

Corso di aggiornamento
Progettazione strutturale e
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

**Progettazione strutturale e geotecnica
di fondazioni e opere di sostegno**

9 - Fondazioni su pali

Spoletto
17-19 febbraio 2011

Aurelio Gheresi

Pali tipologie

- Modalità di esecuzione
 - Pali battuti
 - Pali trivellati
- Plinti
 - Con singolo palo (rari)
 - Con più pali (effetto gruppo)
- Travi di fondazioni su pali
- Platee su pali

Carico limite per azioni verticali

Carico limite verticale

- Resistenza laterale
si attiva subito
- Resistenza di punta
si attiva solo dopo grandi cedimenti
(considerarla? sempre? o quando?)

Carico limite verticale resistenza laterale

$$Q_{lat} = \pi B \int_0^L (a + \sigma_h \mu) dz$$

coesione attrito

- Per terreni a grana grossa

$$\sigma_h \mu = k \sigma'_v \mu = k \mu \gamma' z \quad \text{Il termine coesivo si trascura}$$

- Per terreni a grana fine

$$a = \alpha c_u \quad \text{Il termine attritivo si trascura}$$

Vedere valori in
Viggiani, pag.378

Carico limite verticale resistenza di punta

- È analoga a quella delle fondazioni superficiali

$$Q_{\text{pun}} = \frac{\pi B^2}{4} (N_q \gamma L + N_c c)$$

Carico limite verticale gruppi di pali

- Il carico limite (laterale) viene ridotto per effetto dell'interazione tra i pali

Carico limite

Normativa SLU

- Coefficienti parziali

Tabella 6.4.II – Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche.

Resistenza	Simbolo	Pali infissi			Pali trivellati			Pali ad elica continua		
	γ_R	(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)
Base	γ_b	1,0	1,45	1,15	1,0	1,7	1,35	1,0	1,6	1,3
Laterale in compressione	γ_s	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15
Totale (*)	γ_t	1,0	1,45	1,15	1,0	1,6	1,30	1,0	1,55	1,25
Laterale in trazione	γ_{st}	1,0	1,6	1,25	1,0	1,6	1,25	1,0	1,6	1,25

(*) da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

- Assume importanza la possibilità di dedurre il carico limite da prove dirette su pali

Carico limite per azioni orizzontali

Palo libero in testa terreno coesivo

- Resistenza del terreno minore al piano campagna, che poi diventa sostanzialmente costante
- Può essere ipotizzata come costante ($9 c_u B$) escludendo il tratto più superficiale

Broms, 1964

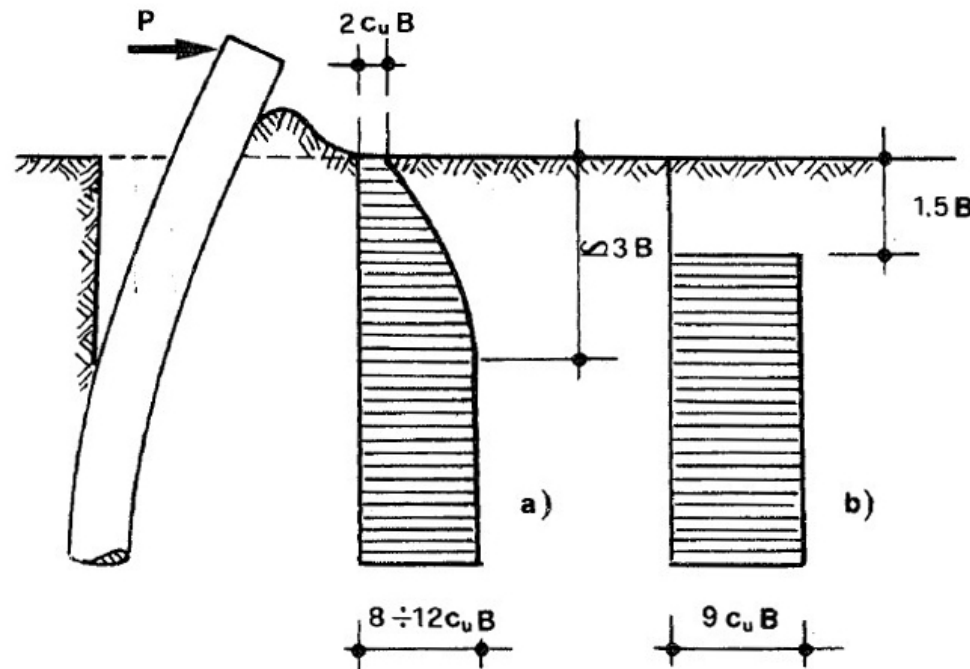
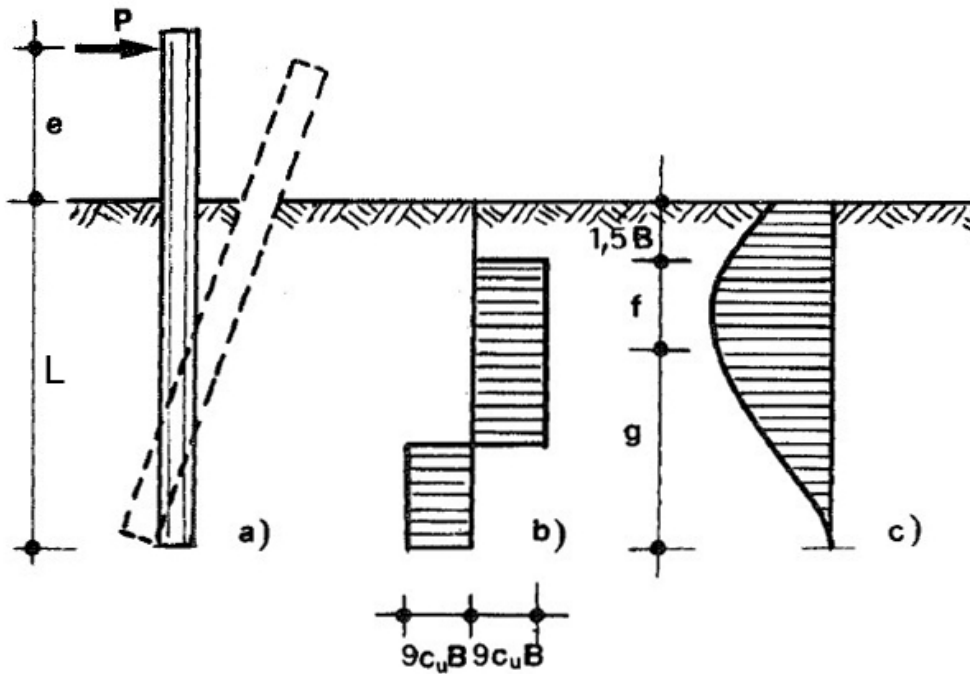


Figure tratte da:
P. De Simone,
Fondazioni,
Liguori editore, 1981

Palo libero in testa terreno coesivo



- Equilibrio alla traslazione

$$P = 9c_u B f$$

- Equilibrio alla rotazione

$$P(e + 1.5 B + 0.5 f) = 9c_u B \frac{g^2}{4}$$

- Si ottiene

$$P^2 + 36c_u B (e + 0.75 B + 0.5 L) P - [9c_u B (L - 1.5 B)]^2 = 0$$

- Il momento massimo è $M_{\max} = P(e + 1.5 B + 0.5 f)$

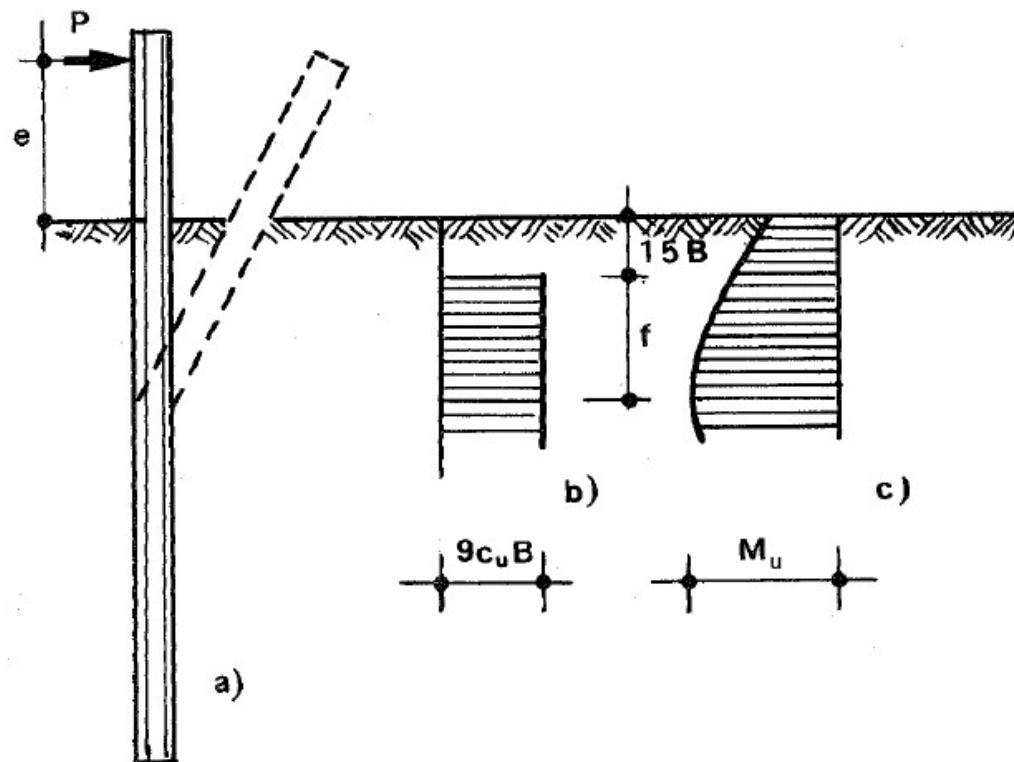
Palo libero in testa terreno coesivo

[illegible]

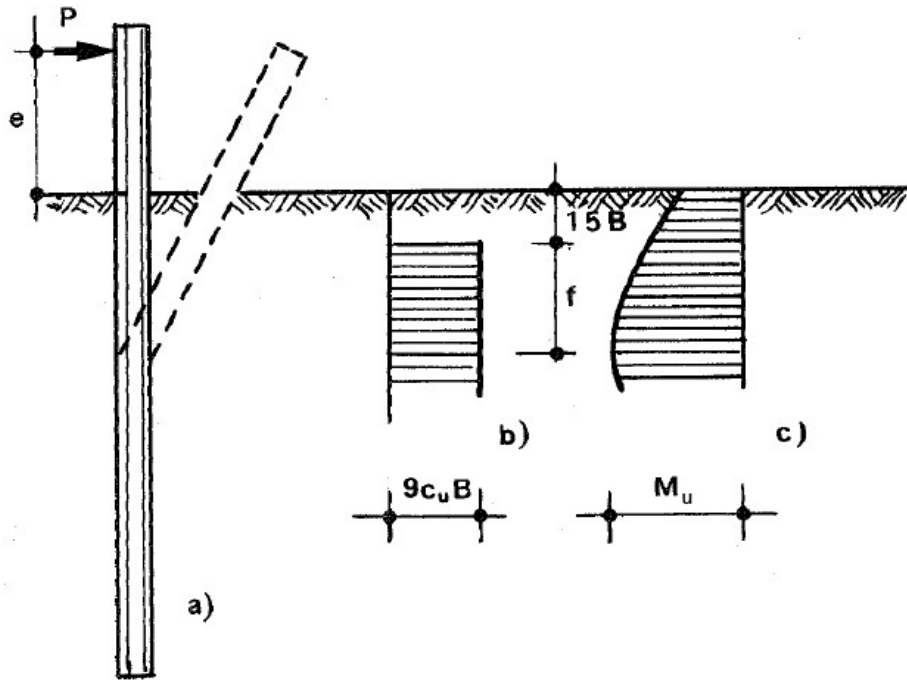
Vedi file Excel Pali

Palo libero in testa terreno coesivo

- Se la sezione del palo non è in grado di sopportare il momento flettente, si plasticizza



Palo libero in testa terreno coesivo



- Equilibrio alla traslazione

$$P = 9c_u B f$$

- Equilibrio alla rotazione

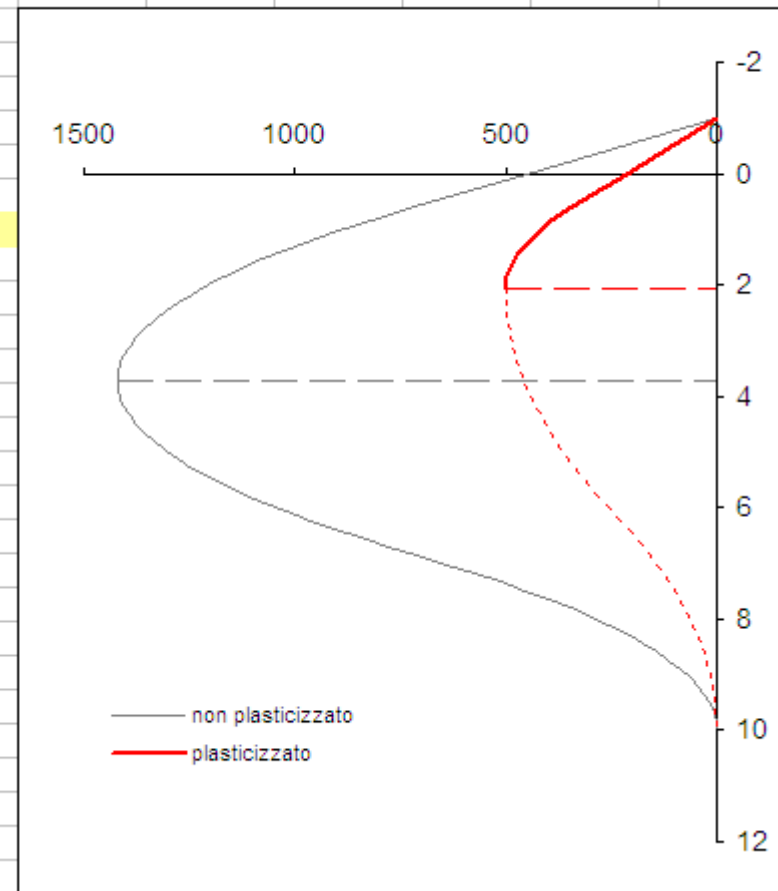
$$P(e + 1.5 B + 0.5 f) = M_u$$

- Si ottiene

$$P^2 + 18c_u B(e + 1.5 B)P - 18c_u B M_u = 0$$

Palo libero in testa terreno coesivo

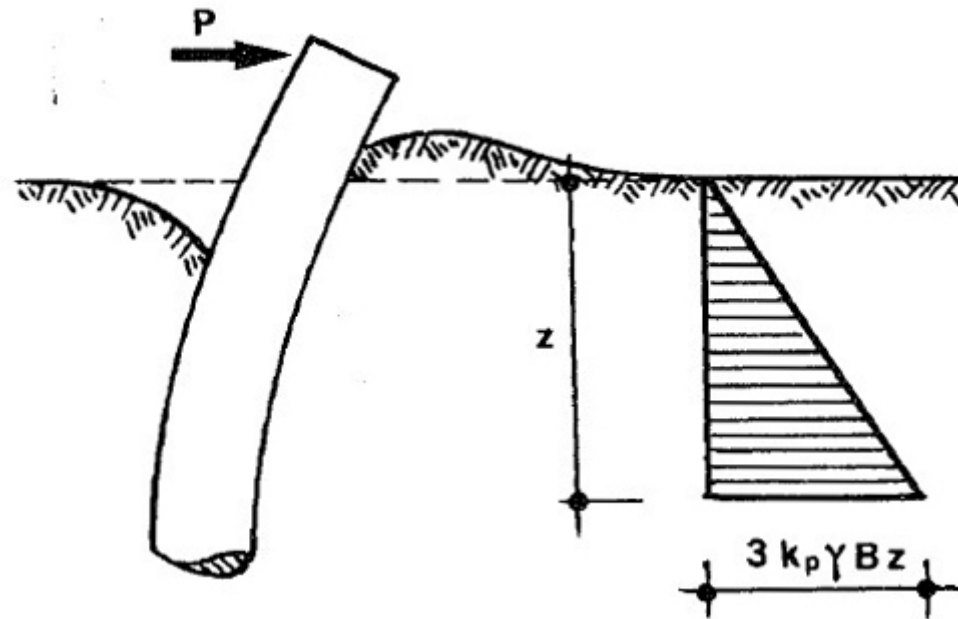
Palo libero in testa - suolo coesivo					
diametro palo	B	40	cm	0.40	m
lunghezza palo	L	10.00	m		
sporgenza piano campagna	e	1.00	m		
coesione non drenata	cu	40	kPa [kN/m ²]		
momento ultimo della sezione	Mu	500.0	kNm		
Il carico limite orizzontale è					
	P lim	213.5	kN	palo lungo	
parte superficiale trascurata	1.5 B	0.60	m		
reazione unitaria terreno	9 cu B	144	kN/m		
se non si plasticizza (palo "corto")					
coeff b/2		1814.4			
coeff c		-1832233			
carico limite	P	449.3	kN		
	f	3.12	m		
	g	6.28	m		
	Mmax	1419.8	kNm		
se si plasticizza (palo "lungo")					
coeff b/2		230.4			
coeff c		-144000			
carico limite	P	213.5	kN		
	f	1.48	m		
	g	7.92	m		
reazione sotto cerniera		31.9	kN/m		



Notare la terminologia: palo lungo – palo corto

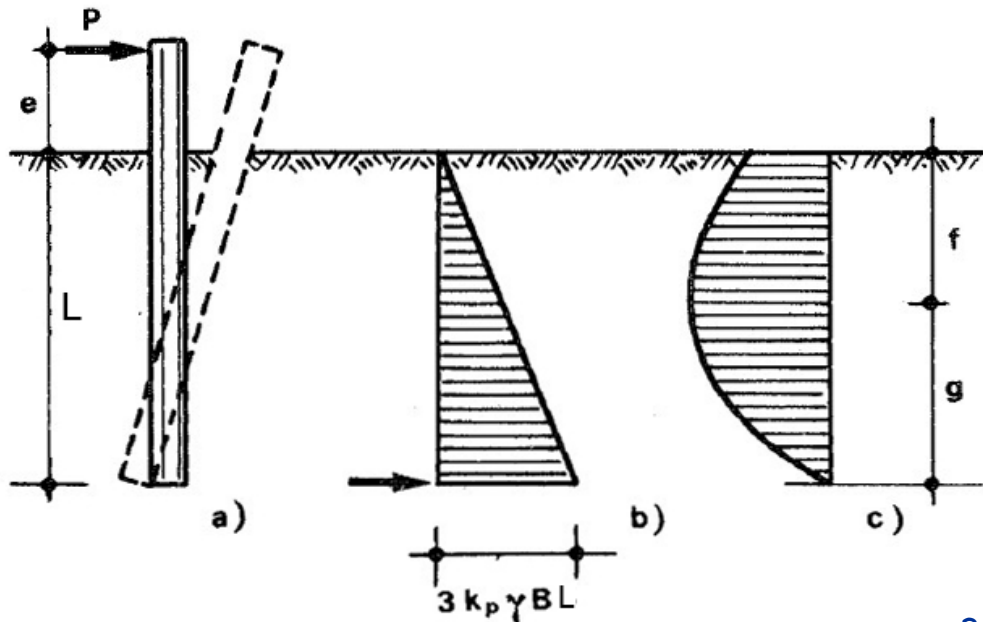
Palo libero in testa terreno incoerente

- Resistenza del terreno che cresce linearmente con la profondità



Palo libero in testa terreno incoerente

- Si ipotizza che ruoti intorno all'estremo inferiore, con terreno che reagisce con una forza concentrata



- Equilibrio alla traslazione

$$P = \frac{3 k_p \gamma B f^2}{2}$$

- Equilibrio alla rotazione

$$P(e + L) = \frac{3 k_p \gamma B L^3}{6}$$

- Si ottiene
$$P = \frac{3 k_p \gamma B L^3}{6(e + L)}$$

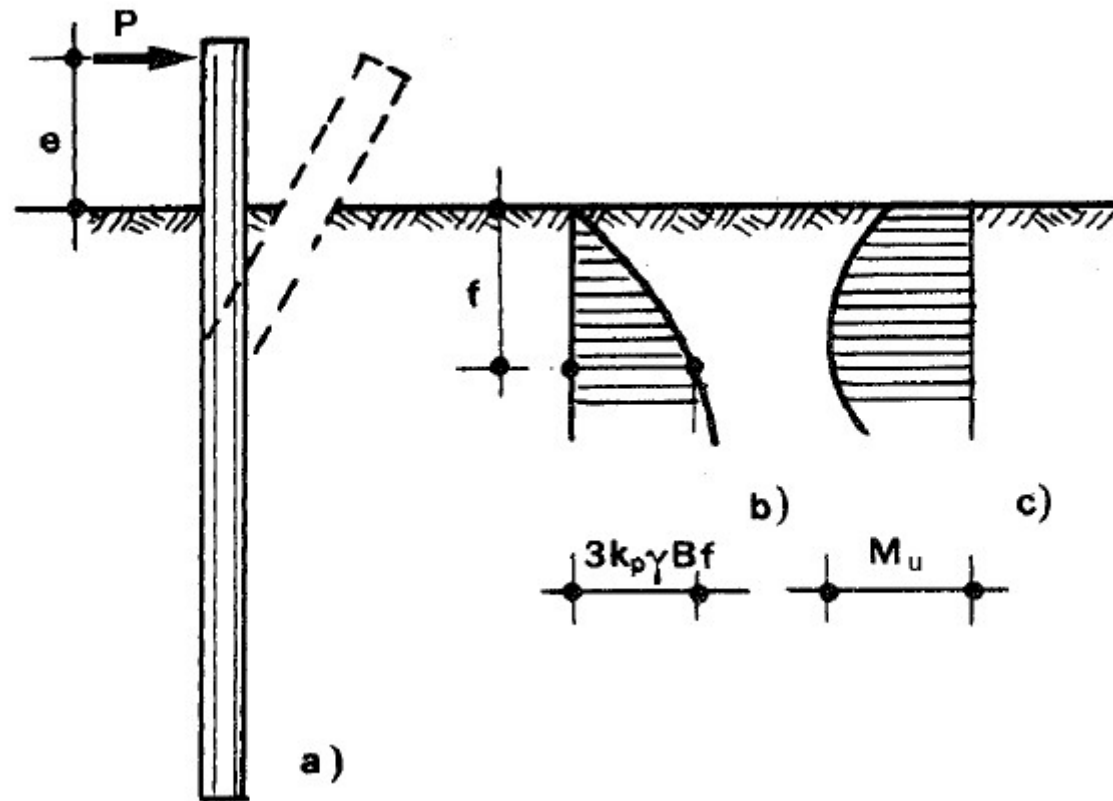
- Il momento massimo è
$$M_{\max} = P \left(e + \frac{2}{3} f \right)$$

Palo libero in testa terreno incoerente

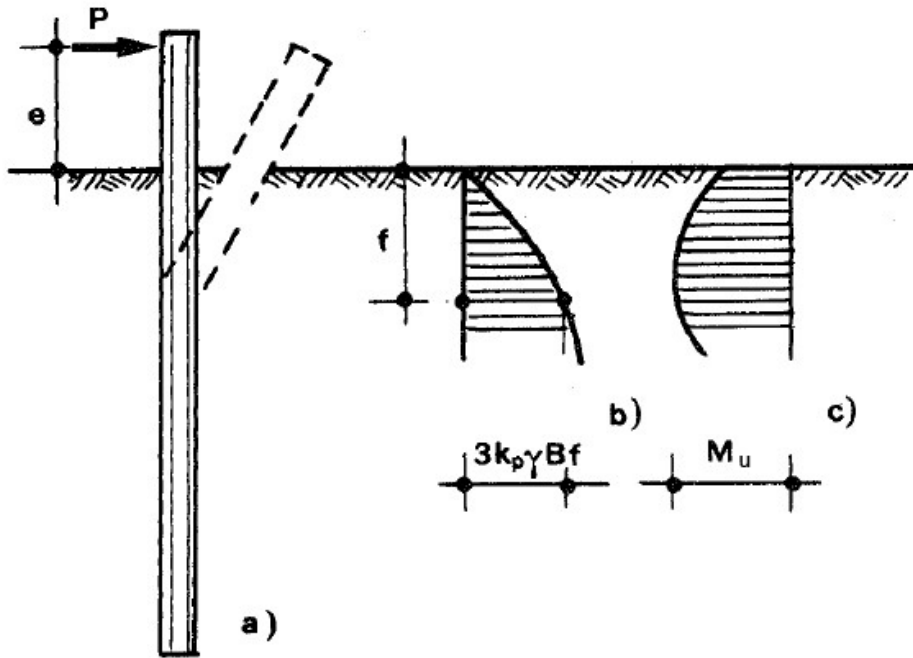
[illegible]

Palo libero in testa terreno incoerente

- Se la sezione del palo non è in grado di sopportare il momento flettente, si plasticizza



Palo libero in testa terreno incoerente



- Equilibrio alla traslazione

$$P = \frac{3k_p \gamma B f^2}{2}$$

- Equilibrio alla rotazione

$$P \left(e + \frac{2}{3} f \right) = M_u$$

- Si ottiene una equazione di terzo grado

Palo libero in testa terreno incoerente

Palo libero in testa - suolo incoerente

diametro palo	B	40	cm	0.40	m
lunghezza palo	L	10.00	m		
sporgenza piano campagna	e	1.00	m		
peso specifico	γ	22	kN/m ³		
angolo di attrito	ϕ	32	°	0.559	rad
momento ultimo della sezione	Mu	1000.0	kNm		

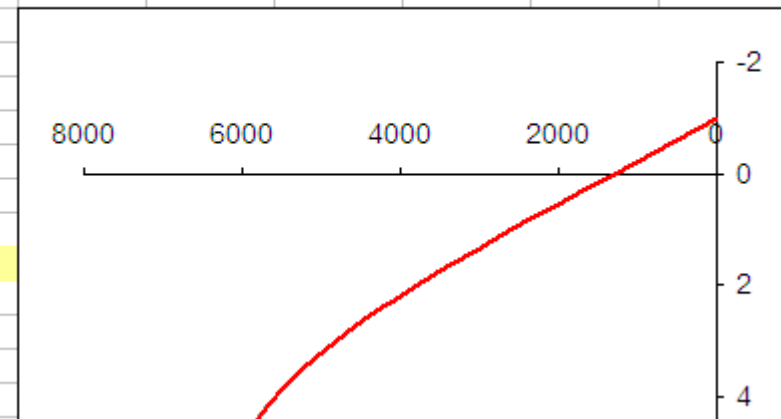
Il carico limite orizzontale è	P lim	1299.6	kN	palo lungo	
coefficiente spinta passiva	kp	3.25			
reazione unitaria terreno	3 kp γ B	85.92	kN/m ²		

se non si plasticizza (palo "corto")

carico limite	P	1301.8	kN		
	f	5.50	m		
	g	4.50	m		
	Mmax	6079.4	kNm		

se si plasticizza (palo "lungo")

carico limite	P	1299.6	kN		
	err Mu	5064.6		azzerare cambiando f	
	f-cambiare	5.50			
	f	5.50	m		
	g	4.50	m		

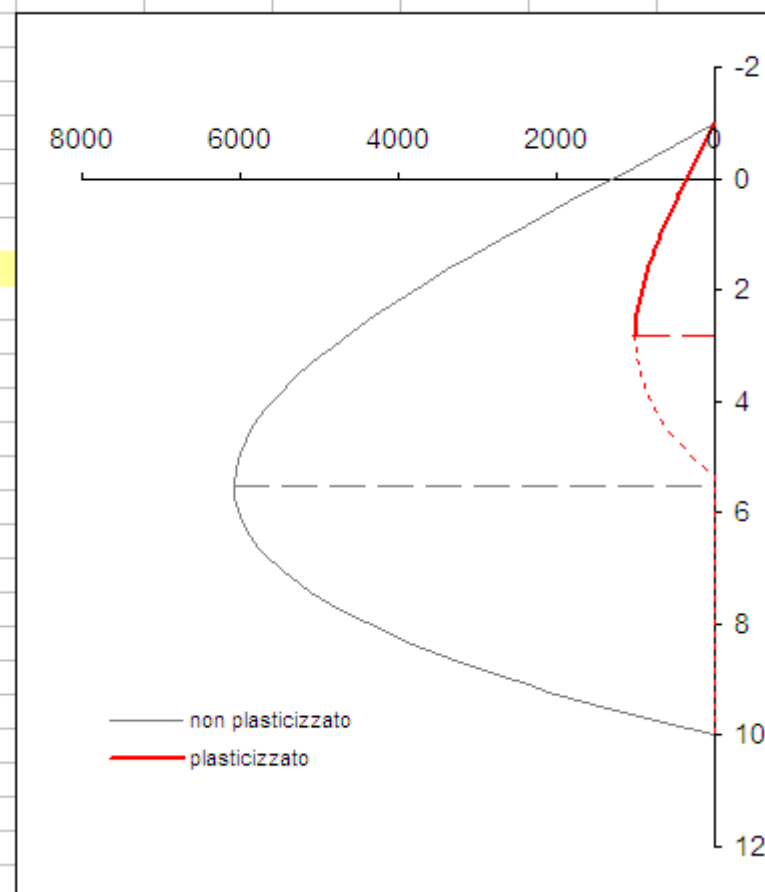


Per risolvere l'equazione di terzo grado occorre azzerare l'errore cambiando f

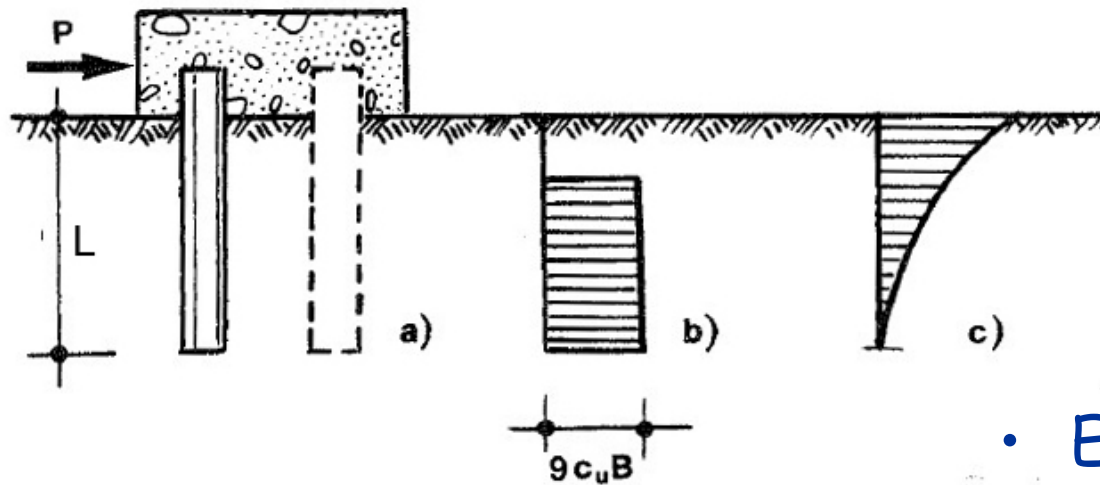
Si può fare facilmente in Excel con ricerca obiettivo

Palo libero in testa terreno incoerente

Palo libero in testa - suolo incoerente					
diametro palo	B	40	cm	0.40	m
lunghezza palo	L	10.00	m		
sporgenza piano campagna	e	1.00	m		
peso specifico	γ	22	kN/m ³		
angolo di attrito	ϕ	32	°	0.559	rad
momento ultimo della sezione	Mu	1000.0	kNm		
Il carico limite orizzontale è					
	P lim	345.8	kN	palo lungo	
coefficiente spinta passiva	kp	3.25			
reazione unitaria terreno	3 kp γ B	85.92	kN/m ²		
se non si plasticizza (palo "corto")					
carico limite	P	1301.8	kN		
	f	5.50	m		
	g	4.50	m		
	Mmax	6079.4	kNm		
se si plasticizza (palo "lungo")					
carico limite	P	345.8	kN		
	err Mu	0.0			
	f-cambiare	2.84			
	f	2.84	m		
	g	7.16	m		



Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo



- Equilibrio alla traslazione

$$P = 9 c_u B (L - 1.5 B)$$

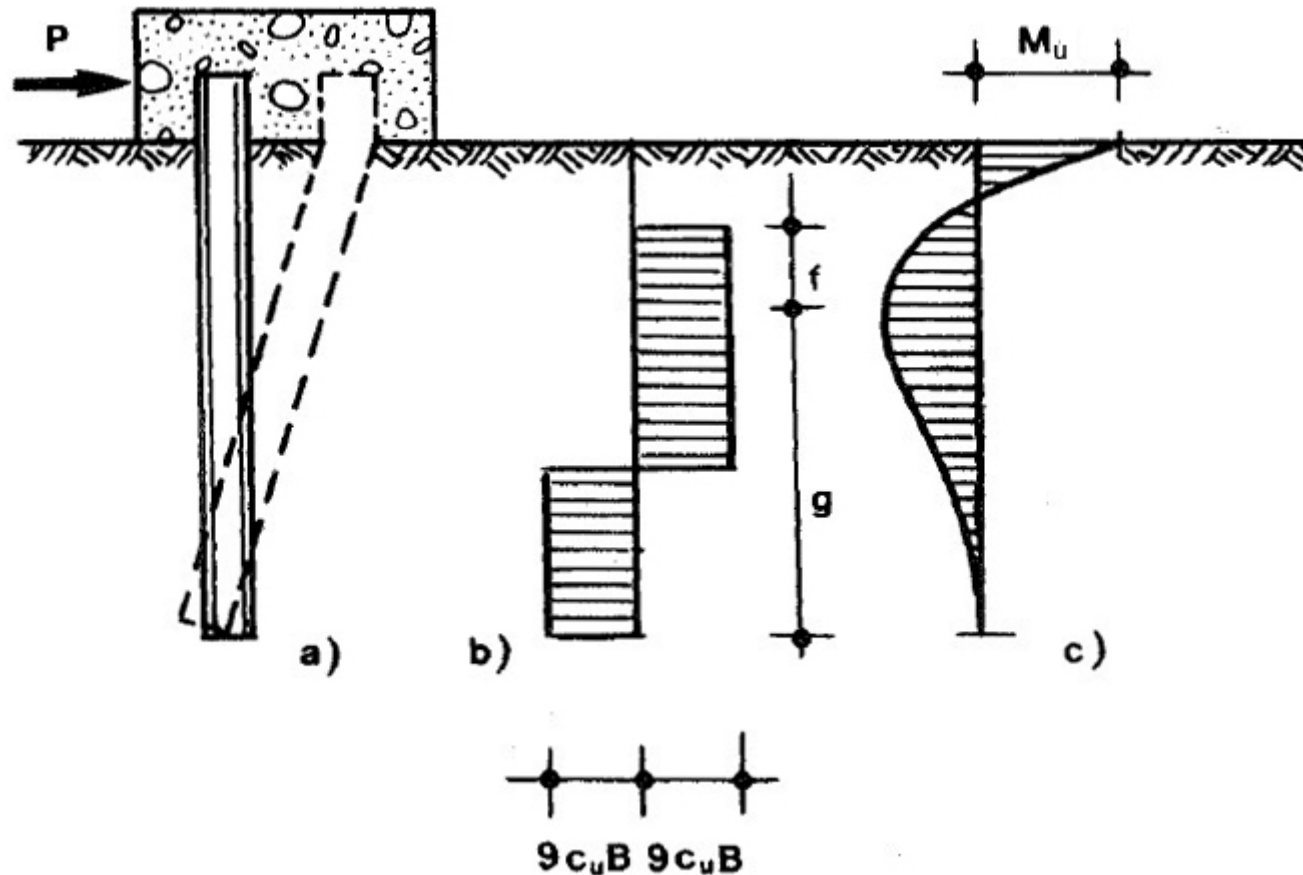
- P è già fornito dall'equilibrio alla traslazione
- Il momento massimo in testa vale $M_{t,max} = P (0.5 L + 0.75 B)$

Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

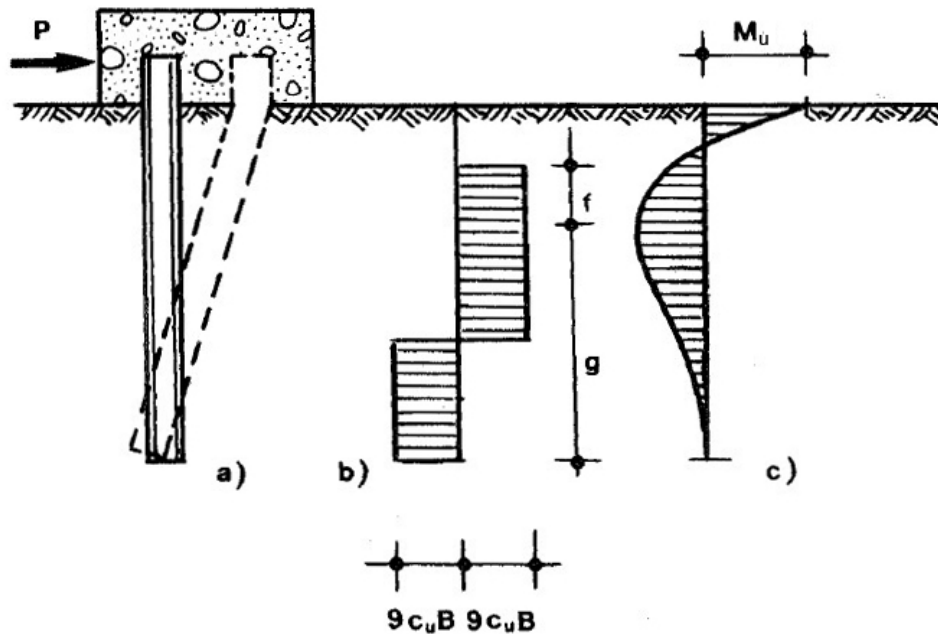
[illegible]

Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

- Se la sezione del palo non è in grado di sopportare il momento flettente in testa, si plasticizza



Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo



- Equilibrio alla traslazione

$$P = 9c_u B f$$

- Equilibrio alla rotazione

$$P(1.5B + 0.5f) - \frac{9c_u B g^2}{4} = M_u$$

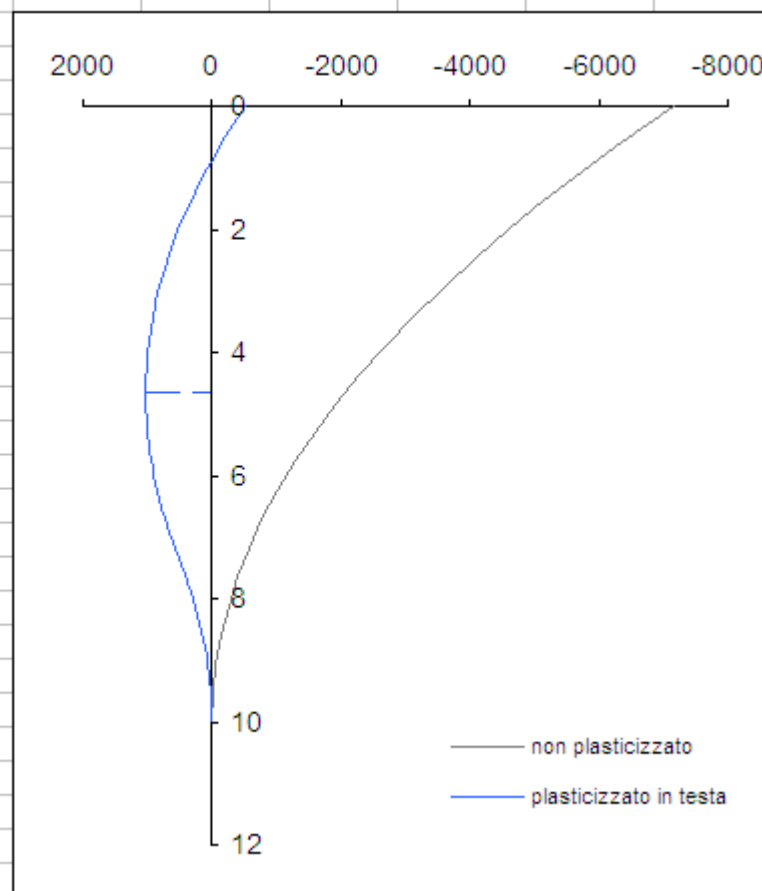
- Si ottiene

$$P^2 + 18c_u B(L + 1.5B)P - [9c_u B(L - 1.5B)]^2 - 36c_u B M_u = 0$$

- Il momento massimo (lungo il palo) è $M_{i,max} = \frac{9c_u B g^2}{4}$

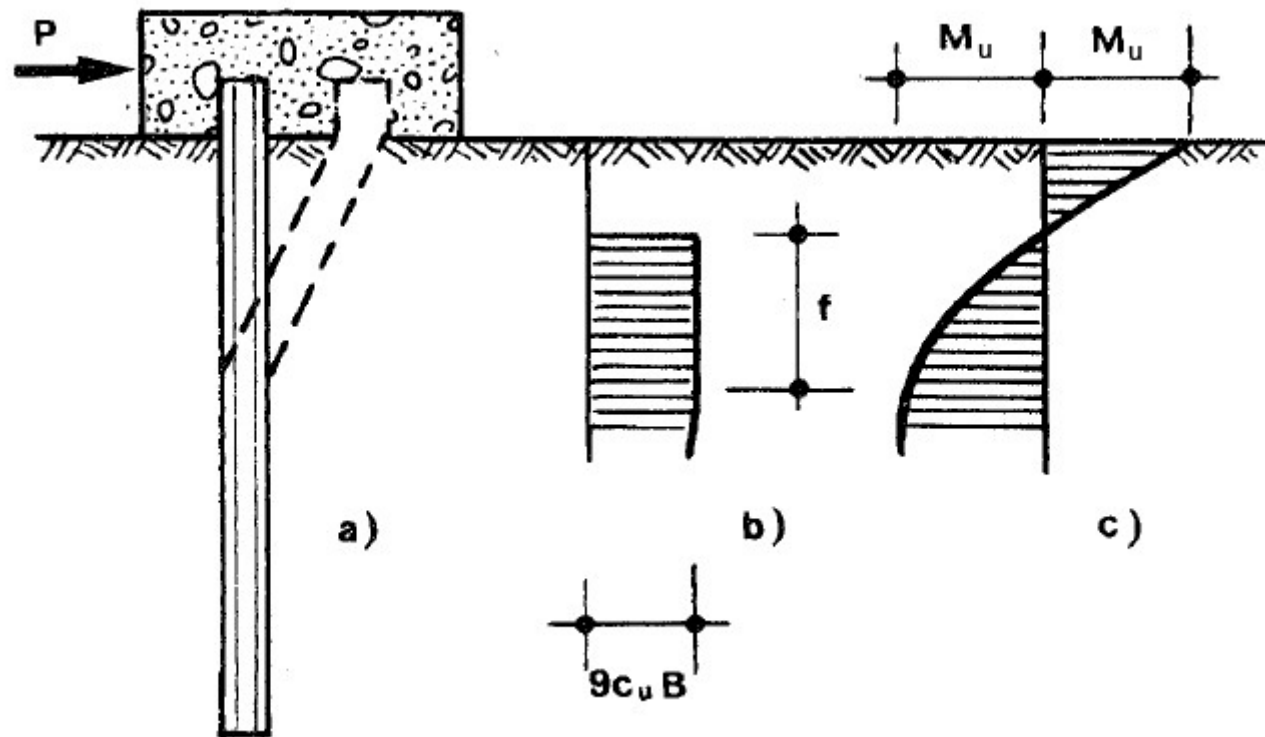
Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

Palo vincolato in testa - suolo coesivo					
diametro palo	B	40	cm	0.40	m
lunghezza palo	L	10.00	m		
coesione non drenata	c_u	40	kPa [kN/m ²]		
momento ultimo della sezione	M_u	500.0	kNm		
parte superficiale trascurata	1.5 B	0.60	m		
reazione unitaria terreno	9 c_u B	144	kN/m		
se non si plasticizza (palo "corto")					
carico limite	P	1353.6	kN		
	f	9.40	m		
	g	0.00	m		
	M-max	7174.1	kNm		
se si plasticizza in testa (palo "intermedio")					
coeff b/2		1526.4			
coeff c		-2120233			
carico limite	P	583.1	kN		
	f	4.05	m		
	g	5.35	m		
	M+max	1030.6	kNm		

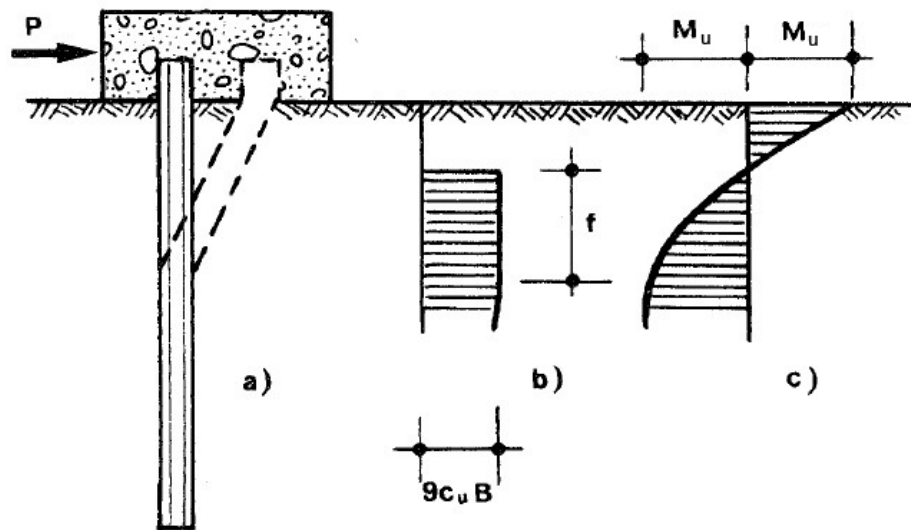


Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

- Se la sezione del palo non è in grado di sopportare il momento flettente lungo l'asse, si plasticizza ancora



Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo



- Equilibrio alla traslazione

$$P = 9c_u B f$$

- Equilibrio alla rotazione

$$P (1.5 B + 0.5 f) = M_{t,u} + M_{i,u}$$

- Si ottiene

$$P^2 + 18c_u B \times 1.5 B P - 18c_u B (M_{t,u} + M_{i,u}) = 0$$

Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

Palo vincolato in testa - suolo coesivo

diametro palo	B	40	cm	0.40	m
lunghezza palo	L	10.00	m		

coesione non drenata	cu	40	kPa [kN/m ²]
momento ultimo della sezione	Mu	500.0	kNm

Il carico limite orizzontale è	P lim	457.2	kN	palo lungo
--------------------------------	-------	-------	----	------------

parte superficiale trascurata	1.5 B	0.60	m
reazione unitaria terreno	9 cu B	144	kN/m

se non si plasticizza (palo "corto")

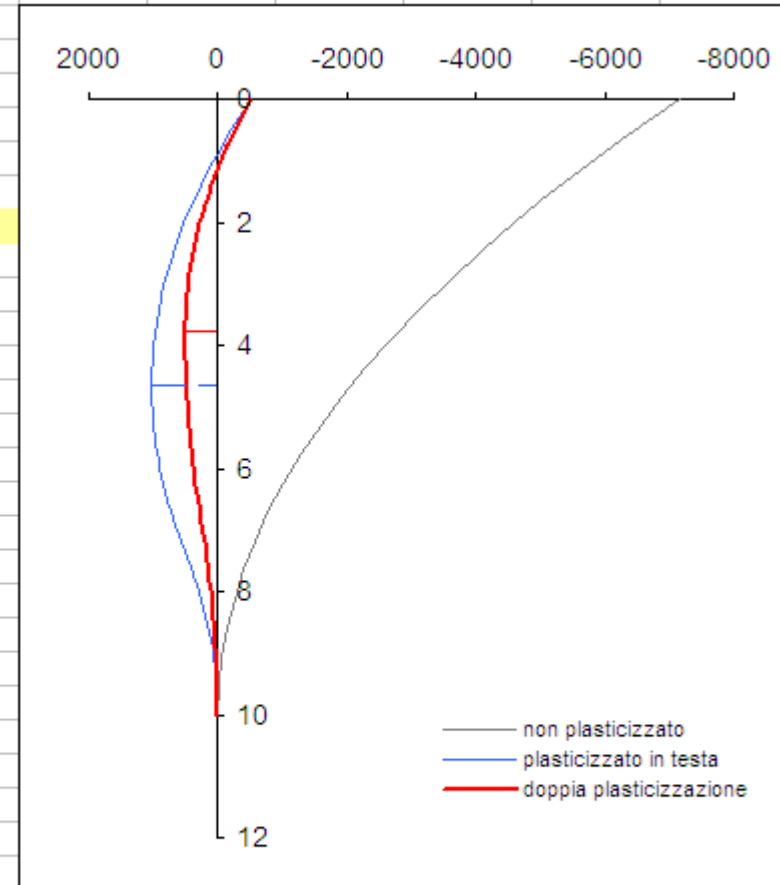
carico limite	P	1353.6	kN
	f	9.40	m
	g	0.00	m
	M-max	7174.1	kNm

se si plasticizza in testa (palo "intermedio")

coeff b/2		1526.4
coeff c		-2120233
carico limite	P	583.1
	f	4.05
	g	5.35
	M+max	1030.6

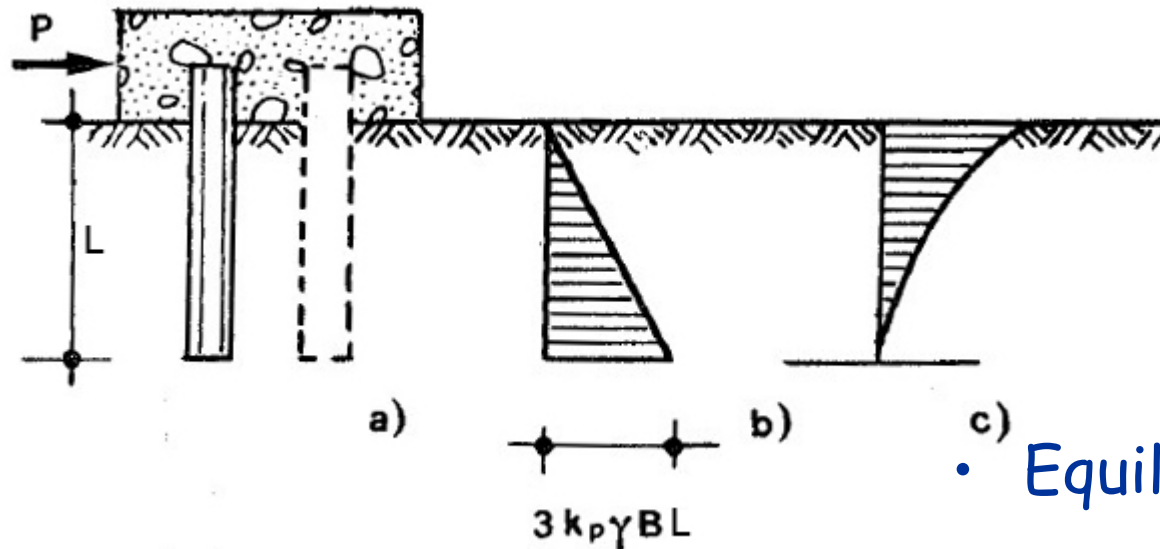
se si plasticizza in due sezioni (palo "lungo")

coeff b/2		86.4
coeff c		-288000
carico limite	P	457.2
	f	3.17
	g	6.23
reazione sotto cerniera		51.6



Notare la terminologia: palo lungo – intermedio - corto

Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente



- Equilibrio alla traslazione

$$P = \frac{3 k_p \gamma B L^2}{2}$$

- P è già fornito dall'equilibrio alla traslazione

- Il momento massimo in testa vale $M_{t,\max} = P \frac{2}{3} L$

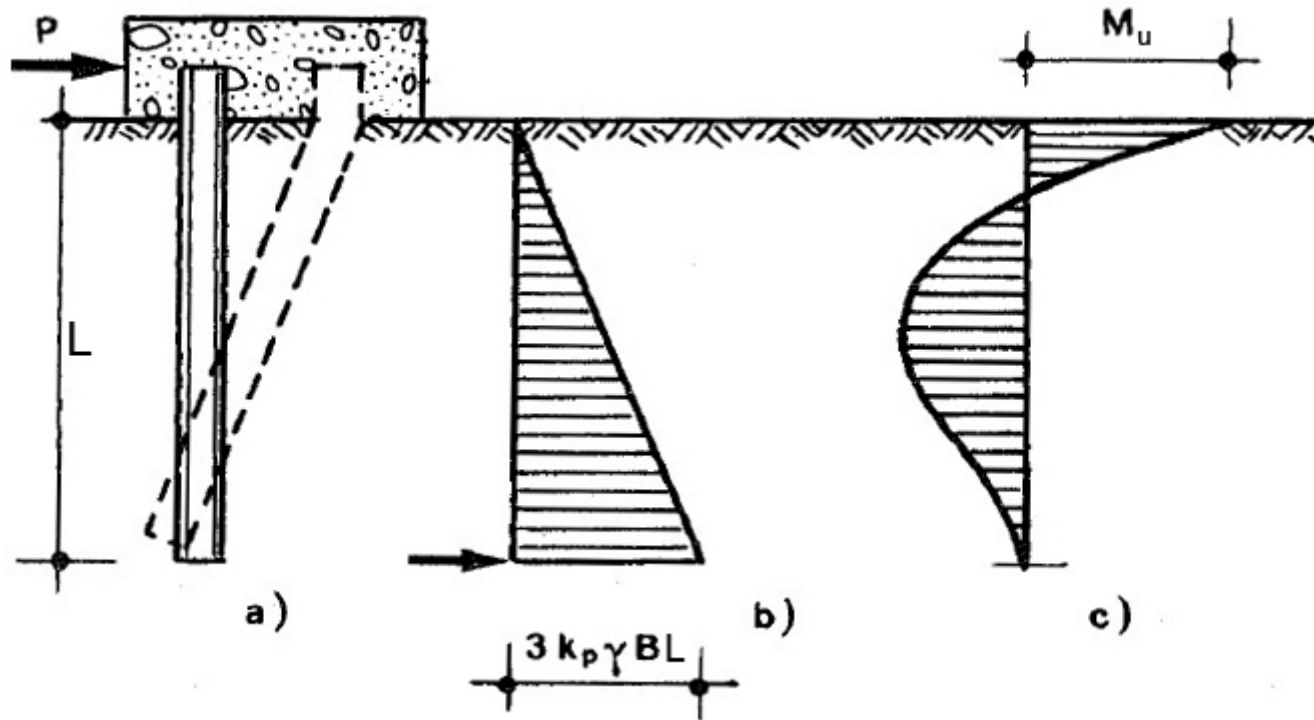
Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

Palo vincolato in testa - suolo incoerente					
diametro palo	B	40	cm	0.40	m
lunghezza palo	L	10.00	m		
peso specifico	γ	22	kN/m ³		
angolo di attrito	ϕ	32	°	0.559	rad
coefficiente spinta passiva	k_p	3.25			
reazione unitaria terreno	$3 k_p \gamma B$	85.92	kN/m ²		
se non si plasticizza (palo "corto")					
carico limite	P	4296.1	kN		
	f	10.00	m		
	g	0.00	m		
	M-max	28640.4	kNm		

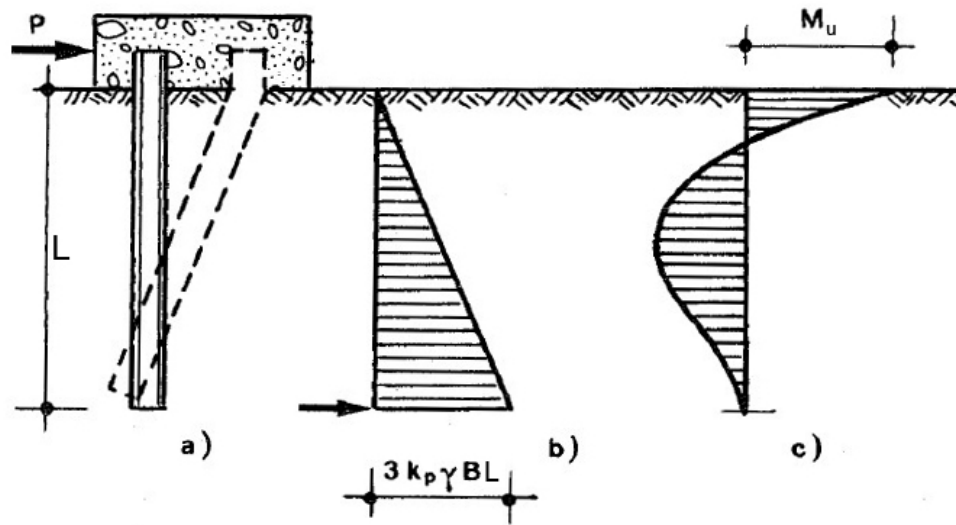
— non plasticizzato

Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

- Se la sezione del palo non è in grado di sopportare il momento flettente in testa, si plasticizza



Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente



- Equilibrio alla traslazione

$$P = \frac{3k_p \gamma B f^2}{2}$$

- Equilibrio alla rotazione

$$P L - \frac{3k_p \gamma B L^3}{6} = M_u$$

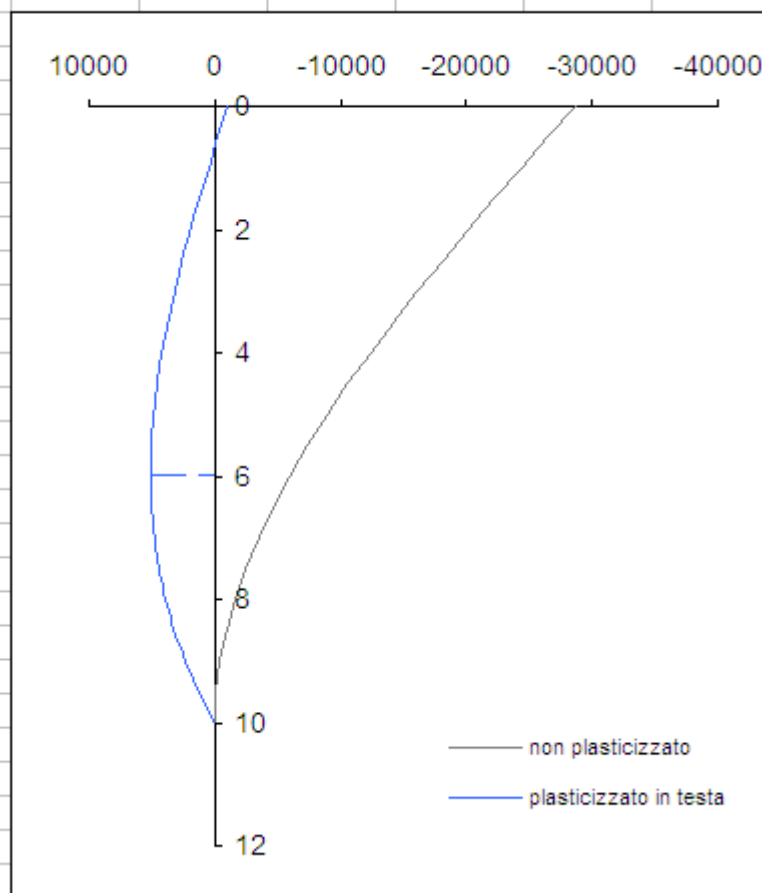
- Si ottiene

$$P = \frac{M_u}{L} + \frac{3k_p \gamma B L^2}{6}$$

$$M_{i,max} = P \frac{2}{3} f - M_u$$

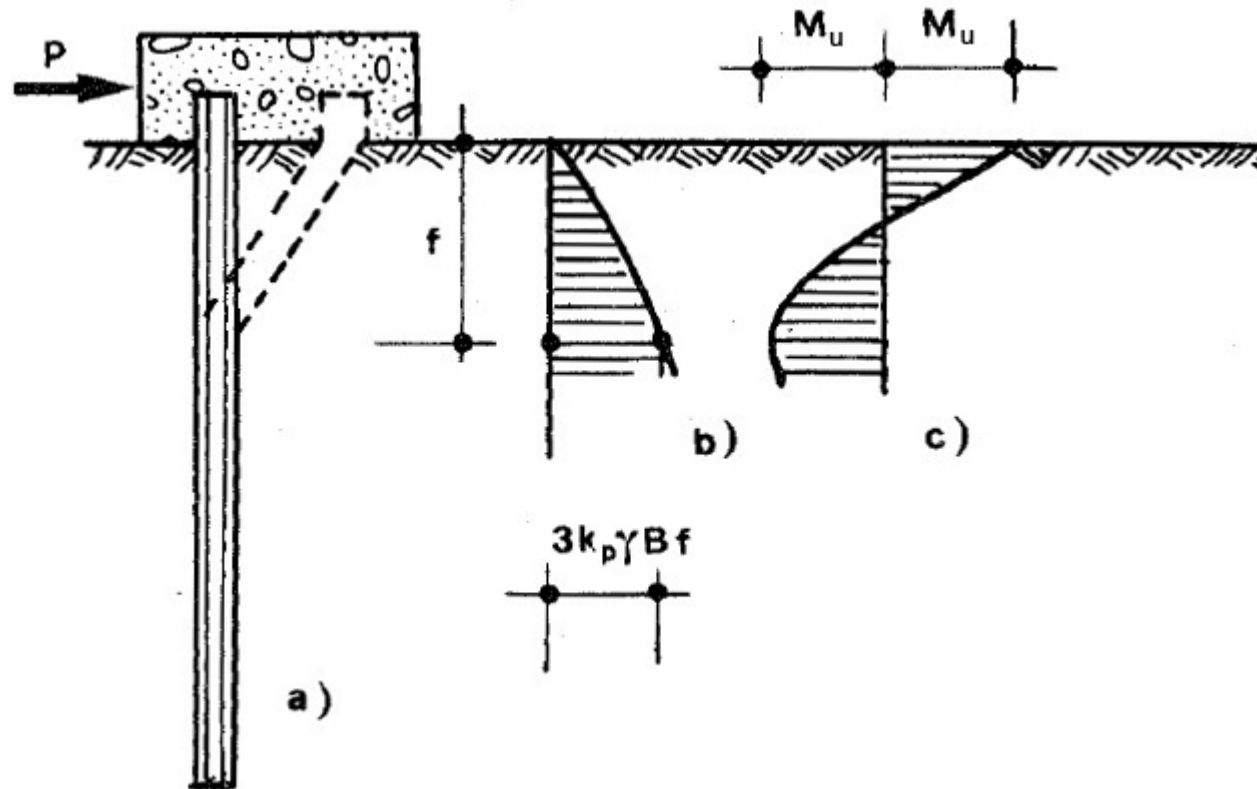
Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

Palo vincolato in testa - suolo incoerente					
diametro palo	B	40	cm	0.40	m
lunghezza palo	L	10.00	m		
peso specifico	γ	22	kN/m ³		
angolo di attrito	ϕ	32	°	0.559	rad
momento ultimo della sezione	Mu	1000.0	kNm		
coefficiente spinta passiva	kp	3.25			
reazione unitaria terreno	3 kp γ B	85.92	kN/m ²		
se non si plasticizza (palo "corto")					
carico limite	P	4296.1	kN		
	f	10.00	m		
	g	0.00	m		
	M-max	28640.4	kNm		
se si plasticizza in testa (palo "intermedio")					
carico limite	P	1532.0	kN		
	f	5.97	m		
	g	4.03	m		
	M+max	5099.2	kNm		

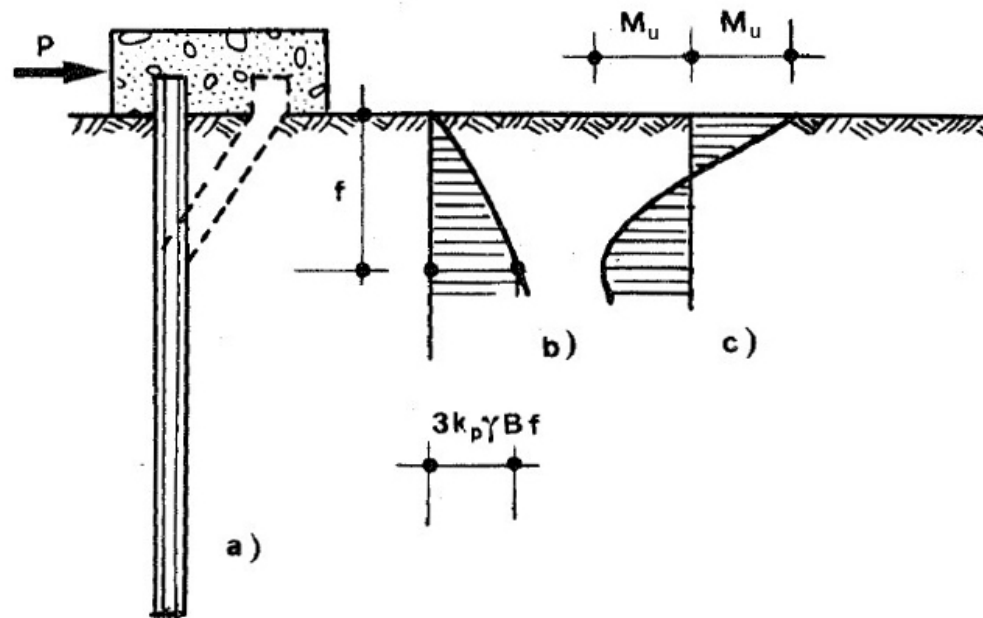


Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

- Se la sezione del palo non è in grado di sopportare il momento flettente lungo l'asse, si plasticizza ancora



Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente



- Equilibrio alla traslazione

$$P = \frac{3k_p \gamma B f^2}{2}$$

- Equilibrio alla rotazione

$$P \frac{2}{3} f = M_{t,u} + M_{i,u}$$

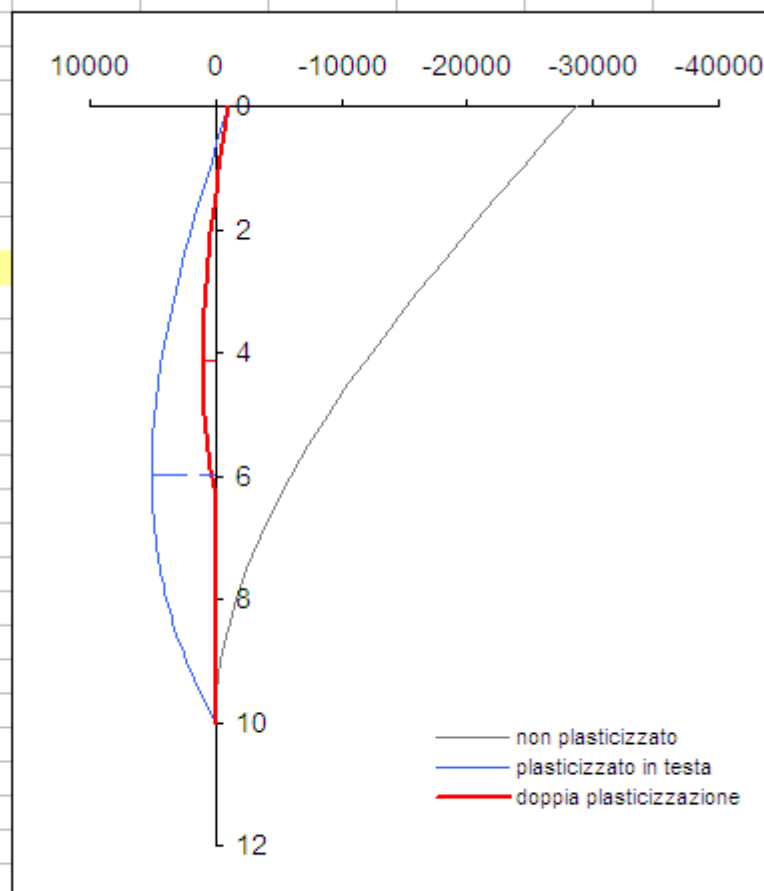
- Si ottiene

$$P = \sqrt[3]{\frac{9}{8}} 3k_p \gamma B (M_{t,u} + M_{i,u})^2$$

Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

Palo vincolato in testa - suolo incoerente

diametro palo	B	40	cm	0.40	m
lunghezza palo	L	10.00	m		
peso specifico	γ	22	kN/m ³		
angolo di attrito	ϕ	32	°	0.559	rad
momento ultimo della sezione	Mu	1000.0	kNm		
Il carico limite orizzontale è					
	P lim	728.5	kN	palo lungo	
coefficiente spinta passiva	kp	3.25			
reazione unitaria terreno	3 kp γ B	85.92	kN/m ²		
se non si plasticizza (palo "corto")					
carico limite	P	4296.1	kN		
	f	10.00	m		
	g	0.00	m		
	M-max	28640.4	kNm		
se si plasticizza in testa (palo "intermedio")					
carico limite	P	1532.0	kN		
	f	5.97	m		
	g	4.03	m		
	M+max	5099.2	kNm		
se si plasticizza in due sezioni (palo "lungo")					
carico limite	P	728.5	kN		
	f	4.12	m		
	g	5.88	m		



Applicazione della normativa

Tradizionalmente (approccio "a rottura"):

- M_u è il momento ultimo della sezione (da calcolare con un approccio tipo SLU, ma senza i coefficienti di sicurezza del materiale)
- Al carico limite ottenuto bisogna applicare il coefficiente di sicurezza dei carichi (maggiore di quello usato con gli approcci attuali)

Pali

verifica sezione e armature

- Da presentare e discutere direttamente