}{2}(75.6 + 124.7)(6) = 600.8$$
$$A_{12-14} = \tfrac{1}{2}(124.7 + 141.1)(2) = 265.8$$

σ′ è **continua attraverso gli strati**: non vi è salto al confine sabbia–argilla; la pendenza cambia solo in corrispondenza della falda freatica e dove cambia γ′. Queste tre aree saranno utilizzate come σ̄′ medio negli Esempi 4 e 5.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

La punta interroga solo il proprio strato

TEORIA

La resistenza alla punta appartiene a **un unico strato**: quello in cui si trova la punta del palo. È calcolata in base al materiale di quello strato; gli strati sovrastanti intervengono solo tramite σ′ (**con punta in sabbia**) e **non hanno alcun effetto con punta in argilla**.

$$\text{sabbia:}\quad Q_p = A_p\, q'\, N_q^* \le A_p\, q_l,\quad q_l = 0.5\, p_a N_q^* \tan\varphi'$$

$$\text{argilla:}\quad Q_p = A_p\, c_u\, N_c^*,\quad N_c^* = 9\ \text{(Meyerhof)}$$

Un palo la cui punta coincide con **un limite esatto** si considera appoggiato allo strato **sotto** il limite.

Coyle–Castello è una correlazione per la **sabbia**; non ha significato alla punta in argilla e, anche se selezionata, la regola per l'argilla resta valida.



Alla punta nella sabbia sono determinanti σ′ e N^*_q; alla punta nell'argilla solo il valore c_u di quello strato.

Traccia

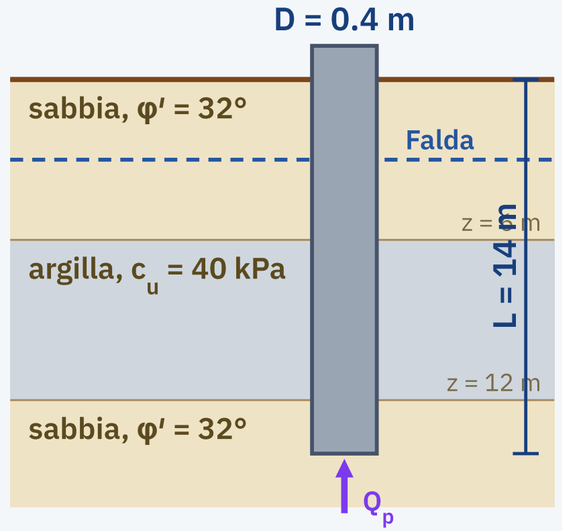
ESEMPIO

Dati

Sabbia 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argilla (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Sabbia 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso dell'unità di volume	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(tre strati)**
Acqua sotterranea	**alla profondità di 3.0 m**
Palo	**infisso, sezione circolare, D = 0.4 m, L = 14 m**
Metodo della punta	**Meyerhof**
Pressione atmosferica	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$
Tensione efficace alla punta	$q' = \sigma'(14) = 141.1\ \mathrm{kPa}$ **(Esempio 1)**

RICHIESTO

Determinare in quale strato si trova la punta e calcolare la **resistenza alla punta** Q_p.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

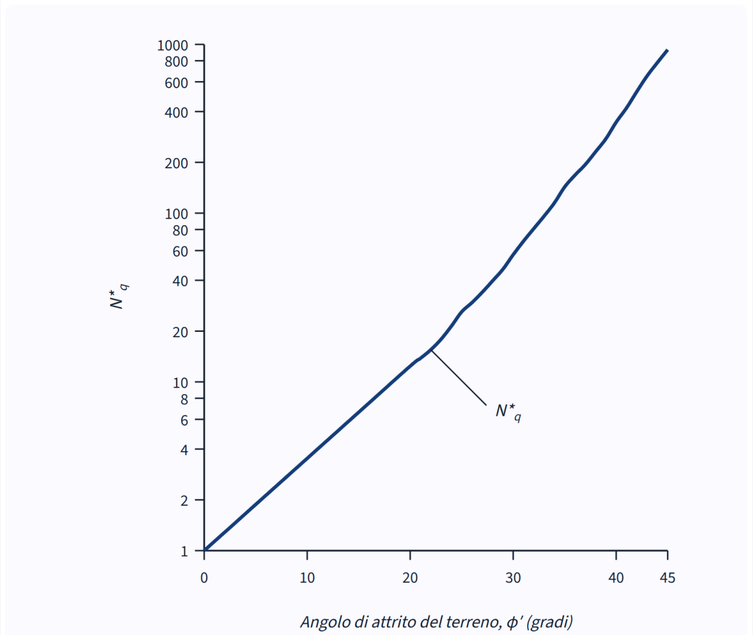
1 Strato della punta: L = 14 m, nella sabbia tra 12–16 m → regola della sabbia (l'argilla sovrastante non interessa la punta)

$$\varphi' = 32^\circ \qquad q' = \sigma'(14) = 141.1\ \text{kPa}$$

2 N^*_q dall'abaco di Meyerhof per φ′ = 32°; poi i due valori affiancati

$$N_q^* = 81$$
$$q' N_q^* = 141.1(81) = 11{,}428\ \text{kPa}$$
$$q_l = 0.5(100)(81)\tan 32^\circ = 2{,}531\ \text{kPa}$$

Il valore N^*_q dell'abaco (a lato) è 81; $q'N^*_q$ = 11,428 kPa, molto maggiore del valore limite q_l = 2,531 kPa: **il limite è determinante**.



Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

3 Resistenza unitaria alla punta: la minore delle due

$$q_p = \min(q' N_q^*;\ q_l) = \min(11{,}428;\ 2{,}531) = \mathbf{2{,}531}\ \text{kPa}$$

4 Area della punta del palo e resistenza alla punta

$$A_p = \frac{\pi (0.4)^2}{4} = 0.1257\ \text{m}^2 \qquad Q_p = A_p\, q_p = 0.1257(2{,}531) = \mathbf{318.0}\ \text{kN}$$

Resistenza alla punta **318.0 kN**. Poiché la punta del palo è nella sabbia vale la regola per la sabbia; essendo attivo il limite, in questo esempio il valore di σ′ non modifica il risultato.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

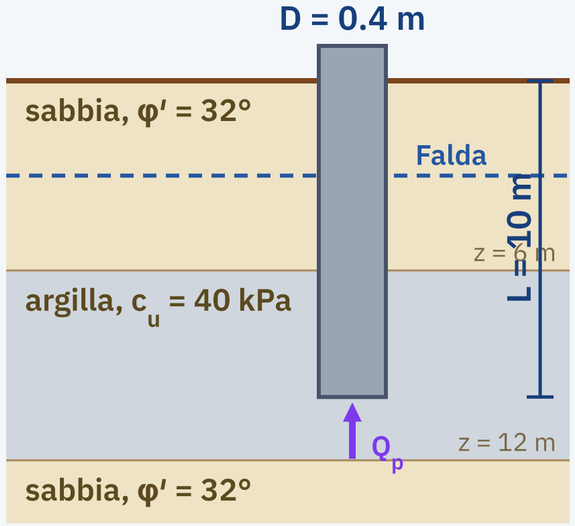
ESEMPIO

Dati

Sabbia 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argilla (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Sabbia 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso dell'unità di volume	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(tre strati)**
Acqua sotterranea	**alla profondità di 3.0 m**
Palo	**stesso palo, ma L = 10 m**
Metodi alla punta	**Meyerhof e Vesic**
Pressione atmosferica	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$

RICHIESTO

Se il palo viene accorciato a 10 m, stabilire in quale strato rimane la punta e determinare la **resistenza alla punta** con due metodi.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Strato alla punta: L = 10 m, nell'argilla tra 6–12 m → regola dell'argilla (sabbia e σ′ non entrano più nel calcolo)

$$c_u = 40\ \text{kPa} \qquad A_p = 0.1257\ \text{m}^2$$

2 Meyerhof: $N^*_c = 9$

$$q_p = 9\,c_u = 9(40) = 360\ \text{kPa} \qquad Q_p = 0.1257(360) = \mathbf{45.2}\ \text{kN}$$

3 Vesic: $I_{rr} = I_r = 347(c_u/p_a) - 33$

$$I_{rr} = 347(0.4) - 33 = 105.8$$
$$N_c^* = \tfrac{4}{3}(\ln 105.8 + 1) + \tfrac{\pi}{2} + 1 = 10.12$$
$$q_p = 40(10.12) = 405\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ Q_p = 0.1257(405) = \mathbf{50.9}\ \text{kN}$$

Per un palo con la punta in sabbia Q_p = **318 kN**; in argilla risulta **45 – 51 kN**: circa un settimo. Prolungando lo stesso palo di 2 m fino a raggiungere la sabbia, la resistenza alla punta aumenta bruscamente.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

K–δ: la profondità critica appartiene all'intero palo

TEORIA

Nello strato di sabbia il fusto oppone resistenza per attrito alla tensione efficace orizzontale. Ogni strato di sabbia ha **il proprio** valore di K e δ′:

$$f = K_i\,\sigma'\tan\delta_i' \;\; (z \le L') \qquad f = f_{z=L'} \;\; (z > L'),\;\; L' = 15D$$

L′ si riferisce **all'intero palo**, non allo strato: al di sotto di L′ il valore di σ′ è mantenuto pari a quello in corrispondenza di L′.

Uno strato di sabbia profondo fornisce un attrito unitario **costante** lungo lo strato, indipendentemente dalla posizione del suo confine.

Opzione: **Coyle–Castello**. Il K proprio dello strato (dall'abaco), δ′ = 0.8φ′ e il valore medio di σ′ dello strato; non vi è profondità critica, il valore medio svolge la sua funzione.

COYLE–CASTELLO (PER STRATO)

$$f_i = K_i\,\bar{\sigma}_i'\tan(0.8\varphi_i')$$

$$Q_s = p\sum f_i\,\Delta L_i$$

Nel metodo K–δ il valore di δ′ è spesso assunto nell'intervallo 0.75φ′ – 0.8φ′; in questa presentazione si utilizzeranno **δ′ = 0.8φ′ = 25.6°** e **K = 1.0**.

Traccia

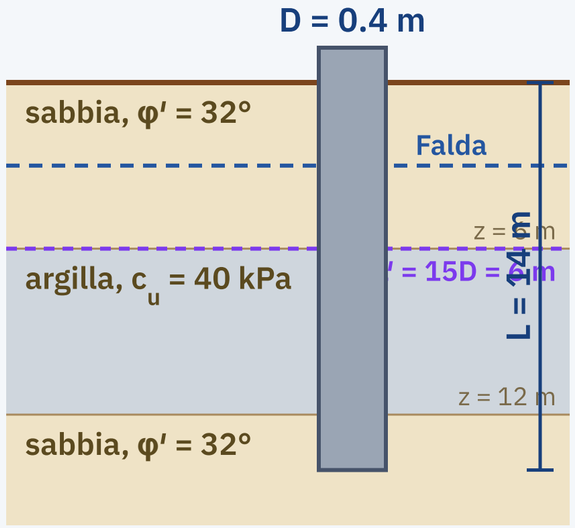
ESEMPIO

Dati

Sabbia 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argilla (6–12 m)	$c_u = 40\ \text{kPa}$
Sabbia 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso dell'unità di volume	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \text{kN/m}^3$ **(tre strati)**
Acqua sotterranea	**alla profondità di 3.0 m**
Palo	**infisso, D = 0.4 m, L = 14 m**
Perimetro	$p = \pi D = 1.257\ \text{m}$
In strati di sabbia	$K = 1.0,\ \delta' = 0.8\varphi' = 25.6^\circ$ **(inserire questi valori nel modulo; il modulo si apre con K = 0.66 e δ′ = 24°)**

RICHIESTO

Determinare la resistenza laterale degli strati di sabbia (0–6 m e 12–14 m) con il metodo K–δ. Profondità critica L′ = 15D.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Profondità critica (unica per l'intero palo)

$$L' = \min(15D;\ L) = \min(15(0.4);\ 14) = \mathbf{6}\ \text{m} \qquad \sigma'(L') = 75.6\ \text{kPa (Esempio 1)}$$

2 Sabbia 1 (0–6 m): lo strato è interamente compreso in L′; nessun cappello; σ′ medio = area / spessore

$$\bar{\sigma}'_1 = \frac{266.4}{6} = 44.4\ \text{kPa}$$

3 Attrito unitario e resistenza

$$f_1 = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}'_1 = 1.0(0.4791)(44.4) = 21.3\ \text{kPa}$$

$$Q_{s1} = p\, f_1 H = 1.2566(21.3)(6) = \mathbf{160.4}\ \text{kN}$$

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

4 Sabbia 2 (12–14 m): interamente sotto L′ → il valore di σ′ viene mantenuto al valore che assume in L′

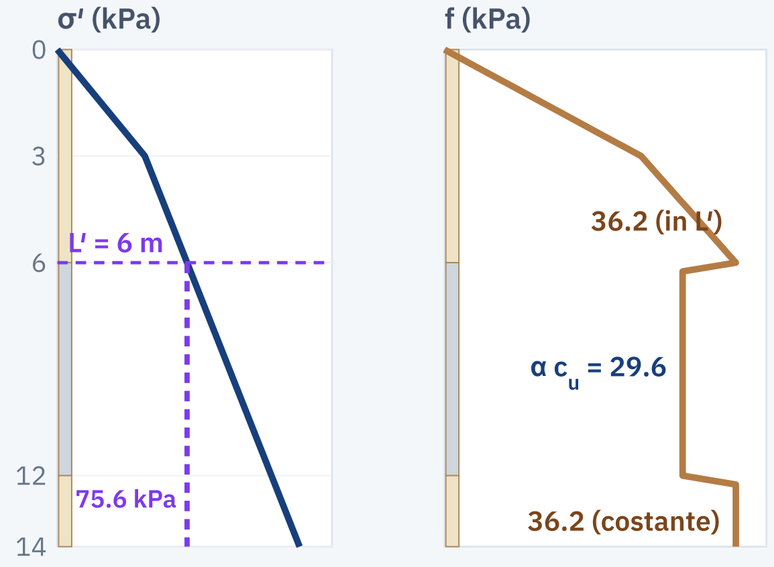
$$\sigma' = \sigma'(L') = 75.6\ \text{kPa}$$

$$f_3 = 1.0(0.4791)(75.6) = \mathbf{36.2}\ \text{kPa}$$

5 Resistenza (spessore 14 − 12 = 2 m)

$$Q_{s3} = p\, f_3 H = 1.2566(36.2)(2) = \mathbf{91.0}\ \text{kN}$$

Senza la profondità critica questo tratto darebbe σ′ = 132.9 kPa, f = 63.7 kPa e Q_{s3} = 160 kN. Il **tetto L′** riduce di **69 kN** il tratto profondo della sabbia.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Anche nell'argilla ogni strato adotta il proprio metodo

TEORIA

Nello strato di argilla il fusto oppone resistenza per **adesione** oppure per **tensione efficace**; tutti e tre i metodi del modulo argilla possono essere utilizzati strato per strato:

$$\alpha: \ f = \alpha_i c_{u,i} \qquad \lambda: \ f_i = \lambda\,(\bar{\sigma}'_i + 2c_{u,i}),\ \lambda = \lambda(L)$$

$$\beta: \ \beta_i = (1 - \sin\varphi'_{R,i})\tan\varphi'_{R,i}\sqrt{OCR_i}, \quad f_i = \beta_i \bar{\sigma}'_i$$

α: **non dipende** dalla profondità all'interno dello strato; l'attrito è costante lungo lo strato (uniforme).

λ e β ripristinano la tensione efficace; producono un **gradino** in funzione degli strati sovrastanti.

UNA NOTA SINCERA

Vijayvergiya e Focht scrissero λ come **un unico valore medio su tutta la lunghezza infissa**. Applicarlo separatamente a ciascuno strato di argilla in un profilo stratificato (λ sulla lunghezza L, con i valori medi σ′ e c_u di quello strato) è **un'estensione del metodo specifica di questo programma**; il modulo lo precisa ovunque.

φ'_R e OCR si **inseriscono**, non si ricavano dal terreno tramite una correlazione (si apre con 30° e 1).

Traccia

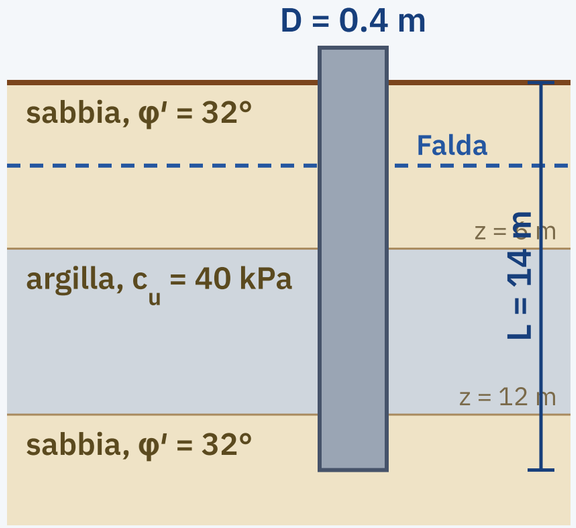
ESEMPIO

Dati

Sabbia 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argilla (6–12 m)	$c_u = 40\ \text{kPa}$
Sabbia 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso dell'unità di volume	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \text{kN/m}^3$ **(tre strati)**
Acqua sotterranea	**alla profondità di 3.0 m**
Palo	**infisso, D = 0.4 m, L = 14 m, p = 1.257 m**
σ′ medio dell'argilla	$\bar{\sigma}'_2 = A_{6-12}/6 = 100.1\ \text{kPa}$ **(Esempio 1)**
per β	$\varphi'_R = 30^\circ,\ OCR = 1$
per α	$p_a = 100\ \text{kPa}$**, α dalla tabella**

RICHIESTO

Determinare la resistenza laterale dello strato di argilla (6–12 m) con i metodi **α, λ e β**.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Metodo α: dalla tabella, α per $c_u/p_a = 0.4$

$$\alpha = 0.74 \quad f = \alpha c_u = 0.74(40) = 29.6\ \text{kPa} \quad Q_s = 1.2566(29.6)(6) = \mathbf{223.2}\ \text{kN}$$

2 Metodo λ: λ, lungo la **lunghezza del palo** (L = 14 m), si ricava dalla tabella ($\lambda_{10} = 0.245$; $\lambda_{15} = 0.200$)

$$\lambda = 0.209$$

$$f = \lambda(\bar{\sigma}'_2 + 2c_u) = 0.209(100.1 + 2(40)) = 37.6\ \text{kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(37.6)(6) = \mathbf{283.9}\ \text{kN}$$

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

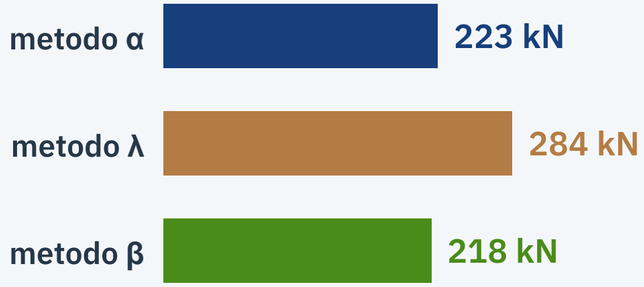
3 Metodo β: $\varphi'_R = 30°$, OCR = 1

$$\beta = (1 - \sin 30^\circ)\tan 30^\circ = 0.289$$

$$f = \beta \bar{\sigma}'_2 = 0.289(100.1) = 28.9 \text{ kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(28.9)(6) = \mathbf{218.0} \text{ kN}$$

I tre metodi forniscono **223**, **284** e **218 kN** per lo stesso strato di argilla: α e β sono vicini tra loro, mentre λ è circa il 27% più elevato. La differenza deriva dalle ipotesi su cui si basano i metodi; l'uso di λ per singolo strato è inoltre un'estensione.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Un unico integrale: lungo il palo

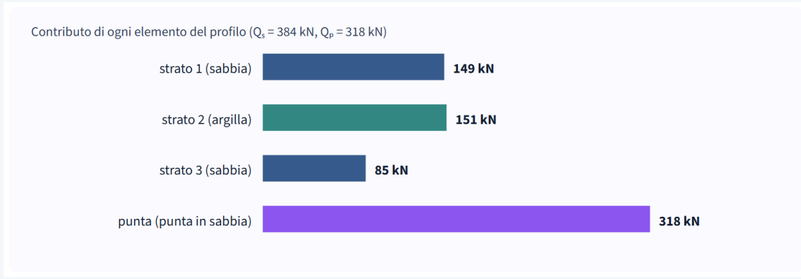
TEORIA

La resistenza laterale è l'integrale dell'attrito lungo il palo moltiplicato per il perimetro. Il calcolo è eseguito per via numerica; il limite può trovarsi **ovunque**, e un palo che termina a metà di uno strato non richiede un caso particolare:

$$Q_s = p \int_0^L f(z)\,dz \;\approx\; p \sum f_i\,\Delta z_i$$

Visto in questo modo, la stratificazione cessa di essere un problema e diventa una **questione di progetto**: **quale parte** del profilo porta il palo?

Come varia la capacità se il palo viene prolungato oltre il confine successivo o accorciato?



Contributo di ciascun tratto del palo dell'esempio (Q_s = 475 kN, Q_p = 318 kN).

Traccia

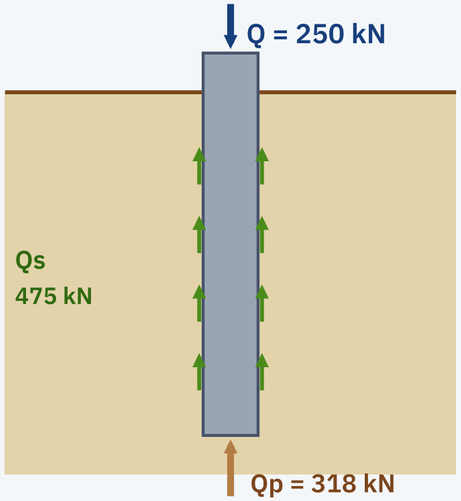
ESEMPIO

Dati

Resistenza alla punta	Q_p = 318.0 kN (Esempio 2)
Sabbia 1 (0–6 m)	Q_{s1} = 160.4 kN (Esempio 4)
Argilla (6–12 m)	Q_{s2} = 223.2 kN (metodo α, Esempio 5)
Sabbia 2 (12–14 m)	Q_{s3} = 91.0 kN (Esempio 4)
Fattore di sicurezza	FS = 3
Carico di esercizio sul palo	Q = 250 kN

RICHIESTO

Determinare la capacità portante **limite** e **ammissibile** del palo; il carico di esercizio è sufficiente?



Soluzione

SOLUZIONE

1 Resistenza laterale: somma dei tratti

$$Q_s = 160.4 + 223.2 + 91.0 \approx \mathbf{474.5}\ \text{kN}$$

2 Carico limite unitario

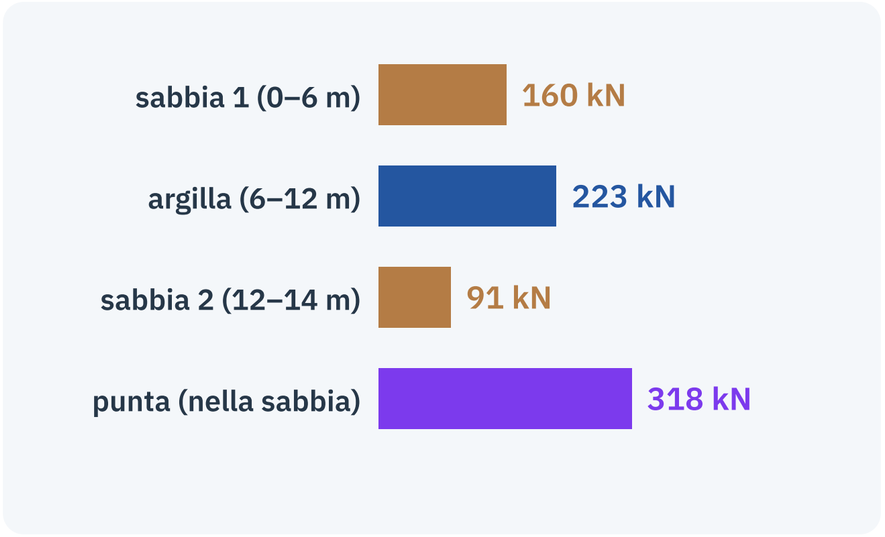
$$Q_u = Q_p + Q_s = 318.0 + 474.5 = \mathbf{792.6}\ \text{kN}$$

3 Capacità portante ammissibile e verifica

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{792.6}{3} = \mathbf{264.2}\ \text{kN}$$

$$Q = 250 \leq 264.2 \ \Rightarrow\ \text{sufficiente}$$

Il rapporto di utilizzo è 0.95. Lo strato di argilla costituisce solo il 43% del fusto, ma fornisce il 47% della capacità: oltre la profondità critica la sabbia non incrementa più σ′, mentre l'argilla fornisce lo stesso valore α c_u a ogni profondità.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

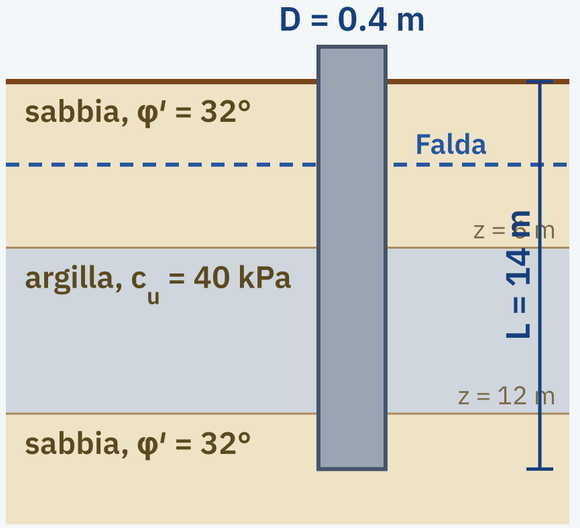
ESEMPIO

Dati

Sabbia 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argilla (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Sabbia 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso dell'unità di volume	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(tre strati)**
Acqua sotterranea	**alla profondità di 3.0 m**
Metodi	**infisso, D = 0.4 m; Meyerhof, α, K–δ**
Lunghezze	**L = 10, 12, 14 e 16 m**
Dati noti	**Esempio 2–6 per L = 14 m**

RICHIESTO

Come varia Q_u se la lunghezza del palo è **10, 12 e 16 m**? Spiegare la **ragione** della variazione.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 L = 10 m: punta in argilla (Esempio 3); tratto in argilla solo da 6 a 10 m

$$Q_p = 45.2\ ; \quad Q_s = 160.4 + 148.8 = 309.2\ ; \quad Q_u = \mathbf{354.4}\ \mathrm{kN}$$

2 L = 12 m: la punta è esattamente al confine → **si appoggia sulla sabbia sottostante**; la sabbia 2 non entra ancora nel fusto

$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 = 383.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{701.6}\ \mathrm{kN}$$

3 L = 16 m: la sabbia 2 entra nel fusto con uno spessore di quattro metri (σ′ limitata: f costante)

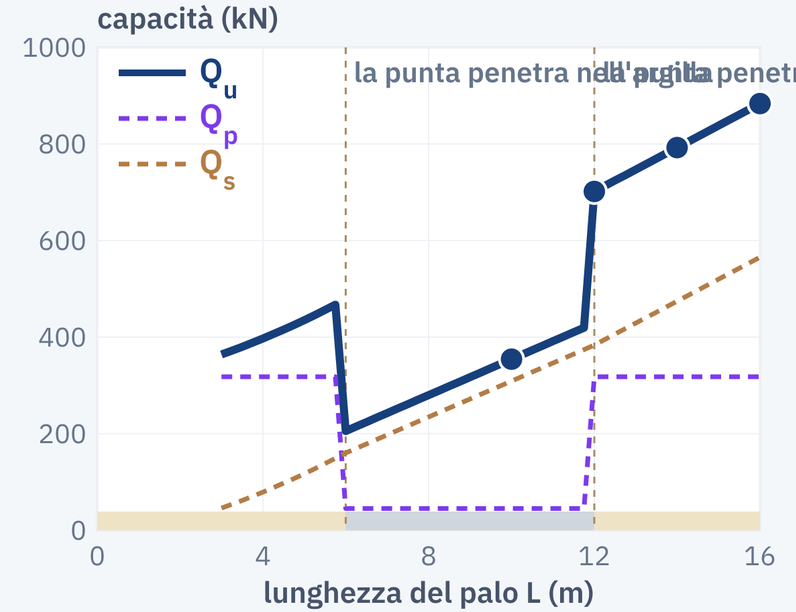
$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 + 182.0 = 565.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{883.6}\ \mathrm{kN}$$

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

L (m)	Strato della punta	Q_p (kN)	Q_s (kN)	Q_u (kN)	Q_{all} (kN)
10	argilla	45	309	**354**	118
12	sabbia	318	384	**702**	234
14	sabbia	318	475	**793**	264
16	sabbia	318	566	**884**	295

10 m → 12 m: la capacità aumenta di **347 kN** (98%): di questi, 273 kN derivano **dalla penetrazione della punta nella sabbia**. Oltre 12 m, ogni metro apporta solo ≈ 45 kN. Nel profilo stratificato, a determinare la lunghezza del palo è **lo strato in cui termina la punta**.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Le regole del palo trivellato valgono anche nel profilo stratificato

TEORIA

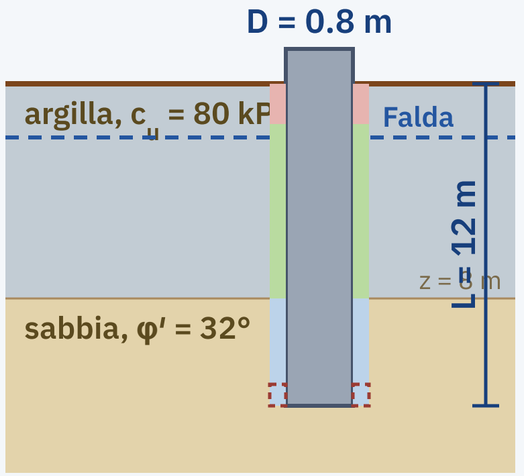
Si esegue il foro e si getta il calcestruzzo: il terreno non viene rimosso, l'argilla si rammollisce sulla parete del foro, detriti possono accumularsi sotto la base. In un profilo misto, ciascuna metà della procedura si applica **dove compete**:

Strati di argilla (α): $\alpha^* = 0.55$ ($c_u/p_a \le 1.5$); **primi 1.5 m e ultimo 1D**: $\alpha^* = 0$. La finestra appartiene **solo ad α** e non si estende a λ e β.

Gli **strati di sabbia** mantengono la propria regola K–δ o di Coyle–Castello; K è prossimo a $\mathbf{K_0 = 1 - \sin\varphi'}$ poiché durante l'infissione il terreno non viene rimosso.

Se la **base** è in argilla, Reese–O'Neill: $q_p = \min[6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b), 9c_{ub}, 40p_a]$. c_{ub} è la c_u media su $\mathbf{2D_b}$ sotto la base; se la zona si estende su più strati, la media è pesata con lo spessore.

Questa zona deve essere **interamente in argilla**: se si estende nella sabbia, il modulo si arresta e richiede la selezione di Meyerhof o Vesic.



Rosso: α* = 0 (primi 1.5 m). Verde: α* = 0.55. Blu: K–δ nella sabbia. Rosso tratteggiato: 1D inferiore, nessuna finestra nella sabbia.

Traccia

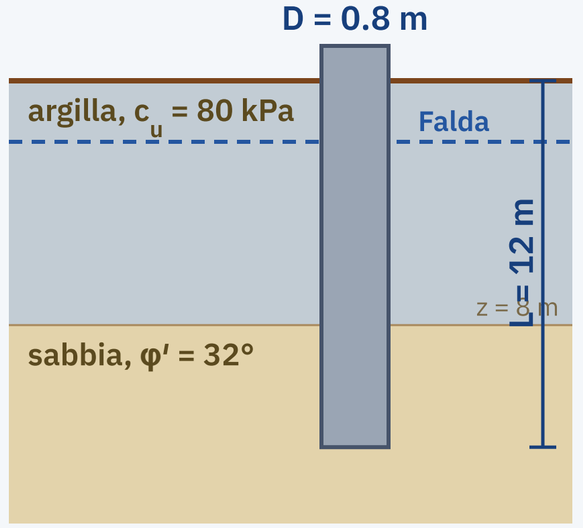
ESEMPIO

Dati

Palo	**palo trivellato (per perforazione), sezione circolare, D = 0.8 m, L = 12 m**
Argilla (0–8 m)	$c_u = 80\ \text{kPa},\ \gamma = \gamma_{sat} = 18\ \text{kN/m}^3$
Sabbia (8–20 m)	$\varphi' = 32°,\ \gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 19\ \text{kN/m}^3$
Acqua sotterranea	**alla profondità di 2.0 m**
Per la sabbia	$K = K_0 = 0.47,\ \delta' = 0.75\varphi' = 24°$
Punta	**Meyerhof; FS = 3**

RICHIESTO

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



Soluzione (1/3)

SOLUZIONE

1 Strato di argilla: α* e finestra (si scartano i primi 1.5 m e l'ultimo 1D = 0.8 m: 1.5 → 12 − 0.8 = 11.2 m)

$$\alpha^* = 0.55 \ (c_u/p_a = 0.8 \leq 1.5) \qquad L_{eff} = 8 - 1.5 = \mathbf{6.5}\ \mathrm{m}$$

2 Attrito unitario e resistenza

$$f = \alpha^* c_u = 0.55(80) = 44.0\ \mathrm{kPa} \qquad Q_{s1} = \pi(0.8)(44.0)(6.5) = \mathbf{718.8}\ \mathrm{kN}$$

Soluzione (2/3)

SOLUZIONE

3 Strato di sabbia (8–12 m): vale la sua regola K–δ; L′ = min(15D; L) = min(12; 12) = 12 m, cioè nessun troncamento entro lo strato

$$\sigma'(8) = 85.1\ ;\ \sigma'(12) = 121.9\ \text{kPa} \qquad \bar{\sigma}' = \frac{414.1}{4} = 103.5\ \text{kPa}$$

4 Attrito unitario e resistenza

$$f = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}' = 0.47 \tan 24^\circ (103.5) = 21.7\ \text{kPa}$$

$$Q_{s2} = \pi(0.8)(21.7)(4) = \mathbf{217.8}\ \text{kN}$$

La porzione **inferiore 1D** della finestra α (11.2 – 12 m) ricade nello strato di sabbia; poiché la finestra appartiene ad α, la sabbia mantiene il proprio attrito anche su questi 0.8 m.

Soluzione (3/3)

SOLUZIONE

5 Punta in sabbia → regola per la sabbia (Meyerhof); nessuna riduzione aggiuntiva per la trivellazione, si utilizza il φ′ inserito

$$q' = \sigma'(12) = 121.9\ \text{kPa} \qquad N_q^* = 81$$

$$q' N_q^* = 9{,}874 > q_l = 2{,}531\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ q_p = 2{,}531\ \text{kPa}$$

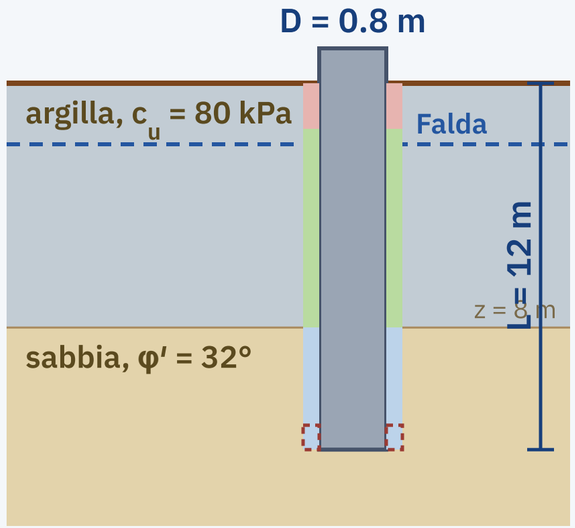
$$Q_p = A_p q_p = 0.5027(2{,}531) = \mathbf{1{,}272}\ \text{kN}$$

6 Capacità portante totale e ammissibile

$$Q_s = 718.8 + 217.8 = \mathbf{936.6}\ \text{kN}$$

$$Q_u = 1{,}272 + 937 = 2{,}209\ \text{kN}$$

$$Q_{all} = \frac{2{,}209}{3} = \mathbf{736}\ \text{kN}$$



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

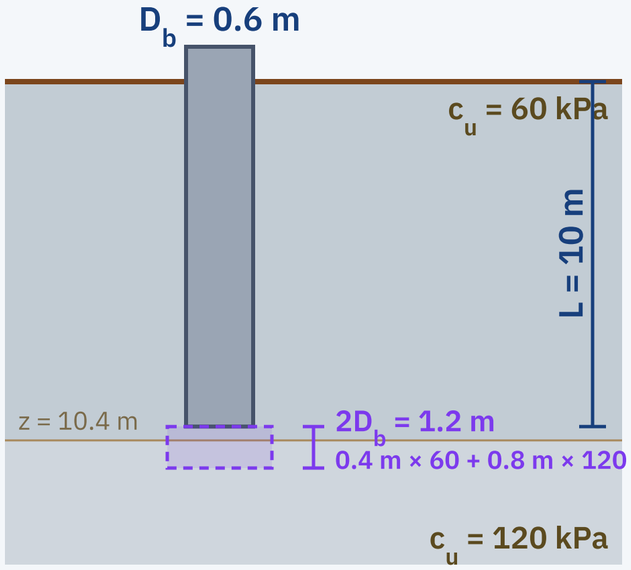
ESEMPIO

Dati

Palo	**palo trivellato, $D_b = D = 0.6$ m, $L = 10$ m**
Argilla 1 (0–10.4 m)	$c_u = 60\ \mathrm{kPa}$
Argilla 2 (10.4–20 m)	$c_u = 120\ \mathrm{kPa}$
Base	**Reese–O'Neill; $p_a = 100$ kPa**

RICHIESTO

Determinare c_{ub} nella zona $2D_b$ sotto la base e i valori di q_p e Q_p.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Zona 10 → 10 + 2D$_b$ = 11.2 m; al confine 10.4 m: media ponderata con la thickness

$$c_{ub} = \frac{60(0.4) + 120(0.8)}{1.2} = \mathbf{100}\ \mathrm{kPa}$$

2 Il più piccolo dei tre valori

$$6c_{ub}\left(1 + 0.2\frac{L}{D_b}\right) = 2{,}600\ ; \quad 9c_{ub} = 900\ ; \quad 40p_a = 4\,000 \ \Rightarrow \ q_p = \mathbf{900}\ \mathrm{kPa}$$

3 Area della base e resistenza alla punta

$$A_b = \frac{\pi(0.6)^2}{4} = 0.2827\ \mathrm{m}^2 \qquad Q_p = 0.2827(900) = \mathbf{254.5}\ \mathrm{kN}$$

Se si fosse assunto solo il valore alla punta c$_u$ = 60 kPa, si otterrebbe Q$_p$ = 152.7 kN: l'argilla più rigida sottostante fornisce il **67%** in più.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Un unico fattore di sicurezza, ma l'incertezza è elevata

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, **FS = 2.5 – 4** usuale.

Estremo superiore: quando il profilo è noto da **pochi sondaggi**. Il profilo stratificato è esattamente questo caso: tra i sondaggi **i confini sono la parte più incerta**, e l'esempio precedente ha mostrato quanto un singolo metro di confine faccia variare la capacità.

I DUE ASPETTI RICHIEDONO CALCOLI SEPARATI

Nel profilo stratificato, separatamente dal calcolo della capacità portante:

- Uno strato soffice che si consolida e rimane appeso al palo come **attrito laterale negativo**
- **Cedimento** governato dallo strato compressibile sotto la punta

Regole in funzione dello strato e dell'installazione

TEORIA

Strato	Fusto (Q_s)	Punta (Q_p): strato alla punta
Sabbia	K–δ (L′ = 15D, un unico valore per l'intero palo) oppure Coyle–Castello (K σ⃗ tan0.8φ′)	$q'N^*_q \le q_l$ (Meyerhof), Vesic, Coyle–Castello
Argilla	α · λ (per strato: estensione) · β	$9c_u$ (Meyerhof) · $N^*_c(I_{rr})$ (Vesic)
Trivellato, argilla	α* = 0.55; primi 1.5 m e ultimo 1D = 0	Reese–O'Neill: media di $c_{ub} = 2D_b$
Trivellato, sabbia	$K \approx K_0 = 1 - \sin\varphi'$; la finestra non viene applicata	$q'N^*_q$ (φ′ inserito)

Ogni riga è una scelta distinta per lo strato corrispondente; **nello stesso palo** si applicano sia la regola della sabbia sia quella dell'argilla.

Sintesi

Punti chiave

La tensione efficace **si accumula attraverso gli strati** ed è continua; l'attrito laterale unitario, invece, **subisce salti ai confini**

La punta è calcolata solo con la regola dello strato in cui si trova la punta; una punta che coincide con un confine si colloca nello strato **sottostante**

Sabbia: $f = K\sigma' \tan\delta'$ e **$L' = 15D$ vale per l'intero palo** · **Argilla**: α, λ (una estensione per strato), β

Il **fusto** è la somma degli strati: $Q_s = p\Sigma f_i \Delta z_i$; a determinare la lunghezza è lo strato in cui termina la punta

Palo trivellato: la finestra di α* vale solo per argilla/α; se la punta è in argilla, c_{ub} su $2D_b$ (possono essere più strati)

$Q_{all} = (Q_p + Q_s)/FS$, FS = 2.5 – 4; per opere importanti, **prova di carico**

Bibliografia

Meyerhof, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT3), 197–228.

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

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

Coyle, H.M. and Castello, R.R. (1981). New design correlations for piles in sand. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107(GT7), 965–986.

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

O’Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025 — il fattore α per palo trivellato.

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.

Mansur, C.I. and Hunter, A.H. (1970). Pile tests, Arkansas River project. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM5), 1545–1582.

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning, che raccoglie tali metodologie nella formulazione adottata in questa pagina.

NOTA

Le figure di questa presentazione sono tratte dalla pagina di teoria di GeoTerva; tutti gli esempi numerici sono stati prodotti con le regole di calcolo e la libreria 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