

7. Pali

I **pali** sono elementi strutturali utilizzati nelle opere di fondazione, nelle opere di contenimento della terra e dell'acqua, negli interventi di miglioramento della stabilità dei pendii e delle scarpate.

Anche se le tecniche costruttive sono molto varie, dal punto di vista esecutivo i pali possono essere classificati in due grandi famiglie: *pali infissi* e *pali trivellati*.

I **pali infissi** sono installati *senza preventiva asportazione di terreno*, mediante battitura, vibrazione, spinta, avviticciamento o una combinazione dei metodi precedenti. Possono essere prefabbricati (in legno, acciaio o CA); per favorire la penetrazione, può essere assegnata al palo una forma leggermente affusolata. Possono anche essere gettati in opera (in cemento armato); la formazione del foro avviene per infissione di un tubo chiuso inferiormente, in genere recuperato dopo avere eliminato la punta; successivamente si procede alla posa in opera della gabbia di armatura (► FIGURA 1) e al getto del calcestruzzo.

I **pali trivellati**, sempre gettati in opera, sono installati *con preventiva asportazione di terreno*. La formazione del foro può avvenire per perforazione (► FIGURA 2) o per scavo con particolari benne mordenti a sezione circolare; successivamente si procede, come nei pali infissi, alla posa in opera delle armature e al getto del calcestruzzo. Durante la formazione del foro la stabilità delle pareti è assicurata da un rivestimento metallico provvisorio o, se necessario, da fanghi bentonitici (v. unità C2, volume 1).

La messa in opera dei pali infissi, avvenendo senza asportazione di materiale, provoca il costipamento del terreno circostante, migliorando le sue caratteristi-



FIGURA 1 La sezione del palo è di solito circolare; l'armatura, costituita da barre longitudinali e staffe, è simile a quella dei pilastri cerchiati in elevazione (v. unità D2).

FIGURA 2 Trivella di perforazione per la gettata di pali trivellati.



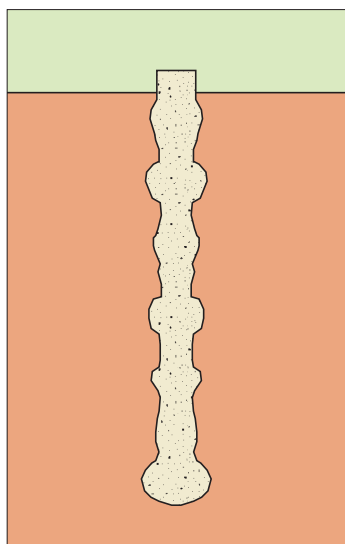


FIGURA 3 Palo infisso gettato in opera.

che fisiche e meccaniche. Viceversa, le vibrazioni trasmesse dai colpi di maglio possono danneggiare le costruzioni vicine e provocare inquinamento acustico.

I pali in opera destinati alle fondazioni profonde, descritte nel paragrafo successivo, possono incrementare la capacità portante mediante allargamenti della base e del fusto, che conferiscono al palo la tipica forma *a bulbo* (► FIGURA 3). Nei pali infissi gli allargamenti possono essere ottenuti ritirando il tubo per tratti e costipando ogni volta energicamente il calcestruzzo, che deborda nel terreno circostante. Nei pali trivellati allo stesso scopo si può calare nel foro un apposito utensile rotante che, divaricato per azione meccanica o idraulica, allarga la sezione della cavità.

Nel caso di terreni porosi o fessurati si possono iniettare miscele cementizie, schiume o resine attraverso tubi predisposti sulla superficie esterna della gabbia di armatura, con l'effetto di costipare il terreno prossimo alla base e al fusto del palo, migliorandone la capacità portante.

Un'altra classificazione, basata sulle dimensioni, distingue tra:

- *pali di grande diametro* ($\phi > 700$ mm); generalmente trivellati, raggiungono lunghezze di circa 60 m;
- *pali di medio diametro* ($300 \text{ mm} < \phi < 700$ mm); raggiungono lunghezze di circa 25 m;
- *pali di piccolo diametro o micropali* ($80 \text{ mm} < \phi < 300$ mm); raggiungono lunghezze di $15 \div 20$ m; i micropali trivellati hanno diametro inferiore a 300 mm; i micropali infissi hanno diametro inferiore a 150 mm.

I micropali sono spesso realizzati con tecnologie speciali, coperte da brevetto. L'armatura può essere costituita da un tubo, da un profilato di acciaio o da una gabbia di barre; il materiale di riempimento può essere costituito da miscela cementizia o malta cementizia o betoncino.

Capaci di operare anche con inclinazioni elevate rispetto alla verticale, i micropali sono impiegati per costruire fondazioni profonde, per consolidare o riparare fondazioni esistenti, per migliorare i terreni prima dell'esecuzione di fondazioni dirette, per conferire stabilità a pendii e scarpate, per realizzare ancoraggi di paratie. Un'applicazione particolare e molto diffusa consiste nella realizzazione di paratie (dette *berlinesi*), che consentono di realizzare scavi di sbancamento anche in prossimità di altri edifici (v. unità C1, volume 3).

■ Portanza limite del palo isolato

Il carico (o *portanza*) limite di un palo di fondazione è in genere definito in base alla sola resistenza, perché gli strati profondi del terreno sono molto meno sensibili degli strati superficiali a deformazioni e a cedimenti.

Risultati davvero attendibili sul valore della portanza si possono ottenere soltanto mediante prove sperimentali, eseguite con apposite apparecchiature su *pali di prova*, perché il carico limite dei pali (e dei micropali in particolare) dipende in modo marcato dalle tecnologie esecutive. I valori derivati per elaborazioni dei risultati delle prove penetrometriche sono soltanto indicativi; anche le valutazioni teoriche del carico limite, una delle quali è proposta nel seguito, sono approssimate.

Si consideri un palo isolato immerso in un terreno omogeneo di grande spessore (► FIGURA 4). In prossimità della rottura del terreno le forze in gioco sono il carico Q_u (*portanza utile*) applicato alla testa del palo e, naturalmente, il peso proprio G_p del palo stesso. La risultante di questi carichi $Q_t = Q_u + G_p$, detta **portanza limite**, è equilibrata:

- dalla risultante Q_p delle pressioni normali distribuite sulla superficie della punta del palo (**portanza per punta**);
- dalla risultante Q_l delle tensioni tangenziali distribuite sulla superficie laterale (**portanza per attrito laterale**).

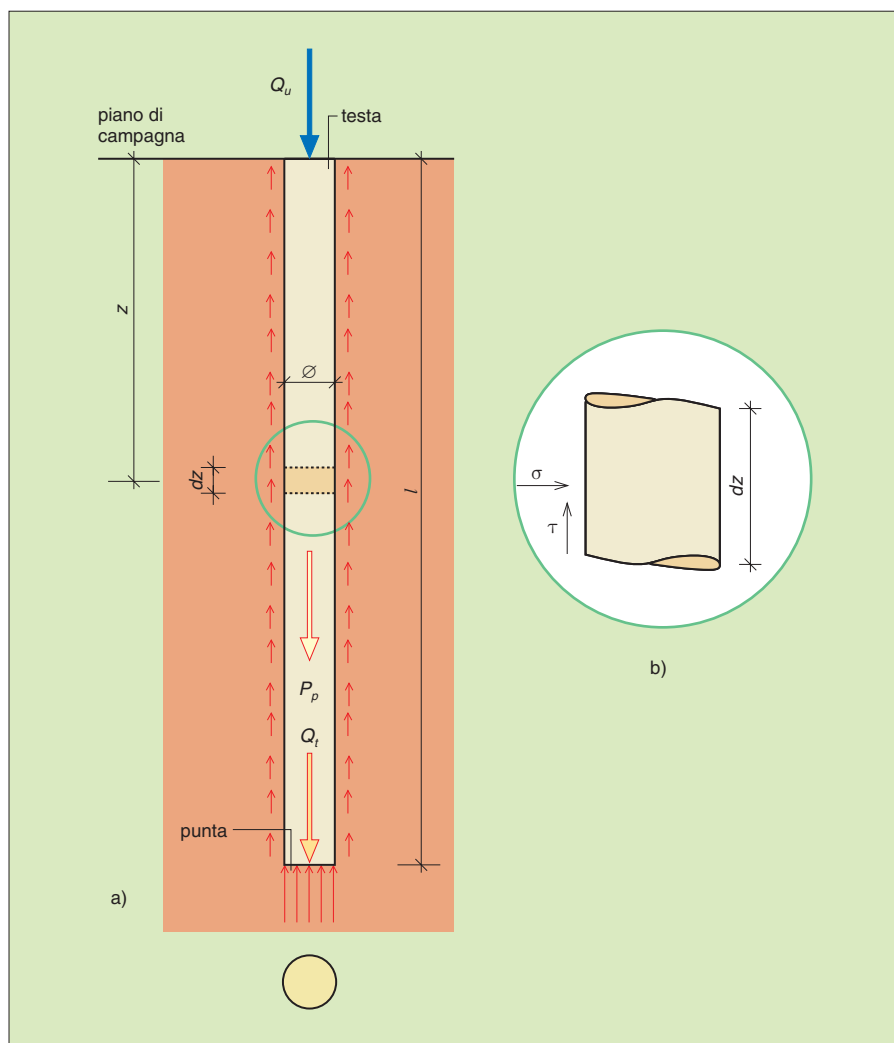


FIGURA 4 Portanza di un palo isolato: a) portanza per punta e portanza per attrito; b) portanza per attrito dell'elemento di lunghezza infinitesima.

Si ha quindi:

$$Q_t = Q_p + Q_l$$

In presenza di strati omogenei di grosso spessore prevale in genere la resistenza per attrito. Nel caso di appoggio su uno strato profondo di notevole compattezza tende a prevalere la resistenza per punta. A parità degli altri parametri, all'aumentare del diametro del palo la resistenza per punta aumenta più della resistenza per attrito.

• Portanza per punta

La portanza per punta di un palo è la risultante delle pressioni che agiscono sull'area di base del palo, che in genere raggiunge terreni di buona o discreta resistenza. Si ha quindi (► FIGURA 4a):

$$Q_p = A_p \cdot q_t$$

dove A_p è l'area della base del palo e q_t è carico limite alla base del palo, che può essere espresso con la formula di Terzaghi relativa alle fondazioni superficiali di base circolare. Si ha (► 1):

$$Q_p = A_p(1,3c N_c + \gamma_t \cdot l \cdot N_q + 0,3\gamma\phi N_g)$$

► 1 I fattori N_c , N_q funzioni dell'angolo di attrito ϕ , si ricavano come sempre dalla ► TABELLA 4 dell'unità E1.

►2 Il significato del coefficiente k si chiarirà meglio nell'unità C1 del volume 3, relativa alla spinta del terreno.

►3 Indicativamente si può considerare α variabile tra 0,5 (terreni compatti) e 0,85 (terreni molli).

o meglio, trascurando il termine $0,3\gamma\phi N\gamma$, generalmente piccolo rispetto agli altri due:

$$Q_p = A_p(1,3cN_c + \gamma_t \cdot l \cdot N_q)$$

Se il palo attraversa strati di terreno di diverse caratteristiche, occorrerà tenerne conto e scrivere:

$$Q_p = A_p(1,3cN_c + N_q \sum \gamma_{it} l_i)$$

• Portanza per attrito

È necessario distinguere tra pali immersi in terreni incoerenti e in terreni coesivi.

Terreni incoerenti. Si consideri un tratto di palo di lunghezza infinitesima dz (►FIGURA 4b). La tensione tangenziale τ può essere espressa dalla formula:

$$\tau = f \cdot k \cdot \gamma_t z$$

dove:

- $\gamma_t z$ è il peso del terreno sovrastante;
- f è il coefficiente di attrito tra palo e terreno, in genere assunto variabile tra 0,25 e 0,35;
- k è un coefficiente che dipende dall'angolo di attrito interno φ e assume valori variabili tra $\tan^2(45^\circ - \varphi/2)$ e $\tan^2(45^\circ + \varphi/2)$ (►2).

La portanza per attrito del tratto di palo di lunghezza dz si ottiene moltiplicando τ per la superficie laterale $\pi\phi dz$ e vale quindi $\pi\phi dz \cdot f \cdot k \cdot \gamma_t z$. La portanza laterale dell'intero palo si ottiene sommando gli infiniti contributi precedenti, ossia integrando tra 0 e l la portanza del tratto infinitesimo. Si ha:

$$Q_l = \pi\phi \cdot f \cdot k \cdot \gamma_t \int_0^l z dz$$

e quindi:

$$Q_l = \pi\phi \cdot f \cdot k \cdot \gamma_t \frac{l^2}{2}$$

L'espressione è nota come **formula di Dörr**.

Terreni coesivi. In questo caso le tensioni tangenziali τ dipendono prevalentemente dalla coesione non drenata c_u , secondo l'espressione $\tau = \alpha \cdot c_u$. Il coefficiente α assume, secondo i diversi autori, valori assai variabili (►3). Si ha quindi:

$$Q_l = \pi\phi \cdot l \cdot \alpha \cdot c_u$$

Se il palo attraversa strati di terreno di caratteristiche diverse, la portanza per attrito laterale risulta dalla somma delle portanze laterali relative ai vari strati.

In presenza di falda la capacità portante del terreno decresce. Si considera allora, invece del peso specifico γ_t , il **peso del volume immerso** γ' ; in mancanza di determinazioni più specifiche si può porre $\gamma' = \gamma - \gamma_w$, dove γ_w è il peso specifico dell'acqua, pari a 10 kN/m^3 .

APPLICAZIONE

Determinare la portanza utile del palo di ►FIGURA 5, ponendo $f = 0,31$, $k = 0,41$ e $\alpha = 0,5$.

Portanza per punta:

$$q_p = A_p (1,3cN_c + \sum N_{qi} \gamma_{ti} \cdot l_i) = \frac{\pi 0,6^2}{4} [(1,3 \cdot 200 \cdot 5,7 + (21 \cdot 12 + 20 \cdot 5) \cdot 1)] = 1036 \text{ kN}$$

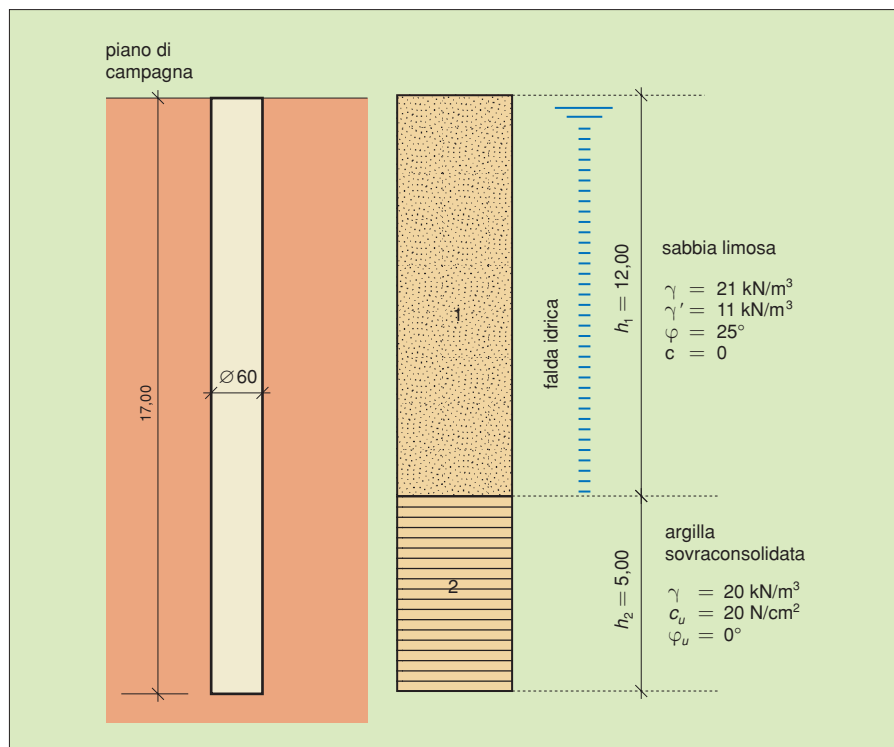


FIGURA 5 Palo che attraversa strati di terreno diverso.

Portanza per attrito del tratto 1 (terreno incoerente in presenza di falda):

$$Q_{f1} = \pi \phi \cdot f \cdot \lambda \cdot \gamma'_1 \cdot \frac{l_1^2}{2} = \pi \cdot 0,60 \cdot 0,31 \cdot 0,41 \cdot 11 \cdot \frac{12^2}{2} = 190 \text{ kN}$$

Portanza per attrito del tratto 2 (terreno coesivo):

$$Q_{f2} = \pi \phi \cdot l_2 \cdot \alpha \cdot c_u = \pi \cdot 0,60 \cdot 5 \cdot 0,5 \cdot 200 = 942 \text{ kN}$$

Portanza totale:

$$Q_t = Q_p + Q_{f1} + Q_{f2} = 1036 + 190 + 942 = 2168 \text{ kN}$$

Peso proprio del palo:

$$P = \frac{\pi \cdot 0,60^2}{4} \cdot 17 \cdot 25 = 120 \text{ kN}$$

Portanza utile:

$$Q_u = 2168 - 120 = 2048 \text{ kN}$$

■ Portanza limite della palificata

Di solito non si ha a che fare con un palo isolato, ma con un insieme di più pali che prende il nome di *palificata*. La portanza utile della palificata è inferiore alla somma delle portanze dei singoli pali $\sum_i Q_{ui}$, perché le zone di diffusione dei carichi relative a pali adiacenti interferiscono tra di loro. In sede di dimensionamento si può assumere:

- per 2 pali $Q_u = 95\% \sum_i Q_{ui}$
- per 3 pali $Q_u = 90\% \sum_i Q_{ui}$
- per 4 pali $Q_u = 85\% \sum_i Q_{ui}$
- per 5 pali $Q_u = 70\% \sum_i Q_{ui}$
- per 10 pali $Q_u = 10\% \sum_i Q_{ui}$

Il calcolo delle palificate compete in genere a studi specializzati, legati alle imprese costruttrici dei pali stessi.