

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 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

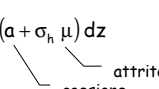
Carico limite per azioni verticali

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**

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



- 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 γ_k da applicare alle resistenze caratteristiche.

Resistenza	Simbolo	Pali infissi			Pali trivellati			Pali ad elica continua		
Base	γ_R	(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)
Laterale in compressione	γ_s	1.0	1.45	1.15	1.0	1.7	1.35	1.0	1.6	1.3
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_u	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

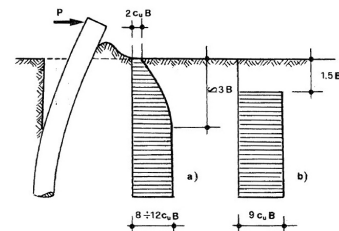
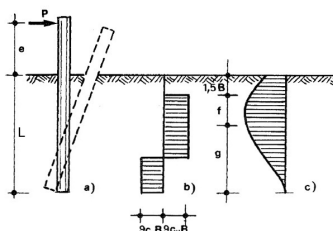


Figure tratte da:
P. De Simone,
Fondazioni,
Liguori editore, 1981

Palo libero in testa terreno coesivo



- Equilibrio alla traslazione

$$P = 9 c_u B f$$

- Equilibrio alla rotazione

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

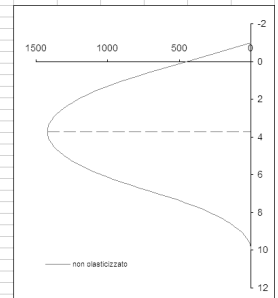
- Si ottiene

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

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

Palo libero in testa terreno coesivo

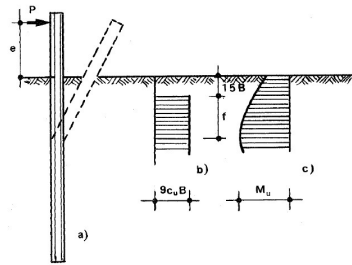
Palo libero in testa - suolo coesivo			
diámetro palo	B	40	cm
longhezza palo	L	10.00	m
sporgenza piano campagna	e	1.00	m
coesione non drenata	c _u	40	kPa [kN/m ²]
parte superficiale trascurata	1.5 B	0.60	m
reazione unitaria terreno	9 c _u B	144	kN/m
se non si plasticizza (palo "corto")			
coeff b/2		1814.4	
coeff c		-183223	
carico limite	P	449.9	kN
	f	3.12	m
	g	6.28	m
	M _{max}	1419.8	kNm



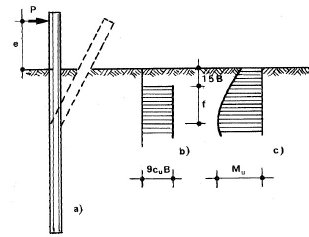
Vedi file Excel Pali

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



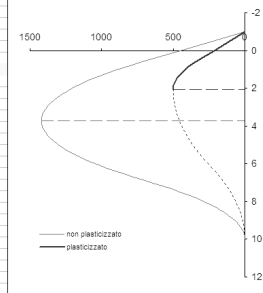
- Equilibrio alla traslazione
 $P = 9c_u B f$
- Equilibrio alla rotazione
 $P(e + 1.5 B + 0.5 f) = M_u$

- Si ottiene

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

Palo libero in testa terreno coesivo

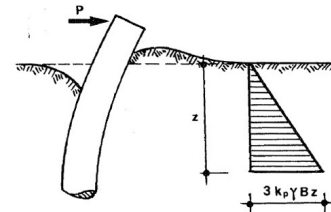
Palo libero in testa - suolo coesivo				
diámetro palo	B	40	cm	0.40 m
lunghezza palo	L	10.00	m	
sporgenza piano campagna	e	1.00	m	
coesione non drenata	c _u	40	kPa	[kN/m ²]
momento ultimo della sezione	M _u	500.0	kNm	
Il carico limite orizzontale è				
P lim		213.5	kN	(palo lungo)
parte superficiale trascurata	1.5 B	0.60	m	
reazione unitaria terreno	9 c _u 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		6.26	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

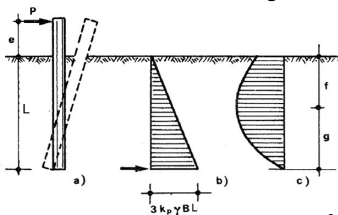
Palo libero in testa terreno incoerente

- 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

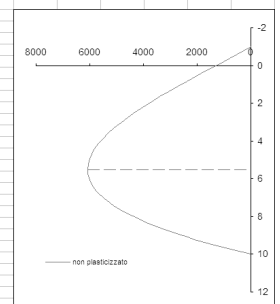
$$P(e + L) = \frac{3k_p \gamma B L^3}{6}$$

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

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

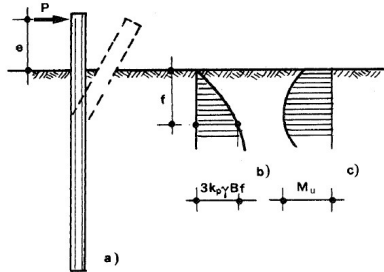
Palo libero in testa terreno incoerente

Palo libero in testa - suolo incoerente				
diámetro 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 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	

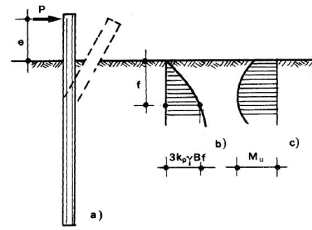


Palo libero in testa terreno incoerente

- 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	\gamma	22	kN/m ³	
angolo di attrito	\phi	32	°	0.559 rad
momento ultimo della sezione	M_u	1000.0	kNm	
Il carico limite orizzontale è				
	P lim	1299.6	kN	palo lungo
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	
	M_max	6079.4	kNm	
se si plasticizza (palo "lungo")				
carico limite	P	1299.6	kN	
	e + M_u	5064.6	m	azzerare cambiando f
	f	5.50	m	
	g	4.50	m	

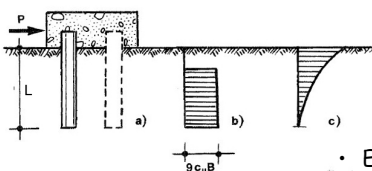
Per risolvere l'equazione di terzo grado occorre azzerare l'errore cambiando f

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	\gamma	22	kN/m ³	
angolo di attrito	\phi	32	°	0.559 rad
momento ultimo della sezione	M_u	1000.0	kNm	
Il carico limite orizzontale è				
	P lim	345.8	kN	palo lungo
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	
	M_max	6079.4	kNm	
se si plasticizza (palo "lungo")				
carico limite	P	345.8	kN	
	e + M_u	0.0	m	
	f	2.84	m	
	g	7.16	m	

Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo



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

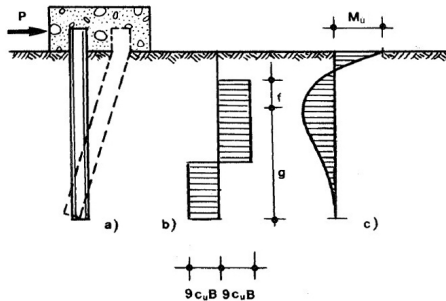
- P è già fornito dall'equilibrio alla traslazione
- Il momento massimo in testa vale $M_{t,max} = P (0.5 L + 0.75 B)$

Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

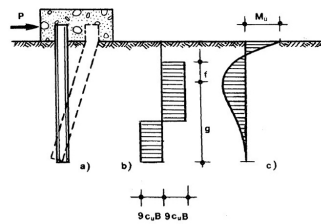
Palo vincolato in testa - suolo coesivo				
diametro palo	B	40	cm	0.40 m
lunghezza palo	L	10.00	m	
coesione non drenata				
	c_u	40	kPa [kN/m ²]	
parte superficiale trascurata				
	1.5 B	0.60	m	
reazione unitaria terreno				
	9 c_u B	144	kN/m	
se non si plasticizza (palo "corto")				
carico limite	P	1353.6	kN	
	f	9.40	m	
	g	0.00	m	
	M_max	7174.1	kNm	

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

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

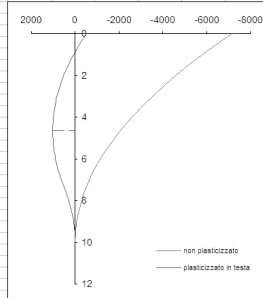
- Si ottiene

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

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

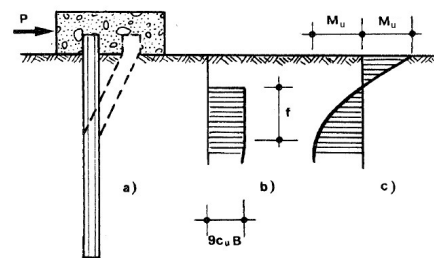
Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

Palo vincolato in testa - suolo coesivo				
diametro palo	B	40	cm	0.40 m
lunghezza palo	L	10.00	m	
coesione non drenata	cu	40	kPa [kN/m ²]	
momento ultimo della sezione	Mu	500.0	kNm	
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	1030.8	kNm	

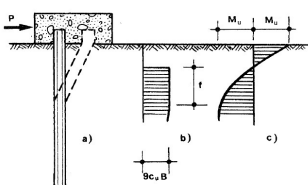


Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

- 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

$$P = 9 c_u B f$$

- Equilibrio alla rotazione

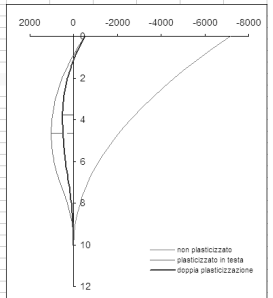
$$P (1.5 B + 0.5 f) = M_{t,u} + M_{i,u}$$

- Si ottiene

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

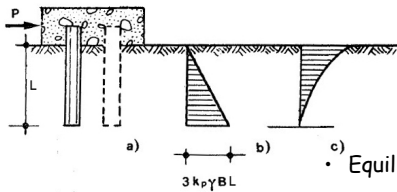
Palo impedito di ruotare in testa terreno coesivo

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	1030.8	kNm	
se si plasticizza in due sezioni (palo "lungo")				
coeff b/2		66.4		
coeff c		-288000		
carico limite	P	457.2	kN	
	f	3.17	m	
	g	6.23	m	
reazione sotto capogiro		51.6	kN/m	



Notare la terminologia: palo lungo - intermedio - corto

Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente



• Equilibrio alla traslazione

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

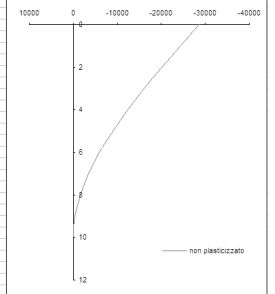
• P è già fornito dall'equilibrio alla traslazione

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

Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

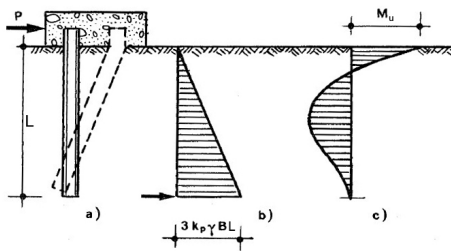
Palo vincolato in testa - suolo incoerente

diametro palo	B	40	cm	0.40	m
lunghezza palo	L	10.00	m		
peso specifico	\gamma	22	kN/m ³		
angolo di 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 ²		
se non si plasticizza (palo "corfo")					
carico limite	P	4296.1	kN		
	f	10.00	m		
	g	0.00	m		
	M _{max}	29940.4	kNm		

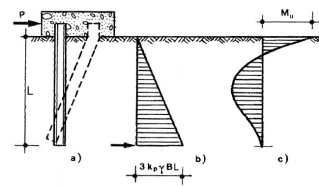


Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

• 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

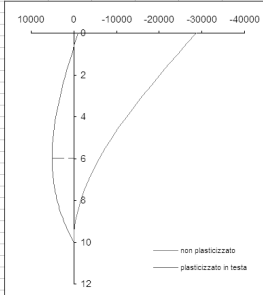
$$P = \frac{M_u}{L} + \frac{3k_p \gamma B L^2}{6}$$

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

Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

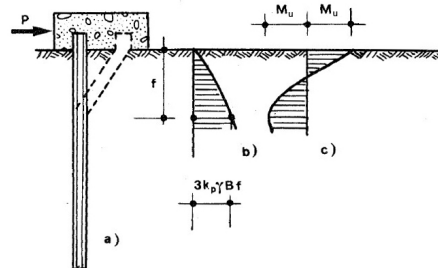
Palo vincolato in testa - suolo incoerente

diametro palo	B	40	cm	0.40	m
lunghezza palo	L	10.00	m		
peso specifico	\gamma	22	kN/m ³		
angolo di attrito	\phi	32	°	0.559	rad
momento ultimo della sezione	M _u	1000.0	kNm		
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 "corfo")					
carico limite	P	4296.1	kN		
	f	10.00	m		
	g	0.00	m		
	M _{max}	29940.4	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		

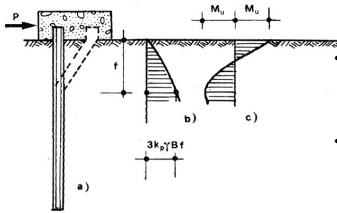


Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

• 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

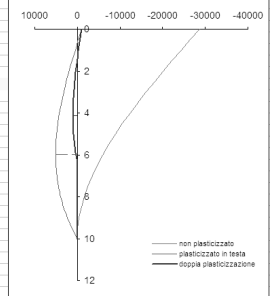
$$P \frac{2}{3} f = M_{t,u} + M_{s,u}$$

- Si ottiene

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

Palo impedito di ruotare in testa terreno incoerente

Palo vincolato in testa - suolo incoerente				
diametro palo	B	40	cm	0.40
lunghezza palo	L	10.00	m	
peso specifico	γ	22	kN/m3	
angolo di attrito	φ	32	°	0.559
momento ultimo della sezione	M _u	1000.0	kNm	
Il carico limite orizzontale è				
	P lim	728.5	kN	palo lungo
coefficiente spinta passiva				
	k _p	3.25		
reazione unitaria terreno				
	3 k _p γ B	85.92	kN/m2	
se non si plasticizza (palo "cofo")				
carico limite				
	P	4296.1	kN	
	f	10.00	m	
	g	0.00	m	
	M+max	29540.4	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