

# **FONDAZIONI SU PALI**

**ing. Nunziante Squeglia**

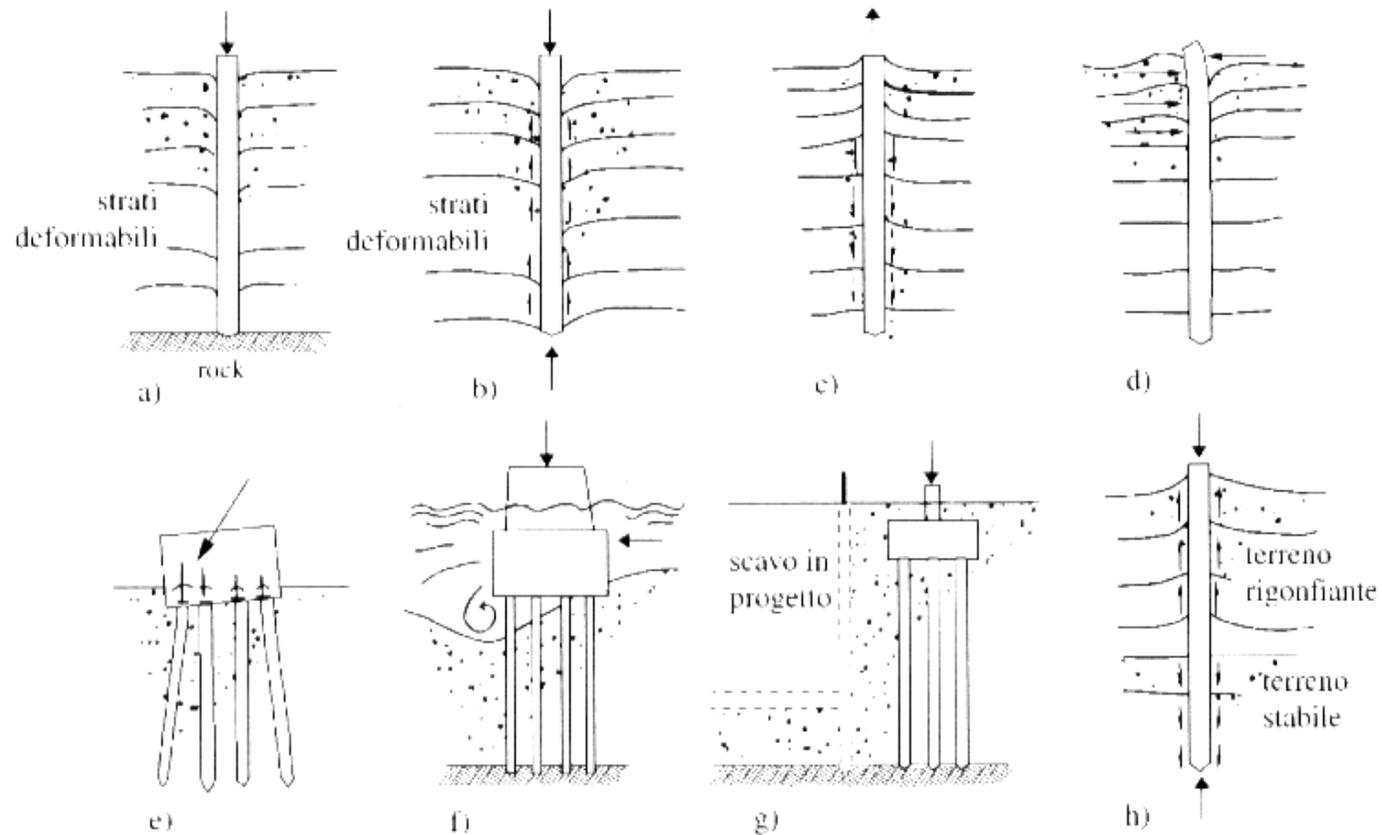
# **Cos'è un Palo?**

## **DEFINIZIONE**

**(Norme Tecniche, 2008)**

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

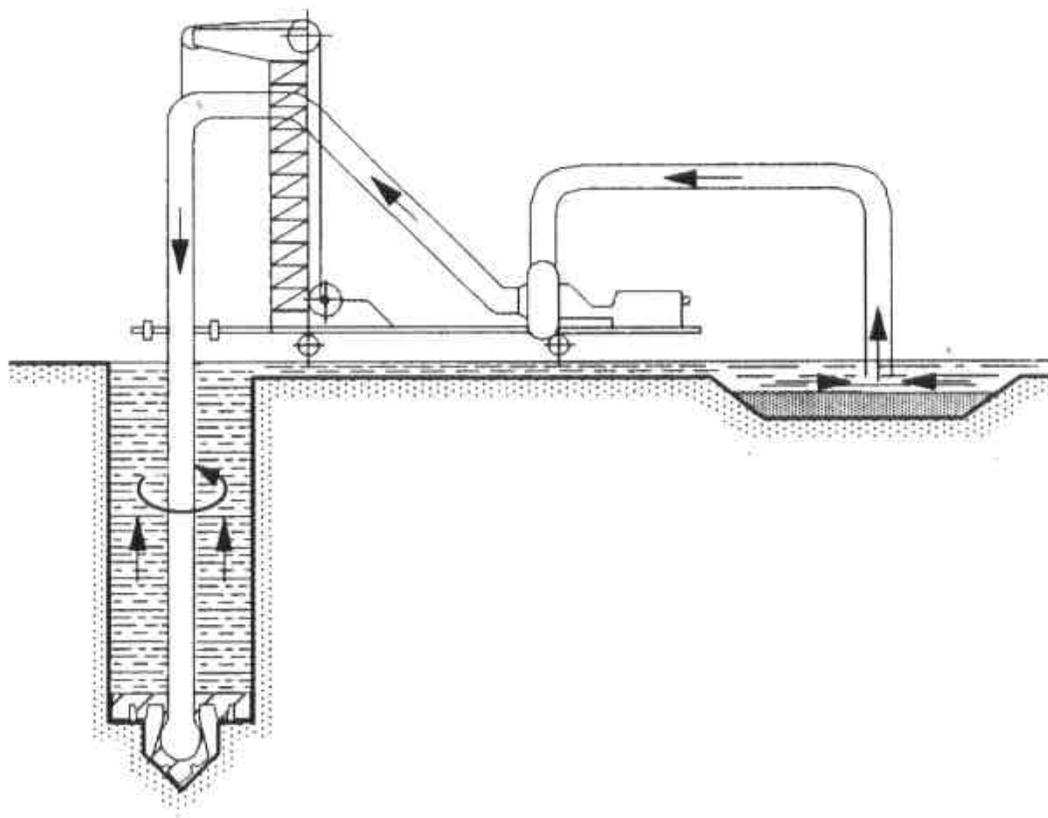
## Perché si ricorre ai pali?



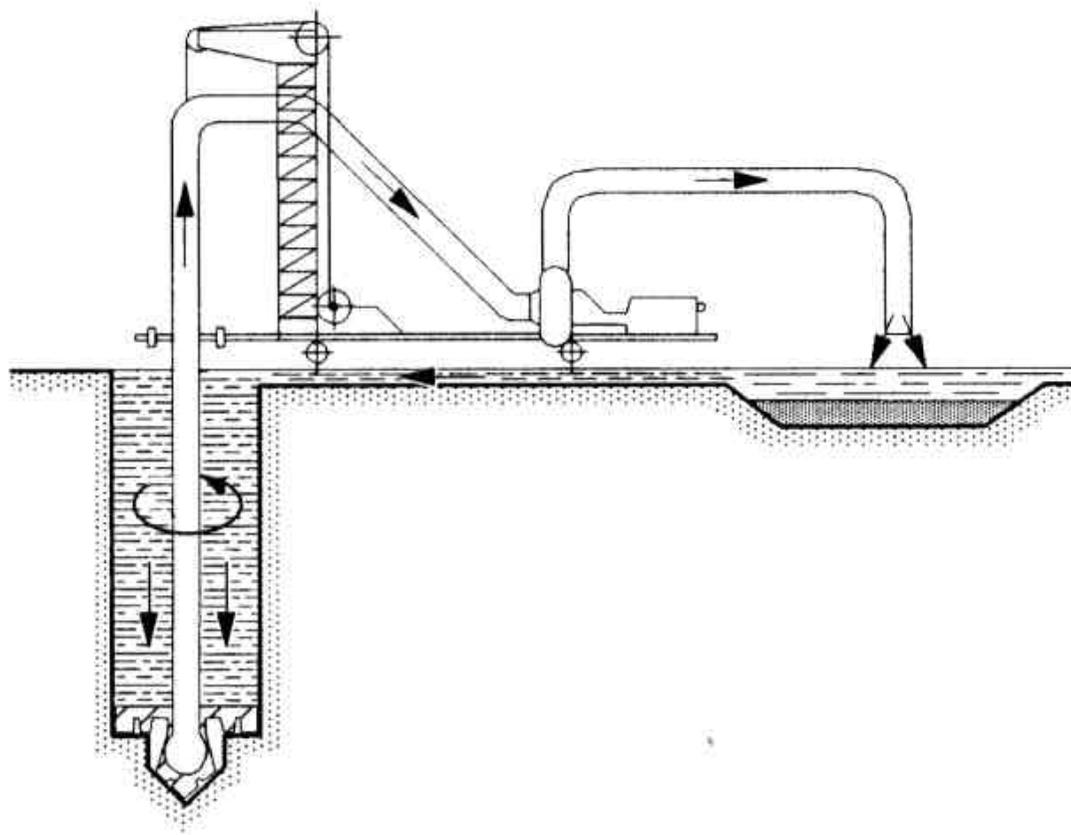
## TIPI DI PALO

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

## ESECUZIONE DELLA PERFORAZIONE TRIVELLAZIONE CON CIRCOLAZIONE DIRETTA



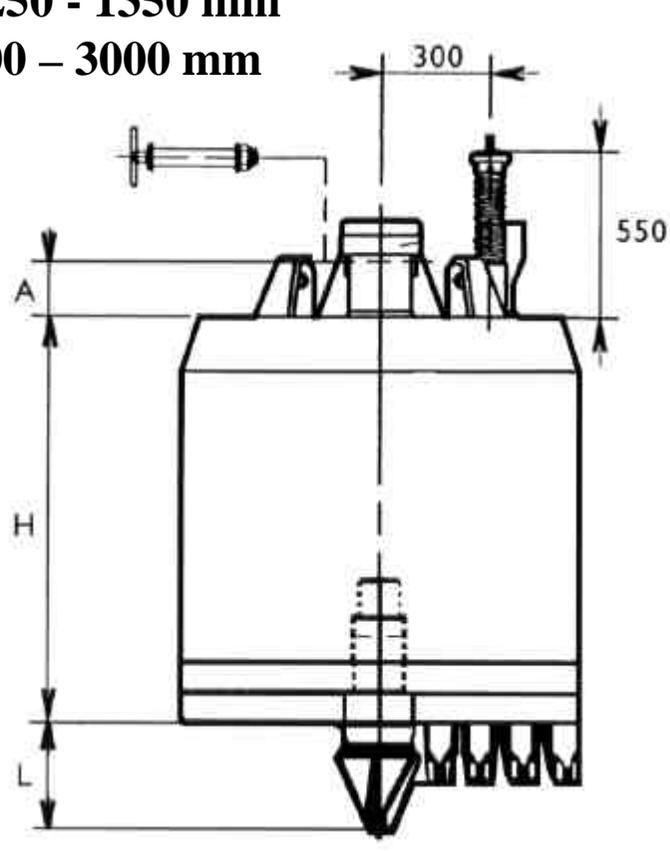
## ESECUZIONE DELLA PERFORAZIONE TRIVELLAZIONE CON CIRCOLAZIONE INVERSA



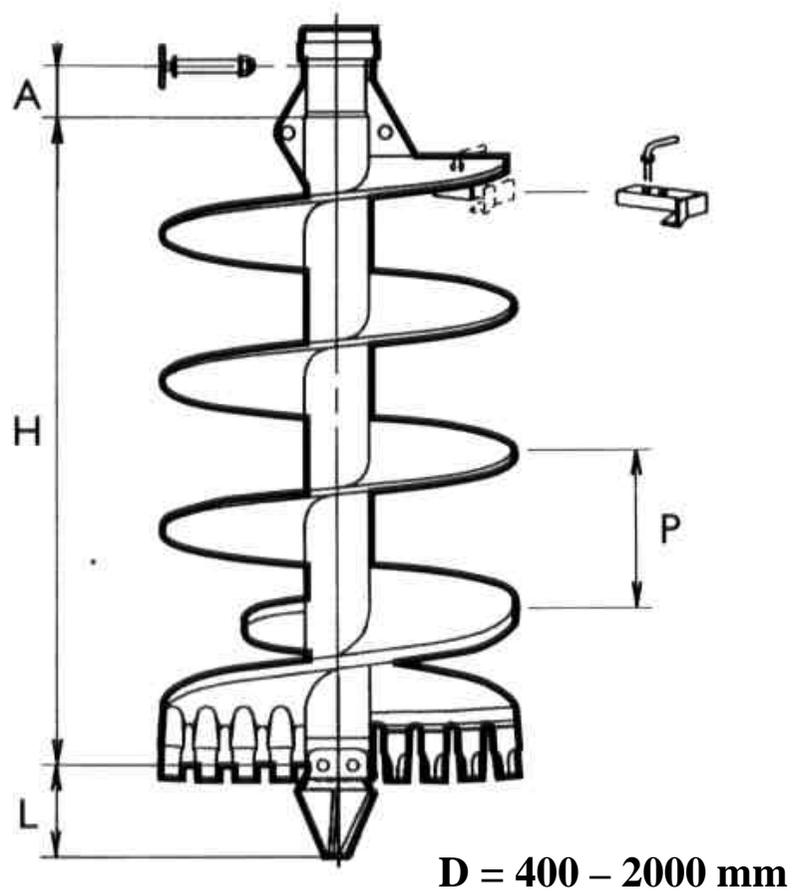
## UTENSILI DI PERFORAZIONE “BUCKET” (Secchione)

**H = 1250 - 1350 mm**

**D = 800 – 3000 mm**



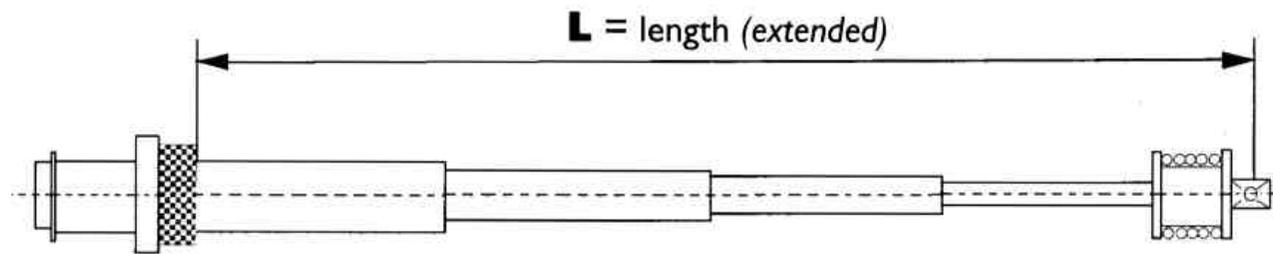
## UTENSILI DI PERFORAZIONE “AUGER” (Trivella)



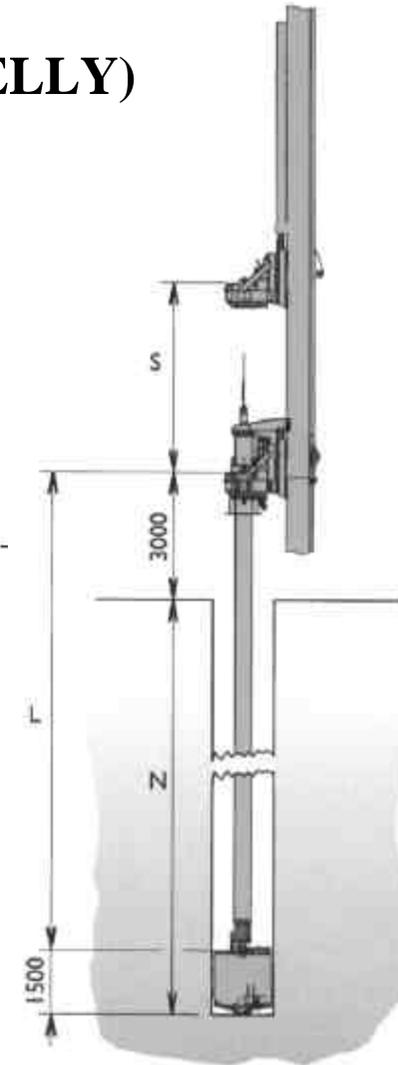
**UTENSILI DI PERFORAZIONE**  
**“AUGER” (Trivella)**  
**Espulsione del materiale estratto**



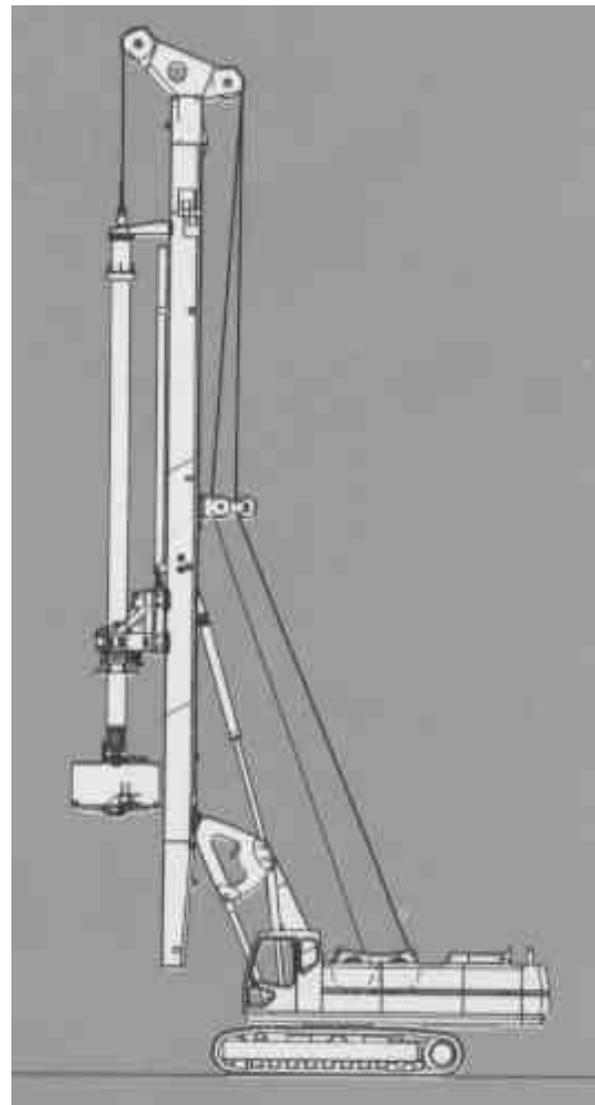
## ASTE TELESCOPICHE DI PERFORAZIONE (KELLY)



$L > 100 \text{ m}$



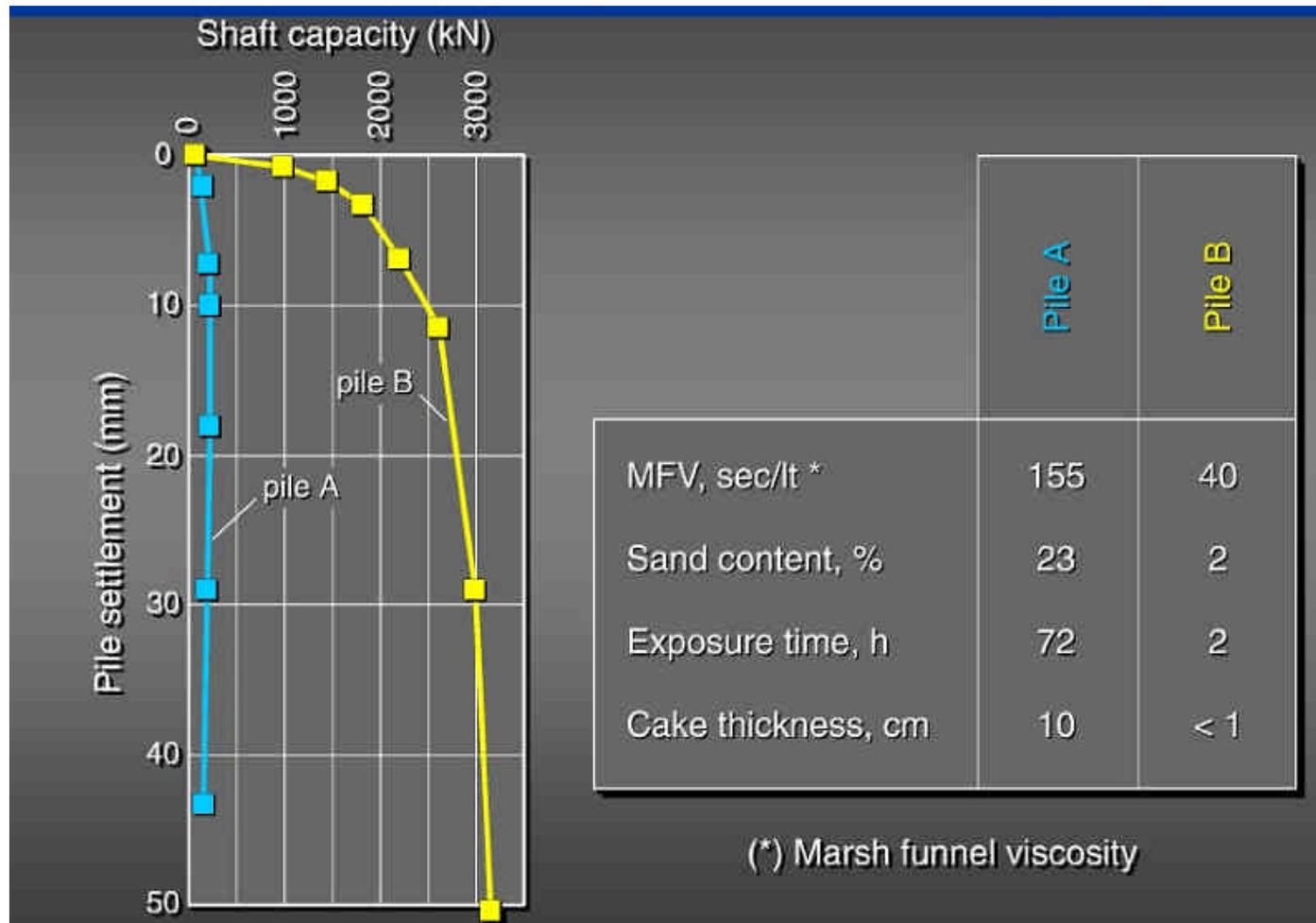
**ESEMPIO DI ATTREZZATURA  
DI PERFORAZIONE**



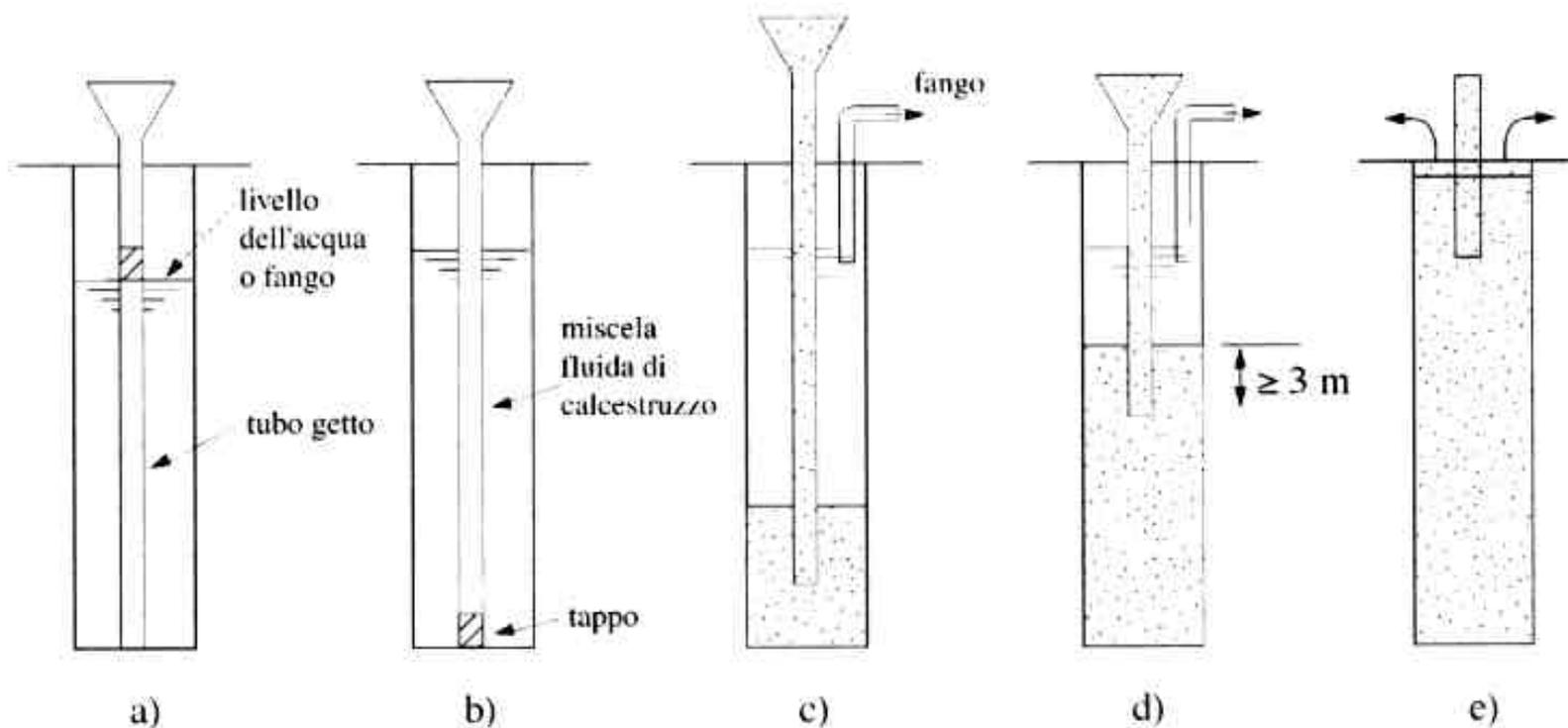
## **SOSTEGNO DELLA PERFORAZIONE**

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

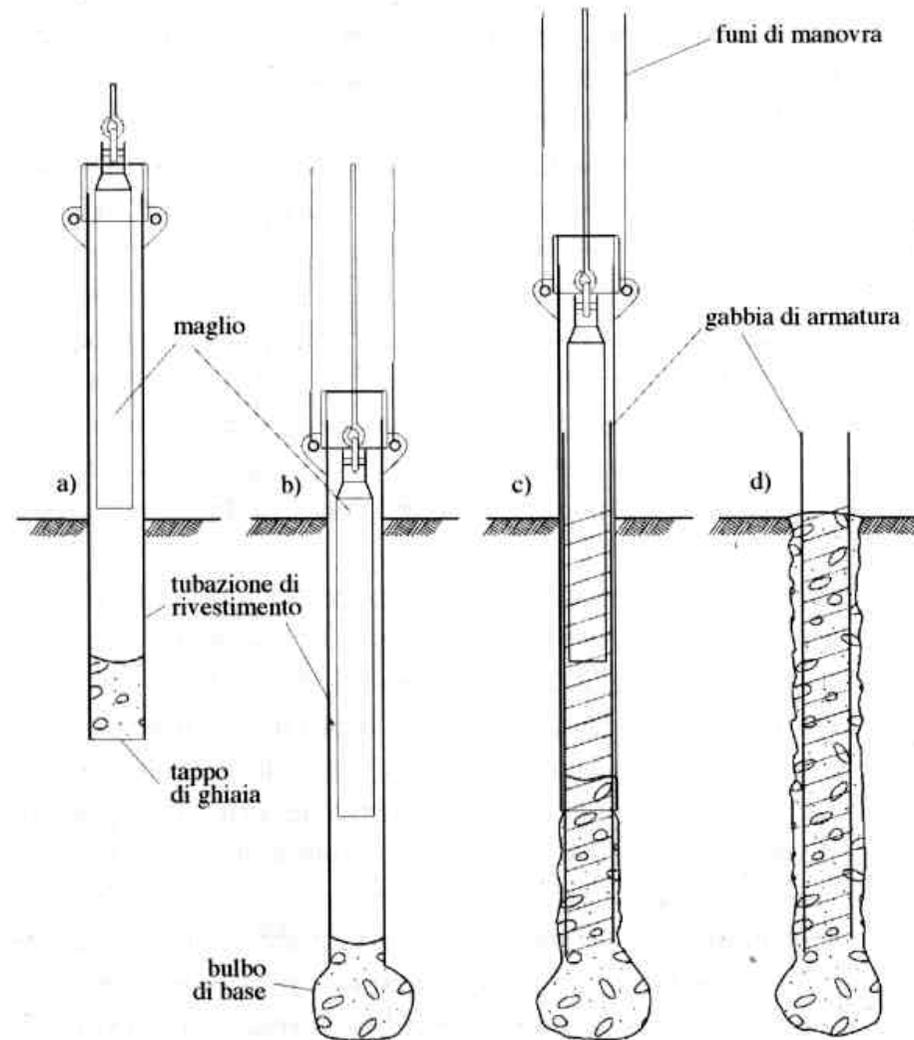
**INFLUENZA DEL FANGO BENTONITICO (Backer et Al., 1993; O'Neill & Hassan, 1994)**



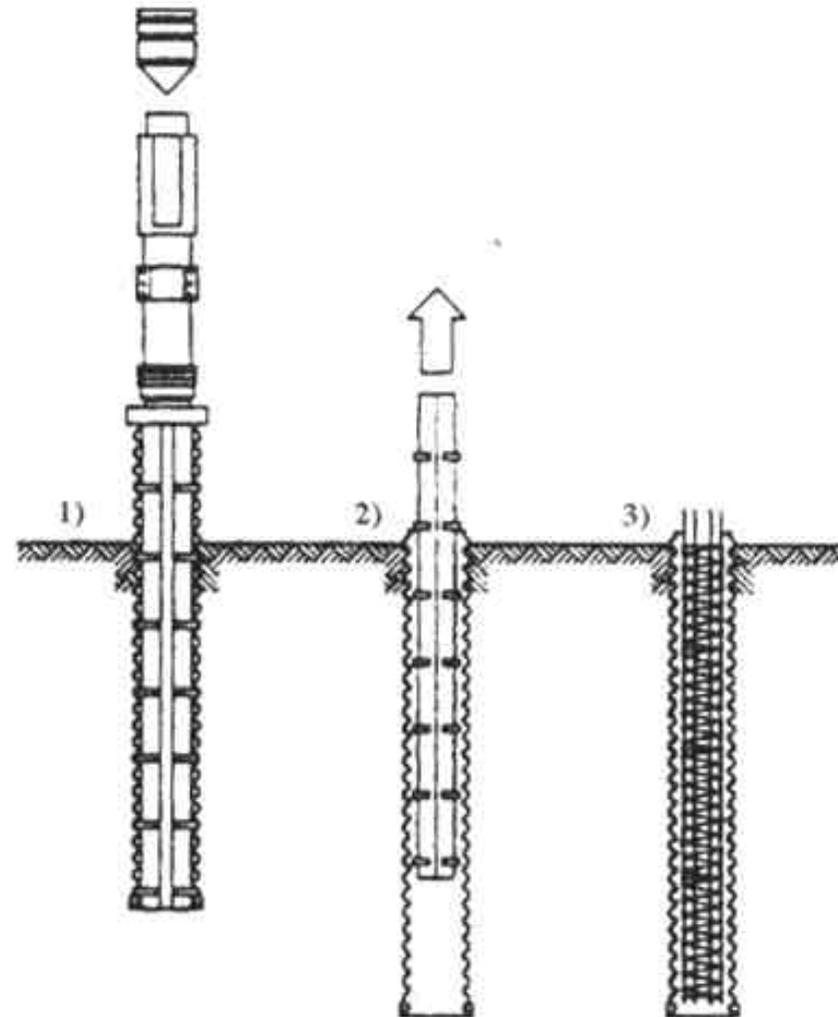
## GETTO DEL FUSTO IN CLS



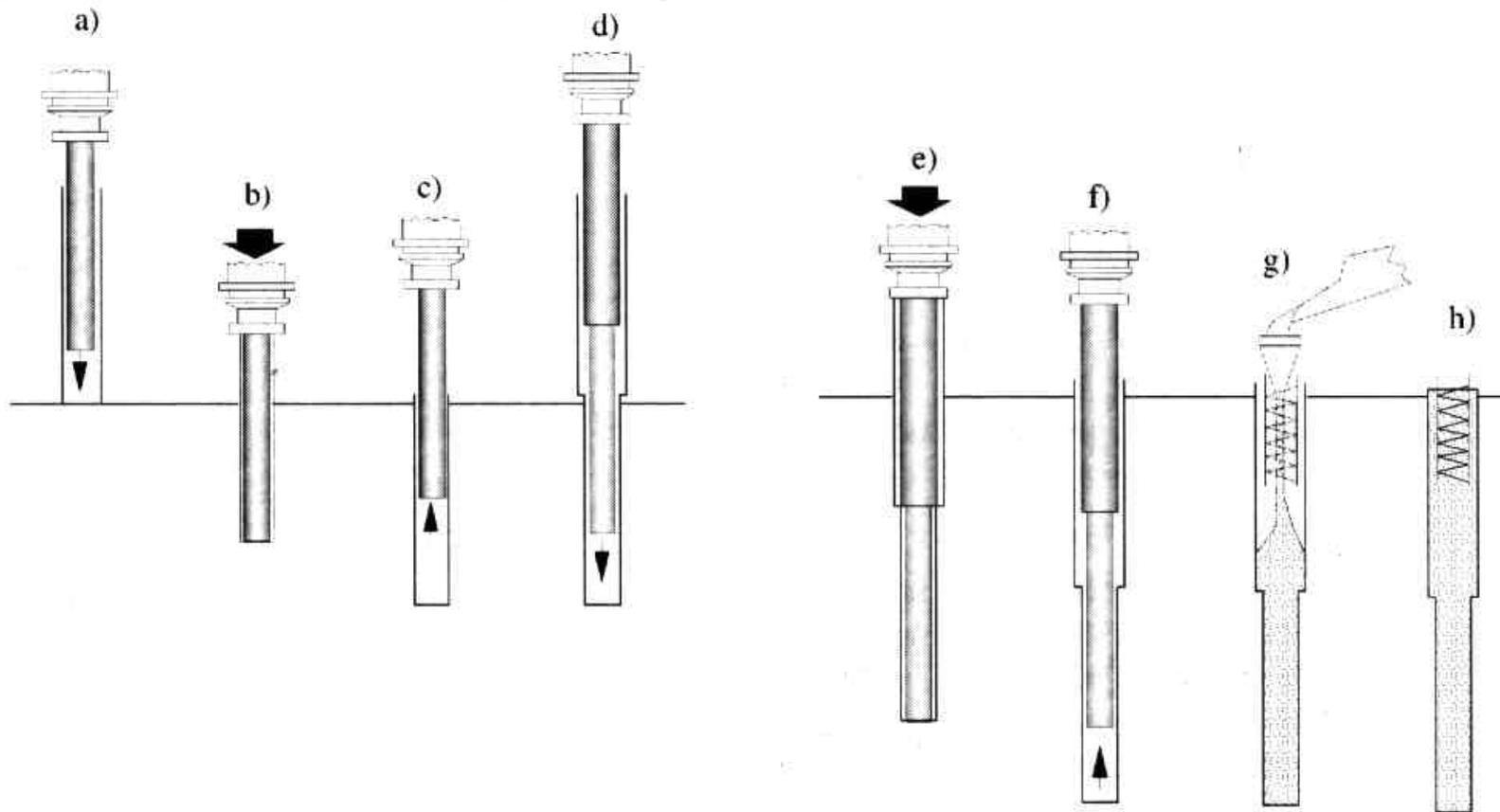
**PALO BATTUTO  
GETTATO IN OPERA  
TIPO “FRANKI”**



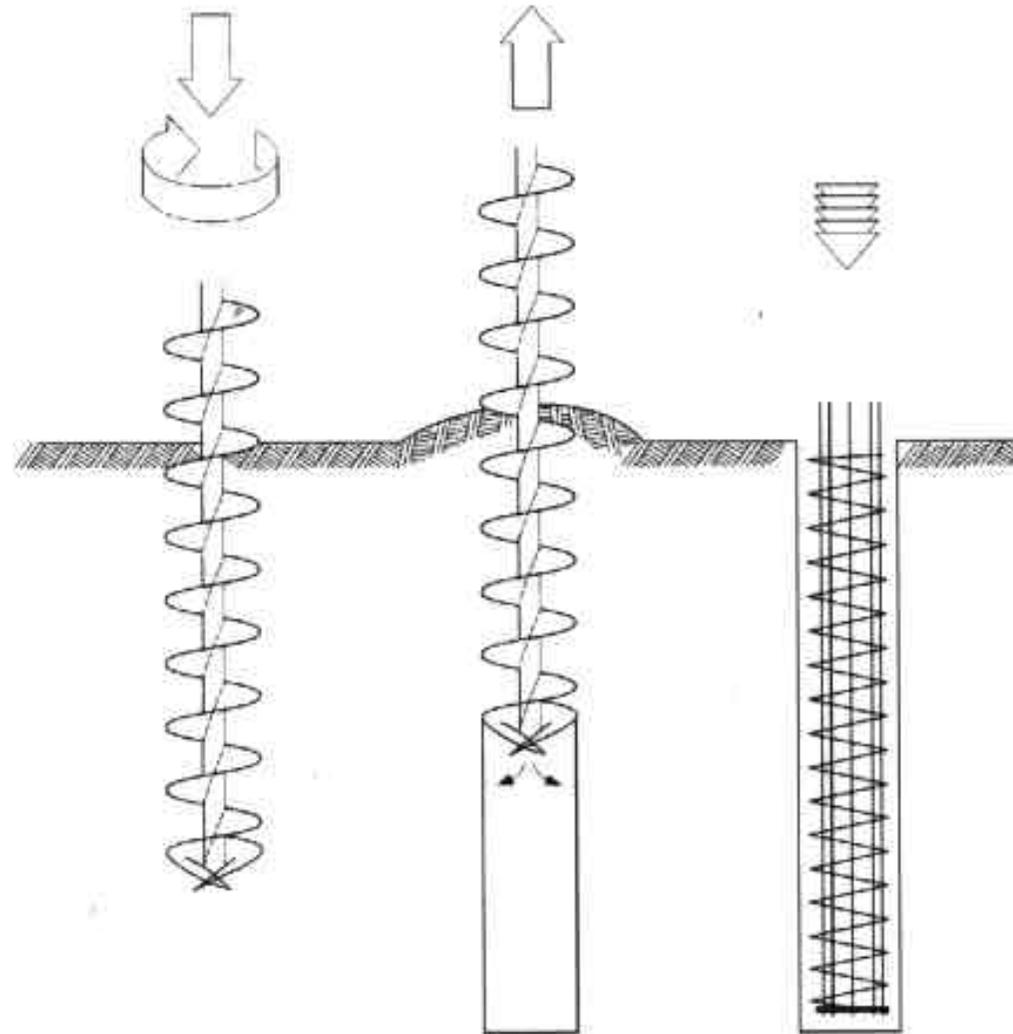
**PALO BATTUTO  
CON LAMIERINO  
TIPO “LACOR”**



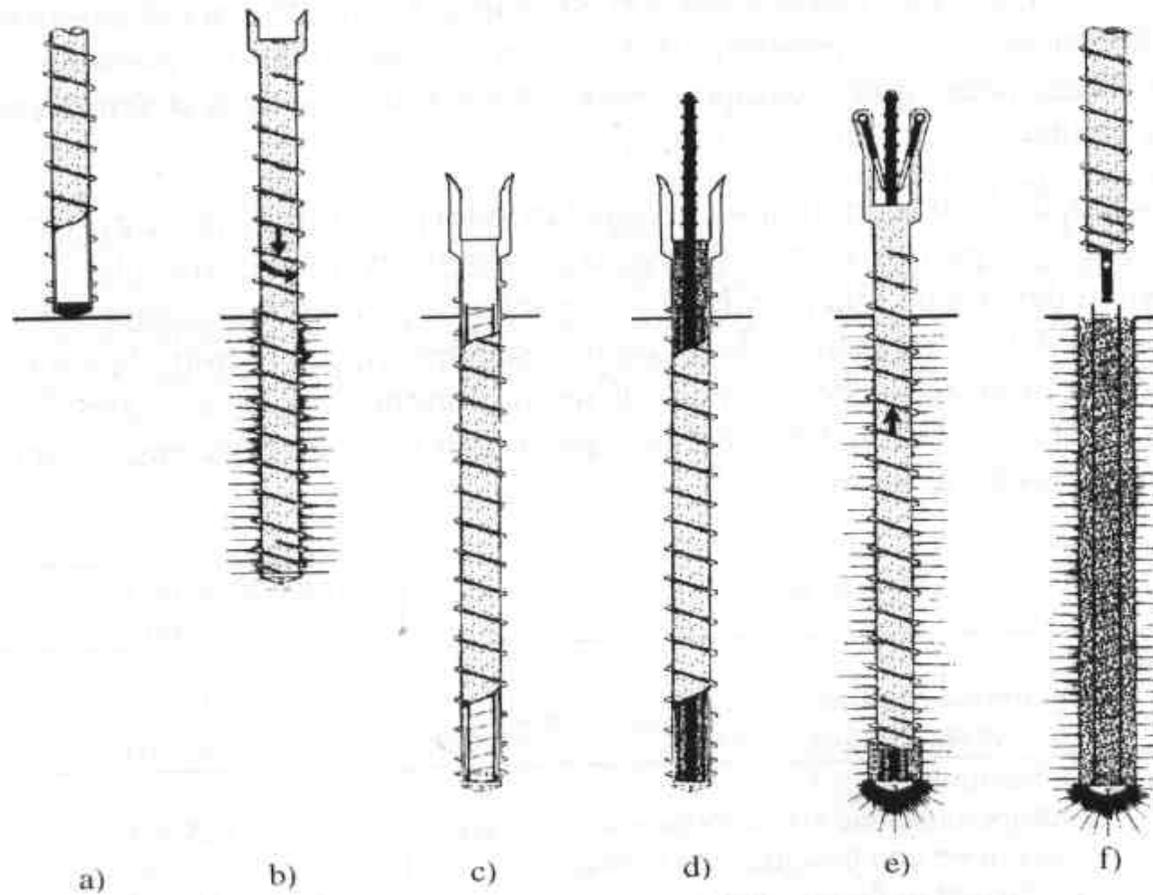
## PALO BATTUTO IN ACCIAIO - TIPO “MULTITON”



**PALO AD ELICA  
CONTINUA (CFA)**

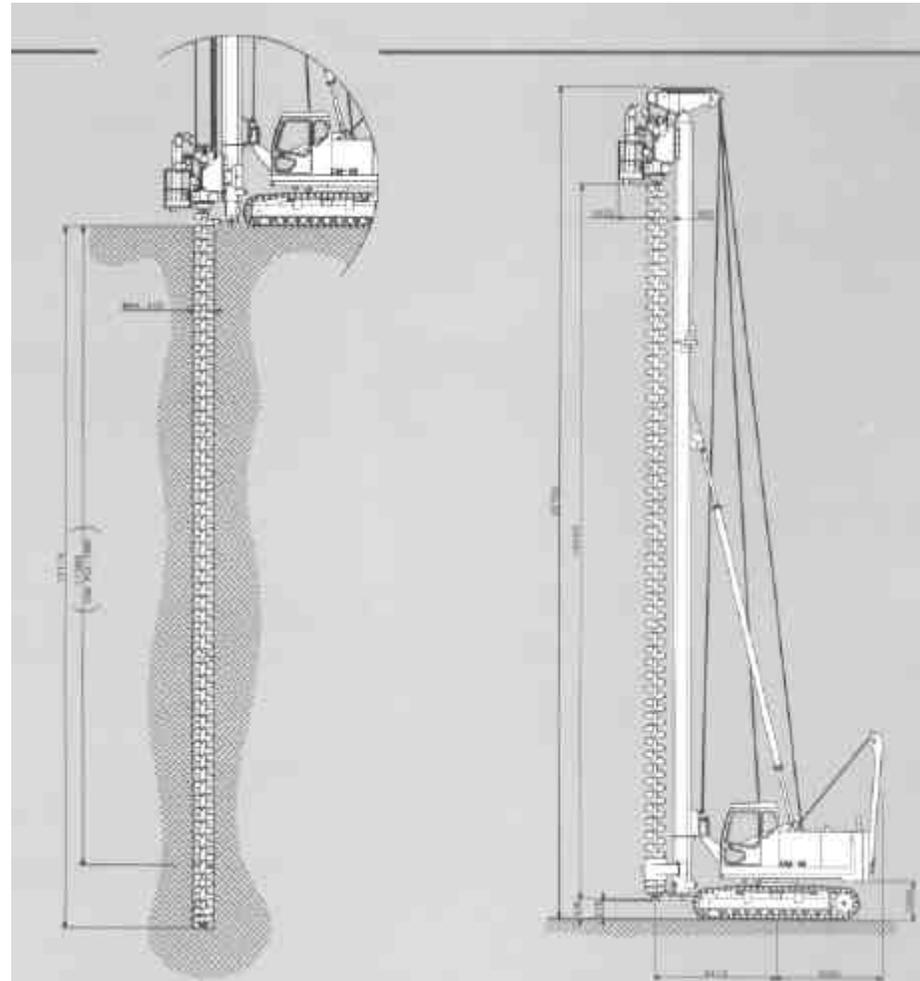


## PALO TRIVELLATO - PRESSATO AD ELICA CONTINUA



**PALO AD ELICA  
CONTINUA (CFA)**

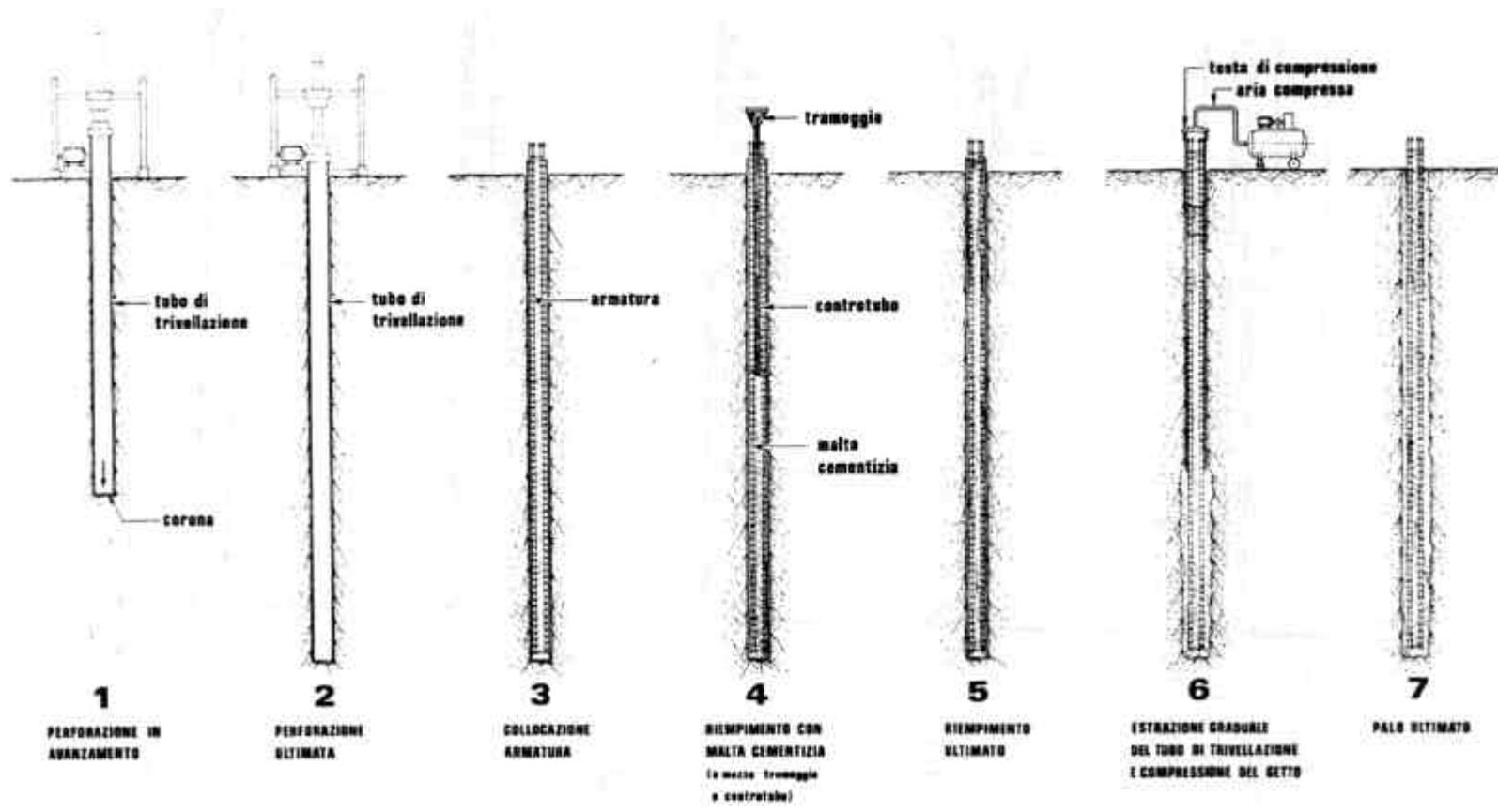
**ATTREZZATURA  
DI PERFORAZIONE**



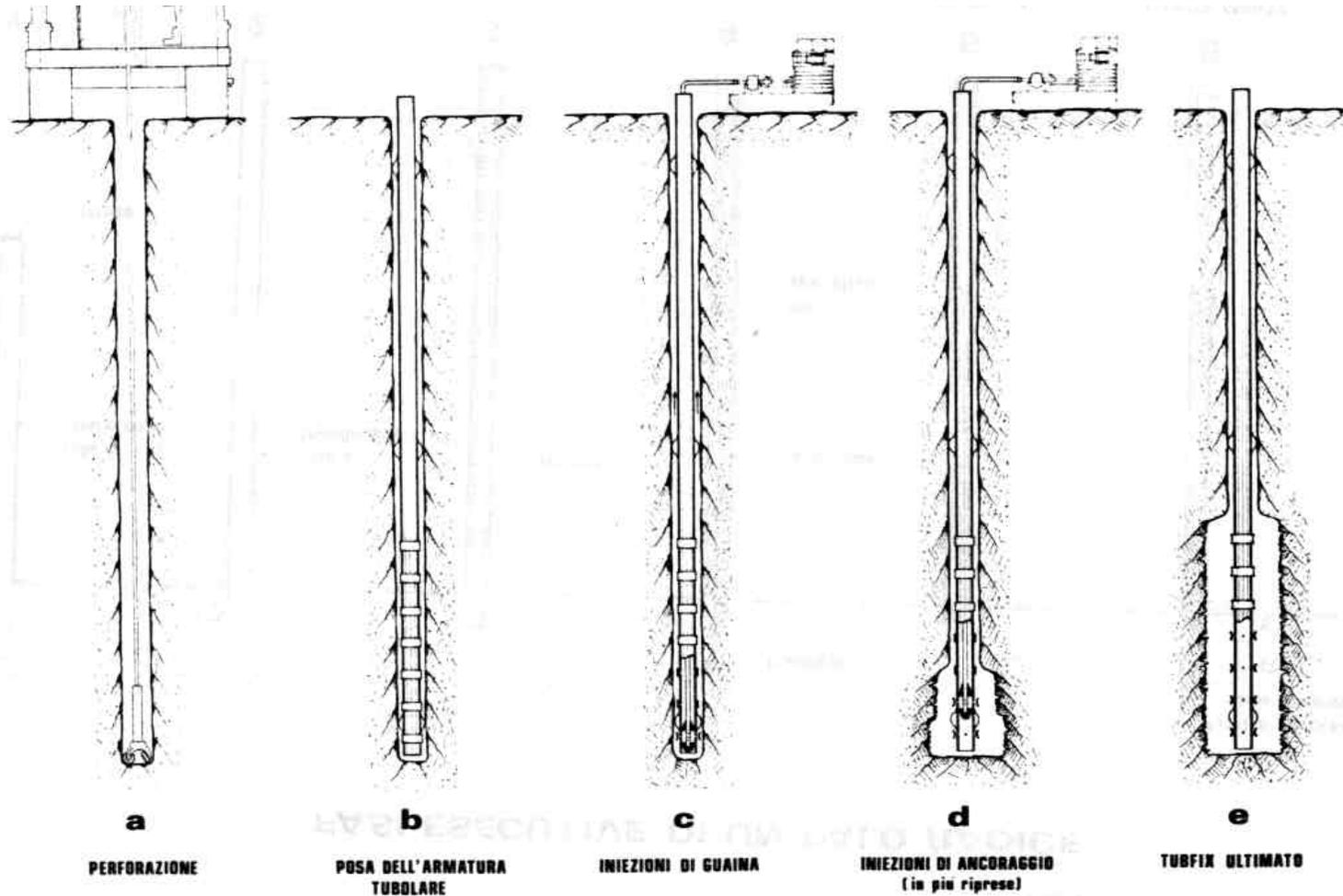
## PRODUTTIVITA' DELLE ATTREZZATURE

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

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



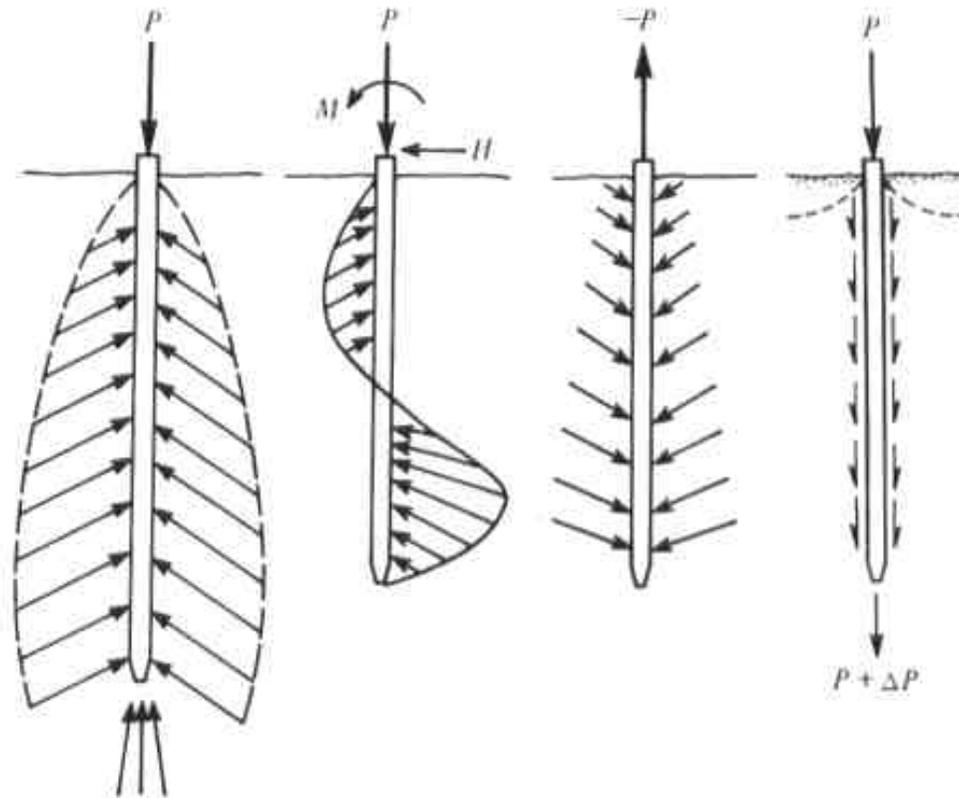
## FASI ESECUTIVE DI UN PALO TIPO “TUBFIX” (IRS)



CARICO LIMITE

## CARICO LIMITE DEL PALO SINGOLO

### Generalità



# DETERMINAZIONE DEL CARICO LIMITE

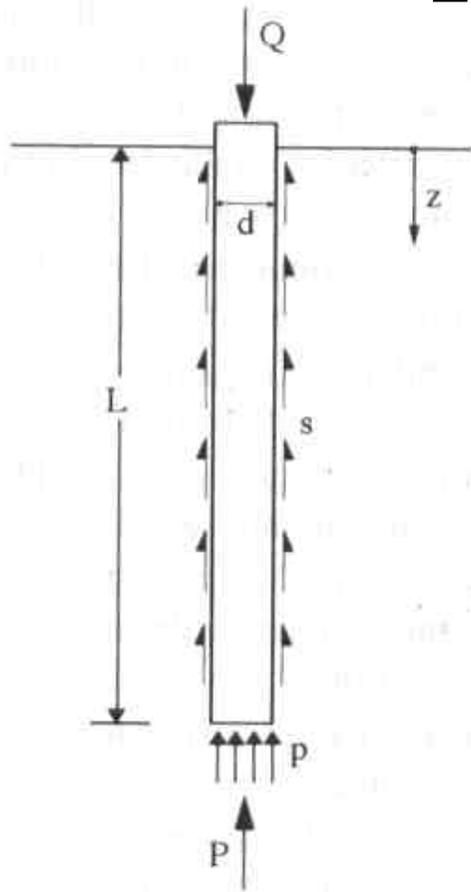
Approcci disponibili:

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

# CARICO LIMITE

## Formule statiche

CARICO LIMITE



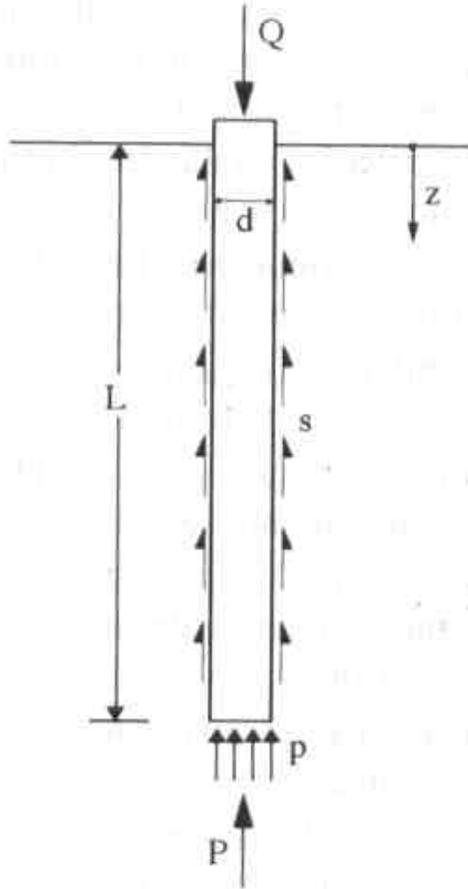
$$Q_{\text{lim}} = P + S = \frac{\pi d^2}{4} p + \pi d \int_0^L s \cdot dz$$

Suddivisione convenzionale tra P ed S

# CARICO LIMITE

## Formule statiche: resistenza alla punta

CARICO LIMITE



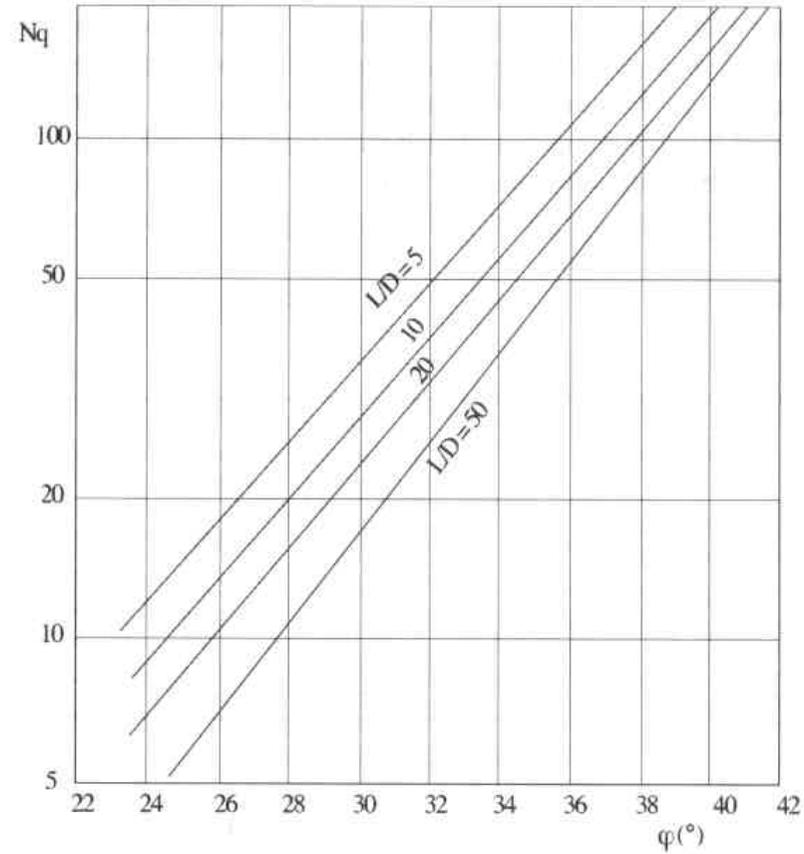
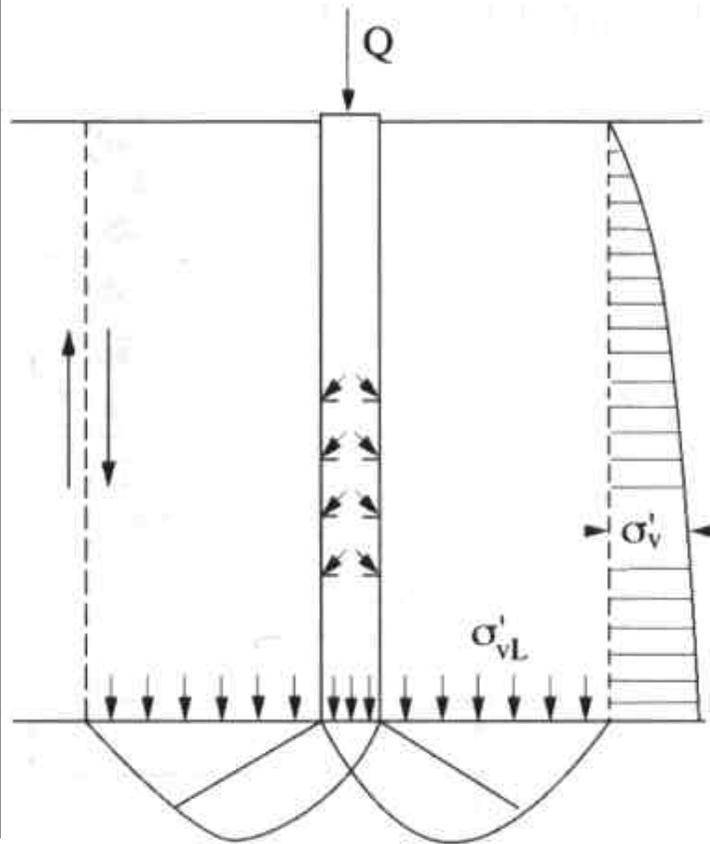
$$D) \quad p = N_q \sigma'_{vL} + N_c c'$$

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

# 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 ÷ 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

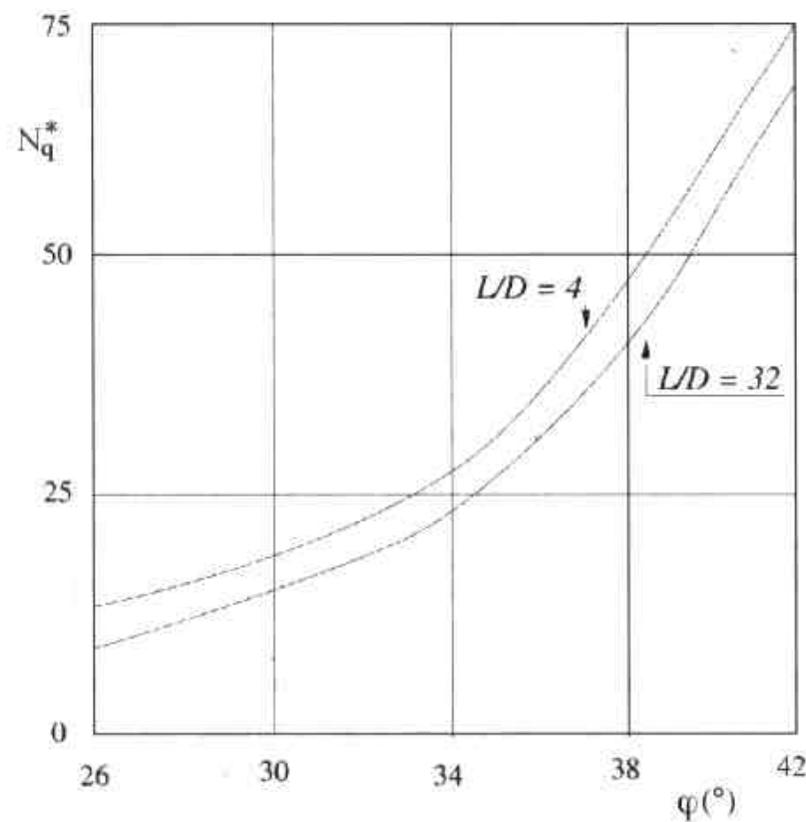
Berazantzev (1965) suggerisce  $0.06d - 0.1d$

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

# CARICO LIMITE

## Pali di grande diametro

CARICO LIMITE



Berezantzev, 1965

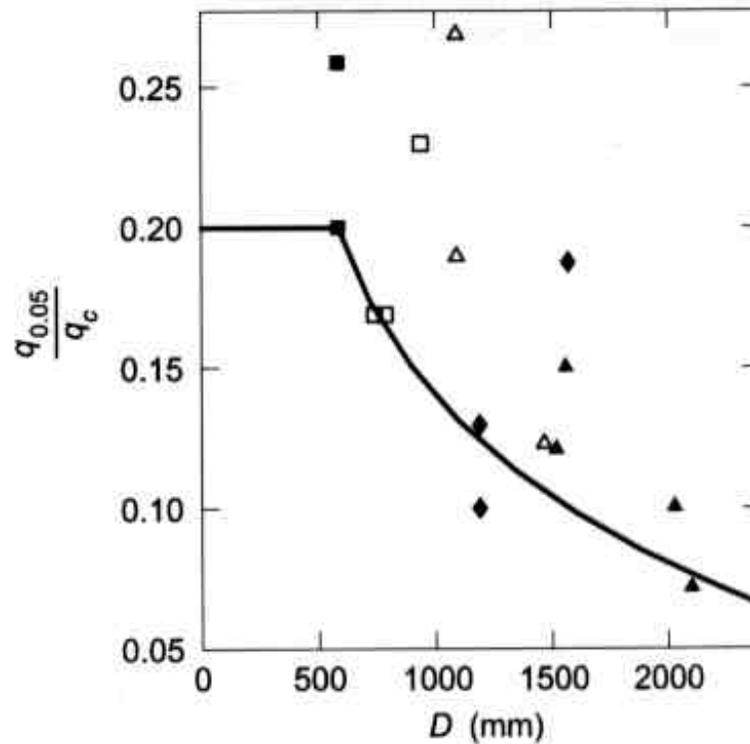
# CARICO LIMITE

## Pali di grande diametro

CARICO LIMITE

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

$q_{0.05}$  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

# CARICO LIMITE

## Formule statiche: resistenza laterale (D)

$$S_{\text{lim}} = m \cdot k \cdot S'_{v0}$$

CARICO LIMITE

Tipo di palo	k (S)	k (D)	$\mu$
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)

CARICO LIMITE

$$s = a \cdot c_u$$

Tipo di palo	$c_{u,ind}$ [kPa]	$\alpha$
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)

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

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

$$d_s = a \cdot d$$

# CARICO LIMITE

## Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

CARICO LIMITE

Terreno	Valori di $\alpha$		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**

# 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	$\geq R1$	$\geq R2$

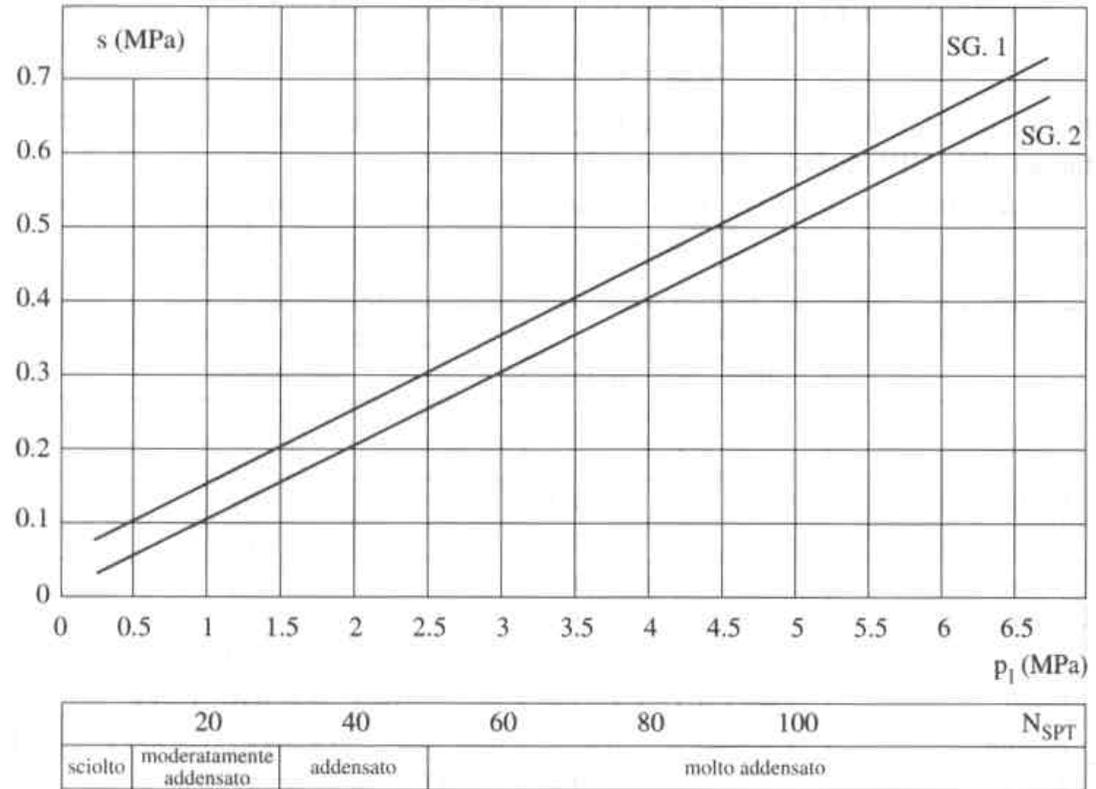
**CARICO LIMITE**

# CARICO LIMITE

## Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

Sabbie limose  
-  
Ghiaie



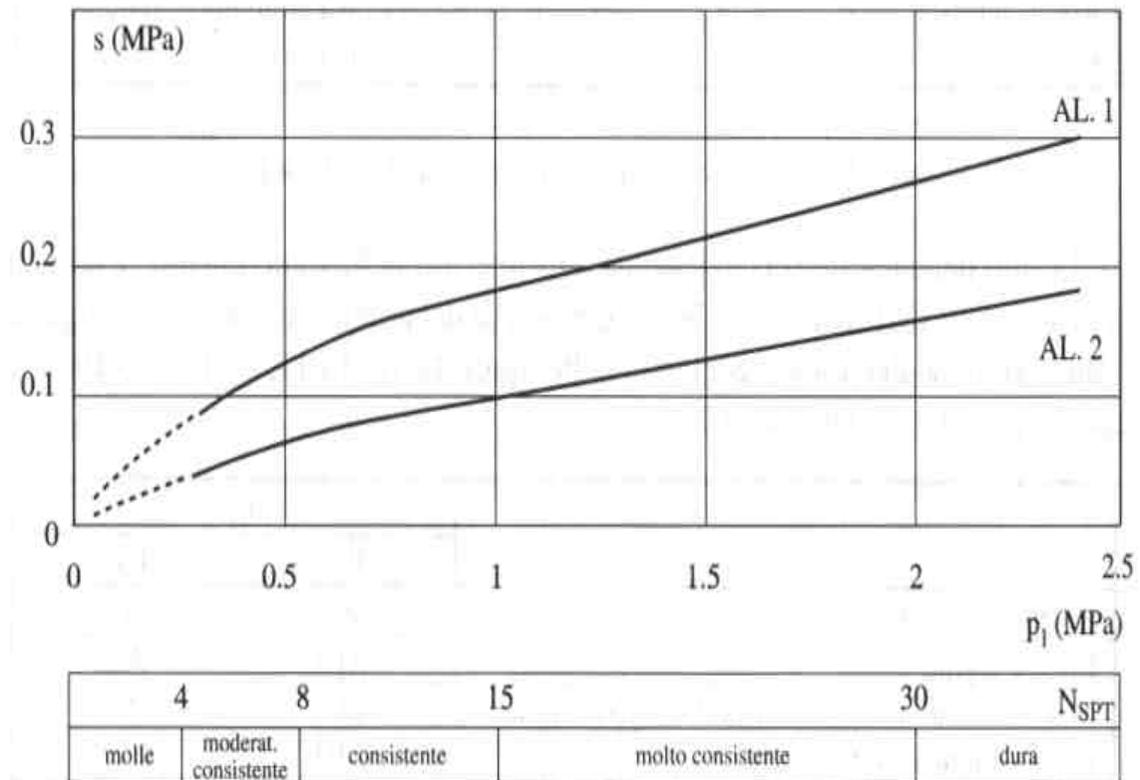
# CARICO LIMITE

## Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

CARICO LIMITE

Argille  
-  
limi



# CARICO LIMITE

## Pali soggetti a forze orizzontali

### Broms (1964)

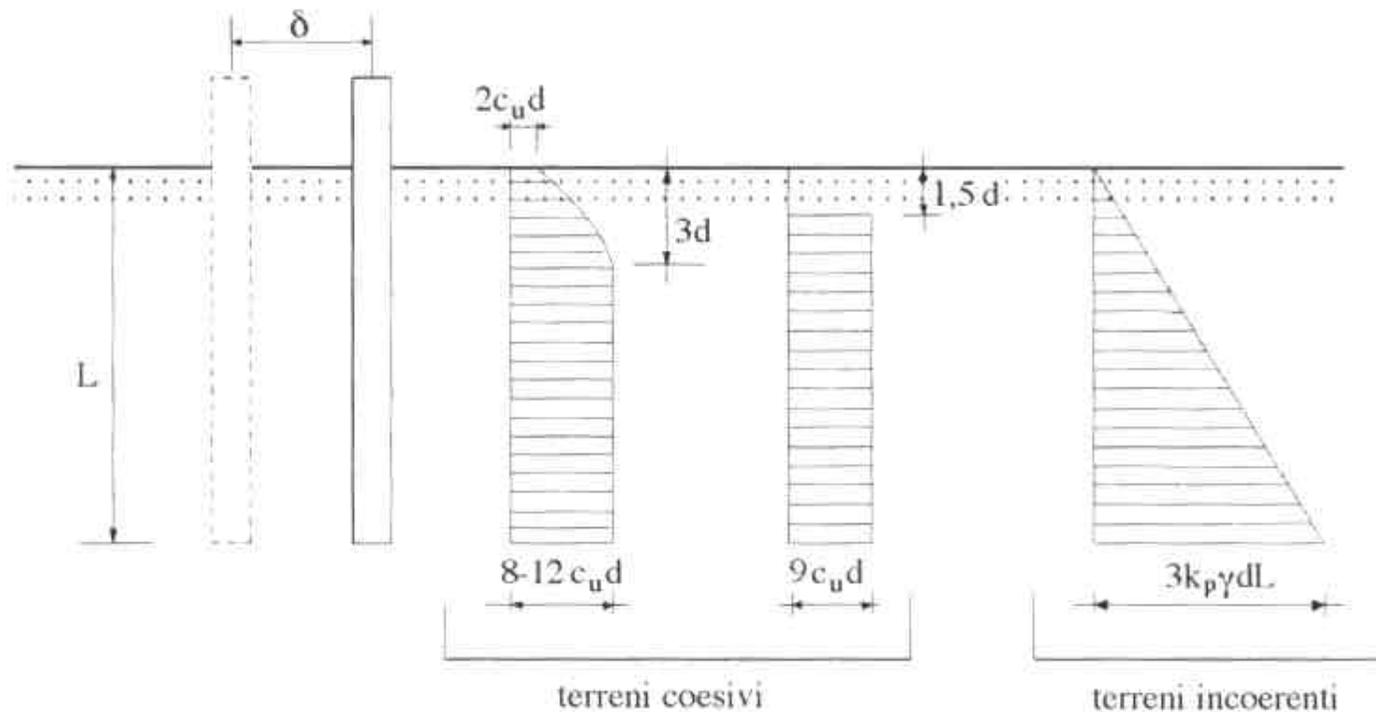
- terreno rigido – plastico
- palo verticale
- terreno omogeneo
- palo rigido – plastico

CARICO LIMITE

# CARICO LIMITE

## Pali soggetti a forze orizzontali

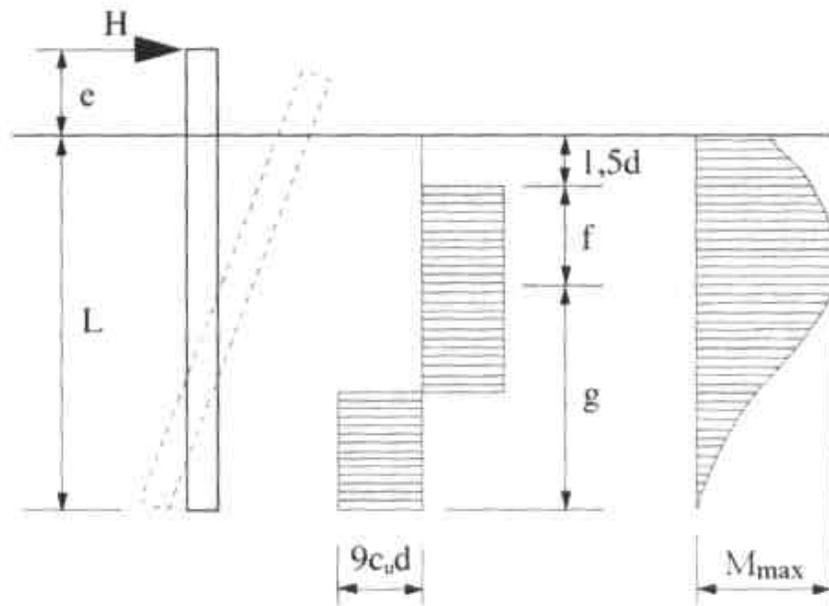
### Broms (1964): reazioni del terreno (U, D)



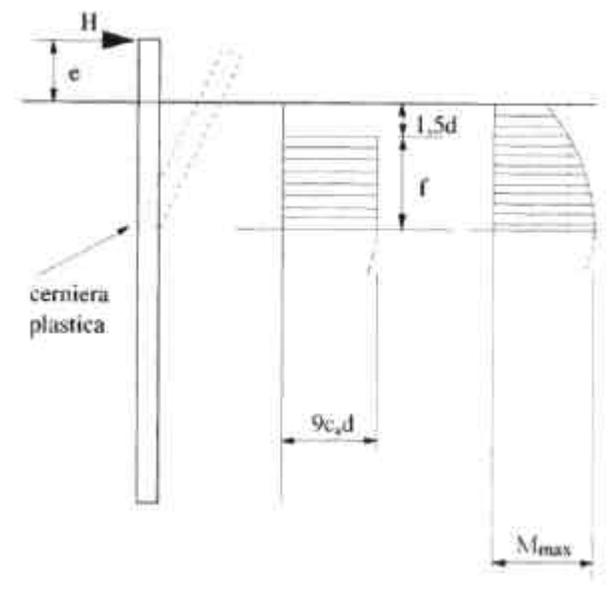
# CARICO LIMITE

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

CARICO LIMITE



corti

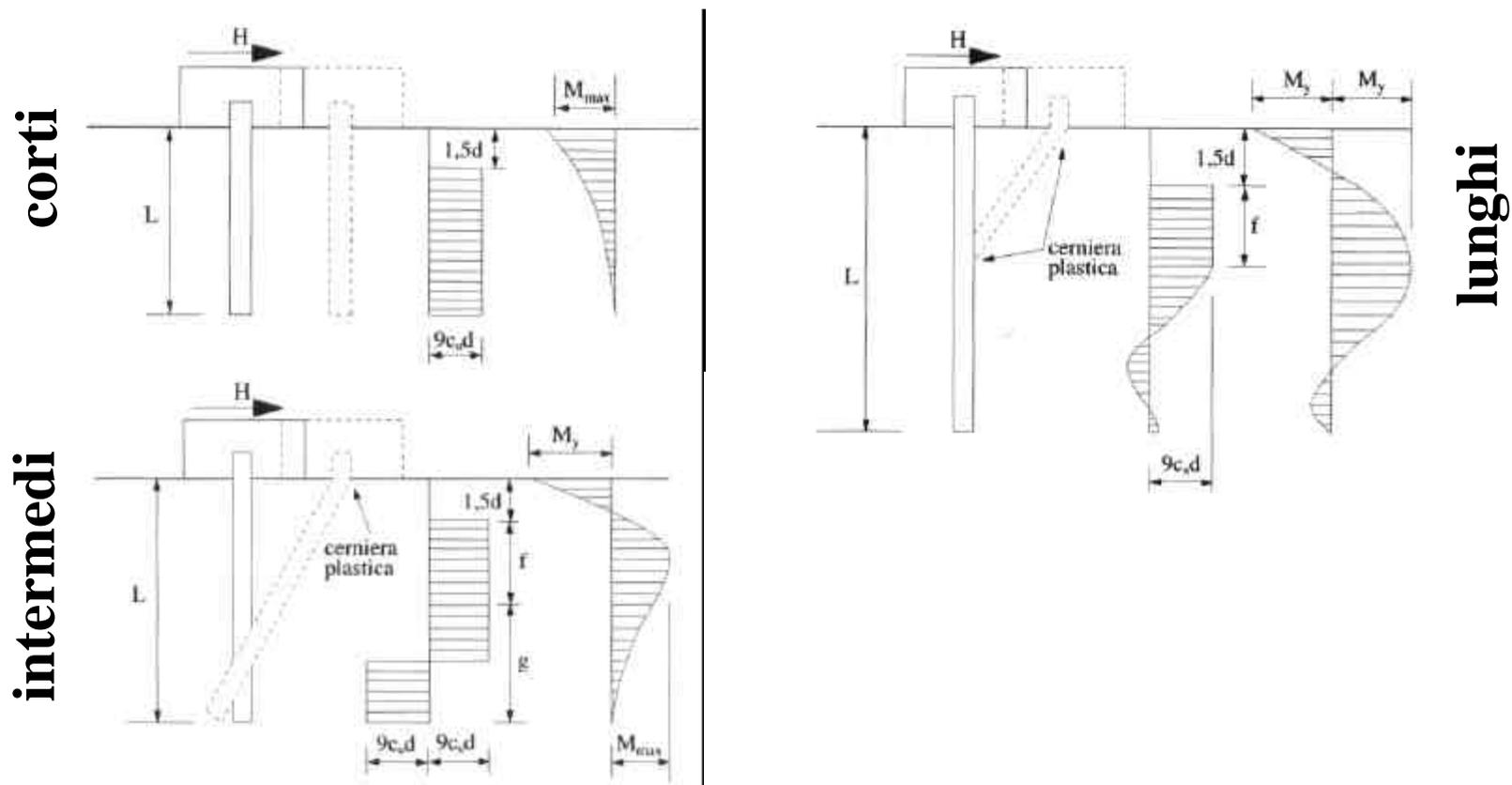


lunghi

# CARICO LIMITE

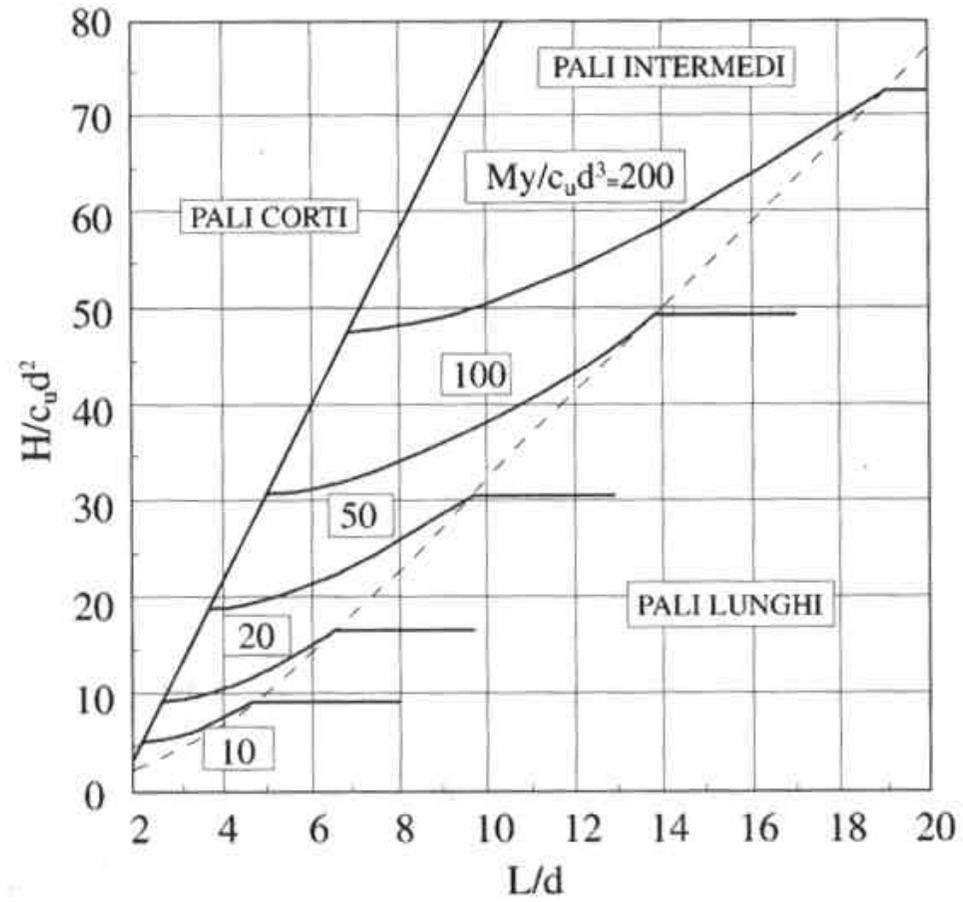
## Pali impediti di ruotare in testa (U)

CARICO LIMITE



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

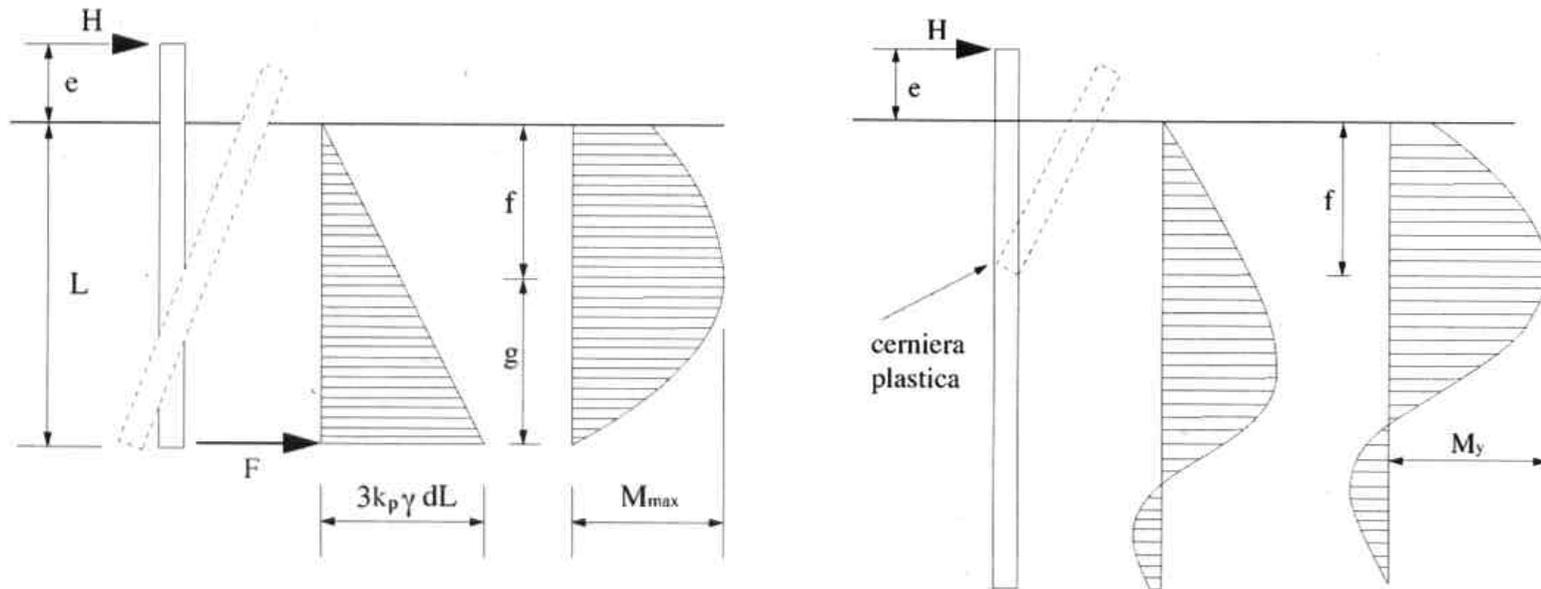
CARICO LIMITE



# CARICO LIMITE

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

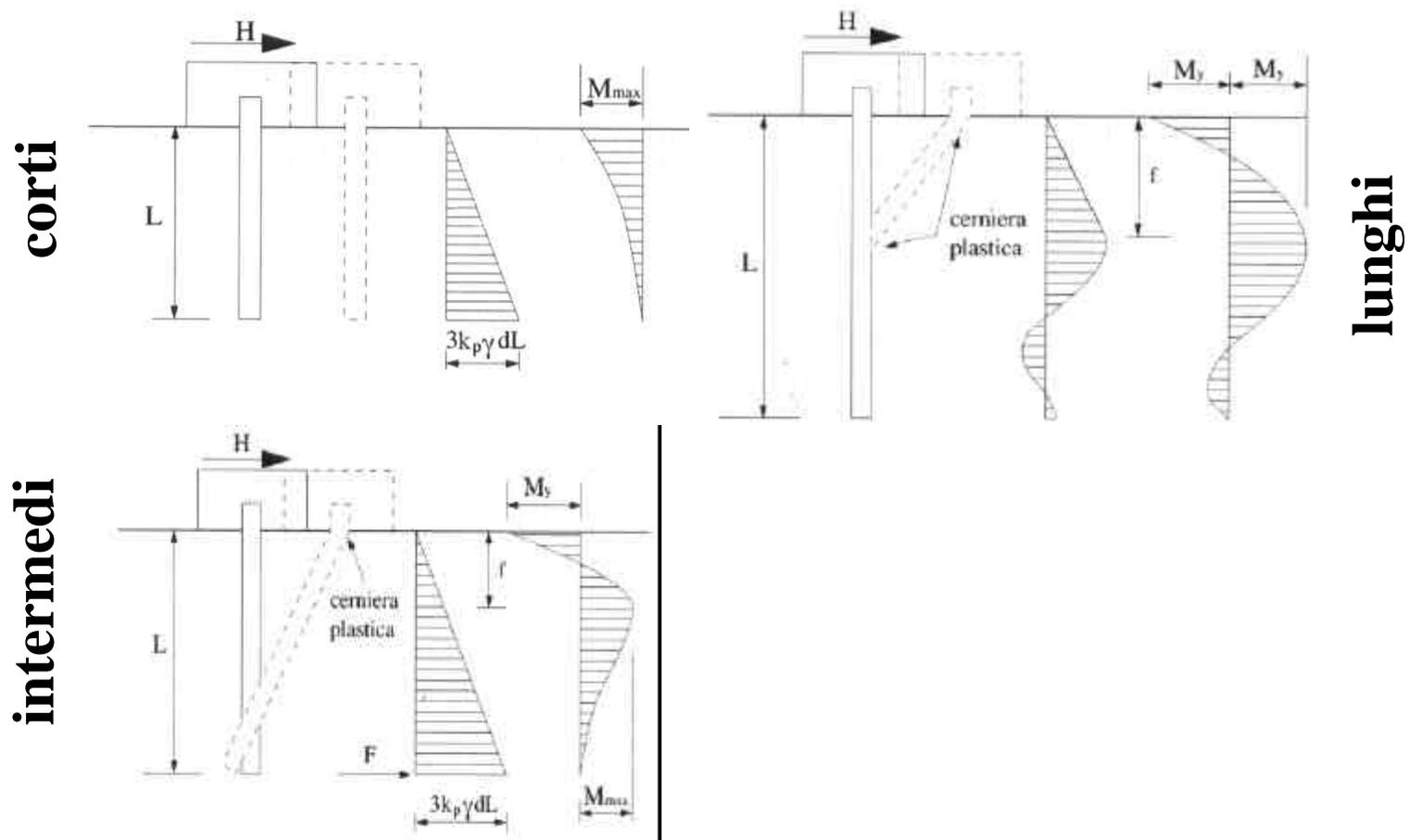
CARICO LIMITE



# CARICO LIMITE

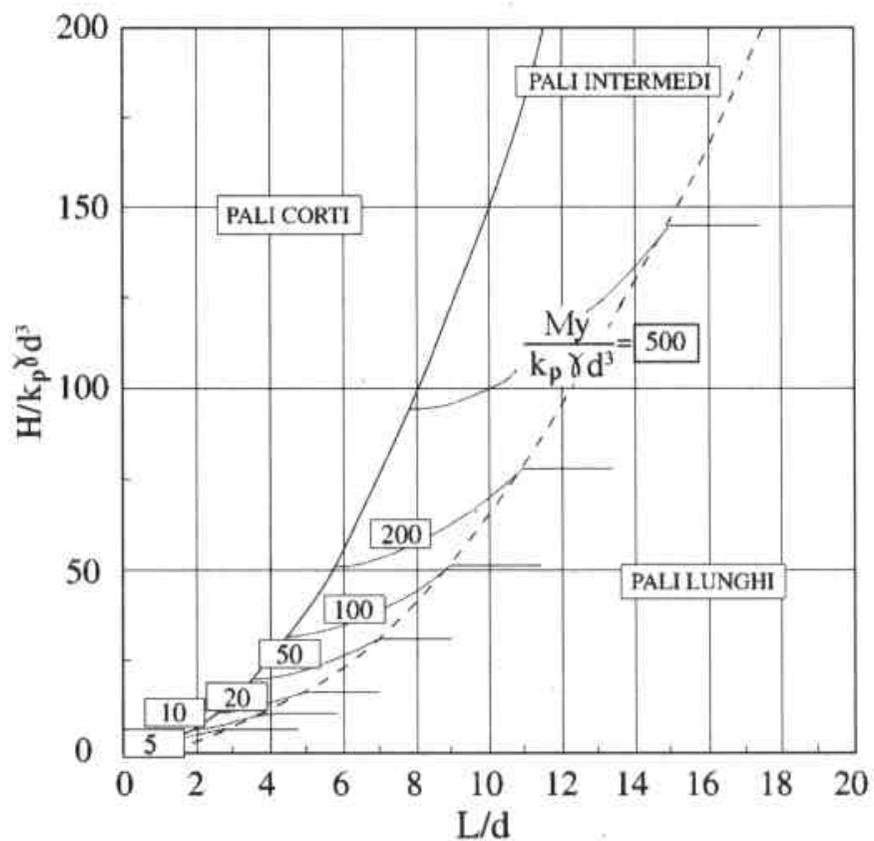
## Pali impediti di ruotare in testa (D)

CARICO LIMITE



CARICO LIMITE

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



## PROVE DI CARICO (NT, 2008)

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

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

Numero delle prove di collaudo: almeno 1%, minimo 2 prove  
(come DM 10.3.1988)

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 eseguite prove di carico dinamiche, da tarare con quelle statiche di progetto, e 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  $D_u$  dovute alla battitura**

## **PROVE DI CARICO**

### **Applicazione del carico**

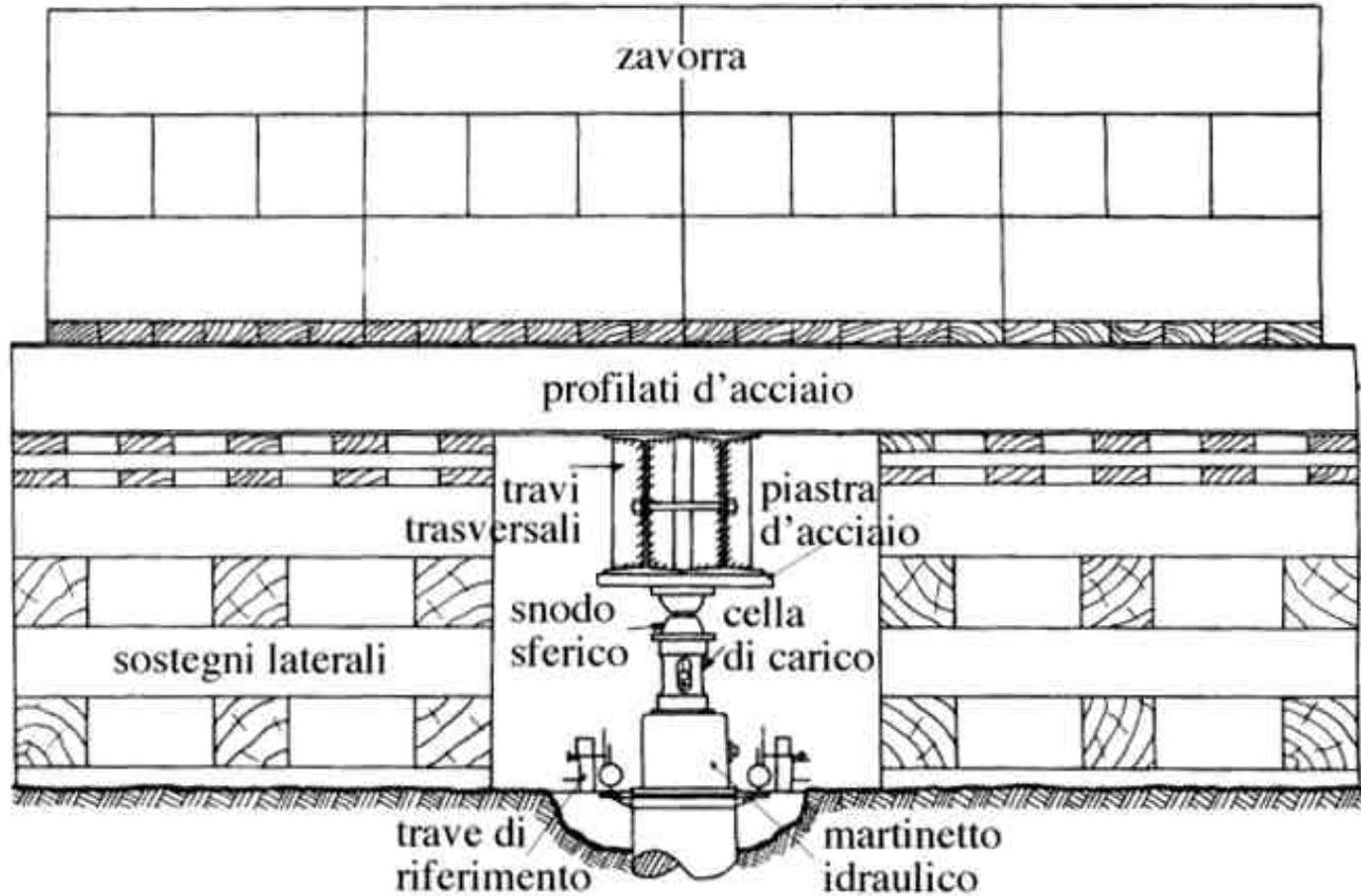
#### **Martinetto idraulico**

Carico massimo, corsa, compensazione del cedimento

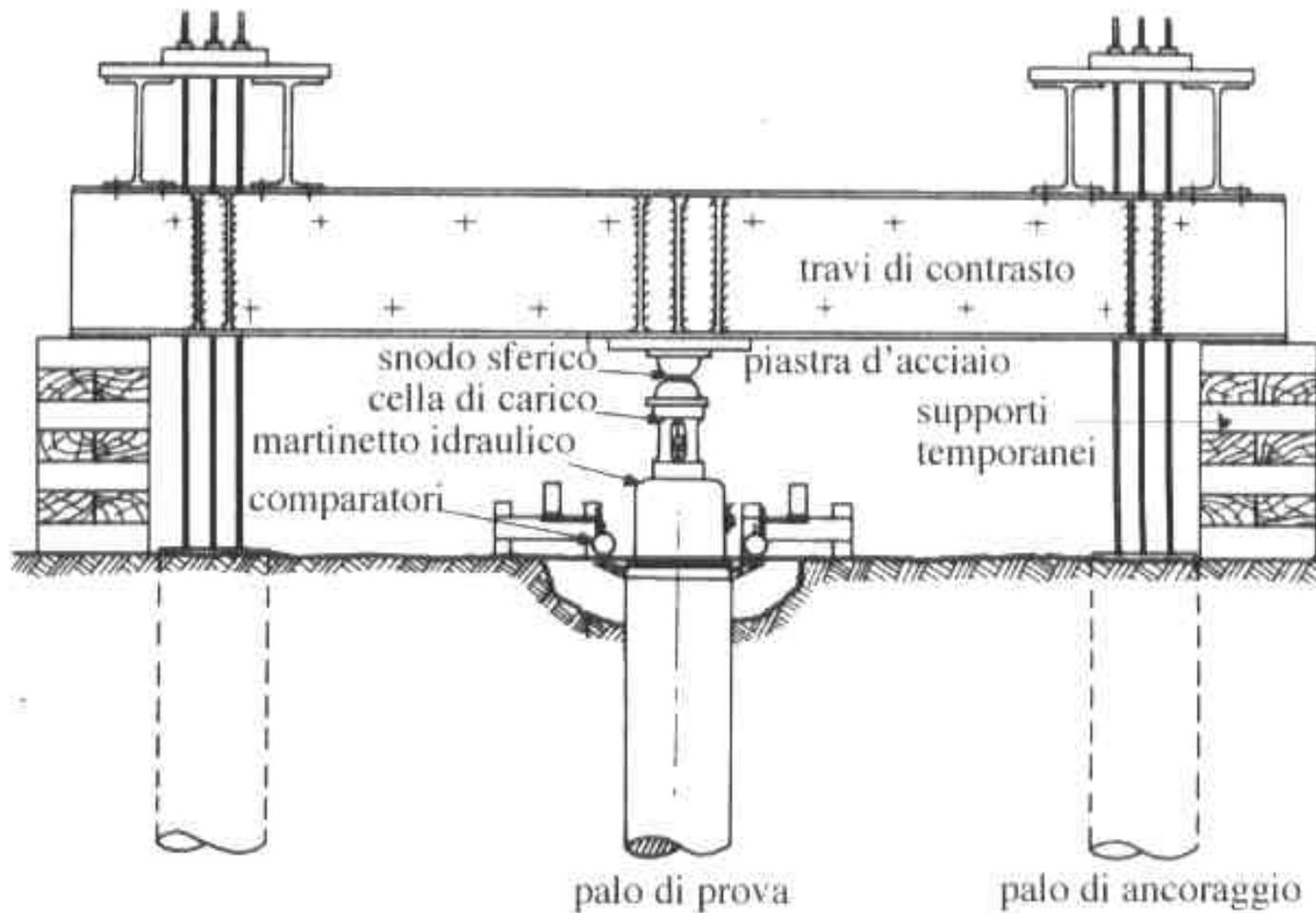
#### **Contrasto**

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

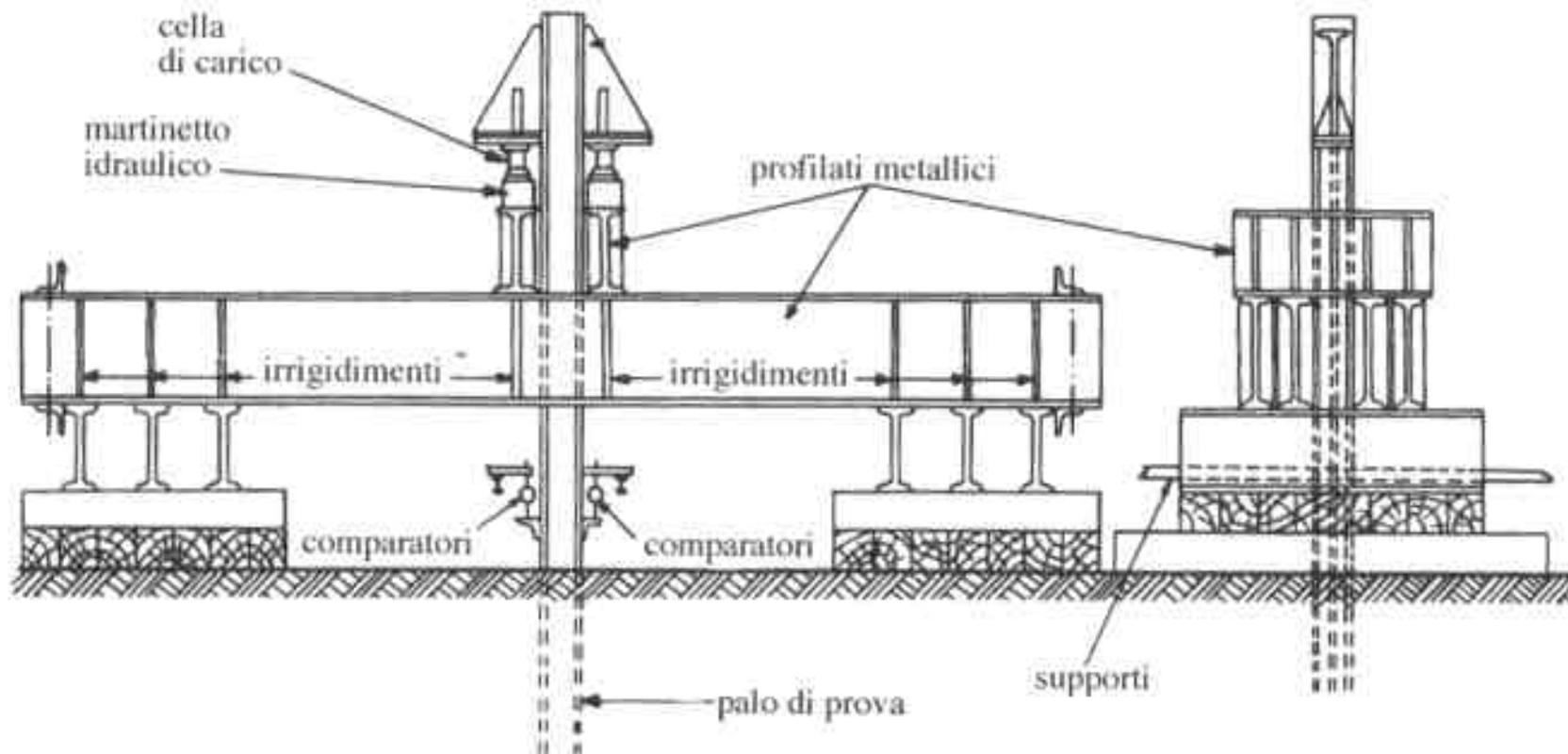
## Schema di prova con zavorra



## Schema di prova con pali di ancoraggio



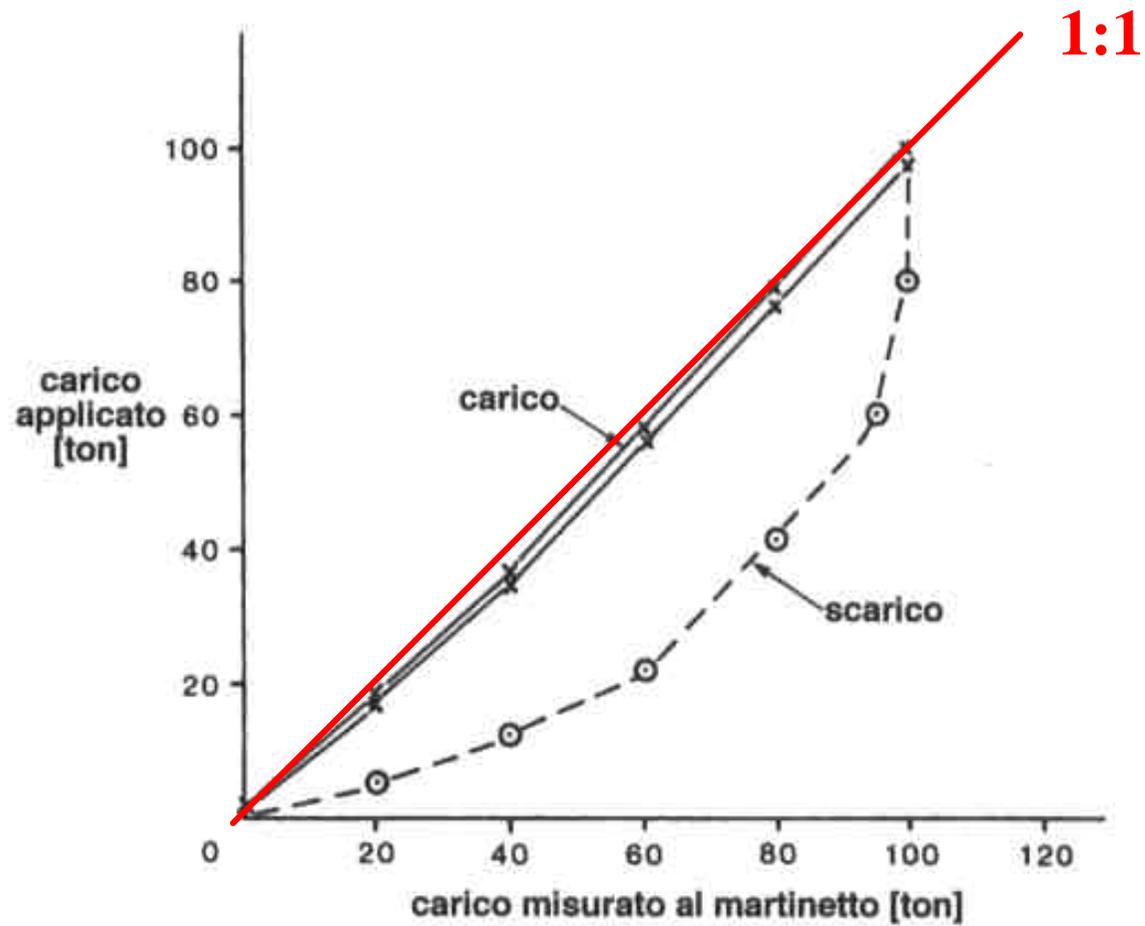
## Schema di prova di carico a trazione



# 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**

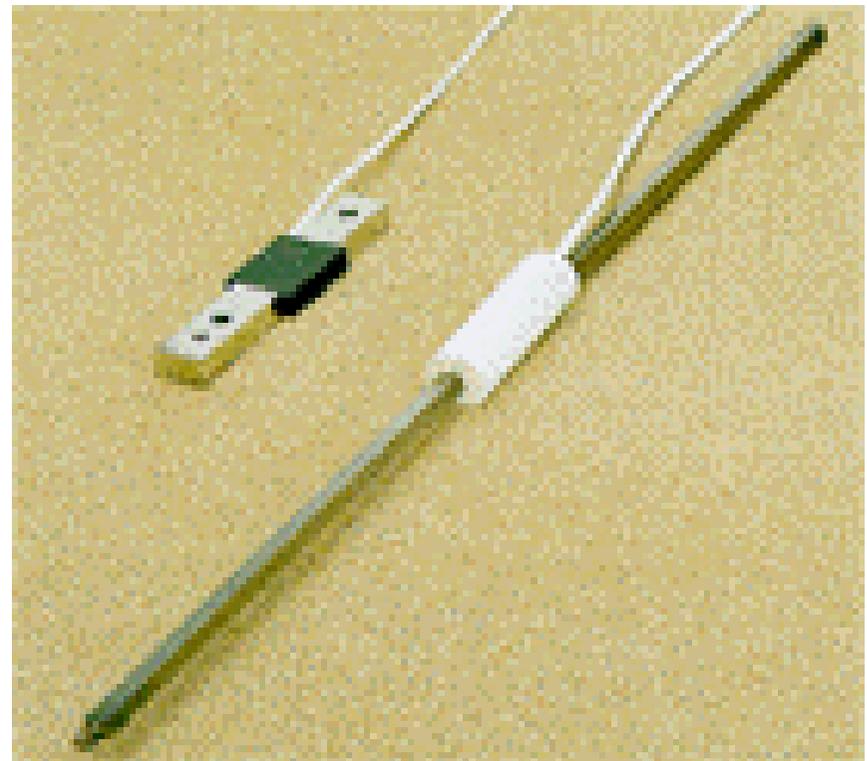
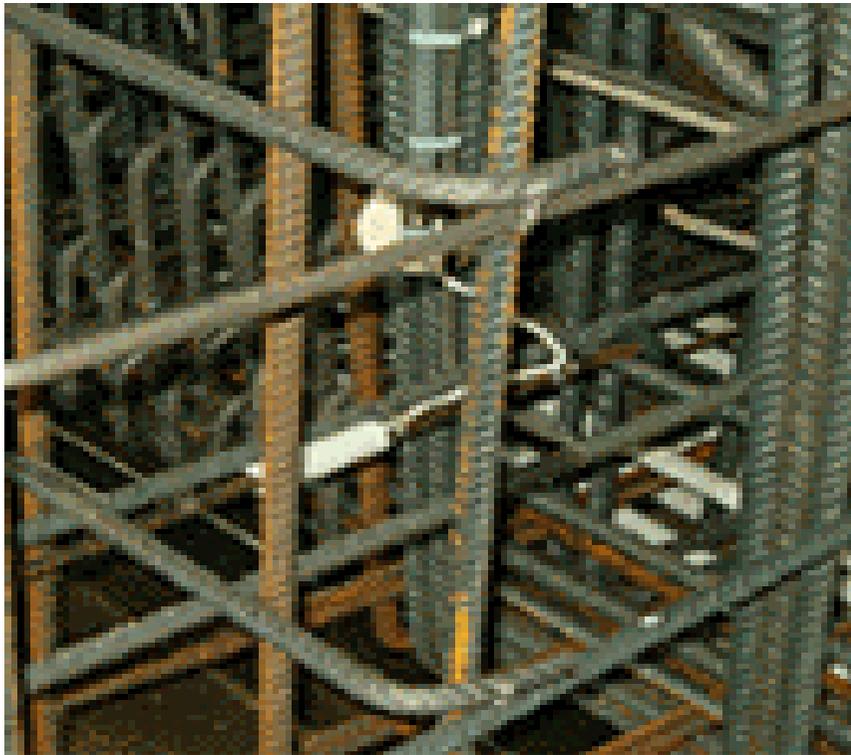
**Minimo tre punti di misura**

**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)

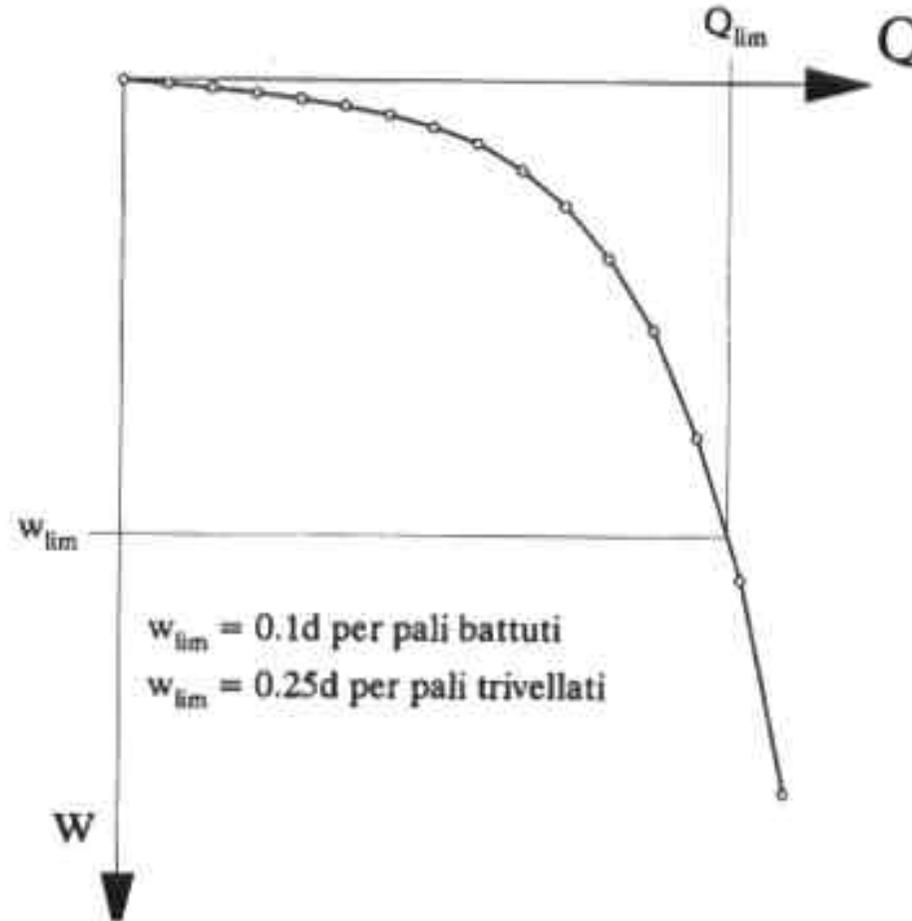
# **PROVE DI CARICO**

## **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

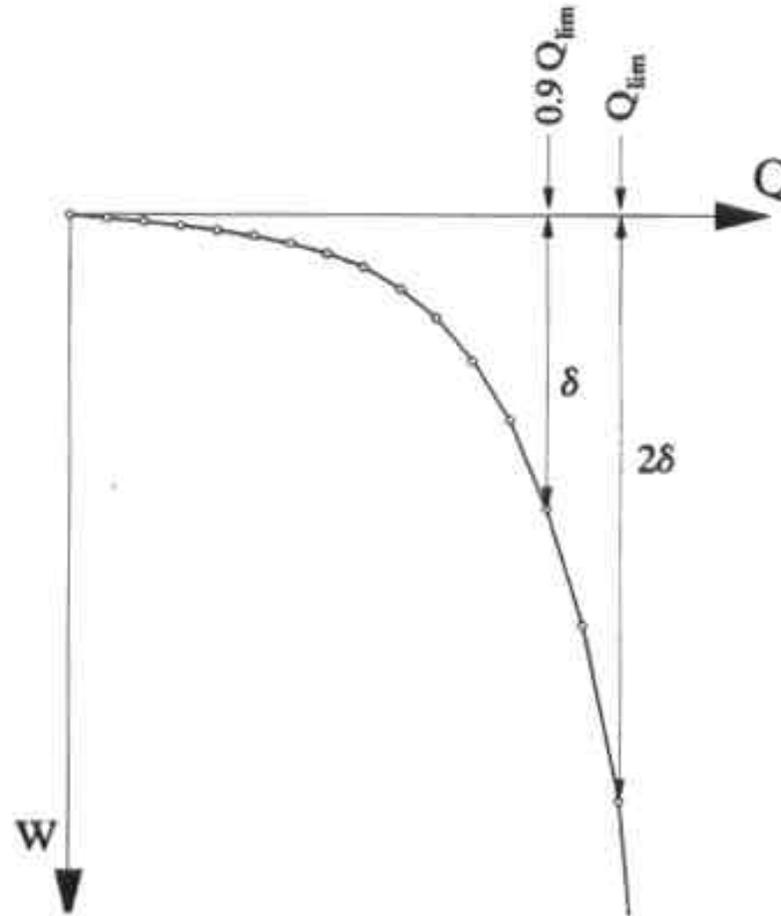
## Interpretazione delle misure

### Determinazione del carico limite (1)

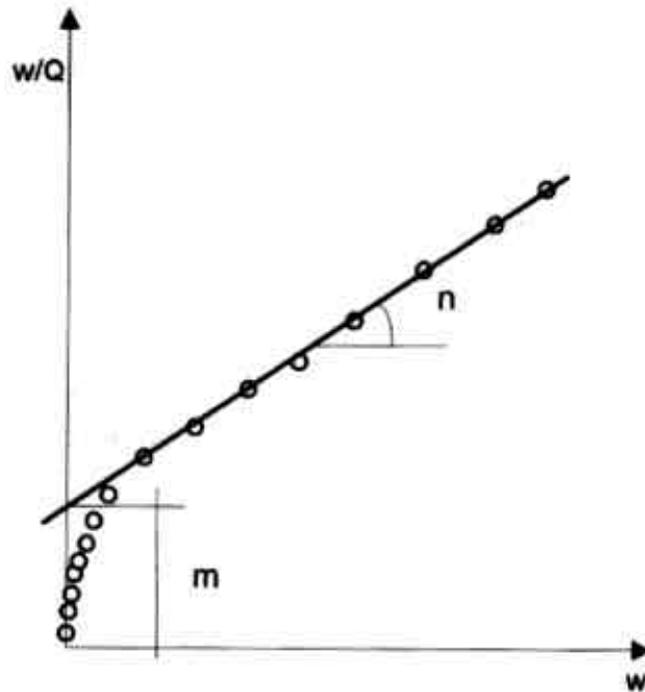


## Interpretazione delle misure

### Determinazione del carico limite (2)



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



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

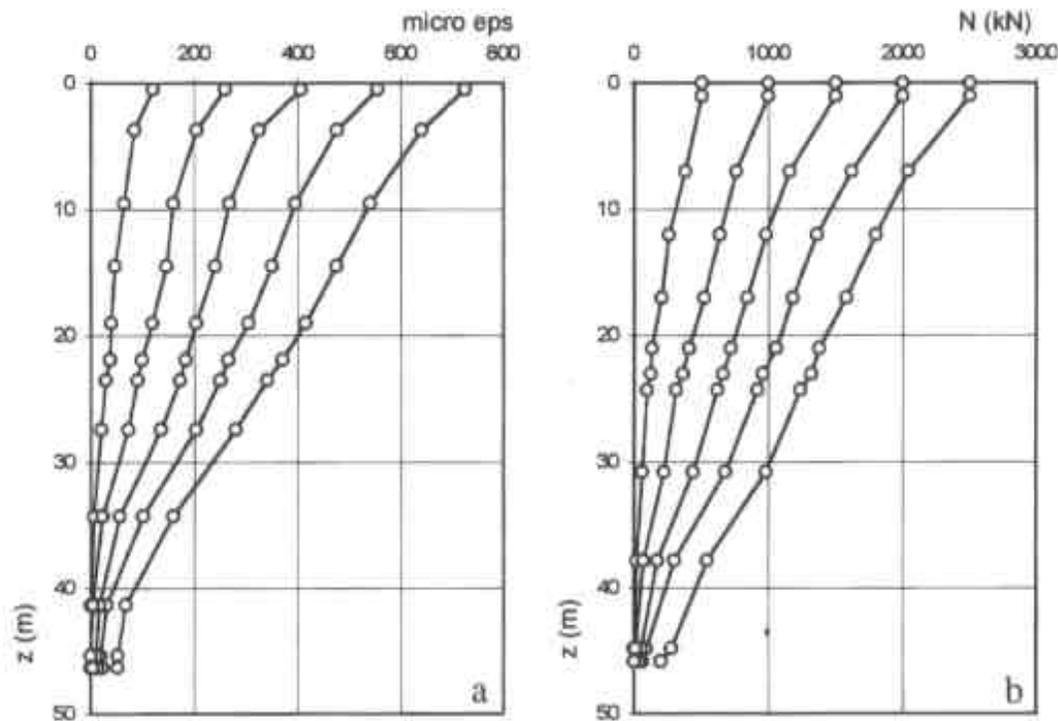
**Interpretazione delle misure**  
**Determinazione del carico limite**  
*Suggerimenti per l'uso dell'interpretazione iperbolica*

$$Q_{\text{lim}} = \frac{0.9}{n} \quad \text{Taglio dell'asintoto}$$

$$Q_{\text{lim}} = \frac{W_{\text{lim}}}{m + n \cdot W_{\text{lim}}} \quad \text{Criterio del cedimento (0.1 – 0.25d)}$$

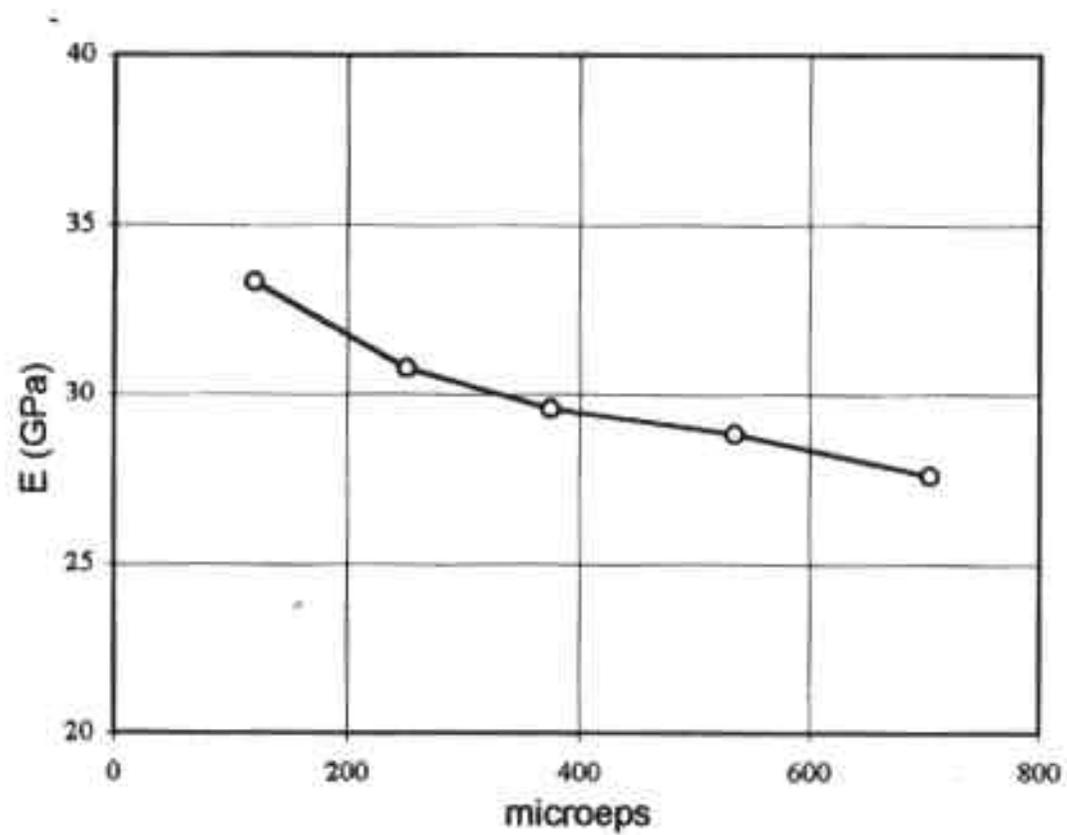
$$Q_{\text{lim}} = \frac{0.889}{n} \quad \text{Criterio del raddoppio del cedimento}$$

# Interpretazione delle misure Palo strumentato

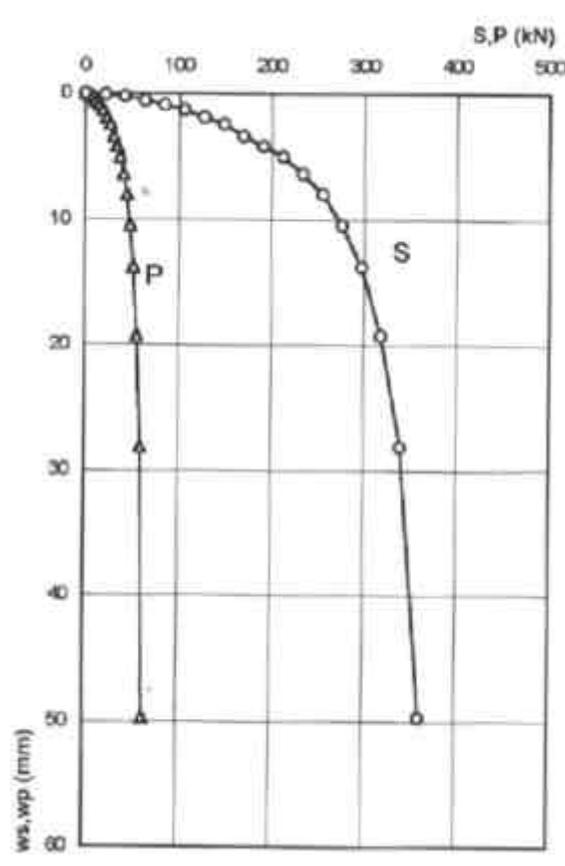


Per passare da  $\epsilon$  ad  $N$  devo conoscere  $E$  e la sezione

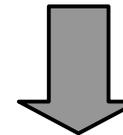
# Interpretazione delle misure Palo strumentato



## Interpretazione delle misure Palo strumentato



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



Parametri di progetto!!

## Prove ecometriche

