

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

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

$\swarrow$   $\searrow$   
 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

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

### 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  $\gamma_R$  da applicare alle resistenze caratteristiche.

Resistenza	Simbolo	Pali infissi			Pali rivellati			Pali ad elica continua		
		(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)
Base	$\gamma_R$	1.0	1.45	1.15	1.0	1.7	1.35	1.0	1.6	1.3
Laterale in compressione	$\gamma_R$	1.0	1.45	1.15	1.0	1.45	1.15	1.0	1.45	1.15
Totale (*)	$\gamma_R$	1.0	1.45	1.15	1.0	1.6	1.30	1.0	1.55	1.25
Laterale in trazione	$\gamma_R$	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

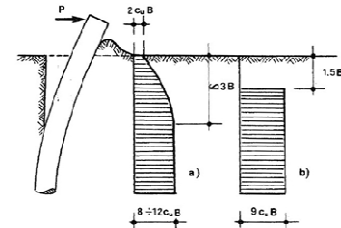
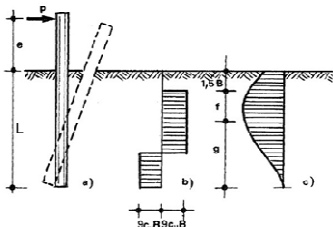


Figure tratte da:  
P. De Simone,  
Fondazioni,  
Liguori editore, 1981

### Palo libero in testa terreno coesivo



- Equilibrio alla traslazione

$$P = 9 c_u B f$$

- Equilibrio alla rotazione

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

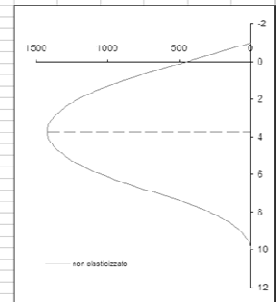
- Si ottiene

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

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

### Palo libero in testa terreno coesivo

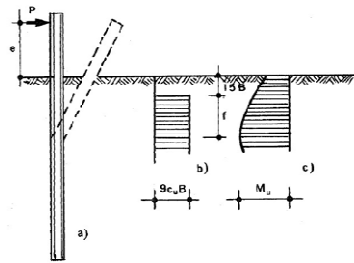
Palo libero in testa - suolo coesivo			
diámetro palo	B	40	cm
longhezza palo	L	10.00	m
sporgenza piano campagna	e	1.00	m
coesione non drenata	c <sub>u</sub>	43	kN/m <sup>2</sup>
parte superficiale trascurata	1.5 B	0.60	m
reazione unitaria terreno	9 c <sub>u</sub> B	144	kN/m
se non si plastifica (palo "coro")		1814.4	
coef b/2		-1032233	
carico limite	P	449.9	kN
	f	3.12	m
	g	6.28	m
	M <sub>max</sub>	1419.8	kNm



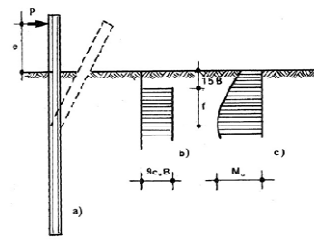
Vedi file Excel Pali

### 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



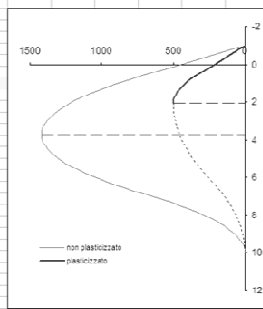
- Equilibrio alla traslazione  
 $P = 9c_u B f$
- Equilibrio alla rotazione  
 $P(e + 1.5 B + 0.5 f) = M_u$

- Si ottiene

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

### Palo libero in testa terreno coesivo

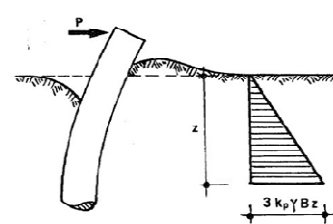
Palo libero in testa - suolo coesivo				
diámetro palo	B	40	cm	0.40 m
longhezza palo	L	10.00	m	
sporgenza piano campagna	e	1.00	m	
coesione non drenata	c_u	40	kPa [kN/m <sup>2</sup> ]	
momento ultimo della sezione	M_u	500.0	kNm	
Il carico limite orizzontale è				
P lim	213.5	kN		palo lungo
parte superficiale trascurata				
1.5 D	0.60	m		
reazione unitaria terreno	9 c_u B	144	kN/m	
se non si plasticizza (palo "corto")				
coeff b/2	181.4			
coeff c	183223			
carico limite	P	449.3	kN	
f	3.12	m		
g	6.26	m		
M_max	1419.8	kNm		
se si plasticizza (palo "lungo")				
coeff b/2	230.4			
coeff c	144800			
carico limite	P	213.5	kN	
f	1.48	m		
g	7.92	m		
reazione sotto cerniera	g	21.9	kN/m	



Notare la terminologia: palo lungo – palo corto

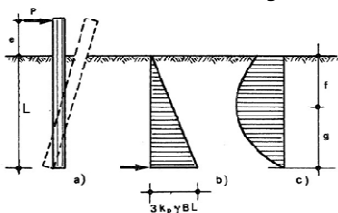
### Palo libero in testa terreno incoerente

- 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

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

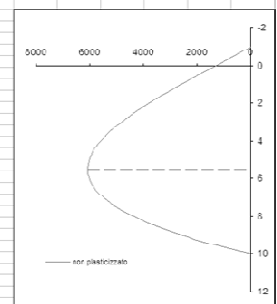
- Equilibrio alla rotazione

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

- Si ottiene  $P = \frac{3k_p \gamma B L^3}{6(e + L)}$
- Il momento massimo è  $M_{max} = P \left( e + \frac{2}{3} f \right)$

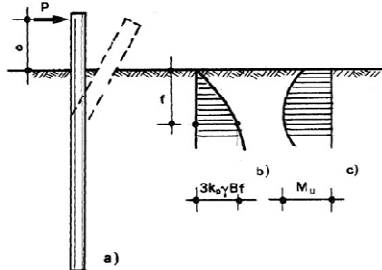
### Palo libero in testa terreno incoerente

Palo libero in testa - suolo incoerente				
diámetro palo	B	40	cm	0.40 m
longhezza palo	L	10.00	m	
sporgenza piano campagna	e	1.00	m	
peso specifico	gamma	25	kN/m <sup>3</sup>	
angolo d'attrito	phi	32	°	0.559 rad
coefficiente spinta passiva				
k_p	3.25			
reazione unitaria terreno				
3 k_p gamma B	85.92	kN/m <sup>2</sup>		
se non si plasticizza (palo "corto")				
carico limite	P	1301.8	kN	
f	5.50	m		
g	4.50	m		
M_max	6079.4	kNm		

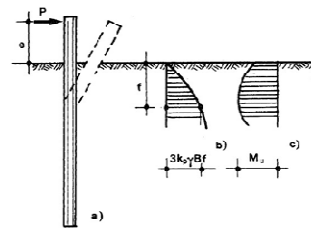


### Palo libero in testa terreno incoerente

- 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

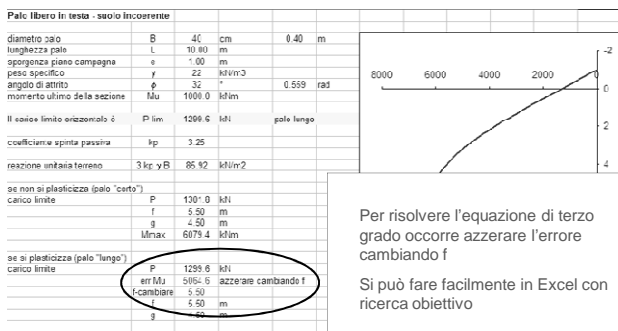
$$P = \frac{3k_p \gamma B f^2}{2}$$

- Equilibrio alla rotazione

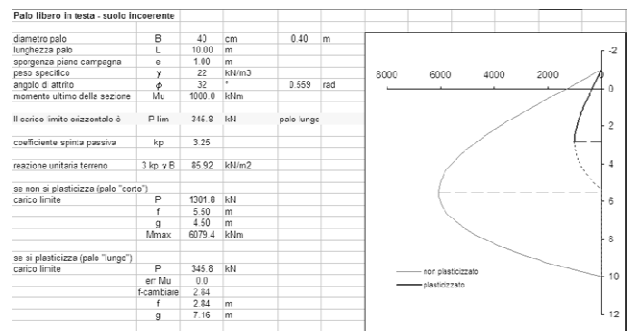
$$P \left( e + \frac{2}{3} f \right) = M_u$$

- Si ottiene una equazione di terzo grado

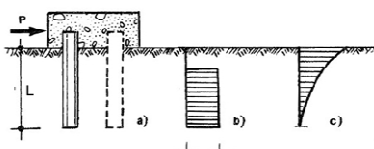
### Palo libero in testa terreno incoerente



### Palo libero in testa terreno incoerente



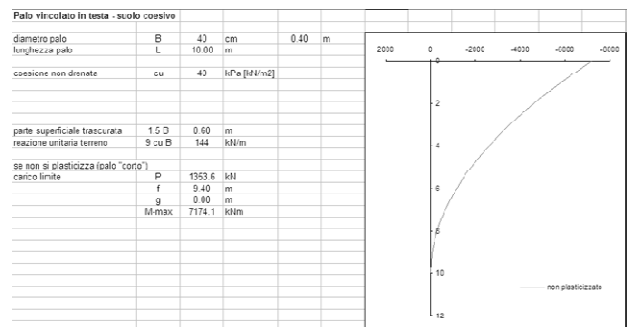
### Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo



- Equilibrio alla traslazione
- $$P = 9c_u B (L - 1.5 B)$$

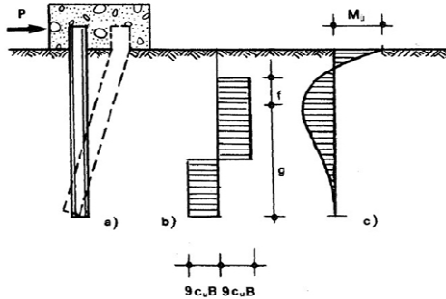
- P è già fornito dall'equilibrio alla traslazione
- Il momento massimo in testa vale  $M_{t,max} = P (0.5 L + 0.75 B)$

### Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

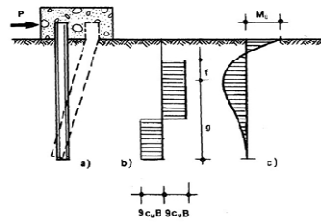


### Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

- 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

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

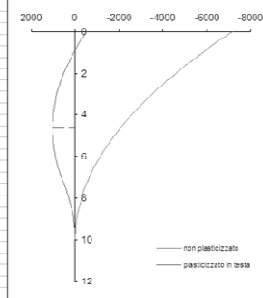
- Si ottiene

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

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

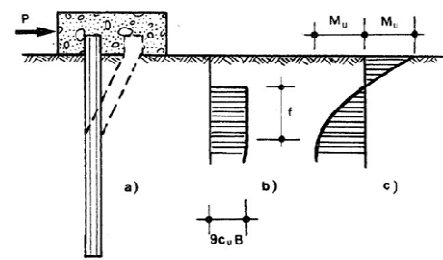
### Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

Palo vincolato in testa - suolo coesivo				
diámetro palo	B	40	cm	0.40 m
longhezza palo	L	10.00	m	
coesione non drenata	c <sub>u</sub>	40	kPa [kN/m <sup>2</sup> ]	
momento ultimo della sezione	M <sub>u</sub>	500.0	kNm	
parte superficiale trascurata	1.5 B	0.60	m	
resistenza unitaria terreno	9 c <sub>u</sub> 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 <sub>i,max</sub>	714.1	kNm	
se si plasticizza in testa (palo "intermedio")				
coeff b/2		1528.4		
		-2120233		
carico limite	P	563.1	kN	
	f	4.05	m	
	g	5.35	m	
	M <sub>i,max</sub>	1030.6	kNm	

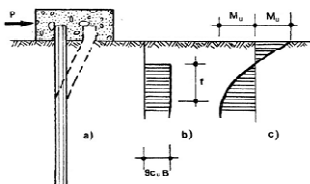


### Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

- 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

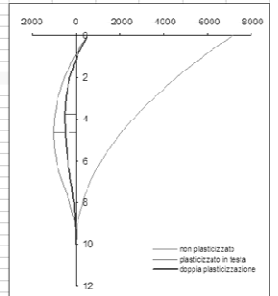
$$P(1.5B + 0.5f) = M_{t,u} + M_{i,u}$$

- Si ottiene

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

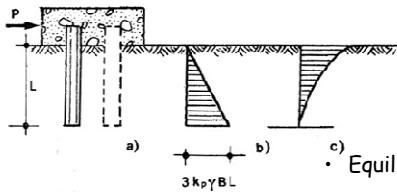
### Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

Palo vincolato in testa - suolo coesivo				
diámetro palo	B	40	cm	0.40 m
longhezza palo	L	10.00	m	
coesione non drenata	c <sub>u</sub>	40	kPa [kN/m <sup>2</sup> ]	
momento ultimo della sezione	M <sub>u</sub>	500.0	kNm	
il carico limite orizzontale è	P lim	457.2	kN	(palo lungo)
parte superficiale trascurata	1.5 B	0.60	m	
resistenza unitaria terreno	9 c <sub>u</sub> 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 <sub>i,max</sub>	714.1	kNm	
se si plasticizza in testa (palo "intermedio")				
coeff b/2		1528.4		
		-2120233		
carico limite	P	563.1	kN	
	f	4.05	m	
	g	5.35	m	
	M <sub>i,max</sub>	1030.6	kNm	
se si plasticizza in due sezioni (palo "lungo")				
coeff b/2		266.4		
		-280000		
carico limite	P	457.2	kN	
	f	3.17	m	
	g	6.23	m	
	M <sub>i,max</sub>	516	kNm	
reazione sotto cerniera				



Notare la terminologia: palo lungo - intermedio - corto

### Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente



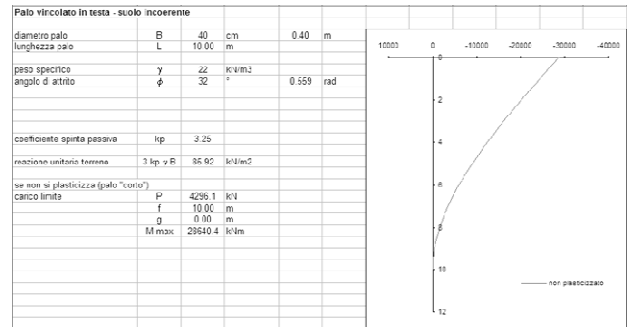
• Equilibrio alla traslazione

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

- P è già fornito dall'equilibrio alla traslazione

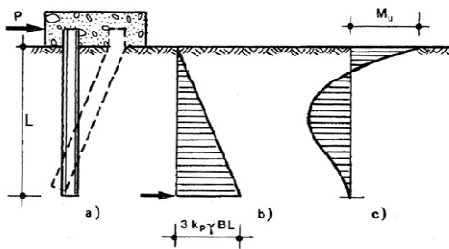
- Il momento massimo in testa vale  $M_{t,max} = P \frac{2}{3} L$

### Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

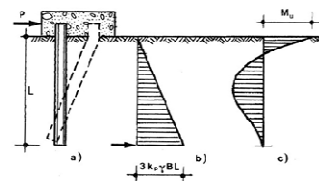


### Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

- 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

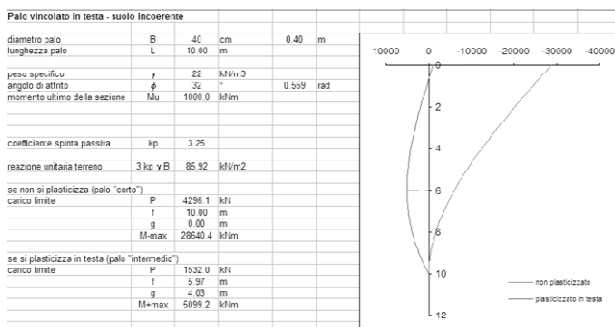
$$P L - \frac{3k_p \gamma B L^3}{6} = M_u$$

- Si ottiene

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

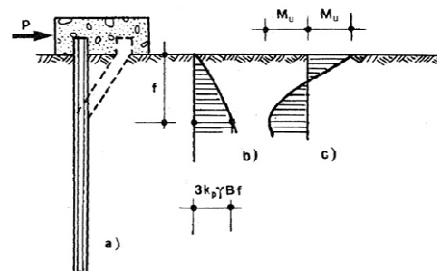
$$M_{t,max} = P \frac{2}{3} f - M_u$$

### Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

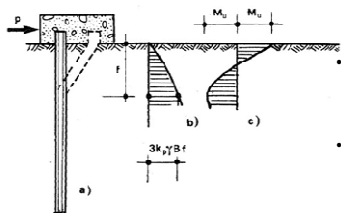


### Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

- 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

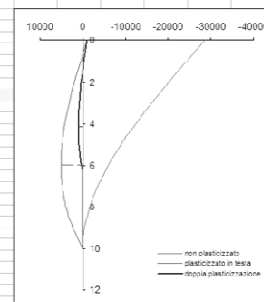
$$P \frac{2}{3} f = M_{t,u} + M_{v,u}$$

- Si ottiene

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

### 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	$\gamma$	22	kN/m <sup>3</sup>	
angolo di attrito	$\phi$	30	°	0.519 rad
momento ultimo della sezione	$M_u$	1000.0	kNm	
il carico limite orizzontale è	P lim	728.5	kN	palo lungo
coefficiente spirale passiva	$k_p$	3.75		
reazione unitaria terreno	3 $k_p \gamma B$	95.92	kN/m <sup>2</sup>	
se non si plasticizza (palo "corto")				
carico limite	P	4766.1	kN	
	f	10.00	m	
	g	0.00	m	
	Mmax	29940.4	kNm	
se si plasticizza in testa (palo "intermedio")				
carico limite	P	1519.8	kN	
	f	5.97	m	
	g	4.03	m	
	Mmax	5059.2	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