

Lezione 9

GEOTECNICA

Docente: Ing. Giusy Mitaritonna

e-mail: g.mitaritonna@poliba.it

- Lezione 9 -

- A. Fondazioni su pali: requisiti di progetto
- B. Tecnologie esecutive nella realizzazione dei pali
- C. Pali battuti
- D. Pali trivellati
- E. Carico limite delle fondazioni profonde in condizioni non drenate e in condizioni drenate

9.A

Fondazioni su pali:

requisiti di progetto

- Le fondazioni su pali sono usate dall'uomo fin dalla preistoria



Graffito preistorico



Anonimo (X d.C)

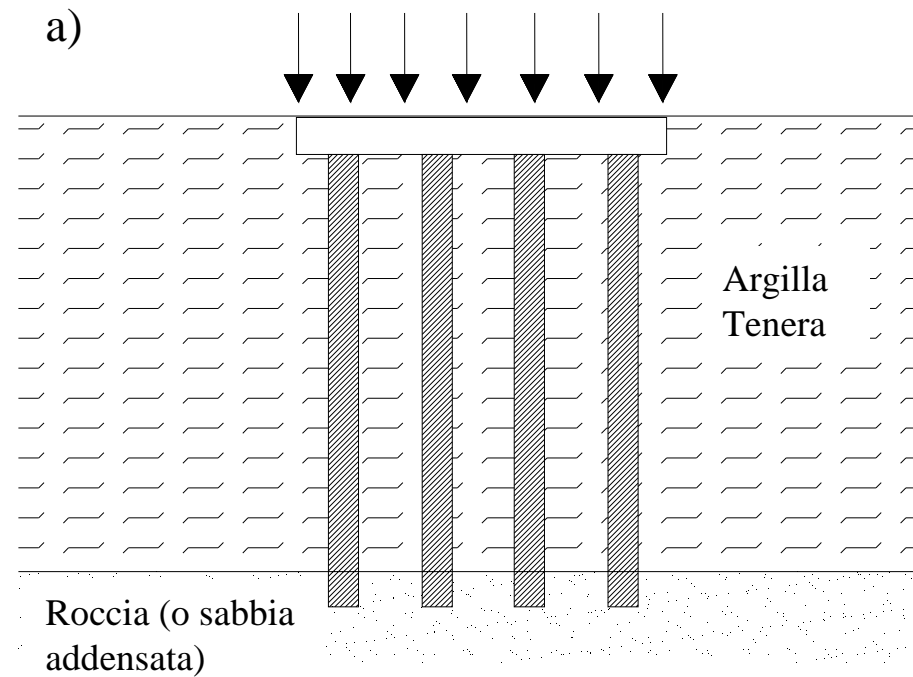


M. Heien (1712 - 1768)

- Negli ultimi decenni si sono sviluppati un gran numero di tipi di pali: dai micropali ($d = 10 \div 15$ cm, portate = $100 \div 200$ kN) ai grandi pali tubolari in acciaio delle strutture off-shore ($d = 2 \div 3$ m, portate = oltre 10 MN)
- Obiettivi da soddisfare nel progetto dei pali di fondazione:
 - 1) la fondazione deve indurre nel terreno uno stato tensionale sufficientemente lontano da quello che produce la rottura
 - 2) i cedimenti devono essere compatibili con la funzionalità della struttura

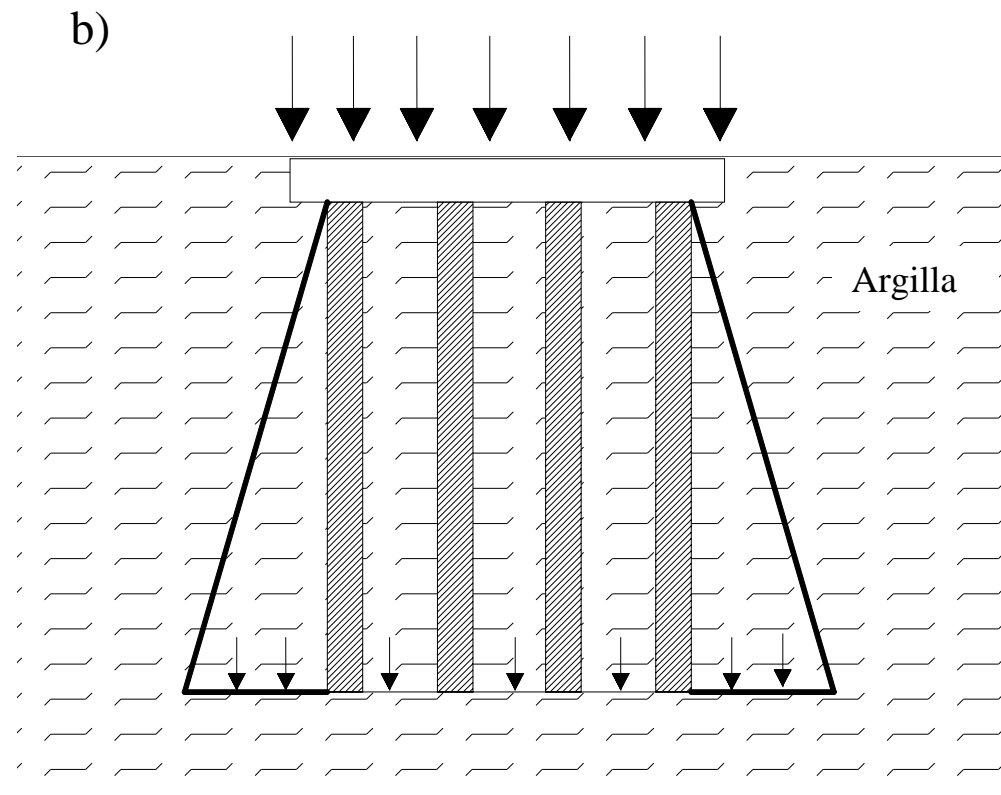
- Situazioni nelle quali può essere opportuno far ricorso ad una fondazione su pali:

(a) per trasferire i carichi a strati profondi, attraverso strati più compressibili



- Situazioni nelle quali può essere opportuno far ricorso ad una fondazione su pali:

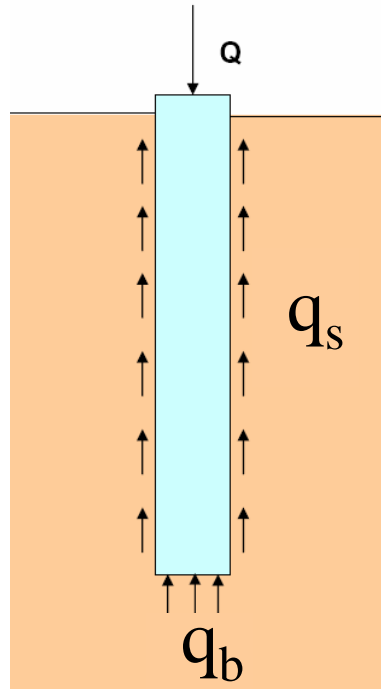
(b) per diffondere i carichi ad una profondità maggiore (anche nel caso di terreno omogeneo)



9.B

**Tecnologie esecutive nella
realizzazione dei pali**

- Un palo di fondazione trasmette il carico al terreno attraverso tensioni tangenziali sulla superficie laterale e tensioni normali alla base o punta



- Ambedue sono profondamente influenzate dal modo in cui il palo è costruito

- E' quindi evidente la grande importanza dei fattori tecnologici nel determinare il comportamento del palo stesso, a differenza di quanto avviene per le fondazioni dirette
- Classificazione dei pali in base:

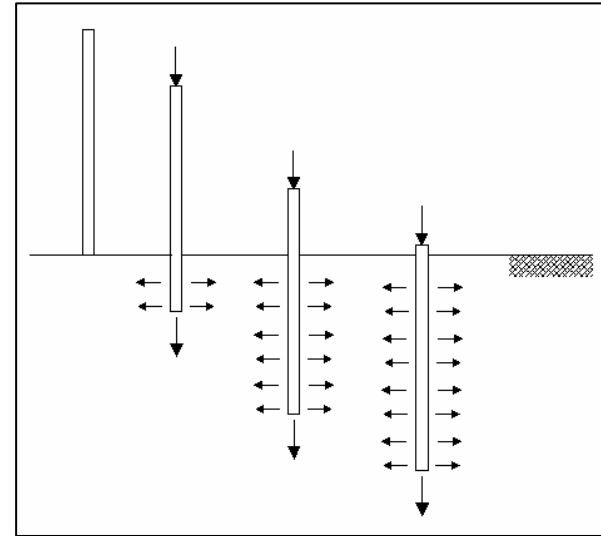
MATERIALE di cui sono costituiti (pali di legno, pali di calcestruzzo prefabbricati, pali di calcestruzzo gettato in opera, pali in acciaio),

DIMENSIONI pali di piccolo diametro $d \leq 25$ cm, pali di medio diametro $30 \text{ cm} \leq d \leq 60$ cm, pali di grande diametro $d \geq 80$ cm

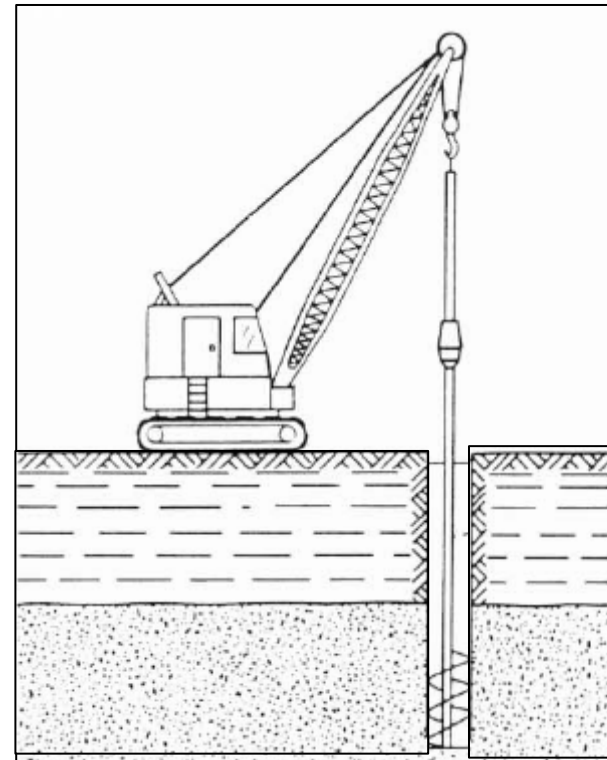
TECNOLOGIE ESECUTIVE in genere suddivisi nelle due grandi categorie di pali battuti (o infissi) e pali trivellati.

- Rispetto alle tecnologie esecutive:

(a) PALI BATTUTI: sono posti in opera senza asportazione del terreno ($d_{max} = 0.5 \text{ m}$, $L_{max} = 20 \text{ m}$)



(b) PALI TRIVELLATI: sono posti in opera con asportazione del terreno ($d_{max} = 1.2 \text{ m}$ generalmente, $L_{max} = 70 \text{ m}$)

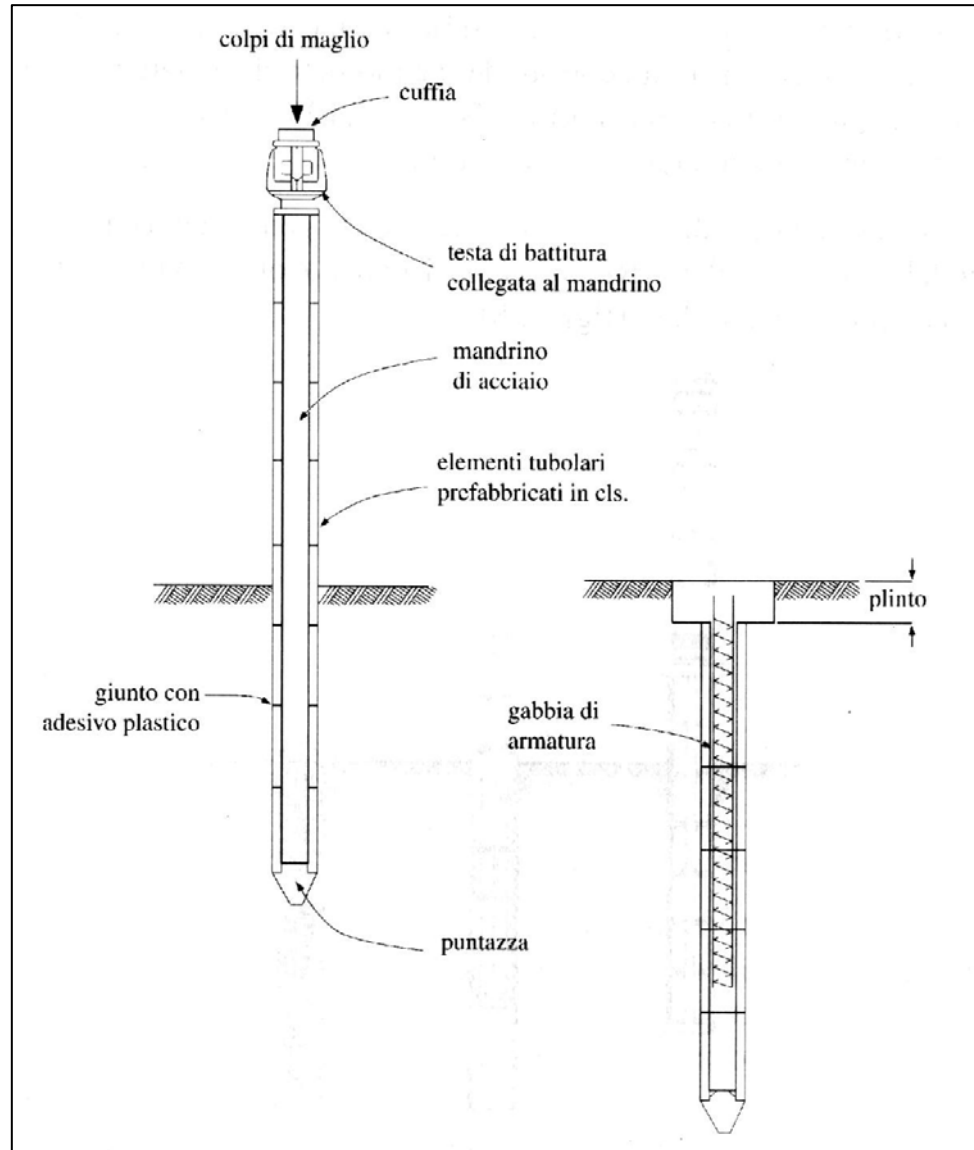


9.C

Pali battuti

- I pali battuti vengono utilizzati prevalentemente in terreni incoerenti (sabbie) in quanto la fase di battitura tende ad addensarli e si ha quindi un aumento di resistenza
- Si distinguono in:
 - (1) pali battuti prefabbricati: in legno (Scandinavia e Canada), in cemento armato, in acciaio; la lunghezza massima, di circa 14 m, è determinata dalla loro trasportabilità mediante TIR; il diametro massimo, pari a circa 50 cm, è dettato dalla resistenza a vincere la fase di battitura
 - (2) pali battuti in calcestruzzo gettato in opera: ne esistono diverse tipologie che si distinguono in relazione alle parti che restano in opera ed a quelle recuperate dopo la battitura

- Pali battuti prefabbricati:

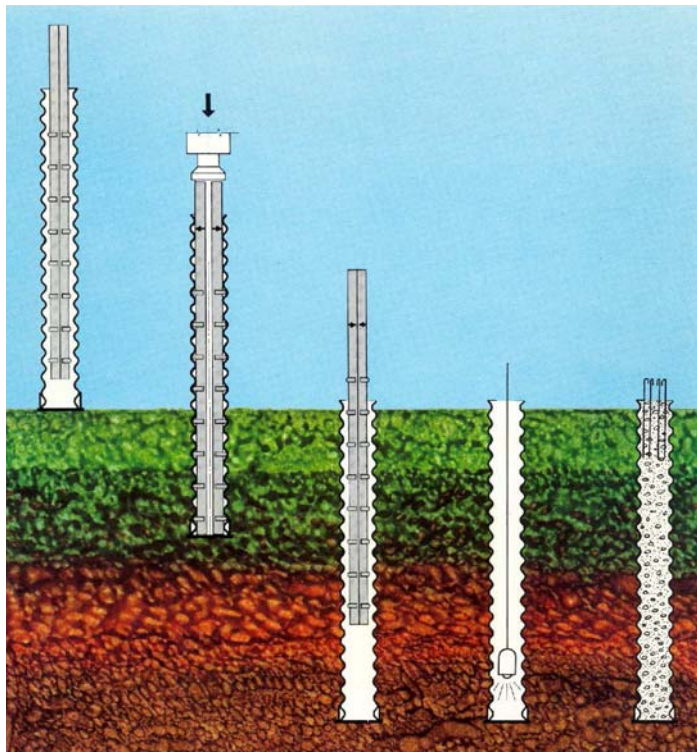


Pali di tipo WEST: sono pali battuti parzialmente prefabbricati che si ottengono infiggendo elementi tubolari in c.a. infilati su un'asta metallica (mandrino) dotata all'estremità di una puntazza in cls a perdere. Raggiunta la profondità desiderata, il mandrino viene estratto e nel foro rivestito degli elementi tubolari in c.a. viene eseguito un getto in opera, previa installazione di una gabbia di armatura

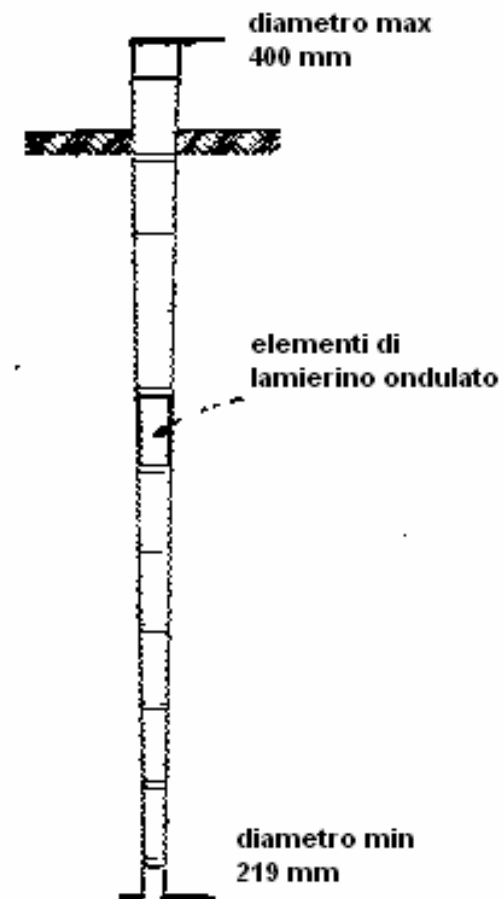
- Pali battuti in acciaio:

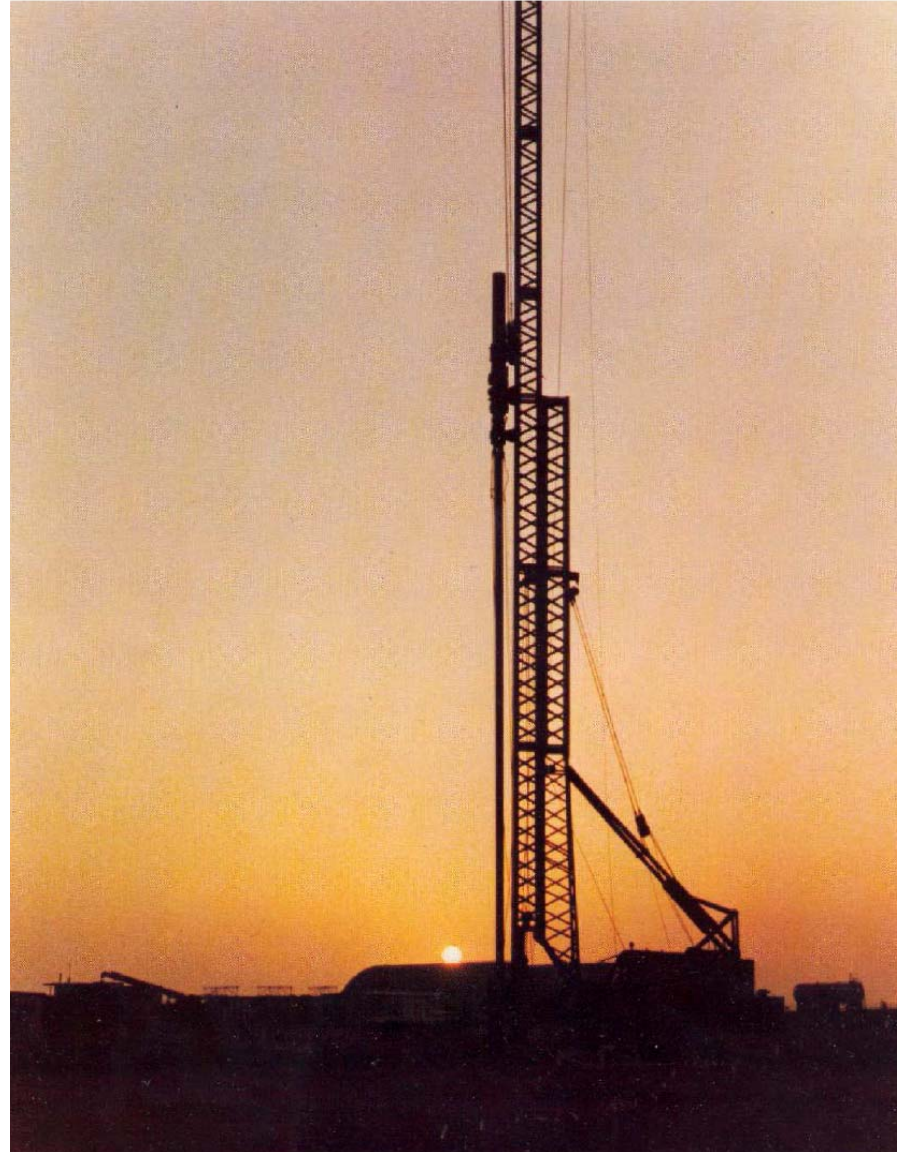
(1) pali Lacor costituiti da lamierino ondulato

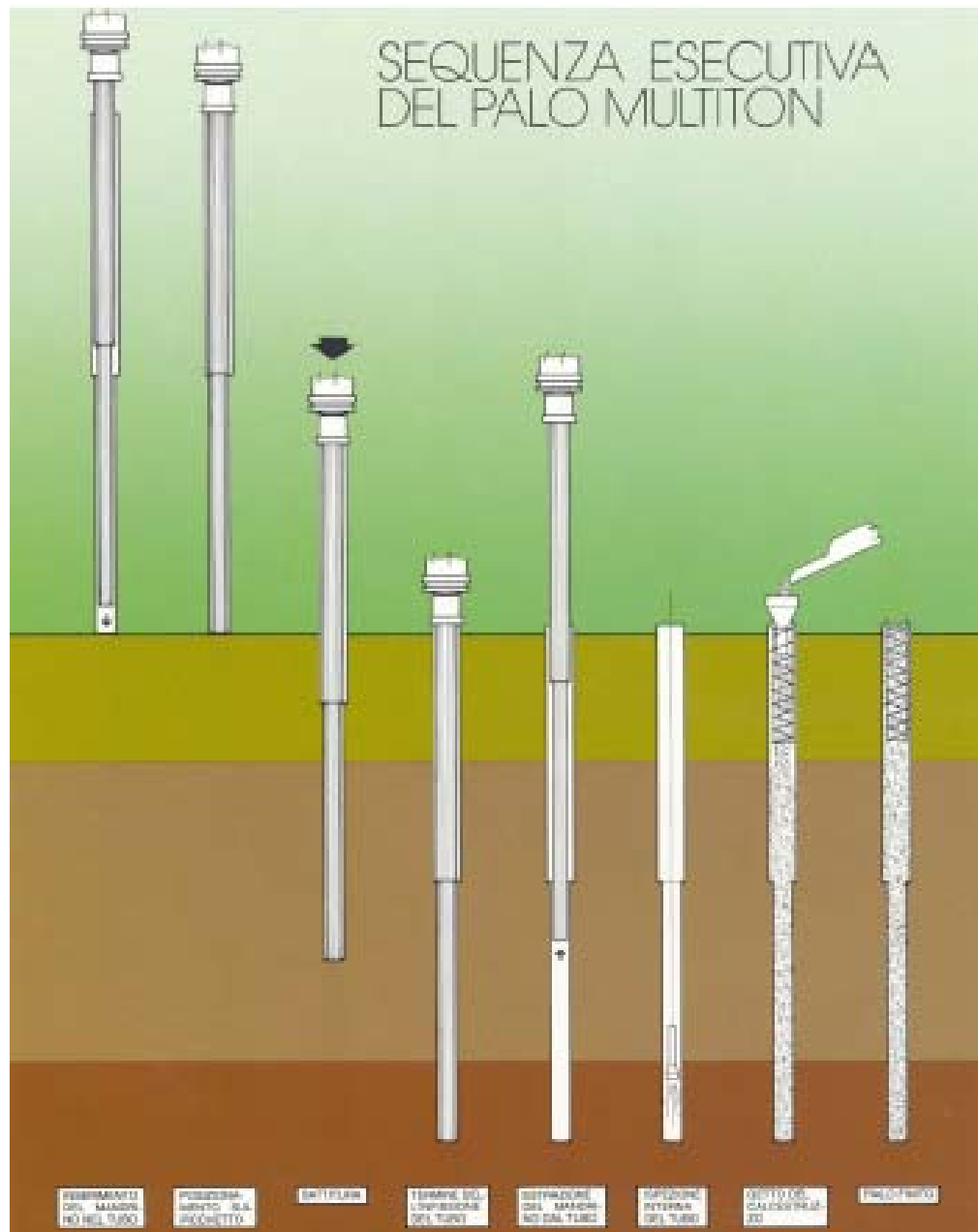
($30\text{ cm} \leq d \leq 35\text{ cm}$, $25\text{ m} \leq L \leq 30\text{ m}$)



(2) pali Raymond a diametro variabile



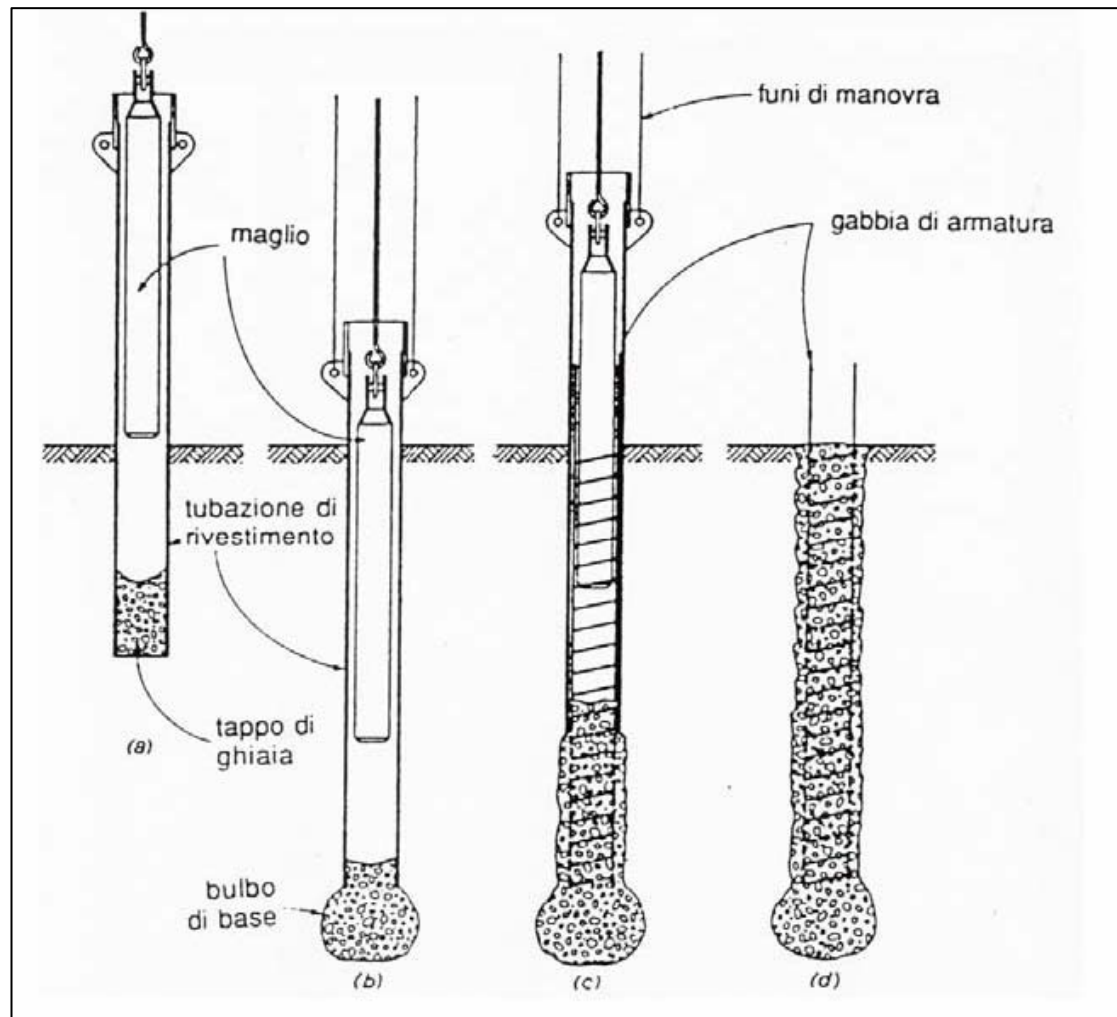




Pali di tipo MULTITON: sono pali battuti parzialmente prefabbricati costituiti da un tubo di acciaio chiuso alla base da un fondello d'acciaio. Il tubo d'acciaio viene infisso nel terreno, senza estrazione di materiale, per battitura mediante l'impiego di martelli-battipali. Il sistema di infissione viene integrato con l'uso di uno speciale MANDRINO. Esso consiste in un tubo di notevole spessore, rigidamente collegato con la testa di battuta del martello e inserito all'interno del tubo stesso prima della battitura. Il mandrino, alla fine della infissione, viene recuperato, mentre il tubo messo in opera rimane nel terreno pronto per essere riempito con il calcestruzzo, previa installazione di una gabbia di armatura.



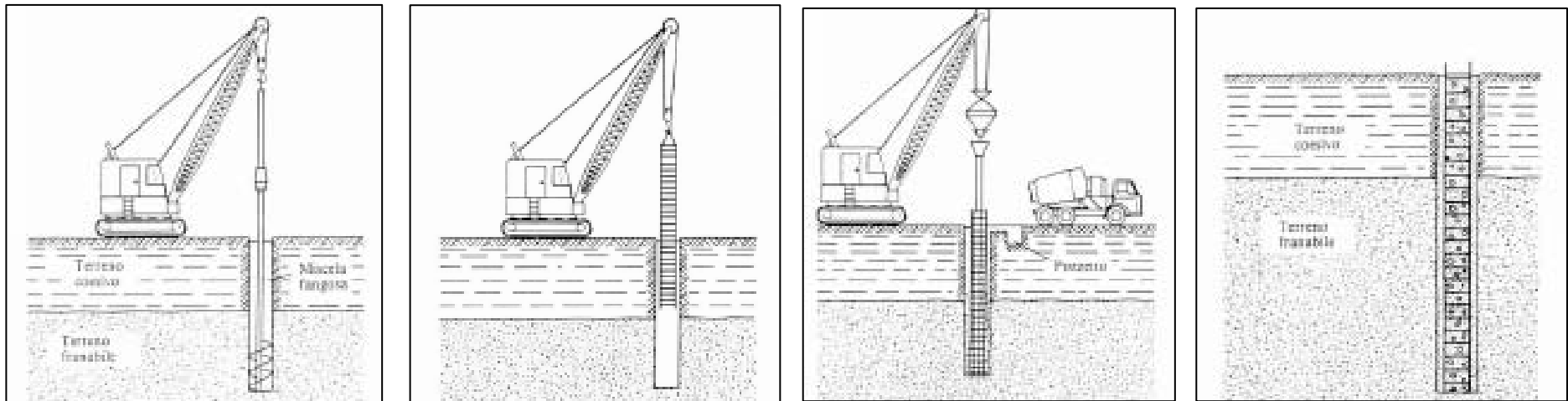
- Pali battuti in calcestruzzo gettato in opera: vengono realizzati a mezzo di un tubo forma metallico battuto, che poi viene recuperato durante o dopo il getto. Es: pali Franki



9.D

Pali trivellati

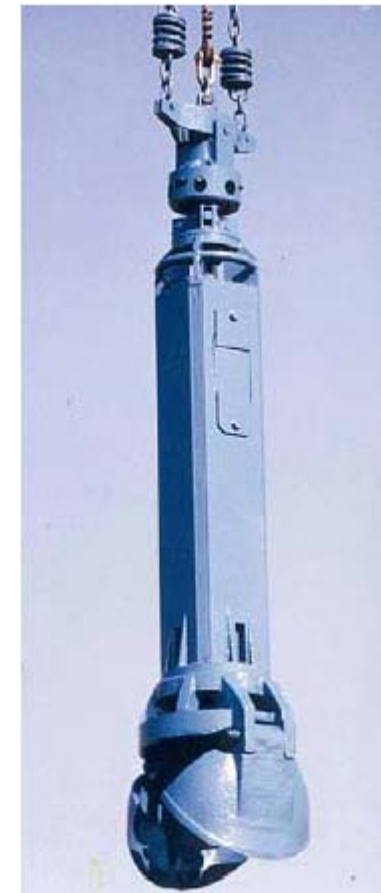
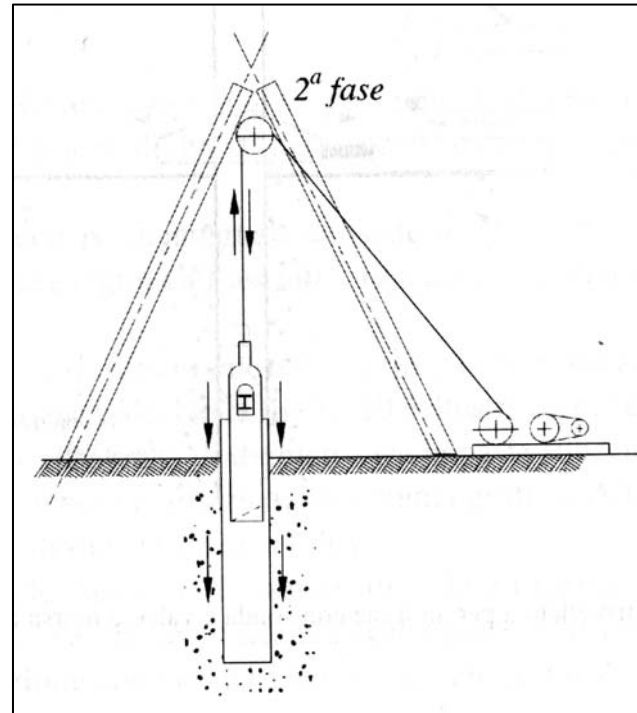
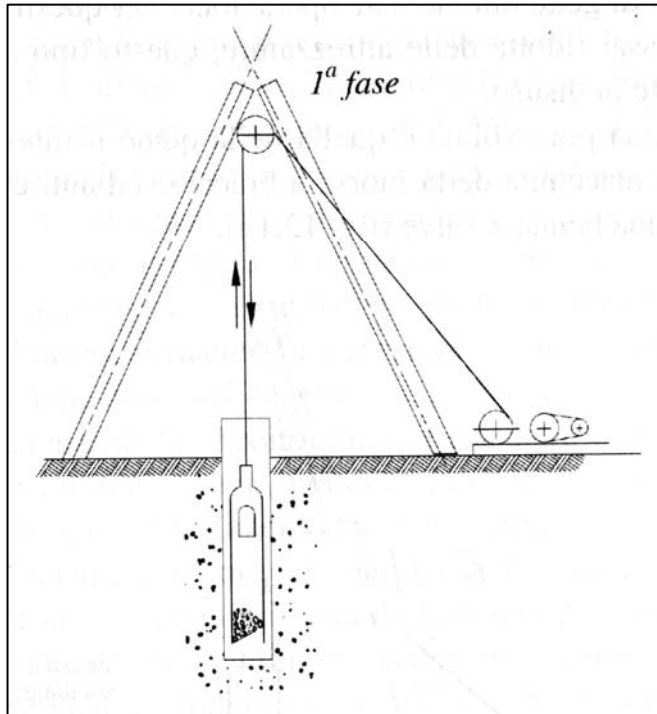
- I pali trivellati vengono costruito eseguendo una perforazione con asportazione del terreno ed eseguendo quindi nel foro un getto di calcestruzzo



- Si differenziano per i metodi di perforazione, sostegno delle pareti del foro e getto del calcestruzzo
- Micropali per la sottofondazione di edifici o strutture esistenti
- I pali trivellati di medio e grande diametro sono i più diffusi in Italia

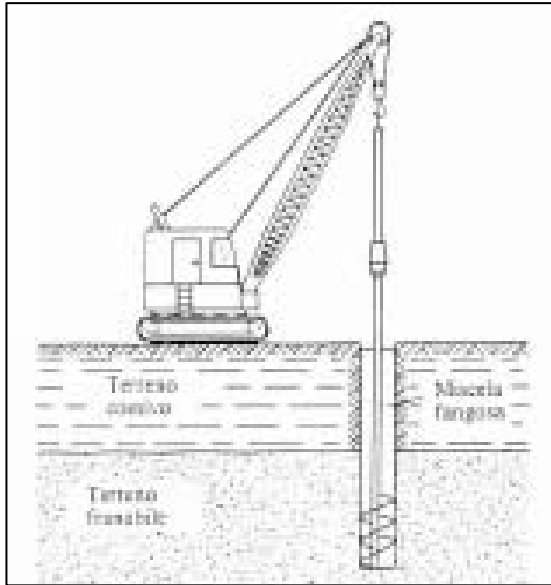
Pali trivellati di medio e grande diametro

- I primi pali venivano perforati a percussione infiggendo nel terreno, mediante battitura, una tubazione metallica ed asportando il terreno all'interno con una sonda



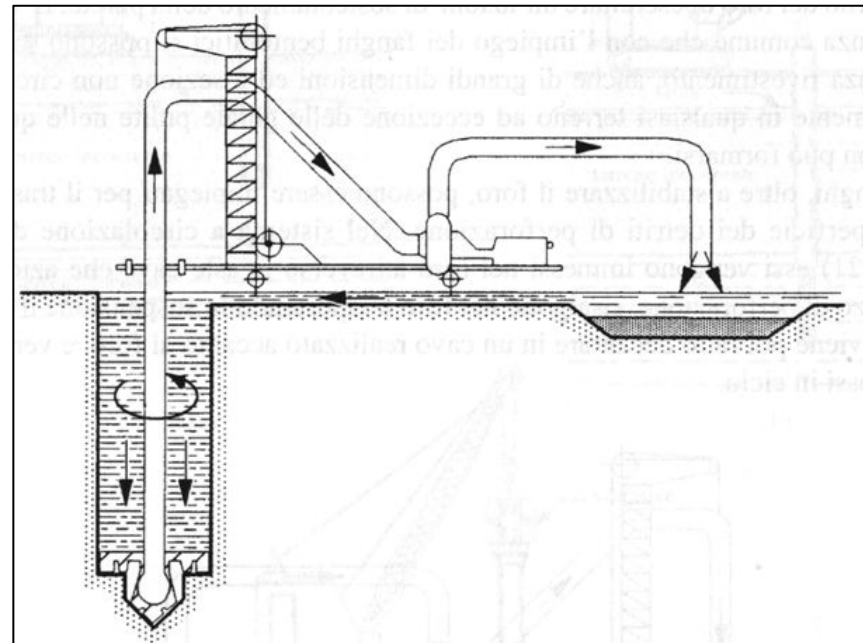
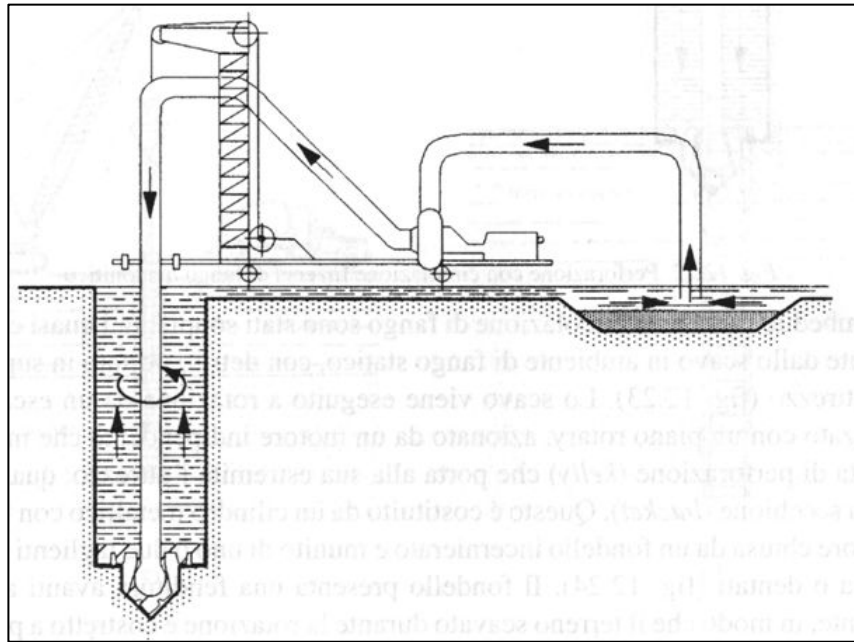
Sonda per
l'asportazione

- Sviluppo delle attrezzature di scavo a rotazione



- Nel caso dei terreni coesivi di adeguata consistenza, le pareti del foro sono stabili e la perforazione, se eseguita all'asciutto, non necessita di alcun rivestimento
- Se vi sono alternanze di terreni coesivi e terreni incoerenti sotto falda: rivestimento parziale

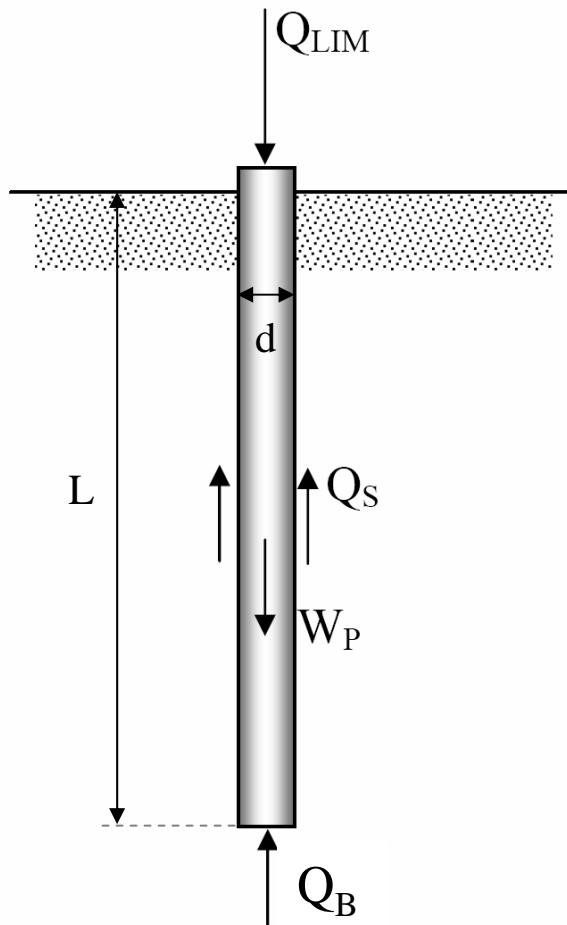
- In terreni nei quali le pareti del foro non sono stabili (terreni incoerenti sotto falda, terreni coesivi poco consistenti) si fa comunemente ricorso alla stabilizzazione con fango bentonitico



9.E

**Carico limite delle fondazioni profonde in
condizioni non drenate e in condizioni
drenate**

- Carico limite del palo sotto carichi verticali di compressione
- Analisi della rottura palo-terreno assimilando il palo ad un corpo rigido e il terreno a un continuo rigido plastico (o elasto-plastico)



$$Q_{lim} = Q_B + Q_S - W_P$$

Q_B = resistenza alla punta

Q_S = resistenza laterale

W_P = peso del palo

RESISTENZA ALLA PUNTA

$$Q_B = A_B (c \cdot N_C + \sigma_{vB} \cdot N_q)$$

- rispetto alle fond. superficiali viene trascurato $\frac{1}{2} \gamma \cdot d \cdot N_\gamma$
- A_B = area della base
- N_c e N_q sono diversi da quelli usati nelle fondazioni superficiali
- In CONDIZIONI NON DRENATE

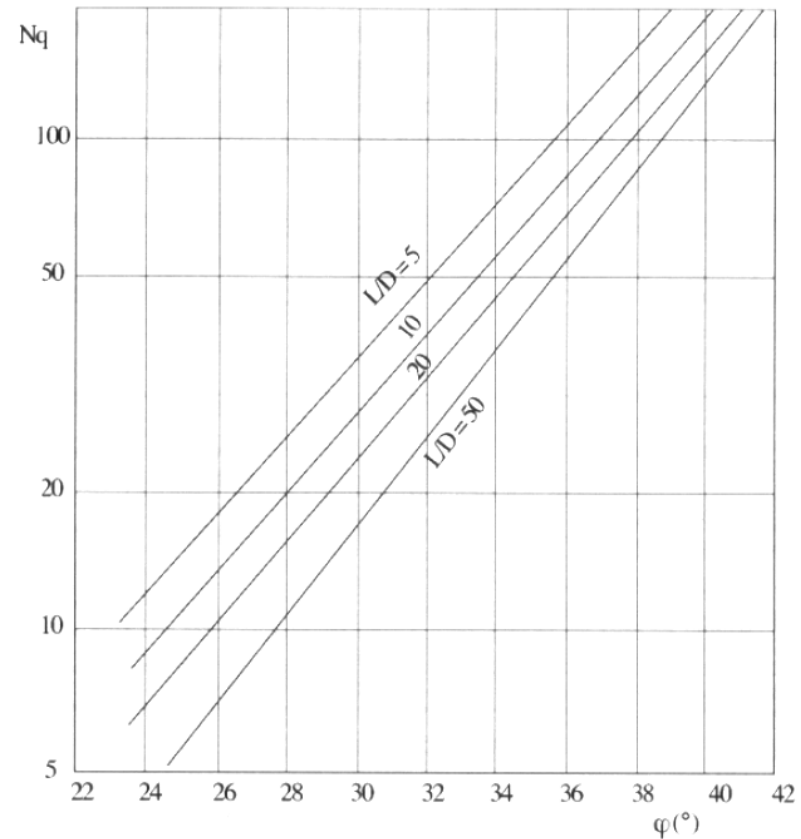
$$c = c_u, \quad \varphi = \varphi_u = 0 \rightarrow N_c = 9, \quad N_q = 1$$

$$Q_B = A_B (c_u \cdot N_C + \sigma_{vB})$$

- In CONDIZIONI DRENATE

$$c = c', \quad \varphi = \varphi' \rightarrow N_q \text{ dai diagrammi, } N_c = \frac{N_q - 1}{\operatorname{tg} \varphi'}$$

$$Q_B = A_B (c' \cdot N_c + \sigma'_{vB} \cdot N_q)$$



Berezantzev et al. (1961)

RESISTENZA LATERALE

- Resistenza laterale Q_S : si ottiene dall'integrazione, estesa a tutta la superficie esterna del palo, degli sforzi tangenziali che si mobilitano al contatto palo-terreno τ_s

$$\tau_s = c_s + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_s$$

- τ_s , valutata con riferimento ad un criterio di resistenza di Mohr-Coulomb, dipende da c_s = adesione palo-terreno, σ_n = tensione normale alla superficie del palo, φ_s = attrito palo-terreno
- Quindi si ha:

$$Q_S = \pi \cdot d \int_0^L (c_s + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_s) dz$$

- c_s , σ_n e φ_s assumono valori diversi al variare del terreno, del tipo di palo, delle condizioni di breve o lungo termine.

PESO DEL PALO

$$W_P = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L \cdot \gamma_{CLS}$$

- N.B. se la punta del palo si trova sotto falda e se l'analisi è effettuata in termini di tensioni efficaci (condizioni drenate) si deve considerare:

$$W' = W - A_B \cdot u_B = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L \cdot \gamma_{CLS} - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot u_B$$

- **PALI IN TERRENI INCOERENTI** (sabbie, ghiaie): $c' = 0$, $\varphi' = \varphi'_0$

$$Q_{lim} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sigma'_{vB} \cdot N_q + \pi \cdot d \int_0^L \sigma'_n \cdot \operatorname{tg} \varphi'_s dz$$

- $c' \cdot N_c = 0$ essendo $c' = 0$
- σ'_{vB} tensione verticale litostatica efficace per $z = L$
- N_q dai diagrammi dopo aver ridotto: $\varphi' = \varphi'_0 - 3^\circ$ per i pali trivellati e incrementato $\varphi' = 3/4 \varphi'_0 + 10^\circ$ per i pali battuti
- $\sigma'_n = K_s \cdot \sigma'_v$ con $K_s = 1$ per i pali battuti e $K_s = 0.4$ per i pali trivellati
- $\varphi'_s = 3/4 \varphi'_0$ per i pali battuti e $\varphi'_s = \varphi'_0$ per i pali trivellati
- W_p' se la base è sotto falda

Q_{lim} risulta dipendere in modo non trascurabile dalle modalità esecutive dei pali

- **PALI IN TERRENI COERENTI (argille) A BREVE TERMINE:**

$$c = c_u, \varphi = \varphi_u = 0$$

$$Q_{\text{lim}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (c_u \cdot N_c + \sigma_{vB} \cdot N_q) + \pi \cdot d \int_0^L (\alpha \cdot c_u + 0) dz$$

- $N_c = 9, N_q = 1$
- σ_{vB} tensione verticale litostatica totale per $z = L$
- $c_s = \alpha \cdot c_u$ con $\alpha \approx 0.5$
- $\varphi_s = 0$
- W_P

- **PALI IN TERRENI COERENTI (argille) A LUNGO TERMINE:**

$$c = c', \varphi' = \varphi'_0$$

$$Q_{\text{lim}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (c' \cdot N_c + \sigma'_{vB} \cdot N_q) + \pi \cdot d \int_0^L \sigma'_n \cdot \text{tg} \varphi'_s dz$$

- σ'_{vB} tensione verticale litostatica efficace per $z = L$
- N_q dai diagrammi considerando $\varphi' = \varphi'_0$
- N_c funzione di $N_q \Rightarrow N_c = \frac{N_q - 1}{\text{tg} \varphi'}$
- $c'_s = 0$ anche se c' è diversa da zero
- $\sigma'_n = K_s \cdot \sigma'_v$ con $K_s = 1 - \sin \varphi'_0$
- $\varphi'_s = 3/4 \varphi'_0$
- W' se la base è sotto falda