

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

ASPETTI GEOTECNICI

Parte I – Considerazioni generali

1. Comportamento meccanico dei terreni sotto azioni statiche e dinamiche
2. Principi di progettazione e metodologie di analisi
3. Moti sismici di riferimento

Parte II – Analisi geotecnica del sito

4. Pericolosità ed effetti del sito
5. Risposta sismica locale
6. Liquefazione
7. Stabilità di pendii e dei fronti di scavo

Parte III – Opere geotecniche

8. Fondazioni
9. Fondazioni superficiali
10. Fondazioni su pali
11. Opere di sostegno a gravità
12. Opere di sostegno flessibili
13. Opere in terra rinforzata
14. Costruzioni in sotterraneo e scavi a cielo aperto
15. Costruzioni in terra

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

Figura 37 – Fondazione del Campanile di San Marco a Venezia (da Donghi, 1913, riprodotta in Colombo e Colleselli, 1997)

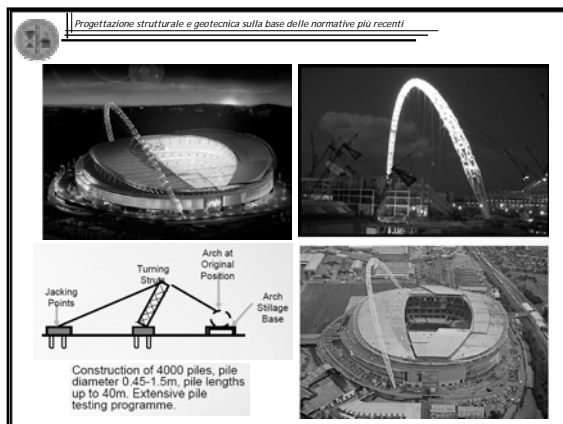
Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

Figura 10 - Macchina per l'infissione di pali, in Trattato di Architettura, ingegneria e Arte Militare, 1482, (da Jappelli e Marconi, 1997)

Figura 11 - Macchina per l'infissione di pali, in Architettura idraulica, ovvero arte di condurre, innalzare e regolare le acque per vari bisogni della vita (Montorio, 1836), (da Jappelli e Marconi, 1997)

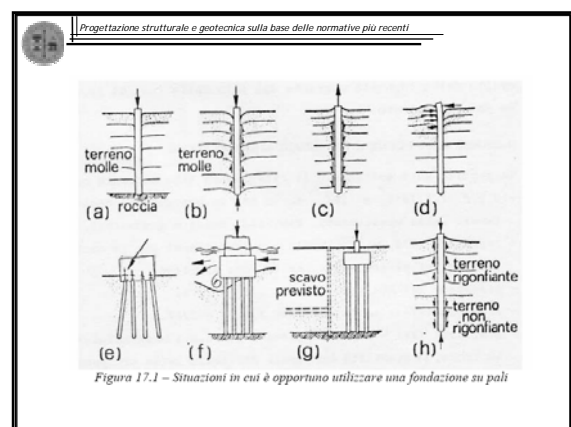
Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

Pali Trivellati gettati in Opera



TIPI DI MICROPALI

- Si definiscono micropali i pali trivellati di piccolo diametro ($D < 250 \text{ mm}$) realizzati con attrezzature e tecnologie particolari
- I tipi fondamentali sono due:
 - PALO RADICE**, che riproduce la tecnica dei pali trivellati di medio diametro, ma con getto in pressione
 - PALO TUBFIX**, ottenuto per trivellazione e getto attraverso un tubo di acciaio valvolato e cementato al terreno



Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

DIMENSIONAMENTO

- Scelta del tipo di palo**
- Dimensionamento del palo (L, d)**
- Numero di pali e disposizione**
- Struttura/e di collegamento**

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

I pali di fondazione possono essere classificati in base a differenti criteri:

Rispetto alle dimensioni

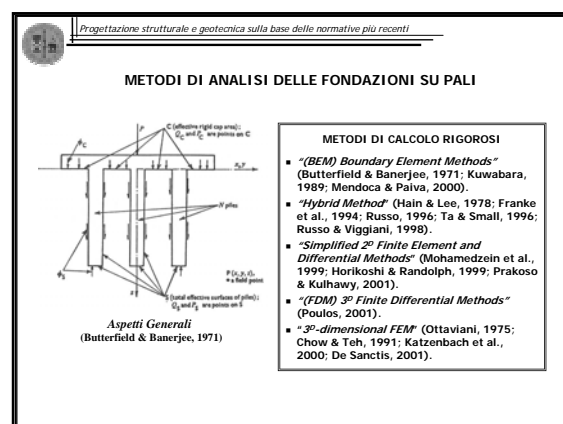
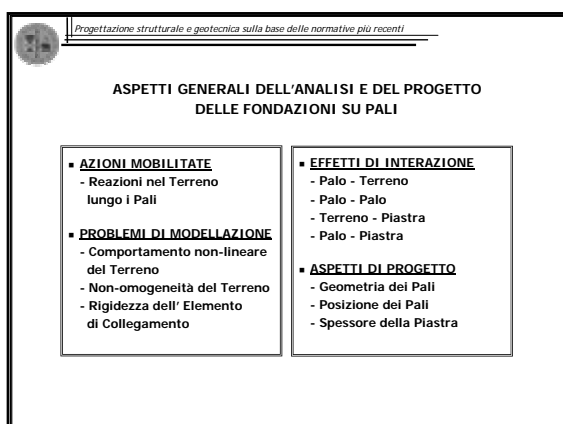
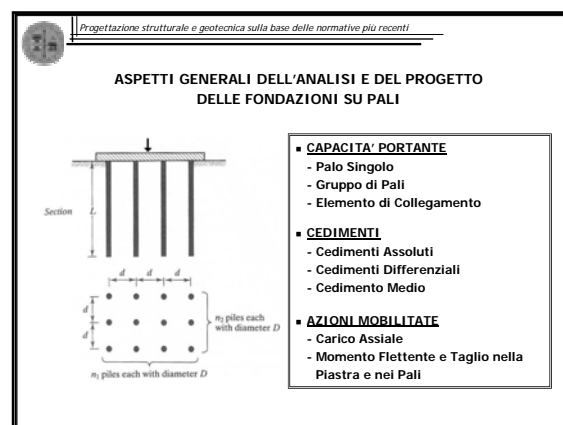
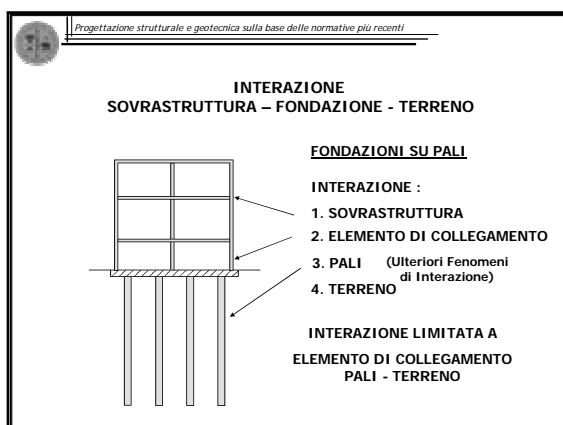
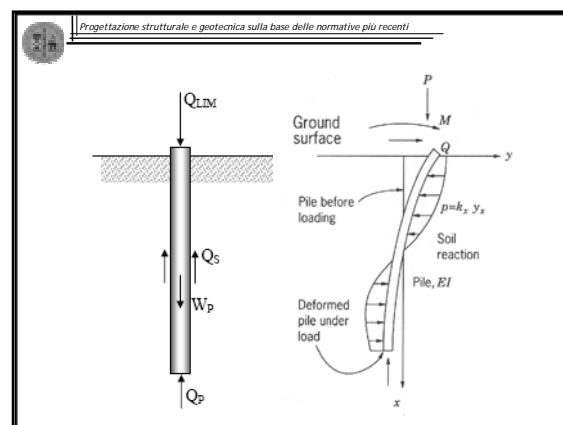
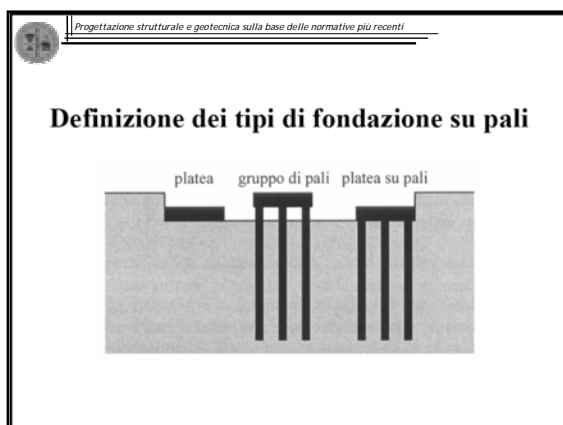
- piccolo diametro o micropali ($d \leq 25 \text{ cm}$),
- medio diametro ($30 \leq d \leq 60 \text{ cm}$),
- grande diametro ($d \geq 80 \text{ cm}$).

Rispetto al materiale costituente

- calcestruzzo (prefabbricato o gettato in opera, normale, centrifugato, vibrato, precompresso),
- acciaio,
- legno.

Rispetto al procedimento costruttivo

- infissi (senza asportazione di terreno, prefabbricati o gettati in opera),
- trivellati (con asportazione di terreno),
- trivellati con elica continua (parziale asportazione di terreno).



- *"A strip on springs"* (Poulos, 1991).
- *"A plate on springs"* (Burghignoli, 1983; Chow & The, 1991; Clancy & Randolph, 1993; Poulos, 1994; Russo & Viggiani, 1997; Kim et al., 2001; Gue et al., 2002).
- *"Variational approach"* (Shen et al., 1997; 2000).

- *"Equivalent Pier Method"* (Poulos & Davis, 1980; Randolph, 1983; Horikoshi & Randolph, 1999).
- *"Stiffness Equivalent Method"* (Randolph, 1994; Poulos, 2000; 2001; 2002).



- Instabilità globale;
- Rottura per carico limite della fondazione su pali;
- Sollevamento o insufficiente resistenza a trazione della fondazione su pali;
- Rottura del terreno per carico trasversale sulla fondazione su pali;
- Rottura strutturale del palo per compressione, trazione, flessione, taglio o carico di punta;
- Rottura combinata del terreno e dei pali di fondazione;
- Rottura combinata del terreno e della struttura di collegamento;
- Cedimenti eccessivi;
- Sollevamenti eccessivi;
- Spostamenti laterali eccessivi;
- Vibrazioni inaccettabili.

- **PALI CARICATI ASSIALMENTE**
- **PALI CARICATI TRASVERSALMENTE ALL'ASSE**
(pali in zona sismica, livelli di scavo diversi su lati opposti della fondazione su pali, fondazione su pali ai piedi di un rilevato,)
- **PALI CARICATI DA AZIONI DOVUTE A SPOSTAMENTI DEL TERRENO**
(pali passivi, attrito negativo, rigonfiamenti o sollevamenti del terreno,)
- **PALI SOGGETTI A TRAZIONE**

- Instabilità globale;
- Rottura per carico limite della fondazione su pali;
- Sollevamento o insufficiente resistenza a trazione della fondazione su pali;
- Rottura del terreno per carico trasversale sulla fondazione su pali;
- Rottura strutturale del palo per compressione, trazione, flessione, taglio o carico di punta;
- Rottura combinata del terreno e dei pali di fondazione;
- Rottura combinata del terreno e della struttura di collegamento;
- Cedimenti eccessivi;
- Sollevamenti eccessivi;
- Spostamenti laterali eccessivi;
- Vibrazioni inaccettabili.

A differenza delle fondazioni dirette, per i pali si assume totale indipendenza tra calcolo di **componente assiale (V_{lim})** e **trasversale (H_{lim})**

Componente assiale V_{lim} (verticale e centrata)
Ipotesi: palo rigido, terreno rigido-plastico

$$V_{lim} = P_{lim} + S_{lim} = p_{lim} A_p + \int_{A_s} s_{lim} dA_s$$

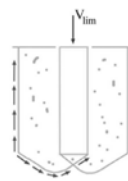
$$p_{lim} = N_q \sigma'_v + N_c c \quad , \quad s_{lim} = \mu k \sigma'_v \tan \phi_{pt} + c_{ps}$$

p, A_p = resistenza unitaria e area della punta
 s, A_s = resistenza unitaria e area laterale

$$\begin{array}{ll} N_q = f(\varphi) & N_c = (N_q - 1) \cot \varphi \\ u \leq \tan \varphi & k = f(\text{tecnologia}) \end{array}$$

Verifica secondo la Normativa attuale (DM 11.III.88)

$$\frac{V_{\text{lim}}}{V_{\text{CS}}} > \text{FS} = 2.5$$



RESISTENZA LATERALE

ARGILLE (SATURE)

$z=0$

$\tau = \tau_{\text{sat}}$
 $c_u = 0$
 $\phi_u = 0$

$\tau_{\text{sat}} = \gamma_{\text{sat}} \cdot z$
 $S_{\text{lat}} = \tau_{\text{sat}} \cdot D \cdot z = \gamma_{\text{sat}} \cdot D \cdot z^2 / 2$
 $S_{\text{tot}} = \tau_{\text{sat}} \cdot D \cdot z + Q = \gamma_{\text{sat}} \cdot D \cdot z^2 / 2 + Q$

SABIE

$\tau' = 0$
 $\phi' \neq 0$

$\tau' = 0$
 $\phi' \neq 0$

$\tau'_{\text{sat}} = \gamma_s \cdot z$
 $S_{\text{lat}} = \tau'_{\text{sat}} \cdot D \cdot z = \gamma_s \cdot D \cdot z^2 / 2$
 $S_{\text{tot}} = \tau'_{\text{sat}} \cdot D \cdot z + Q = \gamma_s \cdot D \cdot z^2 / 2 + Q$

ATTENZIONE

PRESENZA FALDA: $\gamma' = \gamma - w$

$\gamma =$ $w =$

$\gamma' =$ $c' = 0$

$t = \infty$
origine B.C. $c' = 0$

EFFETTI PRODOTTI DALLA INSTALLAZIONE DI UN PALO



Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

Capacità Portante di un Palo Singolo: Resistenza alla Punta

ARGILLE (SATURATE)
 $f = 0$
 $P_{lim} = A_p (s_u + c_u \cdot L + c_u \cdot L)$

SABBIE
 $P_{lim} = A_p \cdot q + L \cdot f_s$

ATTENZIONE
 PRESENZA FALDA: $\gamma = \gamma'$

$f = 0$
 argilla N.C.
 $c' = 0$
 $\gamma' = 0$

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

Pali in Gruppo: Carico Agente sul Singolo Palo

$$Q_i = \frac{V}{n} + V \cdot e_y \cdot \frac{y_i}{\sum y_i^2} + V \cdot e_x \cdot \frac{x_i}{\sum x_i^2}$$

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

Capacità Portante di un Gruppo di Pali

Effetto di gruppo

Il carico limite Q_{lim} di un gruppo di N pali differisce, in generale, dal prodotto del carico limite Q_{lim} del palo singolo per il numero N di pali del gruppo. Si pone:

$$Q_{Glim} = N \cdot E \cdot Q_{lim}$$

dove il fattore E è detto efficienza della palificata.

Per palificate in terreni incoerenti, l'esperienza (Vesic, 1968) ha mostrato che l'efficienza risulta non minore dell'unità; nel progetto, cautelativamente, si potrà assumere $E = 1$.

Per palificate in terreni coesivi, invece, l'efficienza risulta minore dell'unità e tipicamente pari a $0.6 + 0.7$. Per un gruppo costituito da m file di pali con n pali per ciascuna fila, si potrà adottare la formula empirica di Converse Labarre:

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

nella quale i rappresenta l'interasse fra i pali del gruppo.

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

FONDAZIONI SU PALI AZIONI E SITUAZIONI DI PROGETTO SECONDO L'EC7 (EN 1997-1:2003E)

Prove di Carico Statiche:

- Verticale
- Orizzontale

Schema di una prova di carico con trave di contrasto e pali di ancoraggio

Schema di una prova di carico con travata

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

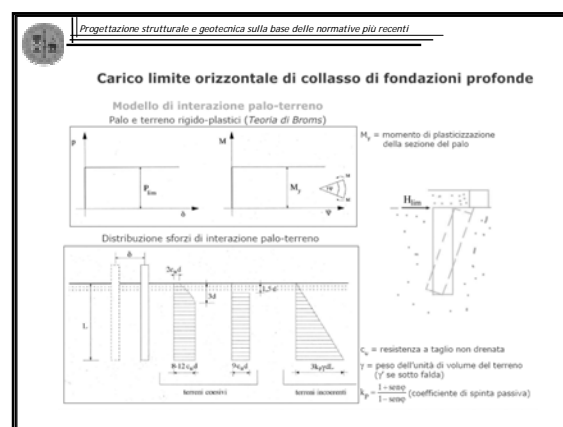
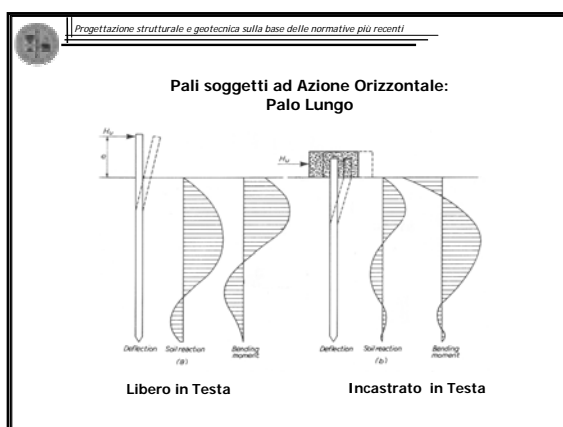
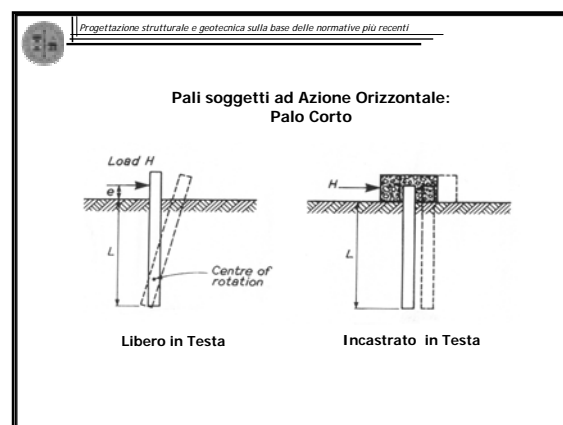
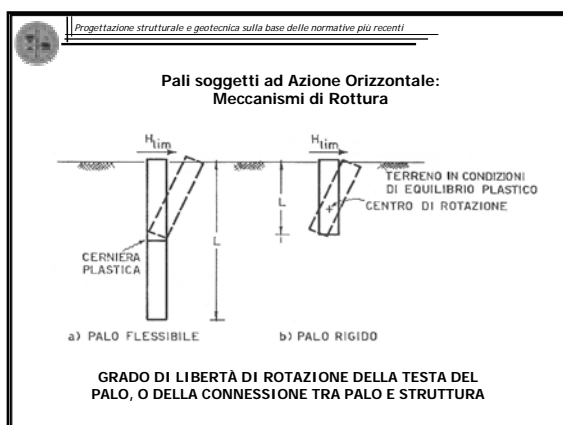
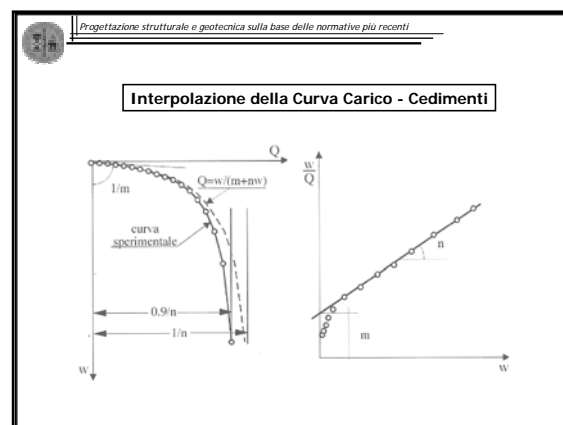
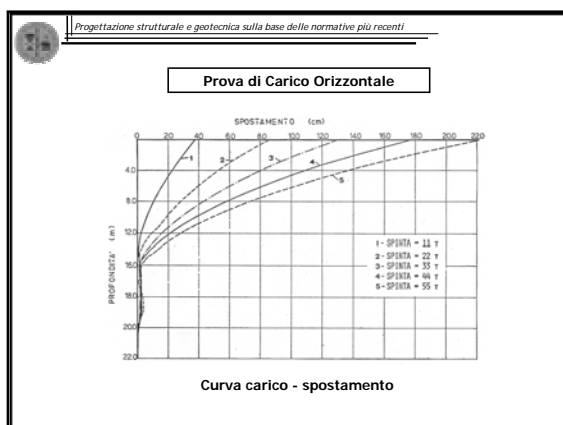
Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

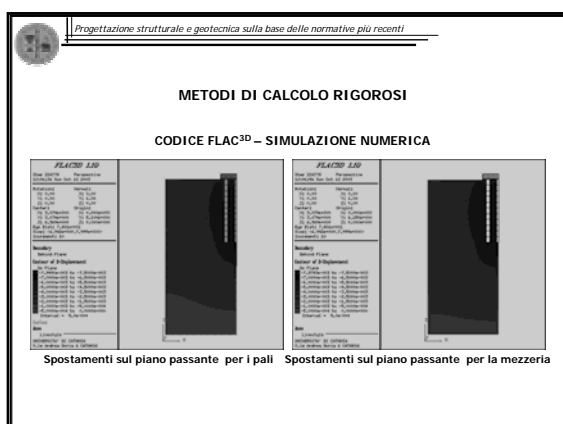
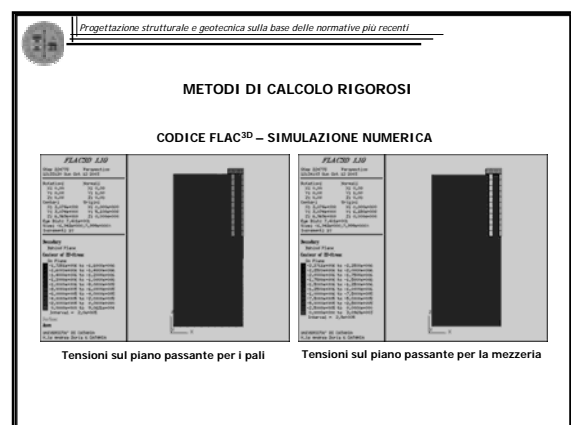
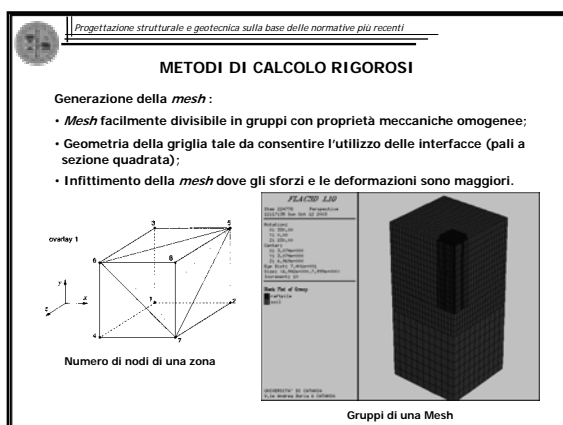
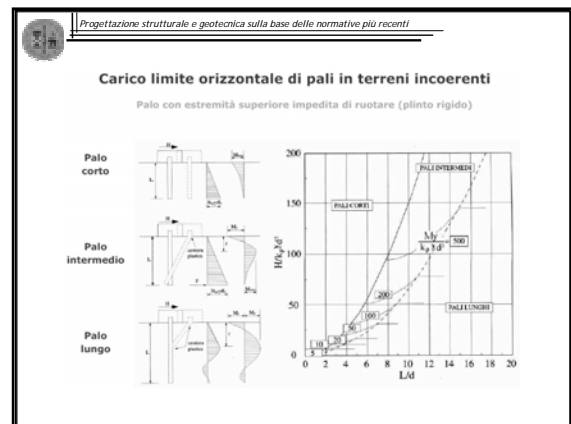
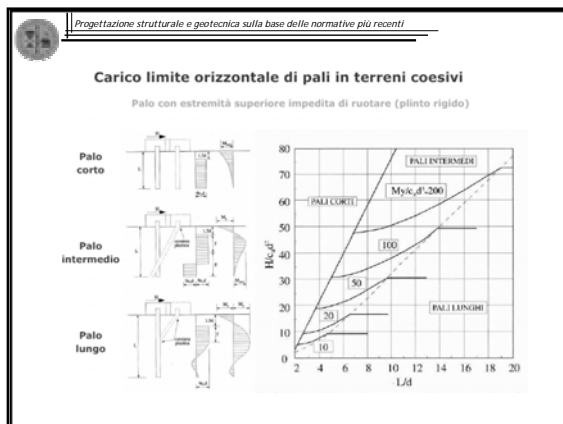
Prove di Carico su Pali Strumentati

a) PROVA DI CARICO

b) DISTRIBUZIONE DEL CARICO

Curva carico - cedimento





Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

CONSIDERAZIONI SULL'ANALISI NUMERICA TRIDIMENSIONALE

- Potenzialmente è il più rigoroso metodo di analisi delle piastre su pali
- Permette di tenere conto delle interazioni:
 - Palo - palo
 - Palo - piastra
 - Piastra - terreno
 - Terreno - palo
- Permette di stimare con affidabilità i cedimenti assoluti e differenziali e le sollecitazioni all'interno della piastra e dei pali
- Risulta oneroso in termini di tempi d'analisi (CPU_{time} = 36 ore).

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

METODI DI ANALISI DELLE FONDAZIONI SU PALI

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

"Metodo del Palo Equivalente"

(Poulos & Davis, 1980; Randolph, 1983; Horikoshi & Randolph, 1999)

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_g} = 2 \sqrt{\frac{A_g}{\pi}} = 1.13 \sqrt{A_g}$$

$$E_{eq} = E_s + (E_p - E_s) \frac{A_{tp}}{A_g}$$

$$A_g = \left[(\sqrt{n} - 1) s \right]^2$$

$$R = \sqrt{\frac{H_s}{L_n}}$$

$$R < 2$$

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

6.4.3 FONDAZIONI SU PALI

Il progetto di una fondazione su pali deve comprendere la scelta del tipo di palo e delle relative tecnologie e modalità di esecuzione, il dimensionamento dei pali e delle relative strutture di collegamento, tenendo conto degli effetti di gruppo tanto nelle verifiche SLU quanto nelle verifiche SLE.

In generale, le verifiche dovrebbero essere condotte a partire dai risultati di analisi di interazione tra il terreno e la fondazione costituita dai pali e dalla struttura di collegamento (fondazione mista a piastra su pali) che porti alla determinazione dell'aliquota dell'azione di progetto trasferita al terreno direttamente dalla struttura di collegamento e di quella trasmessa dai pali.

Le verifiche delle fondazioni su pali devono essere effettuate con riferimento almeno ai seguenti stati limite, quando pertinenti:

- SLU di tipo geotecnico (GEO)
 - collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi assiali;
 - collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi trasversali;
 - collasso per carico limite di sfilamento nei riguardi dei carichi assiali di trazione;
 - stabilità globale;
- SLU di tipo strutturale (STR)
 - raggiungimento della resistenza dei pali;
 - raggiungimento della resistenza della struttura di collegamento dei pali,

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Sicurezza e prestazioni \rightarrow STATO LIMITE ULTIMO

La verifica di stabilità globale deve essere effettuata secondo l'Approccio 1:

- Combinazione 2: (A2+M2-R2)

tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I e 6.2.II per le azioni e i parametri geotecnici e nella Tabella 6.8.I per le resistenze globali.

La rimanenti verifiche devono essere effettuate, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tab. 6.2.I, 6.2.II e 6.4.I, seguendo almeno uno dei due approcci:

Approccio 1:

- Combinazione 1: (A1+M1-R1)
- Combinazione 2: (A2+M2-R2)

Approccio 2:

(A1+M1-R3)

Tabella 6.4.II - Coefficienti parziali γ_s da applicare alle resistenze caratteristiche.

Resistenza	Simbolo	Pali infissi			Pali trivellati			Pali ad elica continua		
		(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)
Tasse	γ_s	1.0	1.45	1.15	1.0	1.45	1.15	1.0	1.45	1.15
Laterale in compressione	γ_s	1.0	1.45	1.15	1.0	1.45	1.15	1.0	1.45	1.15
Laterale in trazione	γ_s	1.0	1.45	1.15	1.0	1.45	1.15	1.0	1.45	1.15

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

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Sicurezza e prestazioni \rightarrow STATO LIMITE ULTIMO

La resistenza caratteristica R_k del palo singolo può essere dedotta da:

- risultati di prove di carico statico di progetto su pali pilota (§ 6.4.3.7.1);
- metodi di calcolo analitici, dove R_k è calcolata a partire dai valori caratteristici dei parametri geotecnici, oppure con l'impiego di relazioni empiriche che utilizzino direttamente i risultati di prove in sito (prove penetrometriche, pressiometriche, ecc.);
- risultati di prove dinamiche di progetto, ad alto livello di deformazione, eseguite su pali pilota (§ 6.4.3.7.1).

(a) Se il valore caratteristico della resistenza a compressione del palo, $R_{c,k}$, o a trazione, $R_{t,k}$, è dedotto dai corrispondenti valori $R_{c,m}$ o $R_{t,m}$ ottenuti elaborando i risultati di una o più prove di carico di progetto, il valore caratteristico della resistenza a compressione e a trazione è pari al minore dei valori ottenuti applicando i fattori di correlazione ξ riportati nella Tab. 6.4.III, in funzione del numero n di prove di carico su pali pilota:

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,m})_{medio}}{\xi_1}, \frac{(R_{c,m})_{min}}{\xi_2} \right\} \quad (6.2.8)$$

$$R_{t,k} = \min \left\{ \frac{(R_{t,m})_{medio}}{\xi_1}, \frac{(R_{t,m})_{min}}{\xi_2} \right\} \quad (6.2.9)$$

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Sicurezza e prestazioni \rightarrow STATO LIMITE ULTIMO

Tabella 6.4.III - Fattori di correlazione ξ per la determinazione della resistenza caratteristica a partire dai risultati di prove di carico statico su pali pilota.

Numero di prove di carico	1	2	3	4	≥ 5
ξ_1	1.40	1.30	1.20	1.10	1.0
ξ_2	1.40	1.20	1.05	1.00	1.0

6.4.3.1.2 Resistenze di pali soggetti a carichi trasversali

Per la determinazione del valore di progetto R_{ed} della resistenza di pali soggetti a carichi trasversali valgono le indicazioni del § 6.4.3.1.1, applicando i coefficienti parziali γ_T della Tab. 6.4.VI.

Tabella 6.4.VI - Coefficienti parziali γ_T per le verifiche agli stati limite ultimi di pali soggetti a carichi trasversali.

COEFFICIENTE PARZIALE (R1)	COEFFICIENTE PARZIALE (R2)	COEFFICIENTE PARZIALE (R3)
$\gamma_T = 1.0$	$\gamma_T = 1.6$	$\gamma_T = 1.3$

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Sicurezza e prestazioni \Rightarrow STATO LIMITE ESERCIZIO

6.4.3.2 Verifiche agli stati limite di esercizio (SLE)

Devono essere presi in considerazione almeno i seguenti stati limite di servizio, quando pertinenti:

- eccessivi cedimenti o sollevamenti;
- eccessivi spostamenti trasversali.

Specificamente, si devono calcolare i valori degli spostamenti e delle distorsioni per verificarne la compatibilità con i requisiti prestazionali della struttura in elevazione (§§ 2.2.2 e 2.6.2), nel rispetto della condizione (6.2.7). La geometria della fondazione (numero, lunghezza, diametro e interasse dei pali) deve essere stabilita nel rispetto dei summenzionati requisiti prestazionali, tenendo opportunamente conto degli effetti di interazione tra i pali e considerando i diversi meccanismi di mobilitazione della resistenza laterale rispetto alla resistenza alla base, soprattutto in presenza di pali di grande diametro.

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

PALI SOGGETTI A CARICO VERTICALE: MODELLAZIONE DEL COMPORTAMENTO

Metodo delle "Funzioni di Trasferimento"

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

MODELLAZIONE COMPORTAMENTO PALI

$q(x) = \frac{w(x)}{\frac{1}{k_{in}} + \frac{w(x)}{q_{lim}}}$

$q_{lim} = \frac{G_o}{R_o \ln(R_o/R_p)}$ [FL-1] $K_s = K_{st} (1 - \eta_s)$

$K_{st} = \frac{4G_o}{\pi R_o (1 - \nu)}$ [FL-2] $K_b = K_{st} (1 - \eta_b)$

$\eta_b = Q_b / Q_{ultim}$

$\eta_s = Q_s / Q_{ultim}$

CASTELLI F., MAUGERI M., MOTTA E. (1992): "Analisi non lineare del cedimento di un palo singolo". *Rivista Italiana di Geotecnica*, vol.26, n.2, pp.115-135.

CASTELLI F., MOTTA E. (2003): "Settlement prevision of piles under vertical load". *Journal of Geotechnical Engineering*, Proceedings of the ICE, London, Issue GE4, pp.183-191.

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

PALI SOGGETTI AD AZIONE ORIZZONTALE: MODELLAZIONE DEL COMPORTAMENTO

Behavior of laterally loaded pile subgrade reaction approach: (a) Beam on elastic foundation, (b) Winkler's idealization, (c) laterally loaded pile in soil, (d) laterally loaded pile on springs.

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

MODELLAZIONE NUMERICA PROVA DI CARICO ORIZZONTALE

Metodo delle curve "p-y"

CASTELLI F., MAUGERI M., MOTTA E. (1995): "Analisi non lineare dello spostamento di un palo soggetto a forze orizzontali". *Rivista Italiana di Geotecnica*, vol.29, n.4, pp.289-303.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

CONTROLLI D'INTEGRITA'

6.4.3.6 Controlli d'integrità dei pali

In tutti i casi in cui la qualità dei pali dipenda in misura significativa dai procedimenti esecutivi e dalle caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione, devono essere effettuati controlli di integrità.

Il controllo dell'integrità, da effettuarsi con prove dirette o indirette di comprovata validità, deve interessare almeno il 5% dei pali della fondazione con un minimo di 2 pali.

Nel caso di gruppi di pali di grande diametro ($d \geq 80$ cm), il controllo dell'integrità deve essere effettuato su tutti i pali di ciascun gruppo se i pali del gruppo sono in numero inferiore o uguale a 4.

6.4.3.7.1 Prove di progetto su pali pilota

Le prove per la determinazione della resistenza del singolo palo (prove di progetto) devono essere eseguite su pali appositamente realizzati (pali pilota) identici, per geometria e tecnologia esecutiva, a quelli da realizzare e ad essi sufficientemente vicini.

L'intervallo di tempo intercorrente tra la costruzione del palo pilota e l'inizio della prova di carico deve essere sufficiente a garantire che il materiale di cui è costituito il palo sviluppi la resistenza richiesta e che le pressioni interstiziali nel terreno si riportino ai valori iniziali.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

6.4.3.7.2 Prove di verifica in corso d'opera

Sui pali di fondazione devono essere eseguite prove di carico statiche di verifica per controllare principalmente la corretta esecuzione e il comportamento sotto le azioni di progetto. Tali prove devono pertanto essere spinte ad un carico assiale pari a 1.5 volte l'azione di progetto utilizzata per le verifiche SLE.

In presenza di pali strumentati per il rilievo separato delle curve di mobilitazione delle resistenze lungo la superficie e alla base, il massimo carico assiale di prova può essere posto pari a 1.2 volte l'azione di progetto utilizzata per le verifiche SLE.

Il numero e l'ubicazione delle prove di verifica devono essere stabiliti in base all'importanza dell'opera e al grado di omogeneità del terreno di fondazione; in ogni caso il numero di prove non deve essere inferiore a:

- 1 se il numero di pali è inferiore o uguale a 20,
- 2 se il numero di pali è compreso tra 21 e 50,
- 3 se il numero di pali è compreso tra 51 e 100,
- 4 se il numero di pali è compreso tra 101 e 200,
- 5 se il numero di pali è compreso tra 201 e 500,
- il numero intero più prossimo al valore $5 + n/500$, se il numero n di pali è superiore a 500.

Il numero di prove di carico di verifica può essere ridotto se sono eseguite prove di carico dinamiche, da tarare con quelle statiche di progetto, e siano effettuati controlli non distruttivi su almeno il 50% dei pali.

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

Progetto convenzionale

L'approccio tradizionale è basato sul calcolo a rottura.
Il carico viene affidato integralmente ai pali preoccupandosi che FS sia sufficiente
Questo procedimento equivale a ignorare completamente il contributo della piastra

↓

I cedimenti delle fondazioni su pali risultano inutilmente ridotti

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

Progetto innovativo

Nel calcolo del carico limite della fondazione su pali viene considerato il contributo della piastra

In quali casi è necessario ricorrere all'aggiunta di pali alla fondazione diretta?

1. FS della piastra sufficiente → Affidando ai pali la sola funzione di controllo e regolazione dei cedimenti è possibile adottare soluzioni di progetto molto meno onerose delle configurazioni dettate dall'approccio tradizionale
2. Se i pali servono a evitare una rottura per carico limite è possibile limitarne il numero in modo molto significativo portando in conto il contributo della piastra

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

CONDIZIONI DI UTILIZZO E VANTAGGI DELLE PIASTRE SU PALI

Il progetto della piastra su pali con l'approccio innovativo dei "Pali come riduttori dei cedimenti" comparato con l'approccio "convenzionale" comporta:

- ✓ Una significativa riduzione del numero di pali;
- ✓ Incrementa la funzionalità della fondazione superficiale riducendone i valori massimi dei cedimenti differenziali e totali;
- ✓ Posizionando opportunamente i pali è possibile ridurre sensibilmente le sollecitazioni interne alla piastra;
- ✓ Nel caso di carichi eccentrici, è possibile concentrare la resistenza in corrispondenza del punto di applicazione della forza ponendovi i pali direttamente al disotto;
- ✓ Incrementa la capacità portante della fondazione grazie alla suddivisione del carico tra pali e piastra.

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

• FS della piastra non accettabile

I pali servono a evitare una rottura per carico limite

"Qual è il numero minimo di pali che occorre aggiungere alla piastra in modo che FS sia sufficiente e i cedimenti siano accettabili?"

• FS della piastra sufficiente

I pali servono a limitare i cedimenti

"Qual è il numero minimo di pali che occorre aggiungere alla piastra in modo che i cedimenti siano accettabili?"

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

Russo e Viggiani (1998)

Piastre su pali "Piccole"

- FS della piastra non accettabile
- $5 \text{ m} \leq B \leq 15 \text{ m}$
- $B/L < 1$
- Piastra rigida

Piastre di piccole dimensioni su terreni coesivi poco consistenti

Piastre su pali "Grandi"

- FS della piastra sufficiente
- $B > 15 \text{ m}$
- $B/L > 1$
- Piastra relat. flessibile

Piastre grandi su terreni a grana grossa

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

Esame della letteratura

"GRUPPI di PALI" (Kedzi, 1957)

$$Q_{G,ult} = \eta \cdot n \cdot Q_{s,ult}$$

$Q_{s,ult}$ = Carico ultimo del palo singolo

n = numero di pali

η = efficienza del gruppo

"PIASTRE SU PALI" (Liu et al., 1994; Borel, 2001)

$$Q_{PR,ult} = \alpha_{UR} \cdot Q_{UR,ult} + \alpha_G \cdot (\eta \cdot n \cdot Q_{s,ult})$$

α_{UR}, α_G = coefficienti di efficienza o coefficienti di carico limite della piastra e del gruppo

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

Piastre su pali in vera grandezza e modelli in scala ridotta

Test	Reference	L/d	n	α_{UR}	α_G	η
1g - model	Coker (1966)	48	3	49	22	1.29
	Coker (1966)	48	3	25	16	1.44
	Coker (1966)	48	3	9	10	1.51
	Coker (1966)	24	3	49	22	1.54
	Coker (1966)	24	3	25	16	1.55
	Coker (1966)	24	3	9	10	1.84
	Coker (1966)	48	4	49	28	1.62
	Coker (1966)	48	4	25	20	1.89
	Coker (1966)	48	4	9	12	1.71
	Coker (1966)	24	4	25	20	2.10
Centrifuge	Coker et al. (2003)	28.6	4	9	14.3	2.20
	Coker et al. (2003)	16.7	4	49	28.6	2.43
	Coker et al. (2003)	28.6	4	9	28.6	9.57
	Coker et al. (2003)	14.3	4	49	28.6	3.74
	Coker et al. (2003)	28.6	4	49	28.6	2.43
	Borel et al. (1972)	40	5	4	7	1.19
	Borel et al. (1972)	40	4	4	6	1.06
	Borel et al. (1972)	40	3	4	5	1.13
	Borel et al. (1972)	40	2.5	4	4.5	1.06
	Lee et al. (1994)	45	4	16	15	1.07
Full scale	Sales (2000)	33.3	5	4	6.7	1.33
	Borel (2001)	27.1	5	4	4.4	1.96

$$\xi_{PR} = \frac{Q_{PR,ult}}{Q_{UR,ult} + Q_{G,ult}} \quad \zeta_{PR} = \frac{Q_{PR,ult}}{Q_{G,ult}} \quad \zeta_{PR} > 1$$

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

STUDIO PARAMETRICO

FATTORI INFLUENTI SUL MECCANISMO DI TRASFERIMENTO DEI CARICHI

- ✓ MODULO DI ELASTICITÀ DEL TERRENO
- ✓ SPESSORE PIASTRA
- ✓ INTERASSE TRA I PALI
- ✓ SNELLEZZA DEI PALI
- ✓ DISPOSIZIONE DEI PALI

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

AZIONI INERZIALI

Sono queste, cioè le azioni trasmesse dalla sovrastruttura alla palificata

Il calcolo della palificata per l'insieme delle azioni verticali e orizzontali va fatto con i classici metodi ingegneristici (ormai diffusi)

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

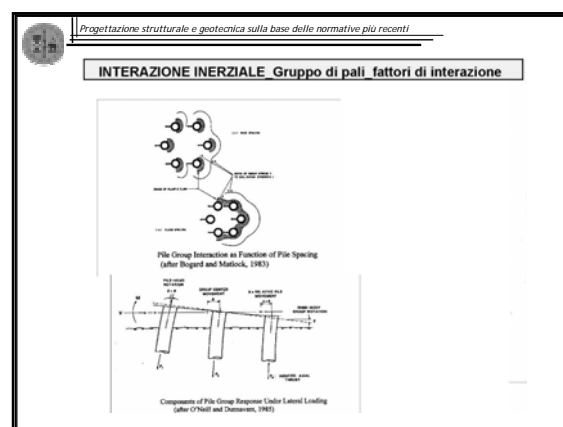
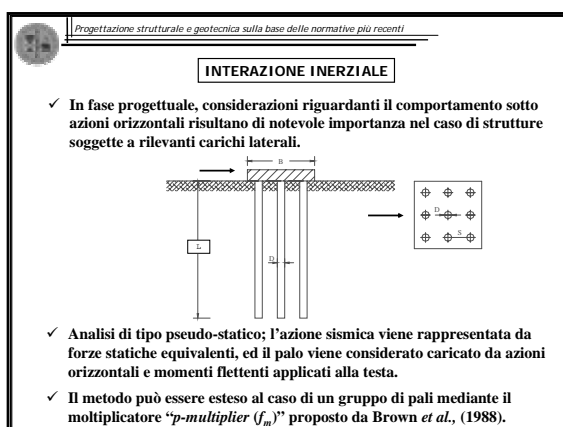
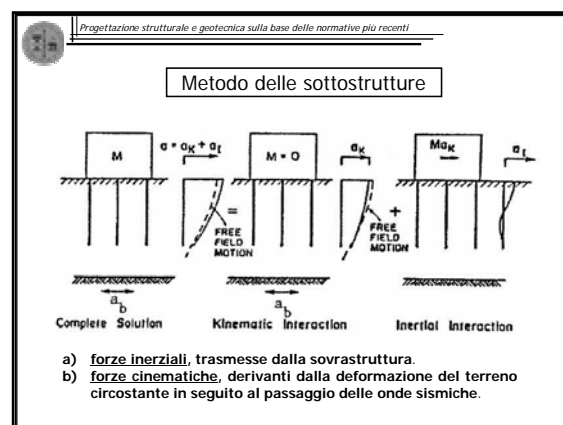
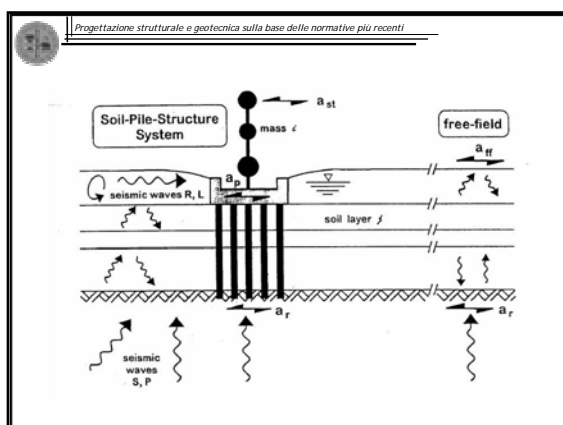
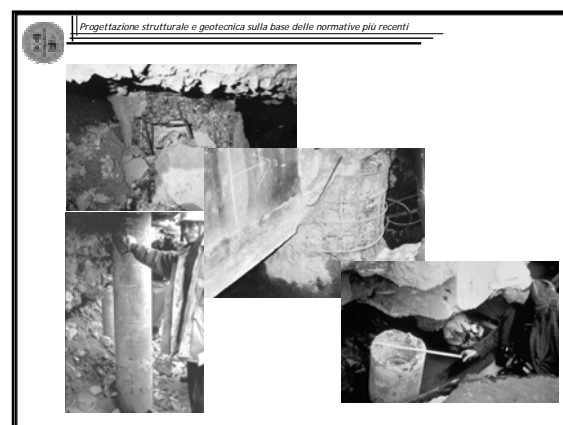
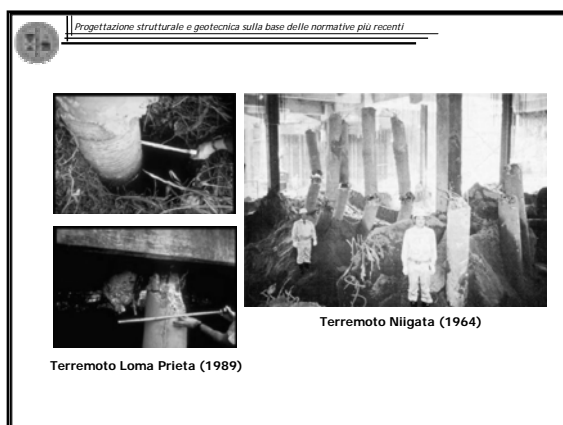
AZIONI CINEMATICHE

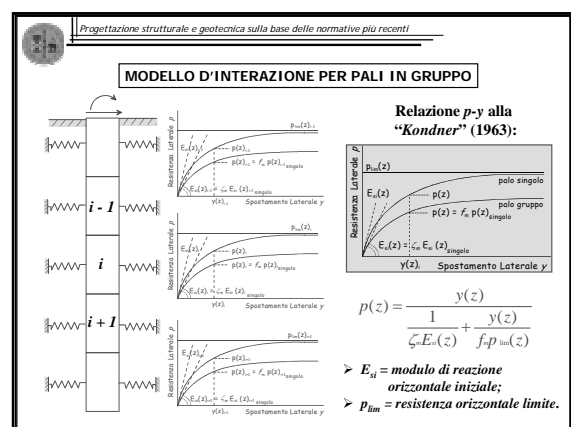
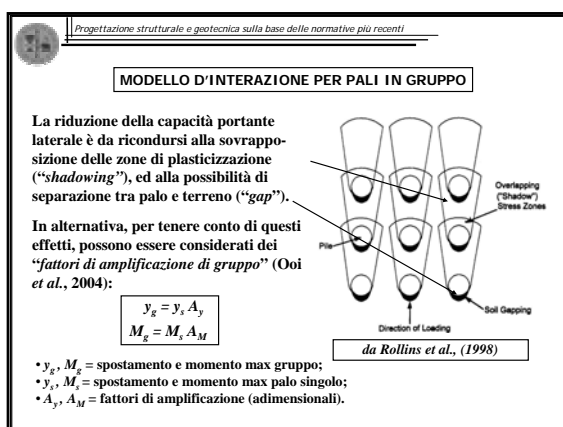
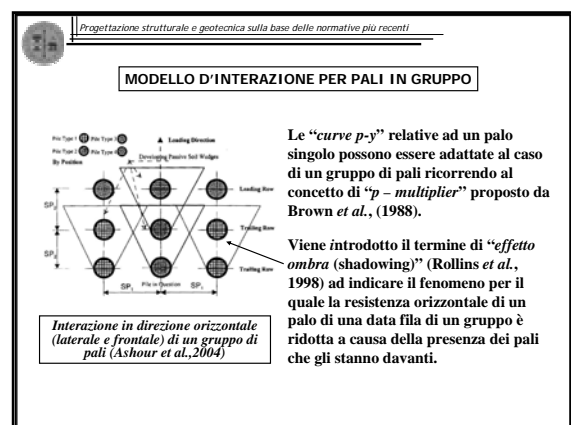
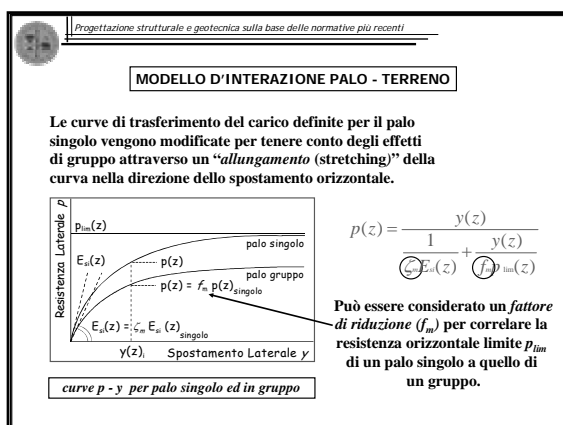
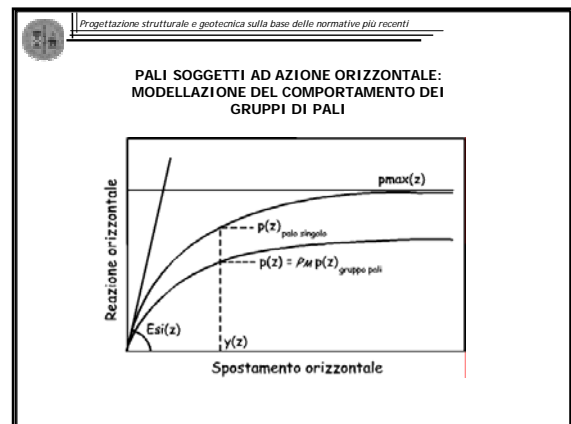
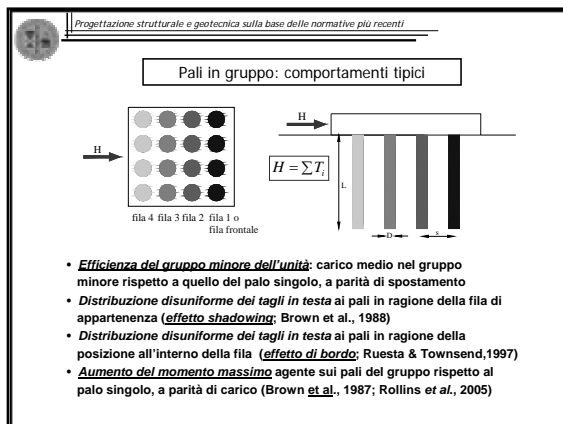
Azioni cinematiche

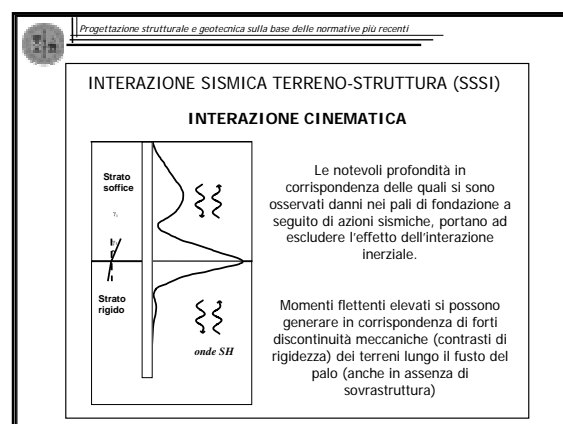
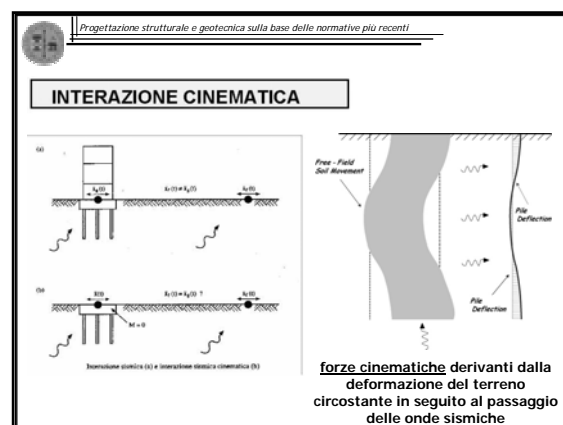
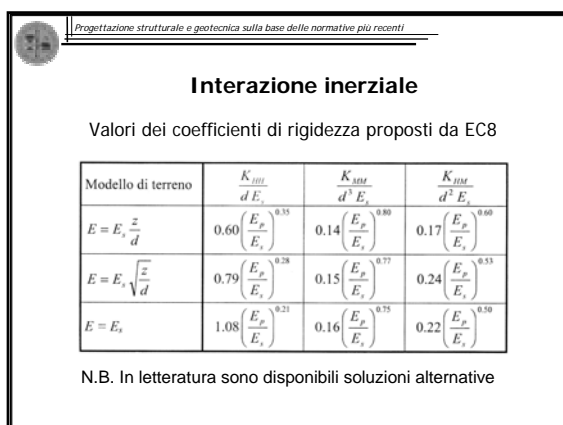
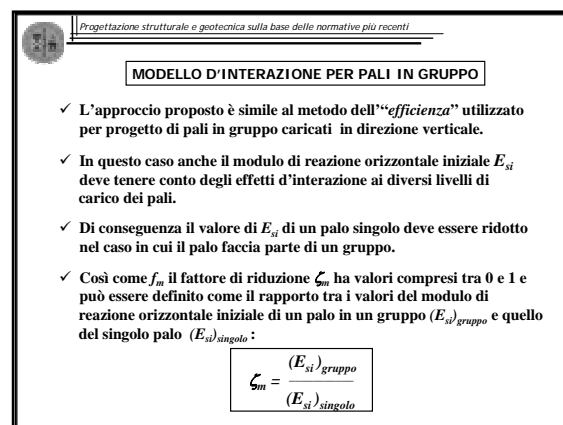
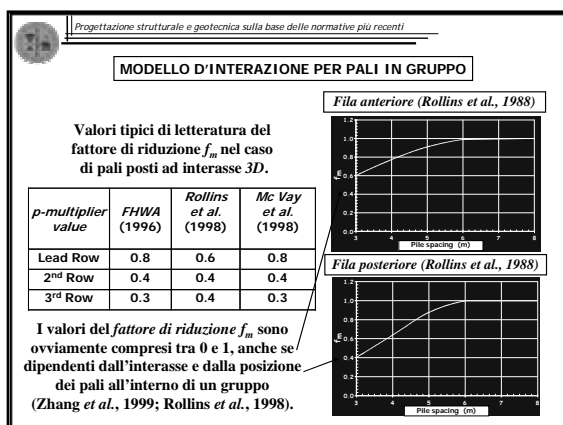
Azioni inerziali

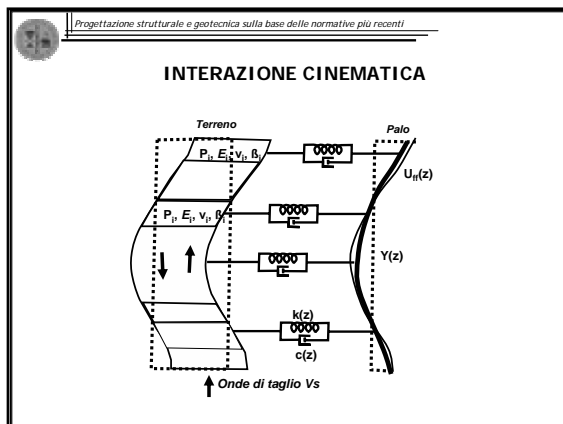
Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

Possibili modi di collasso di fondazioni su pali soggette ad azione sismica









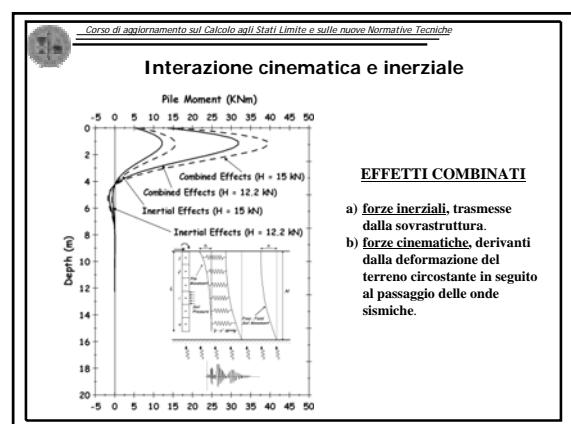
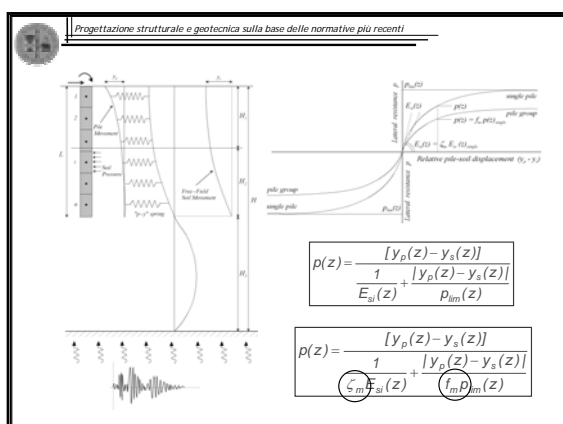
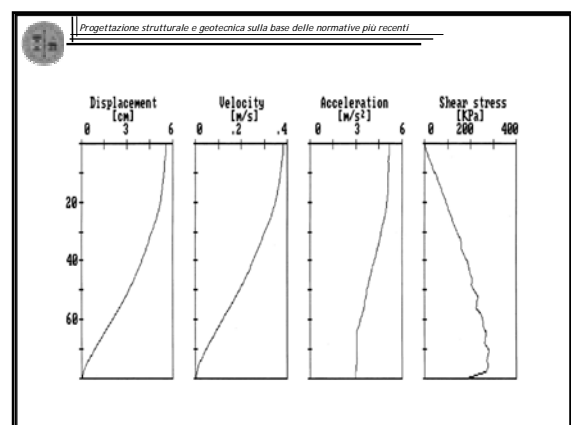
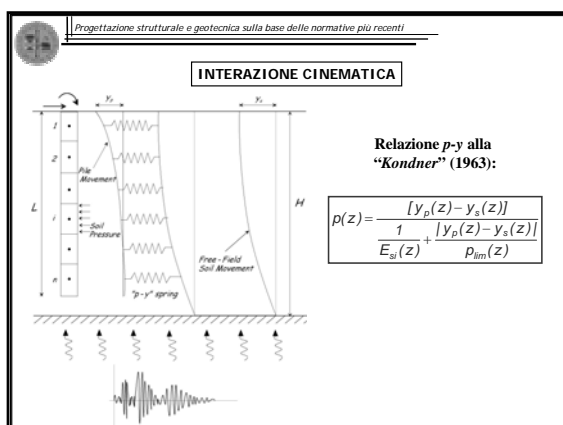
Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

Interazione cinematica

Norme NEHRP (1997)

$$M(z, t) = E_p I_p \frac{a(z, t)}{V_s^2}$$

Valida per sottosuolo omogeneo



Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

MODELLAZIONE DEL COMPORTAMENTO DEI GRUPPI DI PALI

EFFETTI DI INTERAZIONE

IN CAMPO STATICO È NOTO CHE L'EFFETTO DELL'INTERAZIONE TRA I PALI È QUELLO DI RIDURRE LA CAPACITÀ PORTANTE DEL GRUPPO ED INCREMENTARE I CEDIMENTI RISPETTO AL CASO DEL PALO SINGOLO.

IN CAMPO DINAMICO GLI EFFETTI DI INTERAZIONE DIFFERISCONO DAL CASO STATICO. INFATTI L'INTERAZIONE TRA I PALI PUÒ MODIFICARE SENSIBILMENTE LA RIGIDEZZA E LO SMORZAMENTO NEL GRUPPO.

Rapporto di Efficienza del Gruppo (GER)

$$GER = \frac{k_{gruppo}}{\sum k_i}$$

ANALOGAMENTE SI PUÒ DEFINIRE PER LO SMORZAMENTO.

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

MODELLAZIONE DEL COMPORTAMENTO DEI GRUPPI DI PALI

EFFETTI DI INTERAZIONE

IN CAMPO DINAMICO È POSSIBILE INTRODURRE UN FATTORE DI **INTERAZIONE DINAMICA** (Kaynia & Kausel, 1982). NEL CASO DI DUE PALI ESSO È PARI A:

Spostamento dinamico palo 2

Spostamento statico palo 1

Figure 6.19 Interaction curves for horizontal and vertical displacement of pile 2 due to horizontal and vertical force on pile 1 (after Kaynia & Kausel 1982).