

Università di Catania
Corso di laurea in ingegneria civile strutturale e geotecnica

Costruzioni in zona sismica

Fondazioni su pali

gennaio 2012

Aurelio Ghersi

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

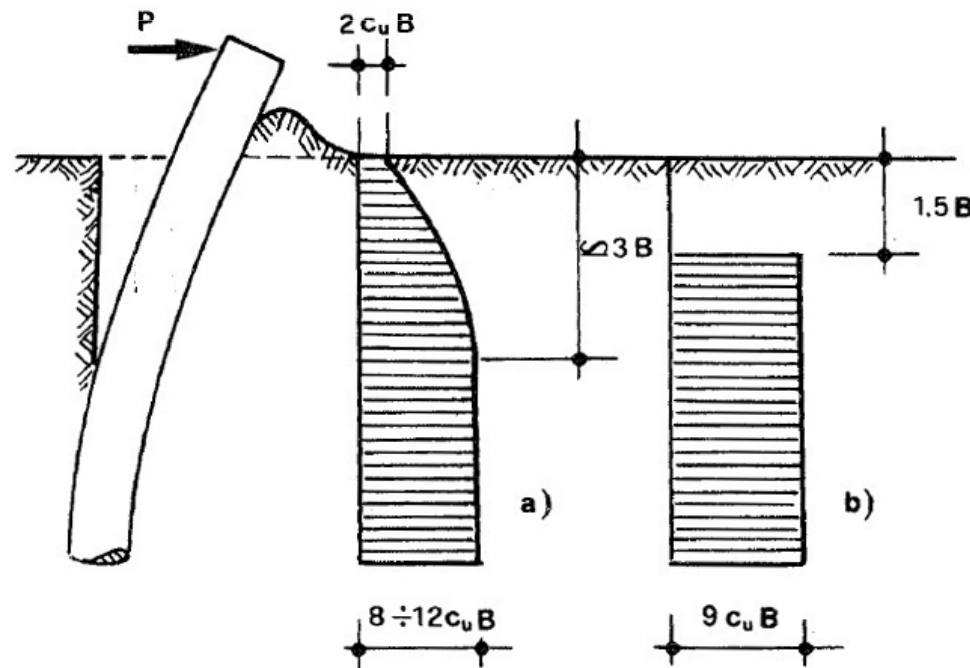
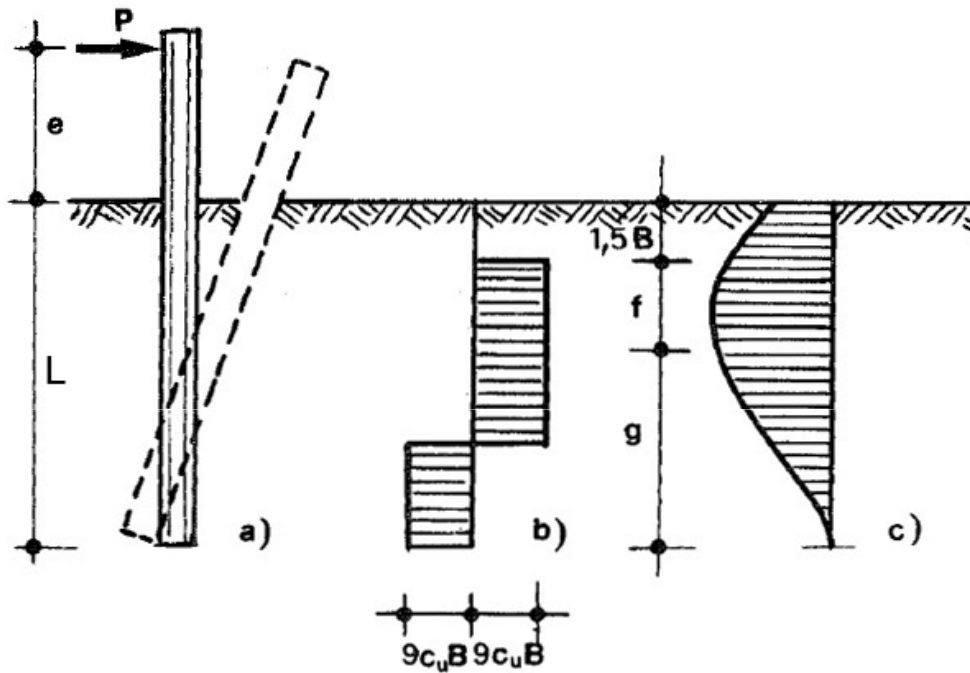


Figure tratte da:
P. De Simone,
Fondazioni,
Liguori editore, 1981

Palo libero in testa terreno coesivo



- Equilibrio alla traslazione

$$P = 9c_u B f$$

- Equilibrio alla rotazione

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

- Si ottiene

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

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

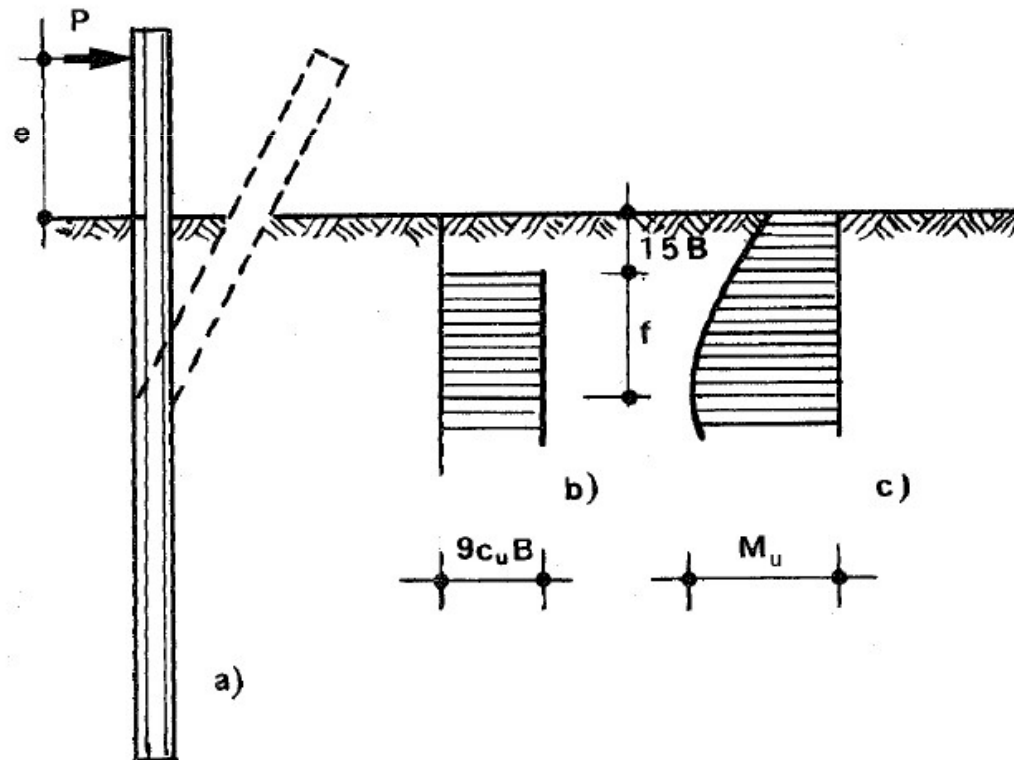
Palo libero in testa terreno coesivo

[illegible]

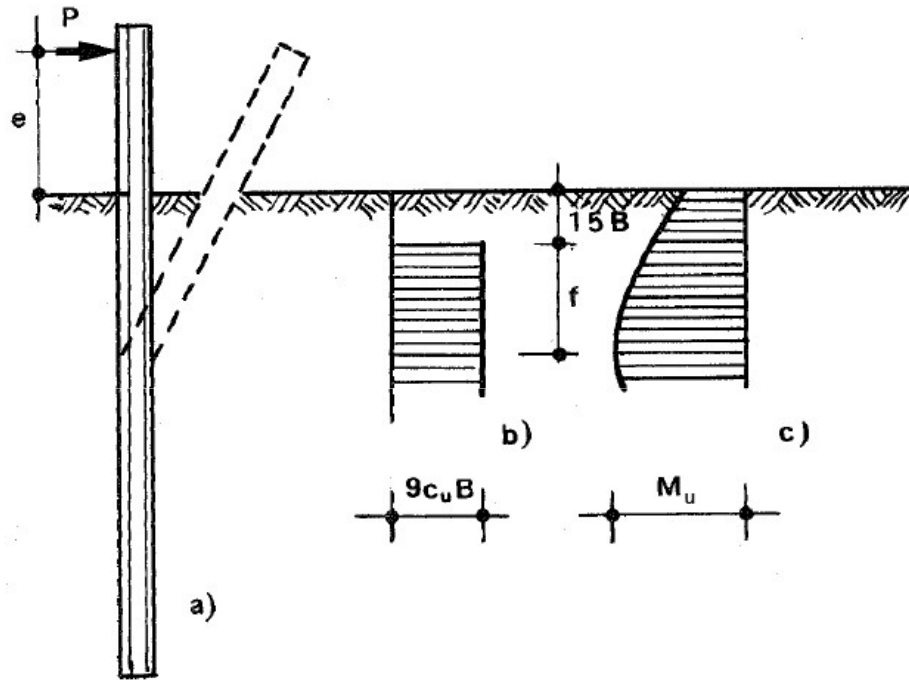
Vedi file Excel Pali

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

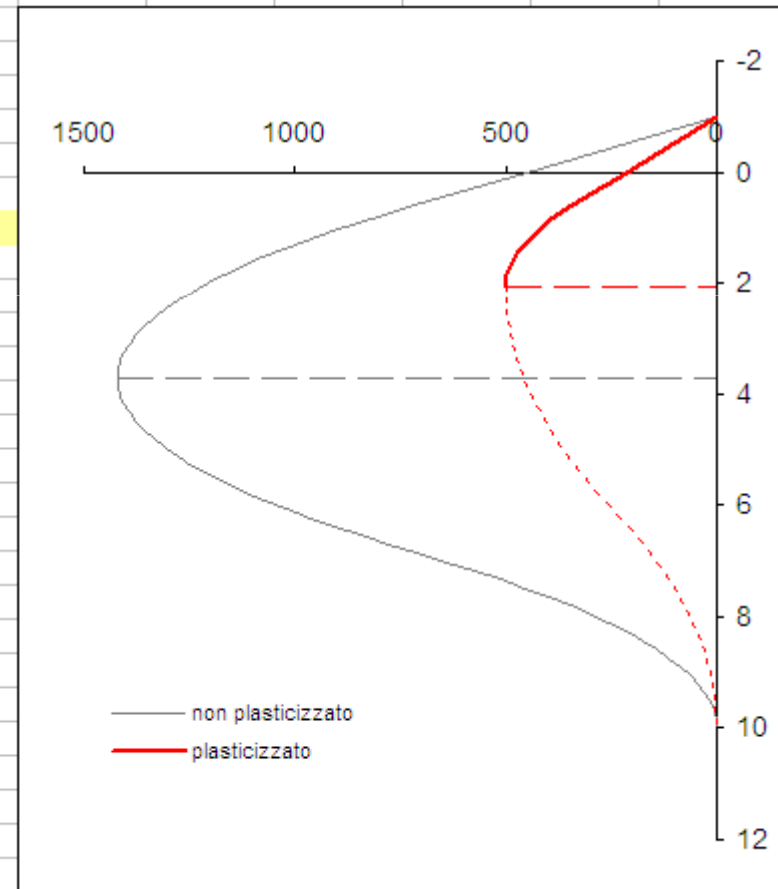
$$P(e + 1.5 B + 0.5 f) = M_u$$

- Si ottiene

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

Palo libero in testa terreno coesivo

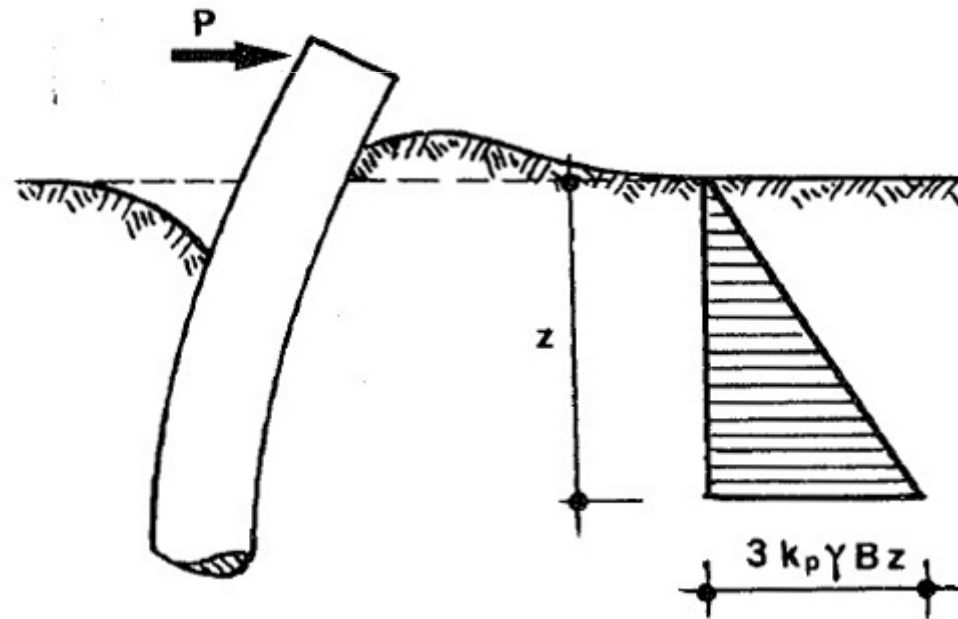
Palo libero in testa - suolo coesivo					
diametro palo	B	40	cm	0.40	m
lunghezza palo	L	10.00	m		
sporgenza piano campagna	e	1.00	m		
coesione non drenata	cu	40	kPa [kN/m ²]		
momento ultimo della sezione	Mu	500.0	kNm		
Il carico limite orizzontale è					
	P lim	213.5	kN	palo lungo	
parte superficiale 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

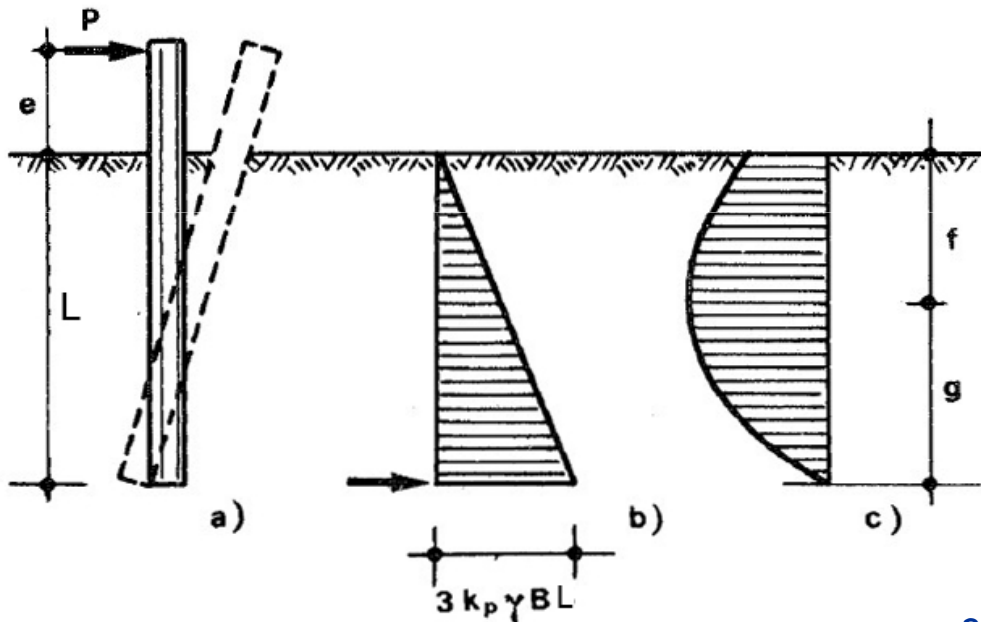
Palo libero in testa terreno incoerente

- 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

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

- Equilibrio alla rotazione

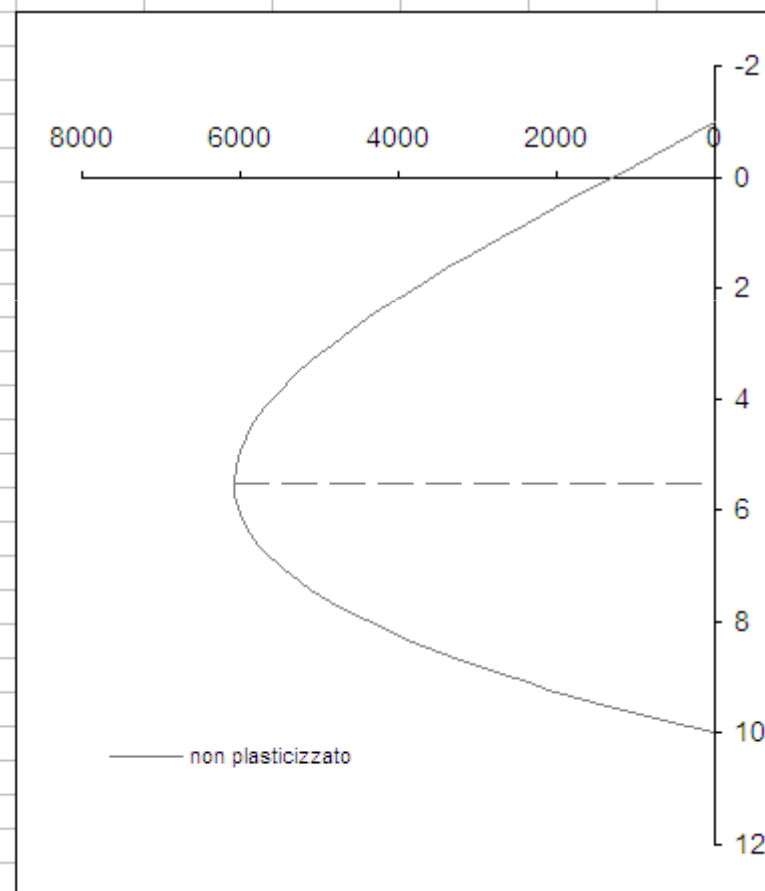
$$P(e + L) = \frac{3k_p \gamma B L^3}{6}$$

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

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

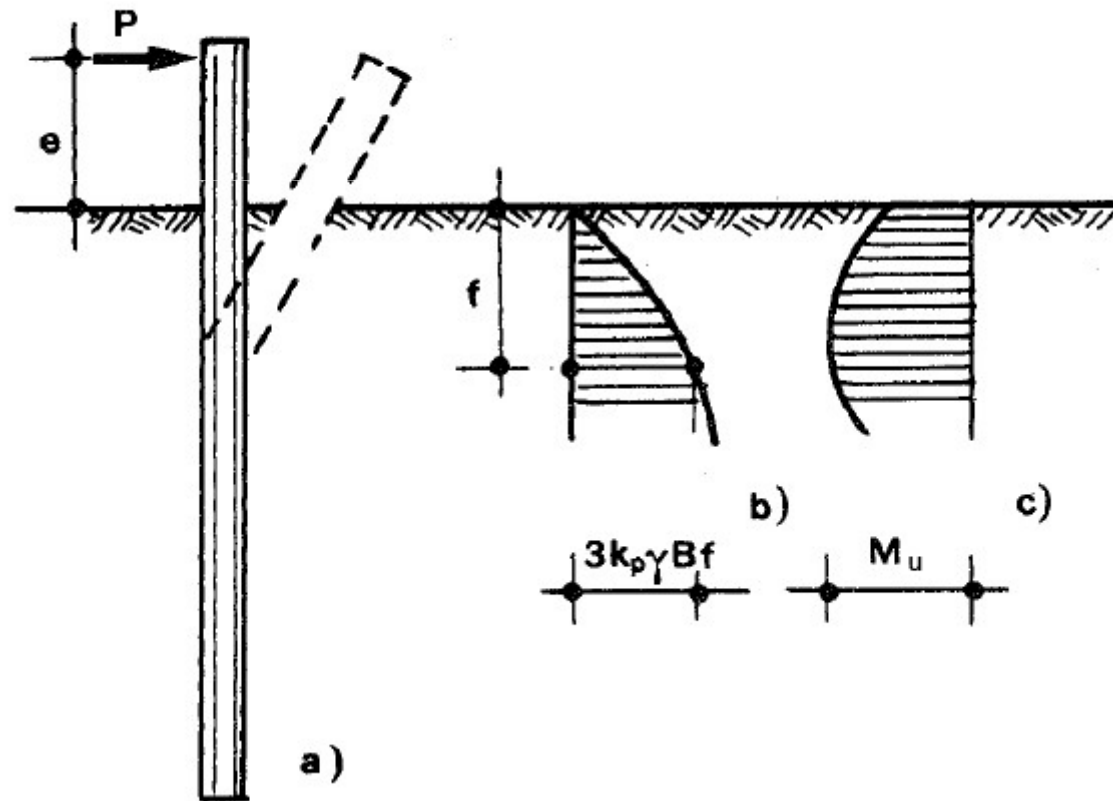
Palo libero in testa terreno incoerente

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										
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	1301.8	kN												
	f	5.50	m												
	g	4.50	m												
	Mmax	6079.4	kNm												

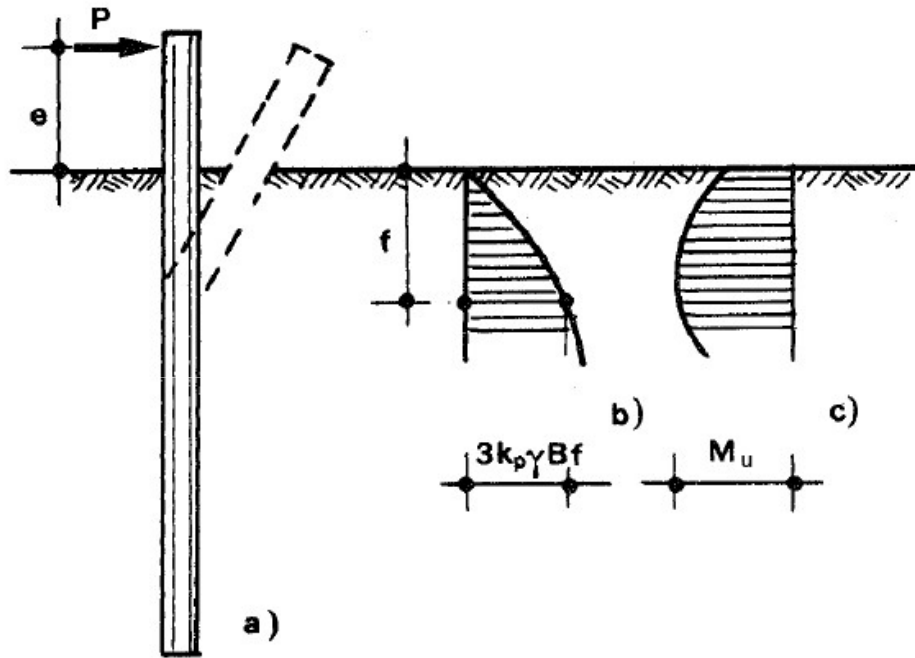


Palo libero in testa terreno incoerente

- 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		

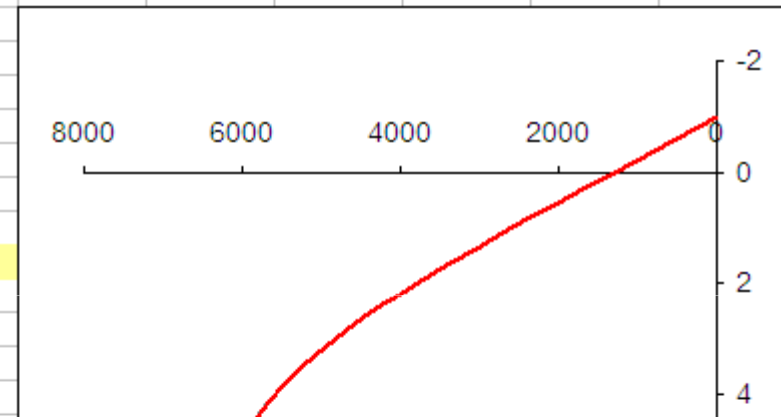
Il carico limite orizzontale è	P lim	1299.6	kN	palo lungo	
coefficiente spinta passiva	kp	3.25			
reazione unitaria terreno	3 kp γ B	85.92	kN/m ²		

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		

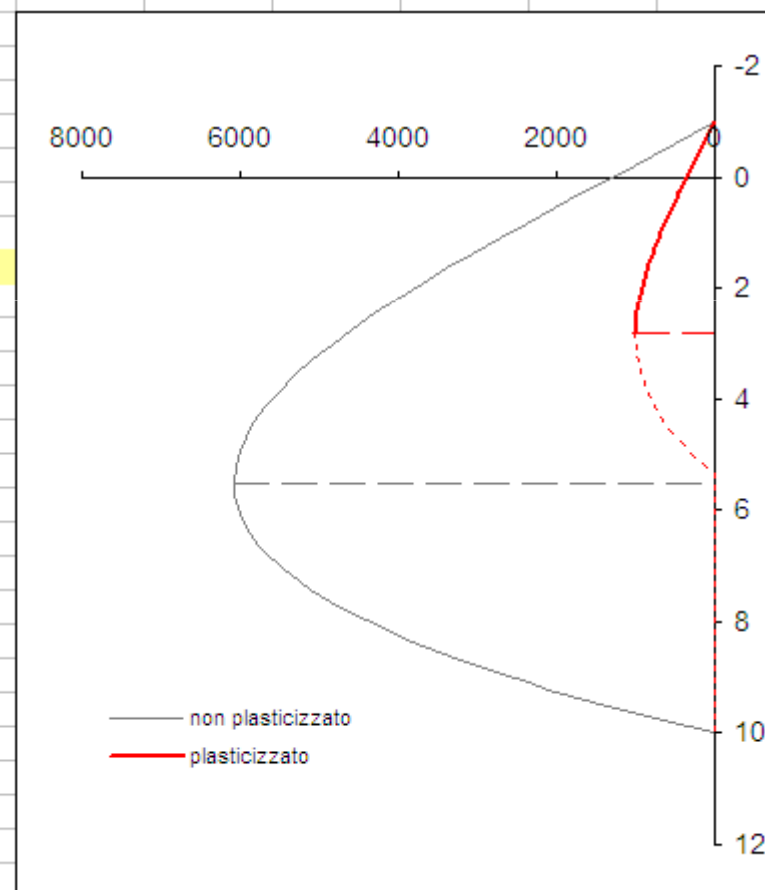


Per risolvere l'equazione di terzo grado occorre azzerare l'errore cambiando f

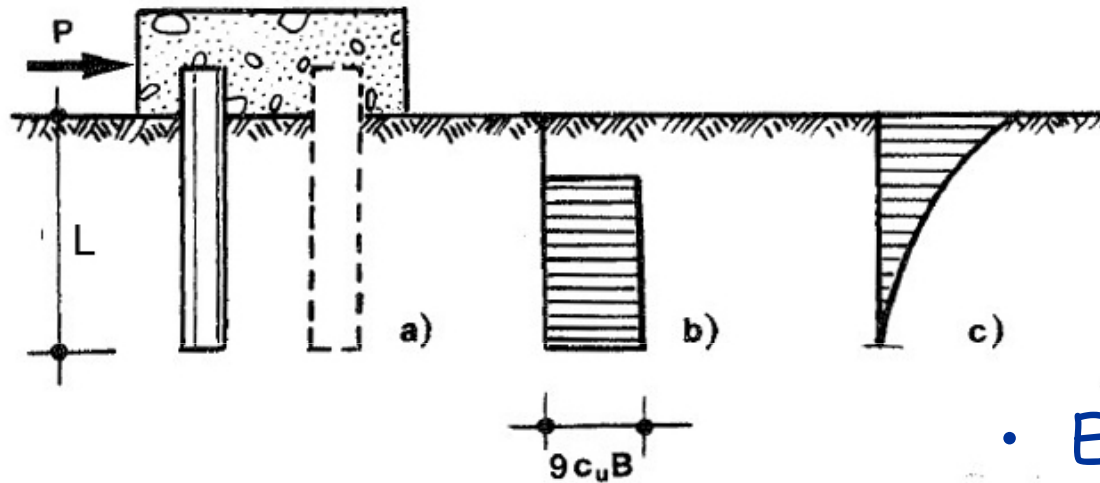
Si può fare facilmente in Excel con ricerca obiettivo

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

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

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

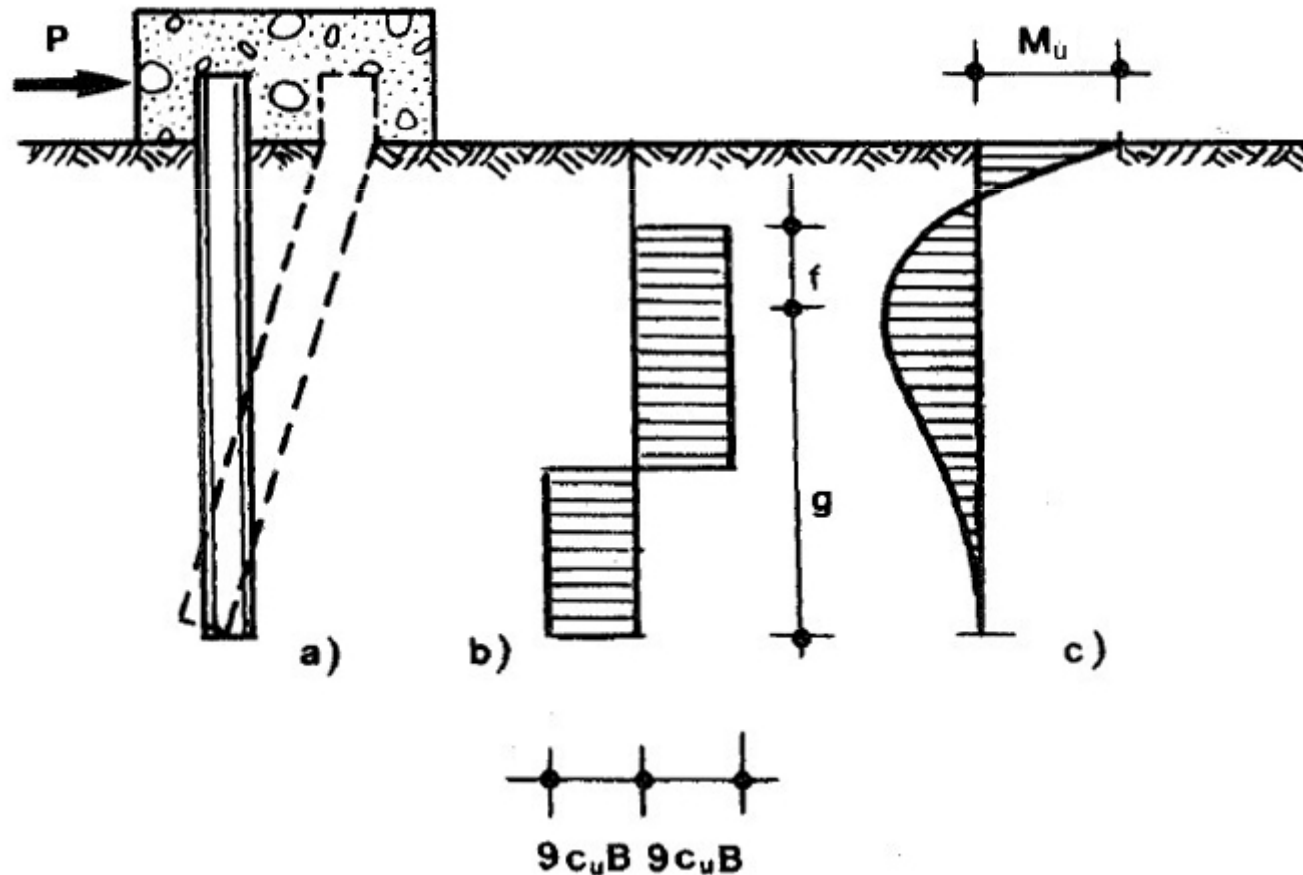
Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

Palo vincolato in testa - suolo coesivo					
diametro palo	B	40	cm		
lunghezza palo	L	10.00	m		
coesione non drenata	c _u	40	kPa [kN/m²]		
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		

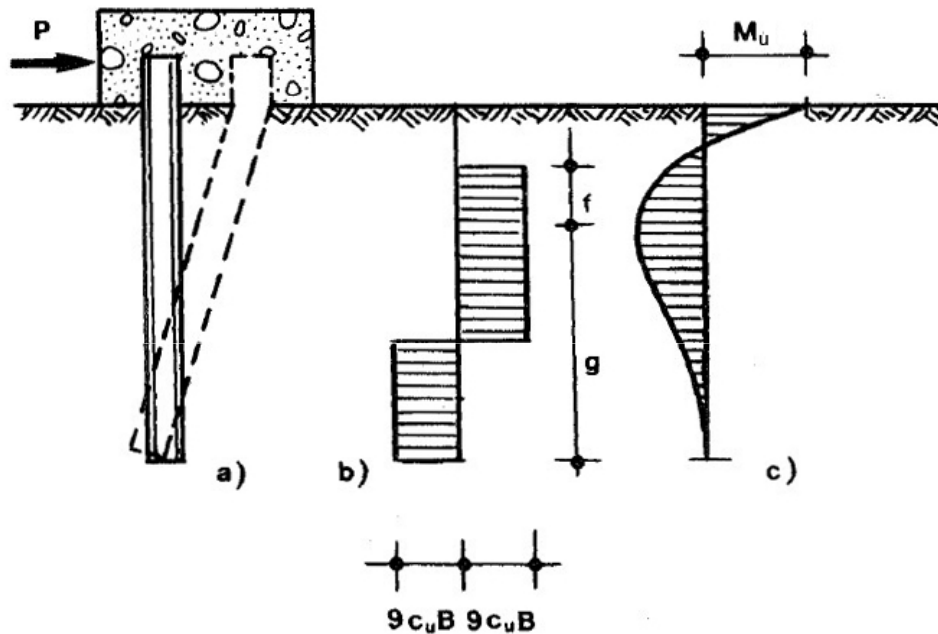
Il diagramma illustra la distribuzione della resistenza laterale lungo la lunghezza di un palo vincolato in testa. L'asse delle ascisse indica la forza di resistenza laterale in kN, con valori da 0 fino a -8000. L'asse delle ordinate indica la profondità in metri, con valori da 0 fino a 12. La curva continua, etichettata come "non plasticizzato", mostra una resistenza che aumenta progressivamente con la profondità, raggiungendo il suo valore massimo alla base del palo.

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

$$P = 9 c_u B f$$

- Equilibrio alla rotazione

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

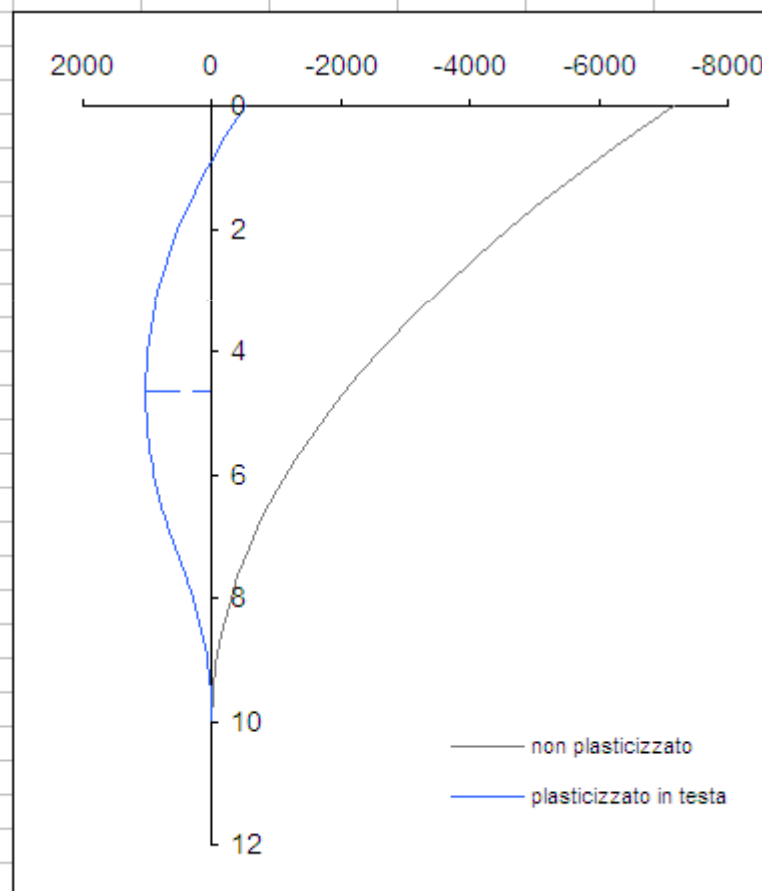
- Si ottiene

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

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

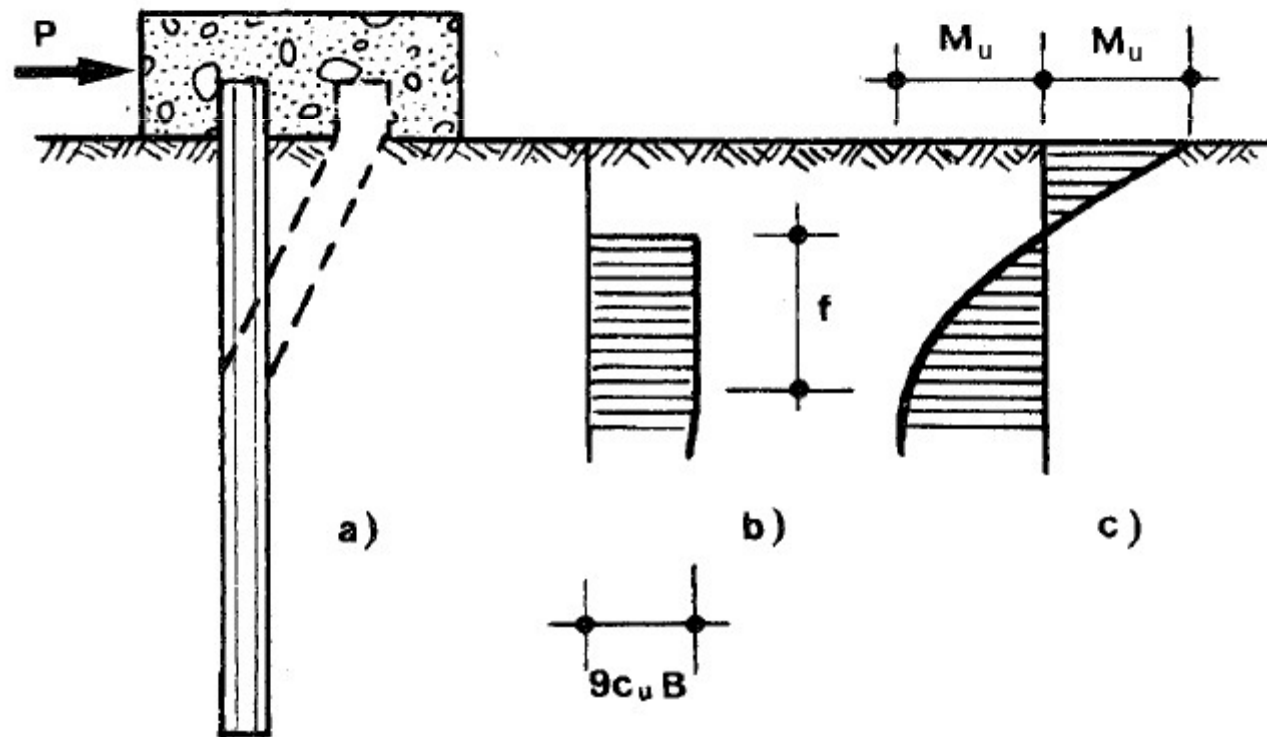
Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

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		

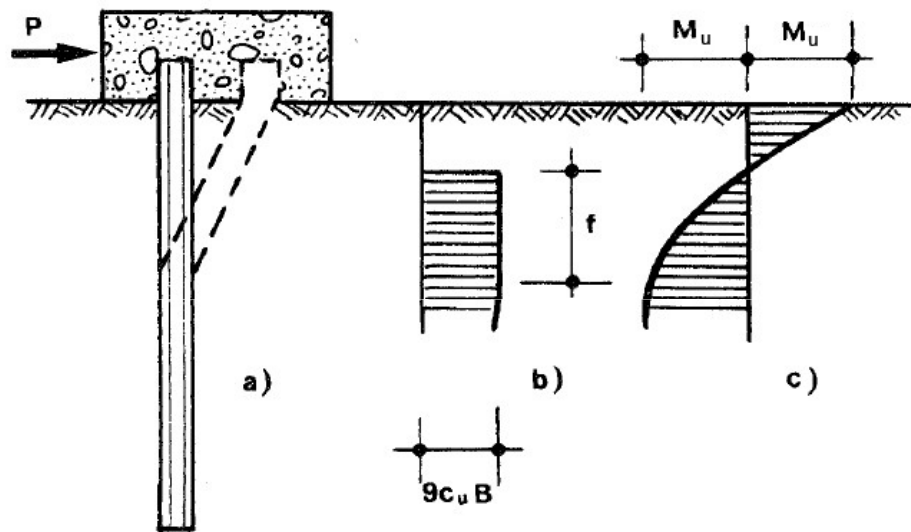


Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

- 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")

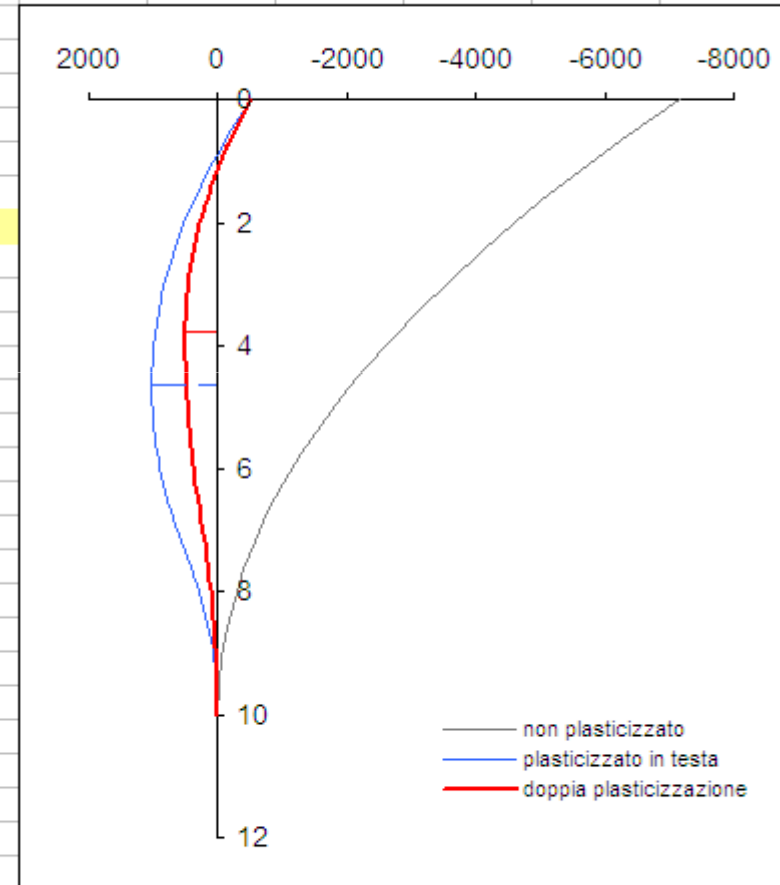
carico limite	P	1353.6	kN		
	f	9.40	m		
	g	0.00	m		
	M-max	7174.1	kNm		

se si plasticizza in testa (palo "intermedio")

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

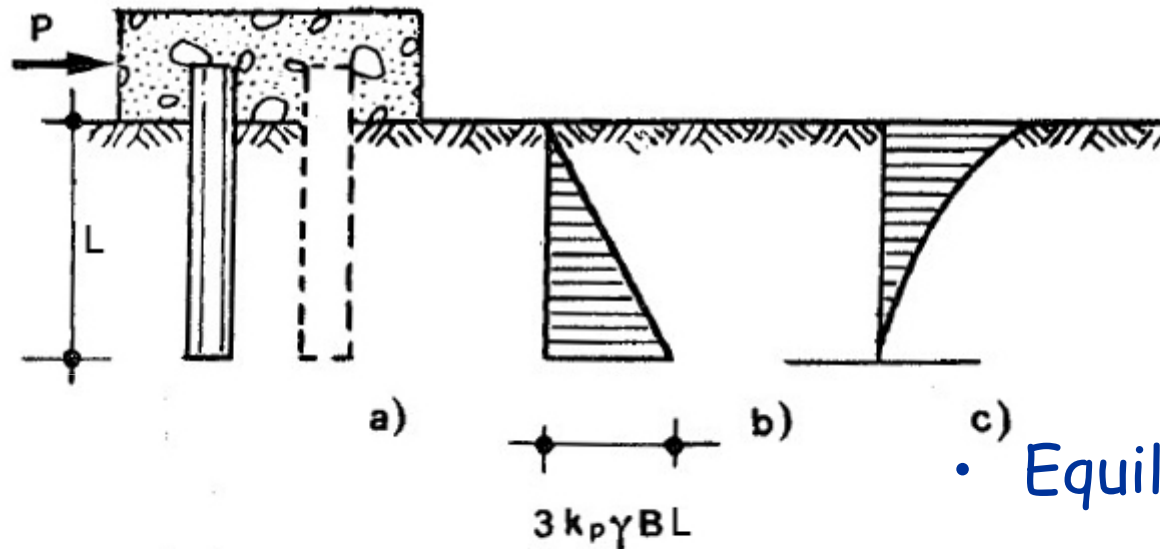
se si plasticizza in due sezioni (palo "lungo")

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



Notare la terminologia: palo lungo – intermedio - corto

Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente



- Equilibrio alla traslazione

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

- P è già fornito dall'equilibrio alla traslazione

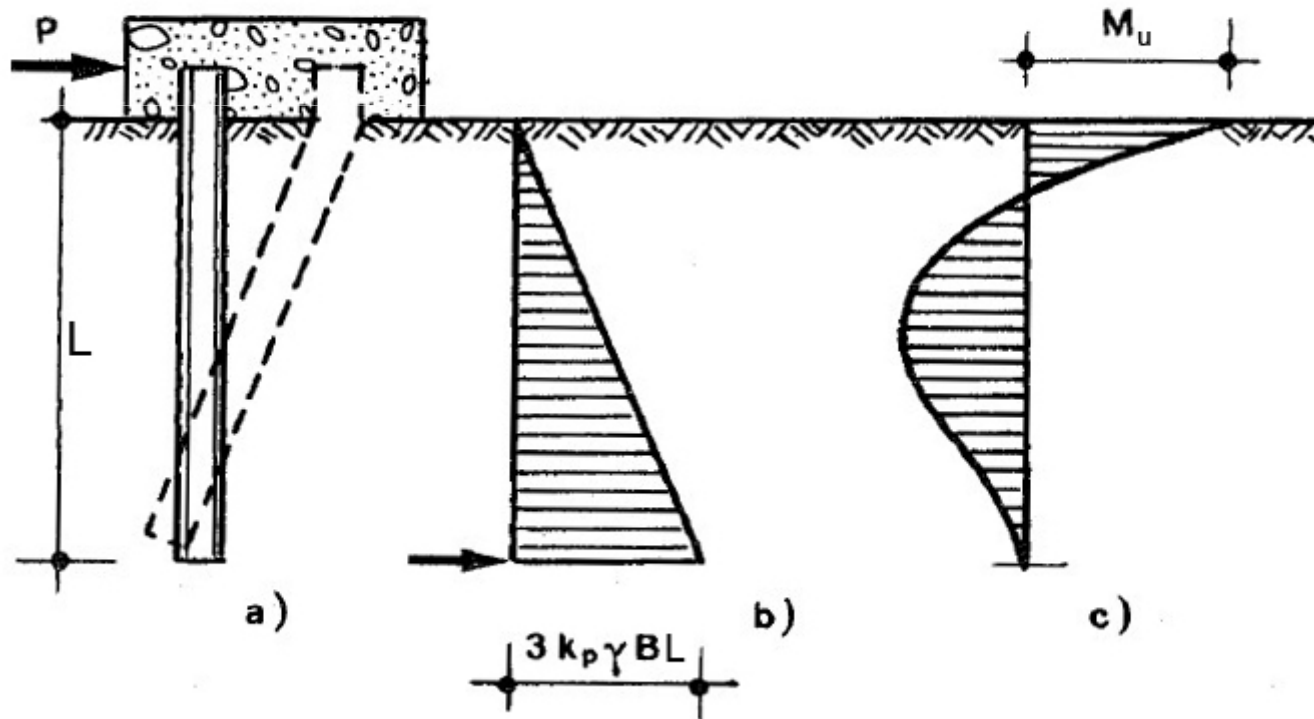
- Il momento massimo in testa vale $M_{t,\max} = P \frac{2}{3} L$

Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

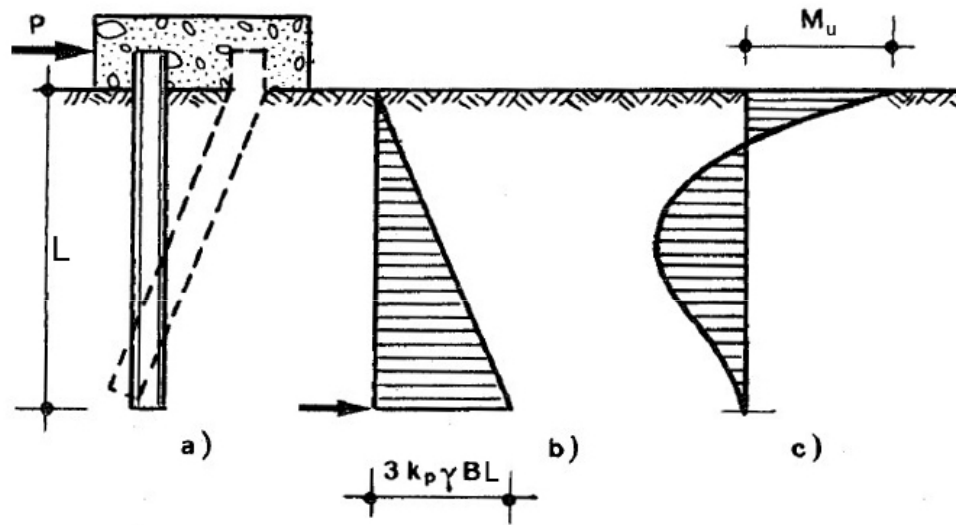
[illegible]

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

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

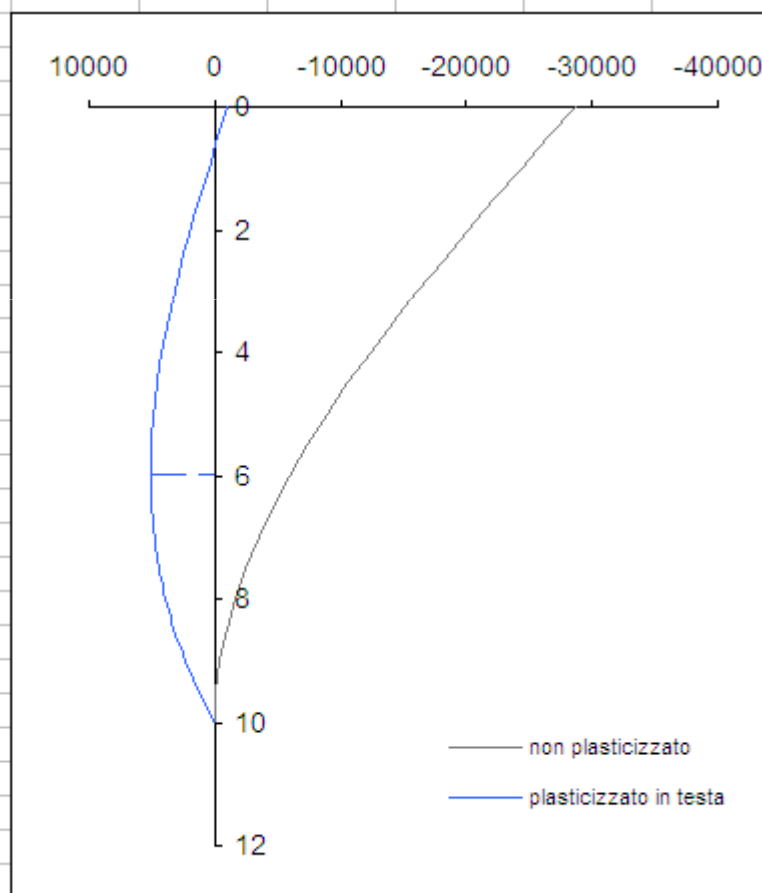
- Si ottiene

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

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

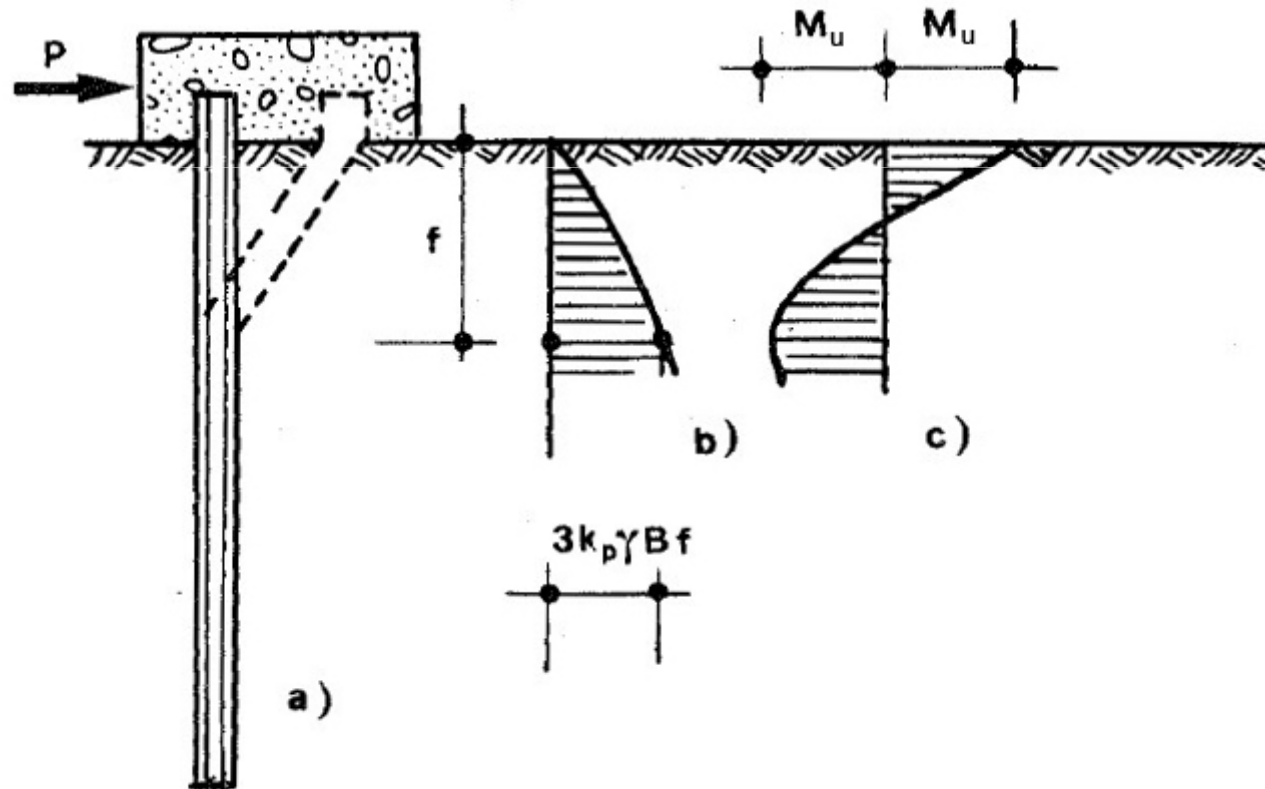
Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

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		

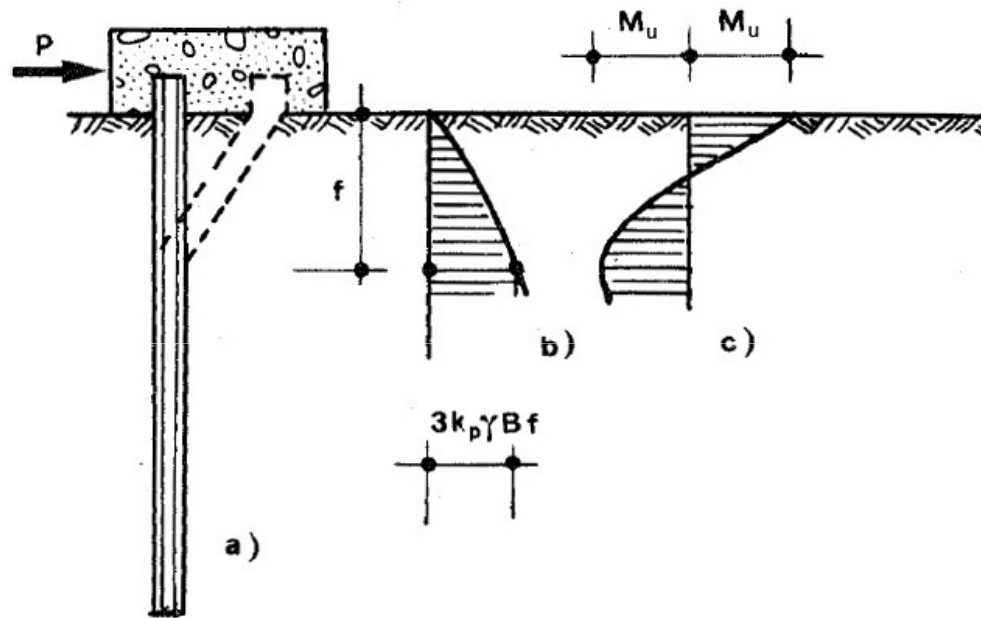


Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

- 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

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

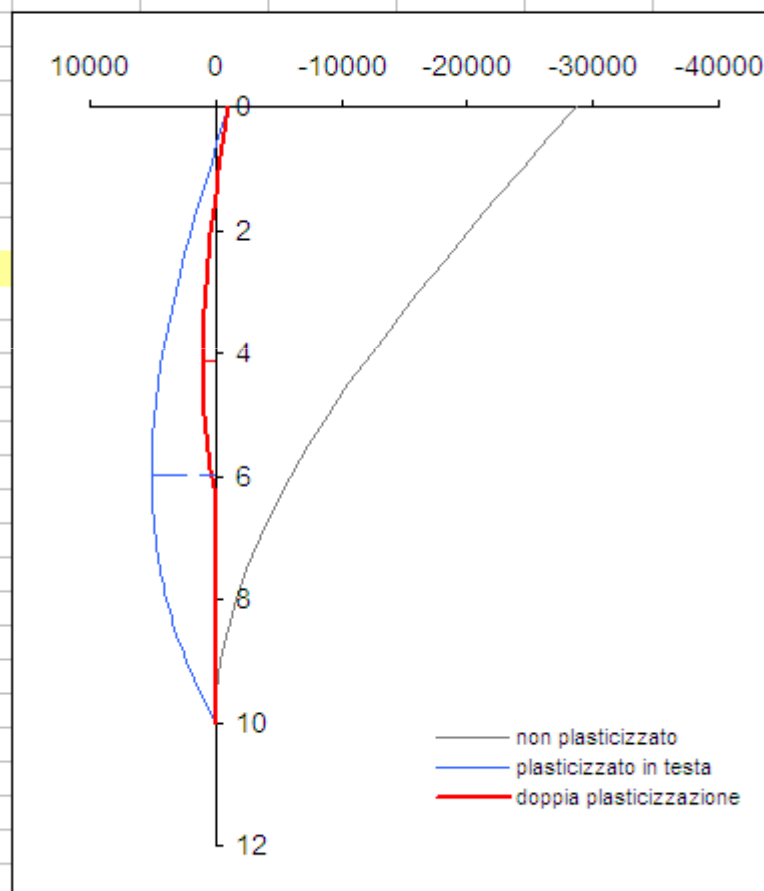
- Si ottiene

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

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