

# **FONDAZIONI**

**ing. Nunziante Squeglia**

## **5. FONDAZIONI SU PALI**

# **Cos' è un Palo?**

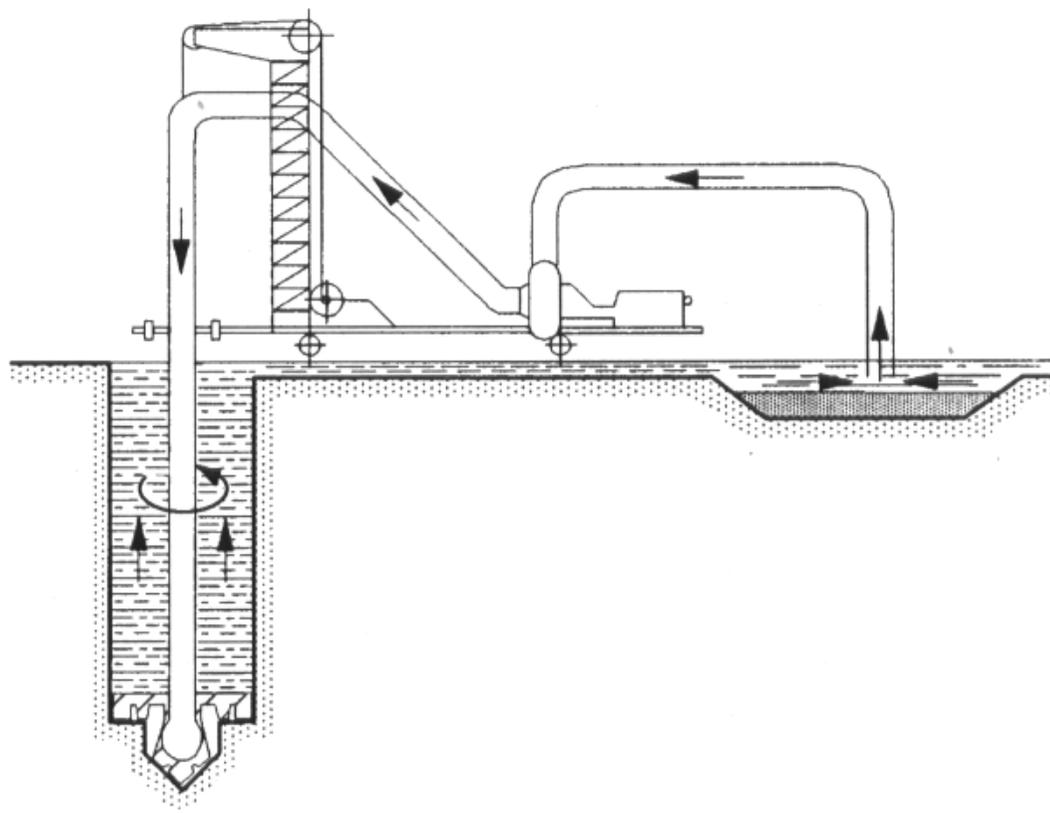
## **DEFINIZIONE**

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

## TIPI DI PALO

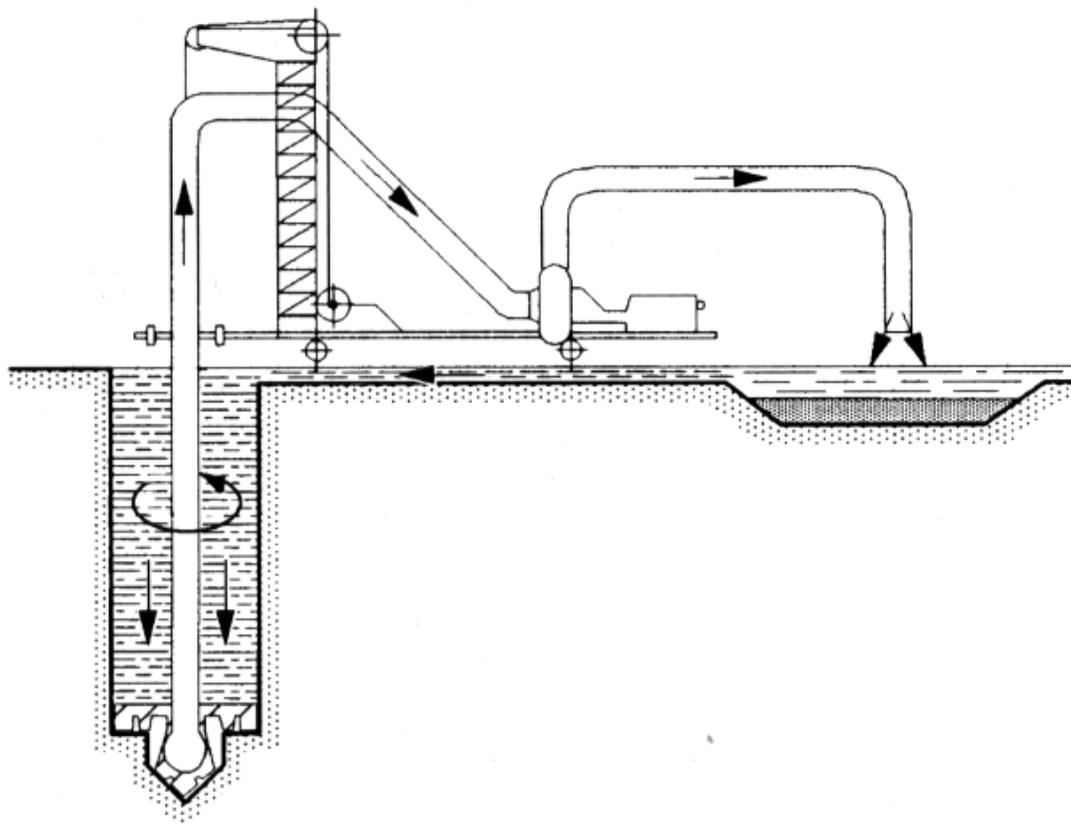
- Pali trivellati
- Pali battuti
  - prefabbricati
  - gettati in opera
- CFA (Continuous Flight Auger) e varianti
- Micropali

## ESECUZIONE DELLA PERFORAZIONE TRIVELLAZIONE CON CIRCOLAZIONE DIRETTA



---

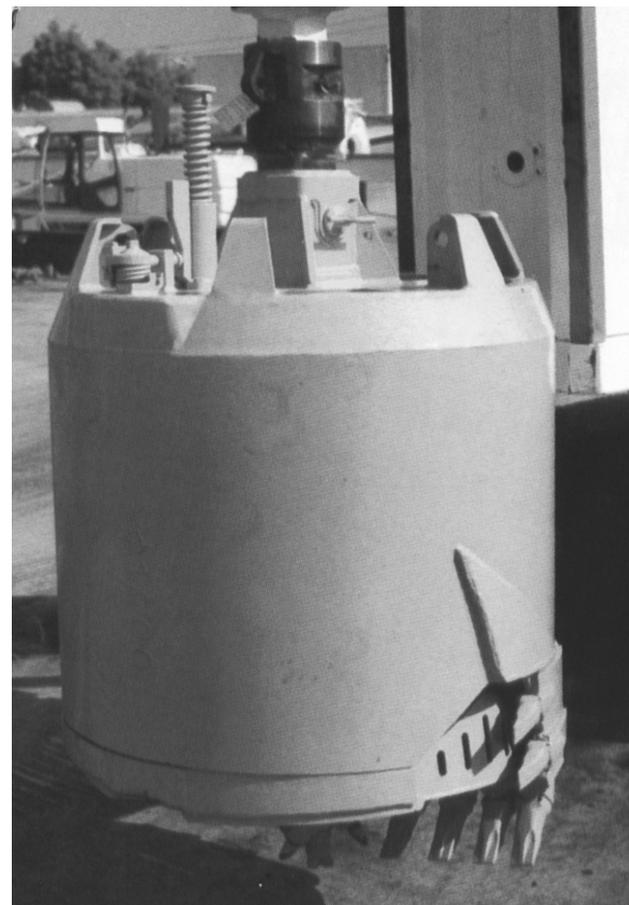
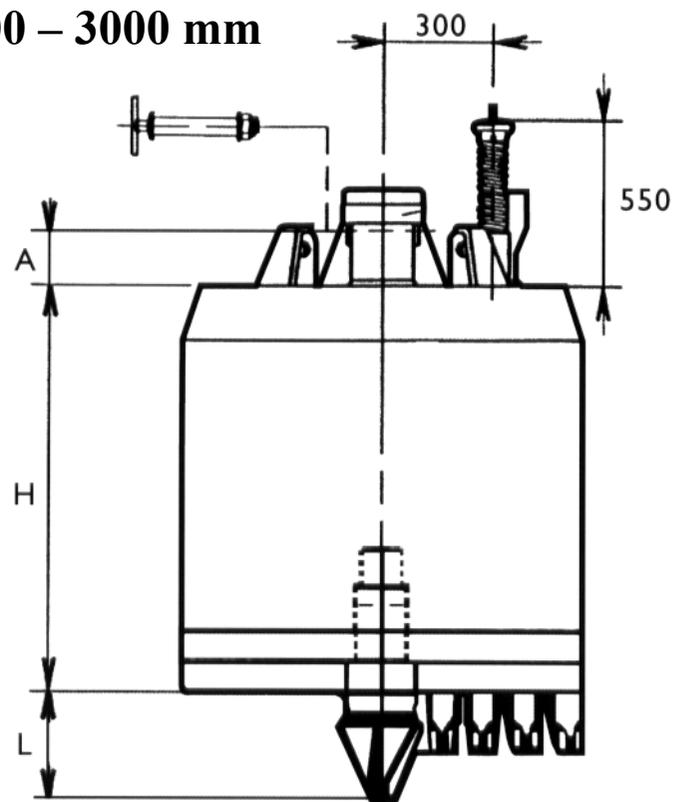
## ESECUZIONE DELLA PERFORAZIONE TRIVELLAZIONE CON CIRCOLAZIONE INVERSA



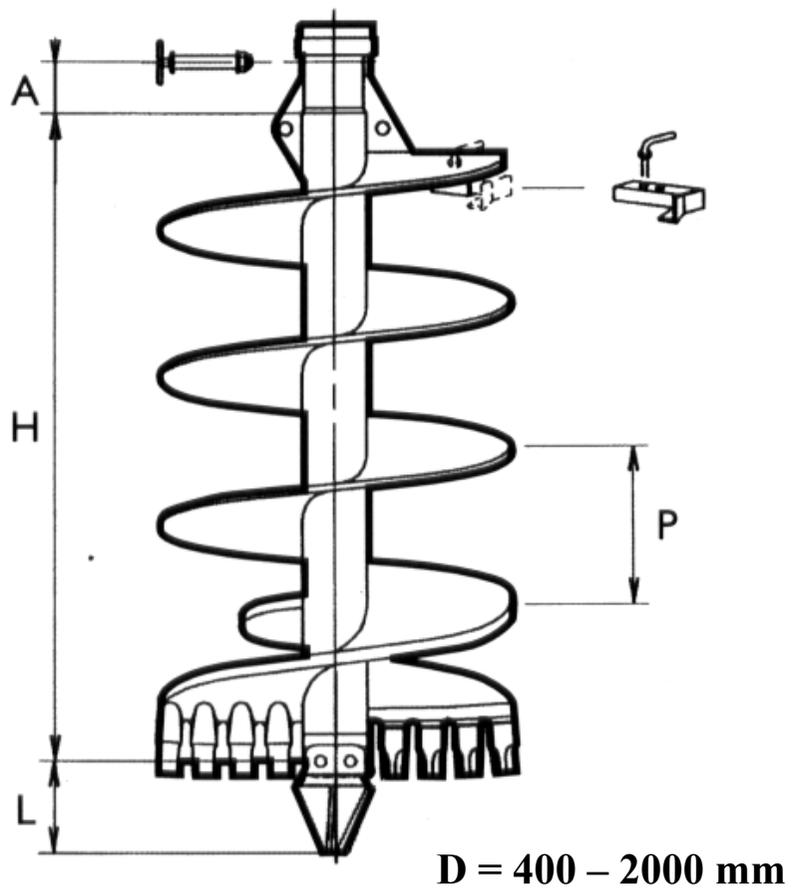
## UTENSILI DI PERFORAZIONE "BUCKET" (Secchione)

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

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



## UTENSILI DI PERFORAZIONE "AUGER" (Trivella)

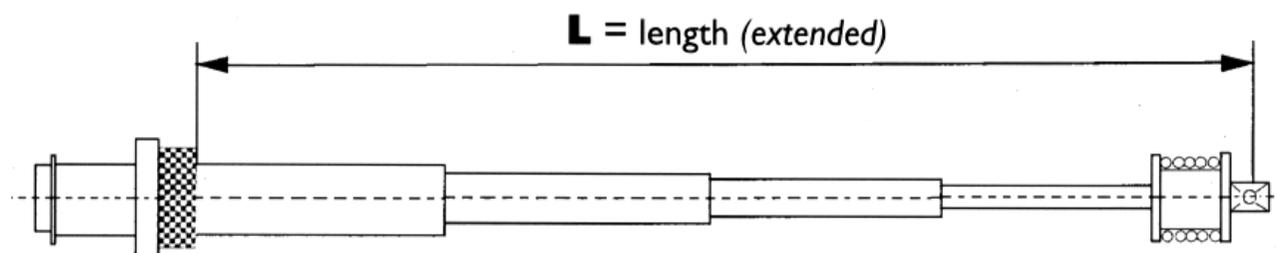


---

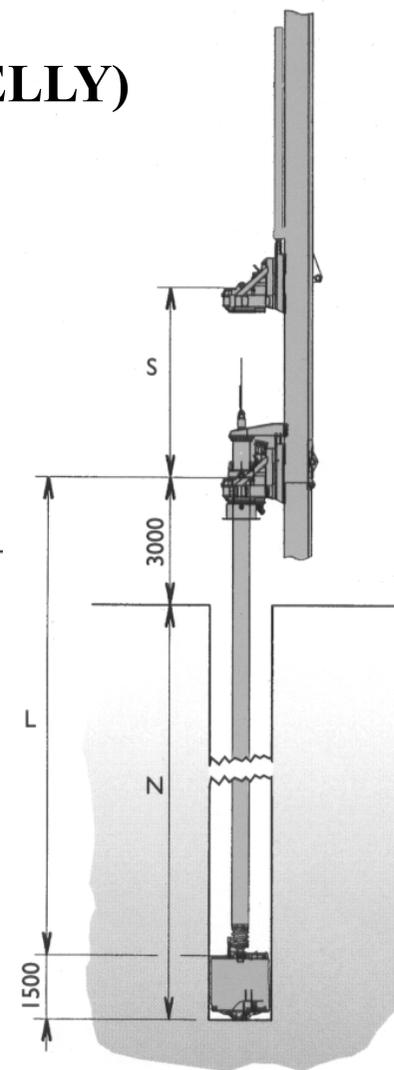
**UTENSILI DI PERFORAZIONE  
“AUGER” (Trivella)  
Espulsione del materiale estratto**



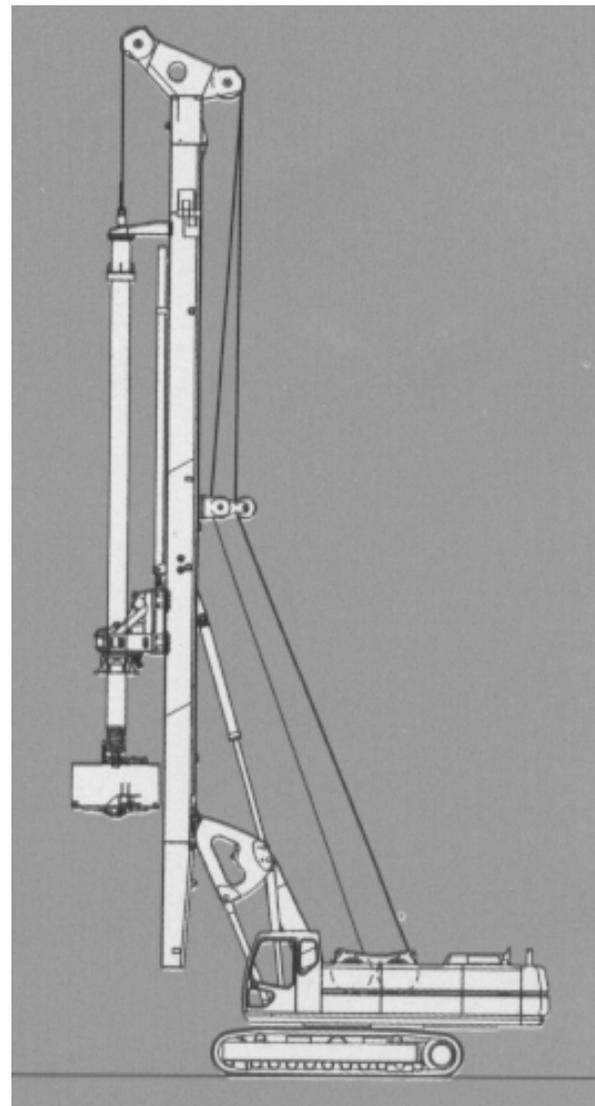
## ASTE TELESCOPICHE DI PERFORAZIONE (KELLY)



$L > 100 \text{ m}$



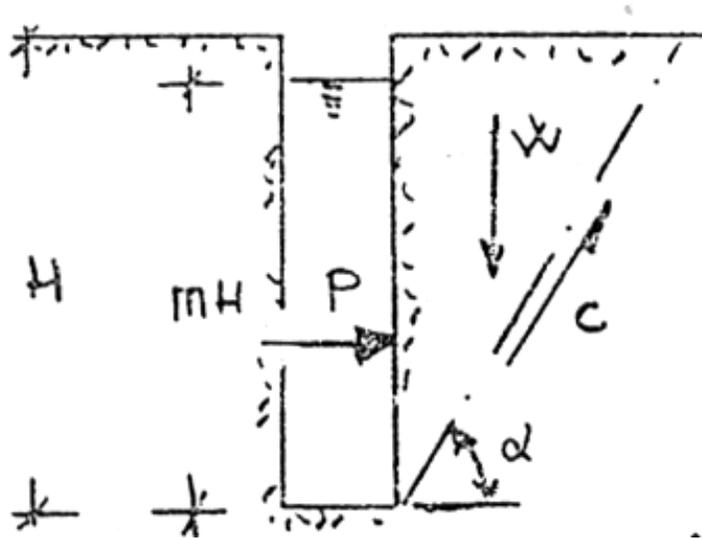
**ESEMPIO DI ATTREZZATURA  
DI PERFORAZIONE**



## **SOSTEGNO DELLA PERFORAZIONE**

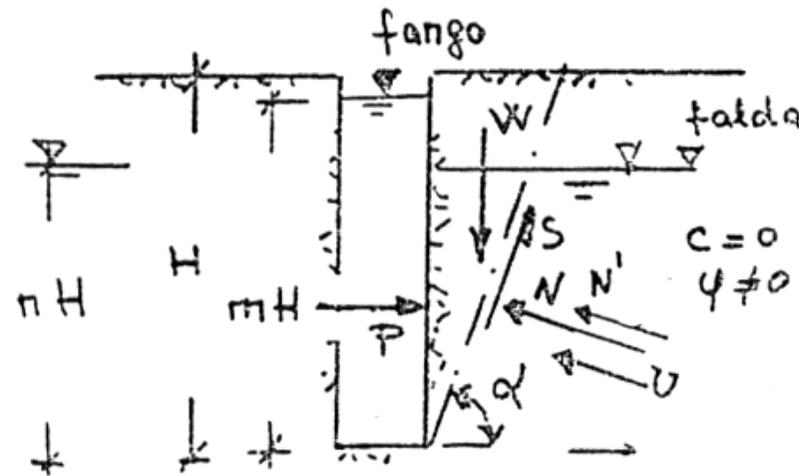
- **Rivestimento (vibroinfisso o trascinato)**
  - **infissione**
  - **stabilità fondo foro**
  - **estrazione**
  
- **Fanghi bentonitici o polimerici**
  - **stabilità delle pareti e del fondo**

## STABILITA' DELLE PARETI DI SCAVO Terreno a grana fine (ND)



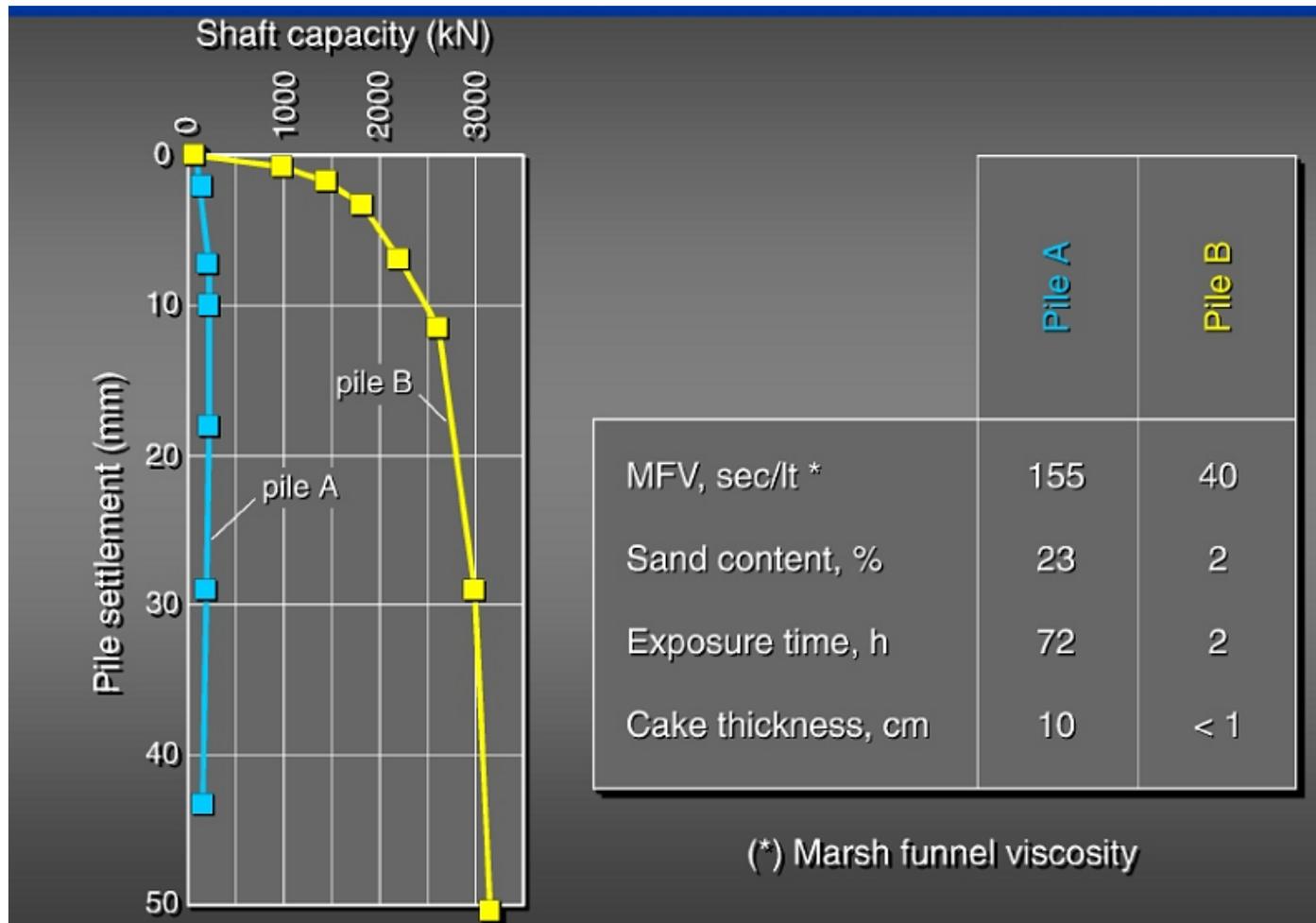
$$SF = \frac{C_{lim}}{C} = \frac{4c_u}{H(\gamma - m^2\gamma_f)}$$

## STABILITA' DELLE PARETI DI SCAVO Terreno a grana grossa (D)

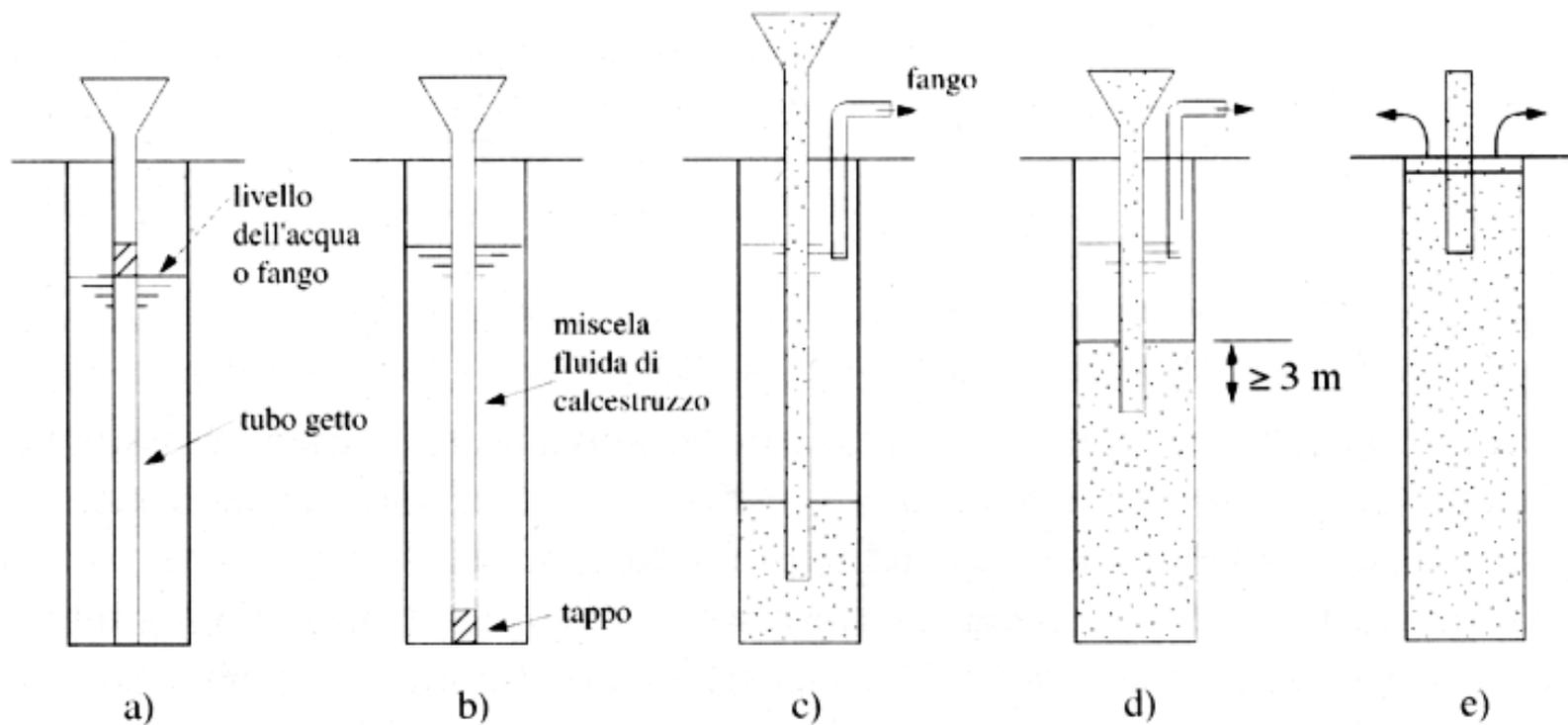


$$SF = \frac{N' \tan \varphi}{S} = \frac{m^2 \gamma_f + \gamma \cot \alpha \cos \alpha - \frac{\gamma \cdot n^2}{\sin \alpha}}{\gamma \cos \alpha - m^2 \gamma_f \cos \alpha} \tan \varphi$$

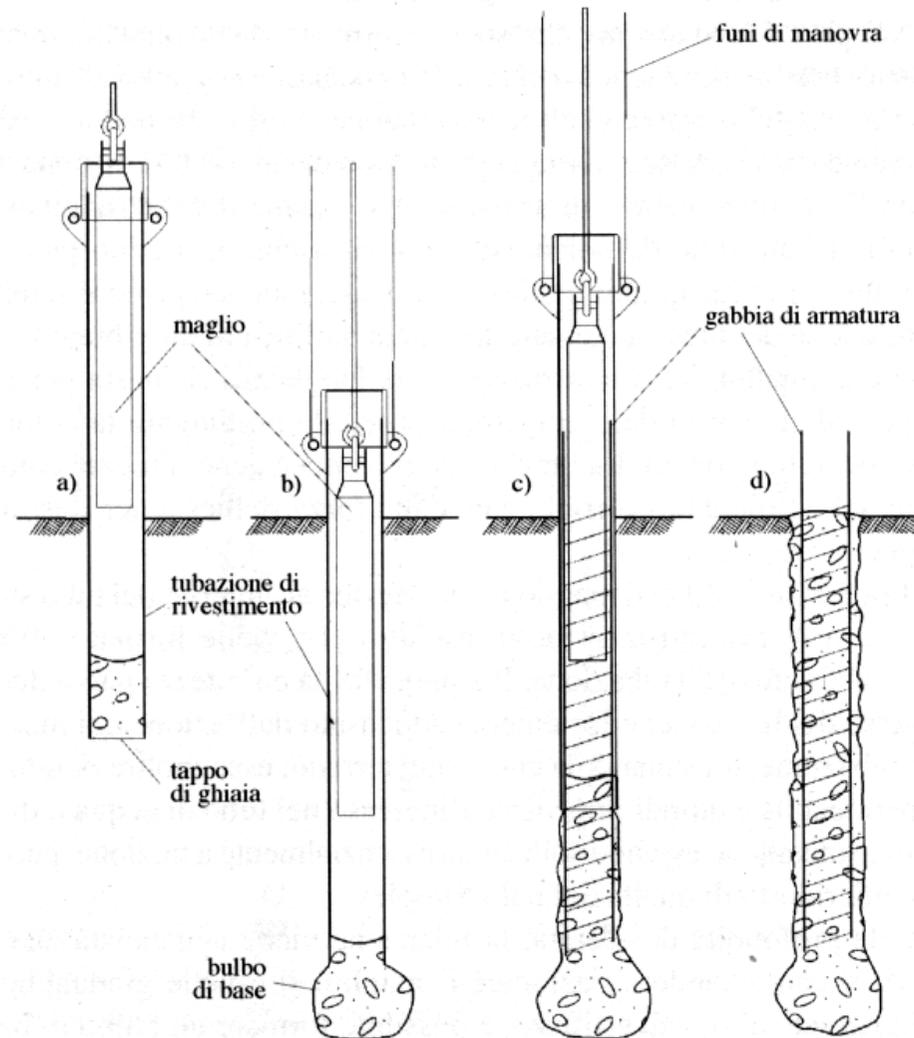
INFLUENZA DEL FANGO BENTONITICO (Backer et Al., 1993; O' Neill & Hassan, 1994)



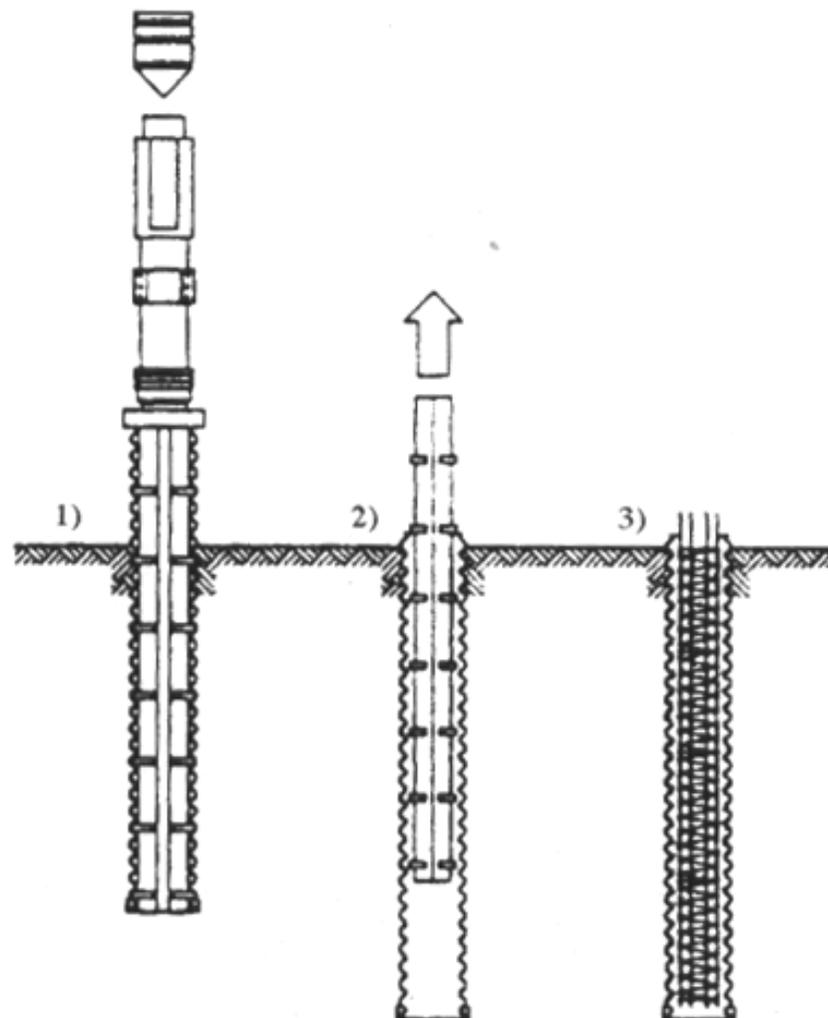
# GETTO DEL FUSTO IN CLS



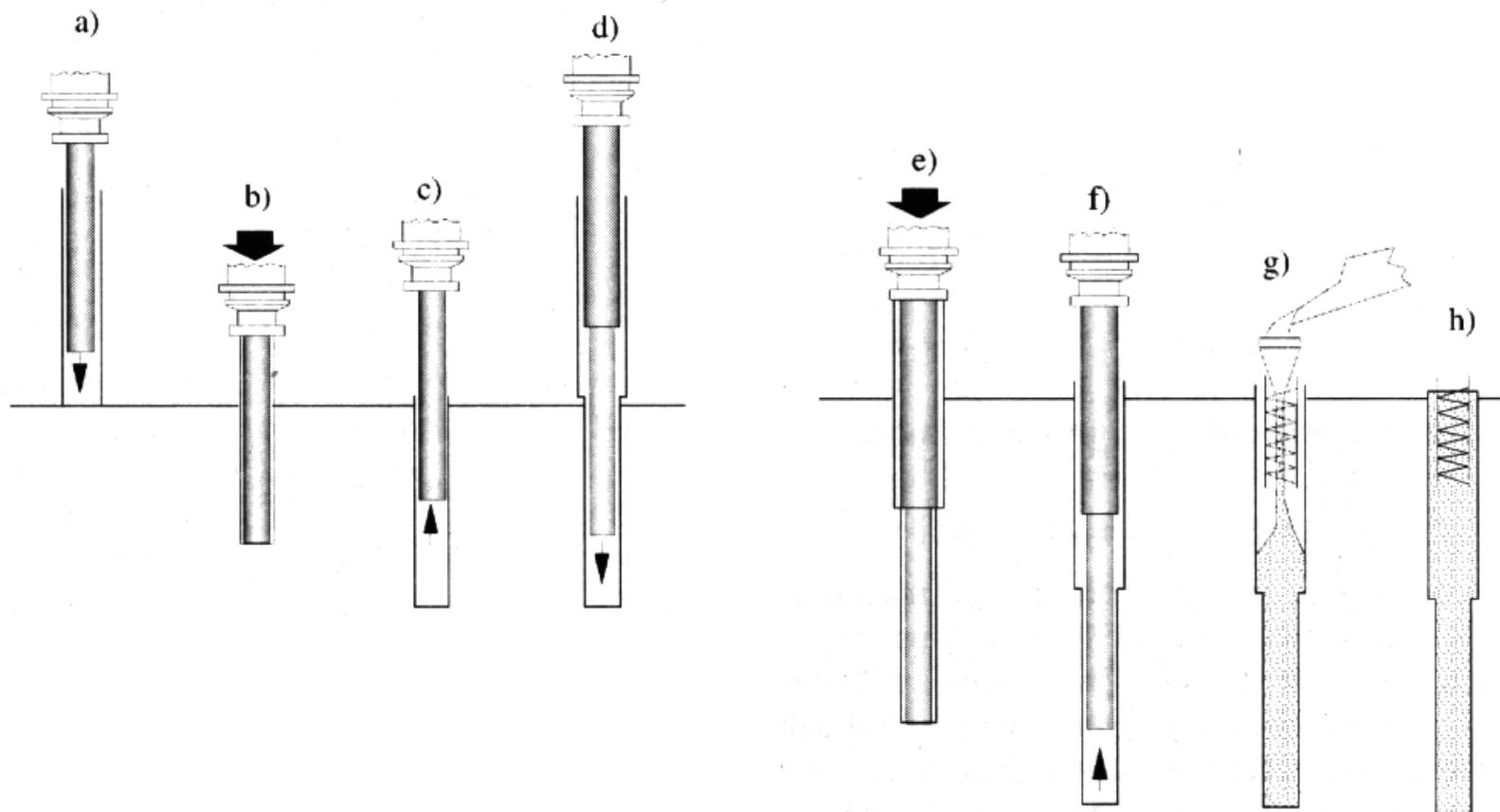
**PALO BATTUTO  
GETTATO IN OPERA  
TIPO "FRANKI"**



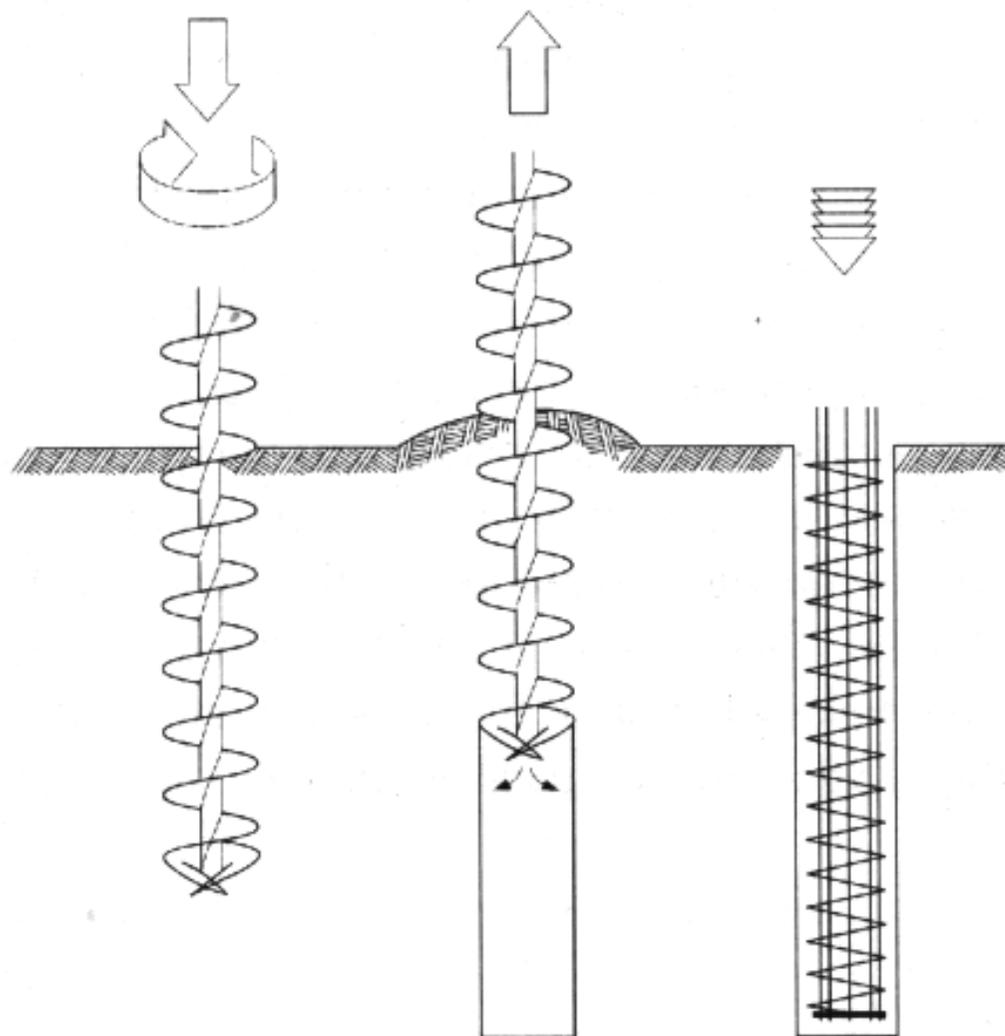
**PALO BATTUTO  
CON LAMIERINO  
TIPO "LACOR"**



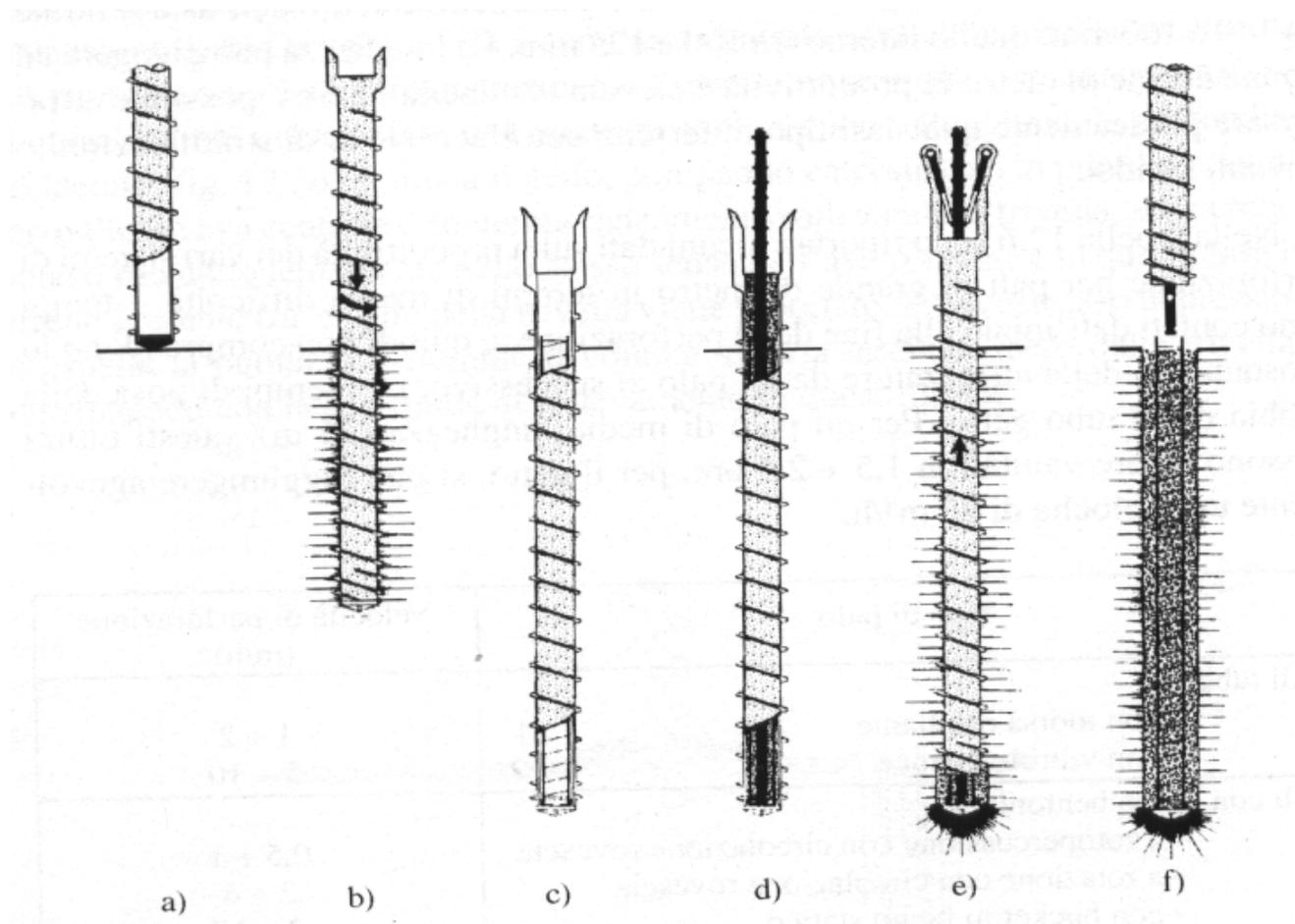
## PALO BATTUTO IN ACCIAIO - TIPO "MULTITON"



**PALO AD ELICA  
CONTINUA (CFA)**

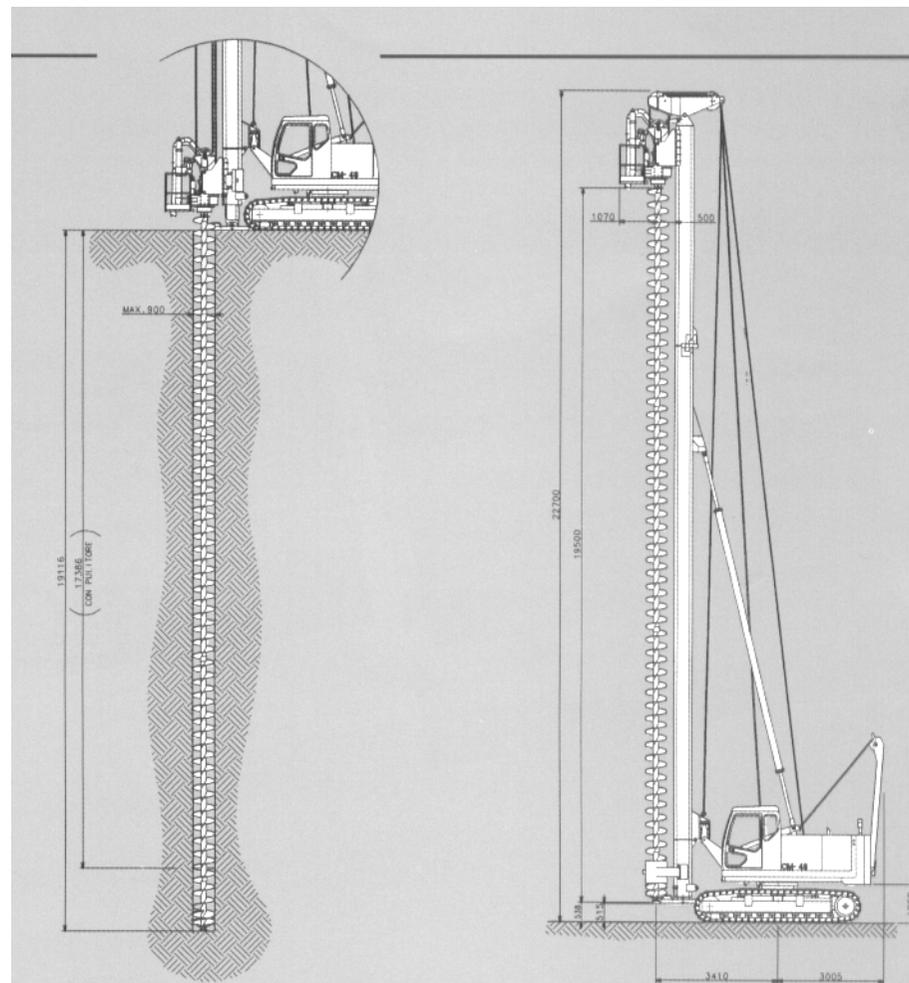


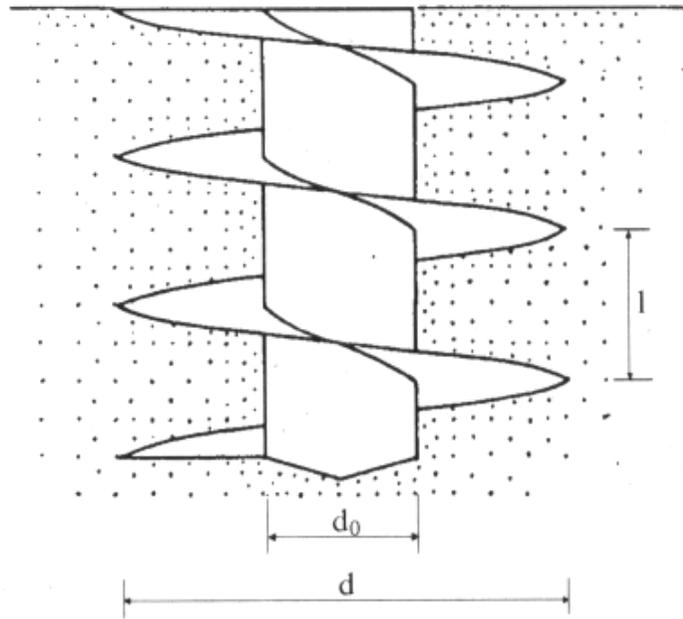
## PALO TRIVELLATO - PRESSATO AD ELICA CONTINUA



**PALO AD ELICA  
CONTINUA (CFA)**

**ATTREZZATURA  
DI PERFORAZIONE**



**AVANZAMENTO DELLA TRIVELLA: ANALISI DEL FENOMENO**

$$V_d = \frac{\pi}{4} \cdot d_0^2 \cdot v \cdot \Delta t$$

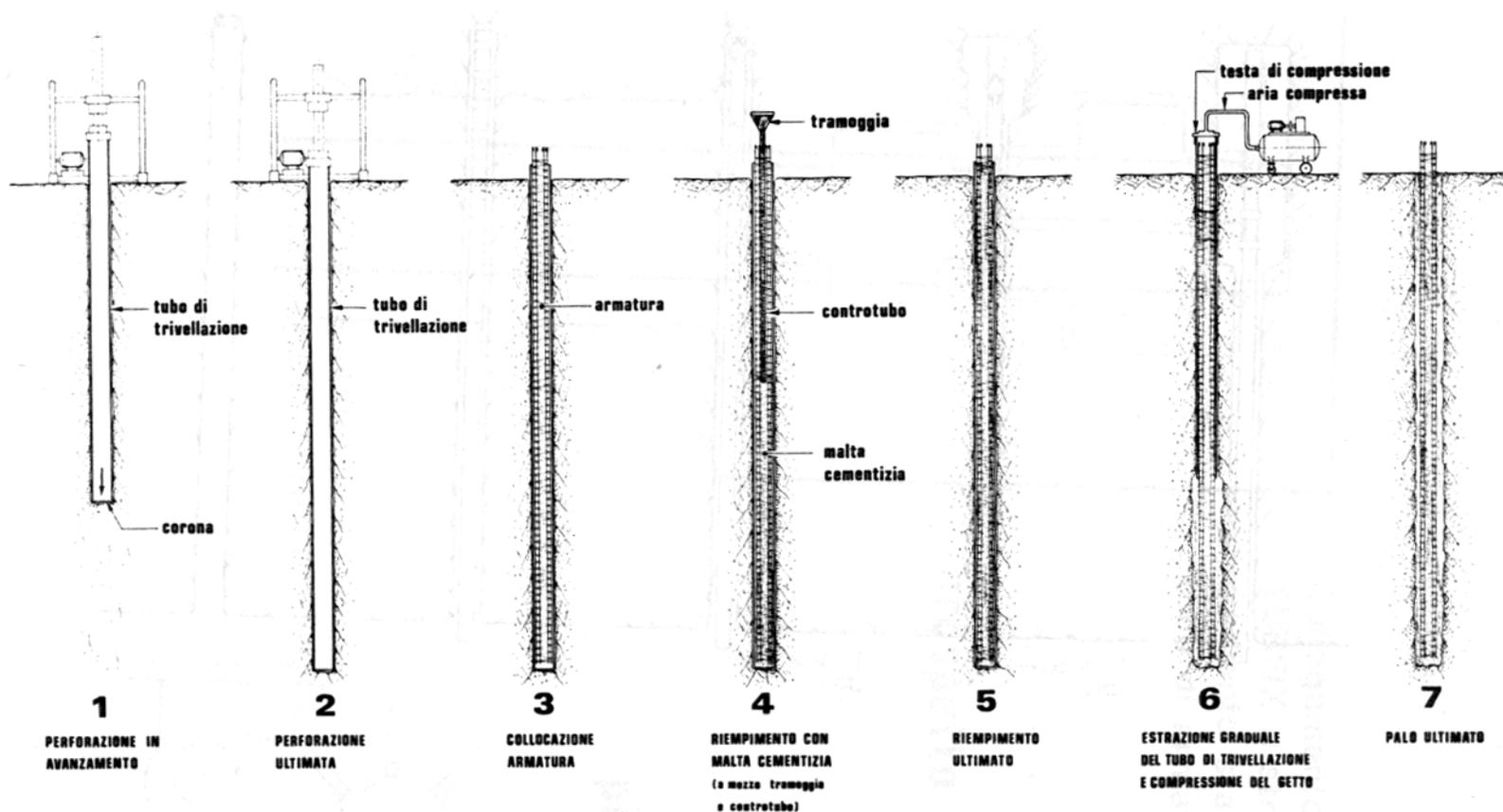
$$V_a = \frac{\pi}{4} \cdot (d^2 - d_0^2) \cdot (n \cdot l - v) \cdot \Delta t$$

$$V_a > 0 \text{ se } v < n \cdot l \cdot \left(1 - \frac{d_0^2}{d^2}\right)$$

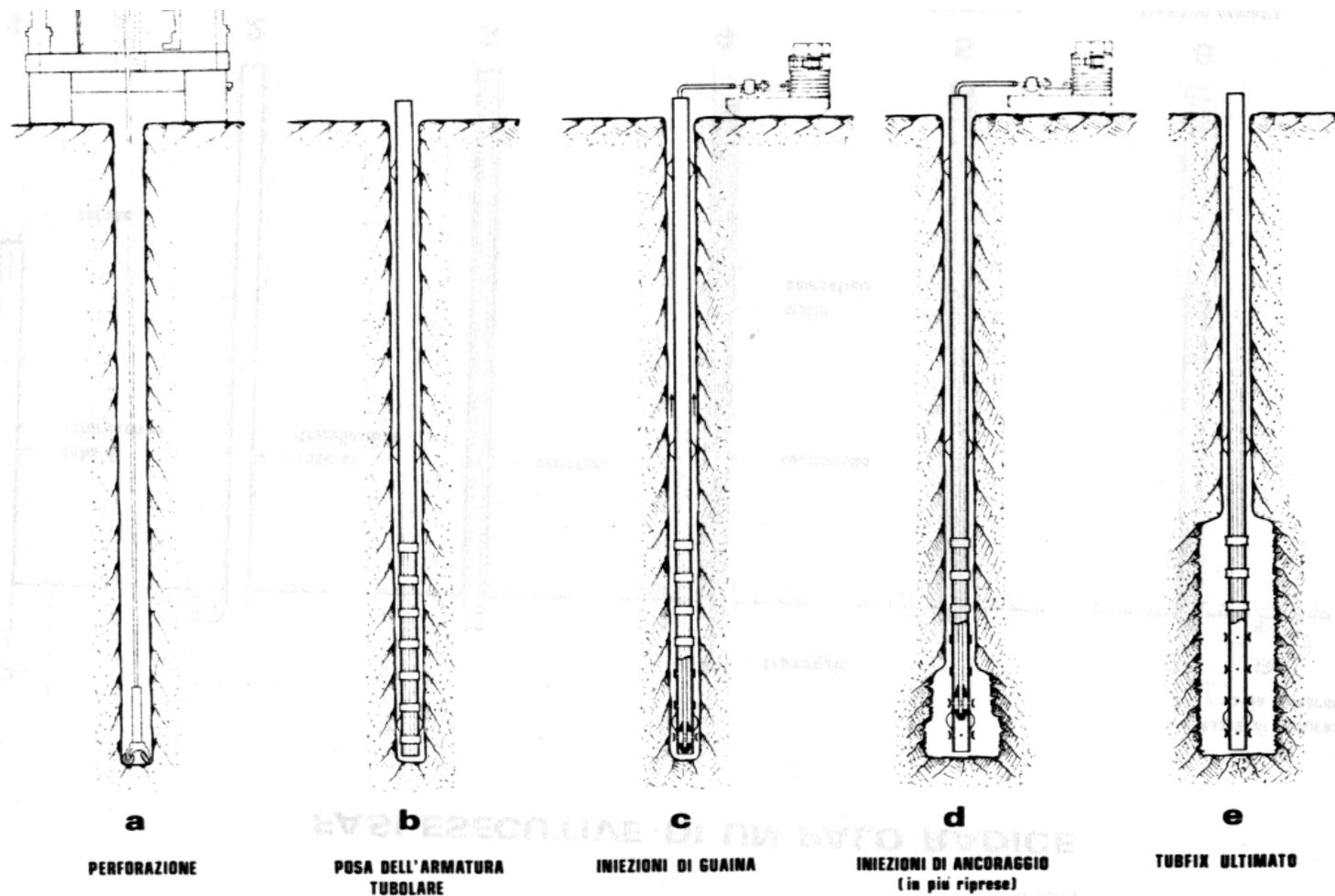
## PRODUTTIVITA' DELLE ATTREZZATURE

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)



# **FONDAZIONI**

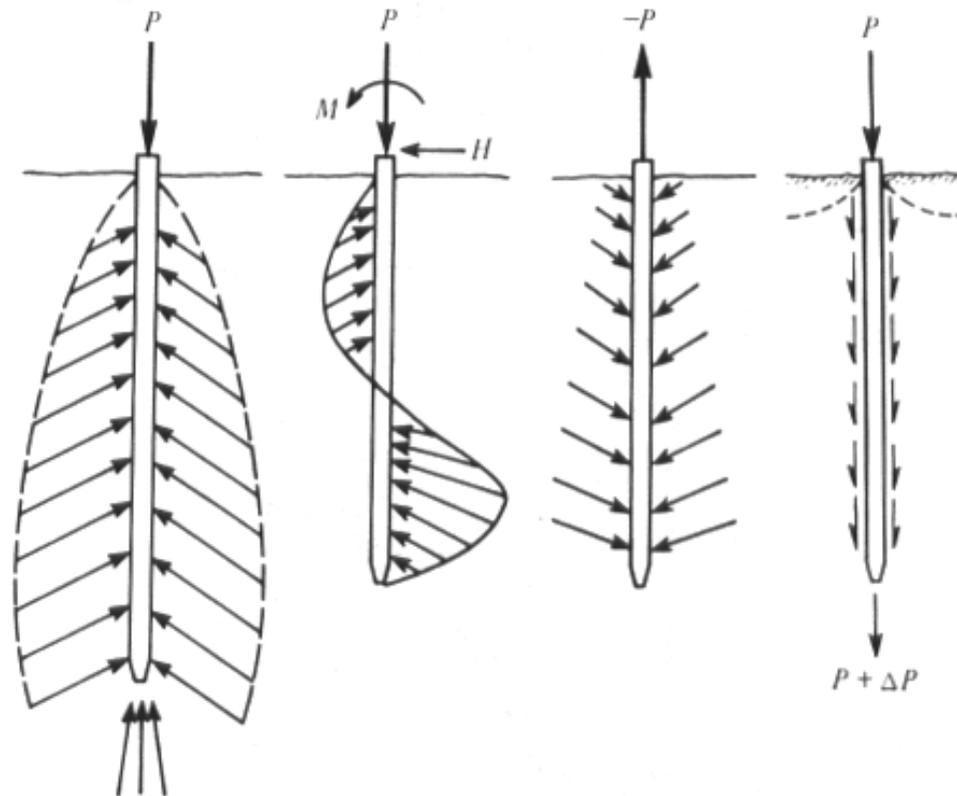
**ing. Nunziante Squeglia**

## **5b. CARICO LIMITE**

CARICO LIMITE

# CARICO LIMITE DEL PALO SINGOLO

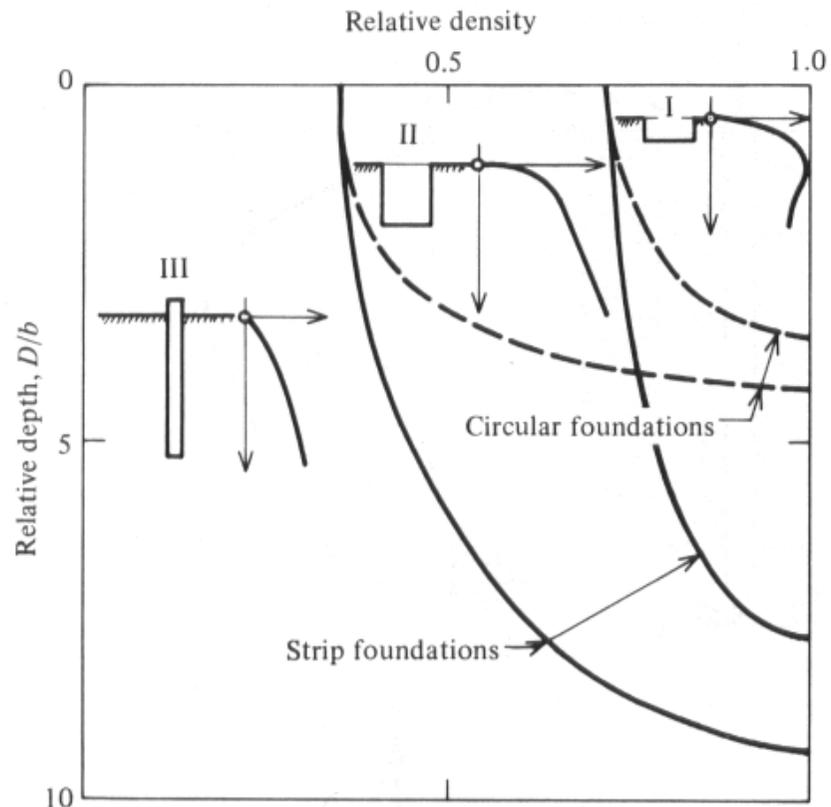
## Generalità



CARICO LIMITE

# CARICO LIMITE DEL PALO SINGOLO

## Generalità



# DETERMINAZIONE DEL CARICO LIMITE

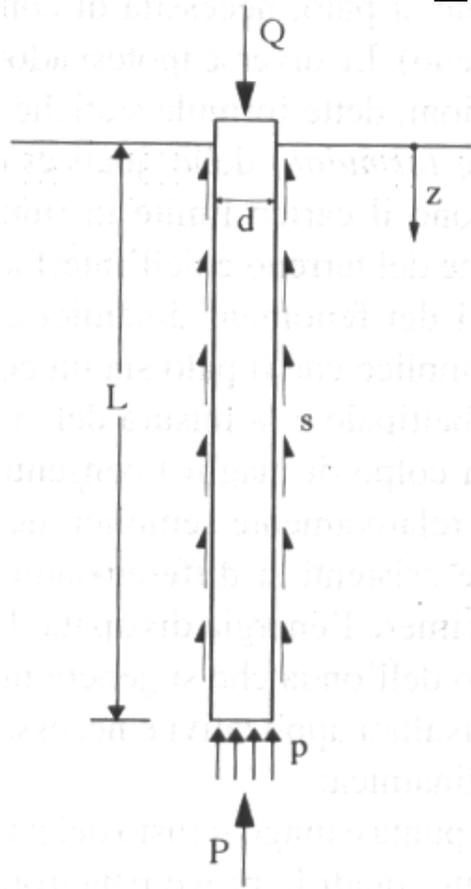
**Approcci disponibili:**

- **Formule statiche**
- **Formule empiriche**
- **Formule dinamiche**
- **Determinazione diretta (n° 6)**

# CARICO LIMITE

## Formule statiche

CARICO LIMITE



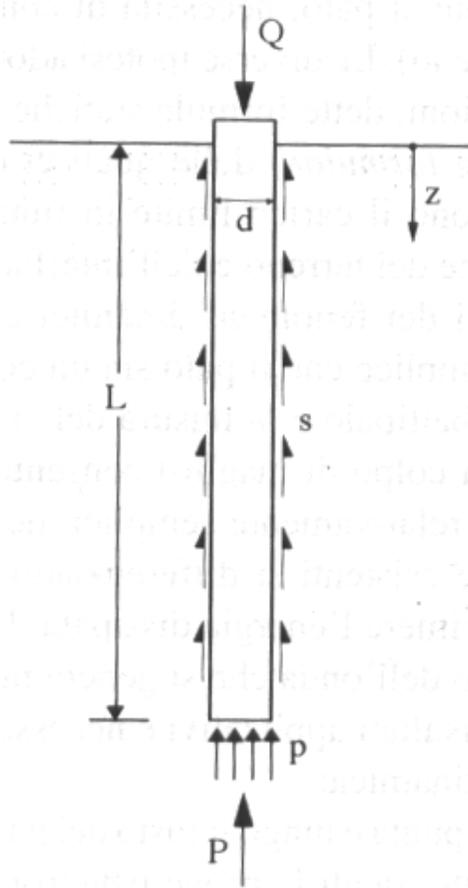
$$Q_{\text{lim}} = P + S = \frac{\pi d^2}{4} p + \pi d \int_0^L s \cdot dz$$

Suddivisione convenzionale tra P ed S

# CARICO LIMITE

## Formule statiche: resistenza alla punta

CARICO LIMITE



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

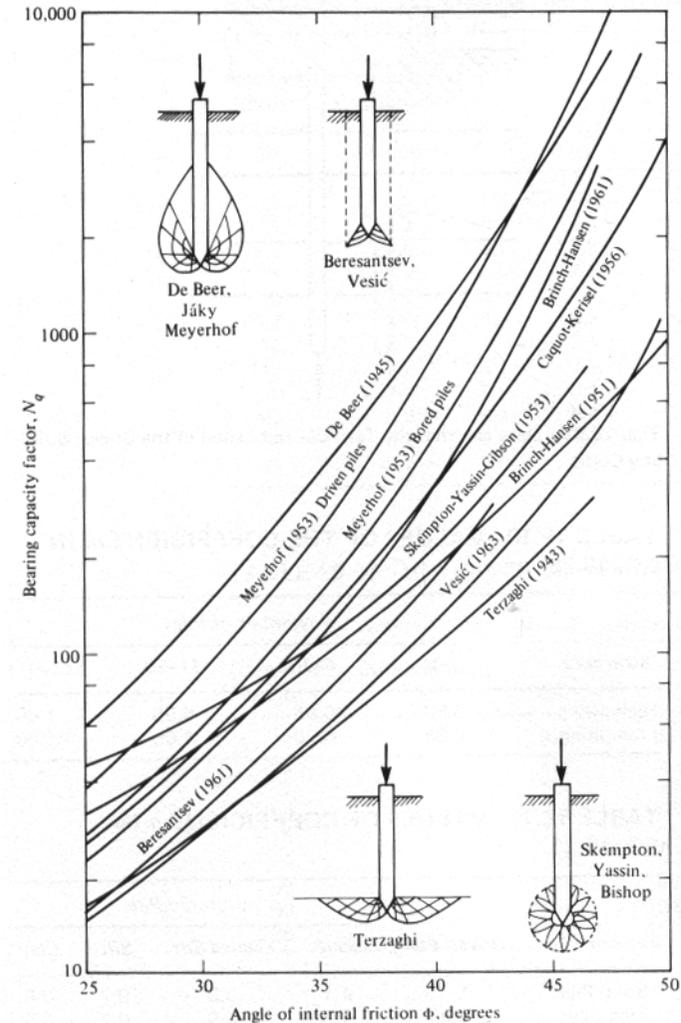
$$U) \quad p = 1 \cdot \sigma_{vL} + N_c c_u$$

CARICO LIMITE

# CARICO LIMITE

Formule statiche:  
resistenza alla punta

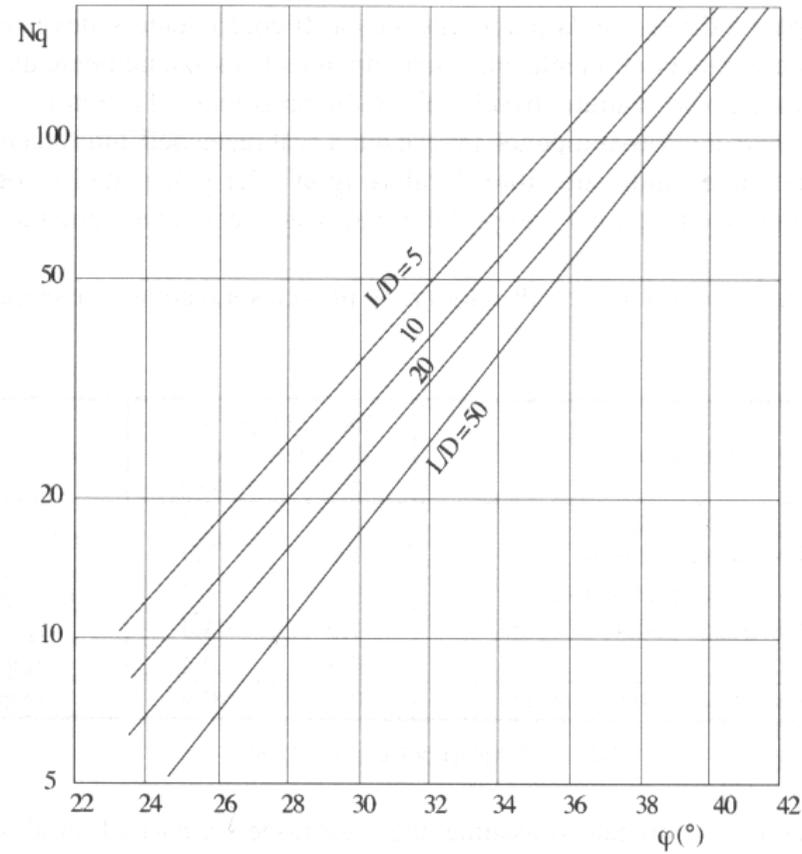
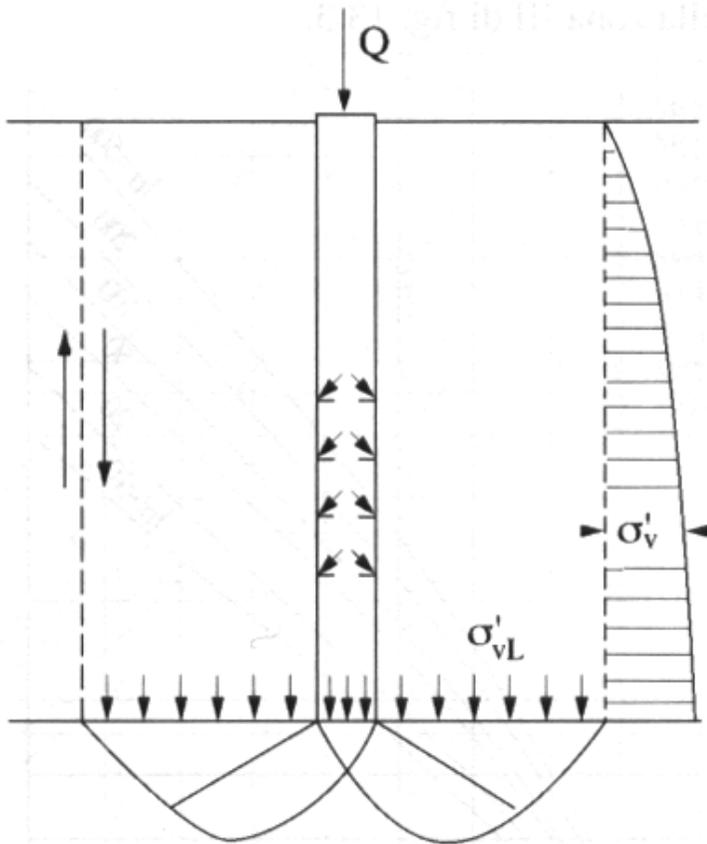
Valori di  $N_q$  secondo  
diverse teorie



# 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

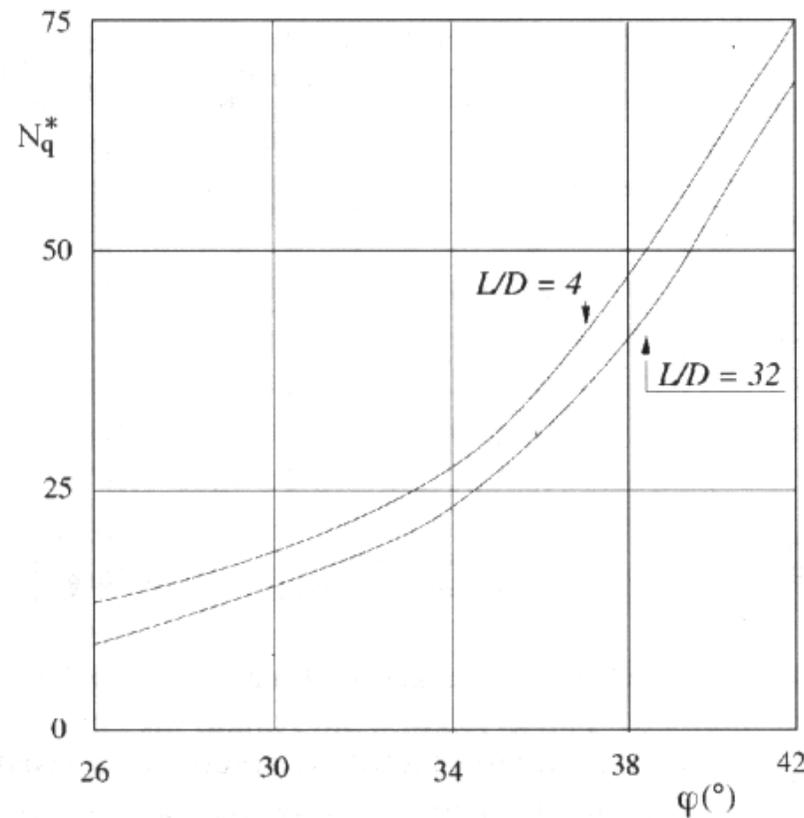
Berazantzev (1965) suggerisce  $0.06d - 0.1d$

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

# CARICO LIMITE

## Pali di grande diametro

CARICO LIMITE



Berezantzev, 1965

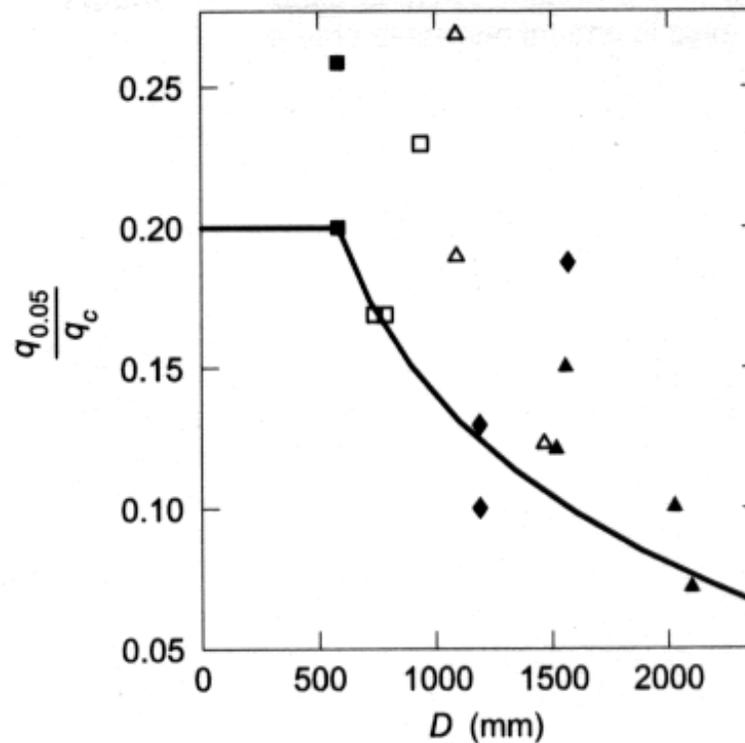
# CARICO LIMITE

## Pali di grande diametro (trivellati)

CARICO LIMITE

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

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



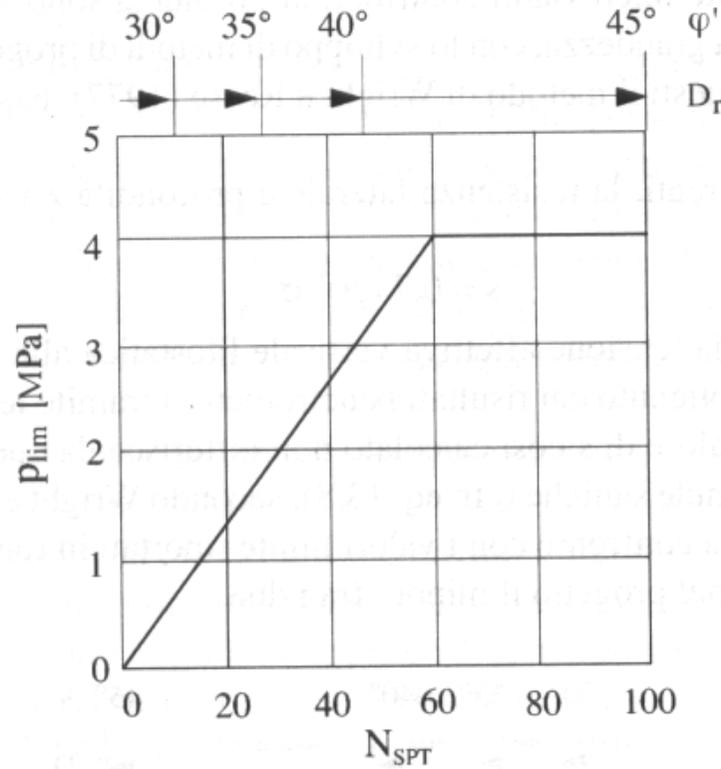
Jamiolkowski e Lancellotta, 1988

CARICO LIMITE

# CARICO LIMITE

## Pali di grande diametro

### Wright & Reese (1977)



## 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)

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

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

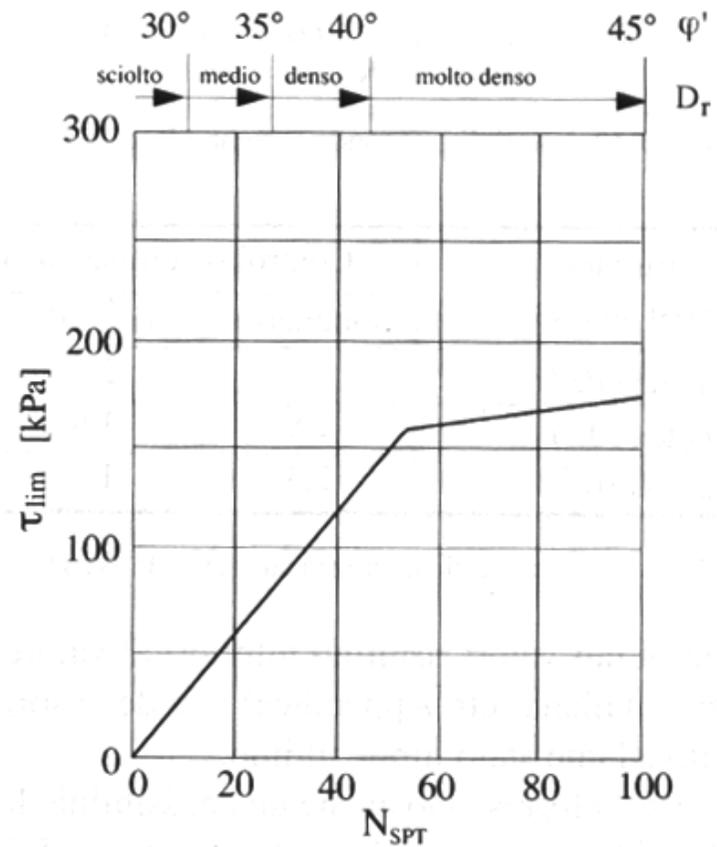
# CARICO LIMITE

Formule statiche: resistenza laterale (D)

Wright & Reese (1977)

Pali di grande diametro

$$s = 0.7 \cdot \tan \varphi' \cdot \sigma'_{v0}$$



# CARICO LIMITE

## Formule statiche: resistenza laterale (U)

$$s = \alpha \cdot c_u$$

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

**CARICO LIMITE**

## CARICO LIMITE

**Correlazioni con prove in sito**

**Prove SPT: resistenza alla punta**

$$p = K \cdot N_{SPT} \text{ [MPa]}$$

Palo	Terreno	K	Fonte
Battuto prefabbricato	Sabbia	0,45	Martin <i>et al.</i> , 1987
	Sabbia	0,40	Decourt, 1982
	Limo, limo sabbioso	0,35	Martin <i>et al.</i> , 1987
	Limo glaciale	0,25	Thorburn, MacVicar, 1971
	Limo sabbioso residuale	0,25	Decourt, 1982
	Limo argilloso residuale	0,20	Decourt, 1982
	Argilla	0,20	Martin <i>et al.</i> , 1987
	Argilla	0,12	Decourt, 1982
	Qualsiasi	0,30	Shioi, Fukui, 1982
Battuto gettato in opera	Incoerente	0,15	Yamashita, 1987 ( $p \leq 7,5$ MPa)
Trivellato	Sabbia	0,10	Shioi, Fukui, 1982
	Argilla	0,15	Shioi, Fukui, 1982

**CARICO LIMITE**

# CARICO LIMITE

## Correlazioni con prove in sito

### Prove SPT: resistenza laterale

$$s = \alpha + \beta \cdot N_{SPT} \quad [\text{kPa}]$$

Palo	Terreno	$\alpha$	$\beta$	Note	Fonte
Battuto prefabbricato	Incoerente	0	2		Meyerhof, 1956 Shioi, Fukui, 1982
	Qualsiasi	10	3,3	$3 \leq N \leq 50$ $s \leq 170 \text{ kPa}$	Decourt, 1982
	Coesivo	0	10		Shioi, Fukui, 1982
Battuto gettato in opera	Incoerente	30	2	$s \leq 200 \text{ kPa}$	Yamashita, 1987 Shioi, Fukui, 1982
	Coesivo	0	5	$s \leq 150 \text{ kPa}$	Yamashita, 1987 Shioi, Fukui, 1982
		0	10		
Trivellato	Incoerente	0	1		Findlay, 1984 Shioi, Fukui, 1982 Wright, Reese, 1979 Shioi, Fukui, 1982
		0	3,3		
	Coesivo	0	5		
		10	3,3		

# CARICO LIMITE

**Correlazioni con prove in sito (GG)**

**Prove CPT: resistenza alla punta**

**Pali battuti**

$$p = q_c$$

**$q_c$  = valore medio tra  $L + d$  ed  $L - 4d$**

# CARICO LIMITE

Correlazioni con prove in sito (GG)

Prove CPT: resistenza laterale

Pali battuti

$$s = \alpha \cdot q_c$$

Stato di addensamento	$q_c$ (MPa)	$\alpha$
Molto sciolto	< 2	0,020
Sciolto	2 + 5	0,015
Medio	5 + 15	0,012
Denso	15 + 25	0,009
Molto denso	> 25	0,007

# 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 $\alpha$		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

## 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	$\geq R1$	$\geq R2$

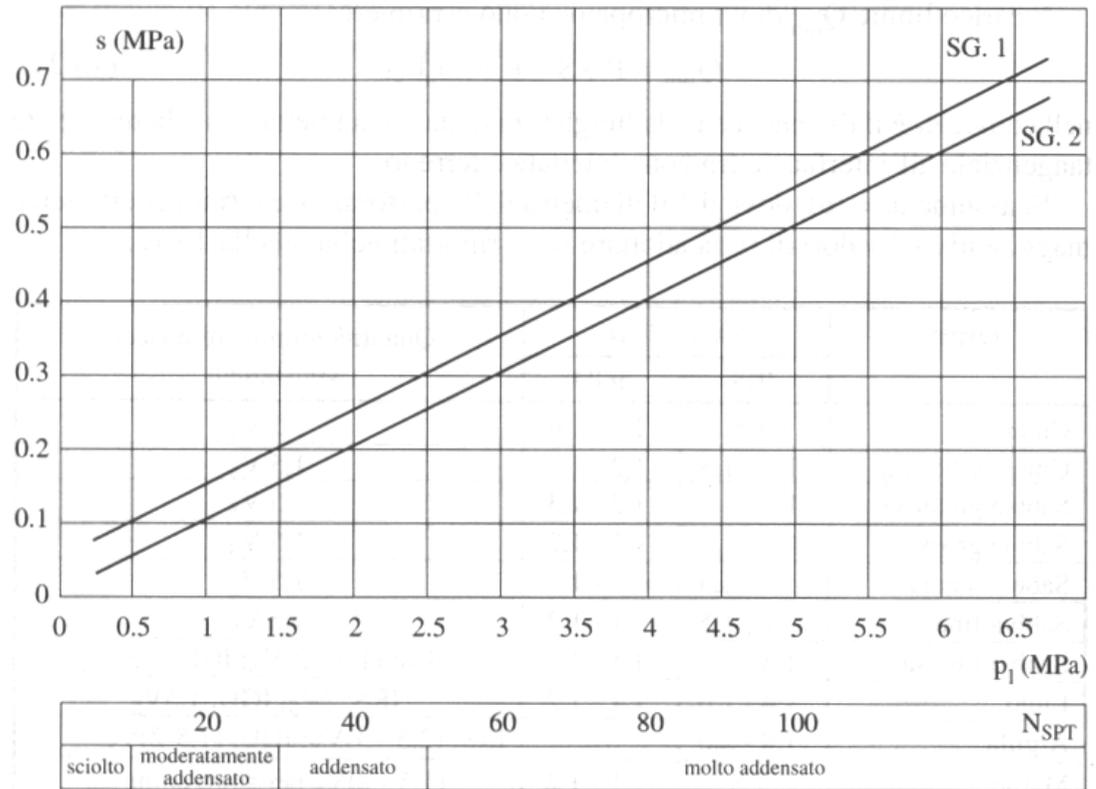
**CARICO LIMITE**

# CARICO LIMITE

## Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

Sabbie limose  
-  
Ghiaie



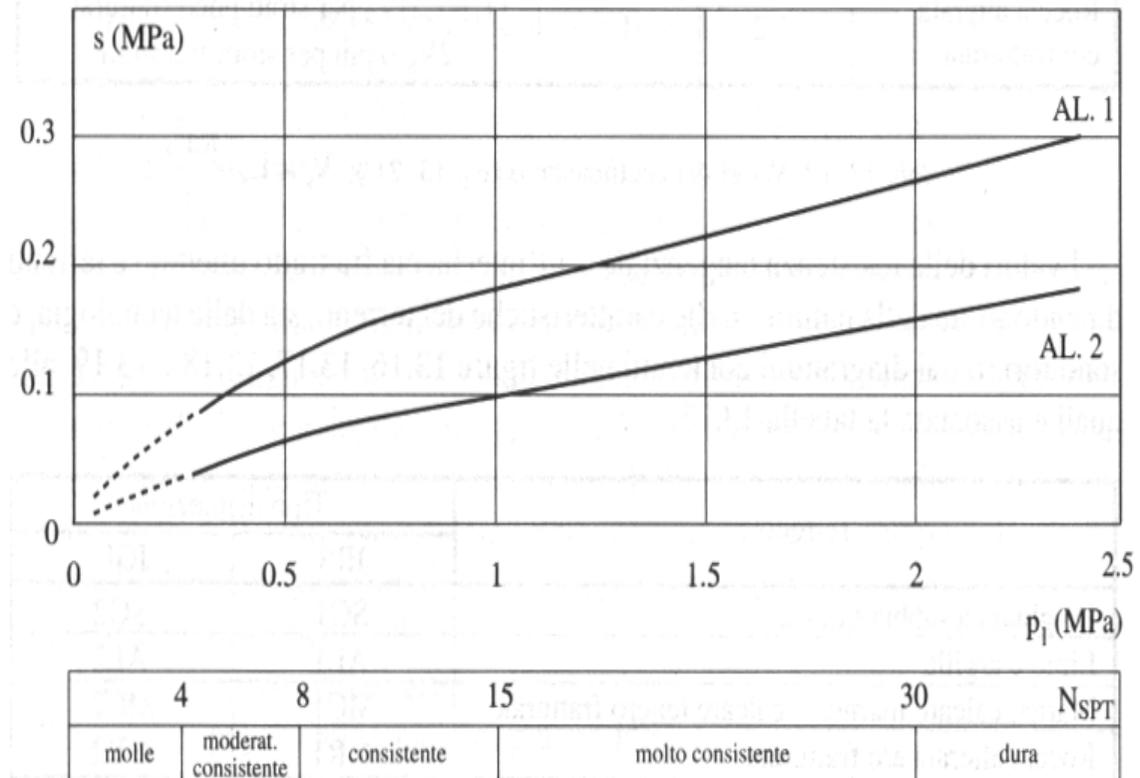
# CARICO LIMITE

## Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

CARICO LIMITE

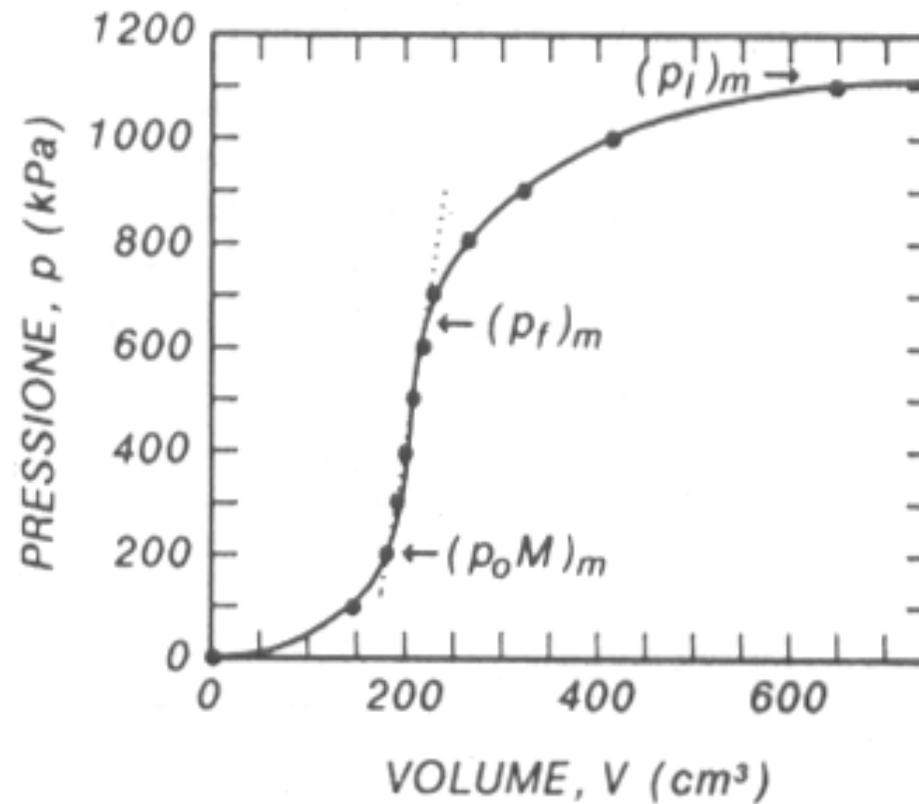
Argille  
-  
limi



CARICO LIMITE

# CARICO LIMITE Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)



# CARICO LIMITE

## Pali soggetti a forze orizzontali

### Broms (1964)

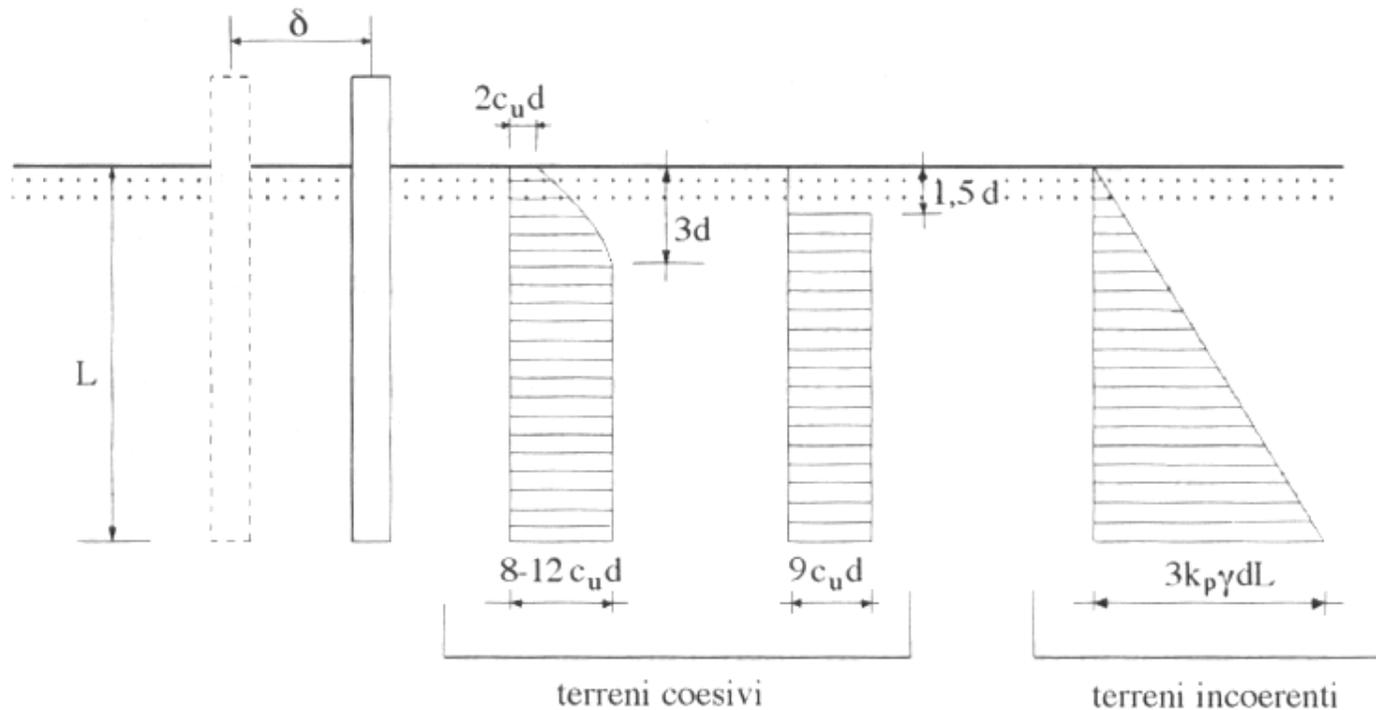
- terreno rigido – plastico
- palo verticale
- terreno omogeneo
- palo rigido – plastico

CARICO LIMITE

# CARICO LIMITE

## Pali soggetti a forze orizzontali

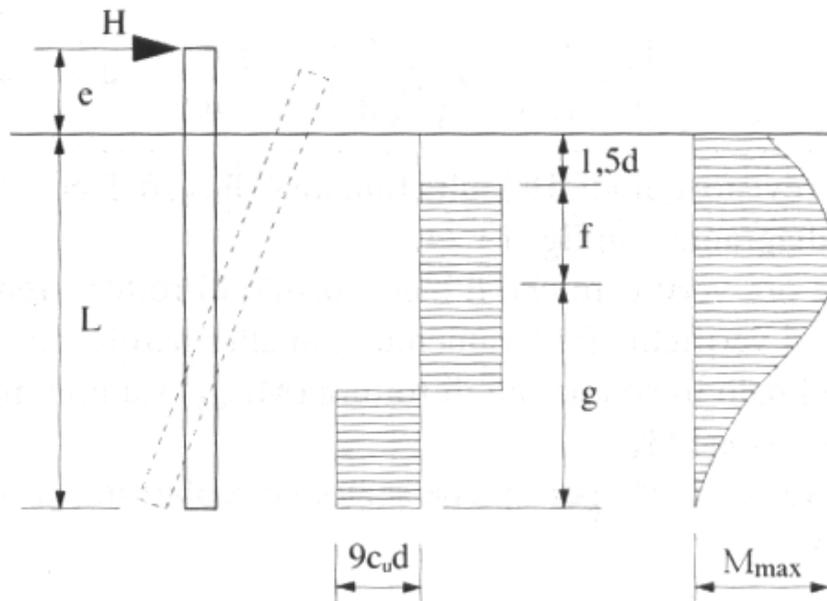
### Broms (1964): reazioni del terreno (U, D)



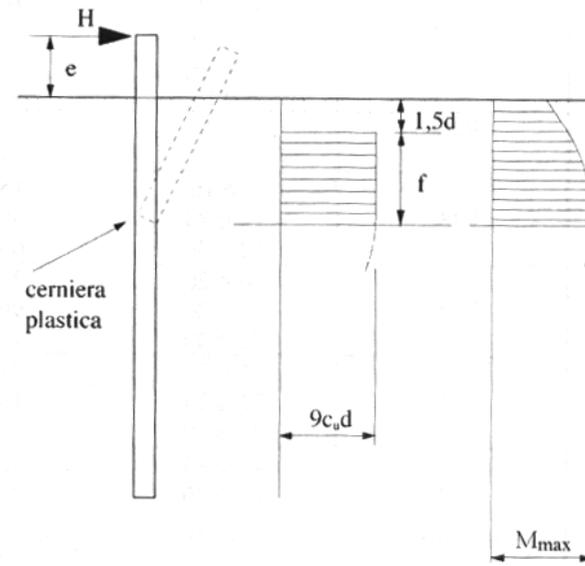
# CARICO LIMITE

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

CARICO LIMITE



corti

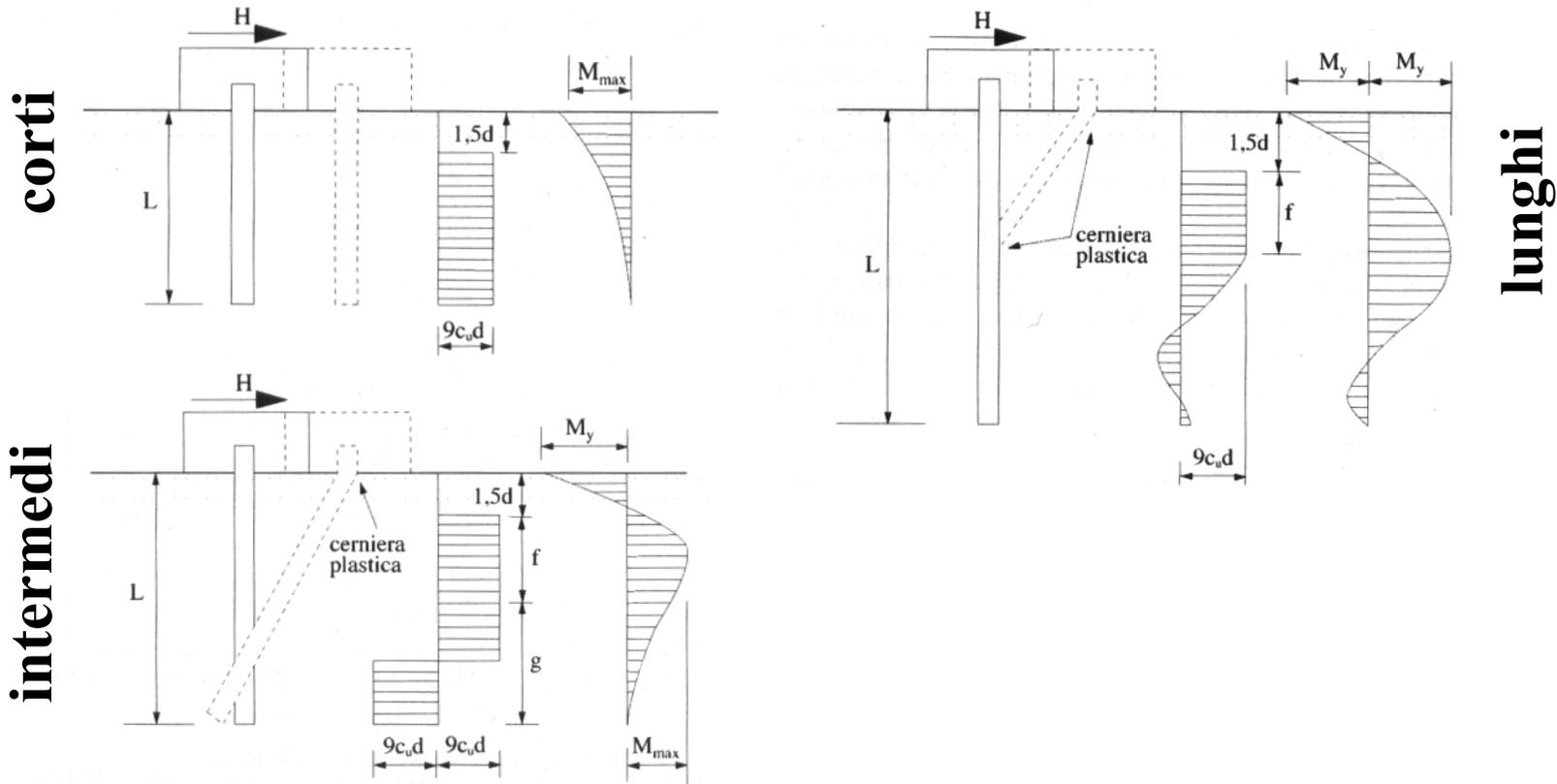


lunghi

# CARICO LIMITE

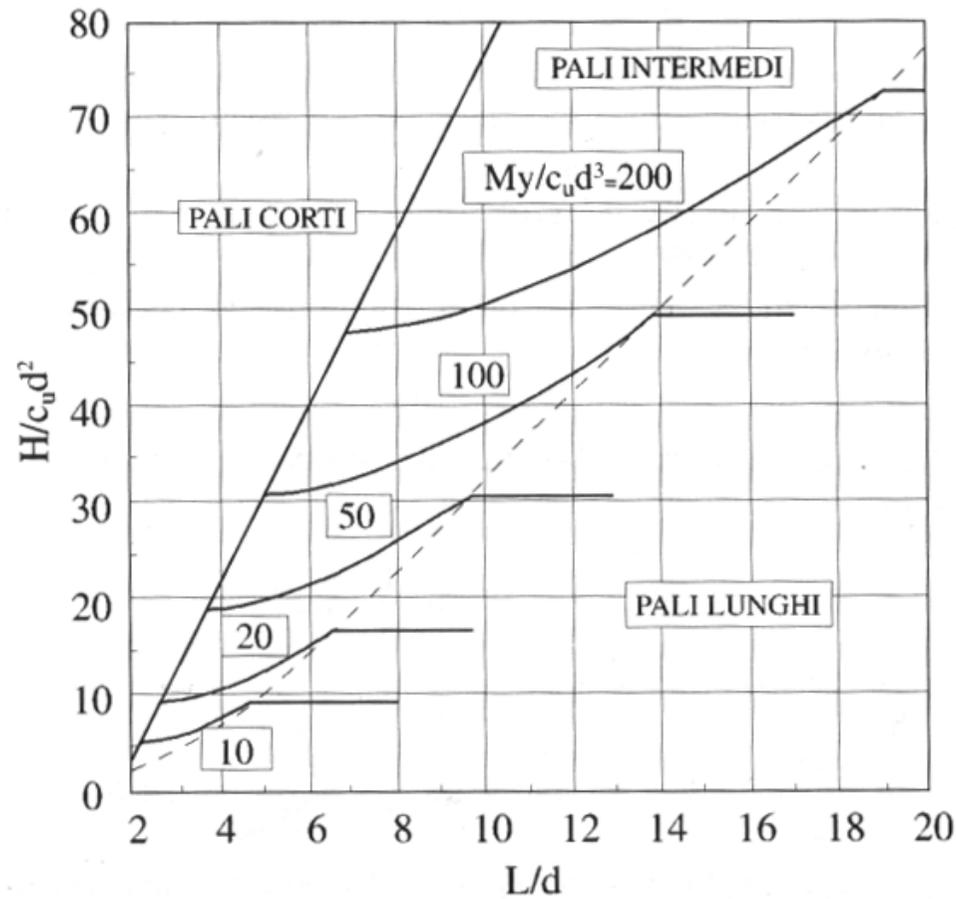
## Pali impediti di ruotare in testa (U)

CARICO LIMITE



CARICO LIMITE

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

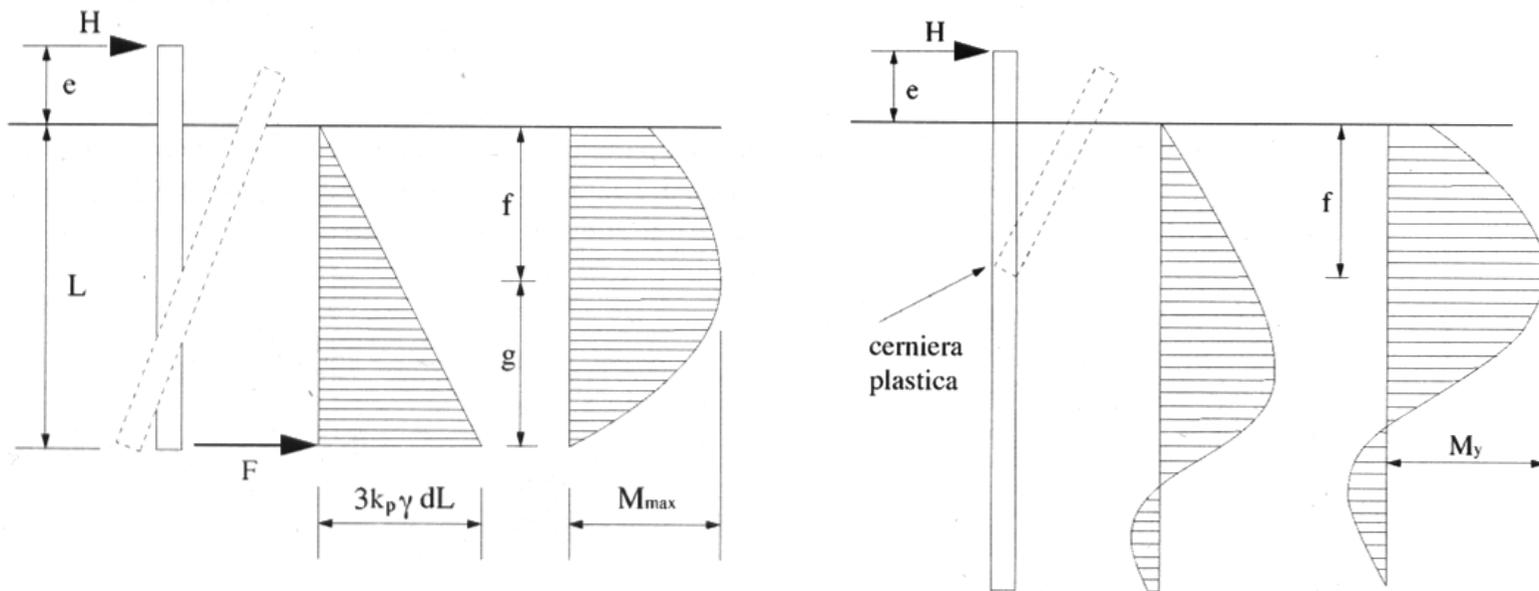


# CARICO LIMITE

## Pali soggetti a forze orizzontali

### Meccanismi per pali liberi in testa (D)

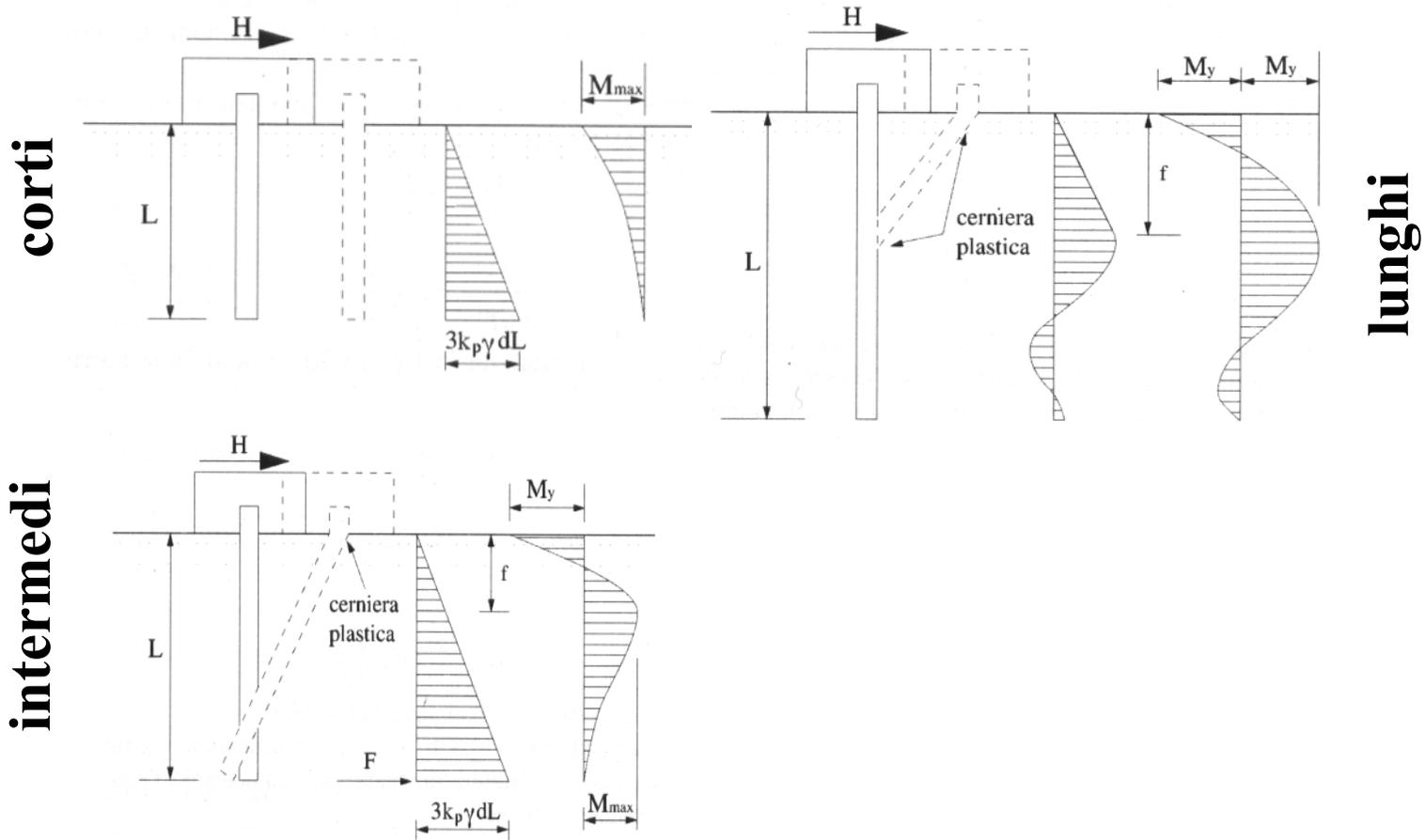
CARICO LIMITE



CARICO LIMITE

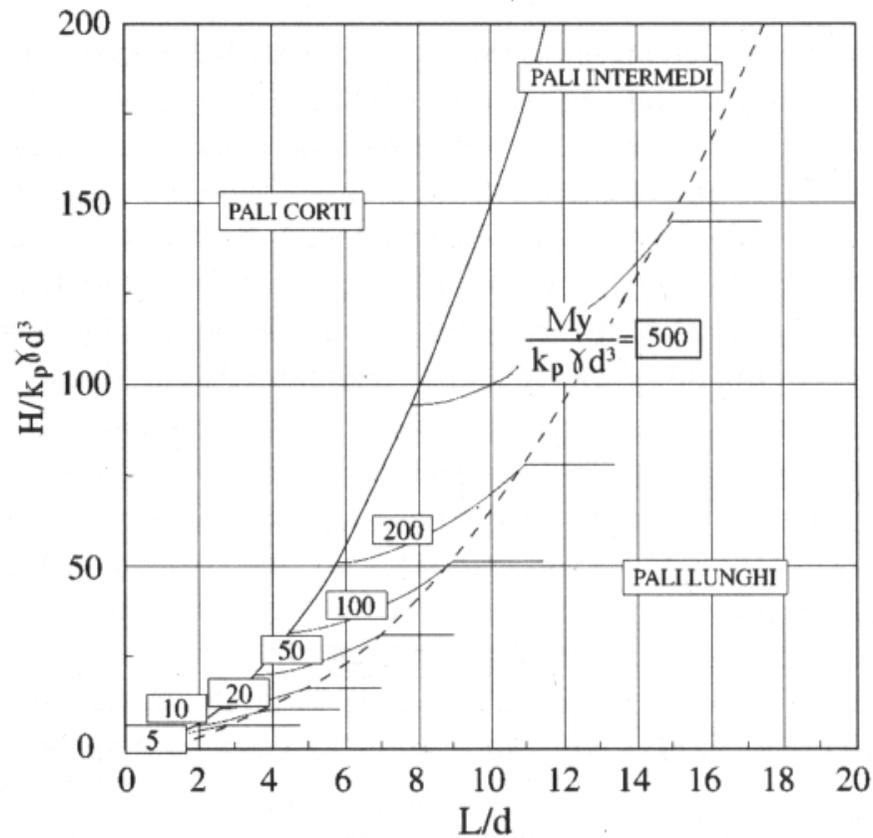
# CARICO LIMITE

## Pali impediti di ruotare in testa (D)



CARICO LIMITE

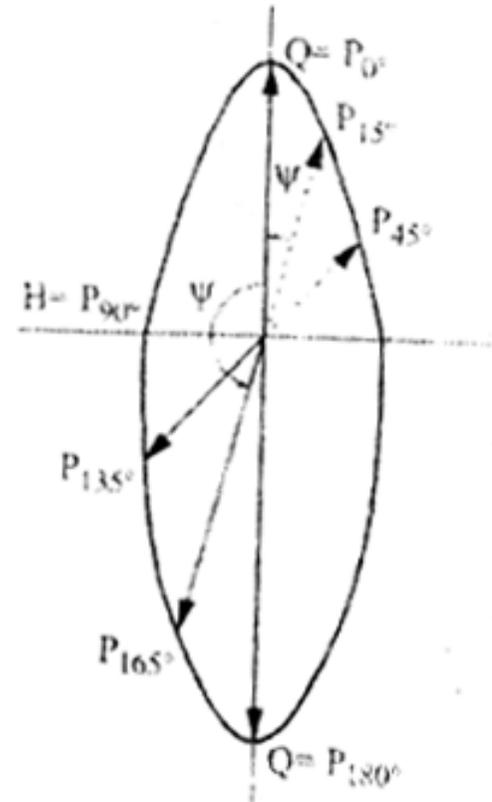
# Abaco per la determinazione di $H_{lim}$ Pali impediti di ruotare in testa (D)



## Combinazione delle azioni orizzontali e verticali (Cho & Kulhawy, 1995)

$$Q = Q_{\text{lim}}^s \left( \frac{\Psi}{90} - 1 \right) + Q_{\text{lim}}^b \left( \frac{\Psi}{90} - 1 \right)^{7.3}$$

$$H = H_{\text{lim}} \sqrt{\text{sen} \Psi}$$



# CARICO LIMITE

## Effetto del gruppo di pali

Il carico limite di un gruppo di pali non è il prodotto del carico limite del palo singolo per il numero di pali

$$Q_{\text{lim,gruppo}} = N \cdot E \cdot Q_{\text{lim,singolo}}$$

Vesic (1968): per terreni incoerenti  $E > 1$ ,  
cautelativamente  $E = 1$

# CARICO LIMITE

## Effetto del gruppo di pali – terreni coesivi

Converse - Labarre

$$E = 1 - \frac{\arctan(d/i)}{\pi/2} \cdot \frac{(m-1) \cdot n + (n-1) \cdot m}{m \cdot n}$$

Terzaghi - Peck

$$Q_{\text{gruppo}} = B_1 B_2 (N_c c_u + \gamma L) + 2(B_1 + B_2) L c_u$$

**CARICO LIMITE**

# CARICO LIMITE

**Effetto del gruppo di pali – terreni coesivi**  
**Terzaghi – Peck: Coefficiente  $N_c$**

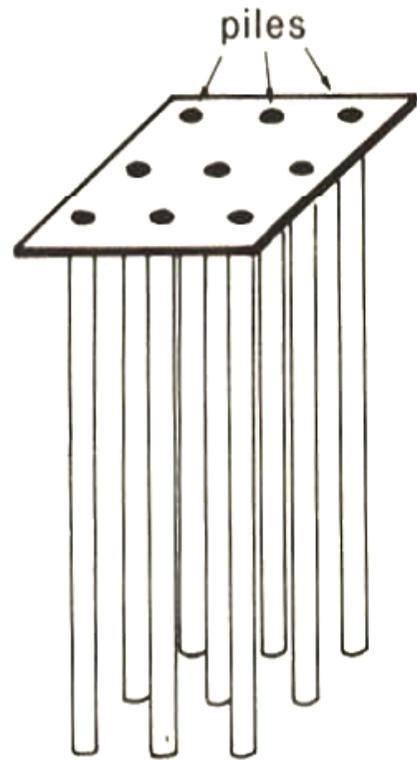
L/B <sub>2</sub>	N <sub>c</sub>	
	B <sub>1</sub> /B <sub>2</sub> = 1	B <sub>1</sub> /B <sub>2</sub> > 10
0,25	6,7	5,6
0,50	7,1	5,9
0,75	7,4	6,2
1,00	7,7	6,4
1,50	8,1	6,8
2,00	8,4	7,0
2,50	8,6	7,2
3,00	8,8	7,4
≥ 4	9,0	7,5

$$N_{c,rett} = N_{c,\infty} (1 + 0.2B_2/B_1)$$

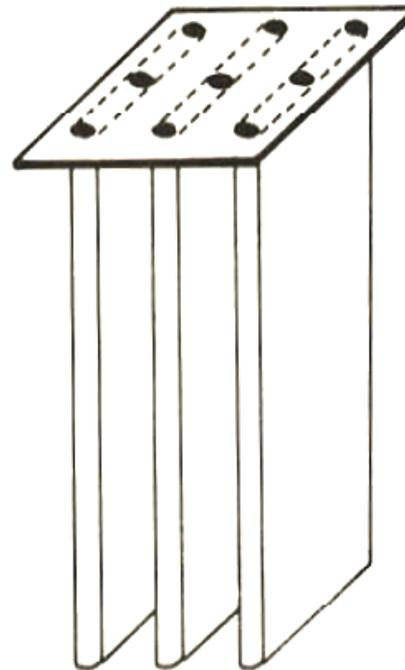
# CARICO LIMITE SOTTO CARICHI ORIZZONTALI

## Effetto del gruppo

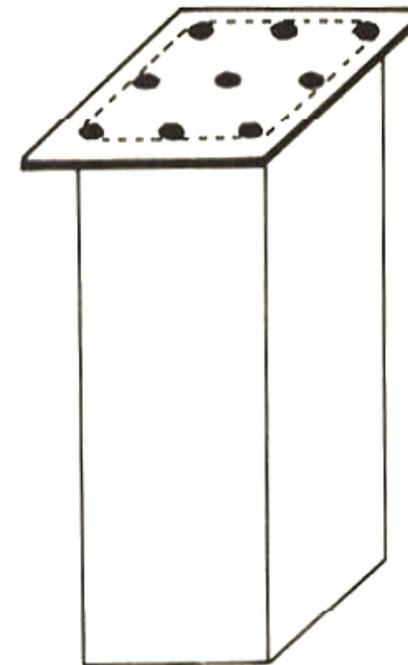
CARICO LIMITE



(a) Single pile failure



(b) Failure of rows of piles



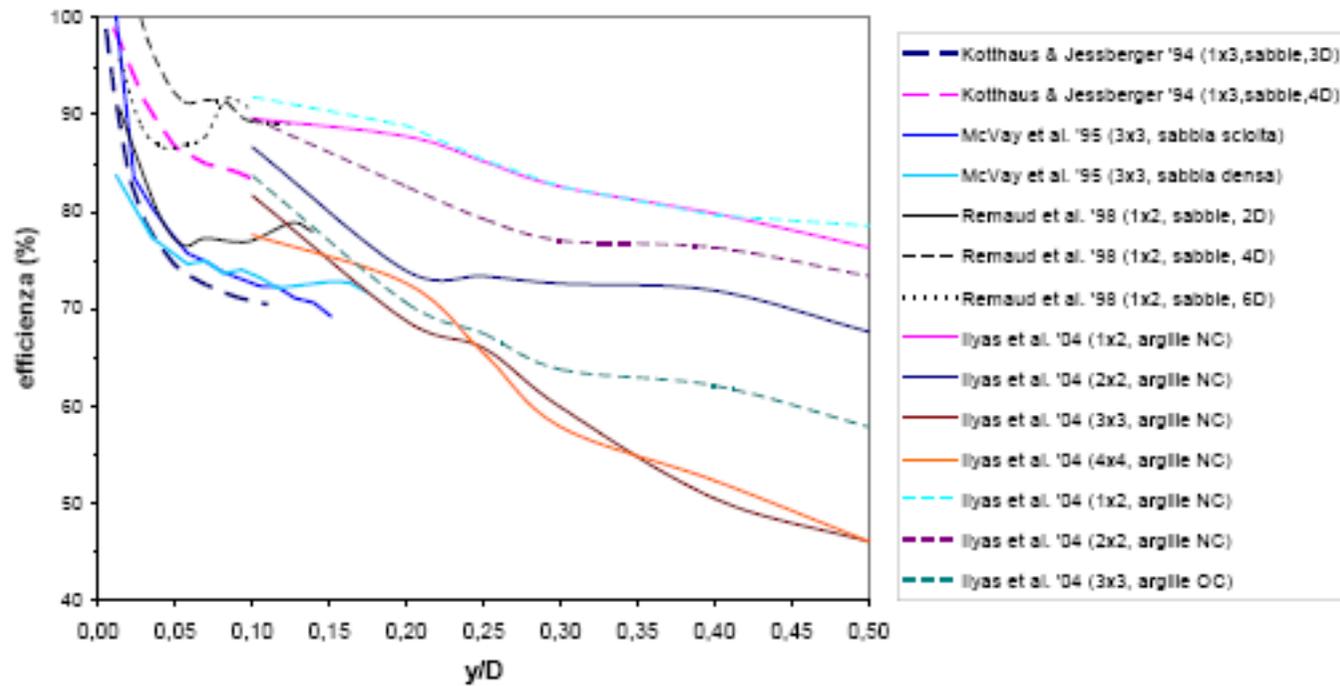
(c) Block failure

# CARICO LIMITE SOTTO CARICHI ORIZZONTALI

## Effetto del gruppo

$$\eta = \frac{H_{\text{gruppo}}}{m \cdot H_{\text{sin golo}}}$$

CARICO LIMITE



pali liberi di ruotare in testa

## CARICO LIMITE SOTTO CARICHI ORIZZONTALI Efficienza (Reese & Van Impe, 2001)

CARICO LIMITE



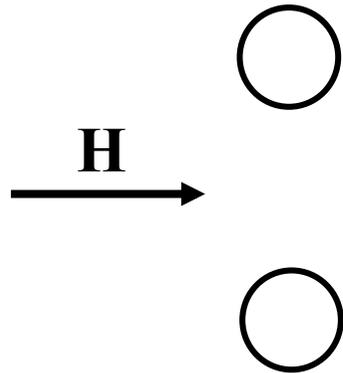
$$e_A = 0.70 \left( \frac{s}{D} \right)^{0.26} \quad \frac{s}{D} \leq 4$$

$$e_B = 0.48 \left( \frac{s}{D} \right)^{0.38} \quad \frac{s}{D} \leq 7$$

Se  $s/D > (4 \text{ o } 7)$  allora  $e = 1$

**CARICO LIMITE SOTTO CARICHI ORIZZONTALI**  
**Efficienza (Reese & Van Impe, 2001)**

**CARICO LIMITE**



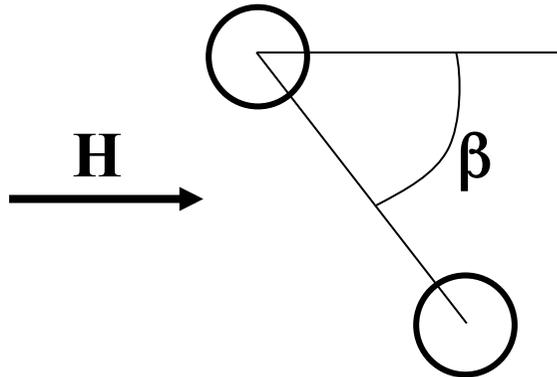
$$e = 0.64 \left( \frac{s}{D} \right)^{0.34}$$

$$\frac{s}{D} \leq 3.75$$

**Se  $s/D > 3.75$  allora  $e = 1$**

## CARICO LIMITE SOTTO CARICHI ORIZZONTALI Efficienza (Reese & Van Impe, 2001)

CARICO LIMITE

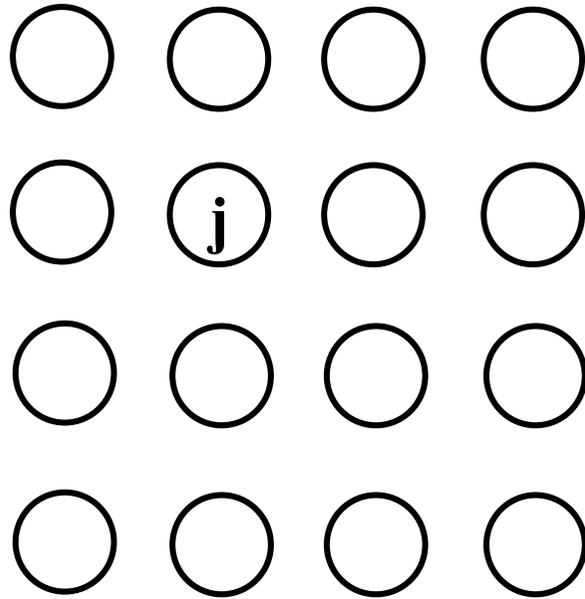


$$e = \sqrt{e_{\text{lin}}^2 \cdot \cos^2 \beta + e_{\text{aff}}^2 \cdot \sin^2 \beta}$$

# CARICO LIMITE SOTTO CARICHI ORIZZONTALI

## Efficienza (Reese & Van Impe, 2001)

CARICO LIMITE



$$e_j = \prod_{i=1}^m e_{ij}$$

gruppo di m pali