

PALI TRIVELLATI IN TERRENO INCOERENTE

1.0 CALCOLO DELLA PORTATA DEI PALI

Per il calcolo della lunghezza dei pali si valutano separatamente la portata per attrito lungo il fusto e la portata alla punta, in corrispondenza della base del palo.

Il coefficiente globale di sicurezza prescritto dalla Normativa in vigore deve avere un valore minimo pari a 2.5.

a) Calcolo portata laterale

La portata laterale è valutata in base alla pressione litostatica lungo il fusto del palo moltiplicata per il coefficiente di attrito tra il palo e il terreno; considerando un tratto di palo di profondità L, in terreno omogeneo, la resistenza unitaria tangenziale risulta :

$$s = \gamma \times K \times f \quad \text{dove:}$$

γ = peso specifico del terreno

K = coefficiente di spinta

f = coefficiente di attrito palo-terreno ($\tan \delta$)

Il valore di K può assumere valori diversi, a seconda degli autori e dei coefficienti di sicurezza adottati:

- 1) $K_a = \tan(45^\circ - \varphi/2)$ = coefficiente di spinta attiva : è certamente il valore più cautelativo, ma fornisce valori di portata troppo bassi rispetto ai risultati sperimentali.
- 2) $K_o = 1 - \sin \varphi$ = coefficiente di quiete: è il valore più ragionevole e di uso più comune.
- 3) $K_p = 1 + \sin \varphi / 1 - \sin \varphi$ = coefficiente di spinta passiva : fornisce i valori di portata più elevati, ma non realistici, specialmente per valori medi e grandi di φ .
- 4) $K_i = 1$ si considera la spinta idrostatica del conglomerato fluido contro le pareti del foro nel terreno (Mayer).

I valori del coefficiente K sono riassunti nella seguente tabella:

φ	K_a	K_o	K_p	K_i
45°	0.171	0.293	5.84	1.00
35°	0.271	0.426	3.69	1.00
25°	0.406	0.577	2.46	1.00
15°	0.589	0.741	1.69	1.00

E' evidente la diversità tra K_a e K_p , soprattutto in corrispondenza dei valori più elevati dell'angolo di attrito interno φ .

Anche il coefficiente f è funzione di φ , in quanto δ è in genere valutato $0.5 \div 0.8 \varphi$, con un valore medio pari a $2/3 \varphi$; nella seguente tabella si riportano i valori di f per $\delta = 2/3 \varphi$

φ	$\delta = \tan (2/3 \varphi)$
45°	0.577
35°	0.431
25°	0.299
15°	0.176

E' interessante osservare che il prodotto $K_x f$ varia in modo meno accentuato rispetto ai singoli fattori, in quanto al crescere di φ , i valori di δ aumentano e quelli di K_a e K_o diminuiscono;

nella seguente tabella sono raccolti i valori del prodotto $K_x f$ al variare di φ .

φ	$K_x f$	$K_o f$	$K_i f$
45°	0.098	0.169	0.577
35°	0.117	0.184	0.431
25°	0.122	0.173	0.299
15°	0.104	0.131	0.176

Si nota che le variazioni di $K_x f$ e di $K_o f$ al variare di φ sono molto contenute, mentre il valore di $K_i f$ assume rapidamente valori molto elevati per $\varphi > 25^\circ$; tali valori vanno valutati con estrema cautela, in quanto possono portare ad una stima poco realistica della portata.

Sulla base delle considerazioni sopra riportate, la portata laterale del palo può essere valutata con la relazione:

$$P_{a \text{ ult}} = \pi \times D \times L \times \gamma \times K_x f \times L/2 \quad \text{ovvero}$$

$$P_{a \text{ ult}} = \pi \times D \times \gamma \times K_x \tan \delta \times L^2/2 ,$$

dove $\gamma \times K_x f \times L/2 =$ tensione media di aderenza lungo il palo, variabile tra 0.084 per $L = \text{m. } 6.00$ e 0.279 per $L = \text{m. } 20.00$

b) Calcolo portata alla punta

la portata alla punta si calcola in genere con la formula di Terzaghi-Meyerhof o formule da essa derivate, da cui:

$$P_{b \text{ ult}} = \pi \times D^2 / 4 \times (\gamma \times L \times N_q + 0.6 \times \gamma \times D \times N_\gamma / 2 + 1.3 \times C \times N_c)$$

Dove N_q , N_y e N_c sono i coefficienti di portata deducibili dal grafico di Terzaghi o ricavabili dalle relazioni di Meyerhof.

Se si vogliono limitare i cedimenti si possono usare i coefficienti critici N'_q , N'_y e N'_c , sempre indicati da Terzaghi e Meyerhof, che risultano sensibilmente minori di quelli normali; secondo alcuni Autori, in questo caso si può adottare per la portata alla punta un coefficiente di sicurezza minore di 2.5.

Un altro criterio per valutare la resistenza alla punta la valutazione del carico critico del terreno con la formula di Frohlich; il carico critico è quello corrispondente all'inizio della plasticizzazione del terreno al di sotto del palo, e può essere considerato come un carico di sicurezza.

$$P_{crit} = \pi \times \gamma \times h / \cot \varphi - (\pi/2 - \varphi)$$

Utilizzando il carico critico si può adottare un coefficiente di sicurezza pari a 1.00

c) Calcolo portata totale

Per il calcolo della portata totale dei pali, al limite ultimo o in fase di esercizio, possono essere usate le seguenti relazioni:

$$\text{Portata limite} \quad P_{tot \text{ ult}} = P_{a \text{ ult}} + P_{b \text{ ult}}$$

$$\text{Portata di esercizio} \quad P_e = (P_{a \text{ ult}} + P_{b \text{ ult}}) / 2.5$$

Volendo calibrare in modo più raffinato il coefficiente di sicurezza, distinguendo tra portata laterale e portata alla punta, si può scrivere:

$$\text{Portata esercizio} \quad P_e = P_{a \text{ ult}} / \eta_1 + P_{b \text{ ult}} / \eta_2 \quad \text{dove:}$$

$$\eta_1 = 2.5 \div 3.0$$

$$\eta_2 = 3.0 \div 4.0 \quad \text{se } P_{b \text{ ult}} \text{ è calcolato con i coefficienti } N_q, N_y \text{ e } N_c$$

$$\eta_2 = 2.0 \div 2.5 \quad \text{se } P_{b \text{ ult}} \text{ è calcolato con i coefficienti } N'_q, N'_y \text{ e } N'_c$$

$$\eta_2 = 1.00 \quad \text{se } P_{b \text{ ult}} \text{ è calcolato con la formula di Frohlich}$$

Come già accennato, è opportuno che, per garanzia contro cedimenti eccessivi, la portata laterale ultima risulti sempre maggiore del massimo carico normale di esercizio

I pali in gruppo vanno collegati da plinti massicci che distribuiscono il carico del pilastro sui vari pali, e sono verificati col metodo del "traliccio spaziale" e a punzonamento nel loro insieme, e a flessione e a taglio per quanto riguarda le verifiche locali all'attacco dei pali.

I plinti vanno collegati tra loro da un robusto graticcio di travi, di altezza tale da assorbire agevolmente i momenti alla base dei pilastri e le eventuali eccentricità dei pali

rispetto alla loro posizione di progetto.

d) Esempio di calcolo della portata di un palo tipo (L=25 m.)

Viene riportato il calcolo di un palo singolo della lunghezza di 25 metri: il terreno in cui è realizzato il palo ha le seguenti caratteristiche geotecniche:

Angolo di attrito $\phi = 17^\circ \div 19^\circ$
Coesione $c = 2.0 \div 1.0 \text{ t/m}^2$
Peso specifico $\gamma = 2.09 \div 2.14 \text{ t/m}^3$

Il palo viene dimensionato con un diametro di 50 cm

Portata laterale

$$P_{a \text{ ult}} = \pi \times D \times L \times \gamma \times K \times f \times L/2$$

$$P_{a \text{ ult}} = \pi \times 0.50 \times 25 \times 0.7076 \times 0.2004 \times 12.5 = 145.19$$

Portata alla punta (con i coefficienti $N'q$, $N'\gamma$ e $N'c$)

$$P_{b \text{ ult}} = \pi \times D^2 / 4 \times (\gamma \times L \times Nq + 0.6 \times \gamma \times D \times N\gamma / 2 + 1.3 \times C \times Nc)$$

$$P_{b \text{ ult}} = \pi \times 0.5^2 / 4 \times (2.09 \times 25 \times 2.84 + 0.6 \times 2.09 \times 0.5 \times 0.53 / 2 + 1.3 \times 1 \times 9.05) = 31.47$$

$$\text{Portata totale limite} = 145.19 + 31.47 = \mathbf{176.66 \text{ t}}$$

$$\text{Portata di esercizio} = 176.66 / 2.5 = \mathbf{70.66 \text{ t}}$$

La portata utile è sufficiente per un carico utile di 50 t, considerando anche il peso proprio del palo ed il coefficiente di riduzione per pali in gruppo.