

FONDAZIONI SU PALI

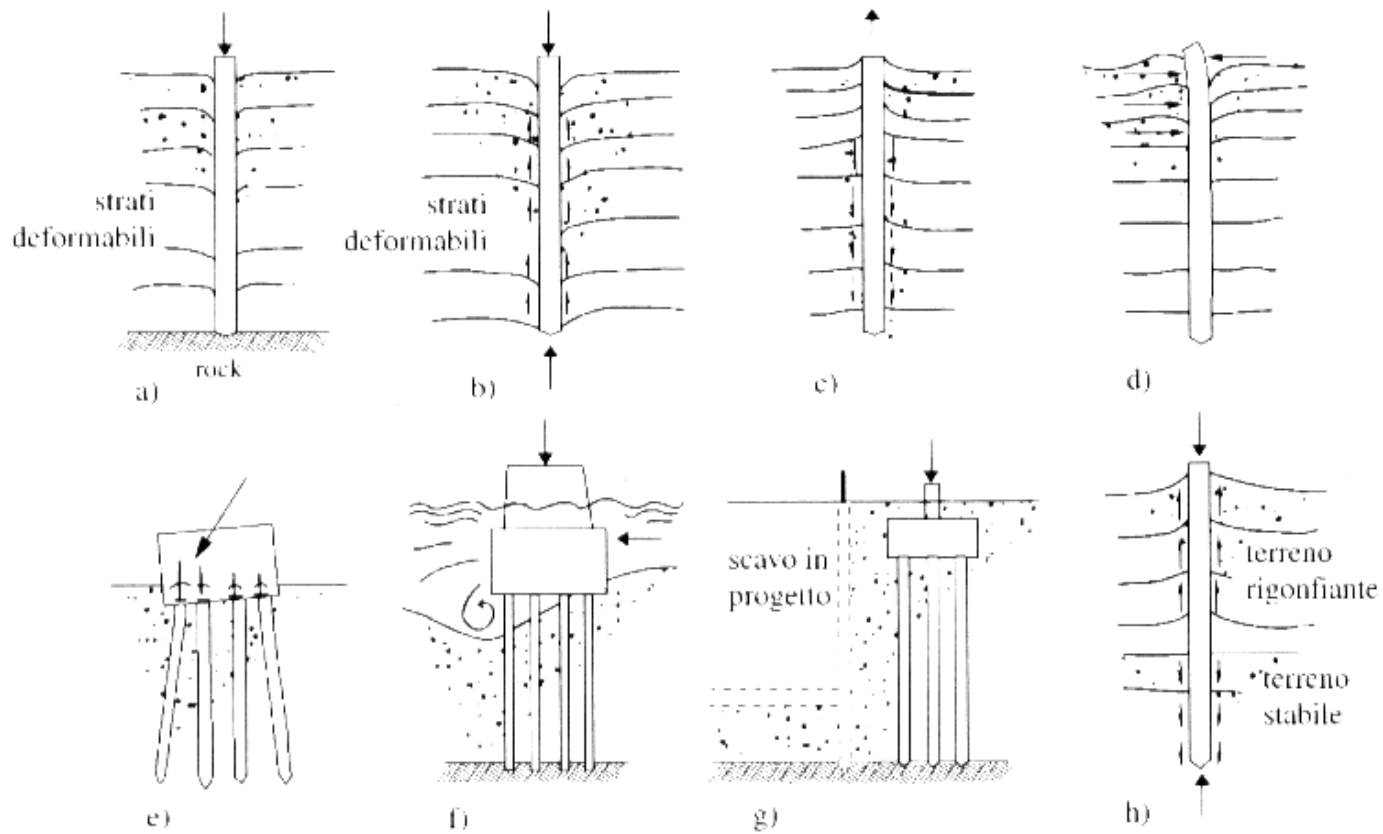
Cos'è un Palo?

DEFINIZIONE

(Norme Tecniche, 2008)

**Elemento strutturale che
“trasferisce l'azione proveniente
dalla struttura in elevato agli
strati profondi del terreno”**

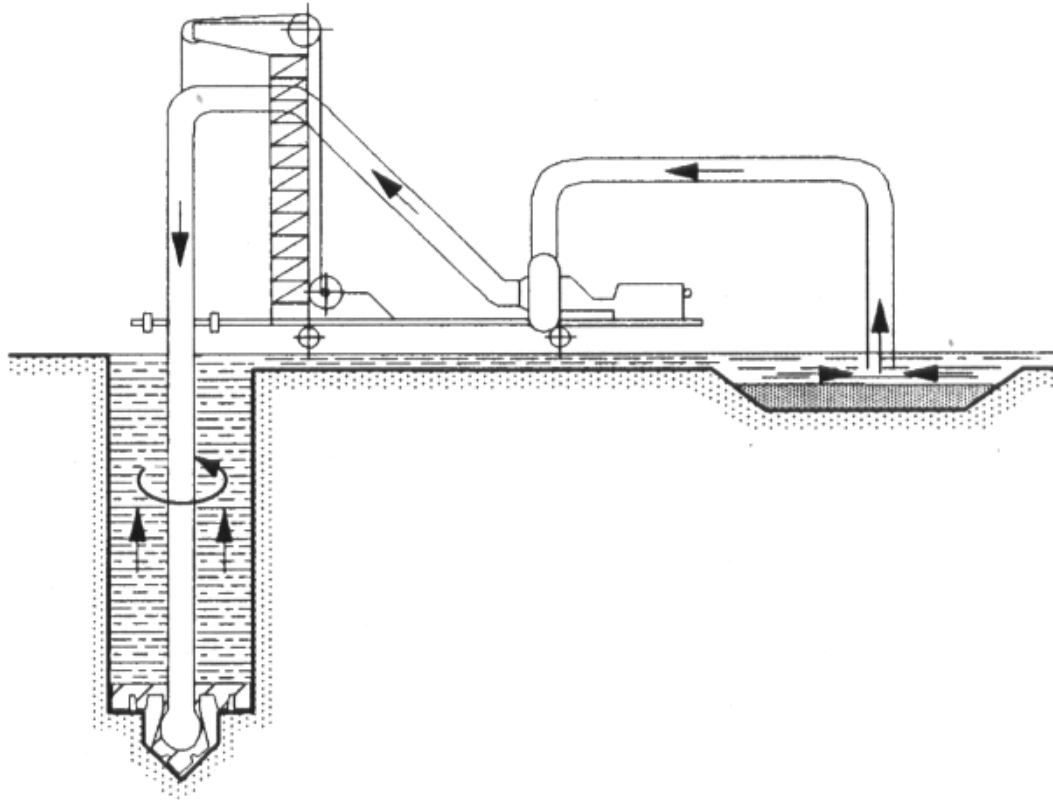
Perché si ricorre ai pali?



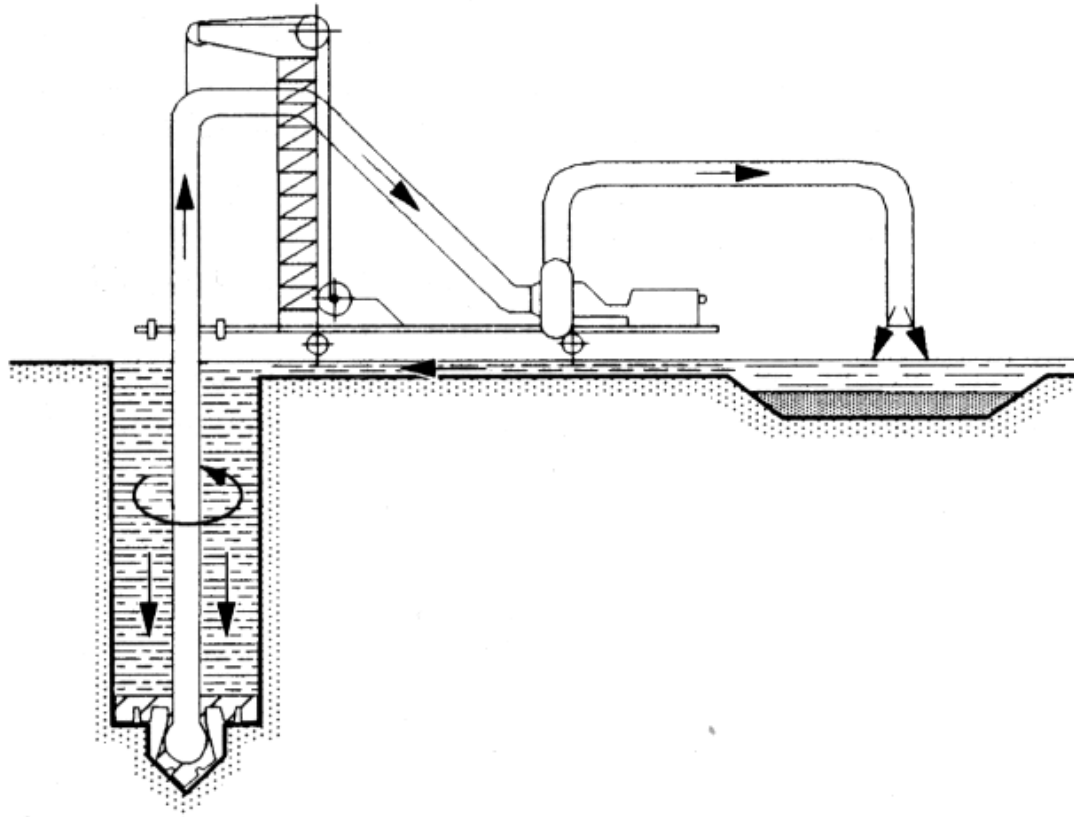
TIPI DI PALO

- Pali trivellati
 - Pali battuti
 - prefabbricati
 - gettati in opera
 - CFA (Continuous Flight Auger) e varianti
 - Micropali
-

ESECUZIONE DELLA PERFORAZIONE TRIVELLAZIONE CON CIRCOLAZIONE DIRETTA



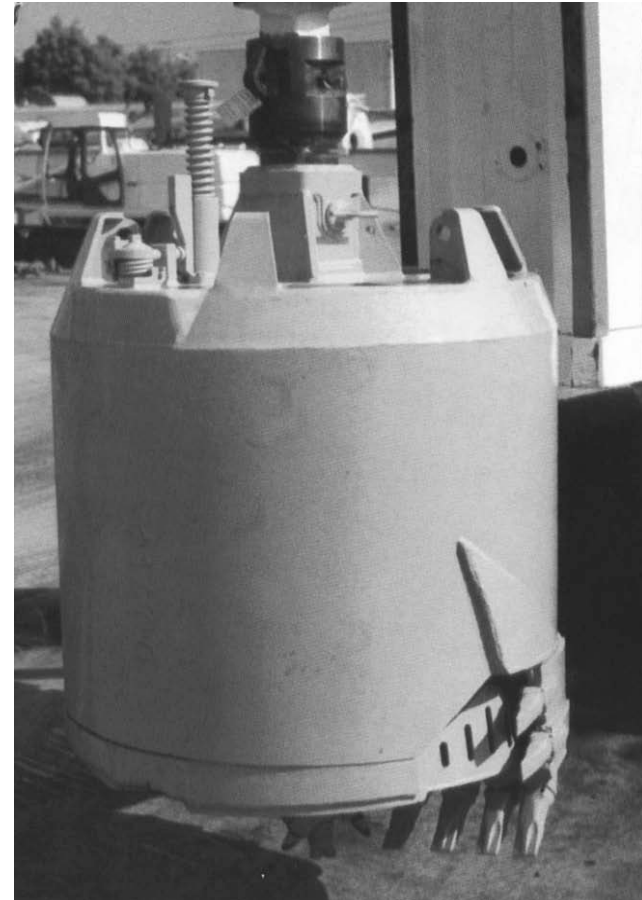
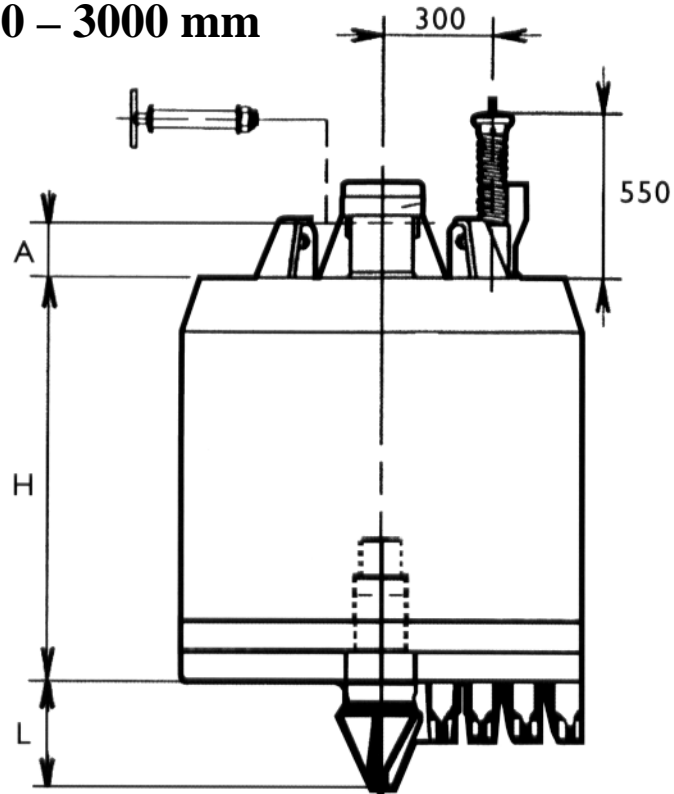
ESECUZIONE DELLA PERFORAZIONE TRIVELLAZIONE CON CIRCOLAZIONE INVERSA



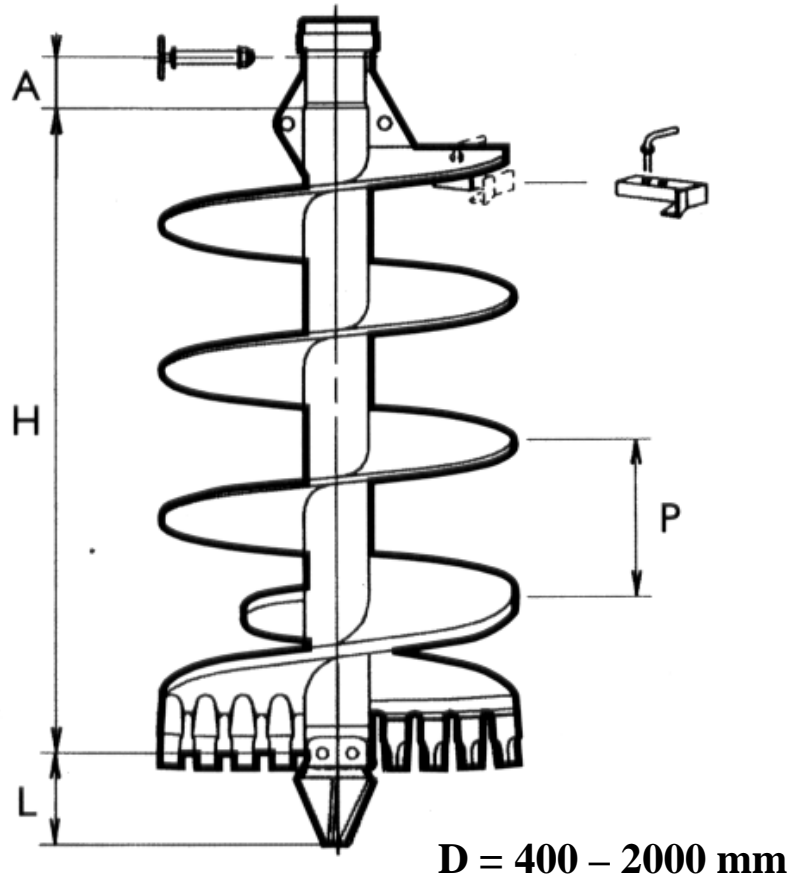
UTENSILI DI PERFORAZIONE “BUCKET” (Secchione)

$H = 1250 - 1350 \text{ mm}$

$D = 800 - 3000 \text{ mm}$



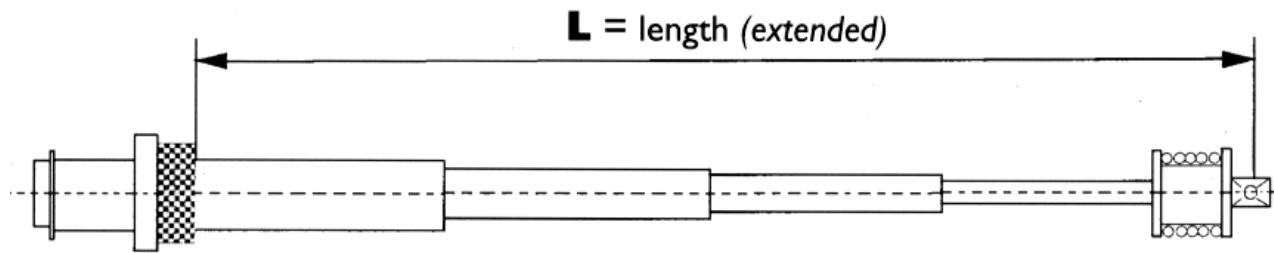
UTENSILI DI PERFORAZIONE “AUGER” (Trivella)



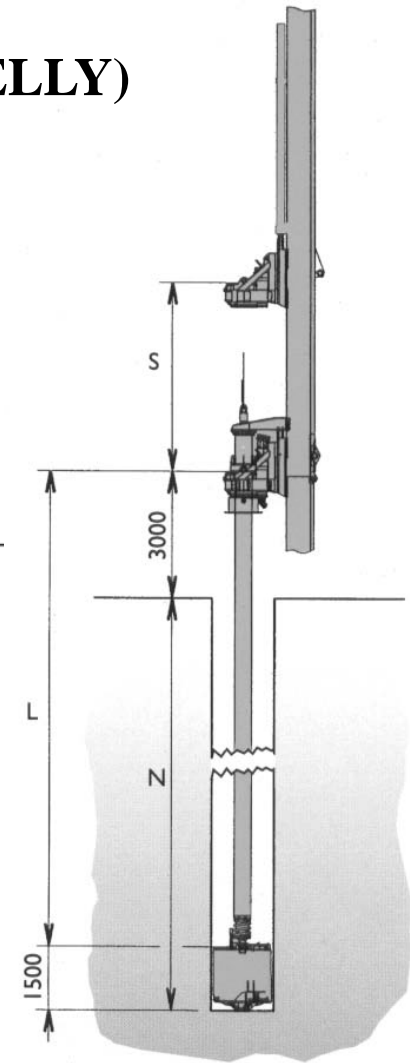
UTENSILI DI PERFORAZIONE
“AUGER” (Trivella)
Espulsione del materiale estratto



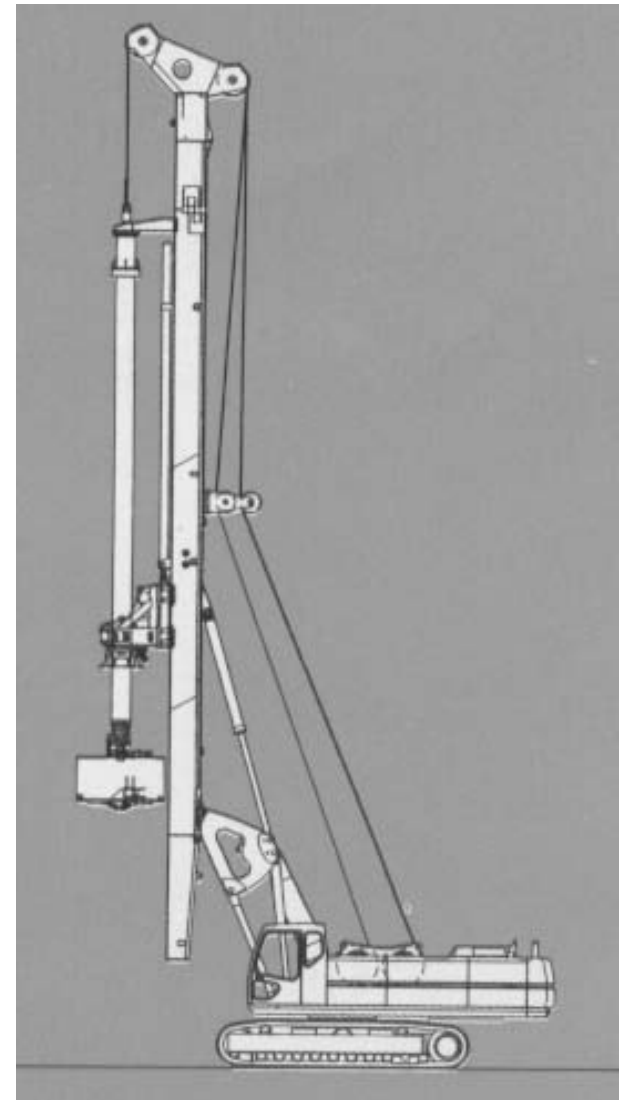
ASTE TELESCOPICHE DI PERFORAZIONE (KELLY)



$L > 100 \text{ m}$



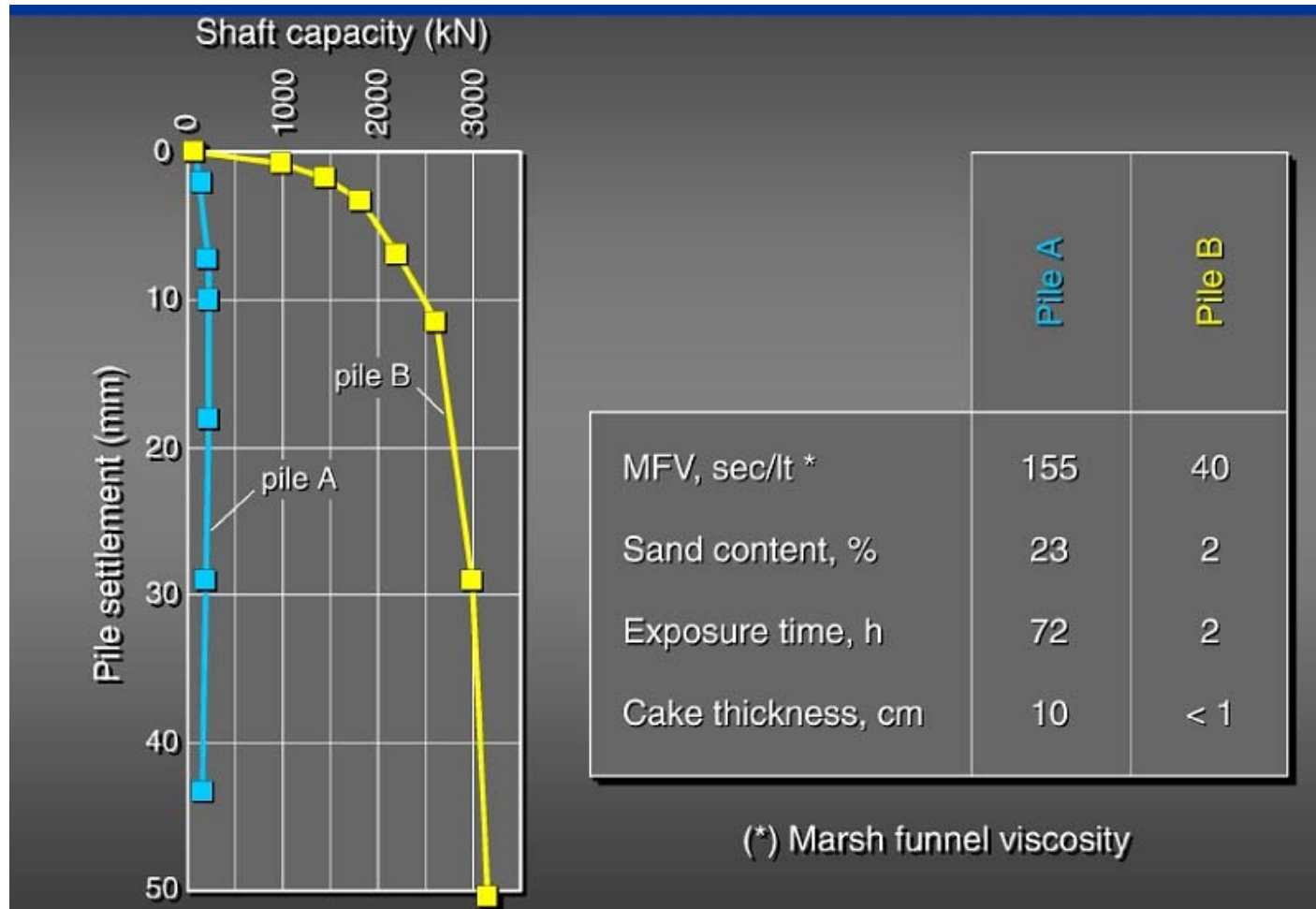
**ESEMPIO DI ATTREZZATURA
DI PERFORAZIONE**



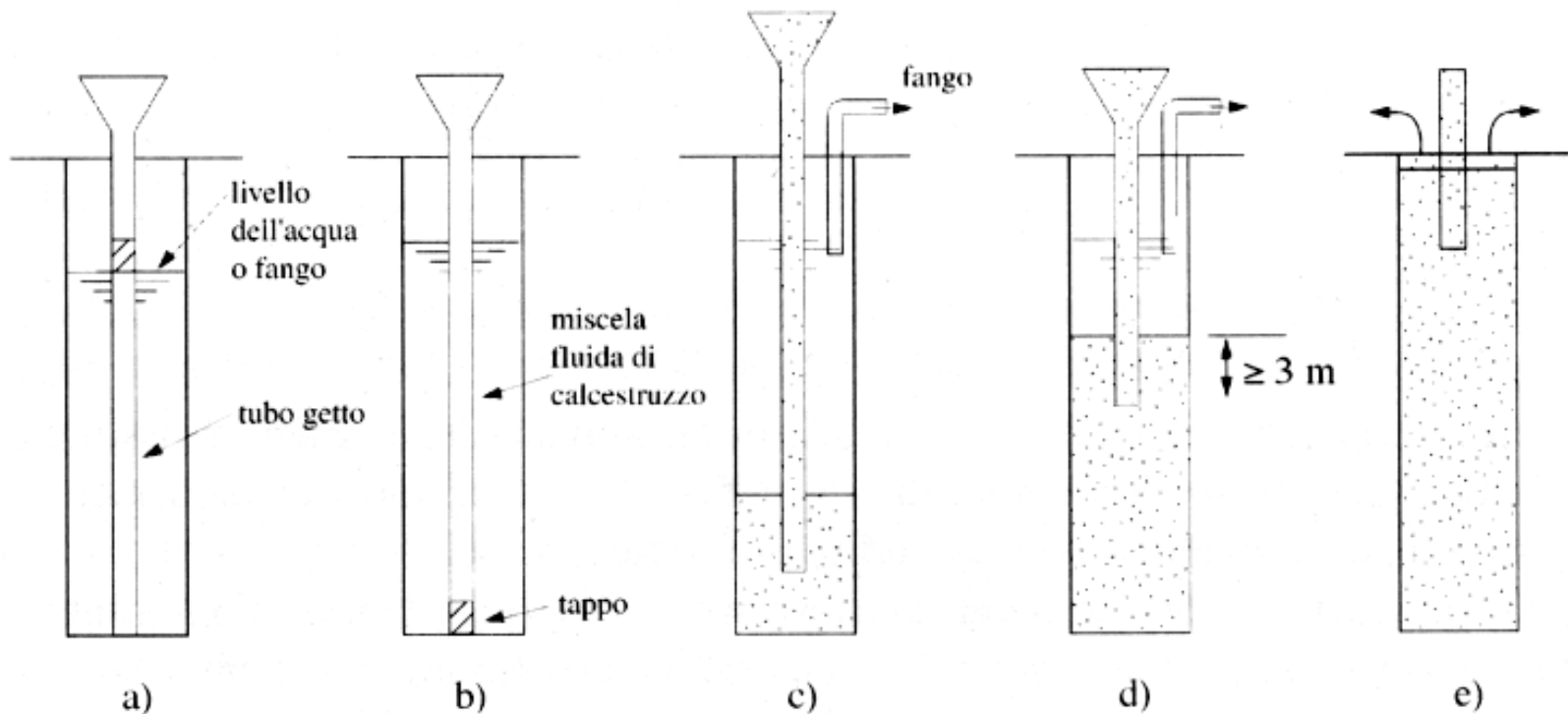
SOSTEGNO DELLA PERFORAZIONE

- **Rivestimento (vibroinfisso o trascinato)**
 - **infissione**
 - **stabilità fondo foro**
 - **estrazione**
 - **Fanghi bentonitici o polimerici**
 - **stabilità delle pareti e del fondo**
-

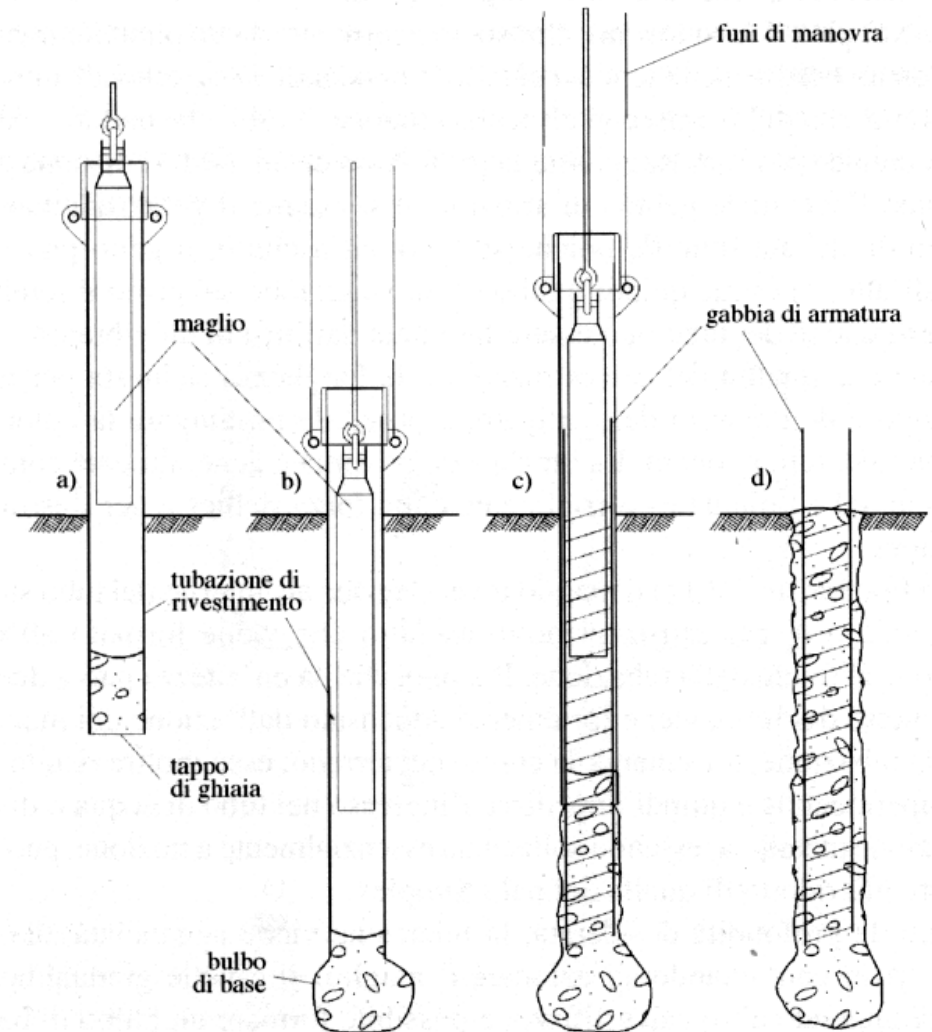
INFLUENZA DEL FANGO BENTONITICO (Backer et Al., 1993; O'Neill & Hassan, 1994)



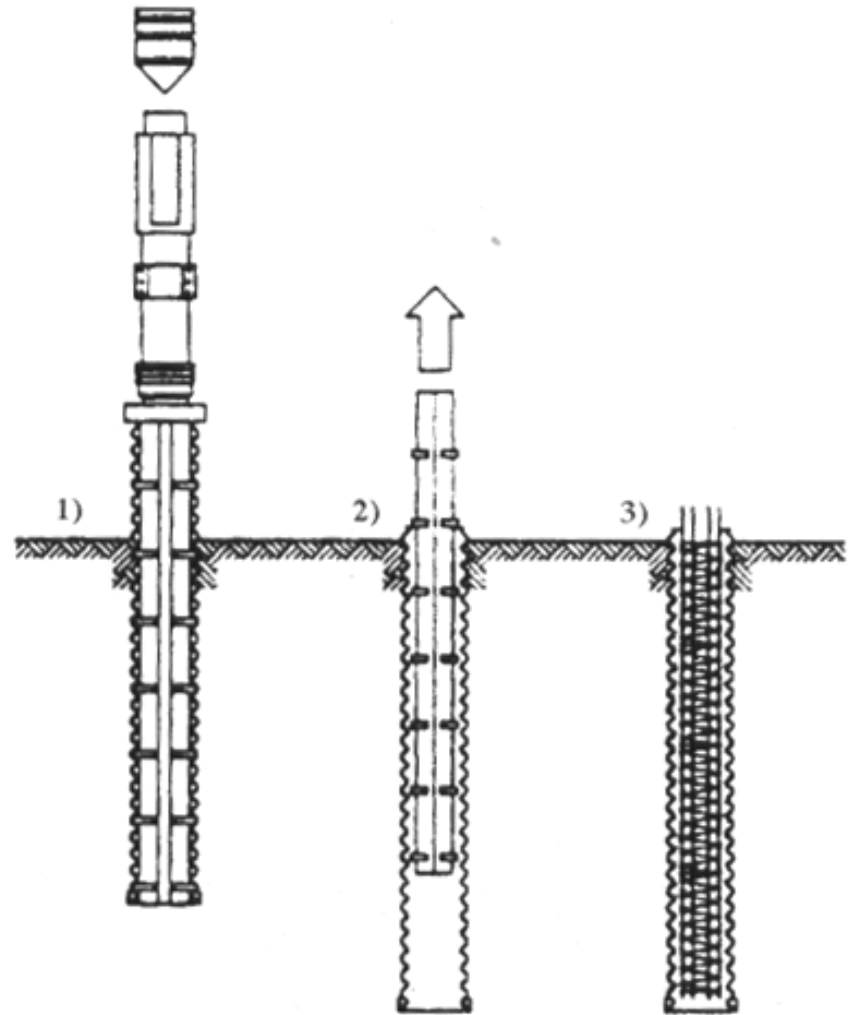
GETTO DEL FUSTO IN CLS



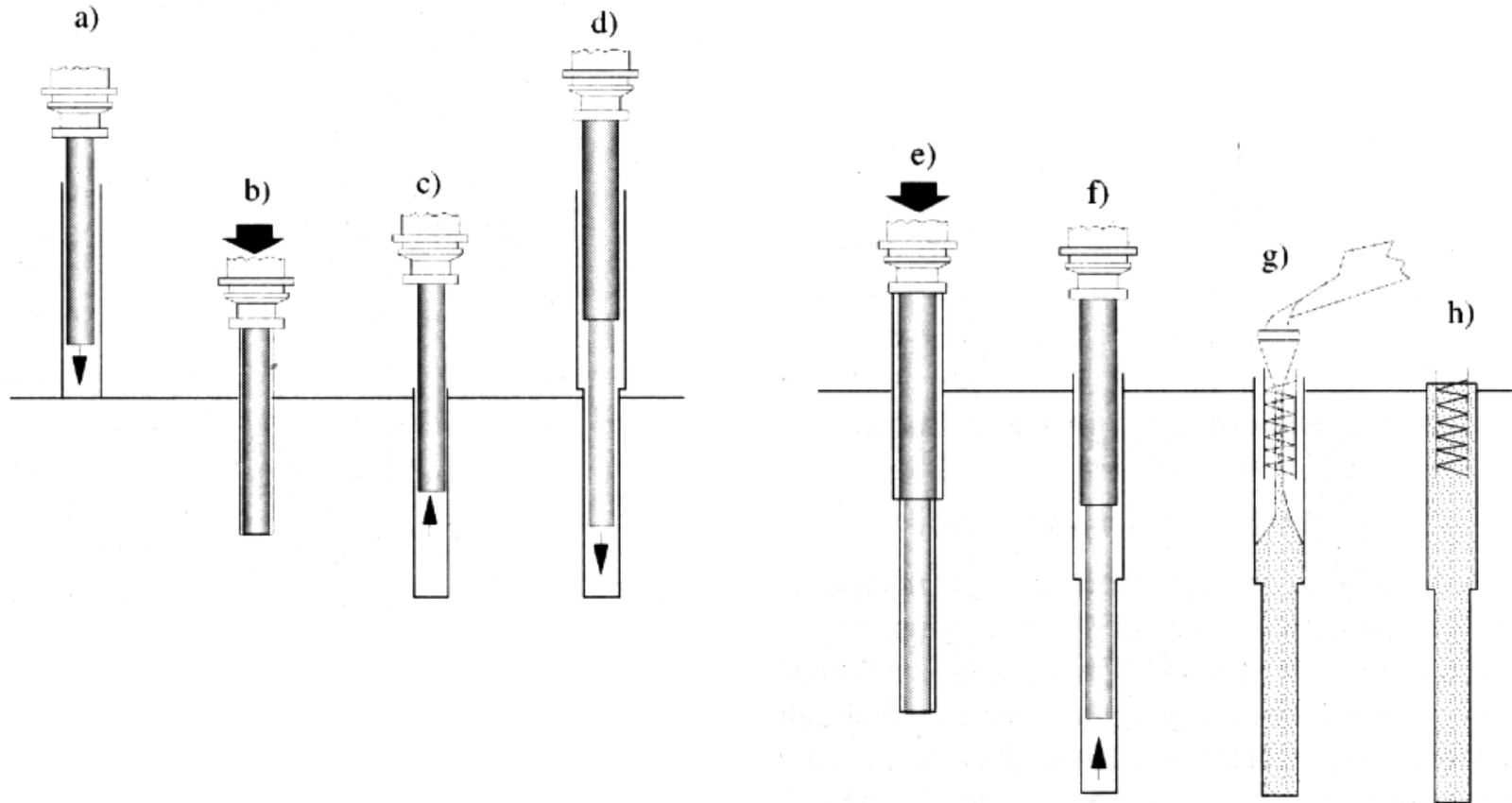
**PALO BATTUTO
GETTATO IN OPERA
TIPO "FRANKI"**



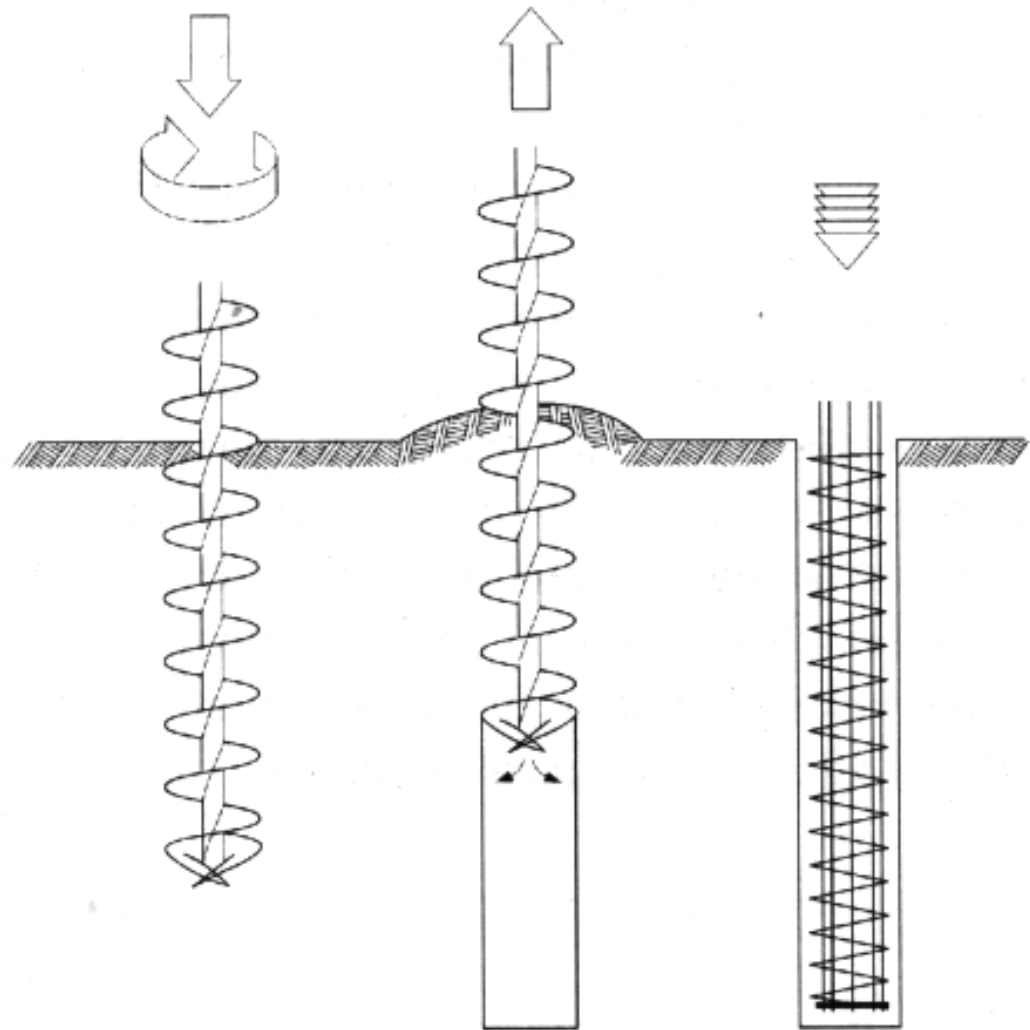
**PALO BATTUTO
CON LAMIERINO
TIPO "LACOR"**



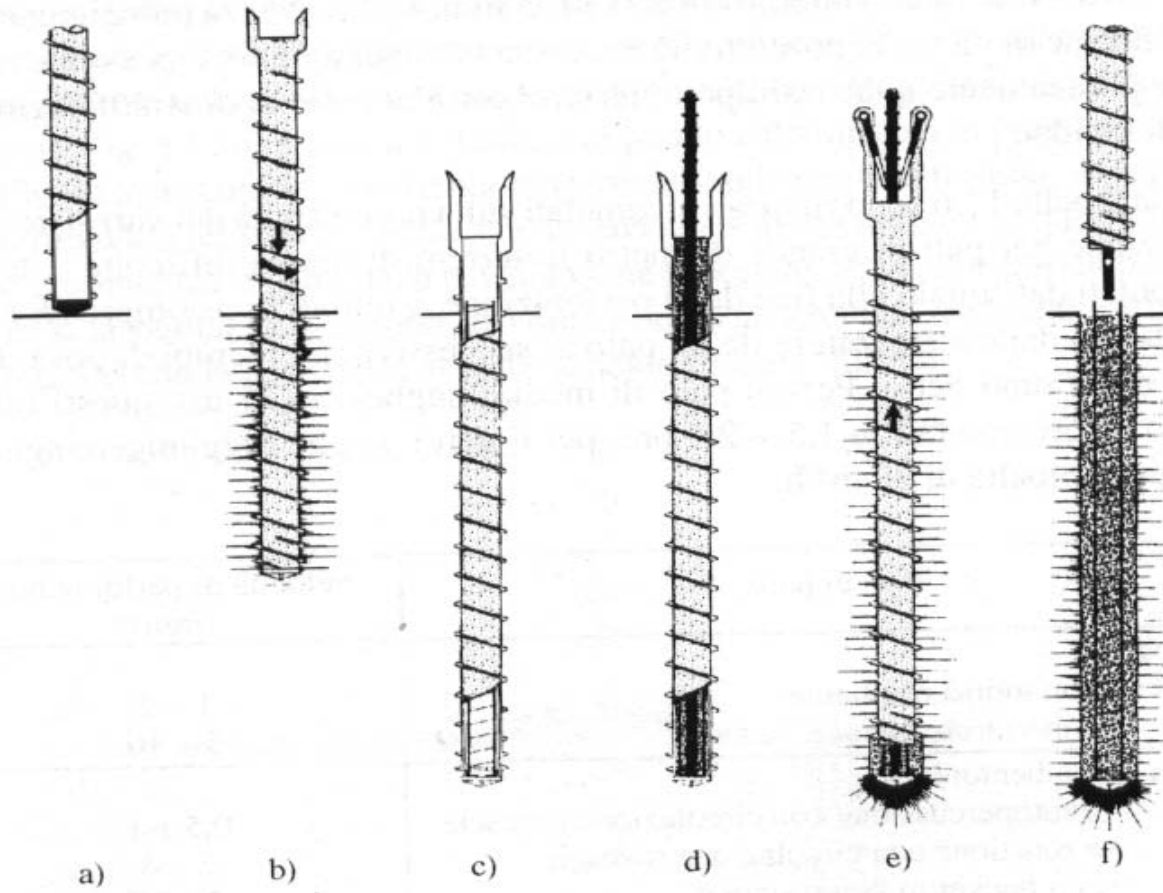
PALO BATTUTO IN ACCIAIO - TIPO "MULTITON"



**PALO AD ELICA
CONTINUA (CFA)**

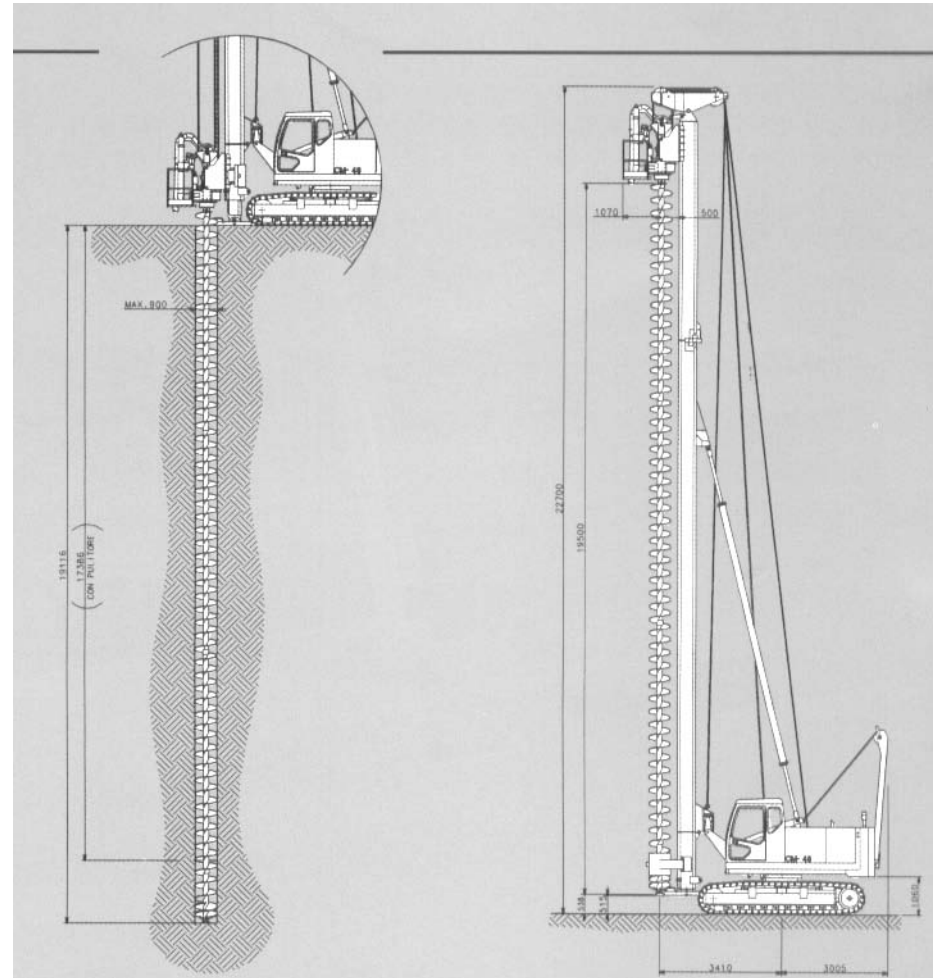


PALO TRIVELLATO - PRESSATO AD ELICA CONTINUA



**PALO AD ELICA
CONTINUA (CFA)**

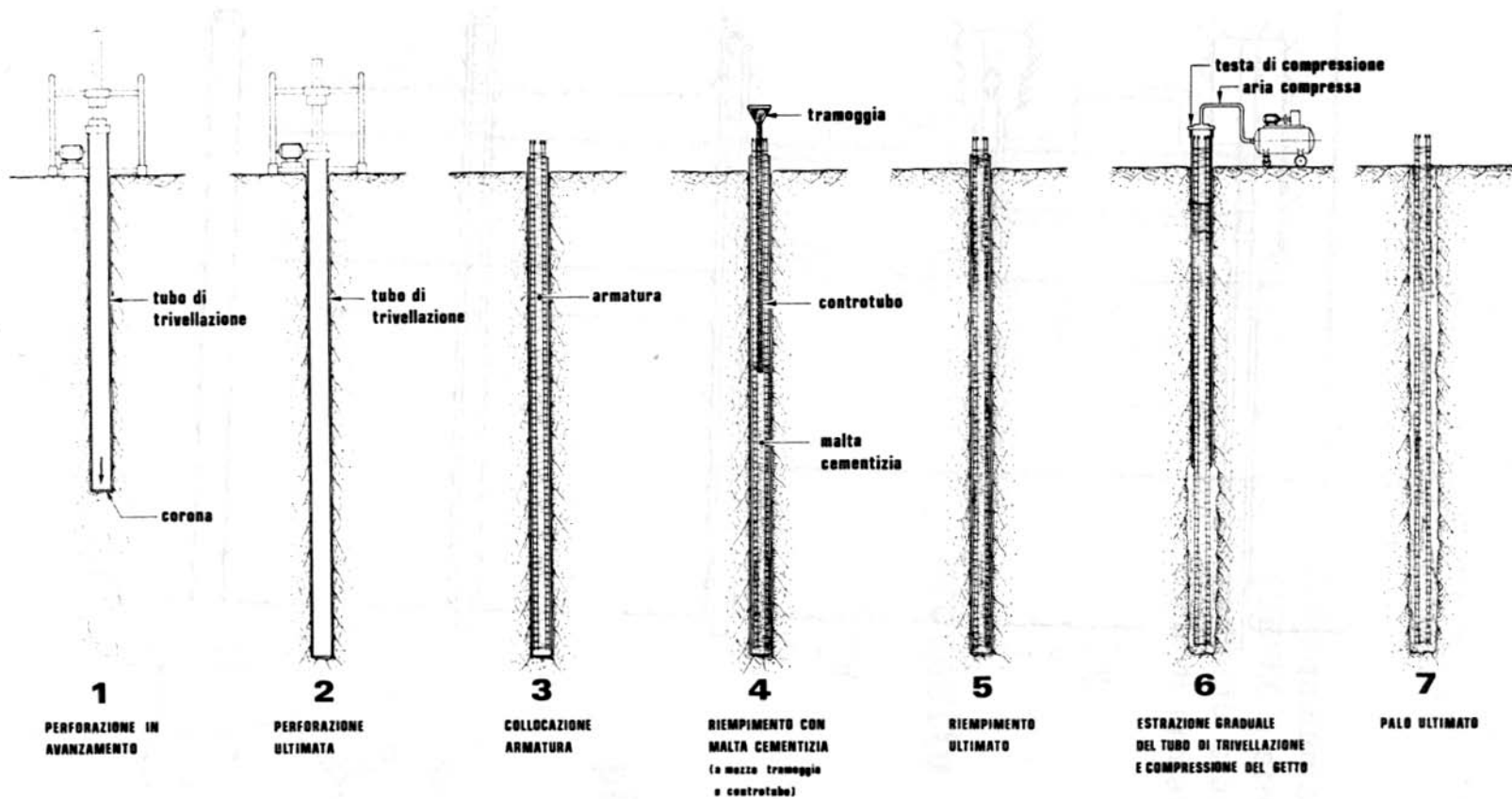
**ATTREZZATURA
DI PERFORAZIONE**



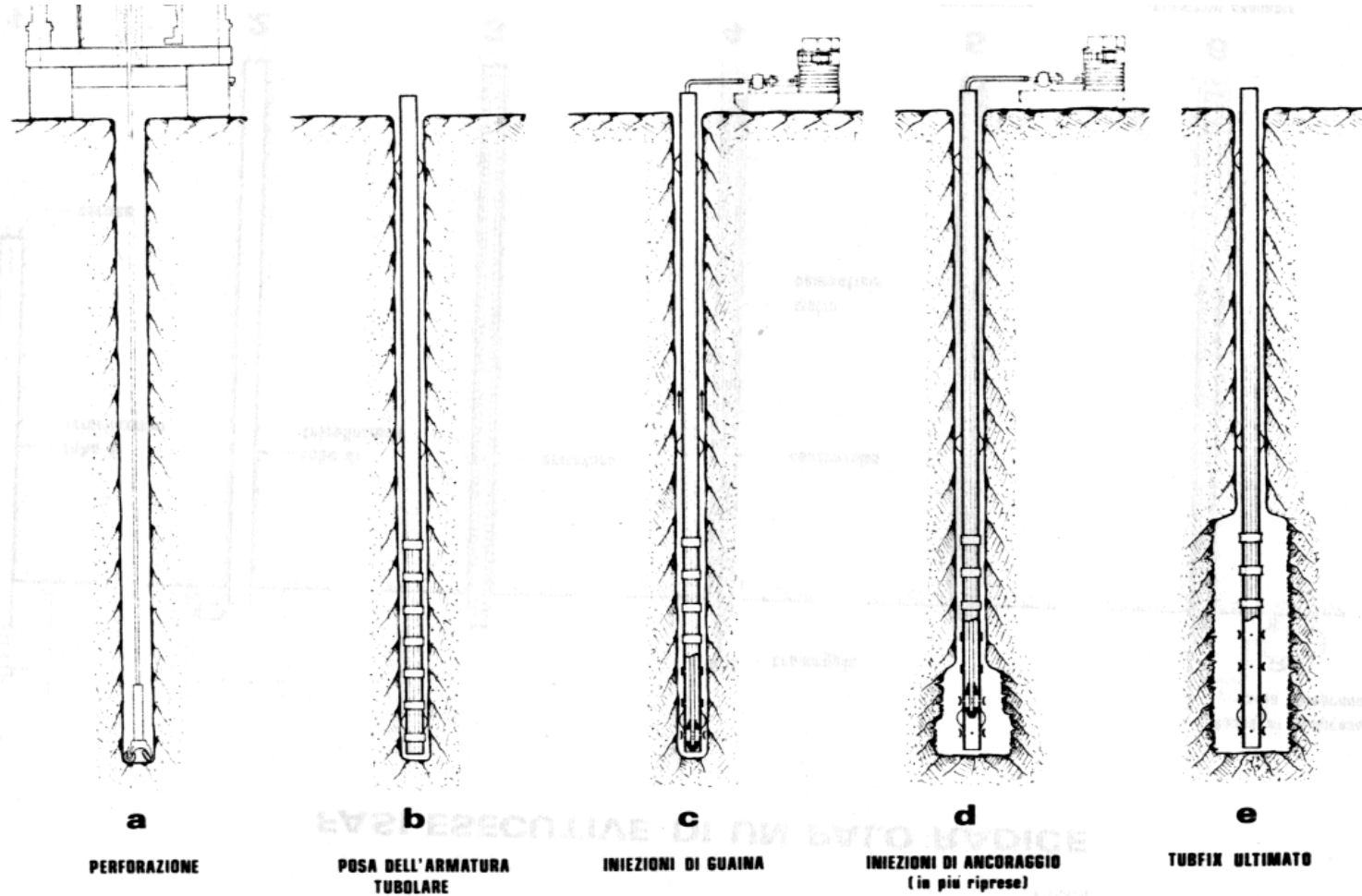
PRODUTTIVITA' DELLE ATTREZZATURE

Tipo di palo	Velocità di perforazione (m/h)
Pali tubati <ul style="list-style-type: none">• con morsa oscillante• con vibroinfissione	1 ÷ 2 5 ÷ 10
Pali con fango bentonitico <ul style="list-style-type: none">• a rotopercussione con circolazione rovescia• a rotazione con circolazione rovescia• con bucket in fango statico	0,5 ÷ 1 2 ÷ 4 3 ÷ 10
Pali a secco <ul style="list-style-type: none">• con elica continua	10 ÷ 20

FASI ESECUTIVE DI UN PALO TIPO “RADICE” (IGU)

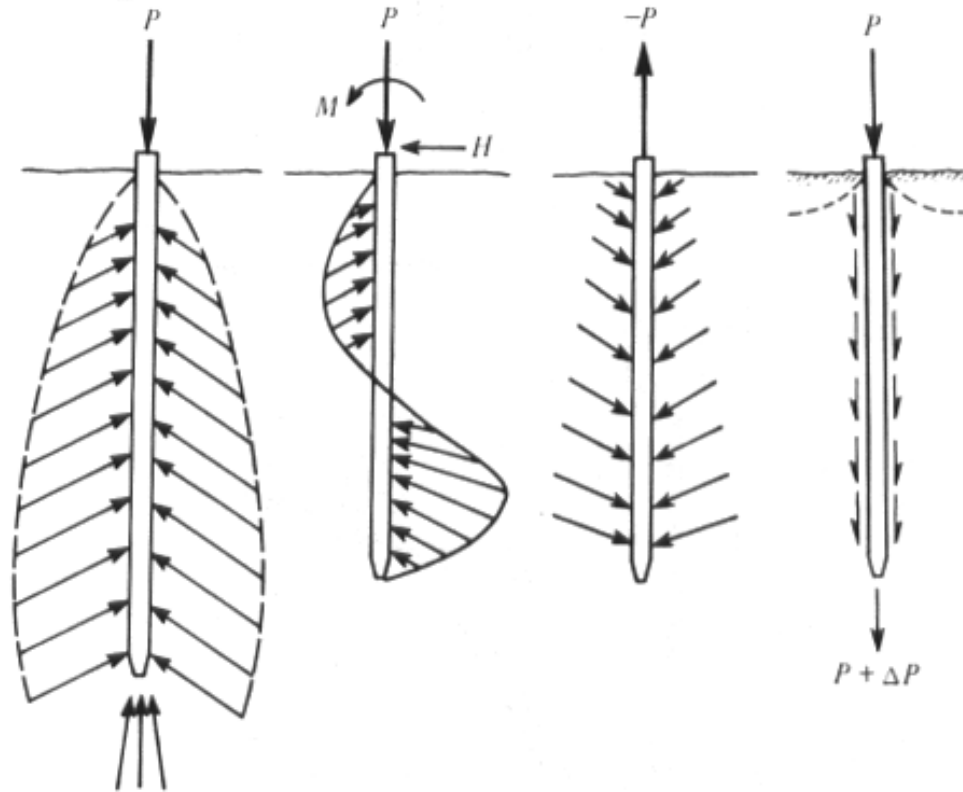


FASI ESECUTIVE DI UN PALO TIPO "TUBFIX" (IRS)



CARICO LIMITE DEL PALO SINGOLO

Generalità



DETERMINAZIONE DEL CARICO LIMITE

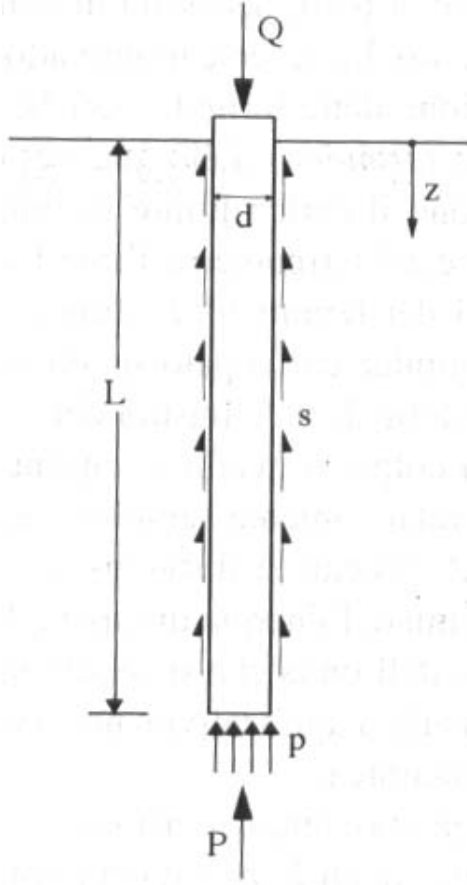
Approcci disponibili:

- **Formule statiche**
- **Formule empiriche**
- **Formule dinamiche**
- **Determinazione diretta**

CARICO LIMITE

Formule statiche

CARICO LIMITE



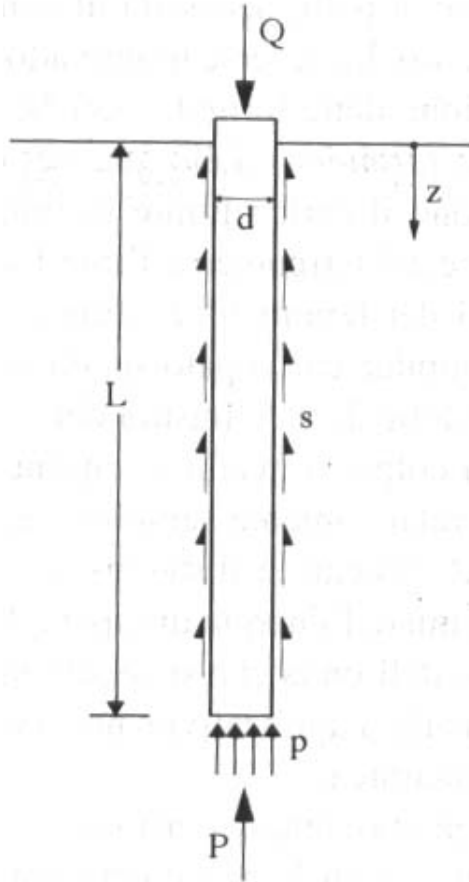
$$Q_{\text{lim}} = P + S = \frac{\pi d^2}{4} p + \pi d \int_0^L s \cdot dz$$

Suddivisione convenzionale tra P ed S

CARICO LIMITE

Formule statiche: resistenza alla punta

CARICO LIMITE



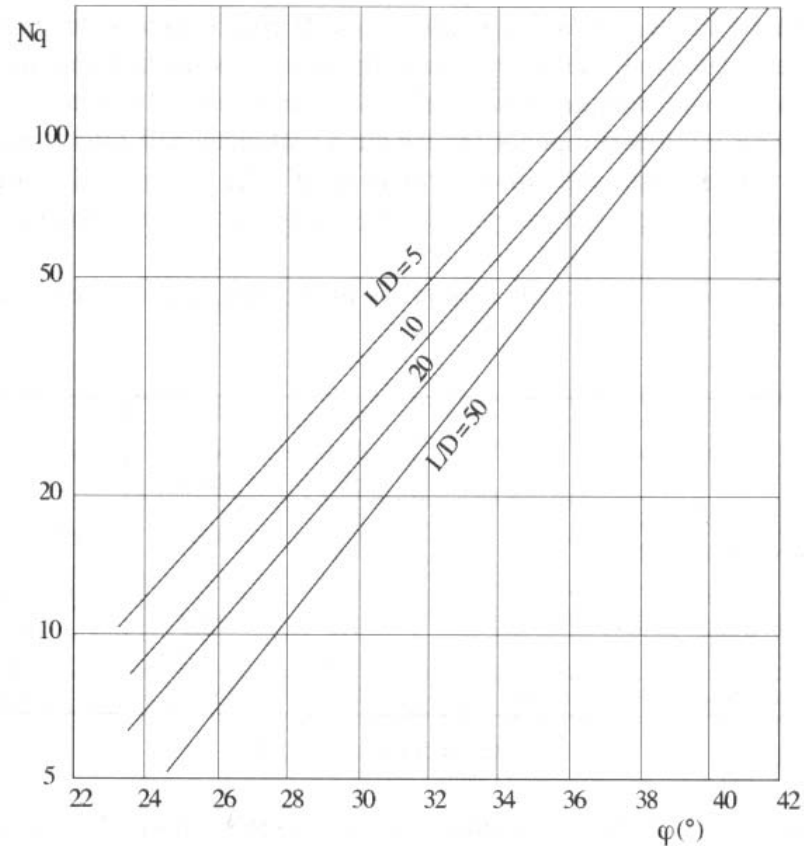
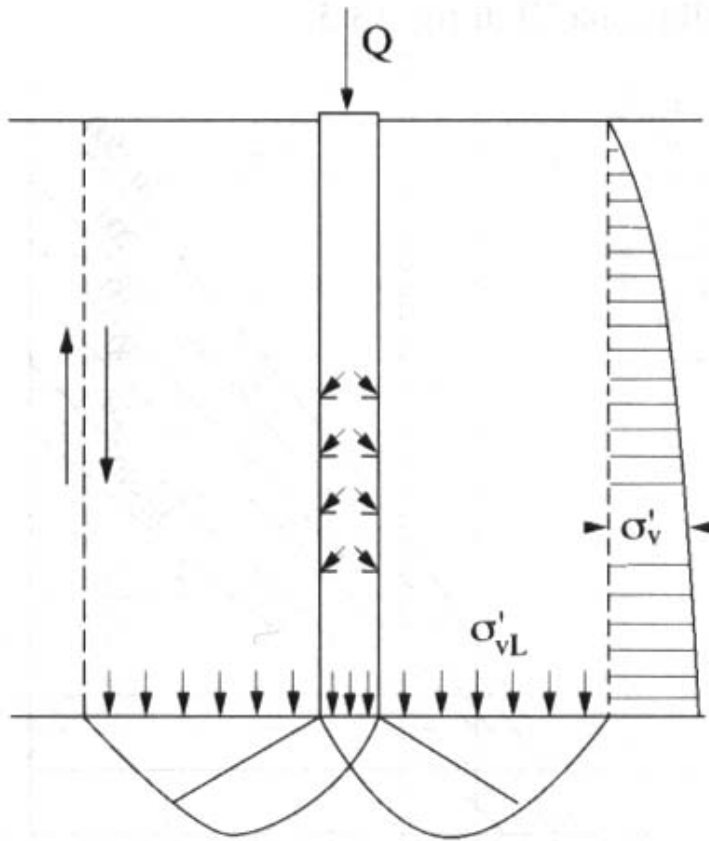
$$D) \quad p = N_q \sigma'_{vL} + N_c c'$$

$$U) \quad p = 1 \cdot \sigma_{vL} + N_c c_u$$

CARICO LIMITE

Formule statiche: resistenza alla punta (D)

CARICO LIMITE



Berezantzev, 1961

CARICO LIMITE

Pali di grande diametro

$$Q_{\text{lim}} = P + S = \frac{\pi d^2}{4} p + \pi d \int_0^L s \cdot dz$$

S si mobilita per cedimenti di $1 \div 2$ cm

P si mobilita per spostamenti di $0.15d$ (battuti)
o $0.25d$ (trivellati)

CARICO LIMITE

Pali di grande diametro (D)

Lo SLU di un palo di grande diametro è definito sulla base dei cedimenti

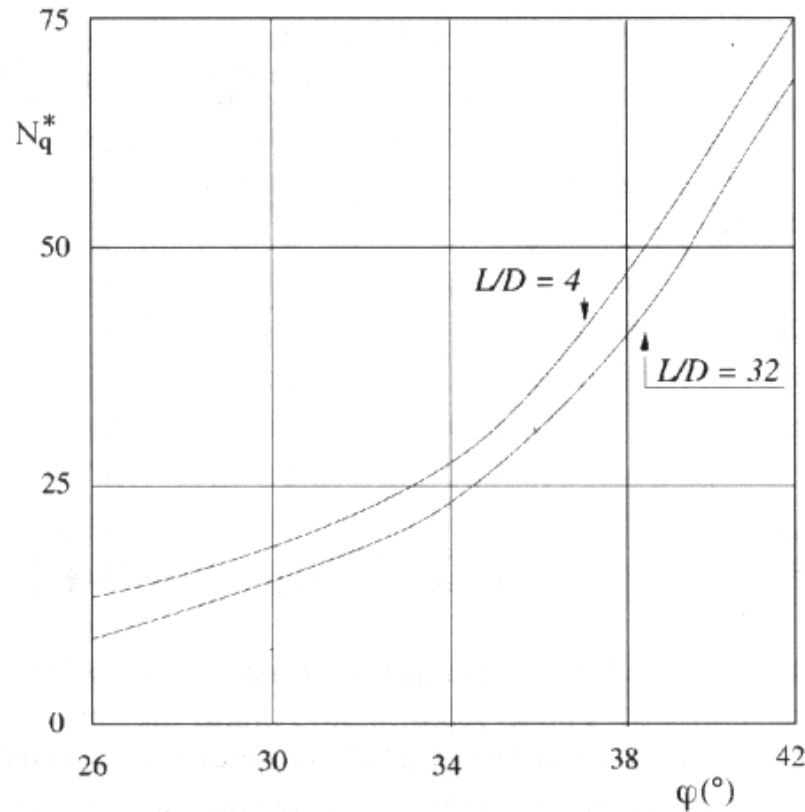
Berazantzev (1965) suggerisce $0.06d - 0.1d$

$$p = N_q^* \cdot \sigma'_{vL}$$

CARICO LIMITE

Pali di grande diametro

CARICO LIMITE



Berezantzev, 1965

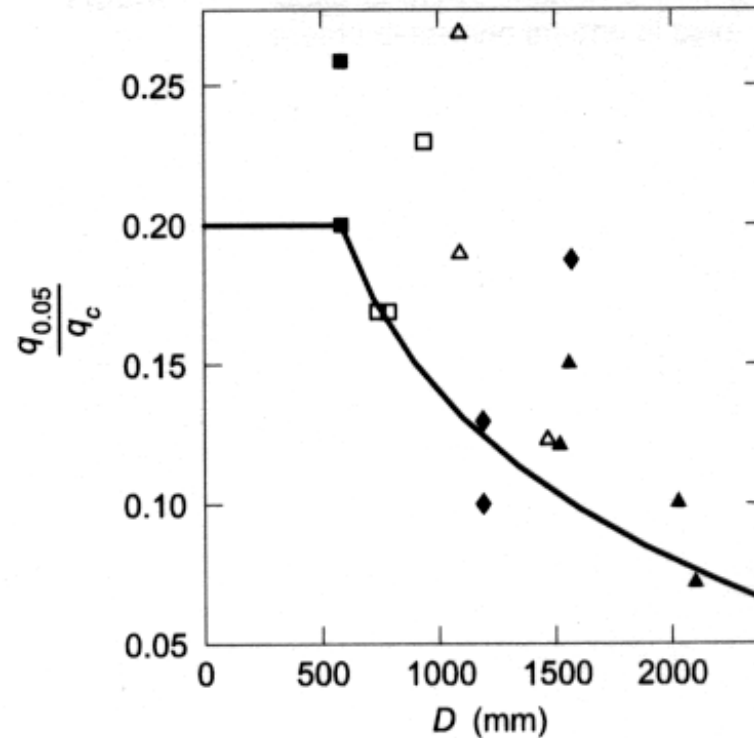
CARICO LIMITE

Pali di grande diametro

CARICO LIMITE

$$q_c = N_q \cdot \sigma'_{v0}$$

$q_{0.05}$ carico unitario
alla punta per un
cedimento di $0.05d$



Jamiolkowski e Lancellotta, 1988

CARICO LIMITE

Formule statiche: resistenza alla punta (U)

$$p_{\text{lim}} = 1 \cdot \sigma_{\text{vL}} + N_c c_u$$

Le teorie ad oggi disponibili portano a valori di N_c compresi tra 8 e 12.

Usualmente si considera un valore di 9.

CARICO LIMITE

Formule statiche: resistenza laterale (D)

$$s_{\text{lim}} = \mu \cdot k \cdot \sigma'_{v0}$$

Tipo di palo	k (S)	k (D)	μ
Batt. profilato	0.7	1.0	0.36
Batt. tubo acc. chiuso	1.0	2.0	0.36
Batt. Cls prefabbricato	1.0	2.0	$\tan(0.75\varphi')$
Batt. Cls gettato	1.0	3.0	$\tan(\varphi')$
Trivellato	0.5	0.4	$\tan(\varphi')$
Elica continua	0.7	0.9	$\tan(\varphi')$

CARICO LIMITE

Formule statiche: resistenza laterale (U)

$$S = \alpha \cdot c_u$$

Tipo di palo	$c_{u,ind}$ [kPa]	α
Battuto	$c_u < 25$	1.0
	$25 < c_u < 70$	$1 - 0.011(c_u - 25)$
	$c_u > 70$	0.5
Trivellato	$c_u < 25$	0.7
	$25 < c_u < 70$	$0.7 - 0.008(c_u - 25)$
	$c_u > 70$	0.35

CARICO LIMITE

Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

Tipo di formazione del micropalo:

- **Radice – IGU – iniezione unica**
- **Tubfix – IRS – iniezione ripetuta**

Metodo basato su prove pressiometriche o SPT

CARICO LIMITE

Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

$$Q_{\text{lim}} = P + S = P + \pi \cdot d_s \cdot L_s \cdot s$$

$$P = 0.15 \cdot S \quad (\text{o trascurata})$$

$$d_s = \alpha \cdot d$$

CARICO LIMITE

Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

CARICO LIMITE

Terreno	Valori di α		Quantità minima di miscela consigliata
	IRS	IGU	
Ghiaia	1,8	1,3 - 1,4	$1,5 V_S$
Ghiaia sabbiosa	1,6 - 1,8	1,2 - 1,4	$1,5 V_S$
Sabbia ghiaiosa	1,5 - 1,6	1,2 - 1,3	$1,5 V_S$
Sabbia grossa	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	$1,5 V_S$
Sabbia media	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	$1,5 V_S$
Sabbia fine	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	$1,5 V_S$
Sabbia limosa	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	IRS: $(1,5 - 2)V_S$; IGU: $1,5 V_S$
Limo	1,4 - 1,6	1,1 - 1,2	IRS: $2V_S$; IGU: $1,5V_S$
Argilla	1,8 - 2,0	1,2	IRS: $(2,5 - 3)V_S$; IGU: $(1,5-2)V_S$
Marne	1,8	1,1 - 1,2	$(1,5 - 2)V_S$ per strati compatti
Calcari marnosi	1,8	1,1 - 1,2	$(2 - 6)V_S$ o più per strati fratturati
Calcari alterati o fratturati	1,8	1,1 - 1,2	
Roccia alterata e/o fratturata	1,2	1,1	$(1,1-1,5)V_S$ per strati poco fratturati $2V_S$ o più per strati fratturati

CARICO LIMITE

Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

Determinazione della resistenza unitaria, s

Terreno	Tipo di iniezione	
	IRS	IGU
Da ghiaia a sabbia limosa	SG1	SG2
Limo e argilla	AL1	AL2
Marna, calcare marnoso, calcare tenero fratturato	MC1	MC2
Roccia alterata e/o fratturata	$\geq R1$	$\geq R2$

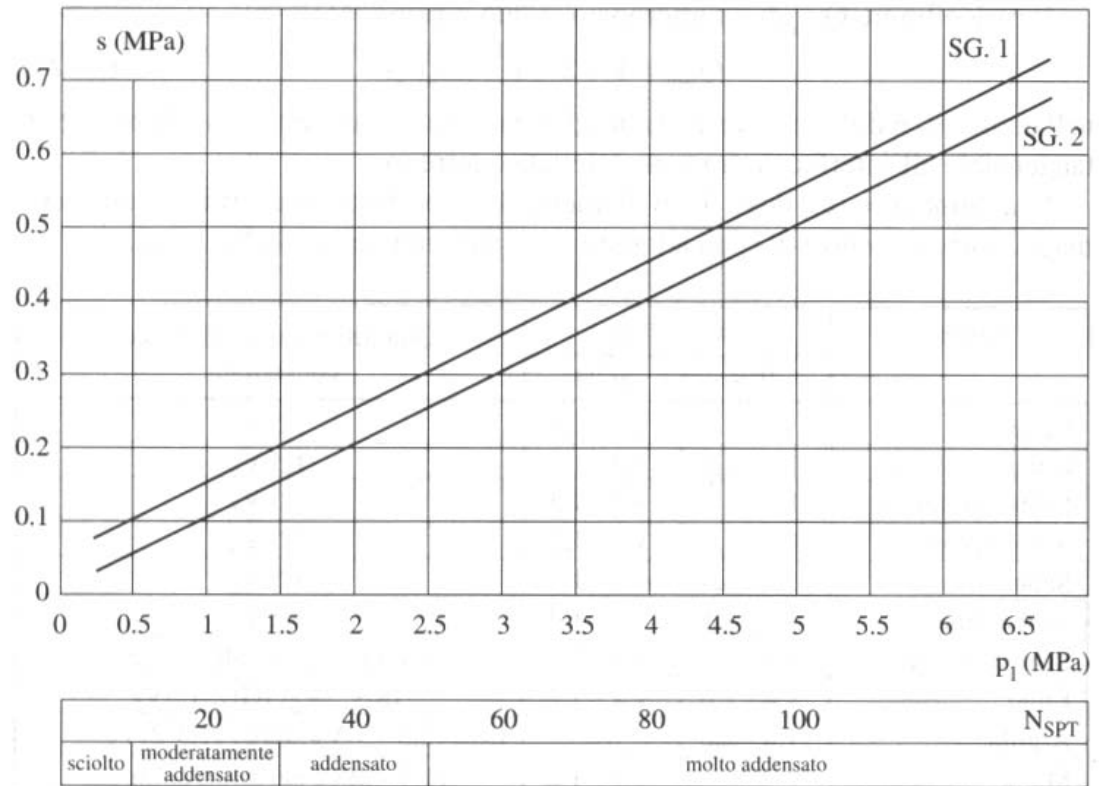
CARICO LIMITE

Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

CARICO LIMITE

Sabbie limose
-
Ghiaie



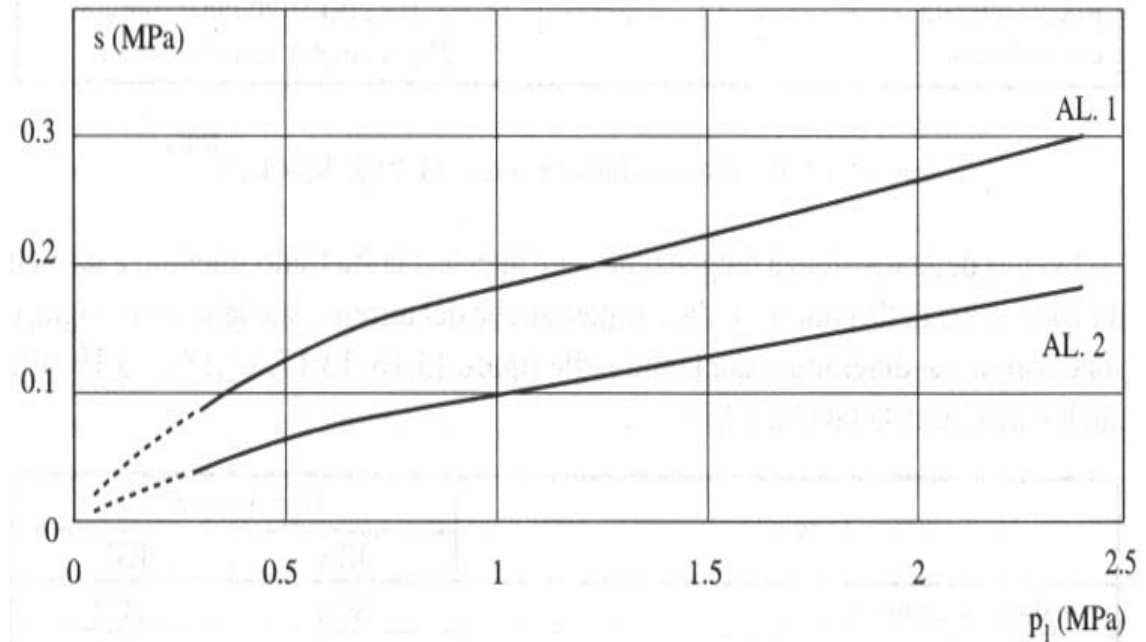
CARICO LIMITE

Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

CARICO LIMITE

Argille
-
limi



4		8	15	30	N_{SPT}
molle	moderat. consistente	consistente	molto consistente		dura

CARICO LIMITE

Pali soggetti a forze orizzontali

Broms (1964)

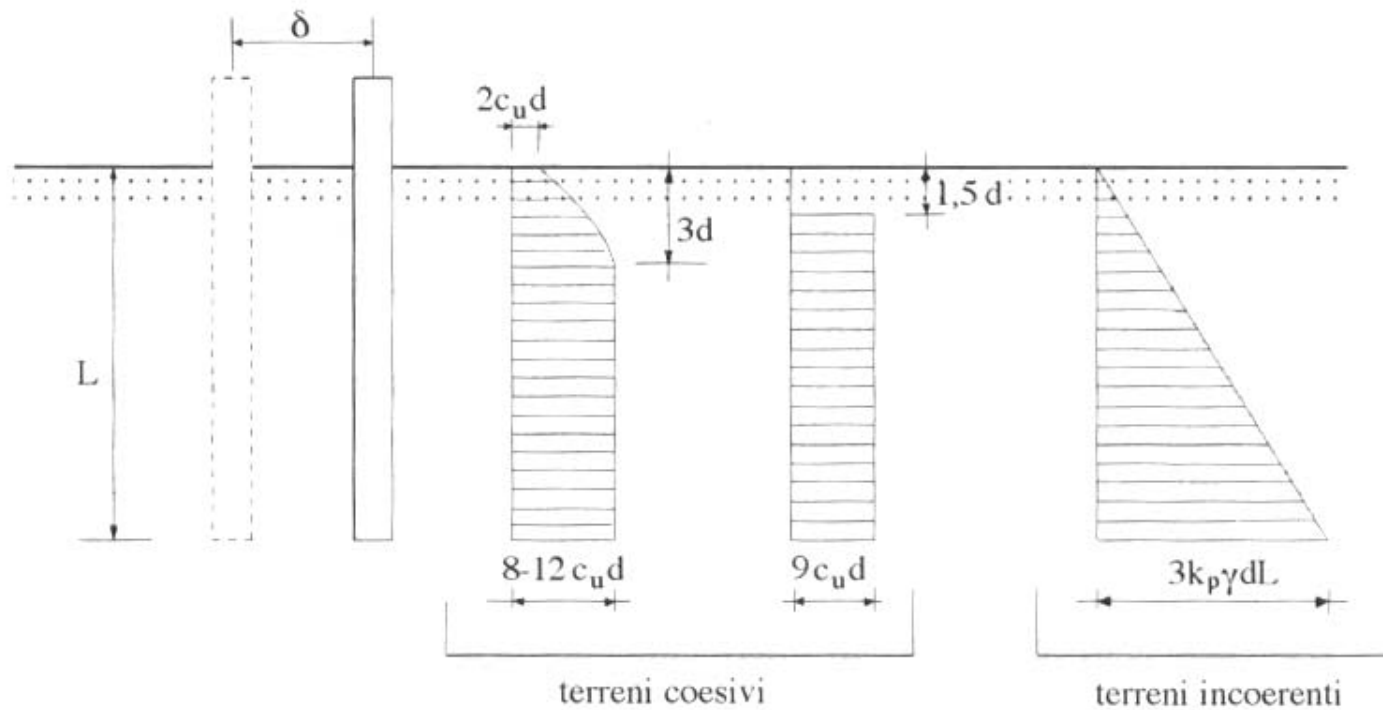
- **terreno rigido – plastico**
- **palo verticale**
- **terreno omogeneo**
- **palo rigido – plastico**

CARICO LIMITE

Pali soggetti a forze orizzontali

Broms (1964): reazioni del terreno (U, D)

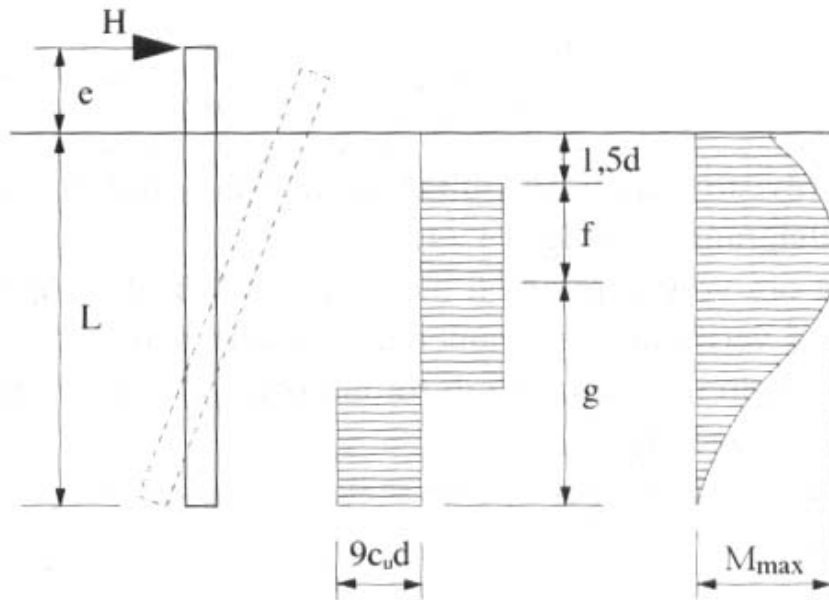
CARICO LIMITE



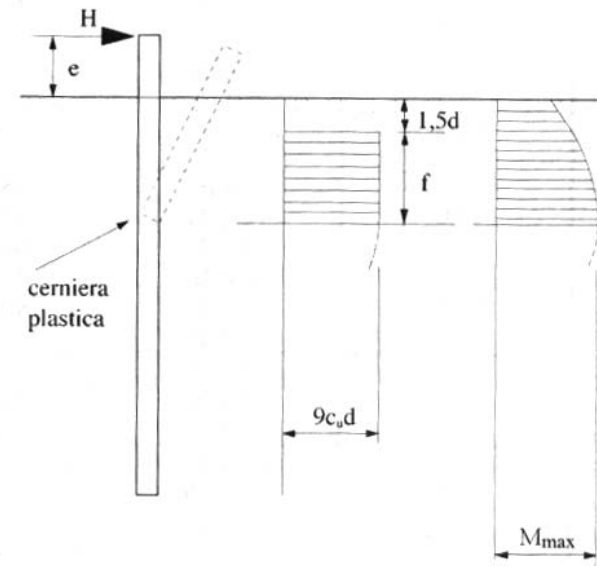
CARICO LIMITE

Pali soggetti a forze orizzontali Meccanismi per pali liberi in testa (U)

CARICO LIMITE



corti



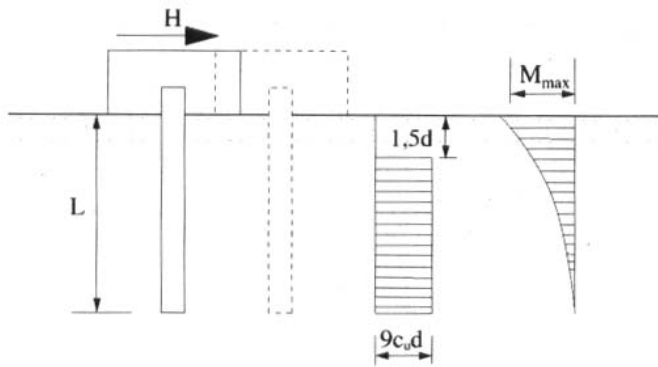
lunghi

CARICO LIMITE

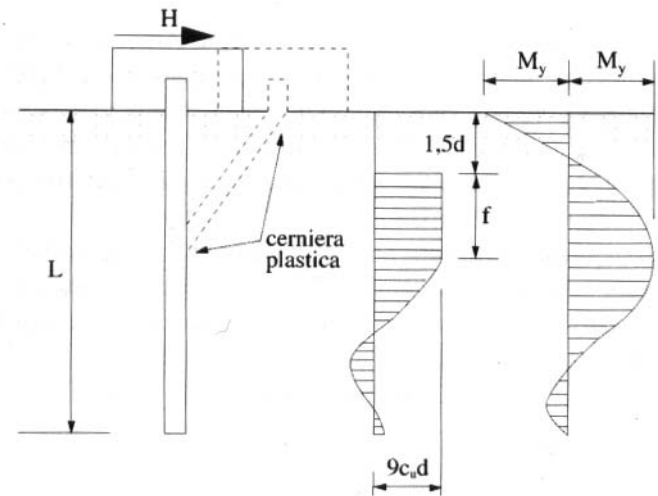
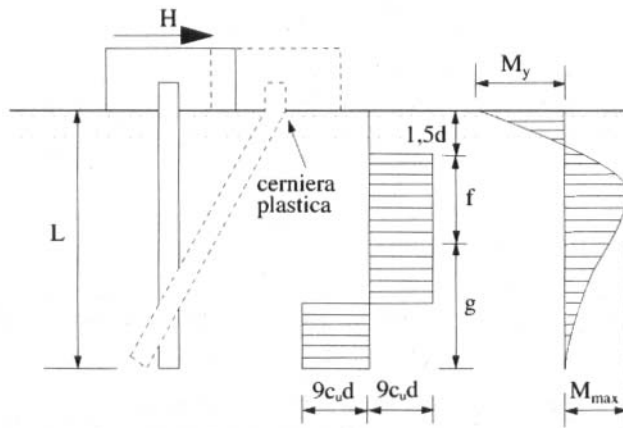
Pali impediti di ruotare in testa (U)

CARICO LIMITE

corti

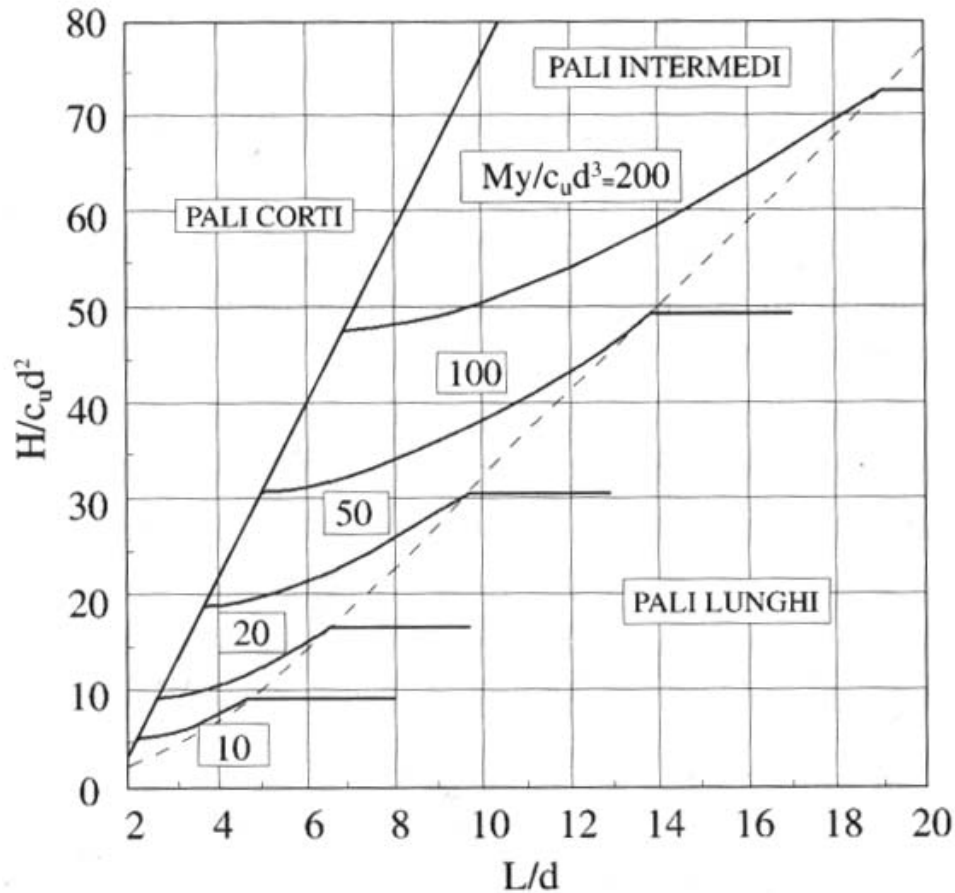


intermedi



lunghi

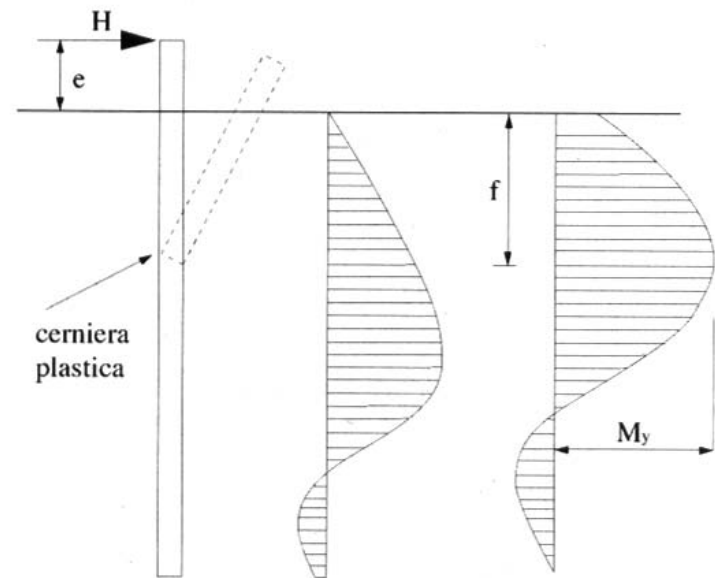
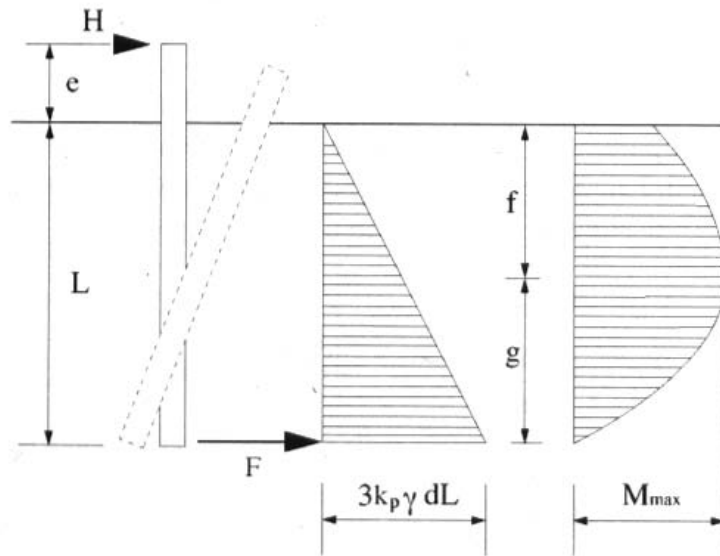
Abaco per la determinazione di H_{lim} Pali impediti di ruotare in testa (U)



CARICO LIMITE

Pali soggetti a forze orizzontali Meccanismi per pali liberi in testa (D)

CARICO LIMITE

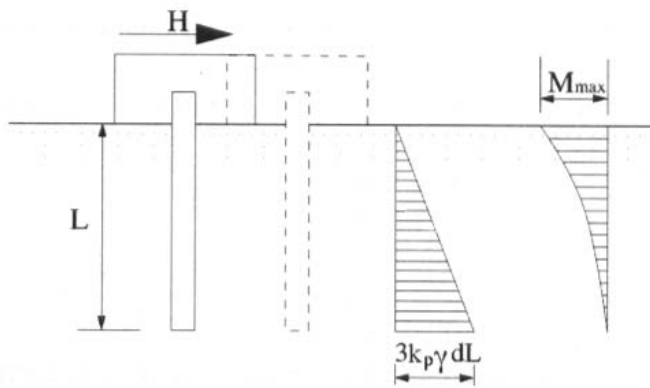


CARICO LIMITE

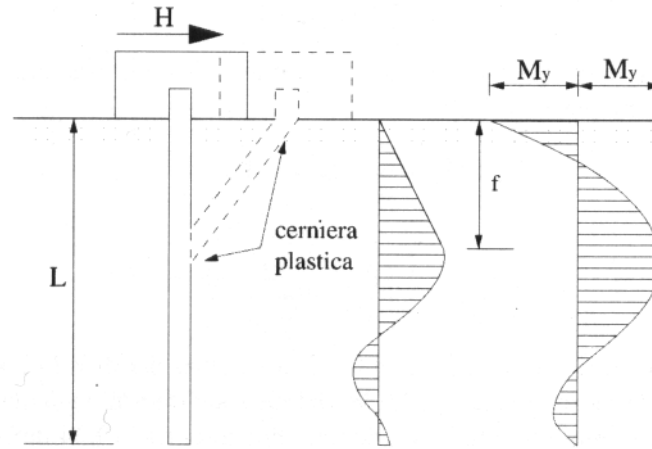
Pali impediti di ruotare in testa (D)

CARICO LIMITE

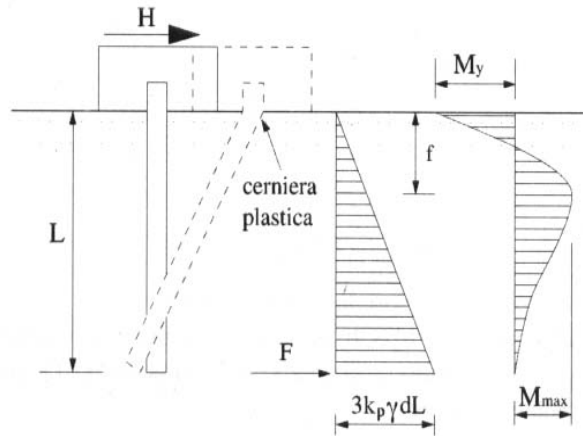
corti



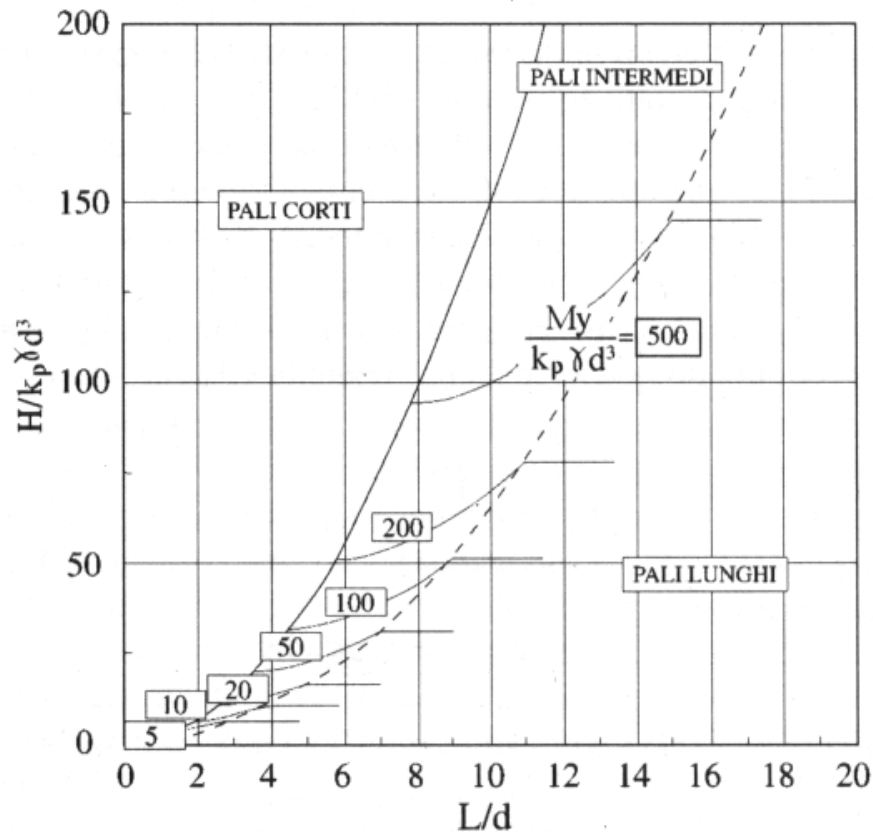
lunghi



intermedi



Abaco per la determinazione di H_{lim} Pali impediti di ruotare in testa (D)



PROVE DI CARICO

Prove di collaudo: $Q_{\max} > 1.5 Q_{SLE}$

Prove di progetto: $Q_{\max} > 2.0 Q_{SLE}$

Numero delle prove di collaudo: in funzione del numero di pali della palificata, minimo 2 prove

Prove pilota su pali di grande diametro: se opportunamente strumentati, palo con d minore, stessa lunghezza e tecnologia

“Ai fini della valutazione dell’integrità del palo possono essere eseguiti controlli non distruttivi.” (i.e. solo collaudo)

COLLAUDO STATICO (NT, 2008)

“Il Collaudatore statico controllerà altresì che siano state messe in atto le prescrizioni progettuali e siano stati eseguiti i controlli sperimentali.”

“*e)* esame del modello geologico e delle indagini geotecniche eseguite nelle fasi di progettazione e costruzione, e delle prove di carico sul terreno e sui pali, come prescritte nel presente testo;

f) controllo dei verbali e dei risultati delle prove di carico fatte eseguire dal Direttore dei lavori su componenti strutturali o sull’opera.”

PROVE DI CARICO

Considerazioni generali

Per le prove di progetto la tecnologia e le modalità esecutive devono essere le stesse previste per la costruzione

Le prove di progetto devono essere eseguite in un sito ben caratterizzato

Le prove di collaudo devono essere eseguite su pali scelti a caso dopo la costruzione

I pali battuti in terreni coesivi devono essere sottoposti a prova dopo la dissipazione delle Δu dovute alla battitura

PROVE DI CARICO
Applicazione del carico

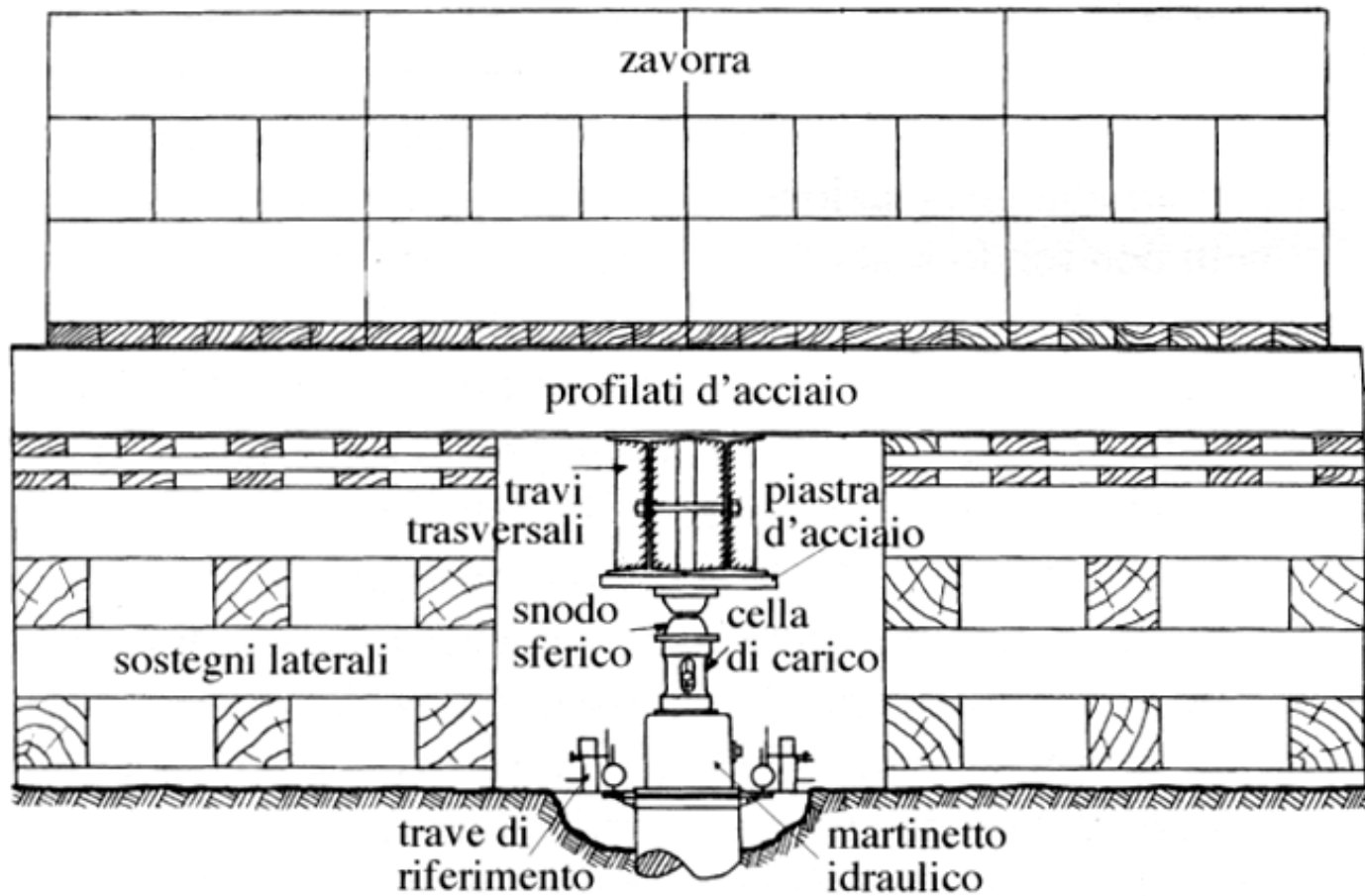
Martinetto idraulico

Carico massimo, corsa, compensazione del cedimento

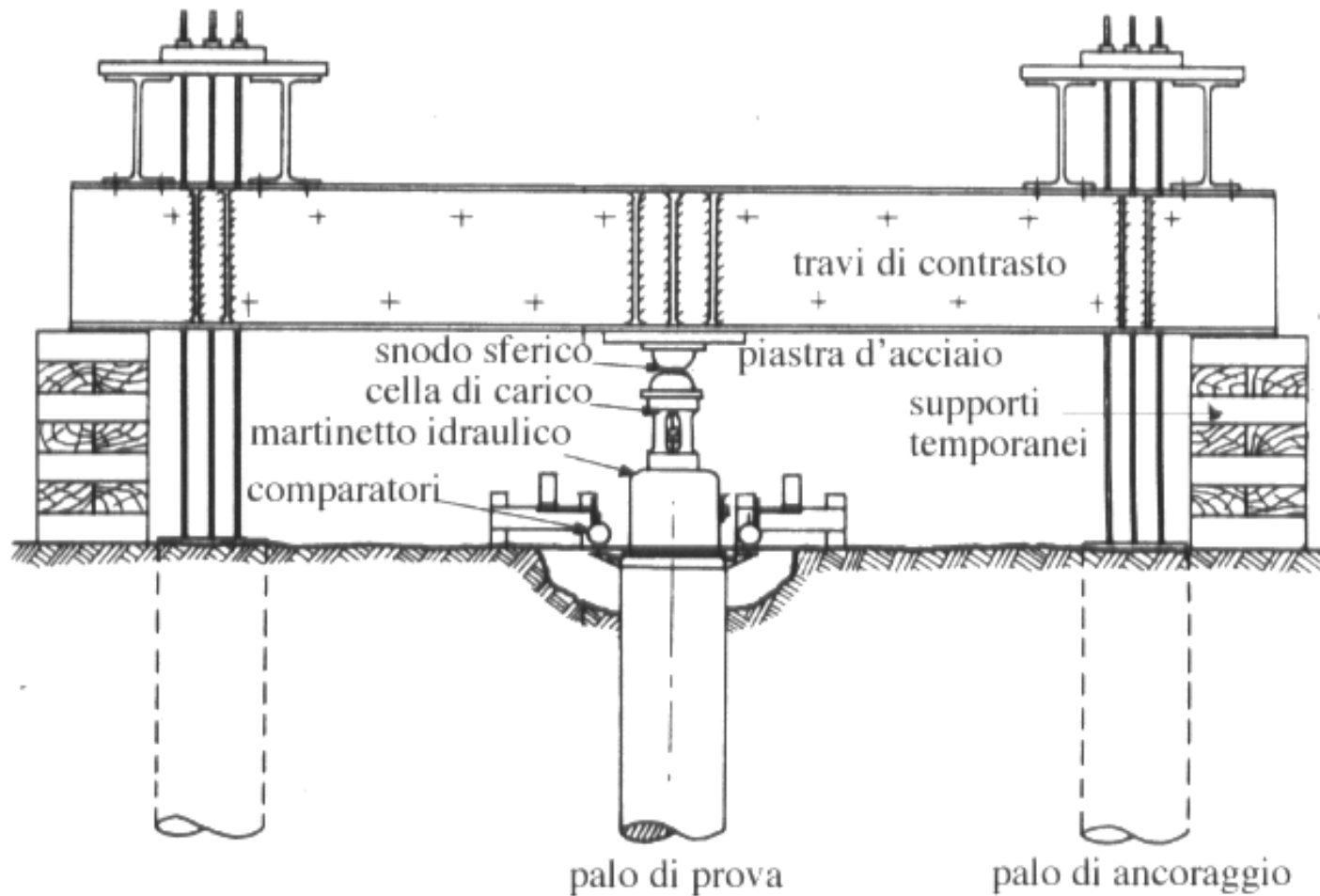
Contrasto

Zavorra (cls, piombo, ghisa), pali, ancoraggi

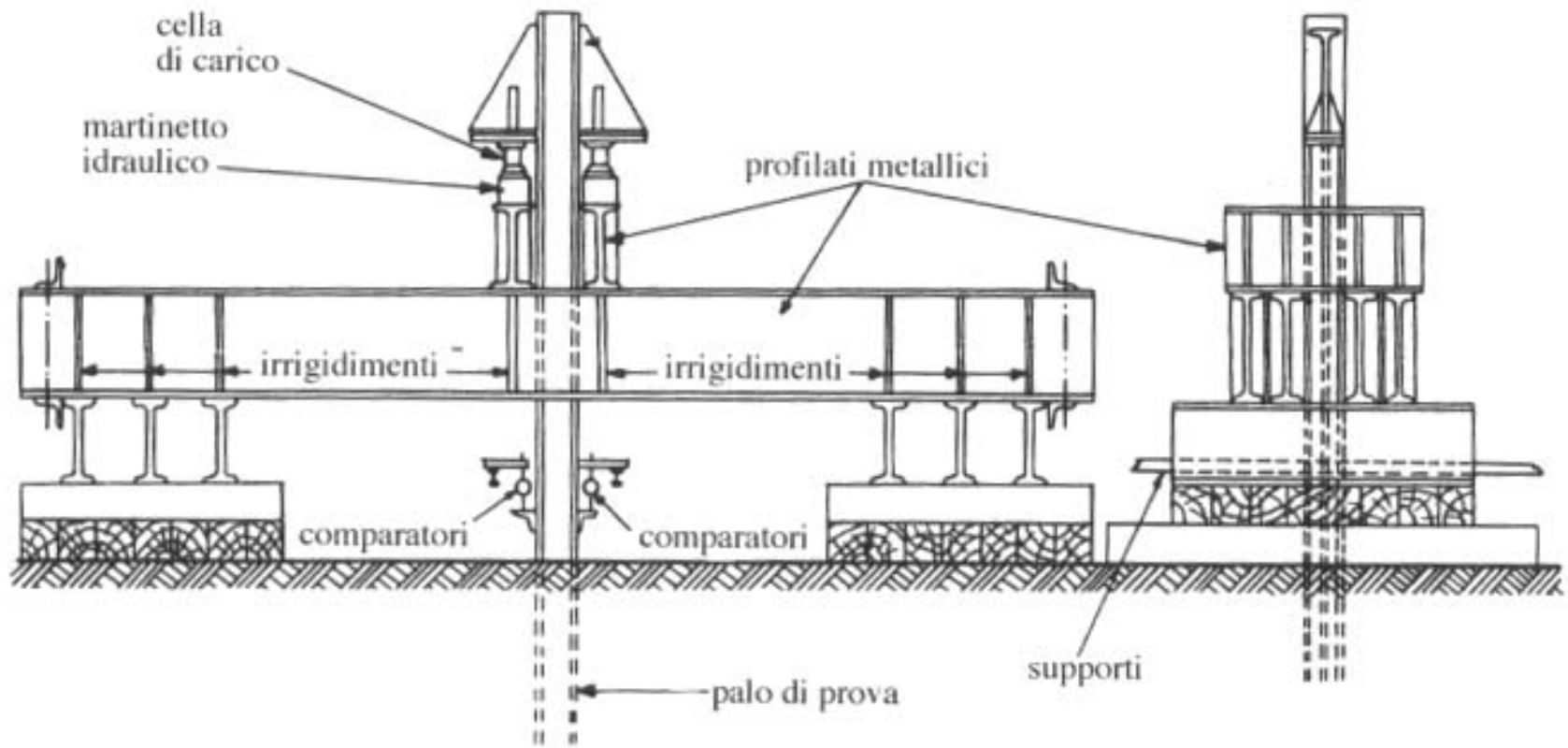
Schema di prova con zavorra



Schema di prova con pali di ancoraggio



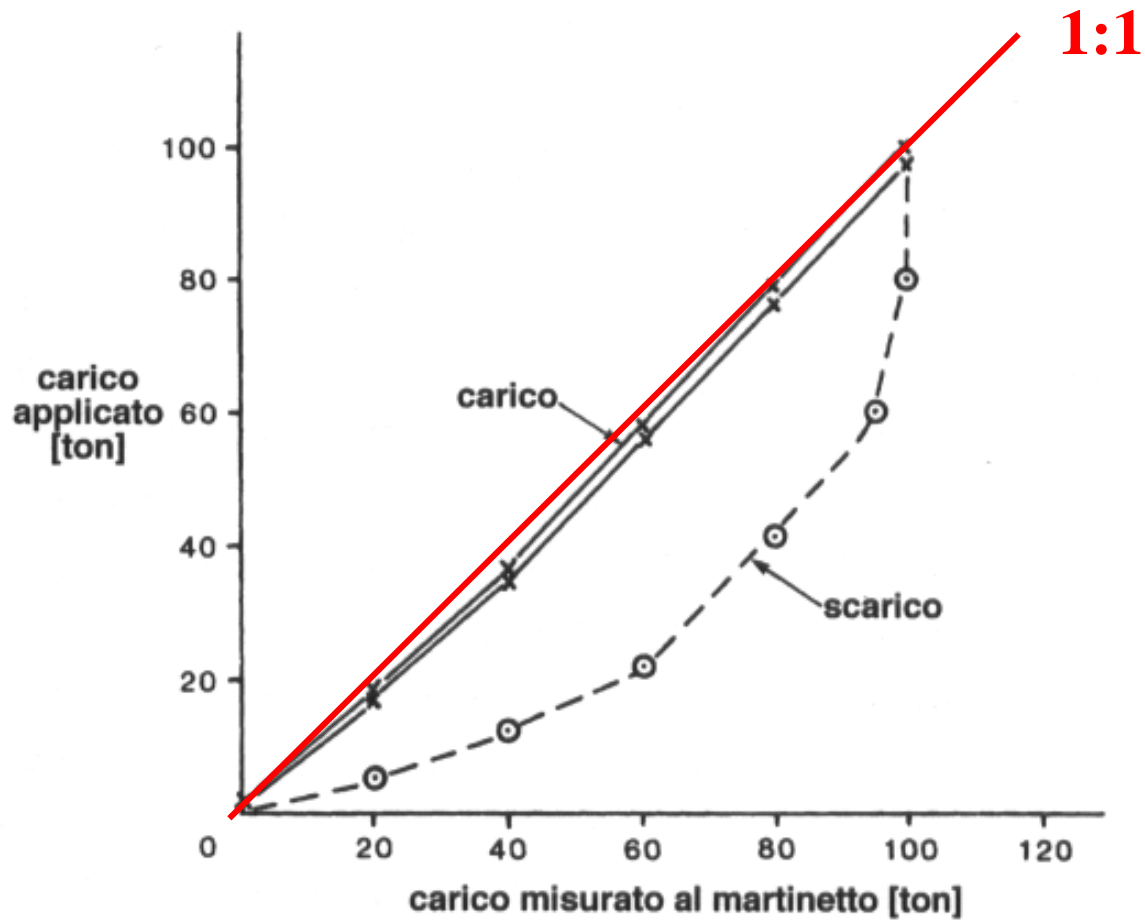
Schema di prova di carico a trazione



Misura del carico

- **Misura della pressione idraulica nel martinetto (!!!)**
 - **Cella di carico idraulica (misura di pressione)**
 - **Colonna di carico (misura di spostamento)**
 - **Anello dinamometrico (misura di spostamento)**
 - **Celle di carico a strain gauges o corda vibrante (misura di resistenza elettrica o frequenza)**
-

Misura del carico



Misura degli spostamenti della testa

Comparatori centesimali

Supporti infissi a distanza dal palo e dai supporti della zavorra ($> 3m$ e $3d$)

Escursioni termiche (osservazione di 12 h)

Corsa utile dei comparatori

Minimo tre comparatori

Livellazione ottica di precisione

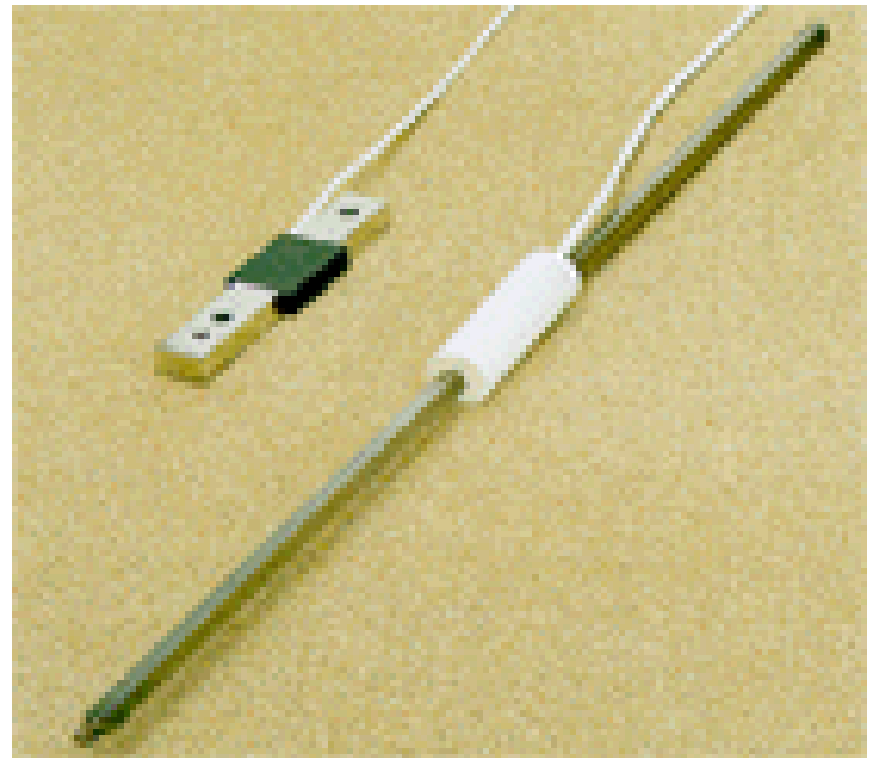
Minimo tre punti di misura

Livello topografico (0.01 mm, lamina a facce pian parallele)

Punto “fisso” sufficientemente lontano

Misura lungo il fusto del palo

Barrette estensimetriche



Sintesi delle informazioni disponibili

- Geometria del palo e tecnica di esecuzione
 - Carico applicato
 - Spostamenti della testa del palo
 - Spostamenti lungo il fusto (se strumentato)
-

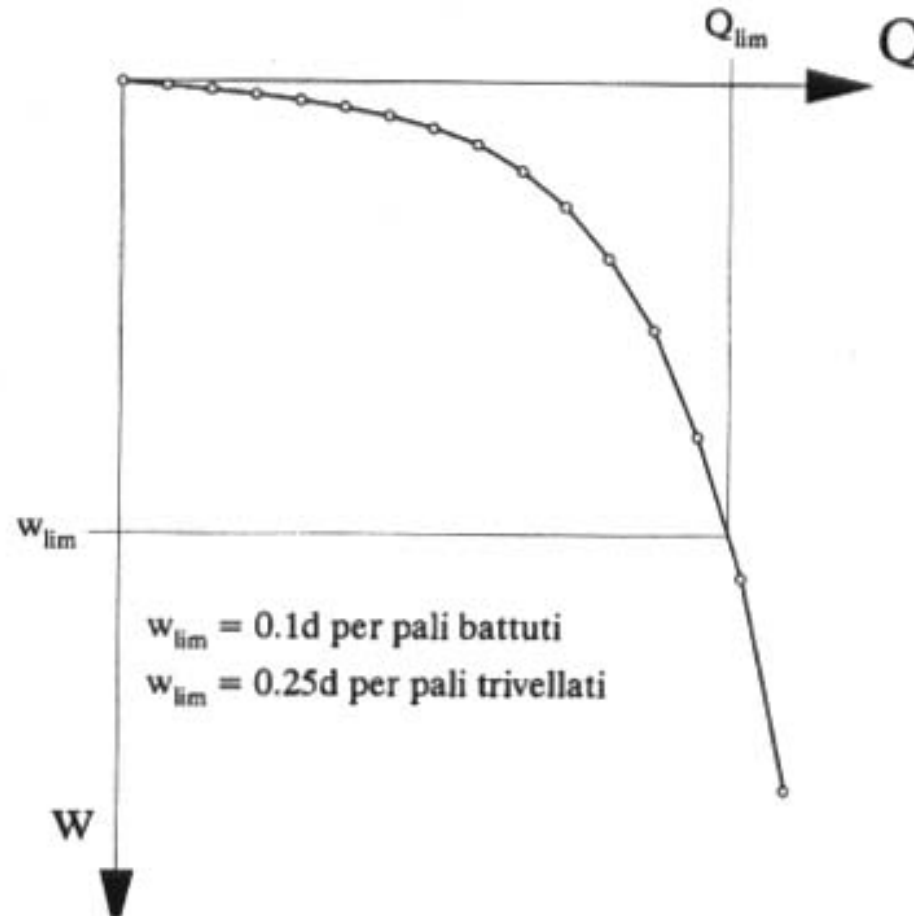
PROVE DI CARICO

Informazioni ricavabili dalla prova

- Curva carichi – cedimenti
 - Carico limite del palo
 - Deformazioni lungo il fusto del palo
 - Carico assiale lungo il fusto del palo
 - Curve di mobilitazione della resistenza laterale ed alla punta
-

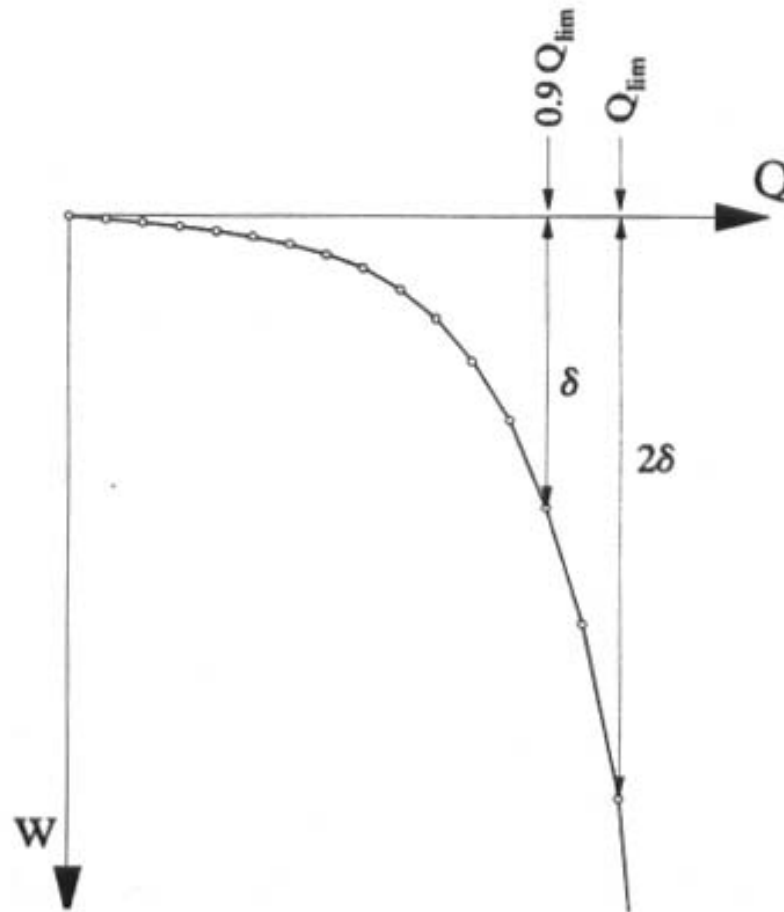
Interpretazione delle misure

Determinazione del carico limite (1)

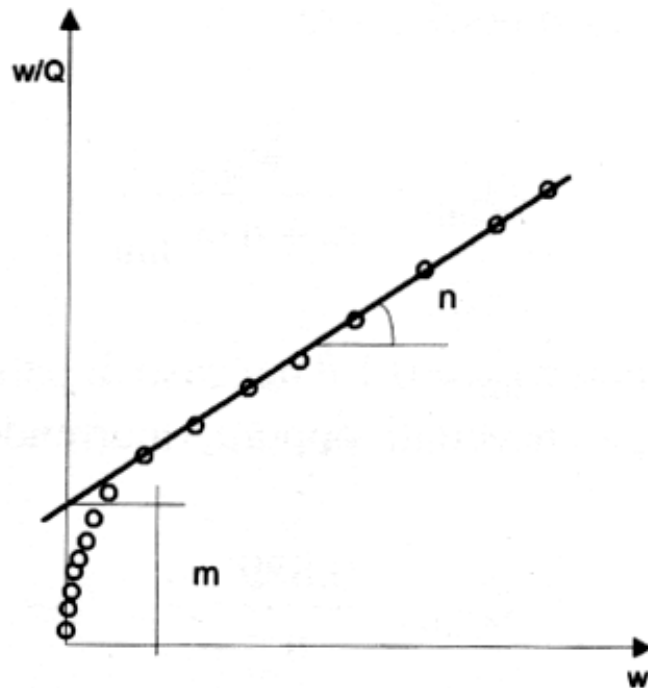


Interpretazione delle misure

Determinazione del carico limite (2)



Interpretazione delle misure
Determinazione del carico limite (3)
Interpretazione iperbolica



$$Q = \frac{w}{m + n \cdot w}$$

Interpretazione delle misure Determinazione del carico limite

Suggerimenti per l'uso dell'interpretazione iperbolica

$$Q_{\text{lim}} = \frac{0.9}{n}$$

Taglio dell'asintoto

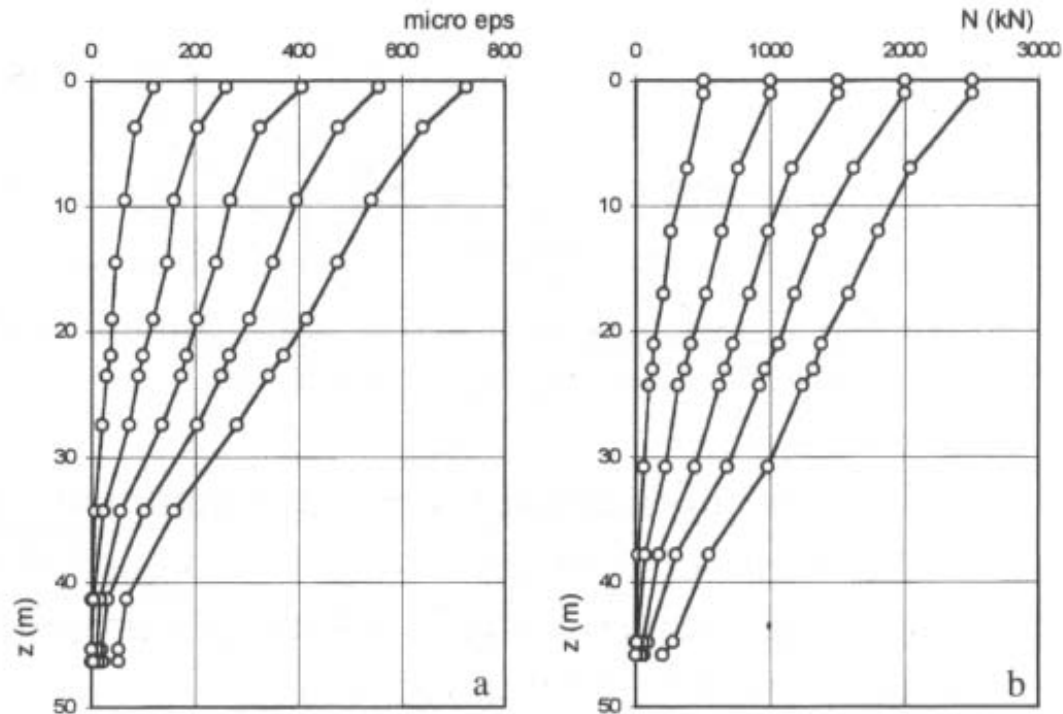
$$Q_{\text{lim}} = \frac{W_{\text{lim}}}{m + n \cdot W_{\text{lim}}}$$

Criterio del cedimento (0.1 – 0.25d)

$$Q_{\text{lim}} = \frac{0.889}{n}$$

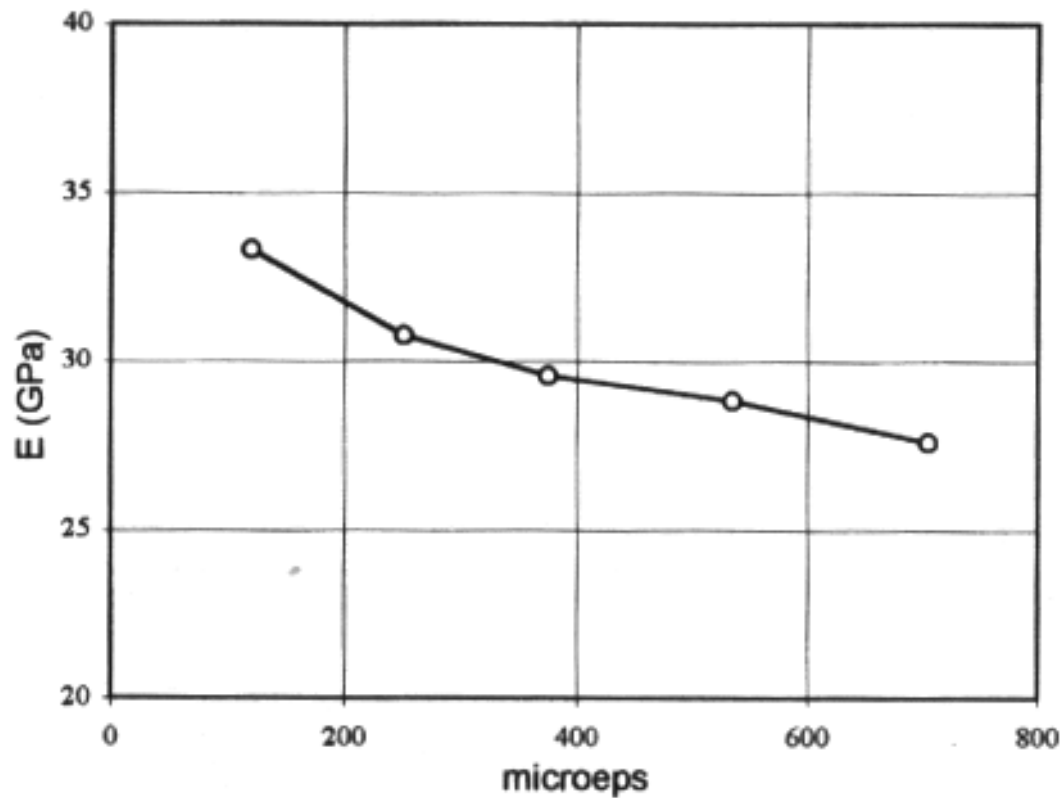
Criterio del raddoppio del cedimento

Interpretazione delle misure Palo strumentato

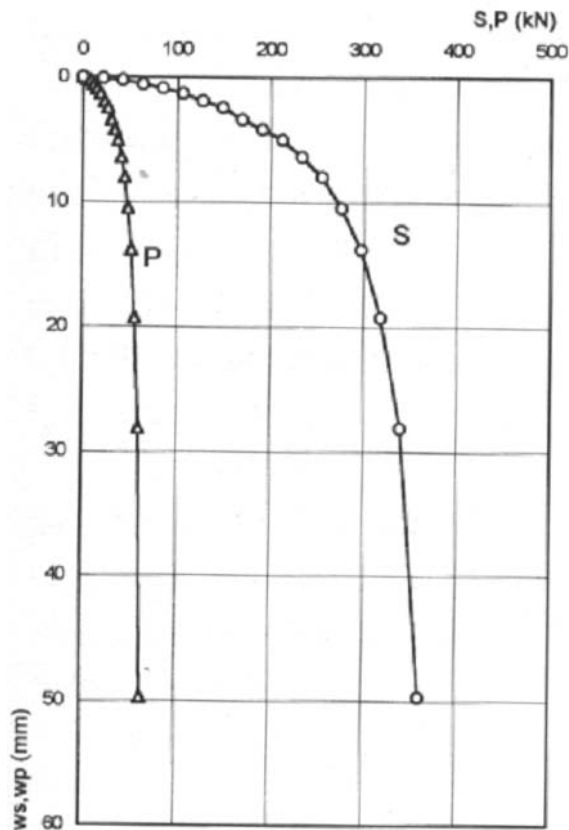


Per passare da ε ad N devo conoscere E e la sezione

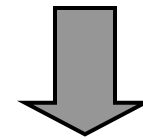
Interpretazione delle misure Palo strumentato



Interpretazione delle misure Palo strumentato



Curve di trasferimento di P ed S,
ma anche di p ed s



Parametri di progetto!!

Prove ecometriche

