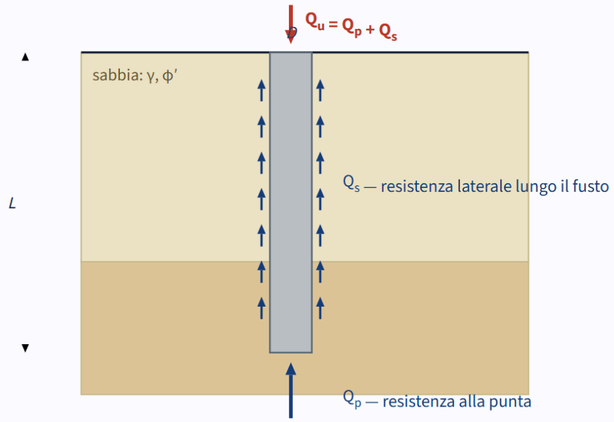
Presentazione didattica di geotecnica · Pali

Capacità portante del palo in sabbia

Lezione: resistenza alla punta, attrito laterale e profondità critica. La teoria di ciascun metodo, seguita da un esempio di calcolo.

Meyerhof (1976) · Vesic (1977) · Coyle e Castello (1981) · Esempi di calcolo



Introduzione

Che cosa si impara in questa lezione?

Saper spiegare come un palo porta il proprio carico come **resistenza alla punta** e **attrito laterale**

Potere ricavare il profilo delle **tensioni efficaci** nella sabbia, compresa la quota della falda

Saper calcolare la resistenza alla punta con tre metodi: **Meyerhof**, **Vesic**, **Coyle e Castello**

Saper interpretare l'attrito laterale e il ruolo della **profondità critica** (L')

Pervenire alla **capacità portante ammissibile** e valutare insieme i risultati dei diversi metodi

SVOLGIMENTO DELLA LEZIONE

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

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

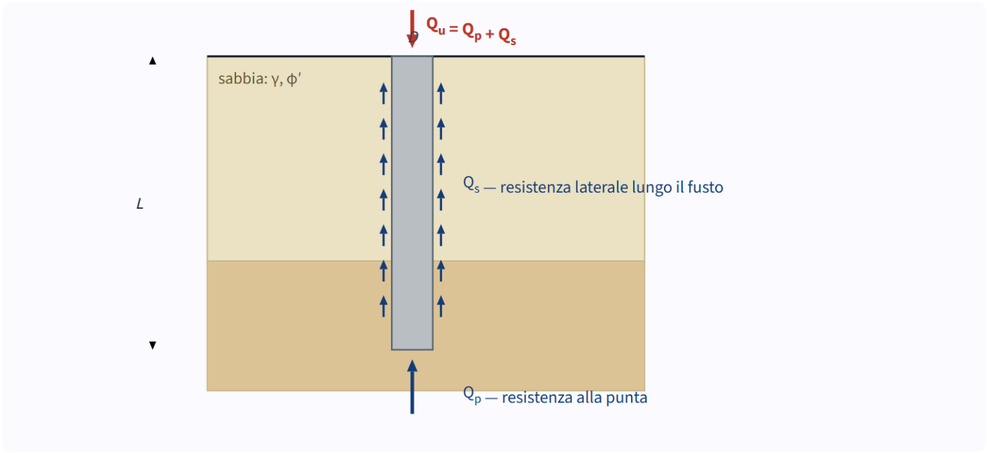
2 · **Traccia**: dati e richiesto

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

Tutti gli esempi sono svolti con lo stesso palo: così i metodi si confrontano fianco a fianco.

Il carico si trasmette in due modi

TEORIA



Il palo trasmette il carico al terreno **contemporaneamente per due vie**: il terreno sotto la punta reagisce con la **resistenza alla punta** (Q_p), mentre la sabbia lungo il fusto reagisce con l'**attrito laterale** (Q_s).

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

L'attrito laterale raggiunge il suo valore pieno per un **piccolo** spostamento, mentre la resistenza alla punta lo raggiunge per uno spostamento **molto maggiore**; le due componenti non raggiungono il picco contemporaneamente.

In questa lezione: **palo singolo**, **sabbia** ($c' = 0$), infisso o trivellato, a sezione costante.

Nella sabbia tutto è proporzionale alla tensione efficace

TEORIA

Nella sabbia sia la **resistenza alla punta** sia l'**attrito laterale unitario** sono proporzionali alla tensione verticale efficace. Il calcolo inizia con la determinazione corretta dei valori di σ'_v nel profilo.

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

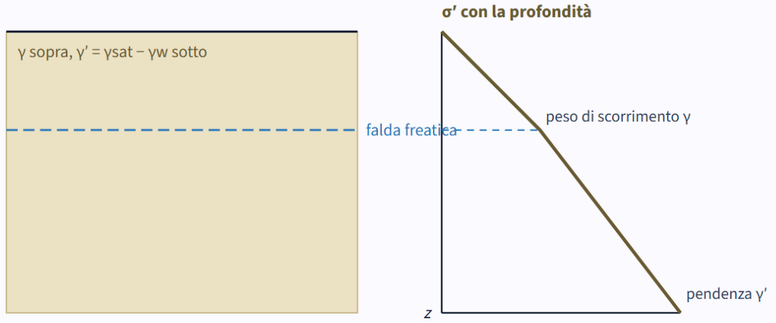
γ : peso dell'unità di volume umido (sopra la falda freatica)

γ_{sat} : peso dell'unità di volume saturo (sotto la falda freatica)

$\gamma_W = 9.81$ kN/m³ : peso dell'unità di volume dell'acqua

falda freatica: livello della falda freatica

> Sotto la falda freatica il gradiente di tensione **diminuisce**: $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_W$



Traccia

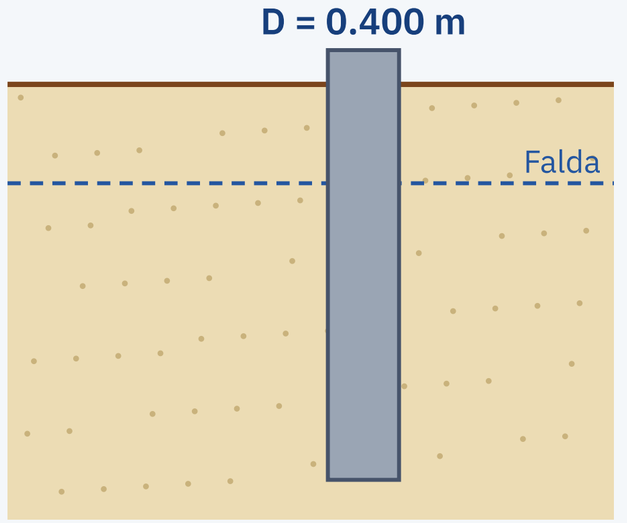
ESEMPIO

Dati

Sabbia, sopra la falda freatica	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$
Sabbia, sotto la falda freatica	$\gamma_{sat} = 19.5\ \mathrm{kN/m^3}$
Profondità della falda freatica	**2.0 m**
Peso dell'unità di volume dell'acqua	$\gamma_w = 9.81\ \mathrm{kN/m^3}$

RICHIESTO

A **8 m di profondità**, determinare la tensione verticale totale, la pressione interstiziale e la **tensione verticale efficace**.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Tensione verticale totale (peso dell'unità di volume umido sopra la falda freatica, saturo sotto)

$$\sigma_v = 17(2) + 19.5(6) = 34 + 117 = \mathbf{151.0}\ \text{kPa}$$

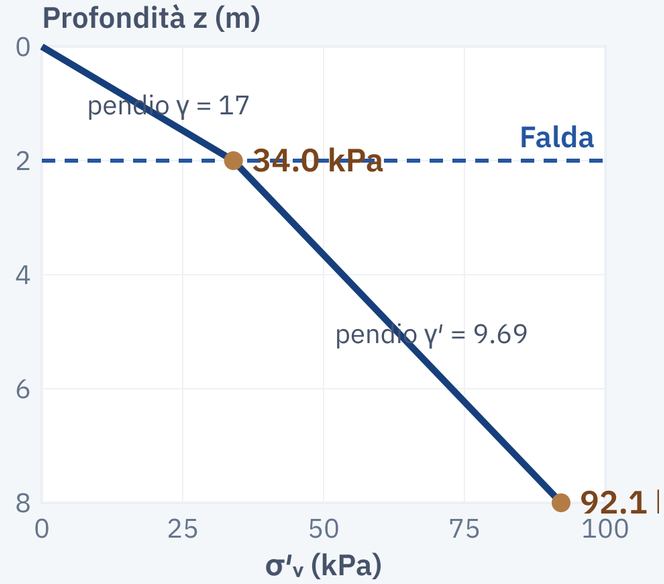
2 Pressione interstiziale (6 m di colonna d'acqua sotto la falda freatica)

$$u = \gamma_w\, h_w = 9.81\,(6) = \mathbf{58.9}\ \text{kPa}$$

3 Tensione verticale efficace

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = 151.0 - 58.9 = \mathbf{92.1}\ \text{kPa}$$

Stesso risultato: σ′$_v$ = 17(2) + (19.5 − 9.81)(6) = **92.1 kPa**. Al di sotto della falda freatica il peso dell'unità di volume efficace è 9.69 kN/m³.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Resistenza alla punta: espressione generale

TEORIA

La sabbia sotto la punta collassa per **rottura per capacità portante** come sotto una fondazione; tuttavia, alla profondità della punta la **tensione di sovraccarico** confina saldamente la sabbia.

Nella sabbia, essendo $c' = 0$, rimane solo il termine di profondità (sovraccarico). Poiché il diametro del palo è piccolo, il termine di larghezza ($0.5\gamma' D N_\gamma$) viene trascurato:

$$q_p = \sigma'_v \, N^*_q \qquad Q_p = A_p \, q_p$$

σ'_v : tensione verticale efficace alla profondità della punta

N^*_q : fattore di capacità portante per il problema del palo

A_p : area della punta del palo

DA DOVE DERIVA N^*_q? TRE APPROCCI

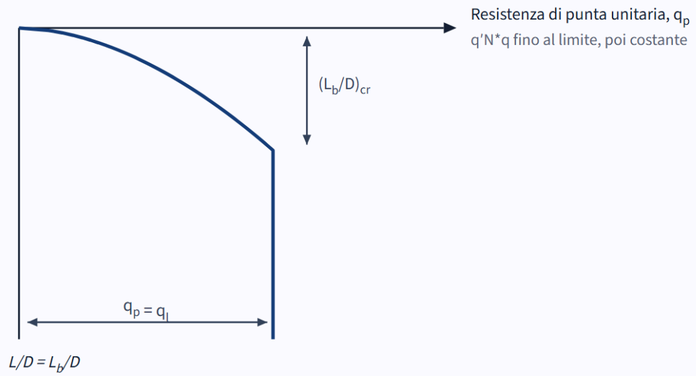
Meyerhof (1976): N^*_q dipende solo da φ'; q_p è limitato da un **valore limite**

Vesic (1977): teoria dell'espansione della cavità; si tiene conto anche della **rigidità** della sabbia

Coyle e Castello (1981): adattato a 24 prove di carico in vera grandezza; N^*_q dipende anche da L/D

La resistenza alla punta non cresce all'infinito

TEORIA



In sabbia omogenea la resistenza unitaria alla punta aumenta con il rapporto di infissione e **raggiunge un picco** in corrispondenza di **$(L_b/D)_{cr}$**; oltre tale valore rimane costante (q_l).

VESIC (1970) · PROVA DI CARICO SU PALO NEL FIUME OGEECHEE (D = 0.457 m)

L (m)	L/D	q_p (kN/m²)
3.02	6.61	3 304
6.12	13.39	9 365
8.87	19.40	11 472
12.00	26.26	11 587
15.00	32.82	13 971

Valore massimo di q_p pari a circa **12 000 kN/m²**

$(L/D)_{cr}$ circa **16 – 18**

Per un N_{60} medio ≈ 30, $4p_aN_{60} = 4(100)(30) = 12\,000$ kN/m²: **la correlazione è coerente con il plateau misurato**

Meyerhof: N*q da φ′, con un limite

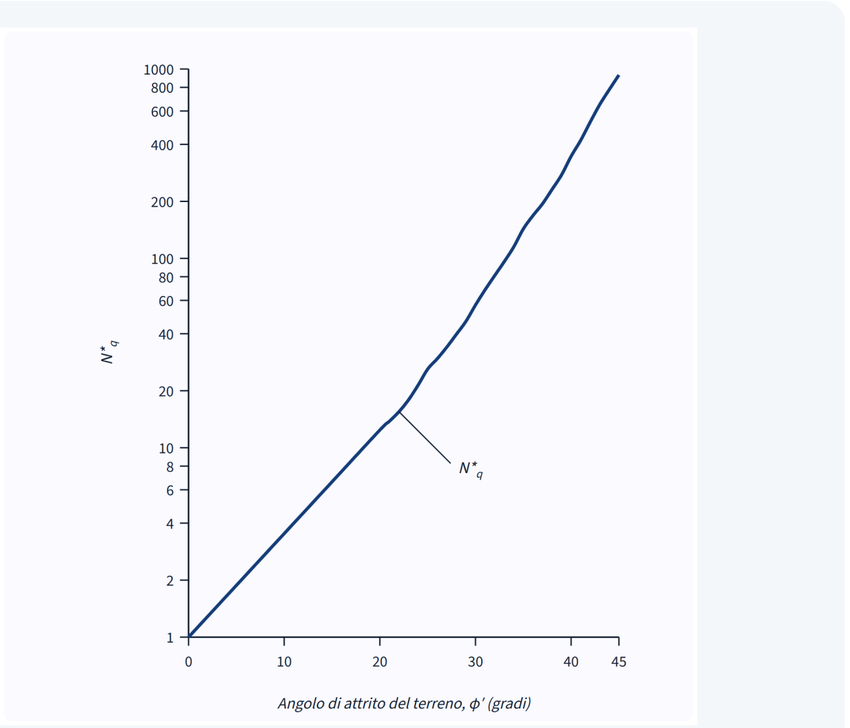
TEORIA

Meyerhof ricava N^*_q unicamente dall'**angolo di attrito interno** (suo abaco, di seguito). Il valore calcolato q_p non può superare un **valore limite**:

$$q_p = \sigma'_v N^*_q \leq q_l \qquad q_l = 0.5\, p_a\, N^*_q \tan\varphi'$$

p_a = 100 kN/m² : pressione atmosferica

φ′ : angolo di attrito efficace della sabbia alla quota della punta



VALORI DI N^*_q (ABACO DI MEYERHOF; SERIE LETTA DAL MODULO)

φ′ (°)	20	25	30	32	34	35	36	38	40	42	45
N^*_q	12.4	26.0	56.7	81.0	115.0	143.0	168.0	231.0	346.0	525.0	930.0

Per φ′ = 35°, N^*_q = 143.0 e q_l = 5,006 kPa; in una sabbia con γ = 18 kN/m³ tale limite viene raggiunto a una profondità di circa **1.9 m**

Meyerhof: passaggio per passaggio e significato del limite

TEORIA

PASSAGGI DI CALCOLO

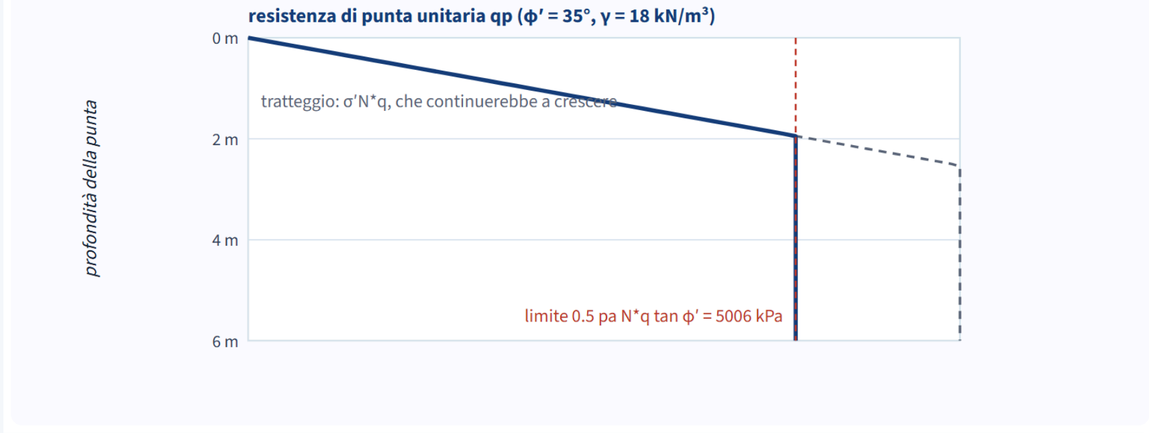
1. Calcolare σ'_v alla quota della punta

2. Leggere il valore di N^*_q per φ' dall'abaco/dalla tabella

3. $q_p = \sigma'_v N^*_q$

4. $q_l = 0.5\ p_a\ N^*_q\ \tan\varphi'$

5. $q_p = \min(\sigma'_v N^*_q, q_l)$ e $Q_p = A_p q_p$



La curva segue la retta $\sigma' N^*_q$ **finché non governa il valore limite**; successivamente resta orizzontale. In assenza del limite q_p crescerebbe indefinitamente con la profondità, il che non è confermato dalle prove in sito.

Traccia

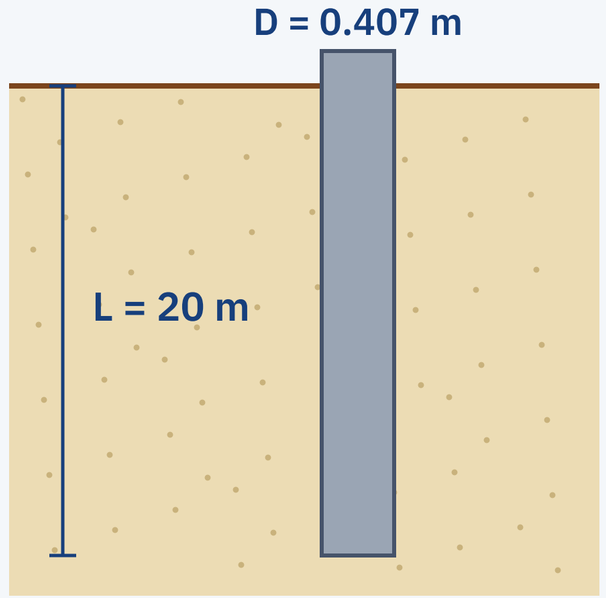
ESEMPIO

Dati

Palo	**in cemento armato, infisso, sezione quadrata**
Dimensione della sezione	**D = 0.407 m**
Lunghezza	**L = 20 m**
Sabbia (omogenea)	$\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 35°$
Acqua sotterranea	**nessuno**

RICHIESTO

Determinare la **resistenza alla punta** Q_p del palo secondo il metodo di **Meyerhof (1976)**.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Area della sezione trasversale e tensione efficace alla punta

$$A_p = 0.407^2 = 0.1656\ \text{m}^2 \qquad \sigma'_v = \gamma L = 18(20) = 360\ \text{kPa}$$

2 Valore di N*q (φ′ = 35°, tabella di Meyerhof) e σ′N*q

$$N_q^* = 143.0 \qquad \sigma'_v N_q^* = 360(143.0) = 51{,}480\ \text{kPa}$$

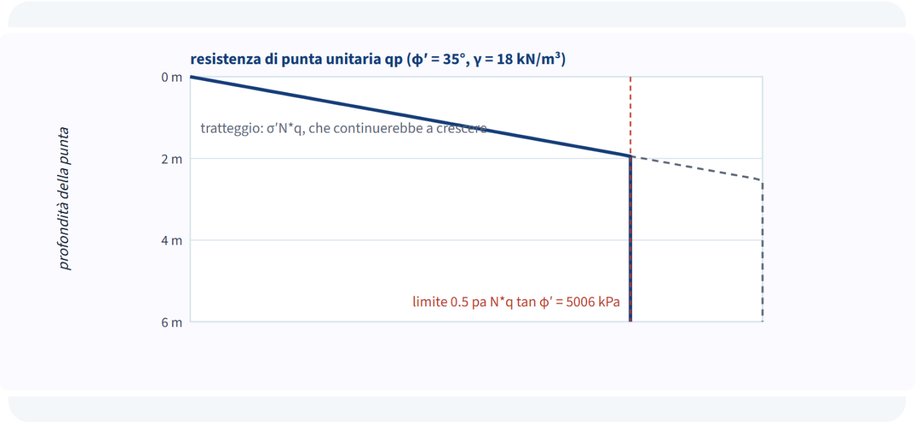
3 Valore limite

$$q_l = 0.5\, p_a N_q^* \tan\varphi' = 0.5(100)(143.0)\tan 35^\circ = 5{,}006\ \text{kPa}$$

4 Resistenza unitaria alla punta: la minore delle due; il limite è determinante

$$q_p = \min(51{,}480;\ 5{,}006) = \mathbf{5{,}006}\ \text{kPa}$$

$Q_p = A_p\, q_p = 0.1656 \times 5{,}006 =$ **829 kN**. Senza il limite si sarebbe ottenuto circa 8,528 kN.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Vesic: la sabbia sotto la punta si espande come una cavità

TEORIA

Vesic ricava la resistenza alla punta **dalla teoria dell'espansione della cavità**: la punta espande una cavità nel terreno circostante; per questo nella soluzione compaiono non solo la **resistenza** ma anche la **rigidezza** della sabbia.

$$Q_p = A_p \, \bar{\sigma}'_o \, N^*_\sigma$$

Qui $\bar{\sigma}'_o$ non è **verticale** ma la **tensione normale efficace media** al livello della punta:

$$\bar{\sigma}'_o = \frac{1 + 2K_o}{3} \, q' \qquad K_o = 1 - \sin\varphi'$$

K_o: coefficiente di spinta laterale delle terre a riposo

q': tensione verticale efficace alla quota della punta ($= \sigma'_v$)

RELAZIONE CON MEYERHOF

$$N^*_\sigma = \frac{3 \, N^*_q}{1 + 2K_o}$$

La forma è la stessa di quella di Meyerhof; i due metodi differiscono in **ciò da cui deriva il coefficiente**, non nella forma dell'equazione.

Vesic: indice di rigidezza ridotto

TEORIA

N^*_σ dipende dall'**indice di rigidezza ridotto** I_{rr} della sabbia e da φ'; I_{rr} tiene conto anche della variazione di volume nella zona plastica:

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r\,\Delta} \qquad I_r = \frac{E_s}{2(1+\mu_s)\,q'\tan\varphi'} = \frac{G_s}{q'\tan\varphi'}$$

E_s : modulo di elasticità del terreno, μ_s : coefficiente di Poisson, G_s : modulo di taglio

Δ : deformazione volumetrica media nella zona plastica al di sotto della punta

APPROCCI PRATICI (CHEN E KULHAWY, 1994; 25° ≤ φ′ ≤ 45°)

$$\frac{E_s}{p_a} = m \qquad \mu_s = 0.1 + 0.3\,\frac{\varphi' - 25}{20} \qquad \Delta = 0.005\left(1 - \frac{\varphi' - 25}{20}\right)$$

UNICO DATO DI INPUT: m = E_s / p_a

Sabbia	m
sciolto	100 – 200
mediamente addensata	200 – 500
addensato	500 – 1000

L'indice di rigidezza è generalmente **75 – 150** (sabbia con densità relativa del 50 – 80%)

Se è disponibile la CPT: $I_r = 300/F_r(\%)$ (meccanica), $170/F_r(\%)$ (cono elettrico)

Vesic: passo per passo

TEORIA

PASSAGGI DI CALCOLO

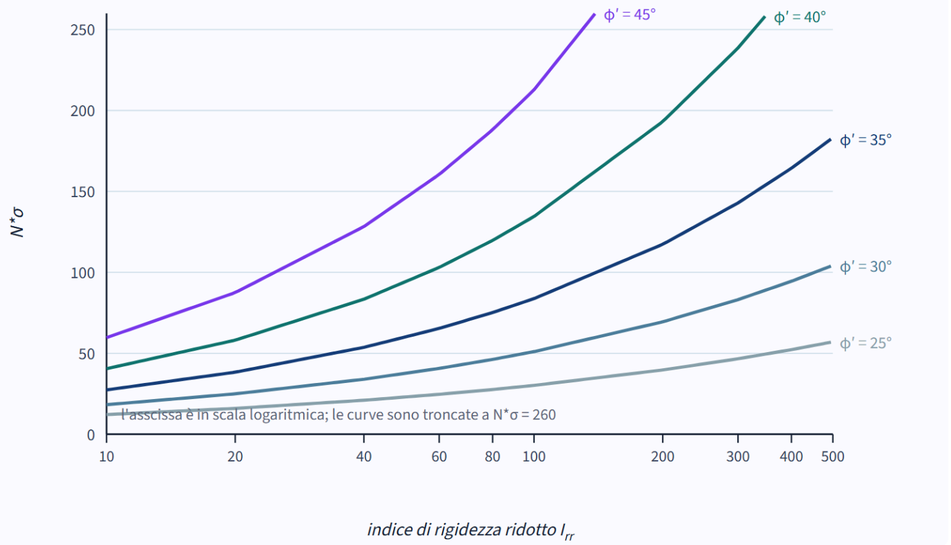
1. $K_o = 1 - \sin\varphi'$ e $\bar{\sigma}_o = (1 + 2K_o)q'/3$

2. $E_s = m \cdot p_a$, μ_s, I_r

3. Δ e $I_{rr} = I_r/(1 + I_r\Delta)$

4. N^*_σ da φ' e I_{rr} (dalla tabella, interpolazione logaritmica)

5. $q_p = \bar{\sigma}_o N^*_\sigma$ e $Q_p = A_p q_p$



Una curva per ciascun φ': **N^*_σ aumenta all'aumentare della rigidezza**; la sabbia addensata e rigida fornisce una resistenza alla punta molto maggiore della sabbia sciolta.

Traccia

ESEMPIO

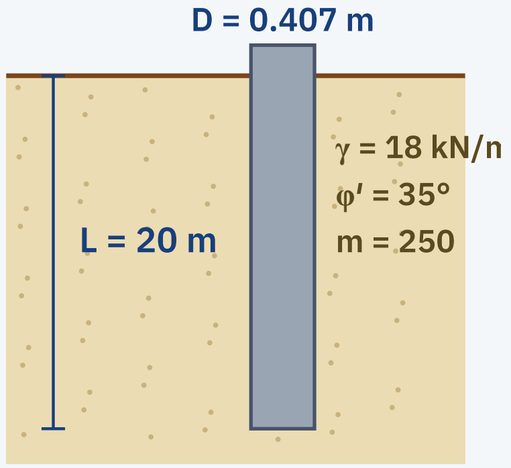
Dati

Palo	**Come nell'Esempio 2: D = 0.407 m, L = 20 m**
Sabbia	$\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 35°$
Acqua sotterranea	**nessuno**
Rapporto dei moduli di elasticità	$m = E_s/p_a = 250$ **(mediamente addensato – addensato)**
Pressione atmosferica	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$

RICHIESTO

Determinare la **resistenza alla punta** Q_p del palo secondo il metodo di **Vesic (1977)**.

Tensione efficace alla punta: q′ = 18(20) = 360 kPa



Soluzione (1/3)

SOLUZIONE

1 Coefficiente a riposo e tensione normale efficace media

$$K_o = 1 - \sin 35^\circ = 0.426 \qquad \bar{\sigma}'_o = \frac{1 + 2(0.426)}{3}(360) = \mathbf{222.3}\ \text{kPa}$$

2 Proprietà del terreno

$$E_s = m\, p_a = 250(100) = 25{,}000\ \text{kPa} \quad \mu_s = 0.1 + 0.3\frac{35 - 25}{20} = 0.25$$

3 Indice di rigidezza e deformazione volumetrica unitaria

$$I_r = \frac{25{,}000}{2(1 + 0.25)(360)\tan 35^\circ} = \mathbf{39.7} \qquad \Delta = 0.005\left(1 - \frac{35 - 25}{20}\right)\frac{360}{100} = 0.0090$$

Soluzione (2/3)

SOLUZIONE

4 Indice di rigidezza ridotto

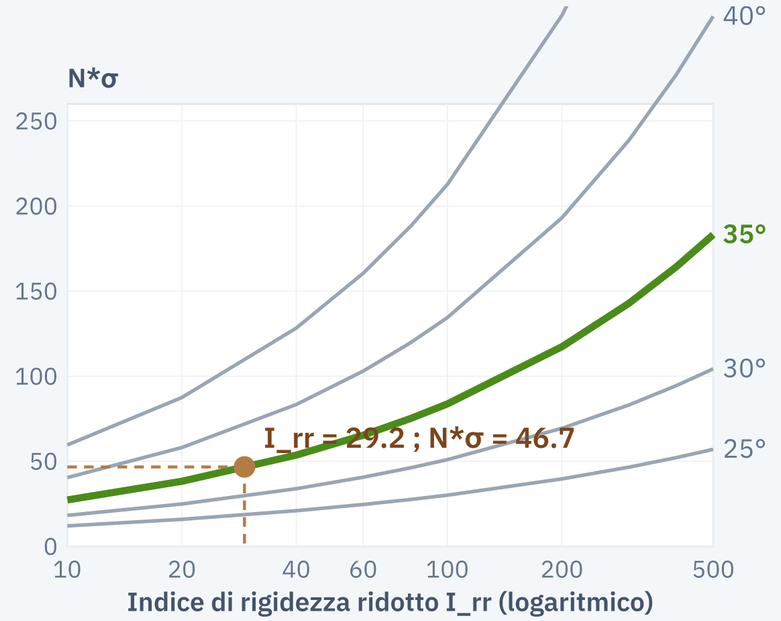
$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta} = \frac{39.7}{1 + (39.7)(0.0090)} = \mathbf{29.2}$$

5 N*σ: nella tabella, interpolazione logaritmica tra 20 e 40 per la riga φ′ = 35° e I_{rr} = 29.2

$$N_\sigma^* = 38.32 + \frac{\log 29.2 - \log 20}{\log 40 - \log 20}(53.67 - 38.32)$$

$$= \mathbf{46.7}$$

Nel grafico la curva verde φ′ = 35°: nel punto in cui interseca la linea verticale I_{rr} = 29.2 si ha **$N^*_\sigma \approx 46.7$**.



Soluzione (3/3)

SOLUZIONE

6 Resistenza unitaria alla punta

$$q_p = \bar{\sigma}'_o N^*_\sigma = 222.3(46.7) = \mathbf{10{,}389}\ \mathrm{kPa}$$

7 Resistenza alla punta

$$Q_p = A_p\, q_p = 0.1656(10{,}389) = \mathbf{1{,}721}\ \mathrm{kN}$$

Per lo stesso palo, **Meyerhof: 829 kN**, **Vesic: 1,721 kN**. Poiché Vesic tiene conto della rigidezza della sabbia (m = 250), fornisce circa 2.1 volte il valore limitato di Meyerhof.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Coyle e Castello: N*q sperimentale

TEORIA

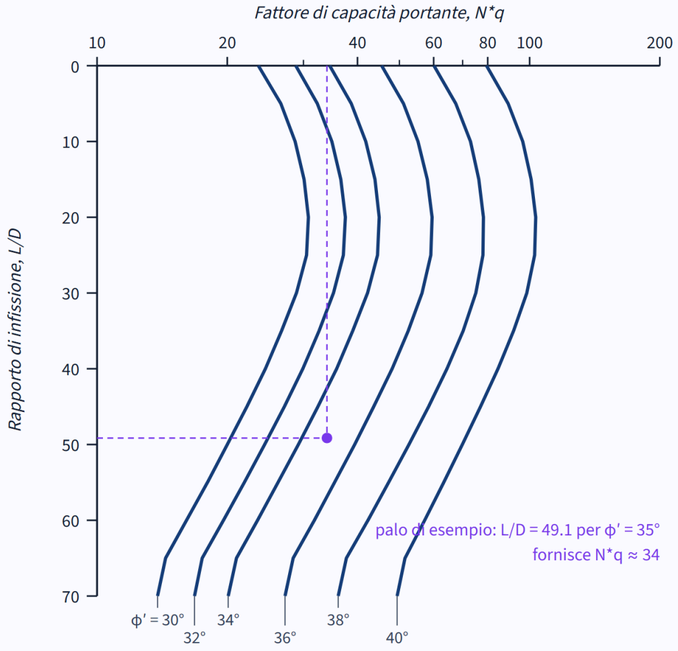
Coyle e Castello hanno esaminato **24 prove di carico in sito su pali infissi in grande scala** e hanno proposto la seguente relazione per la sabbia:

$$Q_p = q' \, N_q^* \, A_p$$

q′ è la tensione verticale efficace alla punta; N^*_q, oltre che da φ′, dipende anche dal **rapporto di infissione L/D** (abaco a lato).

Il coefficiente è **molto minore** di quello di Meyerhof: circa **34** per φ′ = 35° e un palo profondo, contro **143** in Meyerhof. Ciò perché è adattato a **capacità misurate** e non a un meccanismo di rottura.

Quando il rapporto di infissione supera circa 20, il coefficiente **diminuisce**: un palo più lungo dello stesso diametro assume un N^*_q minore.



Traccia

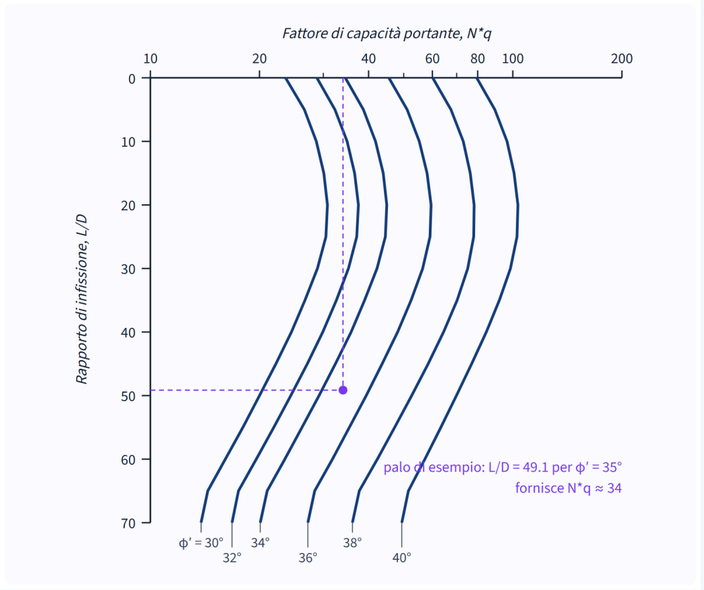
ESEMPIO

Dati

Palo e sabbia	**Come nell'Esempio 2: L = 20 m, D = 0.407 m, φ′ = 35°, γ = 18 kN/m³**
Rapporto di infissione	$L/D = 20/0.407 = 49.1$
Coefficiente letto dall'abaco	$N_q^* \approx 34$ **(Figura 7; φ′ = 35°, L/D ≈ 49)**

RICHIESTO

Con il metodo di **Coyle e Castello (1981)**, determinare la **resistenza alla punta** Q_p del palo.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Tensione efficace alla punta e coefficiente (dall'abaco, lettura approssimata)

$$q' = \gamma L = 18(20) = 360\ \text{kPa} \qquad N_q^* \approx 34$$

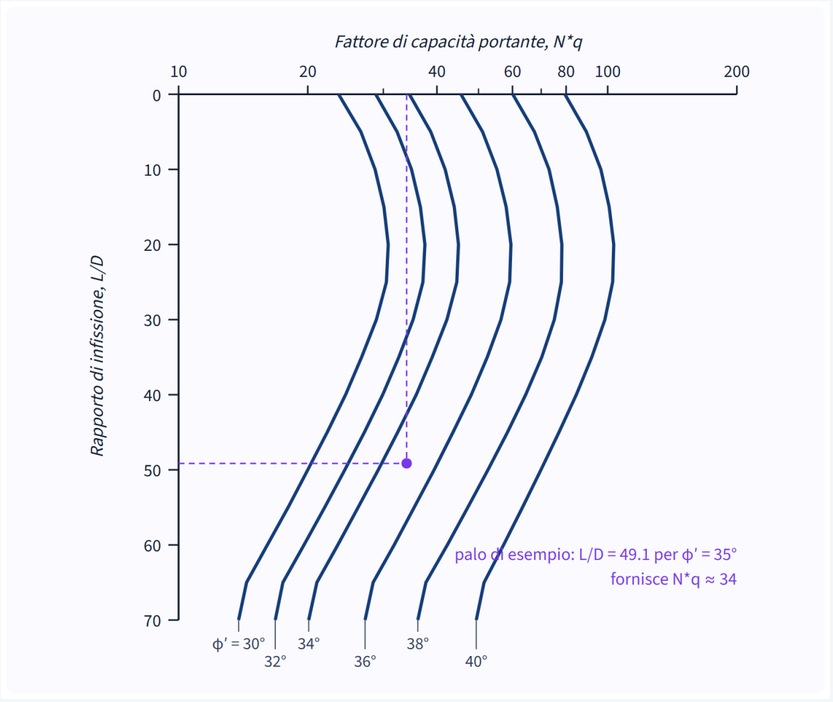
2 Resistenza unitaria alla punta

$$q_p = q' N_q^* = 360(34) = 12{,}240\ \text{kPa}$$

3 Resistenza alla punta

$$Q_p = A_p q_p = 0.1656(12{,}240) = \mathbf{2{,}028}\ \text{kN}$$

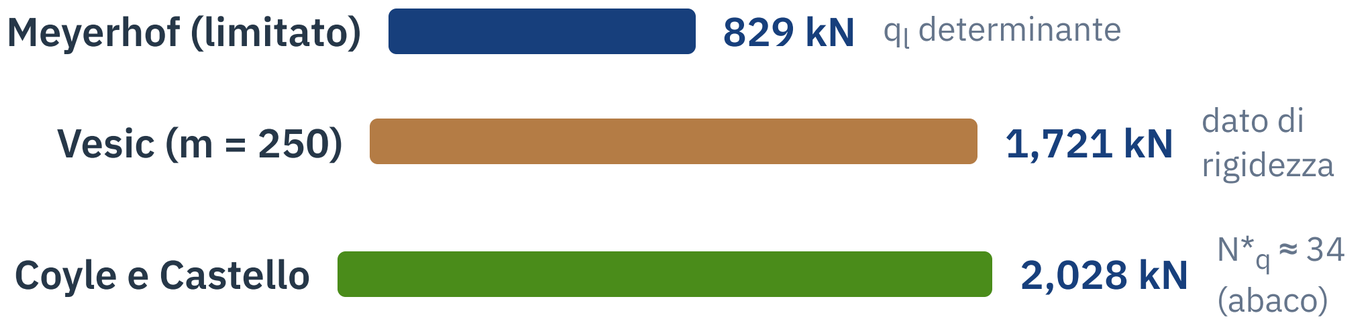
Il valore di N^*_q letto dall'abaco è approssimato; può variare di ±1 – 2 unità in funzione di φ′ e L/D. Il risultato è il maggiore dei tre metodi: **2,028 kN**.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Tre metodi, stesso palo

TEORIA



Poiché i metodi si basano su **ipotesi distinte**, anche i risultati divergono. L'intervallo costituisce un'indicazione onesta di quanto la resistenza alla punta possa essere nota.

Meyerhof: **cautelativo** a causa del valore limite

Vesic: introduce esplicitamente la densità della sabbia tramite **m**

Coyle–Castello: basato su pali infissi misurati; la lettura dell'abaco è approssimata

Nella pratica: si calcolano almeno due metodi, si esamina l'intervallo e, in assenza di una **prova di carico** o di esperienza locale, si sceglie un valore prossimo all'estremo cautelativo.

Attrito laterale: f = K σ′ tanδ′

TEORIA

L'attrito laterale è la somma dell'attrito unitario lungo la superficie del fusto:

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

L'attrito laterale unitario f si esprime in funzione della profondità come segue (L′: profondità critica):

$$f = K\,\sigma'_o \tan\delta' \qquad (0 \le z \le L')$$
$$f = f_{z=L'} \qquad (L' \le z \le L)$$

p : perimetro della sezione del palo, ΔL : lunghezza su cui p e f sono assunti costanti

K : coefficiente di spinta laterale efficace delle terre, σ'_o : tensione verticale efficace a quella profondità

δ′ : angolo di attrito terreno–palo (di norma 0.5φ′ – 0.8φ′)

VALORI DI K (PER TIPO DI PALO)

Tipologia di palo	K
Trivellato o scavato mediante lavaggio (jetted)	≈ Ko = 1 – sin φ′
Infisso a scarso spostamento	da ≈ Ko a 1.4Ko = 1.4(1 – sin φ′)
Infisso ad elevato spostamento	da ≈ Ko a 1.8Ko = 1.8(1 – sin φ′)

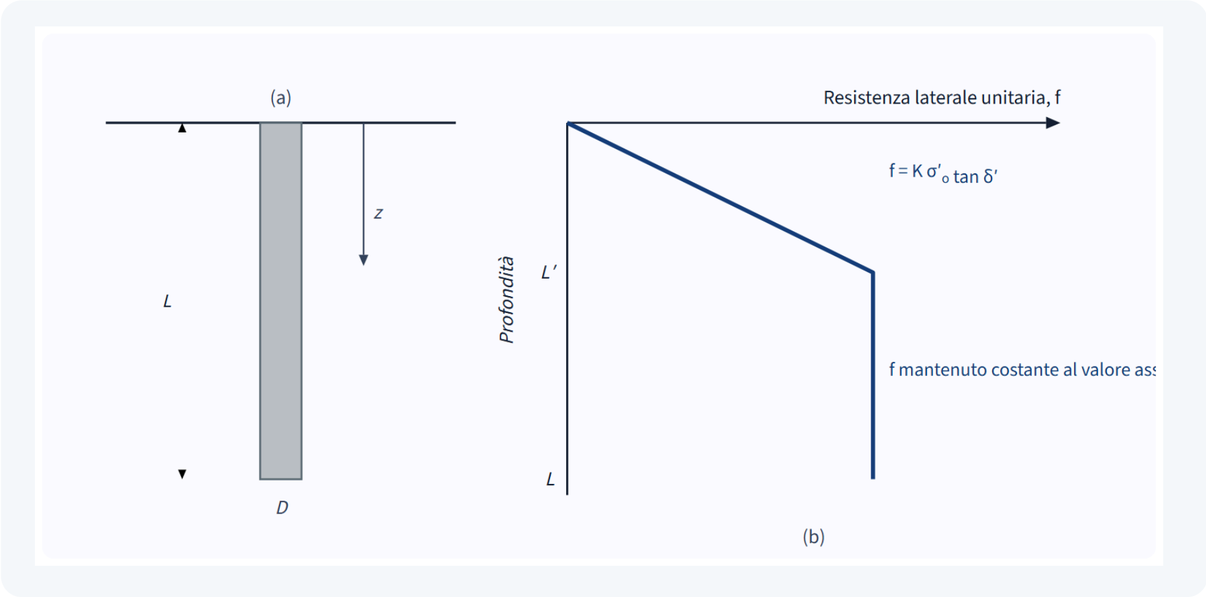
L'**infissione** compatta la sabbia circostante (fino a circa 2.5D)

Il palo ad alto spostamento mobilità più attrito laterale di quello a basso spostamento

I pali **trivellati/jet** danno un attrito inferiore rispetto ai pali infissi

Profondità critica: perché l'attrito non aumenta?

TEORIA



L'attrito misurato non cresce con la profondità **all'infinito** come la tensione efficace; aumenta fino a una **profondità critica** approssimata, poi resta costante.

$$L' \approx 15\,D$$

La spiegazione usuale è l'**effetto arco**: la sabbia non trasferisce al palo, attorno al fusto, l'intera tensione di copertura. Il modulo mantiene la tensione efficace al di sotto di L′ **al valore che essa ha alla profondità L′**; l'attrito unitario resta costante fino alla punta.

> Per L′ la fonte indica 15D – 20D; valore cautelativo **15D**

Traccia

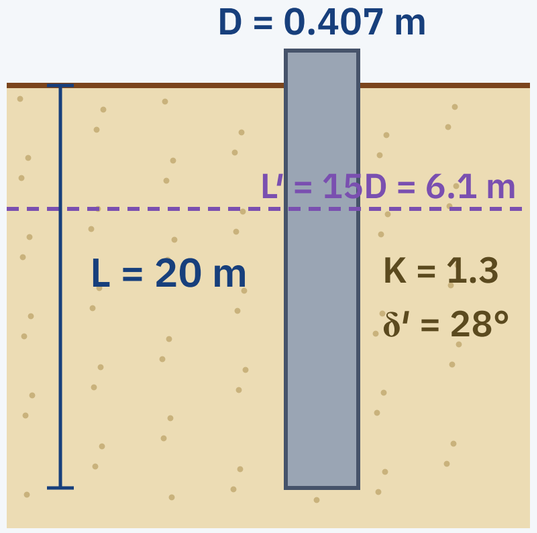
ESEMPIO

Dati

Palo e sabbia	**Come nell'Esempio 2: L = 20 m, D = 0.407 m, γ = 18 kN/m³**
Perimetro	$p = 4D = 4(0.407) = 1.628\ \text{m}$
Coefficienti	$K = 1.3$ **(palo infisso ad alto spostamento),** $\delta' = 28°$ $(\approx 0.8\varphi')$

RICHIESTO

Tenendo conto della profondità critica (L′ = 15D), determinare l'**attrito laterale** Q_s del palo.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Profondità critica e tensione a quella profondità

$$L' = 15D = 15(0.407) = \mathbf{6.105}\ \text{m} \qquad \sigma'(L') = 18(6.105) = 109.9\ \text{kPa}$$

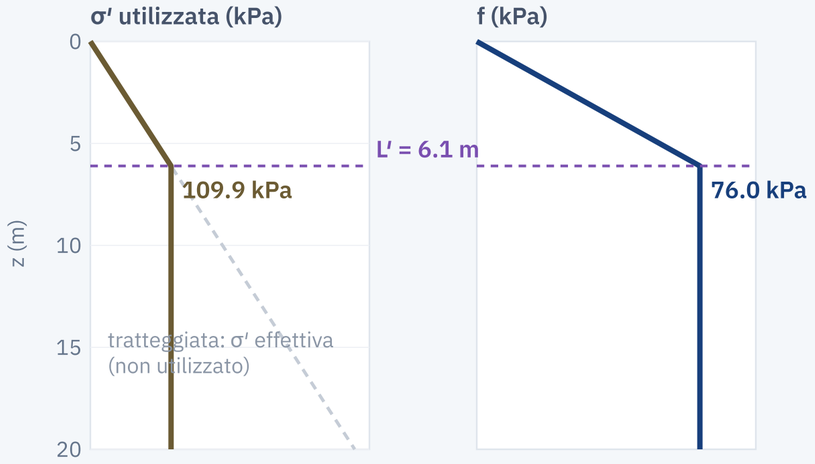
2 L′ e attrito laterale unitario all'estremità (costante al di sotto di L′)

$$f_{L'} = K\,\sigma'(L')\tan\delta' = 1.3(109.9)\tan 28^\circ = \mathbf{76.0}\ \text{kPa}$$

3 Q_s: area del triangolo (0 – L′) + del rettangolo (L′ – L) × perimetro

$$Q_s = p\left[\tfrac{1}{2} f_{L'} L' + f_{L'}(L - L')\right]$$
$$= 1.628\left[\tfrac{1}{2}(76.0)(6.10) + (76.0)(13.89)\right]$$

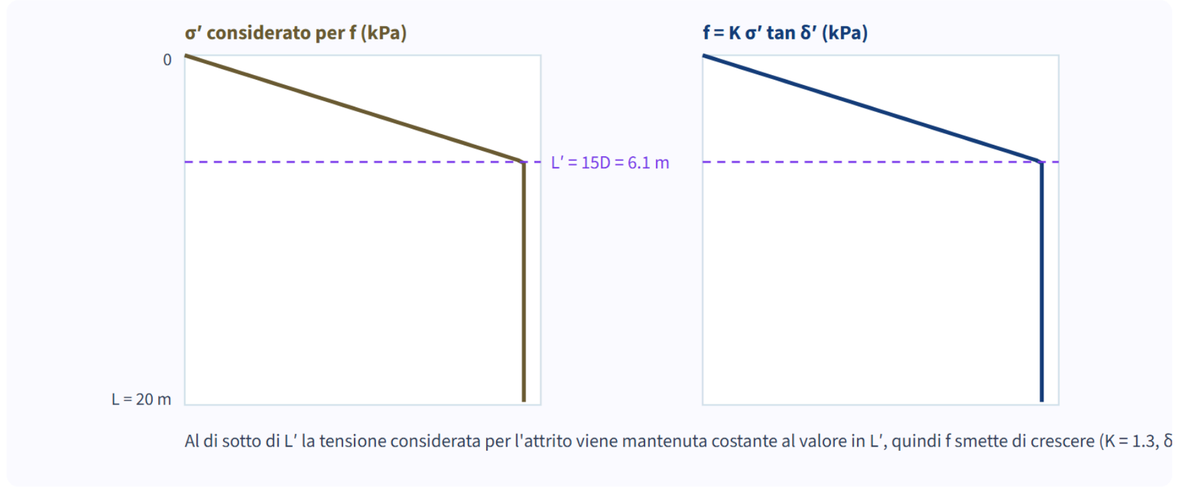
Q_S = 1,628 [231.9 + 1,055.4] = **2,096 kN**.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Che cosa accade se si trascura la profondità critica?

TEORIA



Calcoliamo lo stesso palo **senza considerare L′**, assumendo che la tensione aumenti linearmente fino alla punta:

$$f_L = 1.3(360)\tan 28^\circ = 248.8\ \text{kPa}$$
$$Q_s = p\,\tfrac{1}{2} f_L L = 4{,}051\ \text{kN}$$

2,096 kN invece di **4,051 kN**: circa **93% in eccesso**. Trascurare la profondità critica in un palo lungo produce un errore rilevante a sfavore della sicurezza.

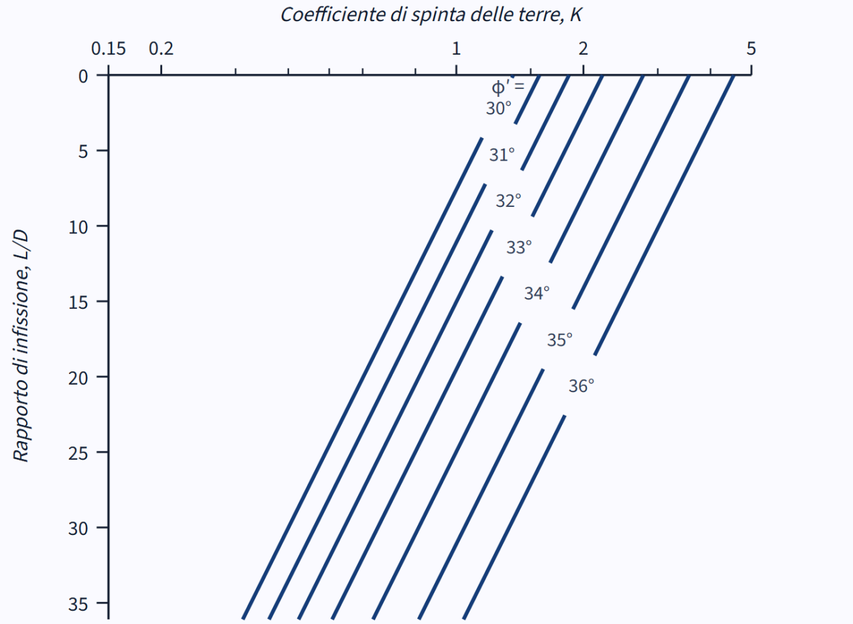
Coyle e Castello: con un'unica tensione media

TEORIA

Coyle e Castello proposero di calcolare l'attrito laterale **in un unico passaggio mediante la tensione efficace media lungo la lunghezza infissa**:

$$Q_s = f_{av}\, p\, L = (K\, \bar{\sigma}'_o \tan\delta')\, p\, L$$
$$\delta' = 0.8\varphi'$$

K è determinato sperimentalmente e si legge dall'abaco (a lato) in funzione di **L/D** e di φ′.



Non esiste una profondità critica separata: la mediata assolve a questo compito

Pertanto i due metodi perimetrali possono dare **notevoli differenze per pali lunghi**

Traccia

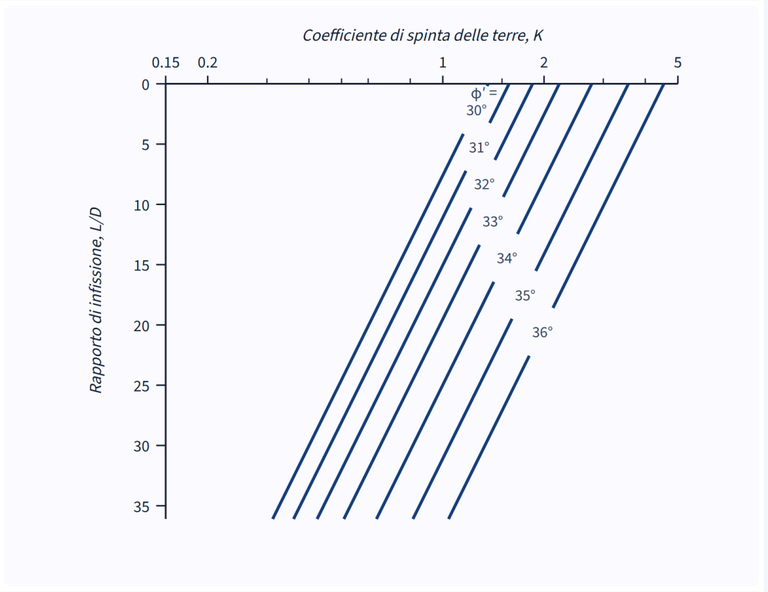
ESEMPIO

Dati

Palo e sabbia	**Come nell'Esempio 2: L = 20 m, D = 0.407 m, φ′ = 35°, γ = 18 kN/m³**
Coefficiente	$K \approx 0.41$ **(Figura 10; l'abaco è tracciato fino a L/D = 36, per L/D ≈ 49 la curva si legge per estrapolazione; inserire questo valore nella casella K del modulo, il modulo inserisce 0.48 dalla propria lettura dell'abaco)**
Angolo di attrito	$\delta' = 0.8\varphi' = 0.8(35^\circ) = 28^\circ$

RICHIESTO

Con il metodo di **Coyle e Castello (1981)**, determinare l'**attrito laterale** Q_s del palo.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Tensione efficace media lungo il fusto (sabbia omogenea, senza falda freatica)

$$\bar{\sigma}'_o = \frac{\gamma L}{2} = \frac{18(20)}{2} = \mathbf{180}\ \text{kPa}$$

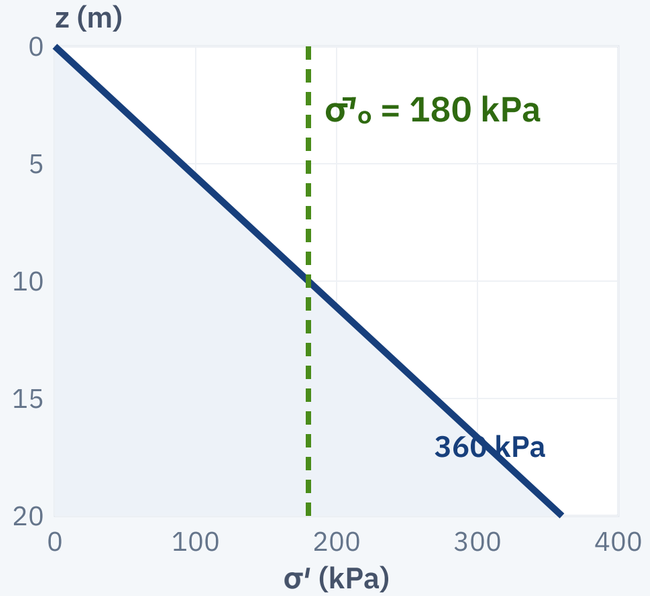
2 Attrito laterale unitario medio

$$f_{av} = K\,\bar{\sigma}'_o \tan\delta' = 0.41(180)\tan 28^\circ = \mathbf{39.2}\ \text{kPa}$$

3 Attrito laterale

$$Q_s = f_{av}\,p\,L = 39.2(1.628)(20) = \mathbf{1{,}278}\ \text{kN}$$

Il metodo K–δ′ (con L′) fornisce **2,096 kN**, Coyle–Castello **1,278 kN**: per questo palo lungo tra i due vi è una differenza di circa il 64%.



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**

Si sceglie l'estremo superiore se il terreno è noto solo da pochi sondaggi oppure se la capacità è sostenuta prevalentemente dalla **punta**

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

Traccia

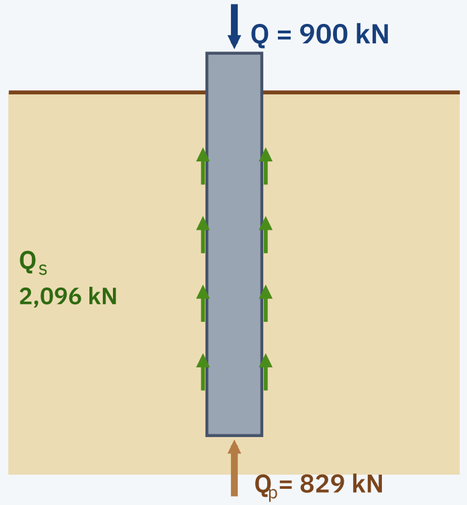
ESEMPIO

Dati

Resistenza alla punta	Q_p = 829 kN (Meyerhof, Esempio 2)
Attrito laterale	Q_s = 2,096 kN (K–δ′, Esempio 5)
Fattore di sicurezza	FS = 3
Carico di esercizio sul palo	Q = 900 kN

RICHIESTO

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



Soluzione

SOLUZIONE

1 Carico limite unitario

$$Q_u = Q_p + Q_s = 829 + 2{,}096 = \mathbf{2{,}925}\ \text{kN}$$

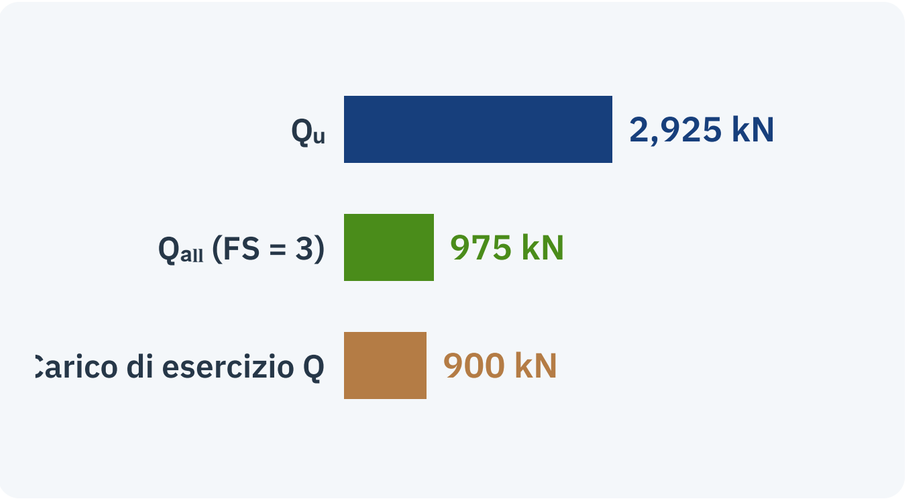
2 Capacità portante ammissibile

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{2{,}925}{3} = \mathbf{975}\ \text{kN}$$

3 Verifica

$$Q = 900\ \text{kN} \ \leq\ Q_{all} = 975\ \text{kN} \quad \Rightarrow \quad \text{sufficiente}$$

Rapporto di utilizzo Q / Q_{all} = 900 / 975 = **0.92**.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Lo stesso palo: Q_u e Q_{all} (FS = 3)

TEORIA

Q_u · Q_{all} (kN)

	Q_s: K–δ′ (con L′) **2,096 kN**	Q_s: Coyle–Castello **1,278 kN**
Q_p: **Meyerhof** 829 kN	2,925 · **975**	2,107 · **702**
Q_p: **Vesic** 1,721 kN	3,817 · **1,272**	2,999 · **1,000**
Q_p: **Coyle–Castello** 2,028 kN	4,123 · **1,374**	3,305 · **1,102**

Per un palo di venti metri due metodi per la resistenza laterale e tre per la resistenza alla punta forniscono sei diversi valori di Q_u: **2,107 – 4,123 kN**. La scelta della combinazione è una **decisione ingegneristica**.

Interpretare l'intervallo, non affidarsi a un unico valore

L'attrito laterale costituisce la maggior parte del totale: la scelta della **profondità critica** è determinante

Verificare, se possibile, con una **prova di carico su palo**

Sintesi

Punti chiave

$Q_u = Q_p + Q_s$; nella sabbia entrambe le componenti dipendono dalla **tensione efficace**

Meyerhof: N^*_q da φ', q_p limitato ($q_l = 0.5 p_a N^*_q \tan\varphi'$)

Vesic: $\sigma'_o N^*_\sigma$; si tiene conto della rigidezza della sabbia (m, I_{rr})

Coyle e Castello: $N^*_q(\varphi', L/D)$ e $K(\varphi', L/D)$ interpolati su capacità misurate

Attrito laterale: $f = K\sigma'\tan\delta'$, costante al di sotto di $\mathbf{L' \approx 15D}$

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

Bibliografia

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

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.

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.

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