

**STRUTTURE DI FONDAZIONE  
E FONDAZIONI**

**ing. Nunziante Squeglia**

**SOLLECITAZIONI DA INTERAZIONE  
CINEMATICA NEI PALI**

## Norme tecniche per le Costruzioni - D.M. 17/1/2018

### 7.11.5.3.2 Fondazioni su pali

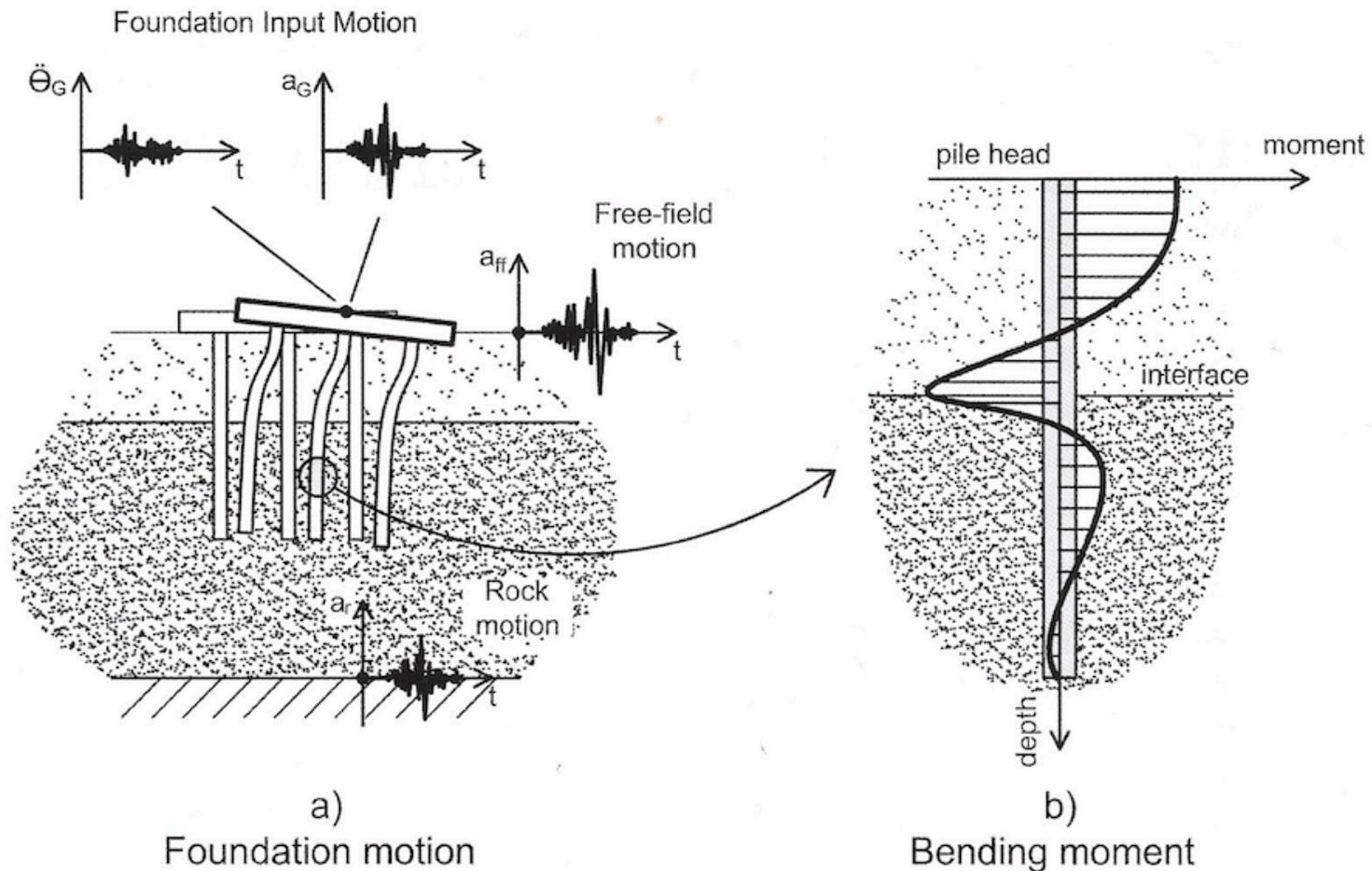
.....

In presenza di moto sismico, nei pali si sviluppano sollecitazioni dovute sia alle forze inerziali trasmesse dalla sovrastruttura (interazione inerziale) sia all'interazione tra palo e terreno dovuta allo scuotimento (interazione cinematica).

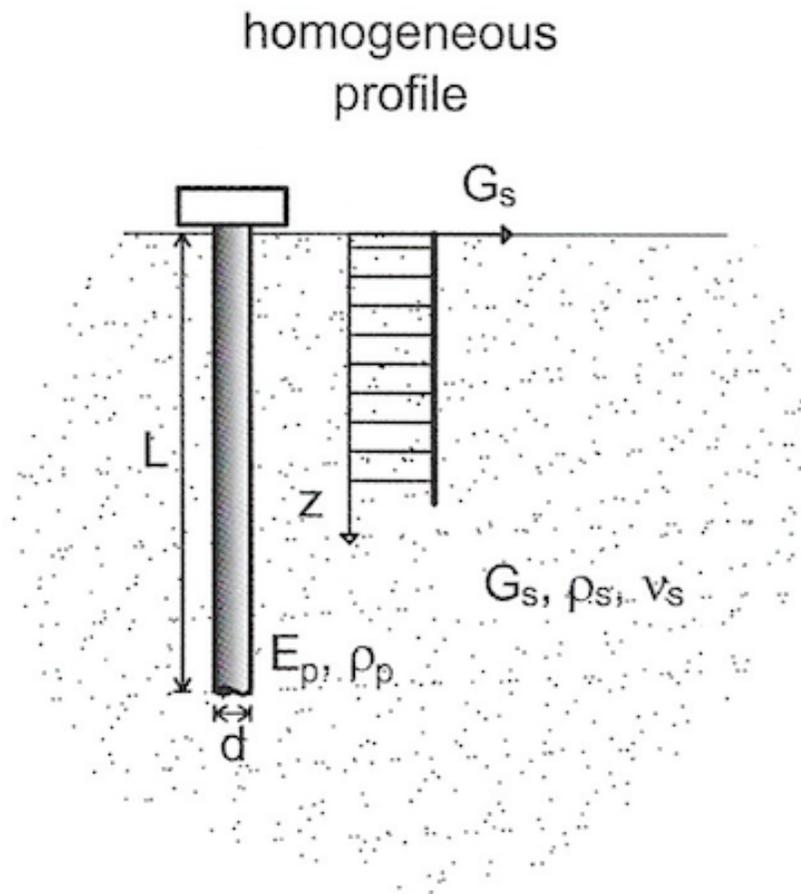
Nei casi in cui gli effetti di interazione cinematica siano considerati importanti, devono essere motivate le assunzioni di calcolo adottate e i criteri di sovrapposizione o meno di tali effetti con quelli inerziali. **E' opportuno che la valutazione degli effetti dovuti all'interazione cinematica sia effettuata per le costruzioni di Classe d'uso III e IV, per sottosuoli tipo D o peggiori, per valori di  $a_g > 0,25g$  e in presenza di elevati contrasti di rigidezza al contatto tra strati contigui di terreno.**

.....

## DEFINIZIONE DEL PROBLEMA



## TERRENO OMOGENEO



$$M = E_p I_p \left( \frac{1}{R} \right)_p = 2 E_p I_p \frac{\varepsilon_p}{d}$$

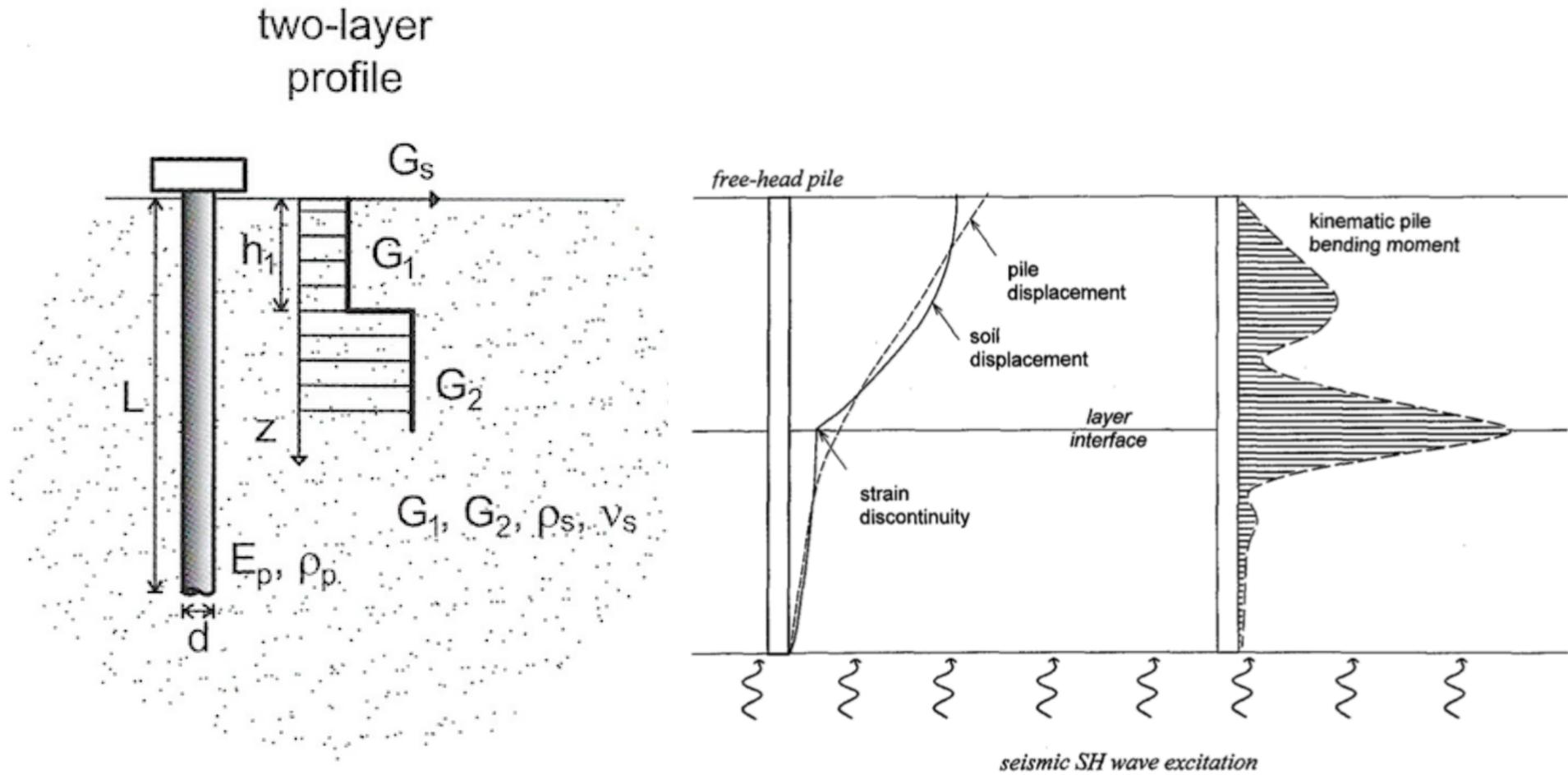
ipotesi più semplice [Margason, 1975]:

$$\left( \frac{1}{R} \right)_p = \left( \frac{1}{R} \right)_s$$

$$\left( \frac{1}{R} \right)_s = \frac{a(z) \rho_s}{G_s}$$

**Attenzione! Non si può utilizzare in terreni stratificati. Non “converge”.**

## TERRENO COMPOSTO DA DUE STRATI



## MODELLO DI DOBRY E O'ROURKE [1983]

### **Ipotesi del modello:**

- **ogni strato è elastico lineare, omogeneo ed isotropo;**
- **entrambi gli strati sono spessi abbastanza da trascurare gli effetti del contorno;**
- **il palo è lungo, verticale ed elastico lineare;**
- **l'interfaccia tra palo e terreno è continua e bilaterale;**
- **Il terreno è soggetto ad uno stato di tensione uniforme e pari a  $\tau$ , quindi  $\gamma_1 = \tau/G_1$  e  $\gamma_2 = \tau/G_2$ ;**
- **vale l'ipotesi di piccoli spostamenti.**

## SOLUZIONE DEL MODELLO DI DOBRY E O'ROURKE [1983]

Modellando il palo come una trave alla Winkler (BWF), con  $k_1 = 3G_1$  e  $k_2 = 3G_2$ , si ottiene:

$$M \cong 1.86 (E_p I_p)^{3/4} G_1^{1/4} \gamma_1 F$$

$$F = \frac{(1 - c^{-4})(1 + c^3)}{(1 + c)(c^{-1} + 1 + c + c^2)}$$

$$c = \left( \frac{G_2}{G_1} \right)^{1/4}$$

**Attenzione! Modellazione statica di un fenomeno dinamico.**

---

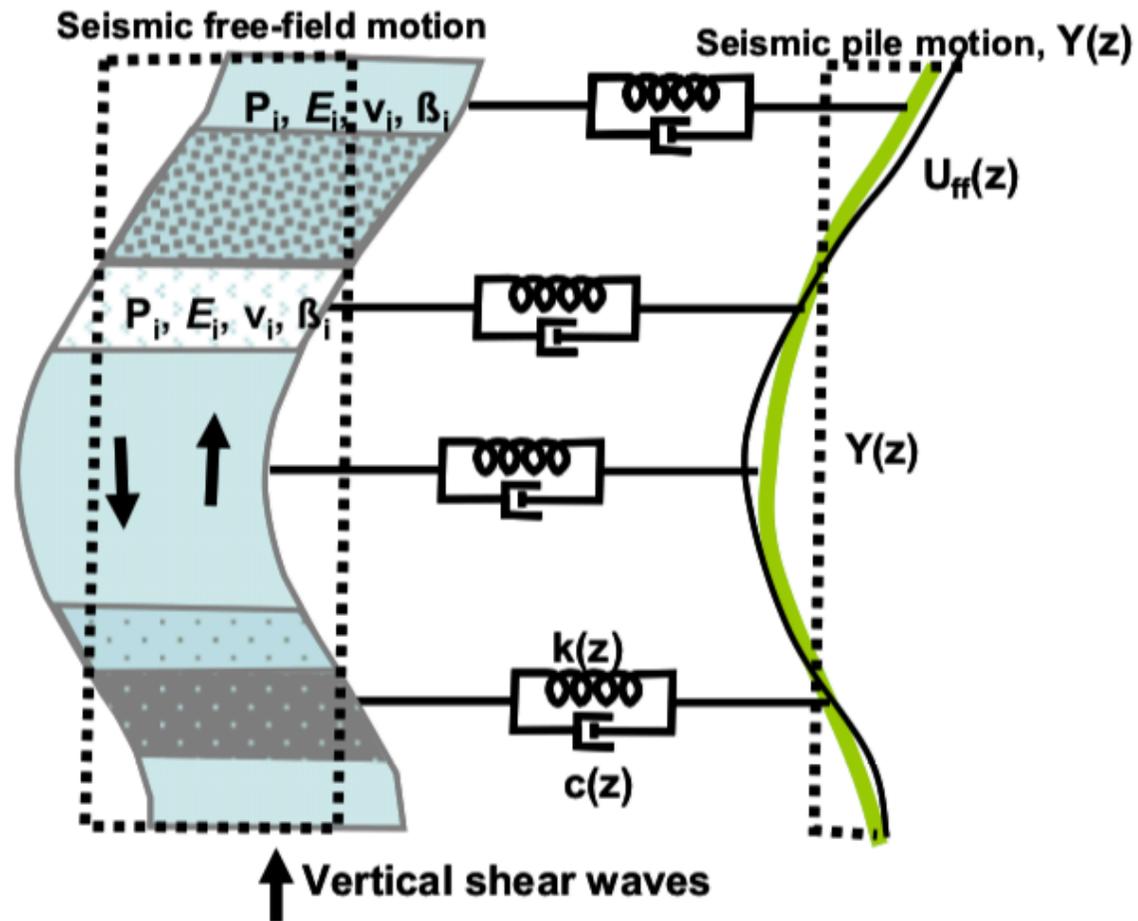
## SOLUZIONE DEL MODELLO DI DOBRY E O'ROURKE [1983]

Per definire  $\gamma_1$  si può:

- effettuare un'analisi di risposta sismica locale;
- utilizzare l'espressione [Seed & Idriss, 1982]

$$\gamma_1 = \frac{r_d \rho_1 H_1 a_{max,s}}{G_1}$$

**MODELLO DI NIKOLAU et Al. [2001]**  
**Modello dinamico di trave alla winkler (BDWF)**



**SOLUZIONE DEL MODELLO DI NIKOLAU et Al. [2001]**  
**Modello dinamico di trave alla winkler (BDWF)**

**Il momento flettente all'interfaccia tra i due strati di diversa rigidezza è dato dalla seguente relazione:**

$$M \cong 0.042 \tau_c d^3 \left(\frac{L}{d}\right)^{0.30} \left(\frac{E_p}{E_1}\right)^{0.65} \left(\frac{V_{s2}}{V_{s1}}\right)^{0.50}$$

$\tau_c$  è il massimo sforzo di taglio dovuto al moto free-field all'interfaccia, determinabile mediante analisi RSL o con la relazione

$$\tau_c = a_{max,s} \rho_1 H_1$$

**SOLUZIONE DEL MODELLO DI NIKOLAU et Al. [2001]  
Modello dinamico di trave alla winkler (BDWF)**

**Il metodo non considera:**

- **Lo spessore degli strati;**
- **L'influenza dello smorzamento del terreno fissato pari al 10%**

**MODELLO DI MYLONAKIS [2001]  
Miglioramenti rispetto a Dobry e O'Rourke**

- **Strati di dimensioni finite**
- **L'azione non è più statica, ma dinamica (armonica)**
- **È considerato lo smorzamento radiante e quello del materiale**

## SOLUZIONE DEL MODELLO DI MYLONAKIS [2001]

Il momento flettente all'interfaccia tra i due strati di diversa rigidezza è dato dalla seguente relazione:

$$M = \frac{(E_p I_p)(\varepsilon_p/\gamma_1)\phi}{r}$$

Trasmissibilità statica

$$\left(\frac{\varepsilon_p}{\gamma_1}\right)_{st} = \frac{1}{2} c^{-3} (c-1)(1+c^2-c) \left\{ \left[ 3 \left(\frac{k_1}{E_p}\right)^{1/4} \left(\frac{h_1}{d}\right) - 1 \right] c(c-1) \right\} \left(\frac{h_1}{d}\right)^{-1}$$

in cui:  $k_1 = \delta E_1$ ,  $\delta \cong 2$ ,  $\phi \cong 1.32$

## SOLUZIONE DI DI LAORA, MANDOLINI & MYLONAKIS [2012]

Il momento flettente all'interfaccia tra i due strati di diversa rigidezza è dato dalla seguente relazione:

$$M = \frac{(E_p I_p)(\varepsilon_p/\gamma_1)\phi}{r}$$

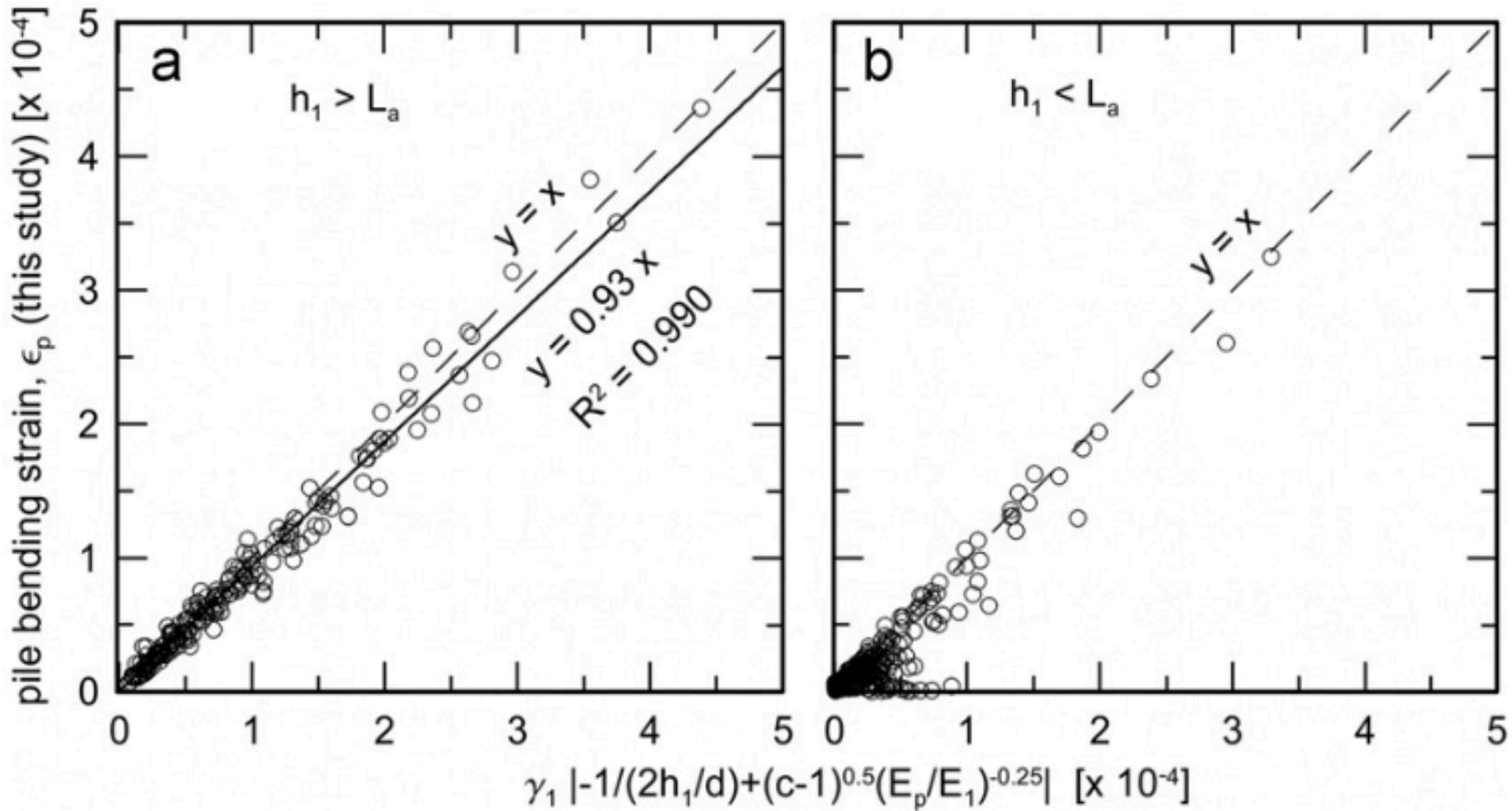
Trasmissibilità statica

$$\frac{\varepsilon_p}{\gamma_1} = \chi \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{h_1}{D} \right)^{-1} + \left( \frac{E_p}{E_1} \right)^{-0.25} (c-1)^{0.5} \right]$$

in cui:  $\chi = 0.93$ ,  $\phi \cong 1$  ( $< 1.25$ )

SOLUZIONE DI DI LAORA, MANDOLINI & MYLONAKIS [2012]

ANSYS



# SOLUZIONI NUMERICHE: CODICE DI CALCOLO KIN-SP

## **KIN**ematic analysis of a **S**ingle **P**ile

### IPOTESI DEL MODELLO

1. Il palo è una trave elastica discretizzata in n conci
2. Ogni concio è soggetto ad uno sforzo orizzontale uniforme
3. Lo sforzo all'interfaccia è normale all'asse del palo
4. Il terreno a contatto con il palo è elastico lineare
5. In FF si ha una deformazione che è ricavata da una RSL-NL (ONDA)
6. Il modulo elastico del terreno è quello relativo ad una deformazione del 65% di quella massima calcolata nella analisi di RSL
7. Lo spostamento del terreno è calcolato con le relazioni di Mindlin (1936) – valide in caso statico

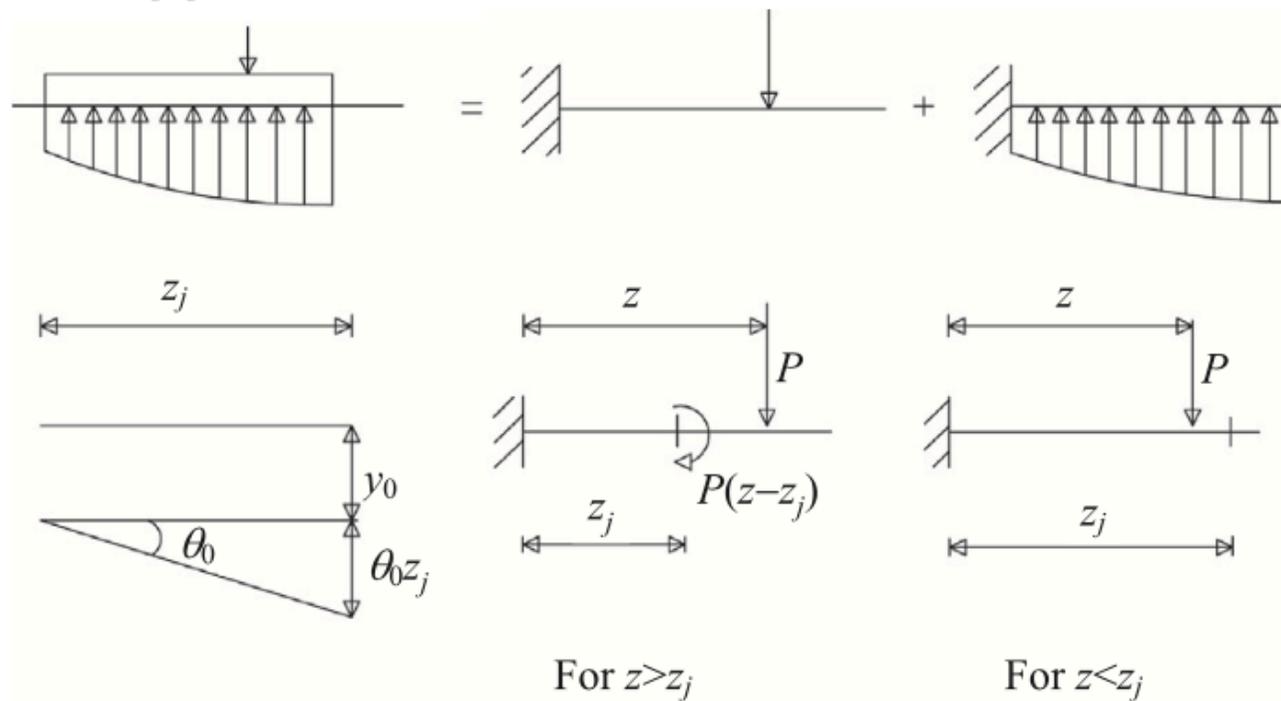
## MATRICE DI DEFORMABILITA' DEL PALO

$$h_{ij} = \frac{z_i^3}{3E_p I_p} + \frac{z_i^2(z_j - z_i)}{2E_p I_p} \quad (z_i \leq z_j)$$

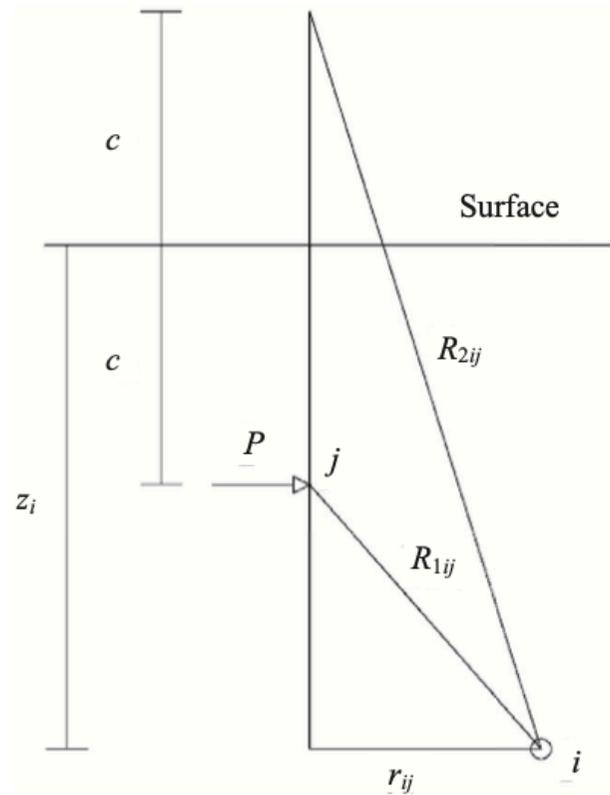
$$\{\Delta y\} = -\mathbf{H}\{\Delta P_p\} + \Delta y_0 + \Delta\theta_0\{z\}$$

$$h_{ij} = \frac{z_j^3}{3E_p I_p} + \frac{z_j^2(z_i - z_j)}{2E_p I_p} \quad (z_i > z_j)$$

$$\{\Delta P_p\} = \{\Delta p\}(tD)$$



## MATRICE DI DEFORMABILITA' DEL TERRENO



$$b_{ij} = \frac{1 + \nu}{8\pi E_s(1 - \nu)} \left[ \frac{3 - 4\nu}{R_{1ij}} + \frac{1}{R_{2ij}} + \frac{2cz}{R_{2ij}^3} + \frac{4(1 - \nu)(1 - 2\nu)}{R_{2ij} + z + c} \right]$$

$$\{\Delta s\} = \mathbf{B}\{\Delta P_s\} + \{\Delta x\}$$

$$\{\Delta P_s\} = \{\Delta p_s\}(tD)$$

$\{\Delta x\}$  vettore degli spostamenti di FF

## RELAZIONE TRA $\{\Delta P_p\}$ E $\{\Delta P_s\}$

$$\{\Delta P_p\} = \{\Delta P_s\} + \mathbf{M}\{\Delta \ddot{y}\} + \mathbf{C}(\{\Delta \dot{y}\} - \{\Delta \dot{x}\})$$

$\mathbf{M}$  è la matrice (diagonale) delle masse dei conci

$\mathbf{C}$  è la matrice (diagonale) dello smorzamento di radiazione pari a  $5\rho_s V_s D t$  (da Kaynia, 1988)

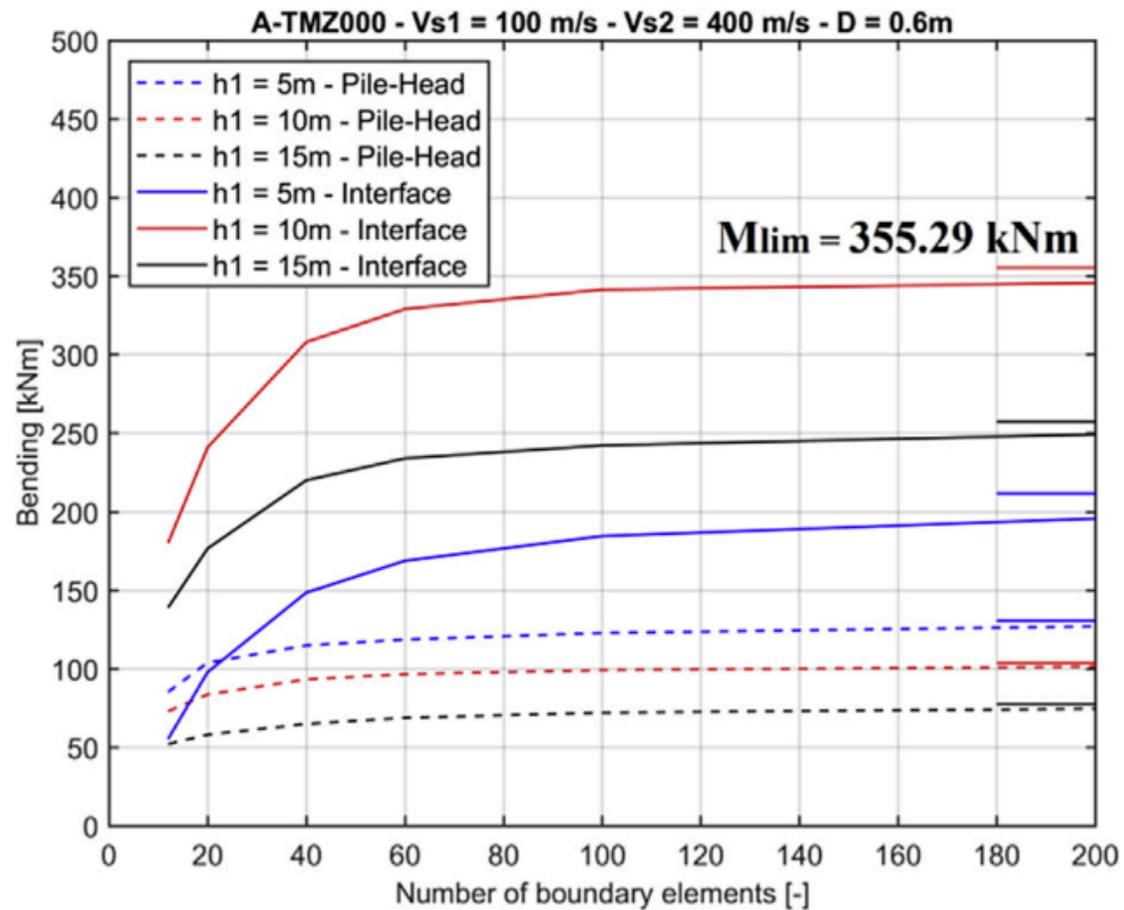
## OTTENENDO....

$$-\mathbf{H}[\{\Delta P_s\} + \mathbf{M}\{\Delta \ddot{y}\} + \mathbf{C}(\{\Delta \dot{y}\} - \{\Delta \dot{x}\})] + \Delta y_0 + \Delta \theta_0 \{z\} = \mathbf{B}\{\Delta P_s\} + \{\Delta x\}$$

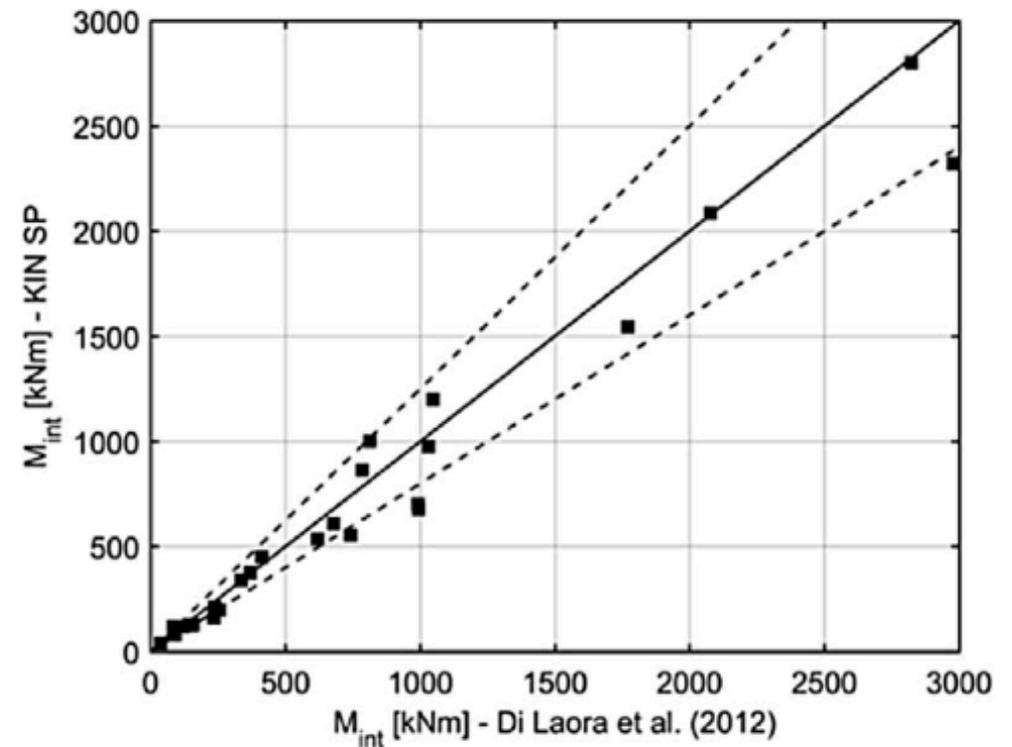
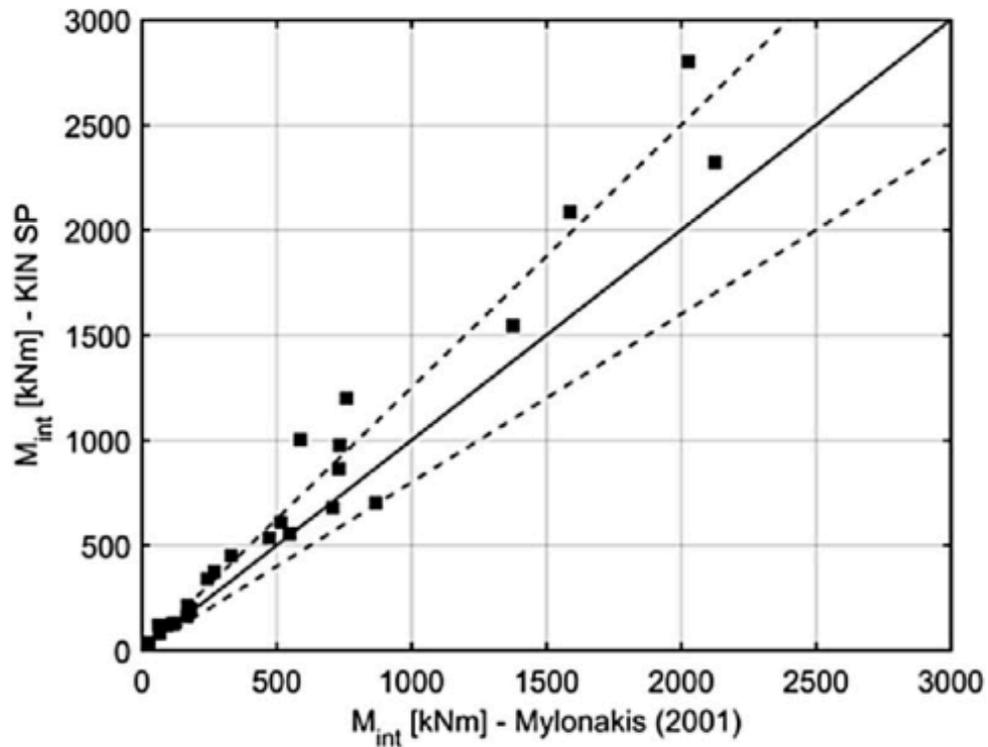
## E QUINDI ...

$$\begin{aligned} & \left( \mathbf{B} + \mathbf{H} + \frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{HMB} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{HCB} - \Delta y_0 - \Delta \theta_0 \{z\} \right) \{\Delta P_s\} \\ & = - \left( \frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{HM} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{HC} + 1 \right) \{\Delta x\} + \mathbf{HC} \{\Delta \dot{x}\} \\ & \quad + \left( \frac{4}{\Delta t} \mathbf{HM} + 2\mathbf{HC} \right) \{\dot{y}\} + 2\mathbf{HM} \{\ddot{y}\} \end{aligned}$$

# INFLUENZA DEL NUMERO DI ELEMENTI



## CONFRONTO CON ALTRI METODI



## **INDAGINI !!!**

**Caratterizzazione dinamica del terreno**

**Definizione affidabile della rigidità alle  
piccole deformazioni**

**Definizione della non linearità/smorzamento  
del terreno**