



**ORDINE DEGLI INGEGNERI  
DELLA PROVINCIA DI CATANIA**  
Commissione Strutture e Geotecnica



**CORSO DI AGGIORNAMENTO SUL CALCOLO  
AGLI STATI LIMITE E SULLA NORMATIVA SISMICA  
(O.P.C.M. n° 3274/2003 e  
successive modifiche ed integrazioni)**

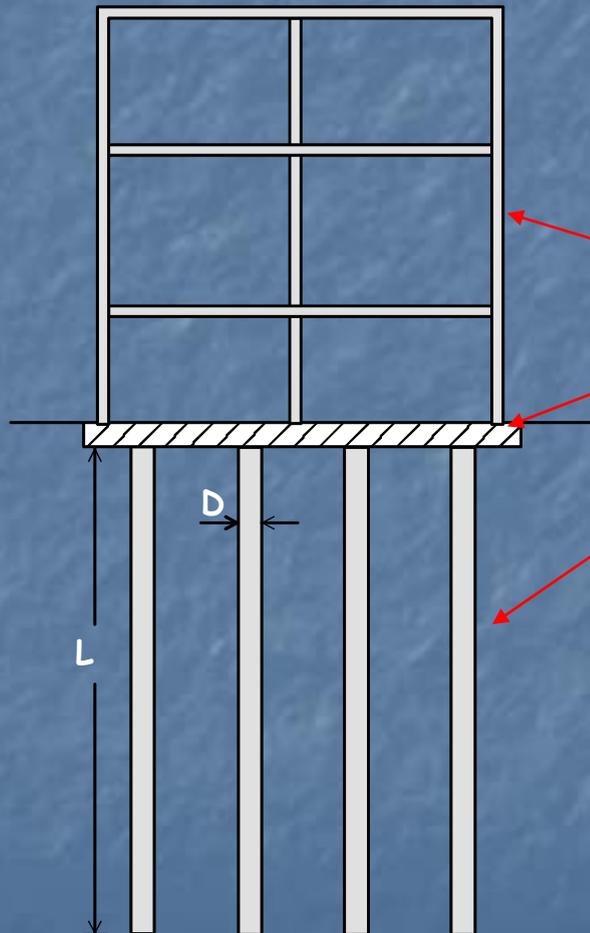
**Modulo 13 – Terreno e Fondazioni:**

**Fondazioni su Pali**

**F. Castelli – M. Maugeri**

**Catania, 4 Maggio 2004**  
President Park Hotel - ACICASTELLO

## INTERAZIONE SOVRASTRUTTURA – FONDAZIONE - TERRENO



### FONDAZIONI SU PALI

#### INTERAZIONE :

1. SOVRASTRUTTURA
2. ELEMENTO DI COLLEGAMENTO
3. PALI (Ulteriori Fenomeni di Interazione)
4. TERRENO

INTERAZIONE LIMITATA A  
ELEMENTO DI COLLEGAMENTO  
PALI - TERRENO

## **ASPETTI GENERALI DELL' ANALISI E DEL PROGETTO DELLE FONDAZIONI SU PALI (O.P.C.M. n° 3274/2003)**

### **PUNTO 3**

#### **3.1 Regole Generali di Progettazione**

Di norma deve essere adottato un unico tipo di fondazione, a meno che essa non consista di unità indipendenti dal punto di vista dinamico. Deve essere evitato l'uso contestuale di pali e di fondazioni dirette nello stesso edificio.

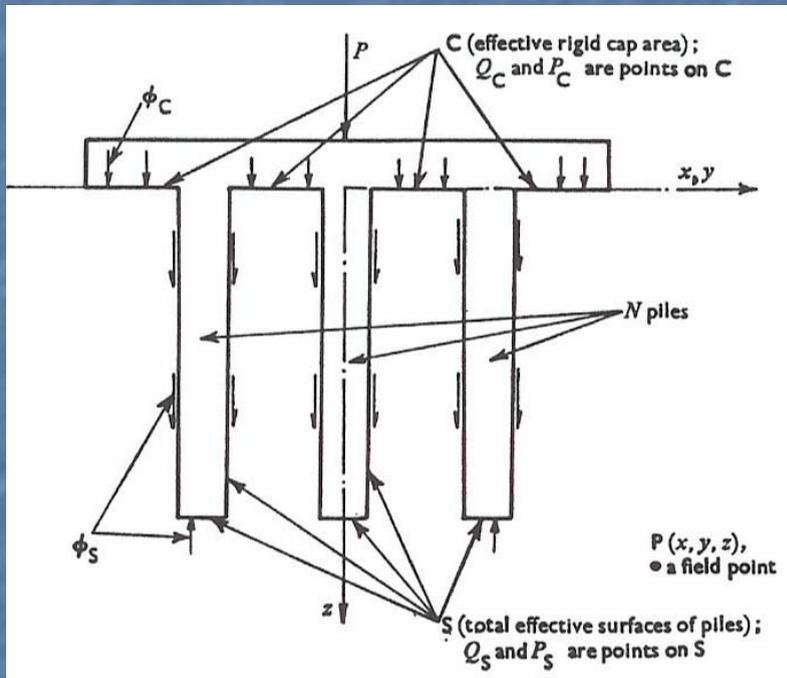
### **PUNTO 3.3 Verifiche e Criteri di Dimensionamento**

#### **3.3.1 Pali e Pozzi di Fondazione**

### **METODI DI ANALISI DELLE FONDAZIONI SU PALI**

- 1. METODI DI CALCOLO RIGOROSI**
- 2. METODI DI CALCOLO APPROSSIMATI**
- 3. METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI**

## METODI DI ANALISI DELLE FONDAZIONI SU PALI



*Aspetti Generali*  
(Butterfield & Banerjee, 1971)

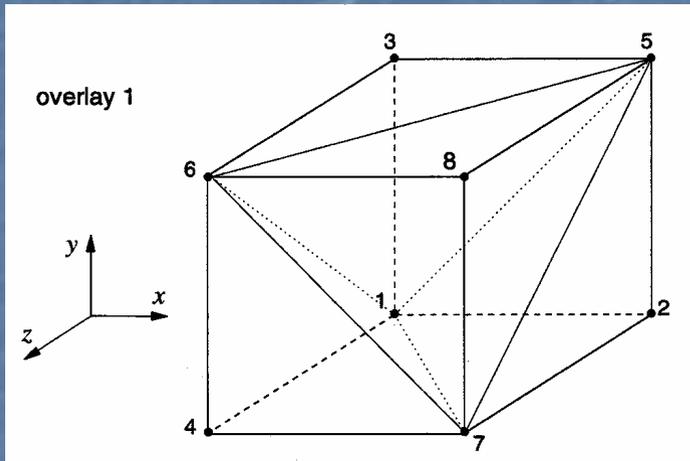
### METODI DI CALCOLO RIGOROSI

- "*(BEM) Boundary Element Methods*" (Butterfield & Banerjee, 1971; Kuwabara, 1989; Mendoca & Paiva, 2000).
- "*Hybrid Method*" (Hain & Lee, 1978; Franke et al., 1994; Russo, 1996; Ta & Small, 1996; Russo & Viggiani, 1998).
- "*Simplified 2<sup>D</sup> Finite Element and Differential Methods*" (Mohamedzein et al., 1999; Horikoshi & Randolph, 1999; Prakoso & Kulhawy, 2001).
- "*(FDM) 3<sup>D</sup> Finite Differential Methods*" (Poulos, 2001).
- "*3<sup>D</sup>-dimensional FEM*" (Ottaviani, 1975; Chow & Teh, 1991; Katzenbach et al., 2000; De Sanctis, 2001).

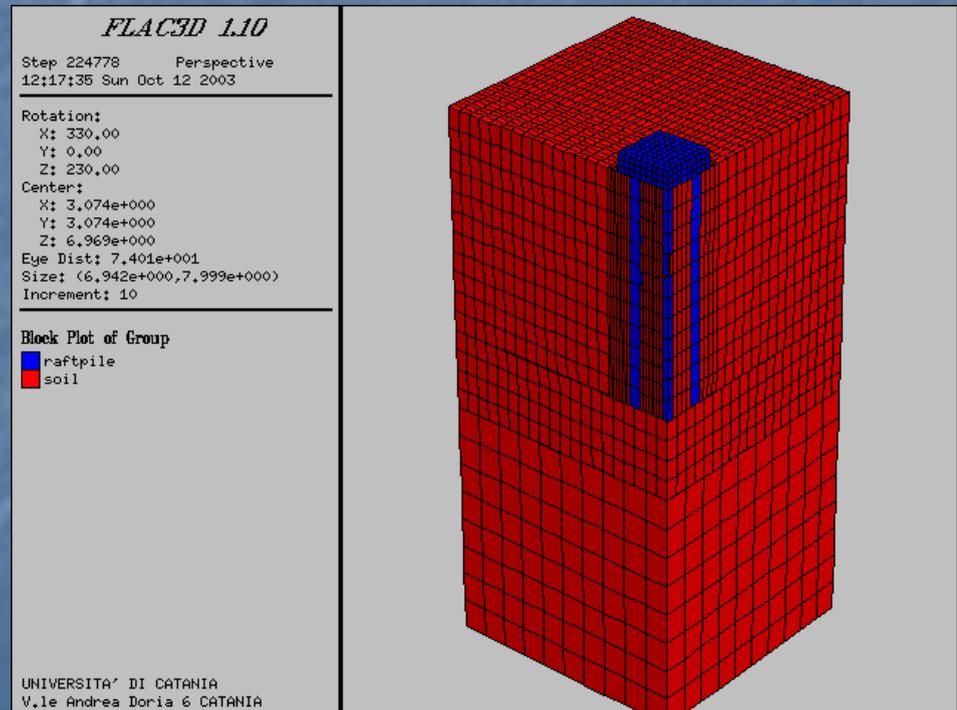
## CODICE FLAC<sup>3D</sup> – GENERAZIONE DELLA GRIGLIA

### Generazione della griglia:

- Mesh facilmente divisibile in gruppi con proprietà meccaniche omogenee;
- Geometria della griglia tale da consentire l'utilizzo delle interfacce (pali a sezione quadrata);
- Infittimento della mesh dove gli sforzi e le deformazioni sono maggiori.

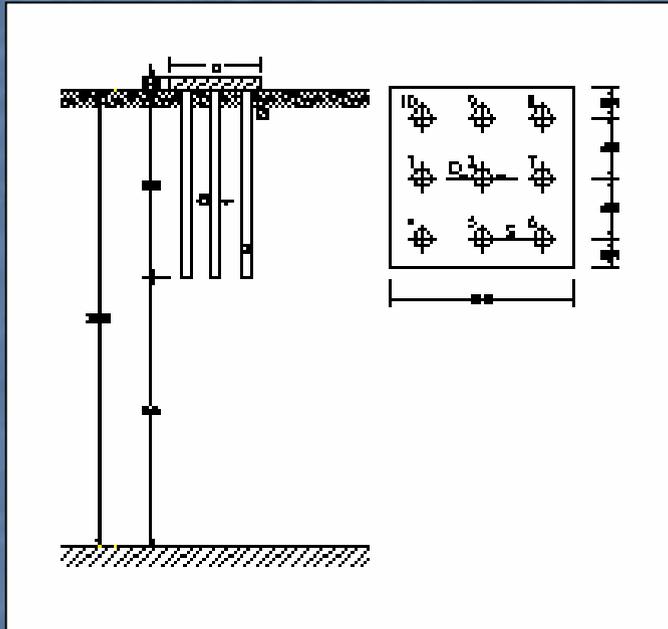


Numero di nodi di una zona

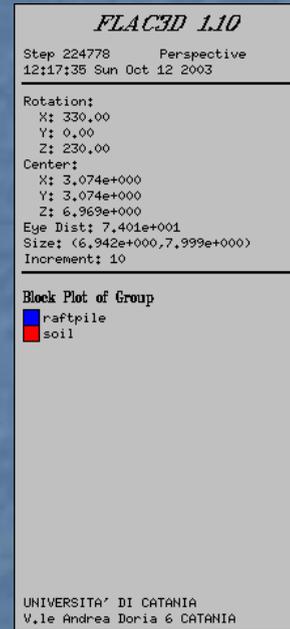


Gruppi di una Mesh

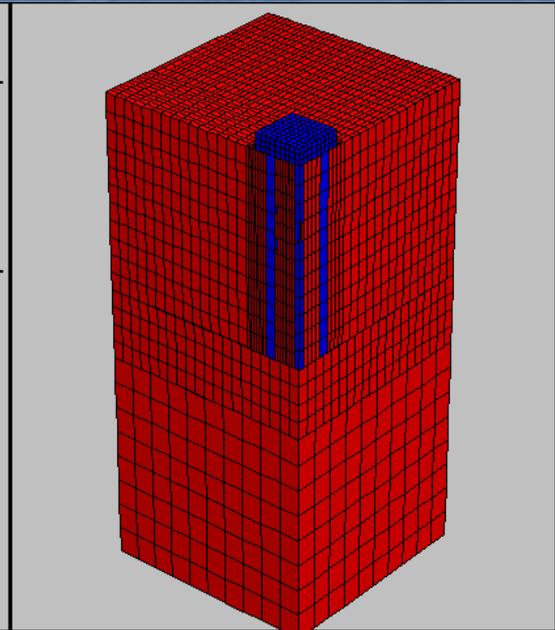
## CODICE FLAC<sup>3D</sup> – SIMULAZIONE NUMERICA (Koizumi & Ito,1967)



Prova Sperimentale  
(Koizumi & Ito, 1967)



Discretizzazione in mesh



## FLAC<sup>3D</sup> - MODELLAZIONE NUMERICA (Koizumi & Ito, 1967)

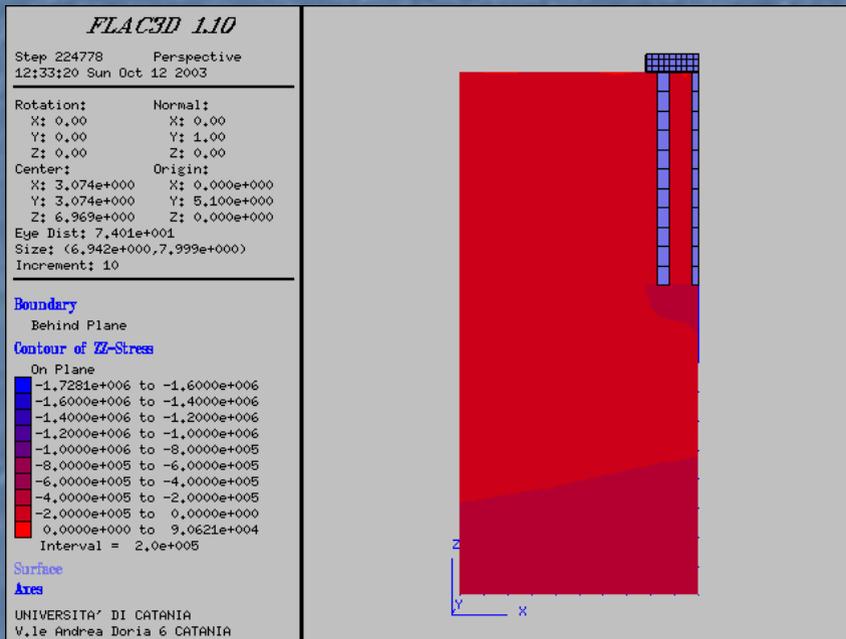
### GEOMETRIA

ELEMENTI	NODI	ZONE	DIMENS. MESH [m]	ALTEZZA MESH [m]	LATO PALO [m]
68735	54992	13747	3.75	13.5	0.30

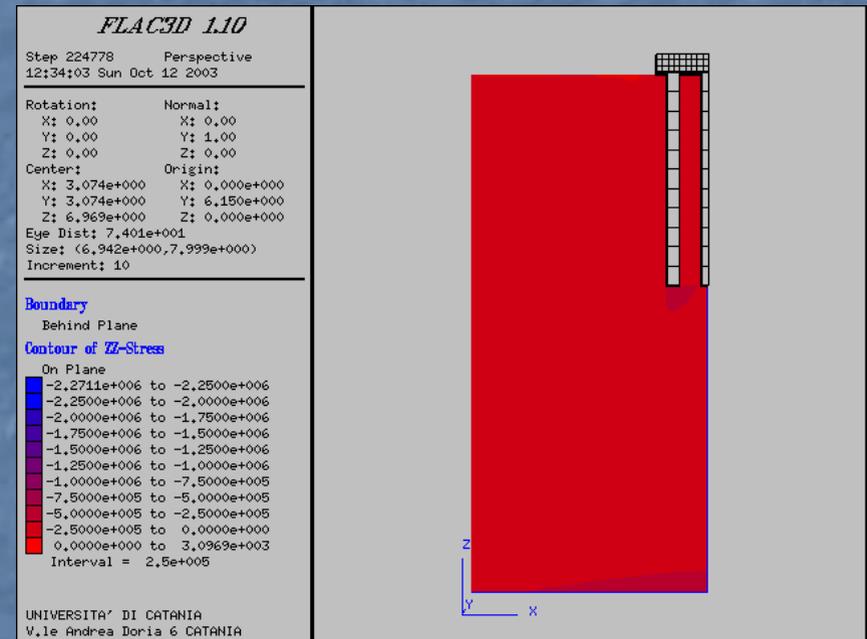
### PROPRIETA' MECCANICHE GRUPPI

GRUPPO	MODELLO	MODULO ELASTICITA' TANGENZ. [N/m <sup>2</sup> ]	MODULO COMPRES. VOL. [KN/m <sup>2</sup> ]	COESIONE [KN/m <sup>2</sup> ]	ANGOLO DI RESISTENZA A TAGLIO [°]	DENSITA' [Kg/m <sup>3</sup> ]
PALO	Elastico	1.35x10 <sup>10</sup>	1.35x10 <sup>10</sup>	-	-	2500
PIASTRA TERRENO	Mohr Coulomb	da 2x10 <sup>9</sup> a 5x10 <sup>9</sup>	da 4x10 <sup>6</sup> a 10x10 <sup>6</sup>	da 25 a 62	25	1570

## RISULTATI NUMERICI CON FLAC<sup>3D</sup> (KOIZUMI & ITO, 1967)

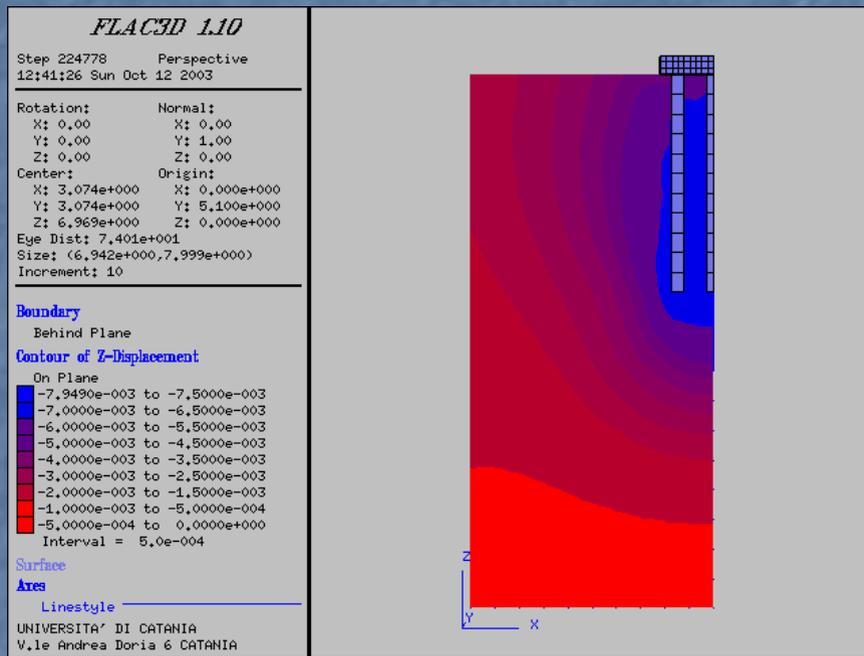


Tensioni sul piano passante per i pali

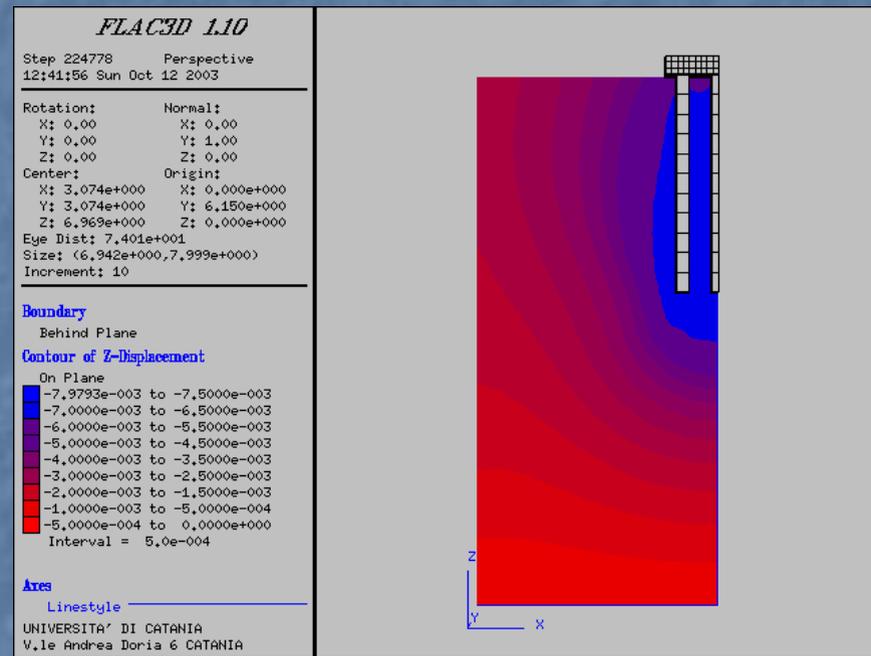


Tensioni sul piano passante per la mezzeria

## RISULTATI NUMERICI CON FLAC<sup>3D</sup> (KOIZUMI & ITO, 1967)

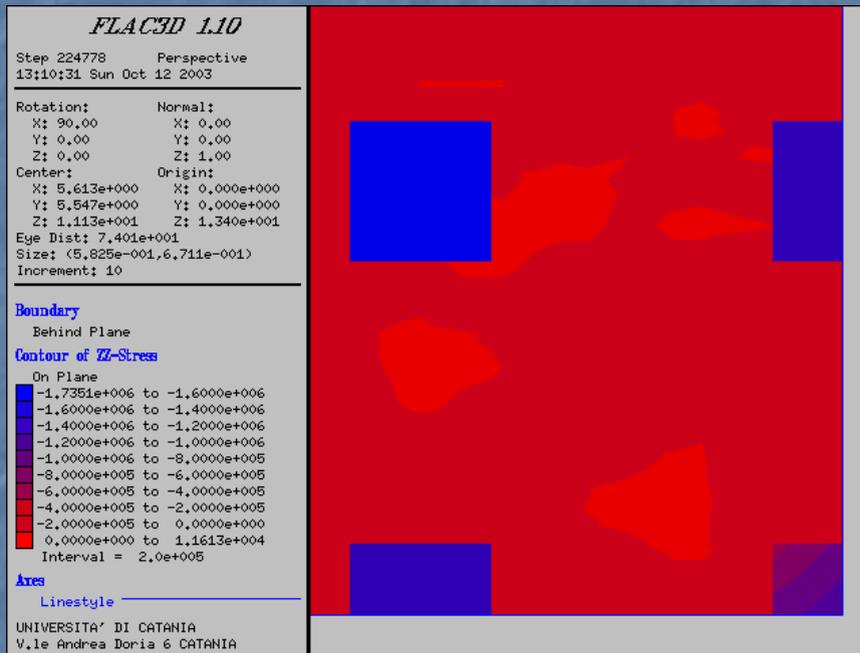


Spostamenti sul piano passante per i pali

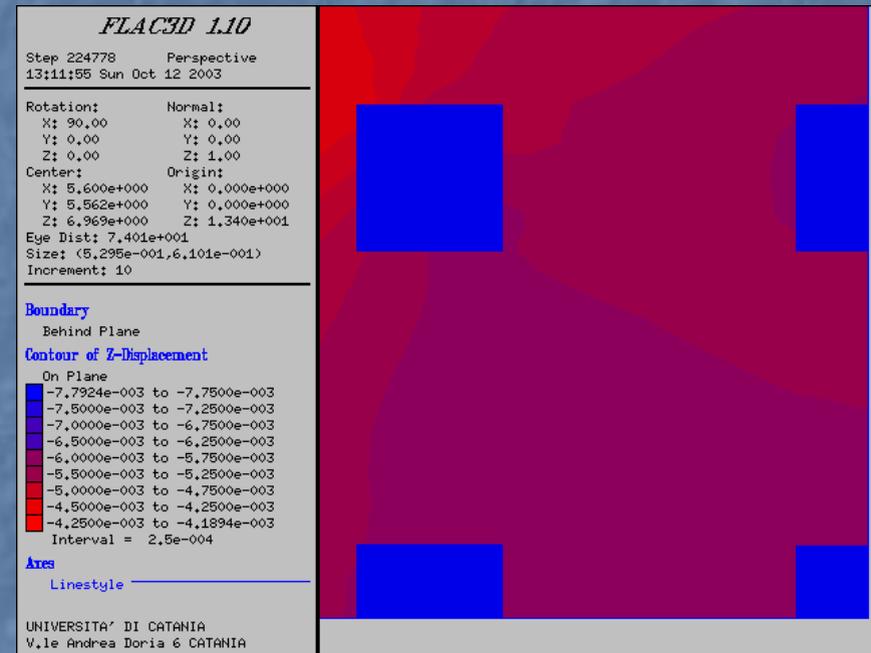


Spostamenti sul piano passante per la mezzeria

## RISULTATI NUMERICI CON FLAC<sup>3D</sup> (KOIZUMI & ITO, 1967)

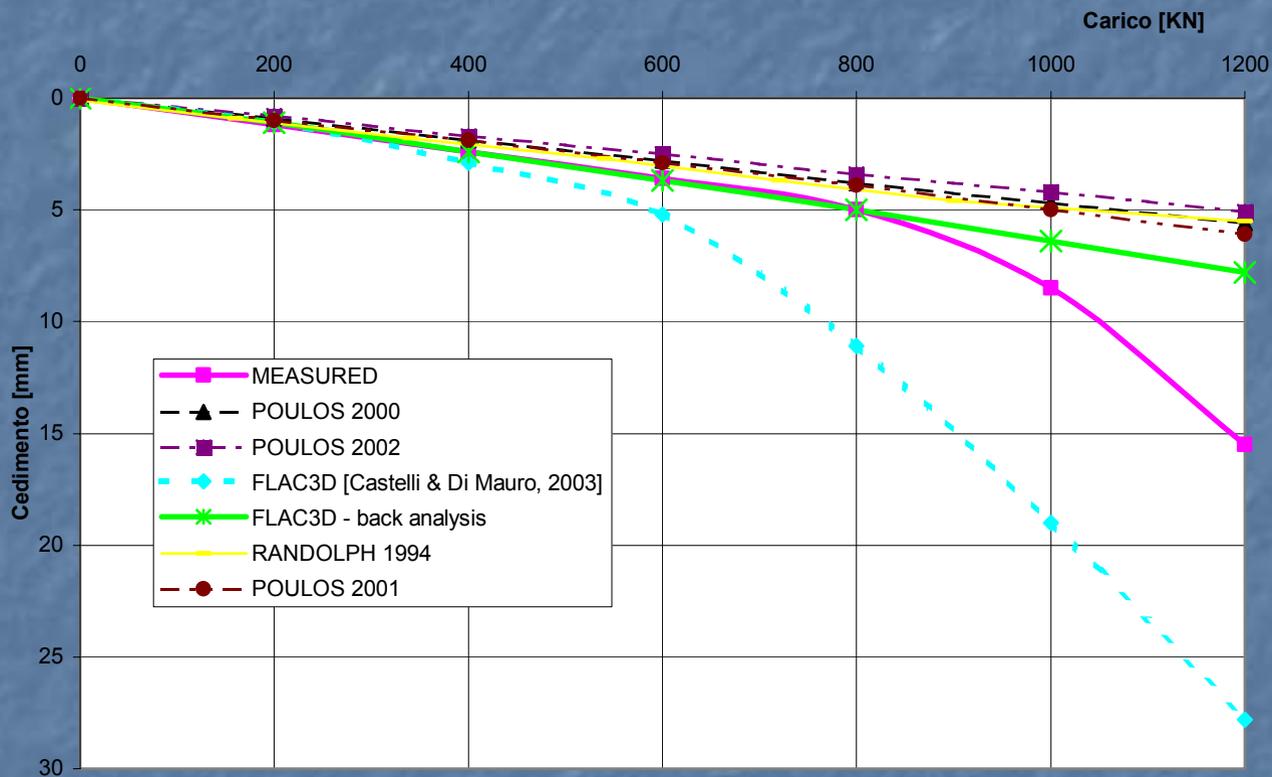


Tensione verticale al contatto piastra-terreno



Spostamento verticale al contatto piastra-terreno

## CONFRONTO TRA ANALISI NUMERICA 3D, METODI SEMPLIFICATI E VALORI SPERIMENTALI (KOIZUMI & ITO, 1967)

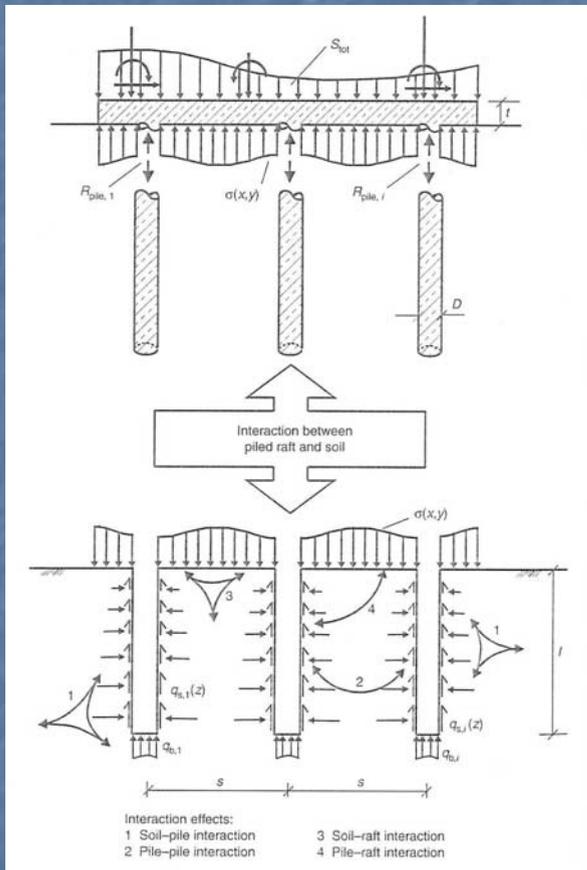


Curve carico - cedimenti

## 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 ( $\text{CPU}_{\text{time}} = 36$  ore).

## METODI DI ANALISI DELLE FONDAZIONI SU PALI



### METODI DI CALCOLO APPROSSIMATI

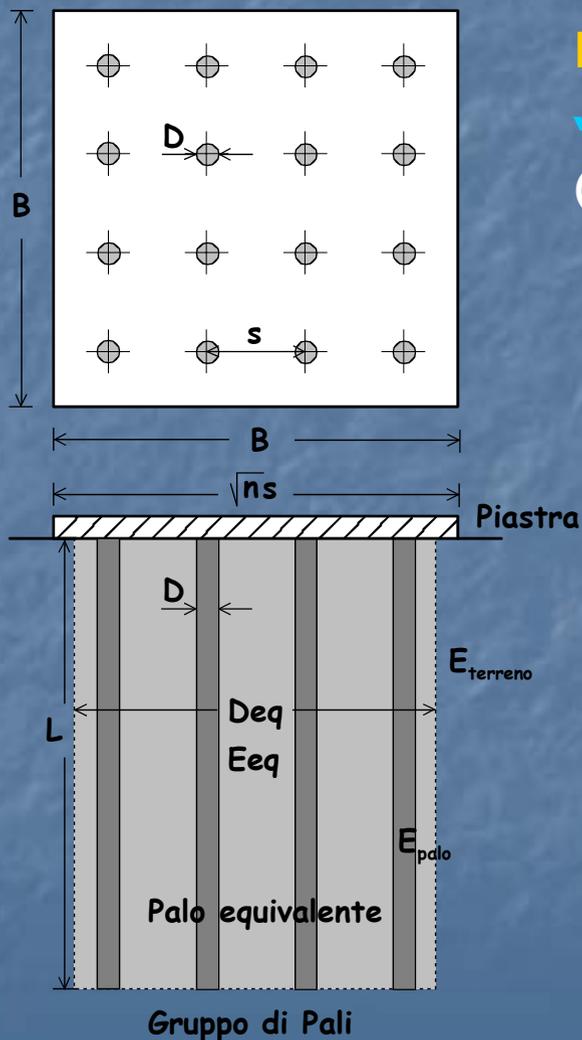
- "A strip on springs" (Poulos, 1991).
- "A plate on springs" (Burghignoli, 1983; Chow & The, 1991; Clancy & Randolph, 1993; Poulos, 1994; Russo & Viggiani, 1997; Kim et al., 2001; Gue et al., 2002).
- "Variational approach" (Shen et al., 1997; 2000).

### METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

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

**Effetti di Interazione Struttura - Terreno**  
(Katzenbach et al., 2000)

## METODI DI ANALISI DELLE FONDAZIONI SU PALI



### METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

“Metodo del Palo Equivalente”  
(Poulos & Davis, 1980; Randolph, 1983;  
Horikoshi & Randolph, 1999)

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

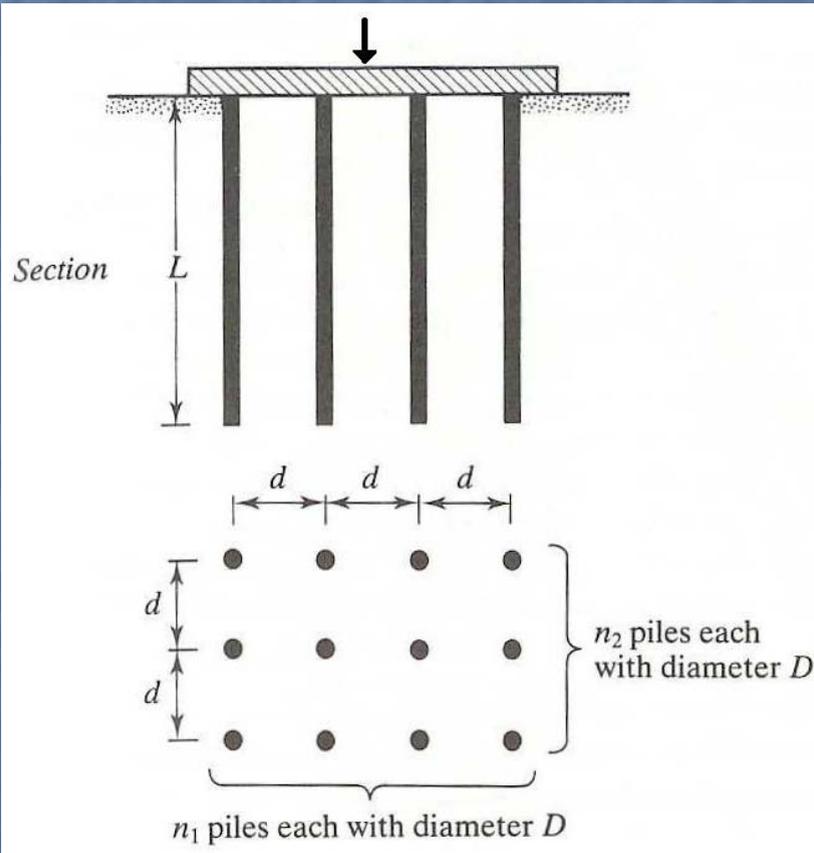
$$E_{\text{eq}} = E_s + (E_p - E_s) \frac{Atp}{A_g}$$

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

$$R = \sqrt{\frac{ns}{L_p}}$$

$$R < 2$$

## ASPETTI GENERALI DELL' ANALISI E DEL PROGETTO DELLE FONDAZIONI SU PALI



### ■ CAPACITA' PORTANTE

- Palo Singolo
- Gruppo di Pali
- Elemento di Collegamento

### ■ CEDIMENTI

- Cedimenti Assoluti
- Cedimenti Differenziali
- Cedimento Medio

### ■ AZIONI MOBILITATE

- Carico Assiale
- Momento Flettente e Taglio nella Piastra e nei Pali

## ASPETTI GENERALI DELL' ANALISI E DEL PROGETTO DELLE FONDAZIONI SU PALI

### ■ AZIONI MOBILITATE

- Reazioni nel Terreno  
lungo i Pali

### ■ PROBLEMI DI MODELLAZIONE

- Comportamento non-lineare  
del Terreno
- Non-omogeneità del Terreno
- Rigidezza dell' Elemento  
di Collegamento

### ■ EFFETTI DI INTERAZIONE

- Palo - Terreno
- Palo - Palo
- Terreno - Piastra
- Palo - Piastra

### ■ ASPETTI DI PROGETTO

- Geometria dei Pali
- Posizione dei Pali
- Spessore della Piastra

## ASPETTI GENERALI DELL' ANALISI E DEL PROGETTO DELLE FONDAZIONI SU PALI

(O.P.C.M. n° 3274/2003)

### PUNTO 3.3.2 – PALI E POZZI DI FONDAZIONE

I PALI DEVONO ESSERE PROGETTATI IN MODO DA RESISTERE:

- A) **FORZE INERZIALI**, TRASMESSE DALLA SOVRASTRUTTURA;
- B) **FORZE CINEMATICHE**, DERIVANTI DALLA DEFORMAZIONE DEL TERRENO IN SEGUITO AL PASSAGGIO DELLE ONDE SISMICHE.

**LE ANALISI DEVONO DETERMINARE:**

1. AZIONI INTERNE LUNGO IL PALO
2. SPOSTAMENTO ORIZZONTALE
2. ROTAZIONE ALLA TESTA DEL PALO

## ASPETTI GENERALI DELL' ANALISI E DEL PROGETTO DELLE FONDAZIONI SU PALI

(O.P.C.M. n° 3274/2003)

LE ANALISI DEVONO ESSERE BASATE SU MODELLI CONTINUI O DISCRETIZZATI IN GRADO DI RIPRODURRE:

- LA **RIGIDEZZA E LA RESISTENZA FLESSIONALE** DEL PALO;
- LE **REAZIONI DEL TERRENO** LUNGO IL PALO, TENENDO NEL DOVUTO CONTO GLI **EFFETTI CICLICI** E **L'AMPIEZZA DELLE DEFORMAZIONI** NEL TERRENO;
- GLI **EFFETTI DI INTERAZIONE** TRA PALO E PALO;
- IL **GRADO DI LIBERTÀ DI ROTAZIONE DELLA TESTA DEL PALO**, O DELLA **CONNESSIONE** TRA PALO E STRUTTURA.

## FONDAZIONI SU PALI

### AZIONI E SITUAZIONI DI PROGETTO SECONDO L'EC8 (EN 1998-5:2003E)

#### 5.4.2 Piles and piers prEN 1998-5:2003 (E)

(1)P Piles and piers shall be designed to resist the following two types of action effects.

a) Inertia forces from the superstructure. Such forces, combined with the static loads, give the design values  $N_{Ed}$ ,  $V_{Ed}$ ,  $M_{Ed}$  specified in 5.3.2.

b) Kinematic forces arising from the deformation of the surrounding soil due to the passage of seismic waves.

(2)P The ultimate transverse load resistance of piles shall be verified in accordance with the principles of EN 1997-1:2004, 7.7.

(3)P Analyses to determine the internal forces along the pile, as well as the deflection and rotation at the pile head, shall be based on discrete or continuum models that can realistically (even if approximately) reproduce:

- the flexural stiffness of the pile;
- the soil reactions along the pile, with due consideration to the effects of cyclic loading and the magnitude of strains in the soil;
- the pile-to-pile dynamic interaction effects (also called dynamic "pile-group" effects);

- the degree of freedom of the rotation at/of the pile cap, or of the connection between the pile and the structure.

NOTE To compute the pile stiffnesses the expressions given in Informative Annex C may be used as a guide.

(4)P The side resistance of soil layers that are susceptible to liquefaction or to substantial strength degradation shall be ignored.

(5) If inclined piles are used, they should be designed to safely carry axial loads as well as bending loads.

NOTE Inclined piles are not recommended for transmitting lateral loads to the soil.

(6)P Bending moments developing due to kinematic interaction shall be computed only when all of the following conditions occur simultaneously:

- the ground profile is of type D, S<sub>1</sub> or S<sub>2</sub>, and contains consecutive layers of sharply differing stiffness;
- the zone is of moderate or high seismicity, i.e. the product  $a_g S$  exceeds  $0,10 g$ , (i.e. exceeds  $0,98 \text{ m/s}^2$ ), and the supported structure is of importance class III or IV.

(7) Piles should in principle be designed to remain elastic, but may under certain conditions be allowed to develop a plastic hinge at their heads. The regions of potential plastic hinging should be designed according to EN 1998-1:2004, 5.8.4.

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

- **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**

## **FONDAZIONI SU PALI**

### **STATI LIMITE PREVISTI DALL'EC7 (EN 1997-1:2003E)**

- 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.

## STATI LIMITE : FATTORI PARZIALI PREVISTI DALL'EC7 (EN 1997-1:2003E)

AZIONE	SIMBOLO	SIMBOLO	SET	
			A1	A2
PERMANENTE	SFAVOREVOLE	$\gamma_G$	1.35	1.0
	FAVOREVOLE		1.0	1.0
TEMPORANEA	SFAVOREVOLE	$\gamma_Q$	1.5	1.3
	FAVOREVOLE		0	0

PARAMETRO TERRENO	SIMBOLO	SET	
		M1	M2
ANGOLO $\Phi'$	$\gamma_{\Phi'}$	1.0	1.25
COESIONE $c'$	$\gamma_{c'}$	1.0	1.25
COESIONE $c_u$	$\gamma_{c_u}$	1.0	1.4
RESISTENZA ELL	$\gamma_{q_u}$	1.0	1.4
PESO SPECIFICO $\gamma$	$\gamma_{\gamma}$	1.0	1.0

## STATI LIMITE : FATTORI PARZIALI PREVISTI DALL'EC7 (EN 1997-1:2003E)

RESISTENZA	SIMBOLO	SET			
		R1	R2	R3	R4
PUNTA	$\gamma_b$	1.25	1.1	1.0	1.6
LATERALE	$\gamma_s$	1.0	1.1	1.0	1.3
TOTALE	$\gamma_t$	1.15	1.1	1.0	1.5
TRAZIONE	$\gamma_{s,t}$	1.25	1.15	1.1	1.6

### APPROCCIO DI PROGETTO 1

COMBINAZIONE 1: A1 "+" M1 "+" R1

COMBINAZIONE 2: A2 "+" (M1 o M2) "+" R4

### APPROCCIO DI PROGETTO 2

COMBINAZIONE 1: A1 "+" M1 "+" R2

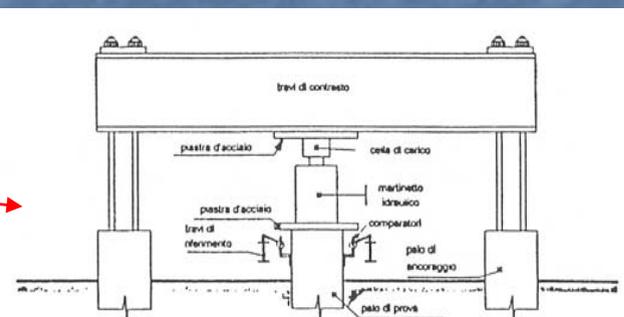
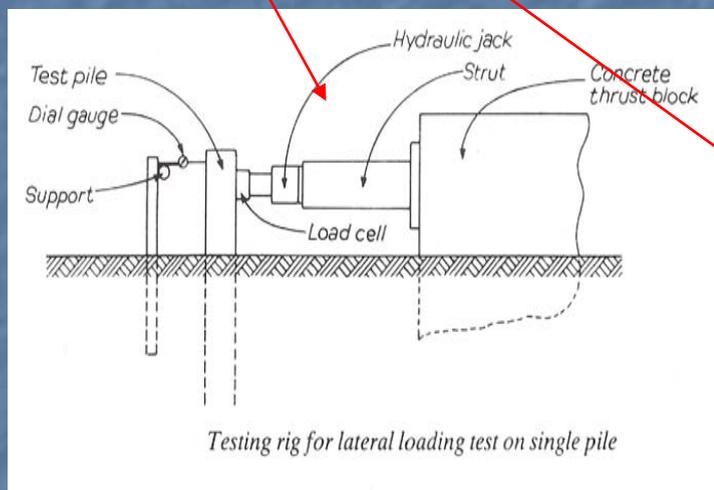
### APPROCCIO DI PROGETTO 3

COMBINAZIONE 1: (A1 o A2) "+" M2 "+" R3

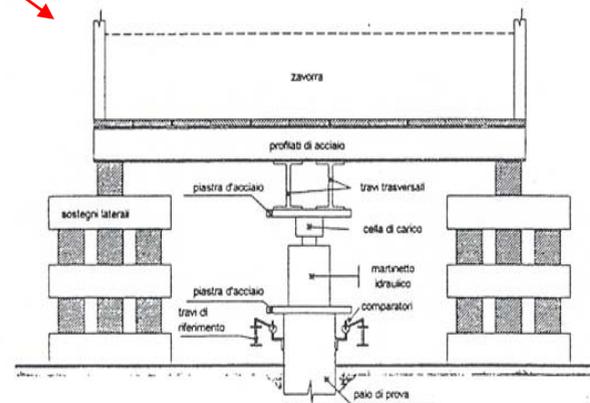
## AZIONI E SITUAZIONI DI PROGETTO SECONDO L'EC7 (EN 1997-1:2003E)

### Prove di Carico Statiche:

- Verticale
- Orizzontale

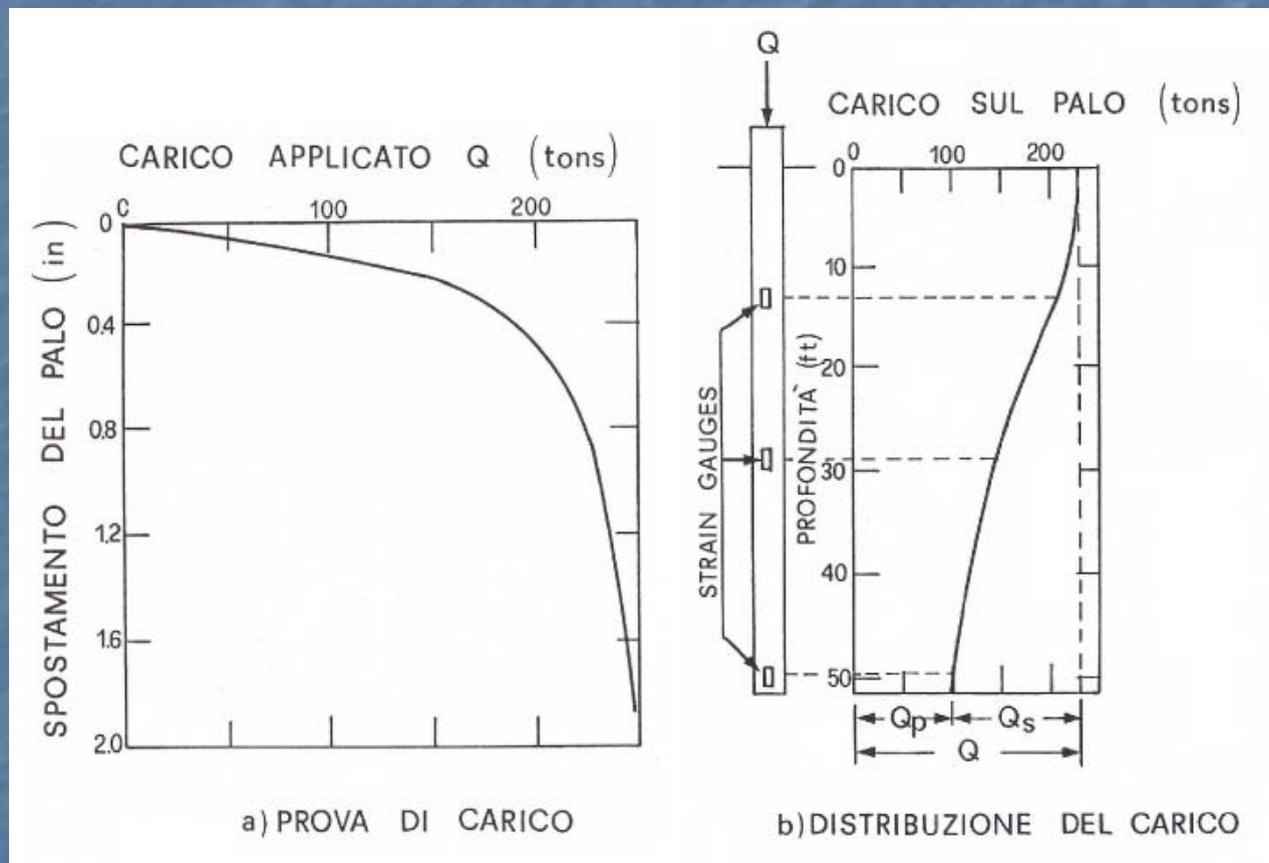


Schema di una prova di carico con trave di contrasto  
e pali di ancoraggio



Schema di una prova di carico con zavorra

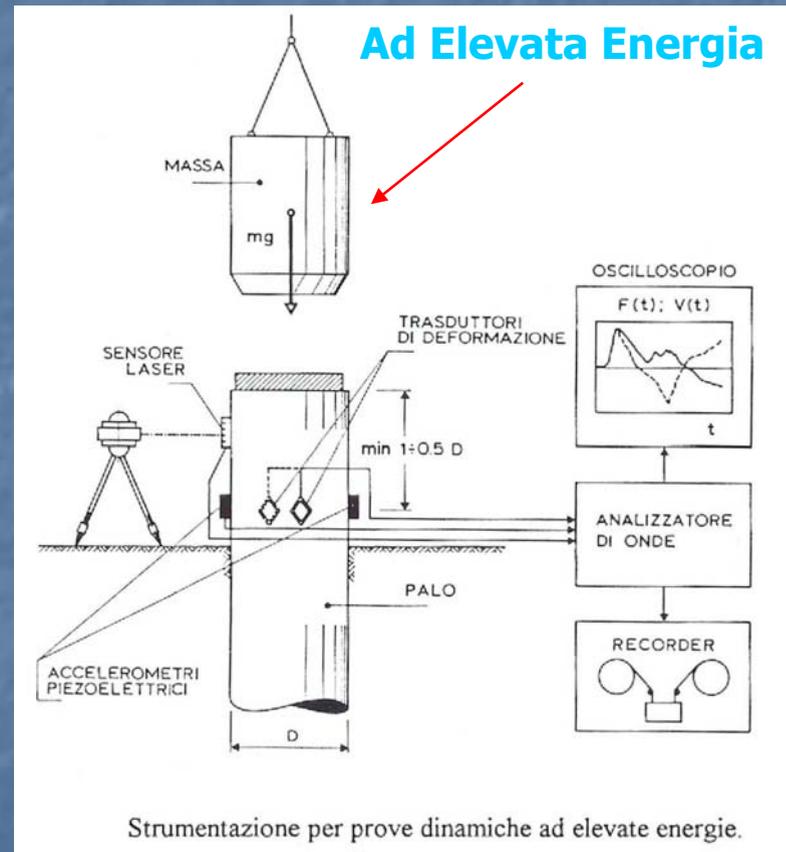
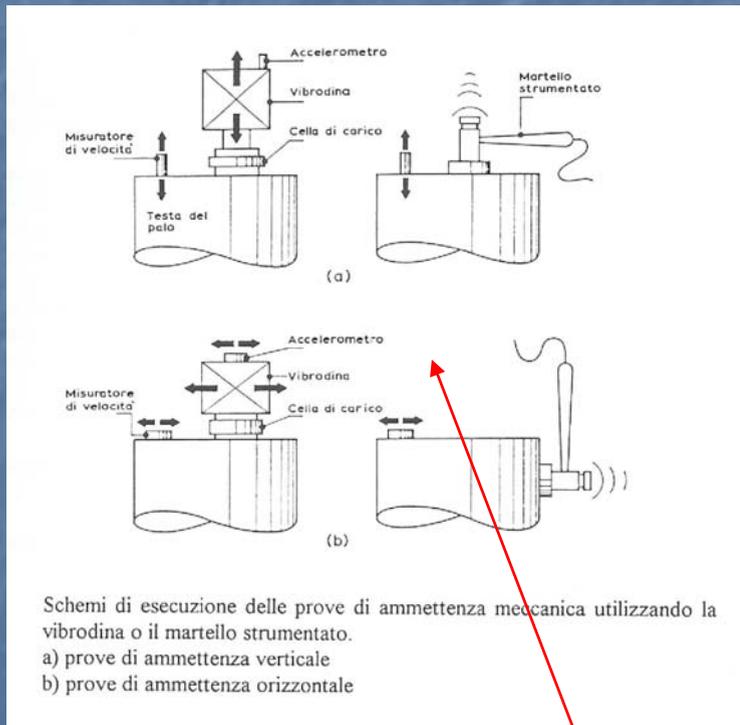
## Prove di Carico su Pali Strumentati



**Curva carico - cedimento**

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

### Prove di Carico Dinamiche: - Ammettenza Verticale - Ammettenza Orizzontale



A Basse Deformazioni

## Prove di Ammettenza Meccanica:

- **Verticale**

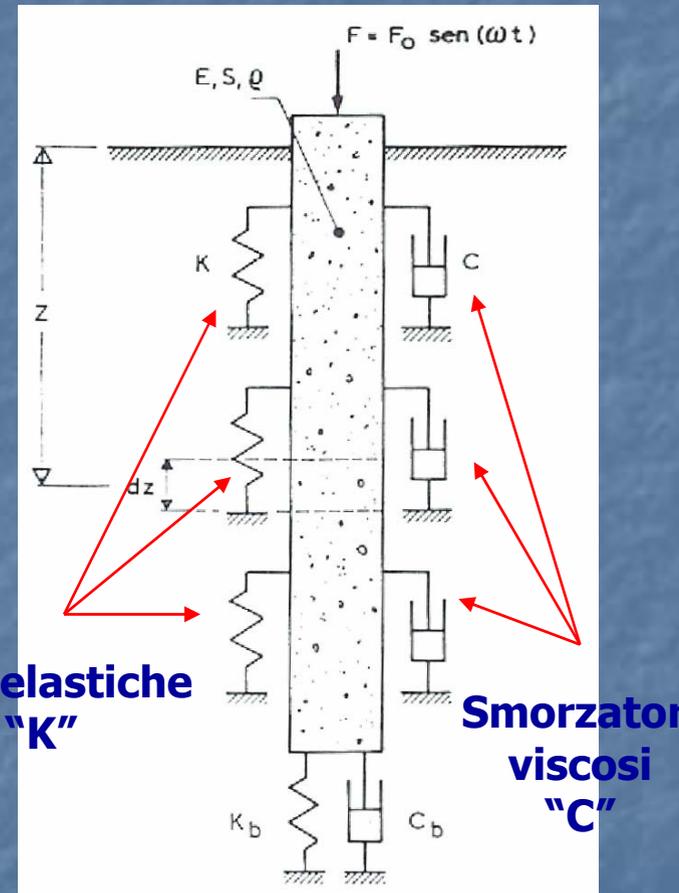
- **Orizzontale**

- Possono essere considerate come delle vere e proprie prove in sito di vibrazione forzata del palo, nel campo delle piccole deformazioni.

- Si possono assimilare ad una misura in sito della impedenza del palo.

- L'impedenza traduce il processo di interazione dinamica del sistema palo-terreno.

- L'interpretazione dei rilievi sperimentali alla luce dell'interazione dinamica palo-terreno, consente di acquisire informazioni sulla geometria del palo e sui parametri dinamici del terreno alle basse deformazioni.



### Prove di Ammettenza Meccanica:

- Verticale
- Orizzontale

E' possibile ricavare:

- una rigidezza dinamica verticale:  $K_{ZZ} = (E_p A_p / R_p) f_{v1}$
- uno smorzamento verticale:  $C_{ZZ} = (E_p A_p / V_s) f_{v2}$
- una rigidezza dinamica orizzontale:  $K_{HH} = (E_p J_p / R_p^3) f_{H1}$
- uno smorzamento orizzontale:  $C_{HH} = (E_p J_p / R_p^2 V_s) f_{H2}$

$E_p$  = modulo di elasticità del palo;

$A_p$  = area sezione trasversale del palo;

$J_p$  = momento d'inerzia del palo;

$R_p$  = raggio del palo;

$V_s$  = velocità onde di taglio terreno;

$f_{v1}, f_{v2}$  = coefficienti adimensionali di rigidezza e smorzamento = 0.03 – 0.05;

$f_{H1}, f_{H2}$  = coefficienti adimensionali di rigidezza e smorzamento = 0.001 – 0.01.

## FONDAZIONI SU PALI

### AZIONI E SITUAZIONI DI PROGETTO SECONDO L'EC8 (EN 1998-5:2003E)

Annex C (Informative) prEN 1998-5:2003 (E)

#### Pile-head static stiffnesses

**C.1** The pile stiffness is defined as the force (moment) to be applied to the pile head to produce a unit displacement (rotation) along the same direction (the displacements/rotations along the other directions being zero), and is denoted by  $K_{HH}$  (horizontal stiffness),  $K_{MM}$  (flexural stiffness) and  $K_{HM} = K_{MH}$  (cross stiffness).

The following notations are used in Table C.1 below:

$E$  is Young's modulus of the soil model, equal to  $3G$ ;

$E_p$  is Young's modulus of the pile material;

$E_s$  is Young's modulus of the soil at a depth equal to the pile diameter;

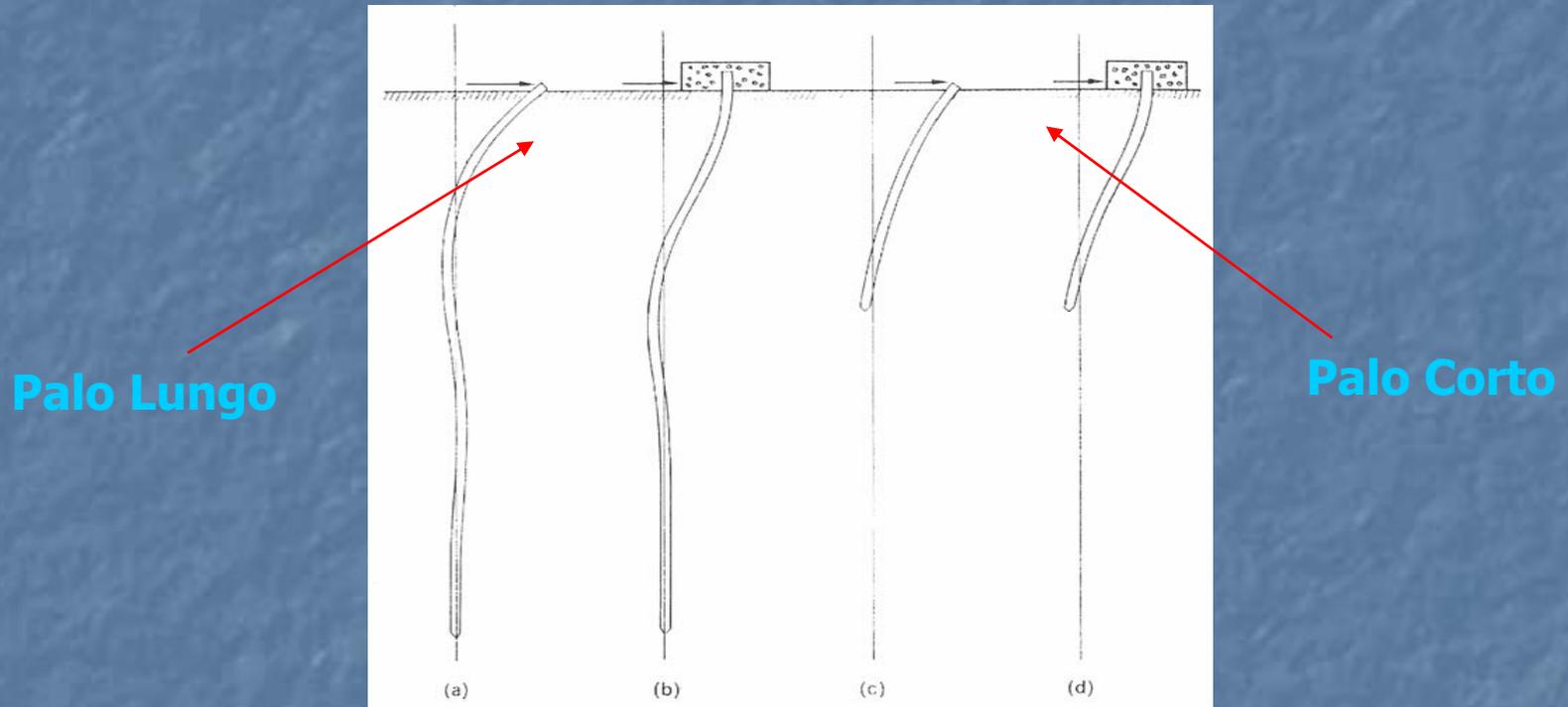
$d$  is the pile diameter;

$z$  is the pile depth.

**Table C.1 — Expressions for static stiffness of flexible piles embedded in three soil models**

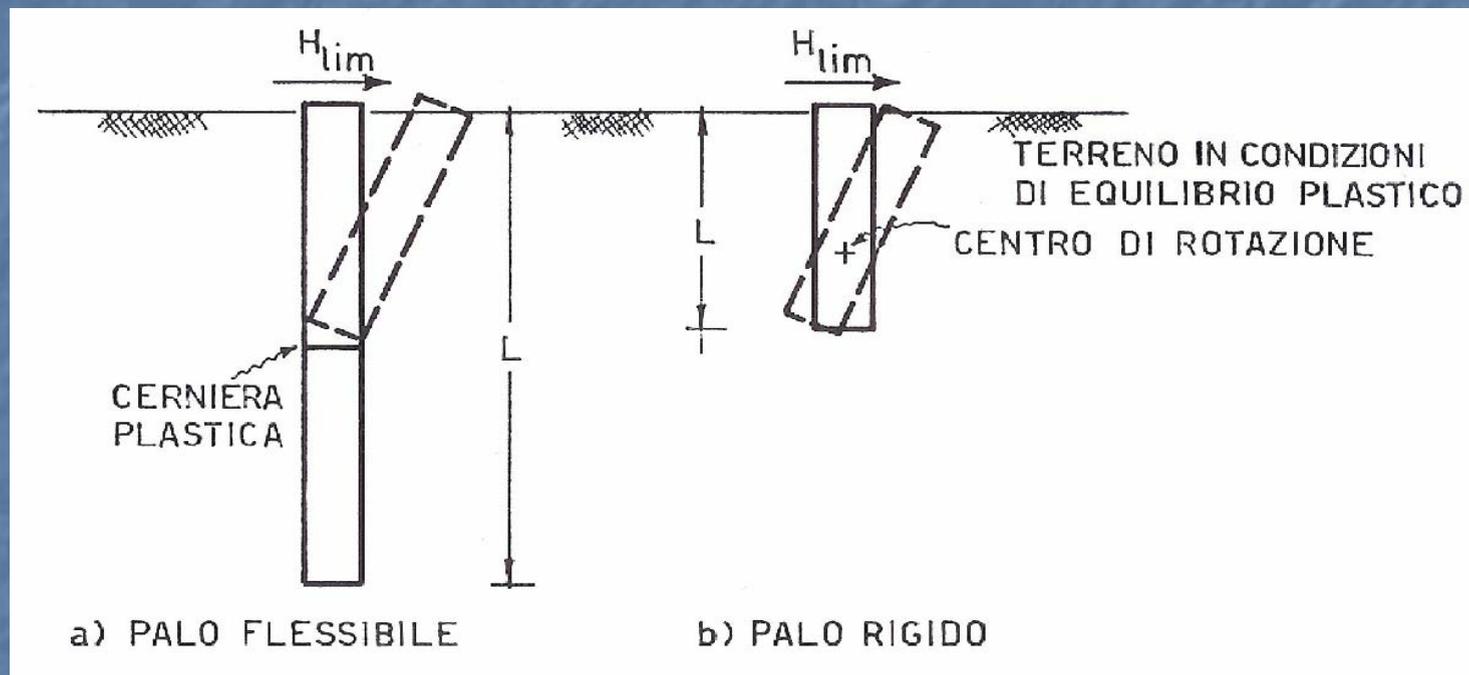
Soil model	$\frac{K_{HH}}{dE_s}$	$\frac{K_{MM}}{d^3E_s}$	$\frac{K_{HM}}{d^2E_s}$
$E = E_s z/d$	$0,60 \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{0,35}$	$0,14 \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{0,80}$	$-0,17 \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{0,60}$
$E = E_s \sqrt{z/d}$	$0,79 \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{0,28}$	$0,15 \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{0,77}$	$-0,24 \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{0,53}$
$E = E_s$	$1,08 \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{0,21}$	$0,16 \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{0,75}$	$-0,22 \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{0,50}$

## Pali soggetti ad Azione Orizzontale

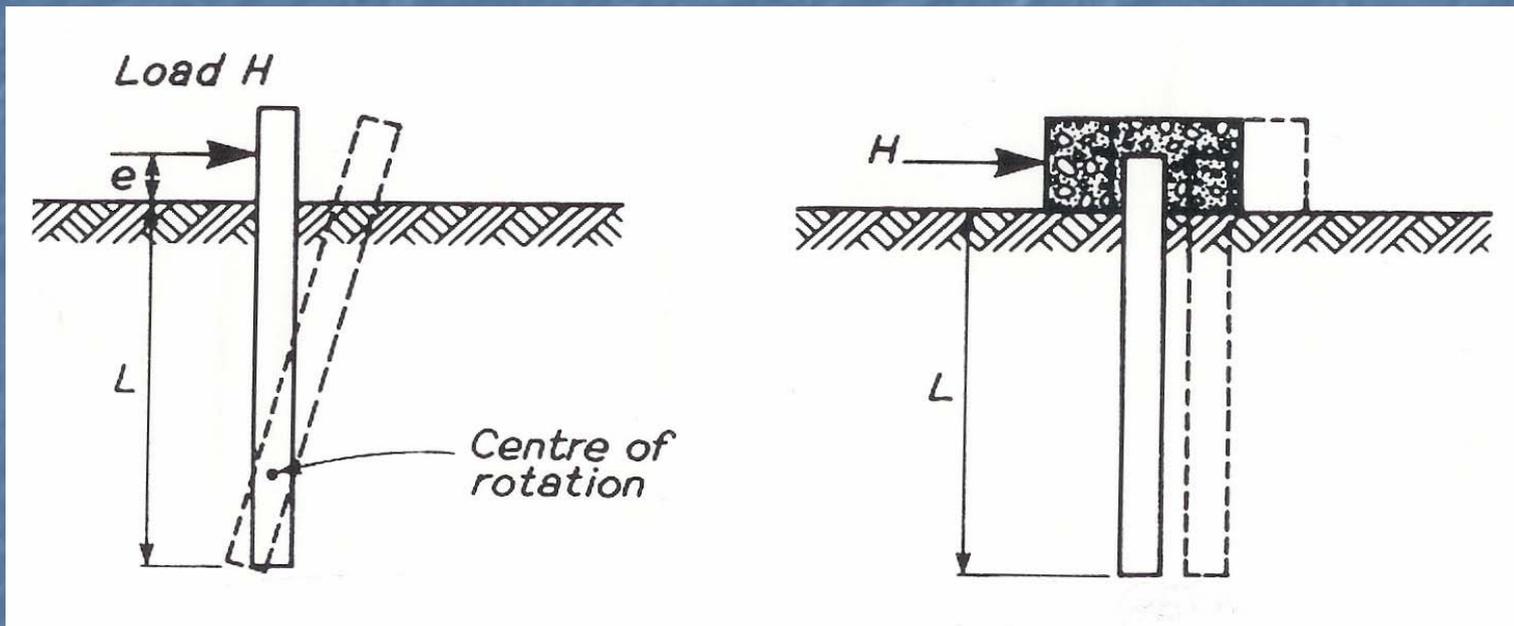


**GRADO DI LIBERTÀ DI ROTAZIONE DELLA TESTA DEL PALO, O DELLA CONNESSIONE TRA PALO E STRUTTURA.**

## Pali soggetti ad Azione Orizzontale: Meccanismi di Rottura



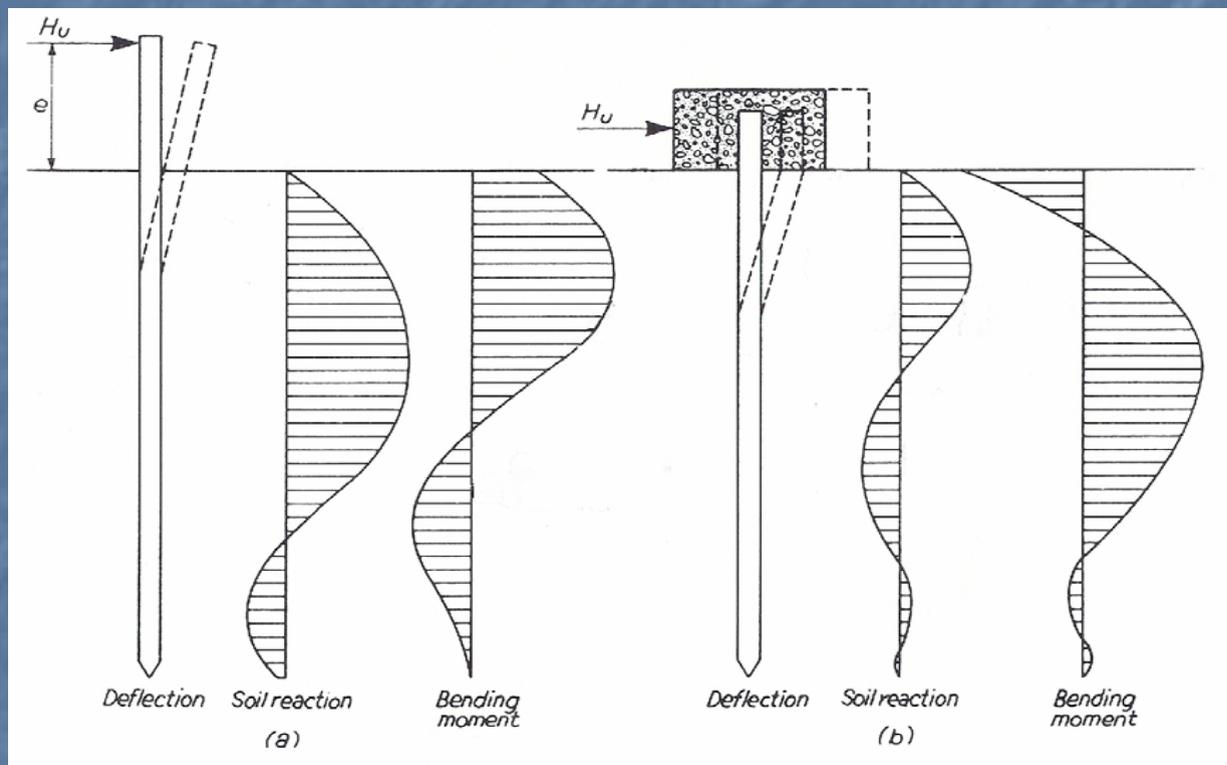
## Pali soggetti ad Azione Orizzontale: Palo Corto



**Libero in Testa**

**Incastrato in Testa**

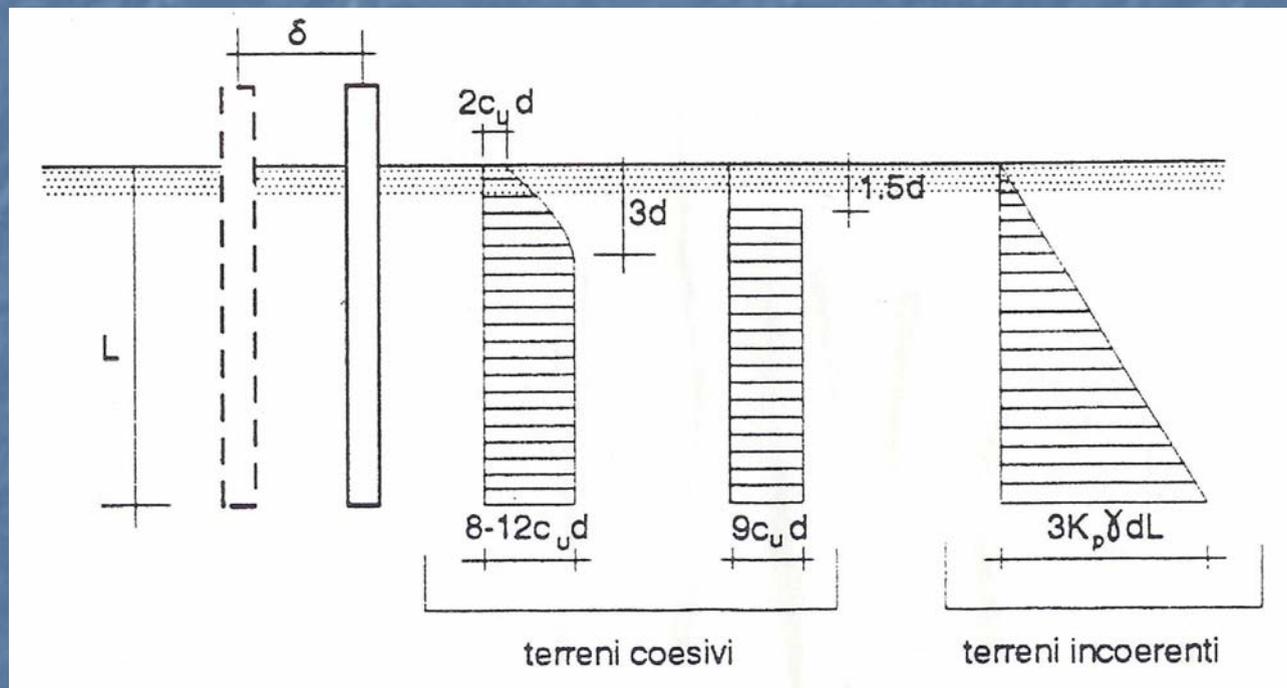
## Pali soggetti ad Azione Orizzontale: Palo Lungo



**Libero in Testa**

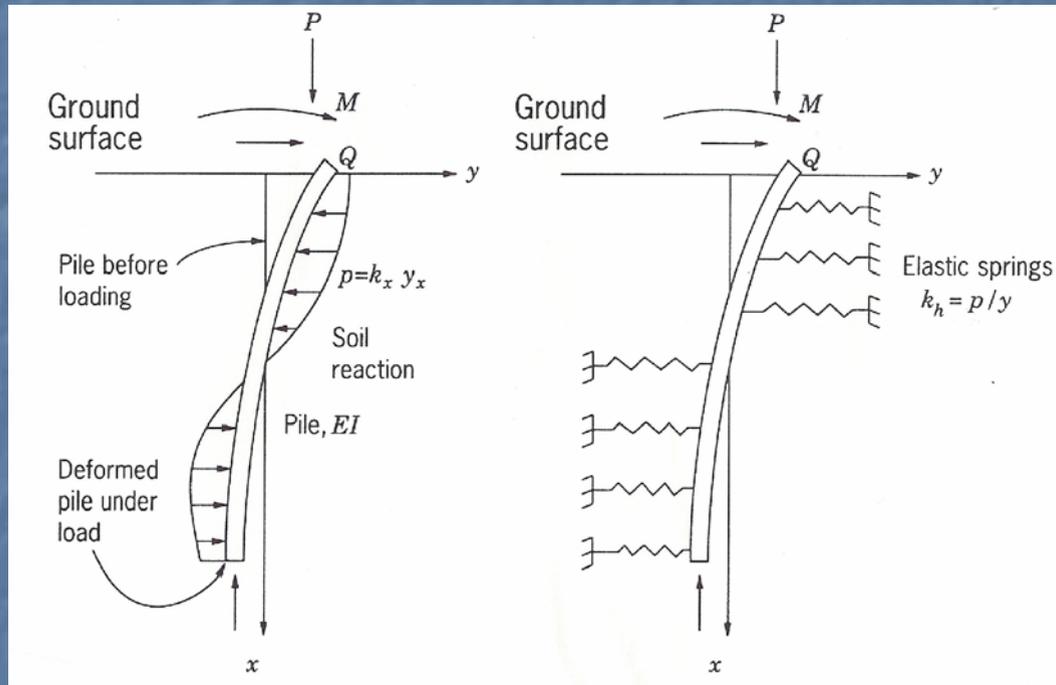
**Incastrato in Testa**

## Pali soggetti ad Azione Orizzontale: Reazione Orizzontale Limite (Broms, 1964)

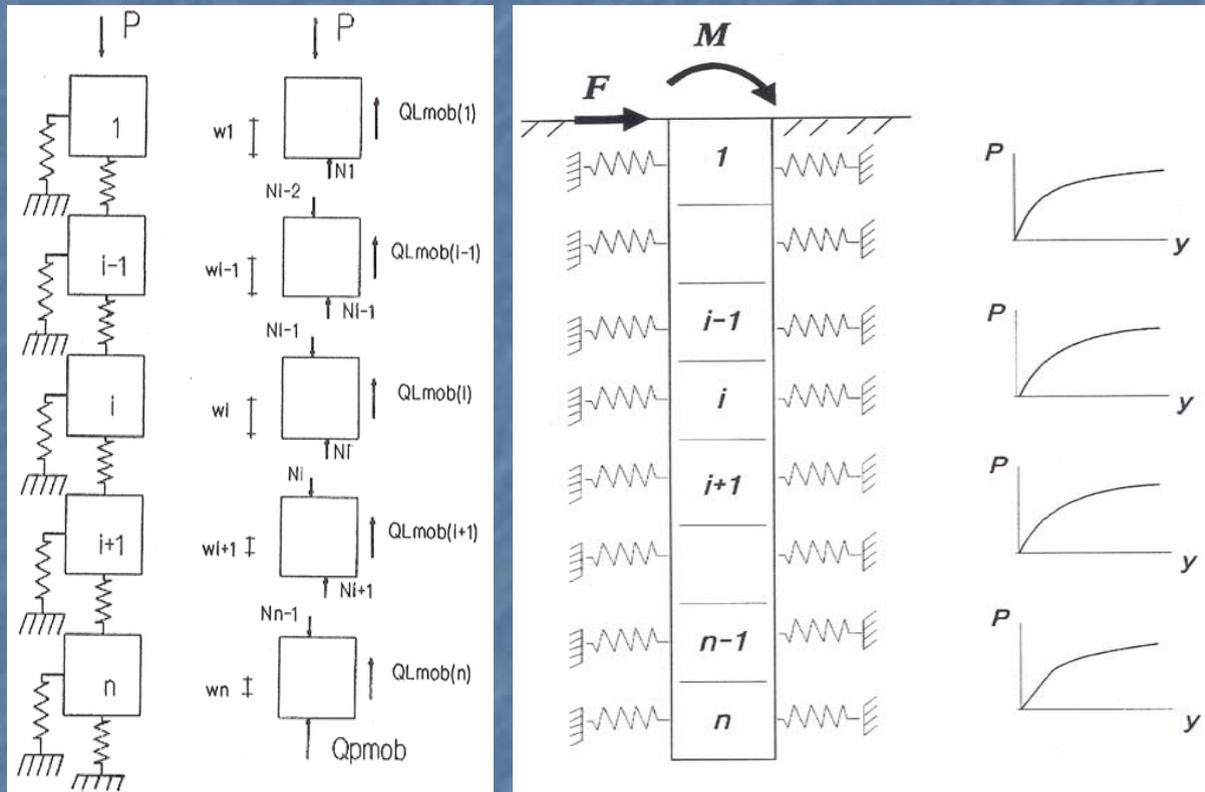


**REAZIONI LIMITE DEL TERRENO LUNGO IL PALO**

## Pali soggetti a Carichi applicati in Testa Modellazione del Comportamento



## Modellazione del Comportamento dei Pali



Metodo delle "Funzioni di Trasferimento"

## Modellazione del Comportamento dei Pali

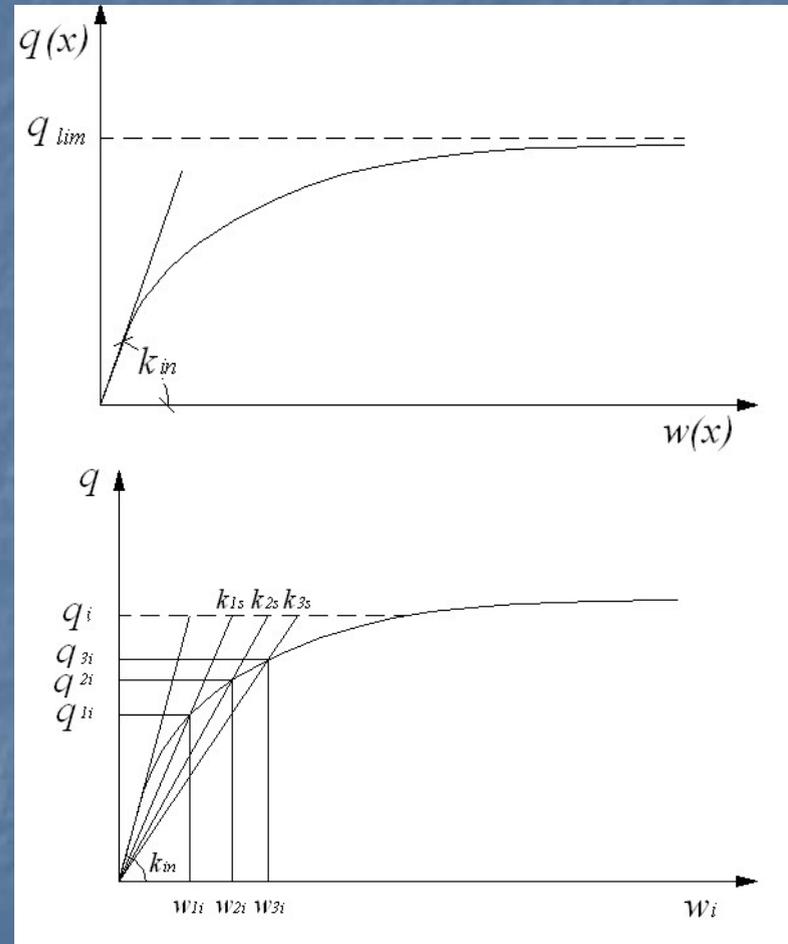
$$q(x) = \frac{w(x)}{\frac{1}{k_{in}} + \frac{w(x)}{q_{lim}}}$$

$$K_{si} = \frac{G_o}{R_o \ln(R_m/R_o)} \quad [FL-3]$$

$$K_{bi} = \frac{4G_o}{\pi R_o (1 - \nu)} \quad [FL-3]$$

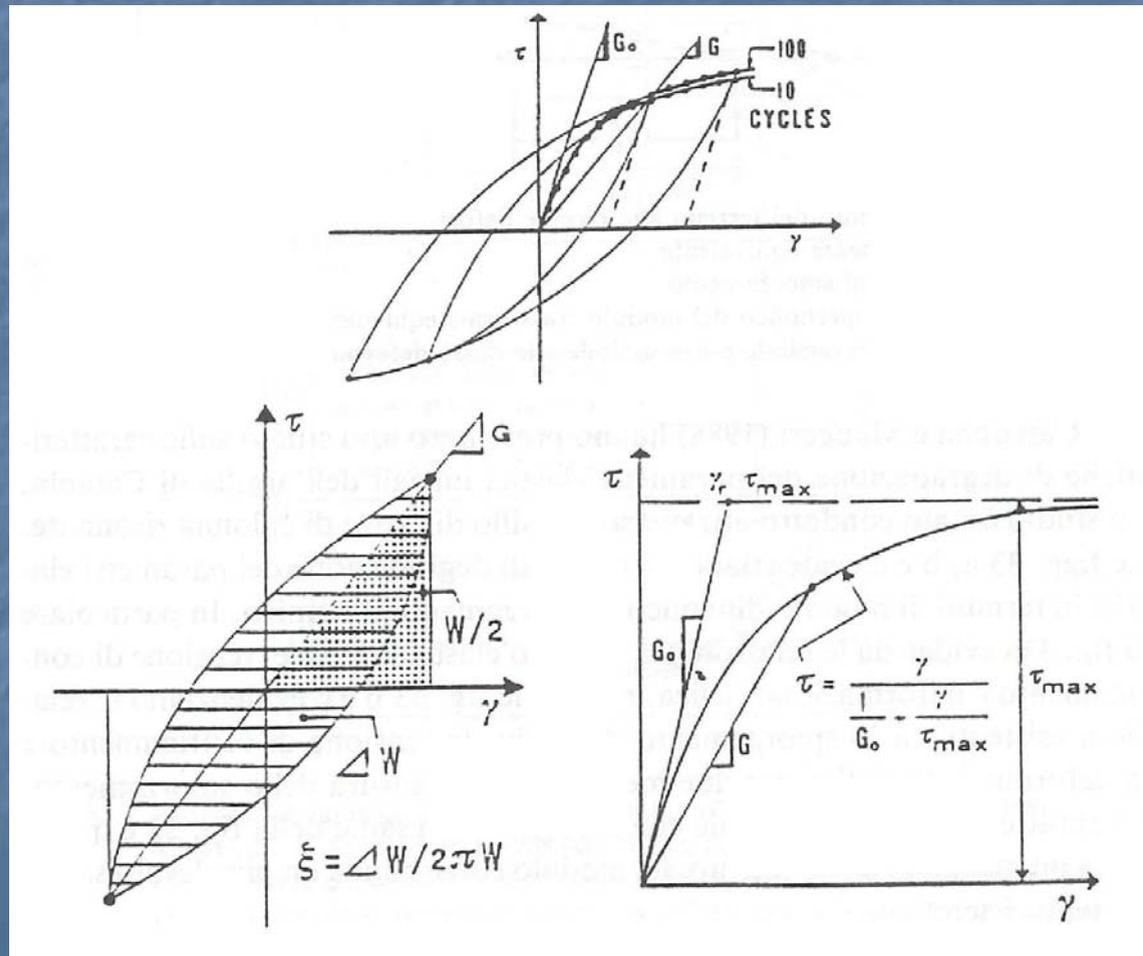
$$K_s = K_{si} (1 - \eta_s) \quad \eta_s = Q_s / Q_{slim}$$

$$K_b = K_{bi} (1 - \eta_b) \quad \eta_b = Q_b / Q_{blim}$$

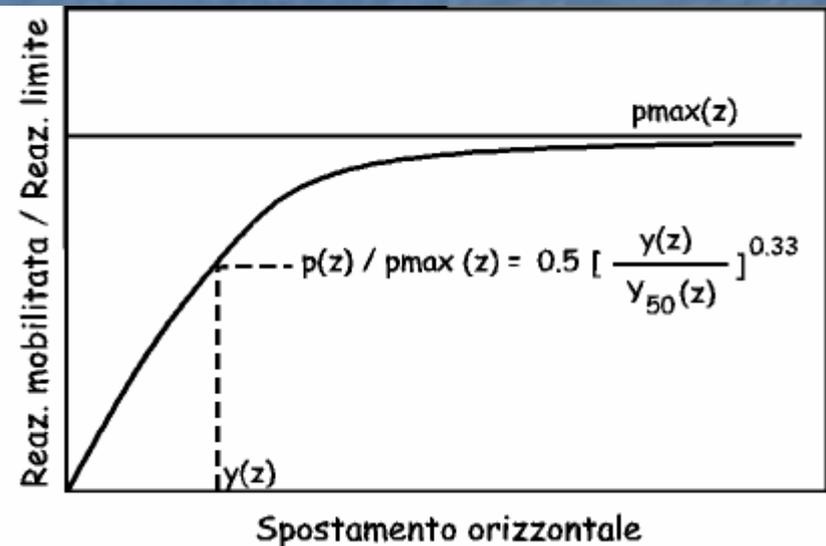
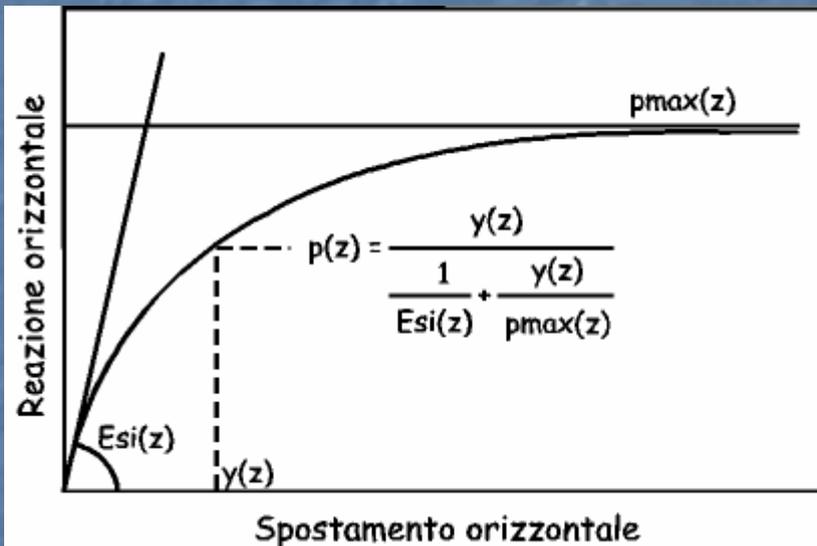


**EFFETTI NON LINEARI DELL'INTERAZIONE PALO - TERRENO**

## EFFETTI CONNESSI ALLA CICLICITA' DELLA SOLLECITAZIONE ED ALL'AMPIEZZA DELLE DEFORMAZIONI NEL TERRENO

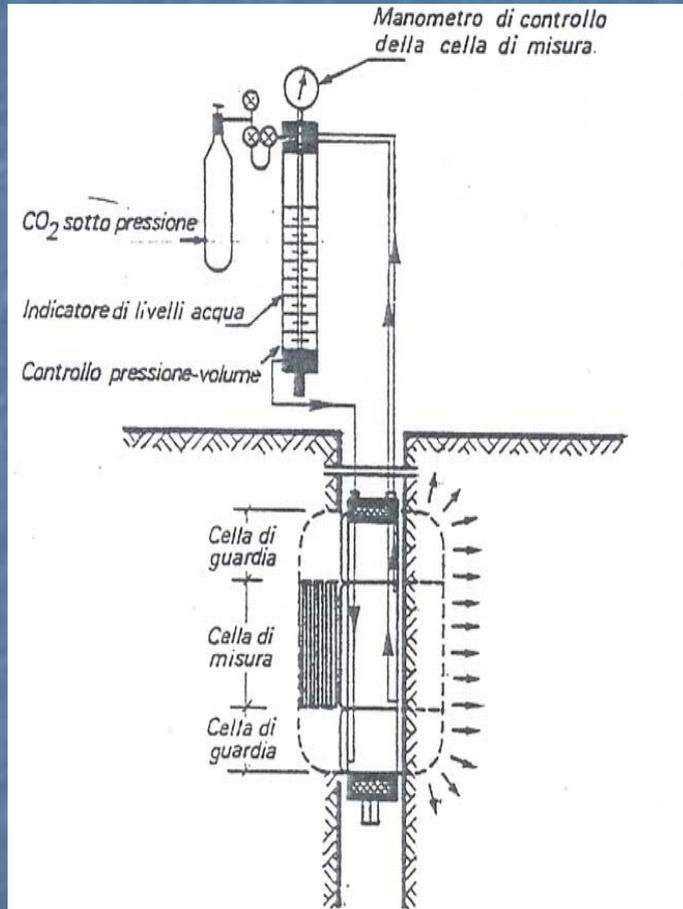


## Pali soggetti ad Azione Orizzontale: Modellazione del Comportamento

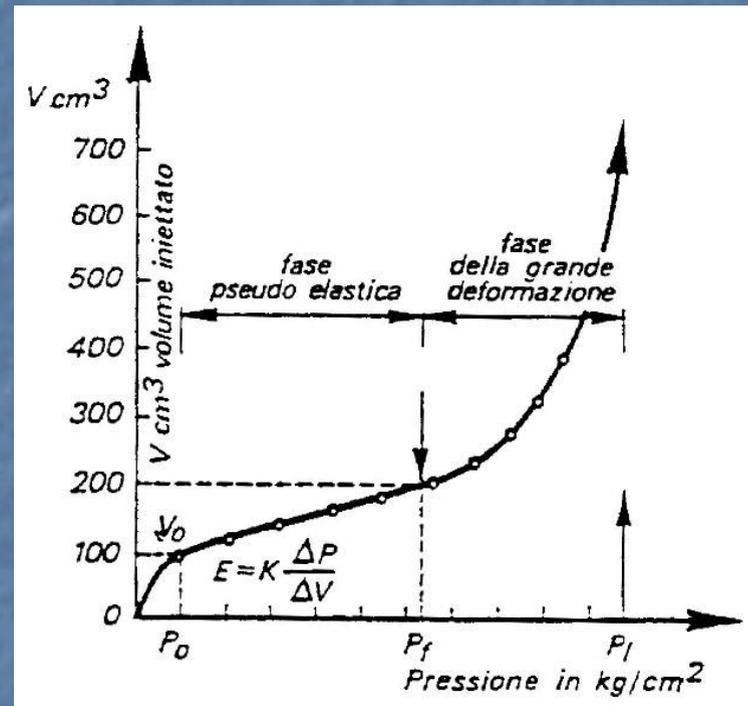


Metodo delle curve "p - y"

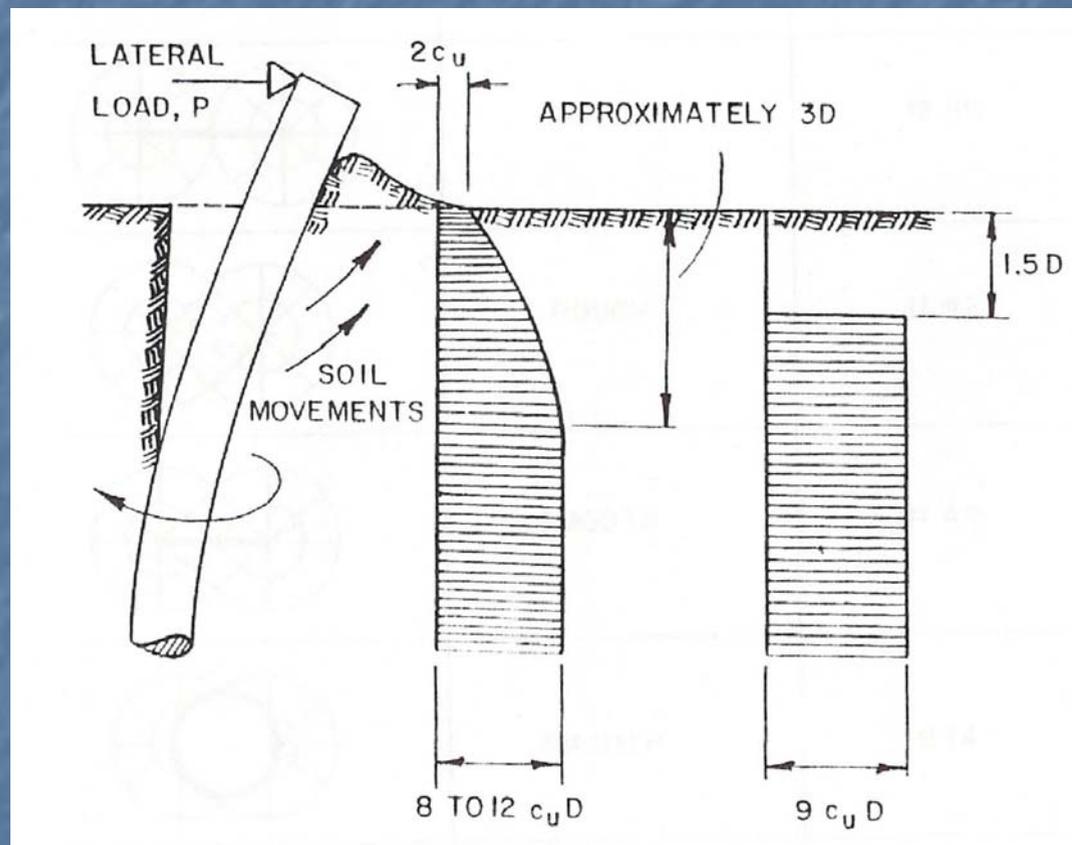
## Prova Pressiometrica



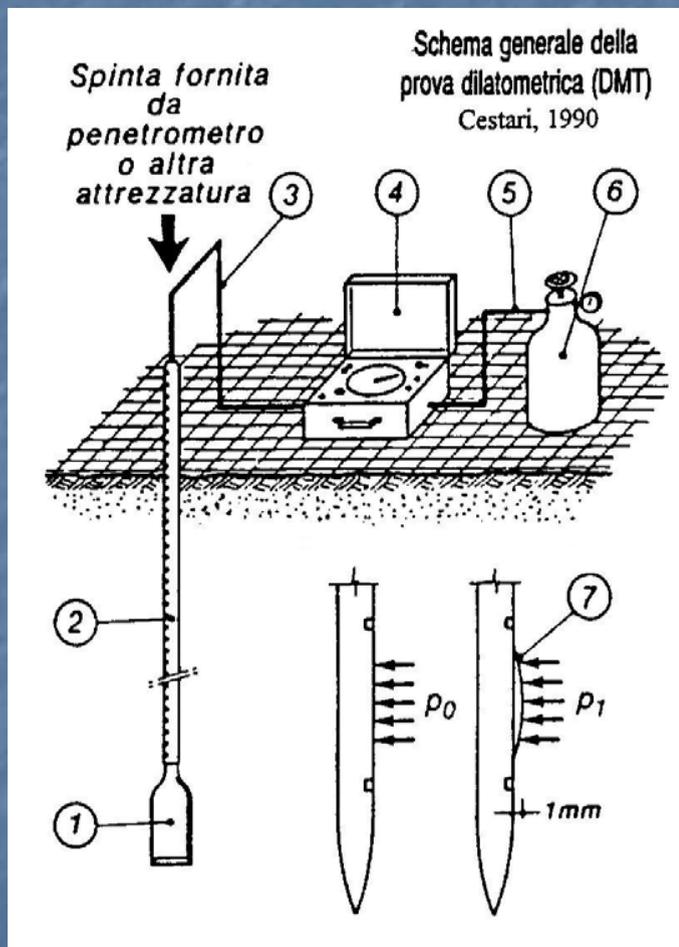
Schema del pressiometro Ménard



## Analogia con Palo soggetto a Forza Orizzontale



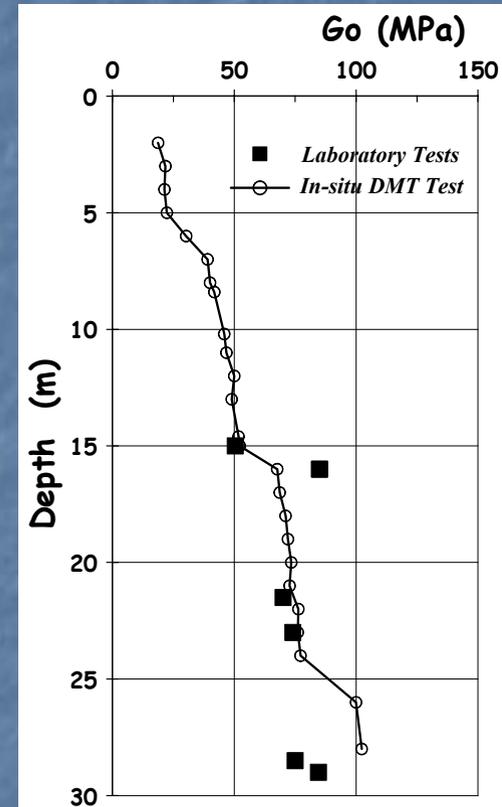
## Prova Dilatometrica (DMT)



## Hryciw (1990)

$$G_o = \frac{530}{(\sigma'_v / P_a)^{0.25}} \cdot \frac{(\gamma_D / \gamma_w) - 1}{2.7 - (\gamma_D / \gamma_w)} k_o^{0.25} (\sigma'_v P_a)^{0.5}$$

- ✓  $P_a$  is the atmospheric pressure,
- ✓  $\sigma'_v$  is the effective vertical stress,
- ✓  $\gamma_D$  and  $k_o$  are respectively the unit weight and the coefficient of earth pressure at rest determined according to Marchetti (1980) by means of DMT results.



## Pali soggetti ad Azione Orizzontale: Modellazione del Comportamento

### *Parametri da Prove DMT*

Lo spostamento  $y_{50}$  può essere valutato attraverso i risultati di una prova DMT, tramite la seguente relazione Robertson et al. (1989):

$$y_{50} = \frac{23.67 c_u D^{0.5}}{F_c E_d}$$

- $c_u$  = resistenza al taglio non drenata valutata con DMT;
- $F_c$  = fattore empirico normalmente assunto pari a 10;
- $E_d$  = modulo dilatometrico da DMT;
- $D$  = diametro del palo in cm.

## Pali soggetti ad Azione Orizzontale: Reazione Orizzontale Limite

Nel caso di terreni coesivi la reazione limite  $P_{\max}$  può essere determinata tramite la relazione (Matlock, 1970):

$$P_{\max} = N_p c_u D$$

-  $N_p$  = coefficiente di capacità portante.

Il coefficiente di capacità portante  $N_p$  può anche essere determinato attraverso i risultati di una prova DMT mediante la relazione (Matlock, 1970):

$$N_p = 3 + \sigma'_v / c_u + J \cdot z / D \leq 9$$

-  $J$  = coefficiente empirico adimensionale variabile tra 0.25 e 0.50 all'aumentare della resistenza del terreno.

## **Pali soggetti ad Azione Orizzontale: Modellazione del Comportamento**

### *Parametri da Prove DMT*

Analogamente il modulo tangente iniziale  $E_{si}$  può essere determinato da una prova DMT mediante la relazione (Campanella e Robertson, 1983):

$$E_{si} = F_c E_D$$

-  $E_D$  = Modulo dilatometrico.

## Pali soggetti ad Azione Orizzontale: Modellazione del Comportamento

### *Legame Iperbolico*

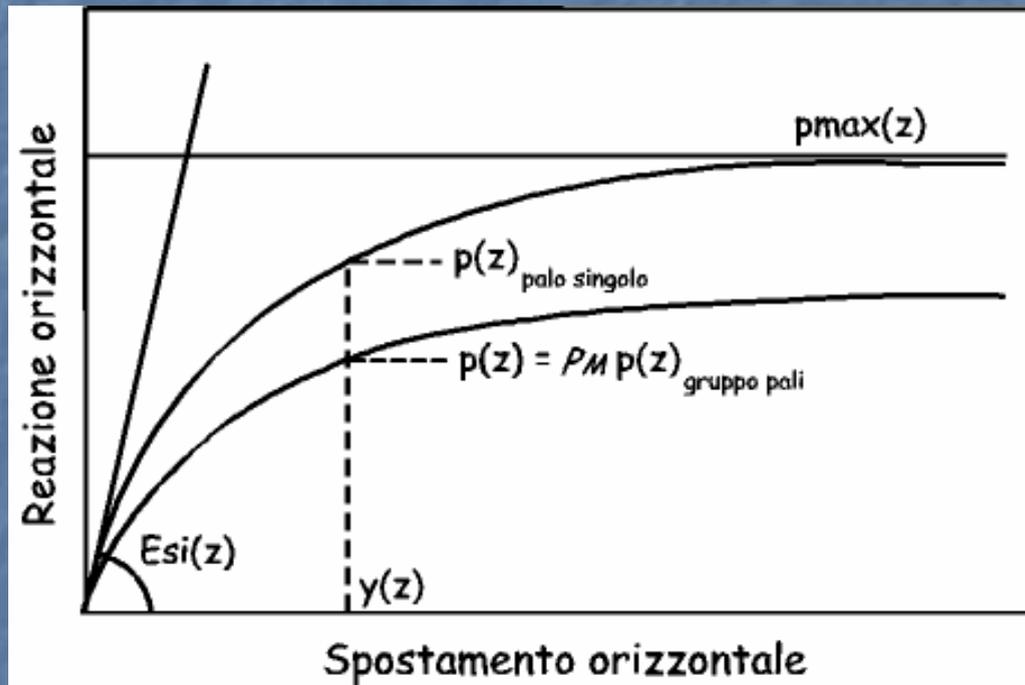
---

Gabr et al. (1994) propongono la seguente relazione per la determinazione dei valori del modulo di reazione orizzontale iniziale  $E_{si}$  del terreno mediante una prova DMT:

$$E_{si} = \frac{6.5 (p_o - \sigma_h)}{0.00685} D$$

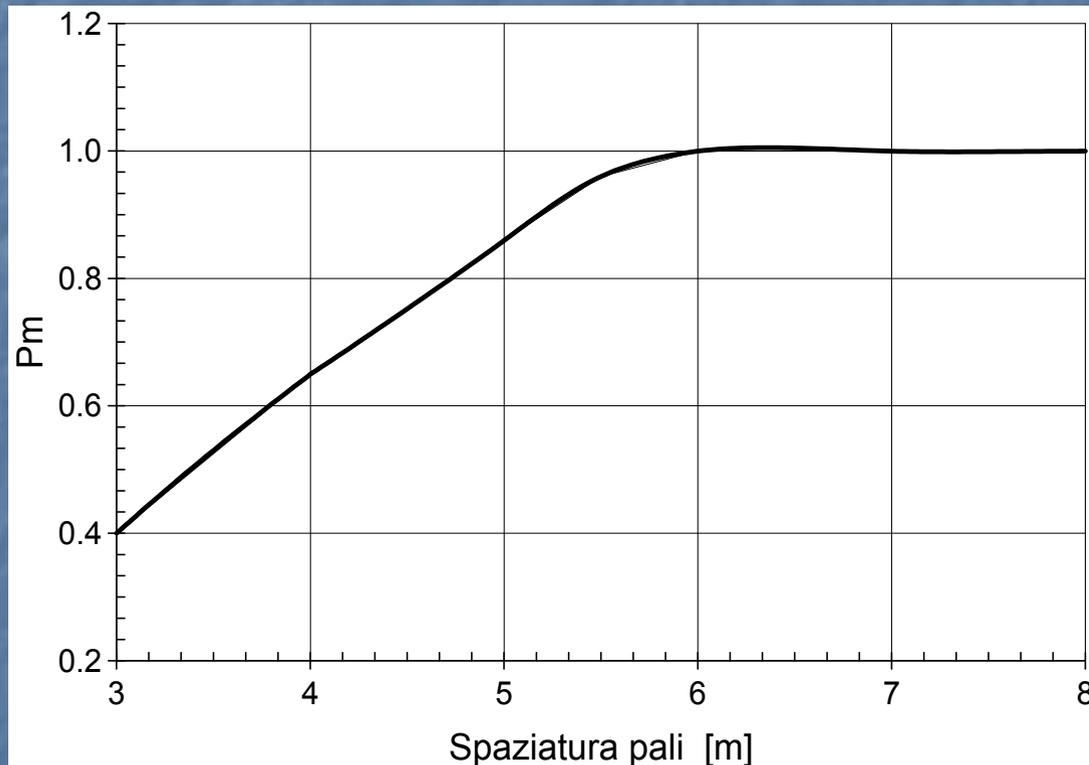
- $p_o$  = lettura A corretta necessaria a provocare l'espansione della membrana del dilatometro (kPa);
- $\sigma_h$  = tensione orizzontale totale (kPa);
- $D$  = diametro del palo (m).

## Pali soggetti ad Azione Orizzontale: Modellazione del Comportamento dei Gruppi di Pali



**EFFETTI DI INTERAZIONE TRA PALI**

## Pali soggetti ad Azione Orizzontale: Modellazione del Comportamento dei Gruppi di Pali



**CONSIDERAZIONI**

**CONCLUSIVE**