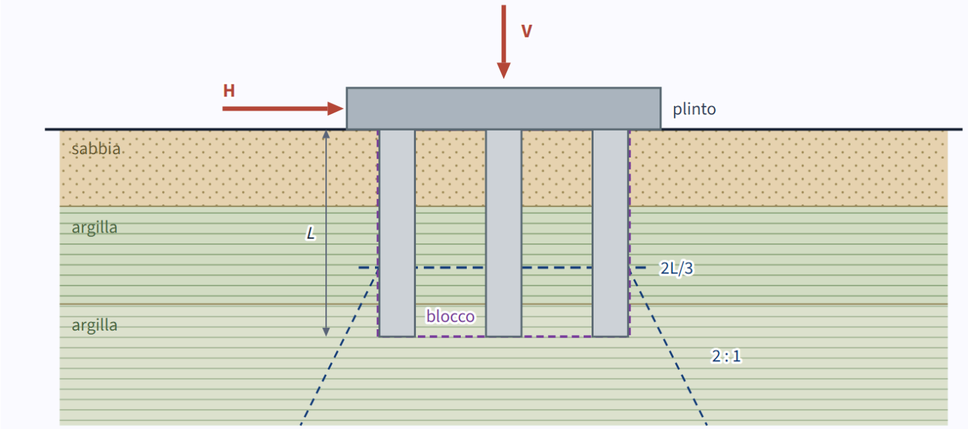
Presentazione didattica di geotecnica · Pali

Analisi del gruppo di pali

Lezione: il carico su ciascun palo di un gruppo di pali sotto un plinto, la sua capacità, il suo cedimento e il suo comportamento sotto carico orizzontale; un esempio di calcolo per ogni argomento.

- Plinto rigido
- Efficienza di gruppo · blocco
- Cedimenti
- Carico orizzontale: moltiplicatori p
- Esempi di calcolo



Introduzione

Che cosa si impara in questa lezione?

- Determinare **il carico su ciascun palo** sotto un plinto rigido e riconoscere il palo che tende alla trazione
- Costruire strato per strato la capacità del **palo singolo** come base della capacità del gruppo
- Applicazione dell'**efficienza di gruppo** (Converse–Labarre, Los Angeles, Seiler–Keeney; regole per pali infissi e trivellati in sabbia) strato per strato
- Verificare la **rottura a blocco** del gruppo e scegliere **il valore minore**
- Calcolare il cedimento elastico (Vesic) e di **consolidazione** (diffusione 2:1)
- a interpretare i moltiplicatori p e le quote diseguali delle file sotto **carico orizzontale**

SVOLGIMENTO DELLA LEZIONE

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

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

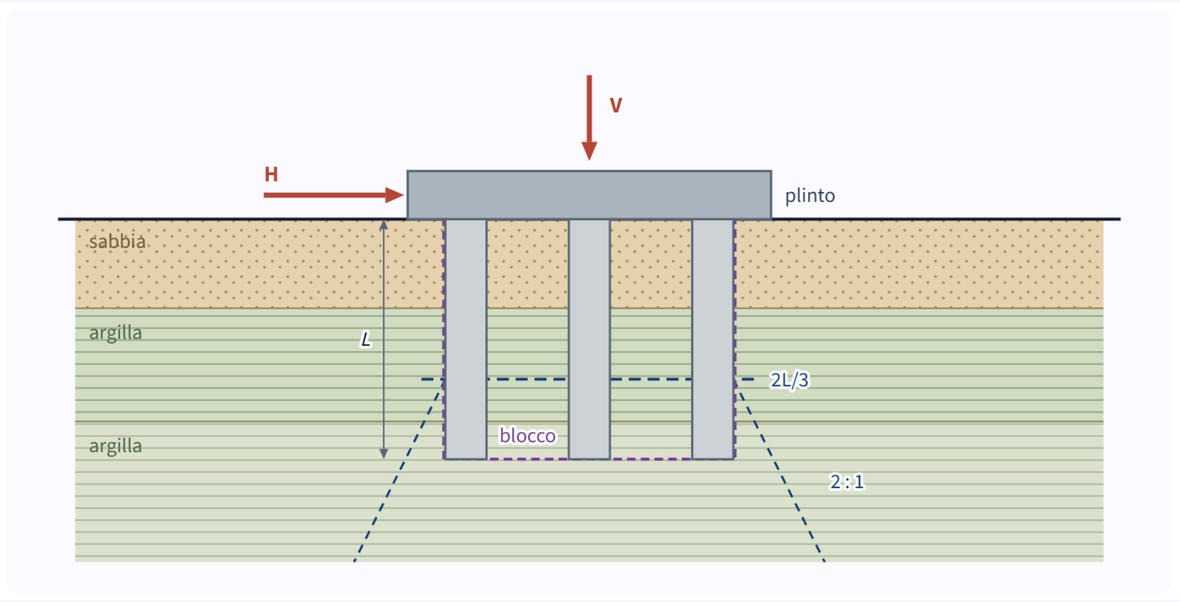
2 · **Traccia**: dati e richiesto

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

Questa presentazione si basa sulla presentazione **palo in terreno stratificato**: il calcolo del palo singolo strato per strato è stato illustrato in quella sede, mentre qui se ne esamina il comportamento all'interno del gruppo.

Che cosa cambia quando i pali agiscono insieme?

TEORIA



I pali sono disposti in file sotto un **plinto**; quando sono vicini, il terreno interposto e circostante deve servire tutti insieme. Tre cose cambiano e il modulo tratta ciascuna come una verifica distinta:

Capacità: il terreno tra i pali è trascinato dal fusto di ciascun palo; ogni palo porta meno di quanto porterebbe da solo (efficienza $\eta < 1$). Se il terreno è debole e i pali sono ravvicinati, il gruppo e il terreno interposto possono collassare anche come un unico **blocco**.

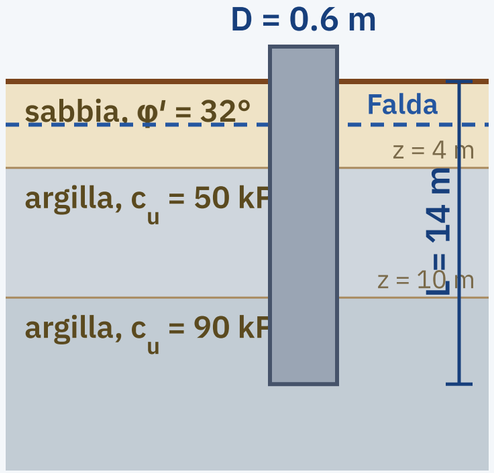
Cedimento: il carico del gruppo si diffonde su **tutta l'area del gruppo**, non su quella del singolo palo, e raggiunge gli strati di argilla molto al di sotto delle punte; il gruppo cedimento molto più di un palo isolato.

Carico orizzontale: le file posteriori lavorano in un terreno spinto e deformato dai pali precedenti; la fila anteriore riceve più carico, le altre meno.

Il gruppo che si utilizzerà durante la lezione

Gruppo di esempio (modello aperto dal modulo)

Pali	**9 pali trivellati (diametro D = 0.60 m, lunghezza L = 14 m), 3 file × 3 pali, base del plinto nel terreno**
Interasse	$s_x = s_y = 1.80\ \mathrm{m}\ (3.0\,D)$
Terreno	**sabbia 0–4 m (φ′ = 32°), argilla 4–10 m (c_u = 50), argilla 10–18 m (c_u = 90 kPa); γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³**
Acqua sotterranea	**alla profondità di 2.0 m**
Carichi	$V = 1\,600\ \mathrm{kN},\ H = 900\ \mathrm{kN},\ M_y = 900\ \mathrm{kN\cdot m}$
Materiale, sicurezza	$E_p = 30\,000\ \mathrm{MPa},\ E_s = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu_s = 0.30;\ FS = 3$



La maggior parte degli esempi si svolge con questo gruppo; i risultati coincidono con i valori della scheda **Modello** del modulo.

Plinto rigido: i pali sono molle identiche

TEORIA

Si assume che il plinto sia rigido e che i pali siano molle verticali identiche. Un plinto rigido si muove come un **piano**: il suo cedimento e le sue rotazioni sono le uniche incognite. Pertanto il carico su ciascun palo è una funzione **lineare** della sua posizione (regola del gruppo di bulloni):

$$P_i = \frac{V}{n} + B\,x_i + C\,y_i$$

$$B = \frac{M_y}{\sum x^2} \qquad C = \frac{M_x}{\sum y^2} \qquad \left(\sum xy = 0\right)$$

$$\sum x^2 = n_y s_x^2\,\frac{n_x(n_x^2-1)}{12}$$

Se M_y è positivo, aggiunge pressione sul lato **+x** (il lato spinto dal carico orizzontale, ossia il lato anteriore). I momenti sono valutati **alla base del plinto**: un carico H posto a quota h sopra la base dà M_y = H h.

Se i pali sono disposti a quinconce (triangolare), Σxy non è nullo; il modulo ricava le sommatorie dalle posizioni dei pali e risolve insieme le due equazioni.

Il carico maggiore va ai pali di testa e il minore a quelli di coda; **se il momento è elevato** il palo posteriore può tendere a lavorare a trazione.

Traccia

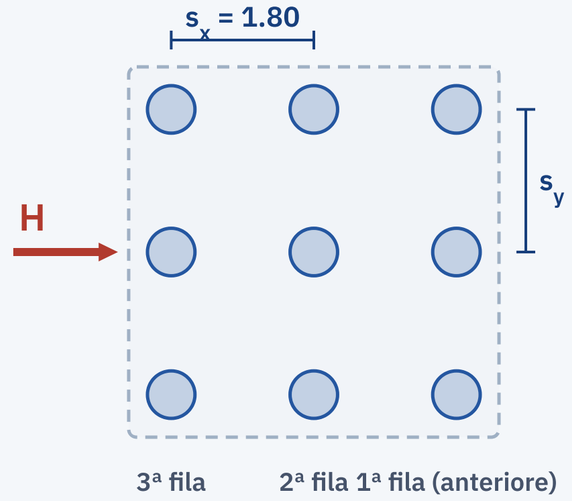
ESEMPIO

Dati

Gruppo	**9 pali trivellati, 3 file × 3 pali, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Terreno	**sabbia 0–4 m (φ′ = 32°) · argilla 4–10 m (c_u = 50) · argilla 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Carichi	$V = 1\,600\ \mathrm{kN},\ M_y = 900\ \mathrm{kN\cdot m}$ **(alla base del paramento)**
Titolo	**rigido; pali identici**

RICHIESTO

Determinare il carico agente su **ciascun palo**. Le file sono numerate **dal fronte** (fronte = il lato verso cui spinge il carico orizzontale, +x).



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Passo costante

$$\frac{V}{n} = \frac{1\,600}{9} = \mathbf{177.8}\ \mathrm{kN}$$

2 Σx² (gruppo simmetrico, forma chiusa)

$$\sum x^2 = n_y s_x^2\,\frac{n_x(n_x^2-1)}{12} = 3(1.8)^2\,\frac{3(9-1)}{12} = \mathbf{19.44}\ \mathrm{m}^2$$

3 Coefficiente di momento (C = 0 poiché $M_x = 0$)

$$B = \frac{M_y}{\sum x^2} = \frac{900}{19.44} = \mathbf{46.30}\ \mathrm{kN/m}$$

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

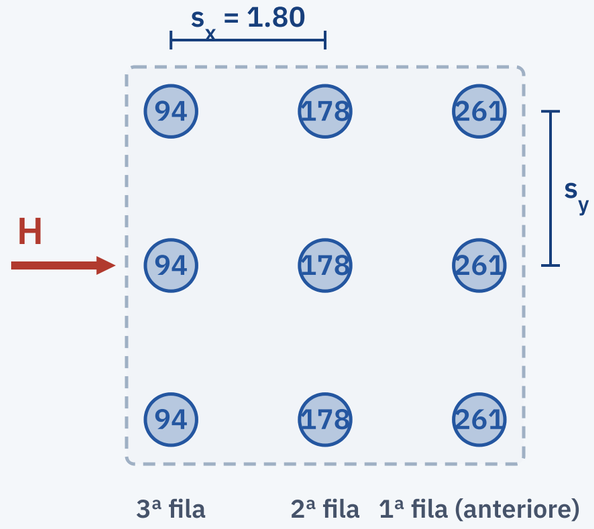
4 Carichi in fila: P = V/n + B x (x = +1.8; 0; −1.8 m)

$$P_1 = 177.8 + 46.30(1.8) = \mathbf{261.1}\ \text{kN (anteriore)}$$

$$P_2 = \mathbf{177.8}\ \text{kN}$$

$$P_3 = 177.8 - 46.30(1.8) = \mathbf{94.4}\ \text{kN (retro)}$$

Totale: 3(261.1 + 177.8 + 94.4) = **1,600 kN** = V. Il carico massimo è sui pali anteriori (261.1 kN), il minimo su quelli posteriori (94.4 kN); **nessun palo è in trazione**.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Se il momento è elevato, i pali posteriori sono in trazione

TEORIA

Se il momento è elevato rispetto al carico verticale, i pali sul lato opposto al momento **si scaricano** e possono essere sollecitati a trazione. Il palo resiste alla trazione **solo tramite il fusto**: lo strato di argilla con il valore pieno, lo strato di sabbia con **tre quarti** della sua resistenza a compressione; la base non contribuisce.

$$T_u = \sum_i \chi_i \, Q_{s,i} \qquad \chi = 1 \ (\text{argilla}),\ \chi = 0.75 \ (\text{sabbia})$$

$$T_g = \min(T_{ind},\, T_{block}) \quad T_{ind} = n_T \sum_i \eta_i \chi_i Q_{s,i}$$

Palo singolo in trazione: $T_{max} \le T_u/FS$. Pali in trazione **insieme**: $\Sigma T \le T_g/FS$; il blocco è trattenuto dal proprio peso e dal taglio sulle facce laterali.

VERIFICA A COMPRESSIONE

$$P_{max} \le \frac{Q_u}{FS}$$

Il carico massimo sul palo si confronta con il carico ammissibile di un **singolo palo**; gli effetti di gruppo non sono considerati qui. Sotto momento, il palo più caricato riceve più di V/n e può superare la propria quota **anche quando il gruppo nel suo insieme è entro la propria capacità**.

Traccia

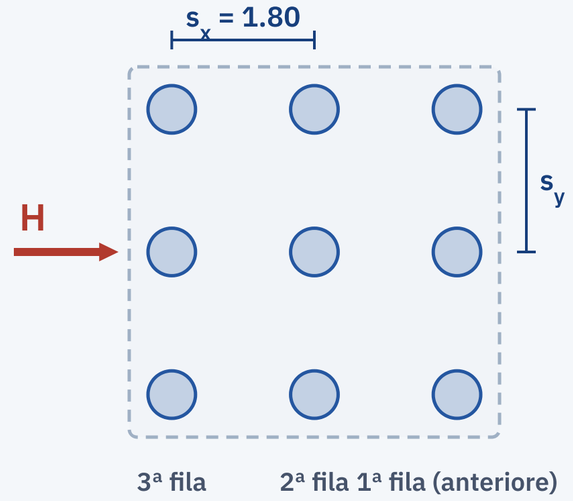
ESEMPIO

Dati

Gruppo	**9 pali trivellati, 3 file × 3 pali, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Terreno	**sabbia 0–4 m (φ′ = 32°) · argilla 4–10 m (c_u = 50) · argilla 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Carico	$V = 1\,600$ kN**, momento incrementato:** $M_y = 2\,400$ kN·m
Palo singolo	**Contributi Q_s (Esempio 3): sabbia 49.8, argilla 311.0, argilla 317.2 kN**
Efficienza	**sabbia 0.767, argilla 0.727 (Esempio 5–6)**

RICHIESTO

Determinare i carichi; verificare con FS = 3 la capacità del palo in trazione e quella dei pali in trazione **nel loro insieme**.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Carichi ($B = M_y/\Sigma x^2$)

$$B = \frac{2\,400}{19.44} = 123.46\ \text{kN/m}$$

$$P_{front} = 177.8 + 123.46(1.8) = \mathbf{400.0}\ \text{kN}$$

$$P_{rear} = 177.8 - 123.46(1.8) = \mathbf{-44.4}\ \text{kN (trazione)}$$

2 Capacità del singolo palo a trazione (sabbia × 0.75, argilla × 1)

$$T_u = 0.75(49.8) + 311.0 + 317.2 = \mathbf{665.6}\ \text{kN} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_u}{FS} = 221.9\ \text{kN}$$

Palo in trazione: T_{max} = **44.4 kN** ≤ T_u/FS = 221.9 kN → **verificato**. Numero di pali in trazione pari a 3 (fila posteriore), trazione totale ΣT = 133.3 kN; la verifica di gruppo è nel passaggio successivo.

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

3 Capacità complessiva dei 3 pali in trazione: somma dei fusti efficaci × 3

$$T_{ind} = 3\left[\eta_s \chi_s Q_{s1} + \eta_c Q_{s2} + \eta_c Q_{s3}\right] = \mathbf{1{,}456}\ \text{kN}$$

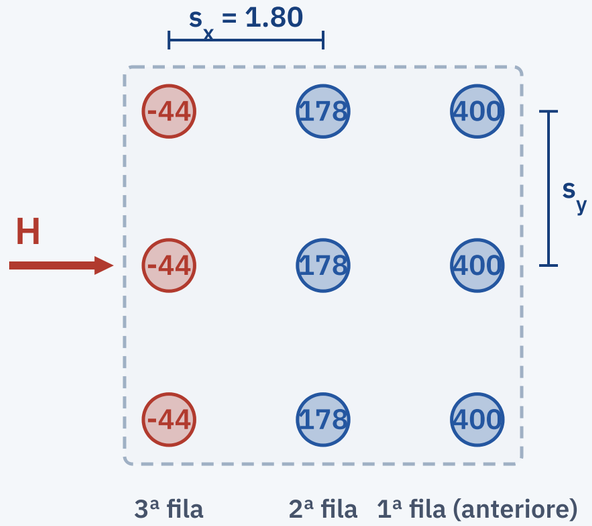
4 Blocco in trazione (3 pali, L_t = D = 0.6 m, B_t = 4.2 m): attrito laterale + peso del blocco

$$T_{block} = \sum \tau_i P_t \Delta L_i + W = 6{,}692 + 369 = \mathbf{7{,}061}\ \text{kN}$$

5 Verifica: minimo e FS

$$T_g = \min(1{,}456;\ 7{,}061) = 1{,}456\ \text{kN}$$

$$\sum T = 133.3 \leq \frac{T_g}{3} = 485\ \text{kN} \ \Rightarrow\ \text{sufficiente}$$



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

La capacità del gruppo si basa su quella del palo singolo

TEORIA

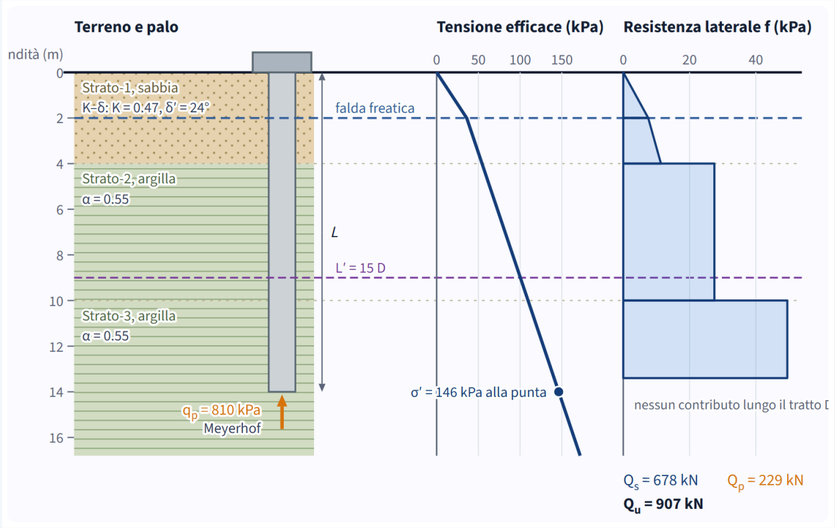
Si calcola dapprima la resistenza **di un singolo palo** del gruppo: ogni strato secondo la regola del proprio materiale, **senza alcuna resistenza inserita**. Le regole sono le stesse della presentazione *palo in terreno stratificato*:

$$Q_u = Q_s + Q_p \qquad Q_s = p \sum_i f_i \, \Delta L_i \qquad Q_p = A_b \, q_p$$

Sabbia: f = Kσ′tanδ′ (profondità critica L′ = 15D). Per il palo trivellato **K = K₀ = 1 – sinφ′**, δ′ = 0.75φ′; per il palo infisso K = 1.4K₀.

Argilla: α, λ oppure β. Per il palo trivellato **α* = 0.55** ($c_u/p_a \le 1.5$) e α* = 0 lungo i **primi 1.5 m e l'ultimo 1D**.

Punta: regola dello strato in cui si trova la punta: $q'N^*_q \le q_l$ nella sabbia, $9c_u$ nell'argilla (per i pali trivellati si può scegliere Reese–O'Neill).



Traccia

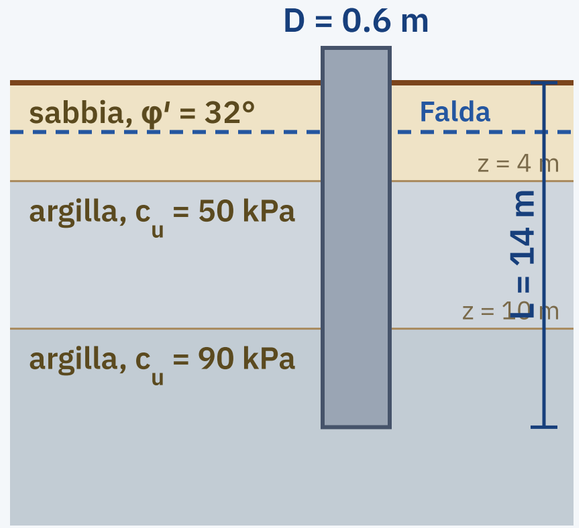
ESEMPIO

Dati

Gruppo	**9 pali trivellati, 3 file × 3 pali, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Terreno	**sabbia 0–4 m (φ′ = 32°) · argilla 4–10 m (c_u = 50) · argilla 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Costituzione	**palo trivellato: K = K_0 = 0.47, δ′ = 0.75φ′ = 24°, α* = 0.55; punta: Meyerhof**
Acqua sotterranea	**2.0 m**
Peso dell'unità di volume	$\gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 19\ \mathrm{kN/m^3}$

RICHIESTO

Determinare strato per strato la resistenza **laterale** di un singolo palo, la resistenza **alla punta** e il valore di $\mathbf{Q_u}$; eseguire la verifica $P_{max} \le Q_u/FS$.



Soluzione (1/3)

SOLUZIONE

1. Sabbia (0–4 m): L′ = 15D = 9 m > 4 m, nessuna chiusura alla punta; σ′(2) = 18(2) = 36.0 e σ′(4) = 36.0 + (19 − 9.81)(2) = 54.4 kPa

$$\bar{\sigma}' = \frac{126.4}{4} = 31.6\ \text{kPa}$$

$$f = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}' = 0.47(0.4452)(31.6) = 6.61\ \text{kPa}$$

$$Q_{s1} = p\, f\, H = 1.885(6.61)(4) = \mathbf{49.8}\ \text{kN}$$

Soluzione (2/3)

SOLUZIONE

2 Argilla (4–10 m): α* = 0.55 (c_u/p_a = 0.5 ≤ 1.5); la finestra di 1.5 → L − D = 13.4 m copre interamente lo strato

$$f = 0.55(50) = 27.5\ \text{kPa} \qquad Q_{s2} = 1.885(27.5)(6) = \mathbf{311.0}\ \text{kN}$$

3 Argilla (10–14 m): la finestra termina a 13.4 m → il tratto inferiore 1D = 0.6 m viene trascurato, lunghezza efficace 13.4 − 10 = 3.4 m

$$f = 0.55(90) = 49.5\ \text{kPa} \qquad Q_{s3} = 1.885(49.5)(3.4) = \mathbf{317.2}\ \text{kN}$$

Soluzione (3/3)

SOLUZIONE

4 Somma del fusto e punta (strato alla punta: argilla, c_u = 90 kPa, N^*_c di Meyerhof = 9)

$$Q_s = 49.8 + 311.0 + 317.2 \approx \mathbf{678.1}\ \text{kN}$$

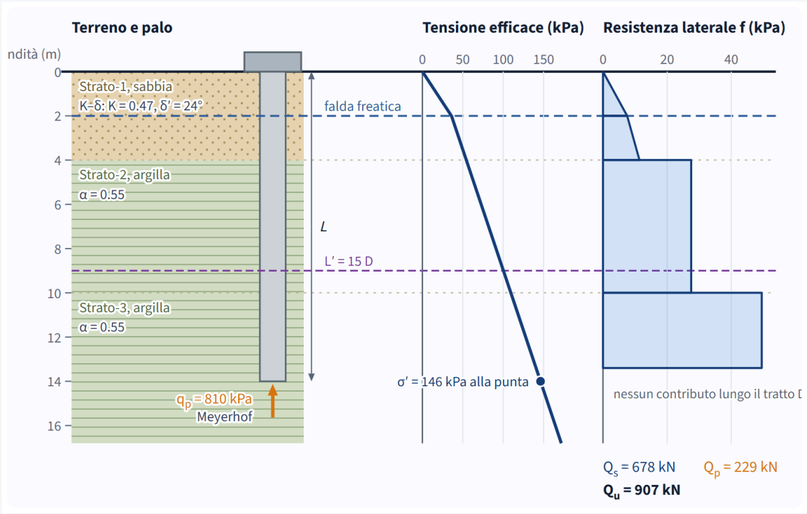
$$q_p = 9(90) = 810\ \text{kPa}$$

$$Q_p = A_b q_p = 0.2827(810) = \mathbf{229.0}\ \text{kN}$$

5 Capacità del palo singolo e verifica

$$Q_u = 678.1 + 229.0 = \mathbf{907.1}\ \text{kN}$$

$$\frac{Q_u}{FS} = 302.4\ \text{kN} \geq P_{max} = 261.1\ \text{kN} \ \Rightarrow\ \text{sufficiente}$$



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Pali ravvicinati portano meno di quanto farebbero singolarmente

TEORIA

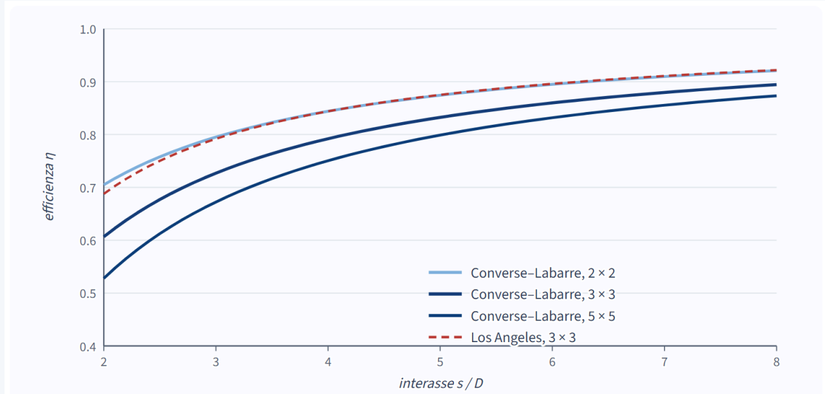
Avvicinando i pali, i terreni da ciascuno tagliati e deformati si sovrappongono. L'**efficienza di gruppo** è il rapporto tra la capacità del gruppo e la somma delle capacità dei pali singoli. La fonte fornisce tre equazioni empiriche per un gruppo di $n_1 \times n_2$ pali di diametro D e interasse d:

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u}$$

$$\eta_{CL} = 1 - \frac{\theta}{90}\,\frac{(n_1-1)n_2 + (n_2-1)n_1}{n_1 n_2}, \quad \theta = \tan^{-1}\frac{D}{d}\ \text{(grado)}$$

Converse–Labarre conta le **coppie di pali adiacenti**: $(n_1 - 1)n_2$ coppie in fila e $(n_2 - 1)n_1$ coppie affiancate, ciascuna con il proprio angolo $\theta = \tan^{-1}(D/d)$ corrispondente all'interasse.

Il modulo utilizza questa equazione per l'argilla; con essa riduce il fusto degli strati di argilla e la base del palo con la punta in argilla.



All'aumentare dell'interasse l'efficienza tende a 1; in un gruppo 3 × 3, circa 0.7 – 0.8 a 3D.

Le altre due equazioni e i limiti

TEORIA

Anche le altre due equazioni della fonte si riferiscono a un gruppo rettangolare. L'equazione di **Los Angeles** e l'equazione di **Seiler–Keeney** (con d in **ft**):

$$\eta_{LA} = 1 - \frac{D}{\pi d\, n_1 n_2}\left[n_1(n_2-1) + n_2(n_1-1) + \sqrt{2}(n_1-1)(n_2-1)\right]$$

$$\eta_{SK} = \left[1 - \frac{11d}{7(d^2-1)}\,\frac{n_1+n_2-2}{n_1+n_2-1}\right] + \frac{0.3}{n_1+n_2}$$

Seiler–Keeney presenta un polo a 1 ft e risulta privo di significato al di sotto di 2 ft; il modulo lo restituisce a partire da **2 ft**.

Un interasse inferiore a 2.5D viene **segnalato**: è l'interasse minimo indicato dalla fonte per i pali a attrito, mentre le equazioni sono state scritte per interassi maggiori.

Nel reticolo triangolare la formula di Converse–Labarre si scrive contando le coppie adiacenti; ciò costituisce un'**estensione del modulo** e fornisce un'efficienza inferiore rispetto al reticolo con lo stesso interasse.

Traccia

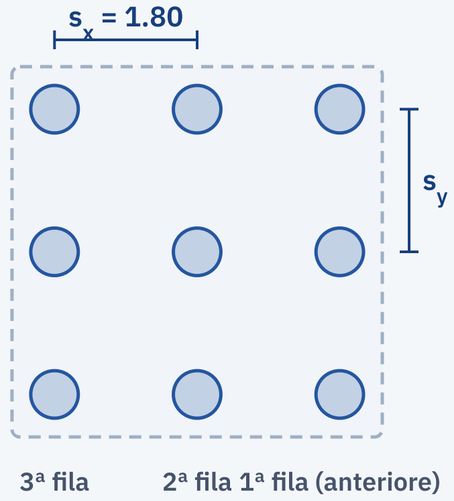
ESEMPIO

RICHIESTO

Determinare l'efficienza di gruppo con le equazioni di **Converse–Labarre**, **Los Angeles** e **Seiler–Keeney**.

Dati

Gruppo	**3 × 3 pali, D = 0.60 m, interasse d = 1.80 m (in entrambe le direzioni)**
Seiler–Keeney	**d in piedi: 1.80 m = 5.906 ft**



Soluzione

SOLUZIONE

1 Converse–Labarre: θ = tan⁻¹(D/d); coppie adiacenti: (2)(3) + (2)(3) = 12

$$\theta = \tan^{-1}\frac{0.6}{1.8} = 18.43^\circ \;;\quad \eta_{CL} = 1 - \frac{18.43}{90}\cdot\frac{12}{9} = \mathbf{0.727}$$

2 Los Angeles

$$\eta_{LA} = 1 - \frac{0.6}{\pi(1.8)(9)}\left[3(2) + 3(2) + \sqrt{2}(2)(2)\right] = \mathbf{0.792}$$

3 Seiler–Keeney (d = 5.906 ft)

$$\eta_{SK} = \left[1 - \frac{11(5.906)}{7(5.906^2 - 1)}\cdot\frac{4}{5}\right] + \frac{0.3}{6} = \mathbf{0.831}$$

Tre equazioni nell'intervallo 0.727 – 0.831. Nell'argilla il modulo utilizza **Converse–Labarre** (0.727).

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Efficienza in sabbia: una regola, non un'equazione

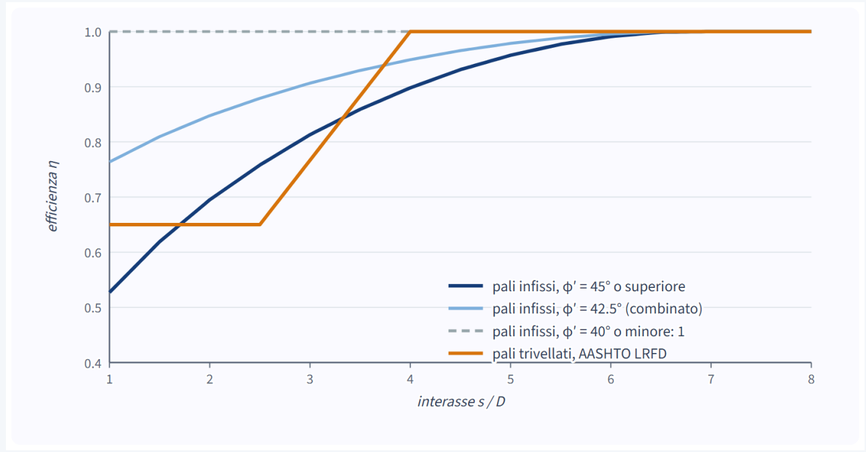
TEORIA

Il palo infisso **compatta** la sabbia sciolta o mediamente addensata; in questa sabbia il gruppo porta quanto la somma dei pali (nelle prove anche di più). Solo nella sabbia addensata (φ′ > circa 40°) un interasse ridotto riduce la capacità. Per il palo infisso il modulo adotta il valore inferiore della fonte e **non porta mai l'efficienza sopra 1**:

- φ′ ≤ 40°: **η = 1**
- 40° < φ′ < 45°: **interpolazione lineare** tra 1 e la curva a 45°
- φ′ ≥ 45°: curva a 45° (1.0 per s/D = 7; 0.53 per s/D = 1)

Il **palo trivellato** non compatta il terreno, anzi può allentarlo. AASHTO LRFD moltiplica la resistenza di ciascun palo trivellato del gruppo per **0.65** con s/D = 2.5 e per **1.0** con 4:

$$\eta = 0.65 + 0.35\,\frac{s/D - 2.5}{1.5} \qquad 2.5 \le s/D \le 4$$



La capacità dello strato di sabbia si applica al fusto di quello strato e alla resistenza alla punta del palo con la base in sabbia. Interasse: **la distanza minima tra due pali**.

Traccia

ESEMPIO

Dati

Interasse	**s = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3.0**
Palo trivellato	**regola AASHTO per la sabbia**
Palo infisso	**sabbia, $\varphi' = 42^\circ$ (curva a 45° per s/D = 3: $\eta_{45} = 0.813$)**

RICHIESTO

Determinare l'efficienza dello strato di sabbia per un palo **trivellato** e per un palo **infisso** in sabbia con φ′ = 42°; che cosa accade per φ′ = 35°?

Soluzione

SOLUZIONE

1 Palo trivellato (AASHTO): s/D = 3.0

$$\eta = 0.65 + 0.35\,\frac{3.0 - 2.5}{1.5} = \mathbf{0.767}$$

2 Palo infisso, φ′ = 42°: peso w = (φ′ – 40)/5 e curva a 45°

$$w = \frac{42 - 40}{5} = 0.4 \qquad \eta = 1 - w(1 - \eta_{45}) = 1 - 0.4(1 - 0.813) = \mathbf{0.925}$$

3 Palo infisso, φ′ = 35°

$$\varphi' \leq 40^\circ \;\Rightarrow\; \eta = \mathbf{1.000}$$

Nello stesso intervallo, un palo **trivellato** in sabbia assume il valore 0.767, mentre un palo **infisso** (in sabbia sciolta–media) assume 1.00: l'infissione compatta il terreno, la trivellazione no.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Il modulo di ogni strato è il modulo di quel terreno

TEORIA

Il fusto del palo viene suddiviso ai confini degli strati e ciascun tratto è calcolato con il proprio metodo. Un eventuale effetto di gruppo legato al terreno va applicato anch'esso **tratto per tratto**: la capacità di uno strato è quella di quel terreno, mentre la **base** assume la capacità del terreno su cui poggia:

$$Q_{ind} = n \left(\sum_i \eta_i \, Q_{s,i} + \eta_b \, Q_p \right)$$

$$\eta_{group} = \frac{Q_{ind}}{\sum Q_u}$$

Strati di **argilla** e base di un palo con la punta in argilla: Converse–Labarre.

Strato di **sabbia**: abaco per pali infissi, regola AASHTO per pali trivellati.

L'efficienza di gruppo **non è un dato di input** ma una **media ponderata** dei contributi degli strati: un palo che prende la maggior parte del carico dalla sabbia riflette l'effetto di gruppo di quella sabbia, un palo sospeso nell'argilla riflette l'effetto di gruppo dell'argilla.

Traccia

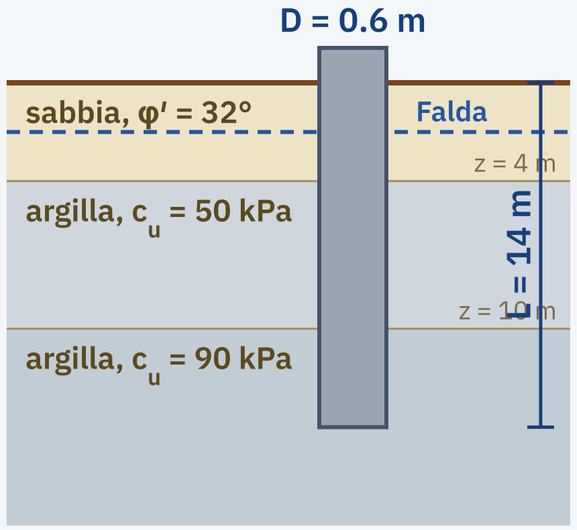
ESEMPIO

Dati

Palo singolo (Esempio 3)	**Q_{s1} = 49.8 (sabbia), Q_{s2} = 311.0, Q_{s3} = 317.2 (argilla), Q_p = 229.0 kN**
Efficienze	**sabbia (trivellato, s/D = 3): 0.767; argilla: 0.727; base (argilla): 0.727**
Gruppo	**9 pali**

RICHIESTO

Quanto valgono Q_{ind} e l'**efficienza di gruppo** $\eta = Q_{ind}/\Sigma Q_u$?



Soluzione

SOLUZIONE

1 Contributo efficace di ciascuna parte (η Q): fusto in sabbia, fusto in argilla 1, fusto in argilla 2, base

$$0.767(49.8) = 38.2\ ; \quad 0.727(311.0) = 226.1$$
$$0.727(317.2) = 230.6\ ; \quad 0.727(229.0) = 166.5$$

2 Capacità di esercizio di un palo singolo e gruppo

$$\sum \eta Q = 38.2 + 226.1 + 230.6 + 166.5 = \mathbf{661.4}\ \mathrm{kN}$$
$$Q_{ind} = 9(661.4) \approx \mathbf{5{,}952}\ \mathrm{kN}$$

3 Efficienza di gruppo

$$\eta = \frac{Q_{ind}}{n\,Q_u} = \frac{5{,}952}{9(907.1)} = \mathbf{0.729}$$

Il gruppo porta il **73%** della somma dei pali singoli (sabbia η = 0.767, argilla η = 0.727).

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Il gruppo può collassare come una fondazione profonda

TEORIA

Se i pali sono ravvicinati, il gruppo e il terreno interposto possono abbassarsi **insieme**: una fondazione profonda di dimensioni $L_g \times B_g$ e profondità L. La sua capacità è la **resistenza al taglio** sui quattro lati più la **capacità portante** al di sotto della base:

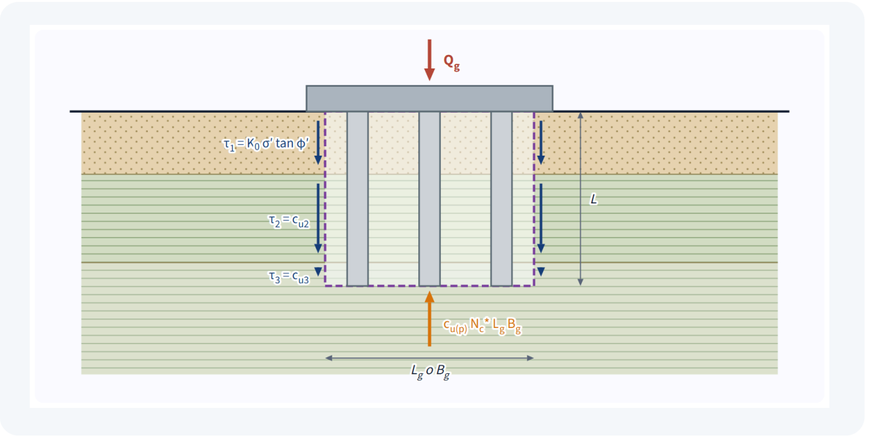
$$Q_{block} = \sum_i \tau_i \, P_b \, \Delta L_i + q_b \, L_g B_g \qquad P_b = 2(L_g + B_g)$$

Faccia laterale in argilla: $\tau = c_u$ (il terreno scorre sul terreno, non ridotto con α).

Faccia laterale in sabbia (estensione del modulo dalla fonte): $\tau = K_0 \sigma' \tan\varphi'$, $K_0 = 1 - \sin\varphi'$.

Base in argilla: $q_b = c_u N^*_c$; N^*_c dall'abaco, in funzione di L/B_g e L_g/B_g. **Base in sabbia**: nQ_p.

$$Q_{g(u)} = \min(Q_{ind},\, Q_{block}) \qquad Q_{all} = \frac{Q_{g(u)}}{FS}$$



Traccia

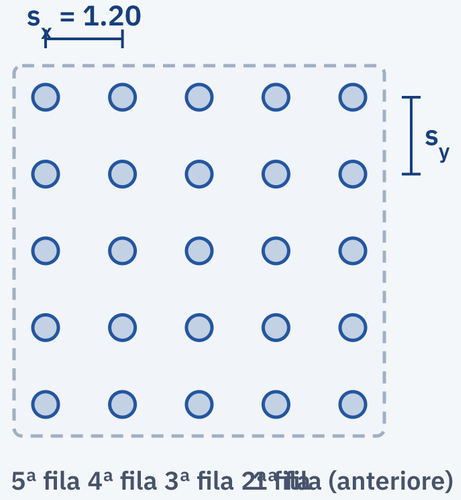
ESEMPIO

Dati

Gruppo	**9 pali trivellati, 3 file × 3 pali, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Terreno	**sabbia 0–4 m (φ′ = 32°) · argilla 4–10 m (c_u = 50) · argilla 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Blocco	**$L_g = B_g = (3 - 1)(1.8) + 0.6$**
Facce laterali	**sabbia: $\tau = K_0\sigma'_v \tan\varphi'$ (σ'_v = 31.6 kPa); argilla: $\tau = c_u$**
Base	**argilla, c_u = 90 kPa; N^*_c dall'abaco (L_g/B_g = 1)**
Individuale	**Q_{ind} = 5,952 kN (Esempio 6); V = 1 600 kN, FS = 3**

RICHIESTO

Determinare il valore di Q_{blocco}, la capacità del gruppo e il suo carico ammissibile.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Dimensioni del blocco e perimetro

$$L_g = B_g = 4.2\ \text{m} \qquad P_b = 2(L_g + B_g) = \mathbf{16.8}\ \text{m}$$

2 Taglio sulle facce laterali ($\tau\ P_b\ \Delta L$)

$$\text{sabbia}: \tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi' = 0.470(31.6)(0.6249) = 9.28 \ \Rightarrow\ 624\ \text{kN}$$

$$\text{argilla 1}: \tau = 50 \ \Rightarrow\ 50(16.8)(6) = 5{,}040\ \text{kN}$$

$$\text{argilla 2}: \tau = 90 \ \Rightarrow\ 90(16.8)(4) = 6{,}048\ \text{kN}$$

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

3 Base: N^*_c dall'abaco per $L/B_g = 14/4.2 = 3.33$ e $L_g/B_g = 1$

$$q_b L_g B_g = c_u N_c^* \, L_g B_g = 90(8.90)(17.64) = \mathbf{14{,}126}\ \text{kN}$$

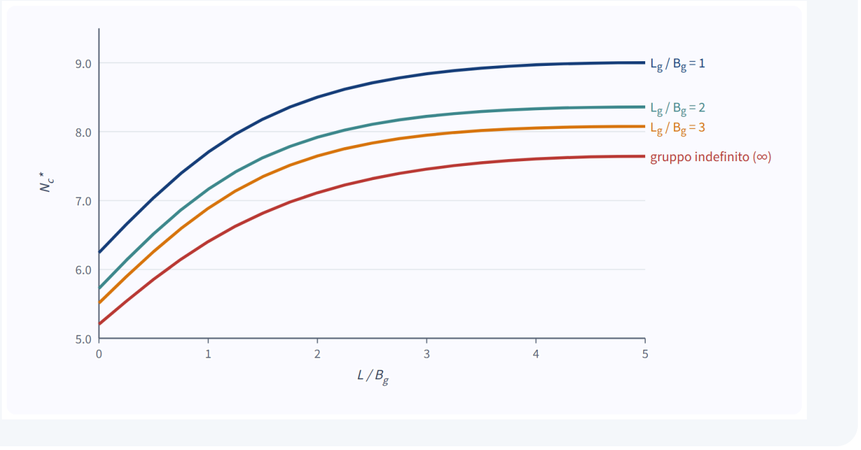
4 Capacità del blocco, capacità del gruppo e carico ammissibile

$$Q_{block} = 11{,}712 + 14{,}126 = 25{,}838\ \text{kN}$$

$$Q_{g(u)} = \min(5{,}952;\ 25{,}838) = \mathbf{5{,}952}\ \text{kN}$$

$$Q_{all} = \frac{5{,}952}{3} = 1{,}984\ \text{kN} \geq V = 1\,600\ \text{kN}$$

La capacità del blocco è **più di 4 volte** la somma dei singoli: in questo gruppo **sono determinanti i pali singoli** (comportamento individuale). Il blocco entra in gioco nei gruppi con pali ravvicinati e numerosi; si veda l'abaco a lato.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

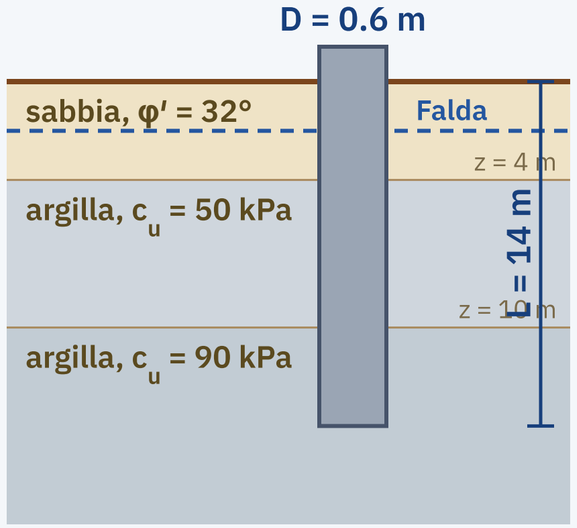
ESEMPIO

Dati

Gruppo	**5 × 5 pali infissi, D = 0.40 m, s = 1.20 m (3D), L = 12 m**
Terreno	**sabbia unica, φ′ = 32°, γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³, falda freatica a 3 m**
Palo singolo	**Q_s = 285.7, Q_p = 318.0 kN (palo infisso, K–δ e Meyerhof)**
Efficienza	**palo infisso, in sabbia con φ′ < 40°: η = 1**

RICHIESTO

Confrontare i valori Q_{ind} e Q_{blocco} e determinare la capacità del gruppo.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Pali singoli (η = 1)

$$Q_{ind} = n\,Q_u = 25(603.7) = \mathbf{15{,}094}\ \text{kN}$$

2 Blocco: $L_g = B_g = 4(1.2) + 0.4 = 5.2$ m; $\sigma'(3) = 54.0$, $\sigma'(12) = 136.7$ kPa

$$P_b = 2(5.2 + 5.2) = 20.8\ \text{m} \qquad \bar{\sigma}' = \frac{939.2}{12} = 78.3\ \text{kPa}$$

$$\tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi' = 0.470(78.3)(0.6249) = 22.99\ \text{kPa}$$

$$\text{scorrimento laterale} = 22.99(20.8)(12) = \mathbf{5{,}738}\ \text{kN}$$

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

3 Base del blocco in sabbia: la base è la somma delle resistenze alla punta dei pali

$$\text{base} = nQ_p = 25(318.0) = \mathbf{7{,}950}\ \text{kN} \qquad Q_{block} = 5{,}738 + 7{,}950 = \mathbf{13{,}689}\ \text{kN}$$

4 Capacità e efficienza del gruppo

$$Q_{block} = 13{,}689 \ < \ Q_{ind} = 15{,}094$$

$$Q_{g(u)} = \mathbf{13{,}689}\ \text{kN} \qquad \eta_{group} = \frac{13{,}689}{15{,}094} = \mathbf{0.907}$$

In questo caso è il **blocco a governare**: in un gruppo numeroso la somma dei fusti dei pali supera la capacità per scorrimento lungo il perimetro esterno del gruppo. Sebbene i pali singolarmente presentino η = 1.00, la capacità del gruppo è pari al **91%** della somma dei singoli.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Vesic: tre parti, poi il gruppo

TEORIA

Il palo singolo si abbassa per l'accorciamento della propria lunghezza, per la compressione del terreno al di sotto della punta e per la compressione del terreno caricato lungo il fusto. Vesic (1969) somma queste tre componenti per il carico di esercizio Q_w (Q_{ws} è la quota del fusto, Q_{wp} quella della punta):

$$s_e = s_{e1} + s_{e2} + s_{e3}$$

$$s_{e1} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws})L}{A_p E_p} \qquad s_{e2} = \frac{q_{wp} D}{E_s}(1 - \mu_s^2) I_{wp}$$

$$s_{e3} = \frac{Q_{ws}}{pL}\frac{D}{E_s}(1 - \mu_s^2) I_{ws} \qquad I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{L/D}$$

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}}\, s_e$$

Il carico di esercizio $Q_w = V/n$; il modulo lo ripartisce tra fusto e base nel rapporto **$Q_s : Q_p$**.

Il gruppo subisce un cedimento **$\sqrt{(B_g/D)}$** volte maggiore di quello di un palo singolo sotto lo stesso carico per palo (relazione empirica di Vesic per i pali in sabbia).

ξ: distribuzione della resistenza laterale, tra 0.5 (uniforme) e 0.67 (crescente con la profondità); $I_{wp} = 0.85$.

Traccia

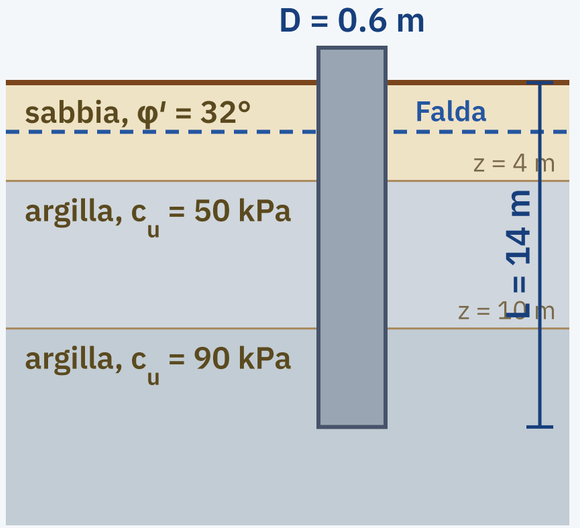
ESEMPIO

Dati

Gruppo	**9 pali trivellati, 3 file × 3 pali, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Terreno	**sabbia 0–4 m (φ′ = 32°) · argilla 4–10 m (c_u = 50) · argilla 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Carico di esercizio	**Q_w = V/n = 177.8 kN; Q_s : Q_p = 678.1 : 229.0 (Esempio 3)**
Materiale	$E_p = 30\,000$ MPa, $E_s = 30$ MPa, $\nu_s = 0.30$, $\xi = 0.6$, $I_{wp} = 0.85$

RICHIESTO

Determinare il cedimento elastico del palo singolo in tre parti e il cedimento elastico del **gruppo**.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Ripartizione del carico di esercizio

$$Q_{ws} = Q_w \frac{Q_s}{Q_u} = 177.8 \frac{678.1}{907.1} = 132.9\ \text{kN} \qquad Q_{wp} = 177.8 - 132.9 = 44.9\ \text{kN}$$

2 Accorciamento del palo

$$s_{e1} = \frac{(44.9 + 0.6(132.9))(14)}{(0.2827)(30\,000\,000)} = 0.21\ \text{mm}$$

3 Base

$$q_{wp} = \frac{Q_{wp}}{A_b} = 158.7\ \text{kPa} \quad s_{e2} = \frac{158.7(0.6)}{30\,000}(1 - 0.3^2)(0.85) = 2.46\ \text{mm}$$

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

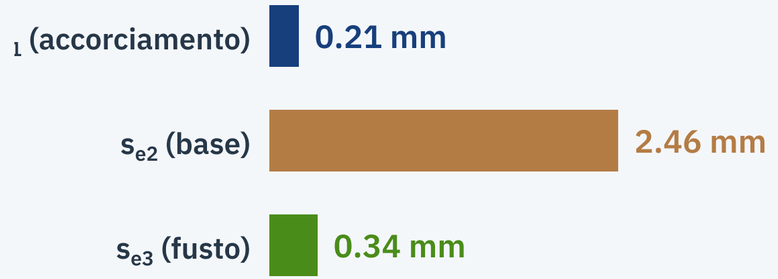
4 Fusto: $I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{(14/0.6)} = 3.69$

$$s_{e3} = \frac{132.9}{(1.885)(14)} \cdot \frac{0.6}{30\,000}(0.91)(3.69) = 0.34 \text{ mm}$$

5 Palo singolo e gruppo

$$s_e = 0.21 + 2.46 + 0.34 \approx 3.00 \text{ mm}$$

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}}\, s_e = \sqrt{\frac{4.2}{0.6}}(3.00) = \mathbf{7.9} \text{ mm}$$



Il **82**% del cedimento deriva dalla componente alla base (s_{e2}); il cedimento elastico totale è pari a **7.9 mm**. Il cedimento principale degli strati di argilla si ha nel passaggio successivo: la consolidazione.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Cedimento lento e elevato degli strati di argilla

TEORIA

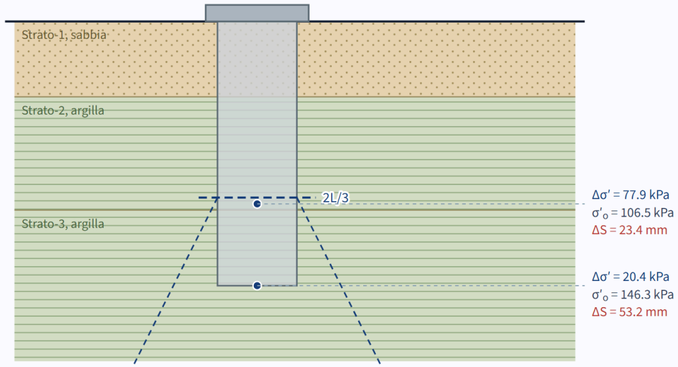
Le argille al di sotto del plinto consolidano lentamente e in prevalenza per **consolidazione**. La sorgente applica il carico del gruppo dal livello del plinto a una fondazione equivalente posta **2L/3 più in basso** (i pali hanno trasferito parte del carico al terreno sovrastante) e lo diffonde al di sotto con una pendenza di **2 verticale : 1 orizzontale**. A metà di uno strato di argilla, a profondità z sotto il livello 2L/3, l'incremento di tensione vale:

$$\Delta\sigma'_i = \frac{Q_g}{(B_g + z_i)(L_g + z_i)}$$

$$\Delta S_i = \frac{C_c H_i}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_i}{\sigma'_o} \quad \text{(NC)}$$

Nell'argilla sovraconsolidata si utilizza C_s (pari a $C_c/5$ se non fornito) fino alla tensione di preconsolidazione, e C_c oltre tale valore.

Nel calcolo rientra la parte dello strato di argilla **sotto** 2L/3; σ'_o si assume a metà di questa parte, in funzione dello strato e del livello della falda. $S_c = \Sigma\Delta S_i$.



Traccia

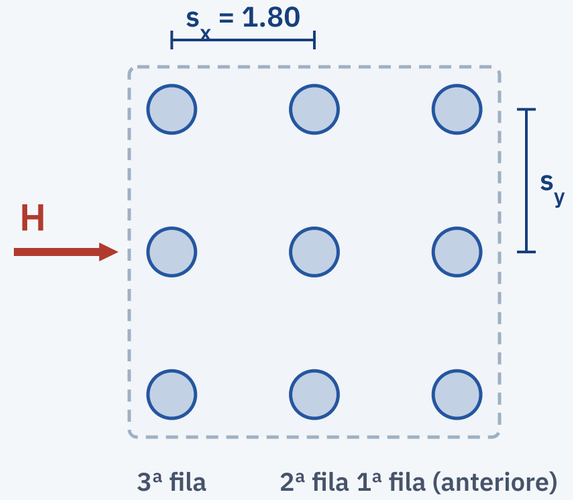
ESEMPIO

Dati

Gruppo	**9 pali trivellati, 3 file × 3 pali, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Terreno	**sabbia 0–4 m (φ′ = 32°) · argilla 4–10 m (c_u = 50) · argilla 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Carico	$Q_g = V = 1\,600$ kN; **blocco** $L_g = B_g = 4.2$ m
Argilla 1 (4–10 m)	$e_0 = 0.90,\ C_c = 0.28$ **(NC)**
Argilla 2 (10–18 m)	$e_0 = 0.70,\ C_c = 0.20$ **(NC)**

RICHIESTO

Determinare il livello 2L/3 e calcolare il cedimento di **ciascuno strato di argilla** (la porzione al di sotto di 2L/3) e il cedimento totale di consolidazione.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Livello 2L/3 (dalla base del plinto)

$$z_0 = \frac{2L}{3} = \frac{2(14)}{3} = \mathbf{9.33}\ \text{m} \ \Rightarrow\ \text{si considerano l'argilla 1 (9.33–10 m) e l'intera argilla 2}$$

2 Argilla 1 (4–10 m): 9.33–10 m, H = 0.67 m; punto medio 9.67 m, z = 0.33 m

$$\Delta\sigma' = \frac{1\,600}{(4.2+0.33)(4.2+0.33)} = 77.9\ \text{kPa} \qquad \sigma'_o = 106.5\ \text{kPa}$$

$$\Delta S = \frac{0.28(0.67)}{1+0.90}\log\frac{106.5+77.9}{106.5} = \mathbf{23.4}\ \text{mm}$$

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

3 Argilla 2 (10–18 m): 10.00–18 m, H = 8.00 m; punto medio 14.00 m, z = 4.67 m

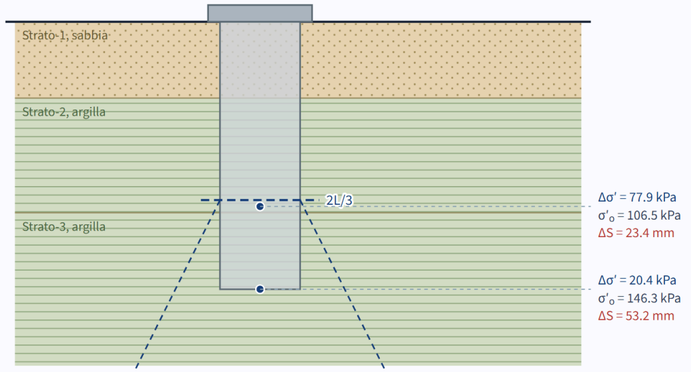
$$\Delta\sigma' = \frac{1\,600}{(4.2+4.67)(4.2+4.67)} = 20.4\ \text{kPa} \qquad \sigma'_o = 146.3\ \text{kPa}$$

$$\Delta S = \frac{0.20(8.00)}{1+0.70}\log\frac{146.3+20.4}{146.3} = \mathbf{53.2}\ \text{mm}$$

4 Cedimento totale di consolidazione e sua combinazione con la componente elastica

$$S_c = 23.4 + 53.2 = \mathbf{76.7}\ \text{mm}$$

$$S = S_{g(e)} + S_c = 7.9 + 76.7 = \mathbf{84.6}\ \text{mm}$$



Il **91%** del cedimento è dovuto alla consolidazione, e il 69% di questa alle argille tra 10 e 18 m: il cedimento del gruppo è governato dallo spesso strato di argilla **ben al di sotto** delle punte; il cedimento del palo singolo non lo evidenzia.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

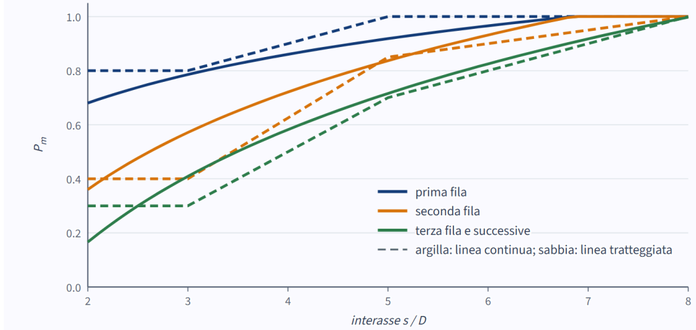
Le file posteriori sono in ombra rispetto a quelle anteriori

TEORIA

Sotto carico orizzontale un palo spinge il terreno e il terreno reagisce lungo il fusto del palo (curva p–y nel modulo per i carichi orizzontali). Quando i pali sono disposti **in fila** nella direzione del carico, ciascuno lavora nel terreno deformato e spinto dal palo che lo precede. Le prove sperimentali (Brown et al. 1988; McVay et al. 1995; Rollins et al. 2006) mostrano che la curva p–y del gruppo mantiene la propria forma, ma è ridotta da un **moltiplicatore p P_m**; il moltiplicatore dipende dalla fila e dall'interasse:

$$p_{group}(y) = P_m \; p_{single}(y)$$

$$\text{argilla (Rollins):} \quad \begin{aligned} P_{m1} &= 0.26 \ln \tfrac{s}{D} + 0.5 \\ P_{m2} &= 0.52 \ln \tfrac{s}{D} \\ P_{m3} &= 0.60 \ln \tfrac{s}{D} - 0.25 \end{aligned}$$



Sabbia: coefficienti AASHTO LRFD (a 3D e 5D: 0.8·0.4·0.3 e 1.0·0.85·0.7; interpolazione lineare tra i due).

Nel terreno stratificato la curva p–y di **ogni strato** è scalata con il moltiplicatore proprio del tipo di terreno di quello strato. Se il carico **si inverte**, ogni riga assume la media dei moltiplicatori di riga del gruppo.

Traccia

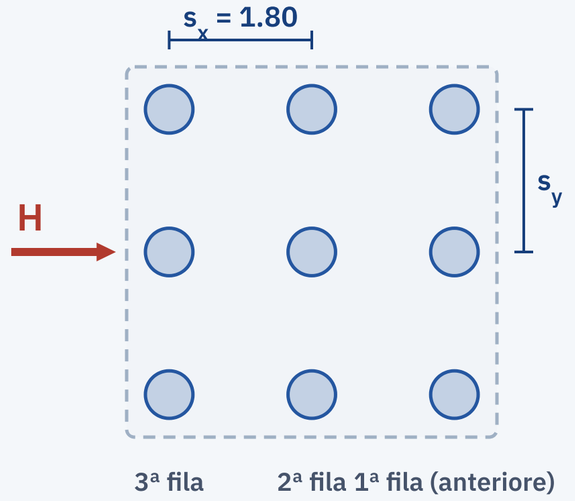
ESEMPIO

Dati

Interasse (nella direzione del carico)	**s_x = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3**
Argilla	**equazioni di Rollins et al. (2006)**
Sabbia	**AASHTO LRFD: in 3D, $P_m = 0.8 \cdot 0.4 \cdot 0.3$**

RICHIESTO

Determinare i **fattori p** delle tre file per lo strato di argilla; se il carico **si inverte**, qual è il fattore medio delle file per argilla e sabbia?



Soluzione

SOLUZIONE

1 Argilla: ln(s/D) = ln 3 = 1.099

$$P_{m1} = 0.26(1.099) + 0.5 = \mathbf{0.786}$$

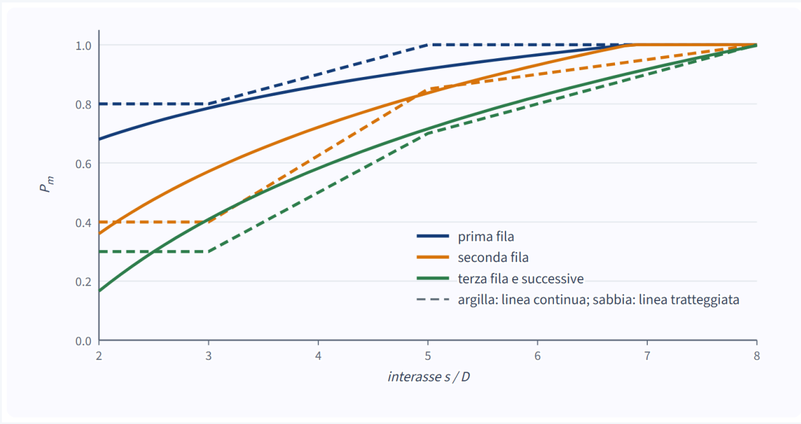
$$P_{m2} = 0.52(1.099) = \mathbf{0.571}$$

$$P_{m3} = 0.60(1.099) - 0.25 = \mathbf{0.409}$$

2 carico reversibile: media delle righe

$$\bar{P}_{m,clay} = \frac{0.786 + 0.571 + 0.409}{3} = \mathbf{0.589}$$

$$\bar{P}_{m,sand} = \frac{0.8 + 0.4 + 0.3}{3} = \mathbf{0.500}$$



La fila anteriore conserva circa il 79% della curva, mentre la terza e le file successive conservano solo il 41% (in argilla); in sabbia 80% e 30%. All'aumentare dell'interasse i moltiplicatori si avvicinano a 1 (a 5D, sabbia 1.0 · 0.85 · 0.7).

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

il plinto subisce un unico spostamento

TEORIA

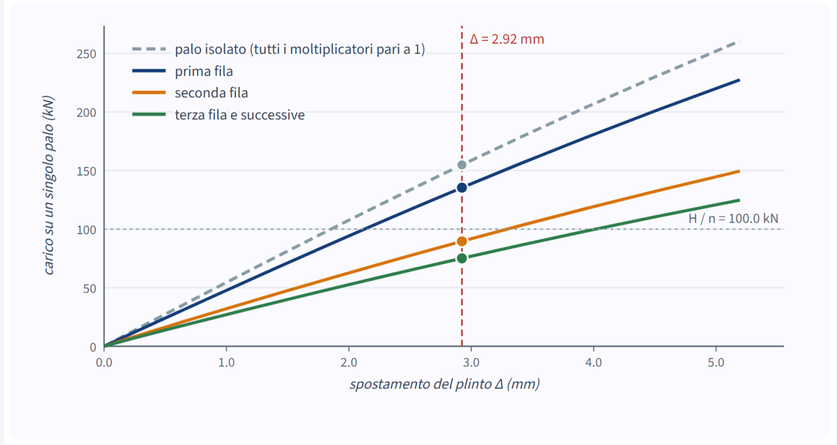
Il plinto è rigido e la sua rotazione è impedita: **ogni testa di palo si sposta dello stesso Δ**; ma poiché le curve p–y sono scalate diversamente, le file portano carichi diversi. Il modulo determina il Δ per cui la somma dei carichi delle file è uguale al carico sul plinto:

$$\sum_{k=1}^{n_x} n_y \, H_k(\Delta) = H$$

Il palo della riga k è il palo singolo del **modulo dei pali sotto carico laterale** (elementi finiti + Newton); le curve sono scalate con i moltiplicatori di quella riga.

Il controllo avviene **sullo spostamento**: la testa del palo viene mantenuta a Δ e si legge la reazione; in tal modo è possibile seguire anche il picco della curva con ramo di rammollimento (argilla ciclica).

Il carico massimo che il gruppo può sopportare è il **primo picco** della somma della riga; se il carico richiesto è maggiore, il modulo lo segnala.



Traccia

ESEMPIO

Dati

Soluzione (modulo)	**Δ = 2.92 mm; carico per palo: 1ª fila 135.3, 2ª fila 89.6, 3ª fila 75.1 kN**
Palo singolo	**A Δ porta 154.8 kN; sotto 100 kN si sposta di 1.85 mm**
Carico	**H = 900 kN, n = 9: quota uguale H/n = 100 kN**

RICHIESTO

Verificare l'equilibrio; determinare il rapporto tra lo spostamento del plinto e quello del palo singolo e l'**efficienza di gruppo sotto carico orizzontale**.

Soluzione

SOLUZIONE

1 Equilibrio: $\Sigma n_\gamma H_k = H$

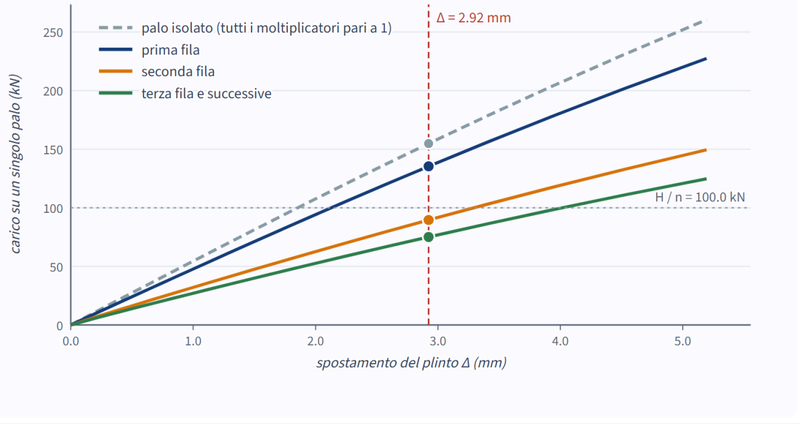
$$3(135.3 + 89.6 + 75.1) = \mathbf{900}\ \text{kN} = H\ \checkmark$$

2 Rapporto tra lo spostamento del plinto e quello del palo singolo

$$\frac{\Delta}{y_{single}} = \frac{2.92}{1.85} = \mathbf{1.58}$$

3 Efficienza di gruppo sotto carico orizzontale: carico medio per palo / carico sul palo singolo per lo stesso Δ

$$\eta_{lateral} = \frac{H/n}{H_{single}(\Delta)} = \frac{100.0}{154.8} = \mathbf{0.65}$$



La fila anteriore porta **1.35 volte** la quota uguale, la terza fila 0.75 volte; il plinto si sposta **1.58 volte** più che nel caso del palo singolo. Il momento flettente massimo è alla testa del palo: 207 kN·m.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Quale valore va a quale verifica?

TEORIA

Carichi sui pali: $P_{max} \leq Q_u/FS$ (palo singolo, senza effetto di gruppo); il palo in trazione $T_{max} \leq T_u/FS$, e i pali in trazione nel loro insieme $\Sigma T \leq T_g/FS$

Capacità del gruppo: $V \leq Q_{all} = Q_{g(u)}/FS$; quale delle due (palo singolo o blocco) risulta determinante

Cedimento: elastico + consolidazione, confrontato con il valore ammissibile inserito

Laterale: spostamento del plinto su pali, carico della fila anteriore, momento flettente massimo ed efficienza laterale; confronto con lo spostamento ammissibile

Il carico per palo e il momento flettente sono le sollecitazioni per la **progettazione strutturale** della sezione del palo

GRUPPO DI ESEMPIO: VERIFICHE

Verifica	Risultato
$P_{max} \leq Q_u/FS$	261 ≤ 302 kN ✓
$V \leq Q_{all}$	1 600 ≤ 1,984 kN ✓
Cedimento	84.6 mm
Δ (laterale)	2.92 mm

Traccia

ESEMPIO

Dati

Gruppo	**9 pali trivellati, 3 file × 3 pali, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Terreno	**sabbia 0–4 m ($\varphi' = 32°$) · argilla 4–10 m ($c_u = 50$) · argilla 10–18 m ($c_u = 90$ kPa)**
Variabile	**interasse dei pali s = 2.5D · 3D · 4D · 5D · 6D (in entrambe le direzioni)**
Carichi	**V = 1 600, H = 900 kN, $M_y = 900$ kN·m**

RICHIESTO

All'aumentare dell'interasse, come variano la capacità, l'efficienza del gruppo e lo spostamento del plinto?

Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

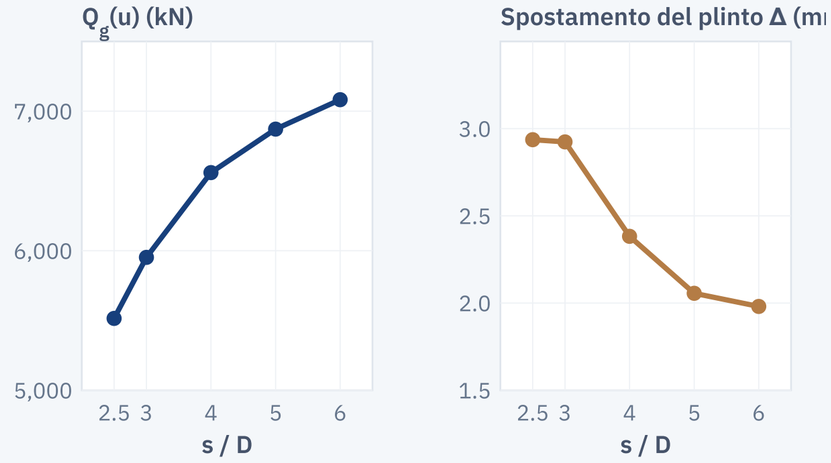
s / D	s (m)	η sabbia	η argilla	$Q_{g(u)}$ (kN)	η gruppo	Δ (mm)
2.5	1.50	0.65	0.677	5,515	**0.676**	2.94
3.0	1.80	0.77	0.727	5,952	**0.729**	2.92
4.0	2.40	1.00	0.792	6,560	**0.803**	2.38
5.0	3.00	1.00	0.832	6,871	**0.842**	2.06
6.0	3.60	1.00	0.860	7,083	**0.868**	1.98

s = 2.5D → 6D: capacità **5,515 → 7,083 kN**, efficienza di gruppo 0.68 → 0.87, spostamento del plinto **2.94 → 1.98 mm**. All'aumentare dell'interasse sia l'efficienza sia i moltiplicatori p si avvicinano a 1; 2.5D è l'interasse minimo fornito dalla fonte.

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

Commento. Aumentando l'interasse da 2.5D a 6D la capacità cresce del 28% e lo spostamento del plinto si riduce del 33%; però il plinto si ingrandisce e i pali si distribuiscono su un'area maggiore. In pratica un compromesso tra 3D – 3.5D e 5D. Nella figura, $Q_{g(u)}$ a sinistra e Δ a destra.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Le ipotesi alla base dei numeri

TEORIA

Gruppo: pali verticali disposti a reticolo rettangolare o a schema triangolare, di un'unica sezione e lunghezza, sotto un plinto rigido. Il plinto trasmette il carico ma non aggiunge resistenza (la spinta passiva, l'attrito al di sotto di esso e il carico limite sono trascurati a favore della sicurezza).

Palo singolo: regole per terreno stratificato, non si inserisce alcuna resistenza.

Efficienza: equazioni empiriche per i pali infissi nell'argilla; nella sabbia un unico interasse (la distanza minima). Nella disposizione triangolare Converse–Labarre è un'**estensione**.

Blocco: la fondazione della sorgente nell'argilla; lo scorrimento nella sabbia e la base in sabbia sono un'**estensione del modulo**.

Carichi: V include il peso del plinto; carico orizzontale e momenti agenti alla base del plinto. Nella trazione si considera solo il fusto, sabbia ¾.

Cedimenti: è un'opzione; la parte elastica con un unico E_s e v_s, la consolidazione con diffusione 2:1, a metà di ciascuno strato.

Laterale: i moltiplicatori p derivano da prove su terreni e interassi specifici; quelli 3D sono contrassegnati.

Sintesi

Punti chiave

Plinto rigido: **P = V/n + Bx + Cy**; il carico massimo è sul palo anteriore, il minimo su quello posteriore; se il momento è elevato, il palo posteriore va in **trazione**

Il **palo singolo** è calcolato strato per strato; la capacità del gruppo si costruisce su di esso

L'**efficienza** si applica strato per strato: Converse–Labarre nell'argilla, l'abaco per l'infissione nella sabbia ($\eta \leq 1$) e la regola AASHTO per i pali trivellati

Capacità = **min(singolo palo, blocco)**; il blocco è determinante nei gruppi con interasse ridotto e con molti pali

Cedimento: elastico (Vesic, con $\sqrt{(B_g/D)}$) + consolidazione (diffusione 2:1 da 2L/3); il cedimento del gruppo è governato dall'argilla spessa

Laterale: i fattori p diminuiscono dalla fila anteriore a quella posteriore; il plinto subisce un unico Δ, le file sopportano carichi diseguali

Bibliografia

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

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, Washington.

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.

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.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.

Vijayvergiya, V.N. and Focht, J.A. (1972). A new way to predict capacity of piles in clay. Proceedings of the 4th Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 1718.

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

O'Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025, Federal Highway Administration, Washington.

Reese, L.C. and O'Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-HI-88-042, Federal Highway Administration, Washington; base di un palo trivellato in argilla.

Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

Kishida, H. and Meyerhof, G.G. (1965). Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sand. Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, 2, 270–274.

Vesic, A.S. (1969). Experiments with instrumented pile groups in sand. Performance of Deep Foundations, ASTM STP 444, 177–222.

Jaky, J. (1944). The coefficient of earth pressure at rest. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 7, 355–358.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th ed.: moltiplicatori p dei gruppi di pali e resistenza laterale dei gruppi di pali trivellati in terreno incoerente.

Washington State Department of Transportation (2010). Bridge Design Memorandum No. 07-2010, Bearing resistance of shaft groups.

Brown, D.A., Morrison, C. and Reese, L.C. (1988). Lateral load behavior of pile group in sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 114(11), 1261–1276.

McVay, M., Casper, R. and Shang, T.-I. (1995). Lateral response of three-row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121(5), 436–441.

Rollins, K.M., Olsen, R.J., Egbert, J.J., Jensen, D.H., Olsen, K.G. and Garrett, B.H. (2006). Pile spacing effects on lateral pile group behavior: analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 132(10), 1272–1283.

Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. Proceedings of the 2nd Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 1204, 577–594.

Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1974). Analysis of laterally loaded piles in sand. Proceedings of the 6th Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 2080, 473–485.

American Petroleum Institute (2000). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms — Working Stress Design, API RP 2A-WSD, 21st ed.

GeoTerva

Calcoli geotecnici online

Dalla teoria alla pratica

Calcolare passo per passo in GeoTerva il gruppo di pali di questo esempio: 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