

Progetto RELUIS – DPC 2005-2008

Assemblea annuale 2006

**SVILUPPI DELL'INGEGNERIA SISMICA A TRENT'ANNI DAL TERREMOTO DEL FIULI**

La ricerca applicata in Italia

Risultati del primo anno di progetto

*Udine – 22-23 novembre 2006*



Linea di ricerca 6

Metodi innovativi per  
la progettazione di opere di sostegno e  
la valutazione della stabilità dei pendii

**Linea di ricerca 6.4 - FONDAZIONI PROFONDE**

Coordinatore: Armando Lucio Simonelli

**Attività I anno**

Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

## LR 6.4 - Unità operative

- Università del Sannio *Simonelli*
- Università della Calabria *Dente*
- Università di Catania *Maugeri*
- Università della Basilicata *Caputo*
- Seconda Università di Napoli *Mandolini*

Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

## Obiettivo principale

- L'obiettivo **principale** del progetto è l'individuazione di elementi da introdurre nelle normative in tema di **interazione cinematica** per fondazioni profonde.

Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

## Cronoprogramma

Argomento	Trimestri												
Inquadramento dello stato delle conoscenze													
Modellazione numerica di riferimento													
Definizione dei casi di studio													
Sperimentazione numerica estesa													
Individuazione elementi per normativa													

Importante: Sperimentazione su modello mediante tavola vibrante

Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

## 6.4 Fondazioni profonde - Rapporto Scientifico I Anno

...

### 3. Results

#### **Literature review**

3.1. Vertically loaded piled foundations

3.2. Horizontally loaded piles and piled foundations

3.3. Soil-structure interaction under seismic loads

#### **Numerical simulation**

3.4. Horizontally loaded piles and piled foundations

3.5. Soil-structure interaction under seismic loads

...

Premessa

Indice delle  
attività

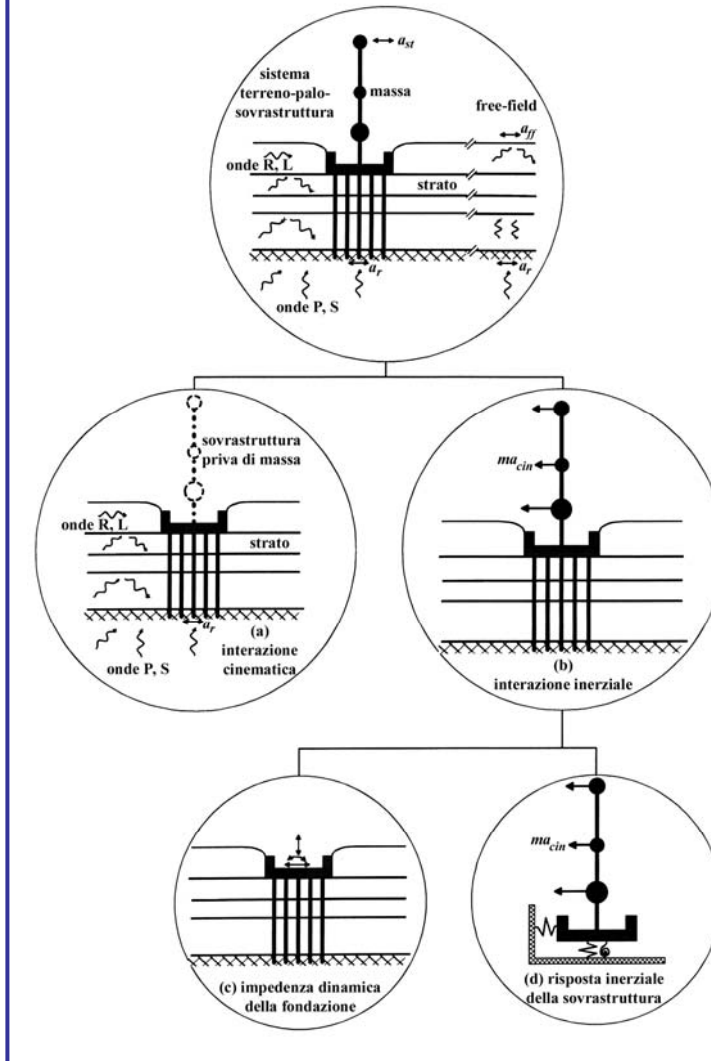
Pali sotto carichi  
orizzontali statici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

## Interazione sismica terreno-struttura (SSSI)



### Metodo delle sottostrutture

RISPOSTA SISMICA LOCALE

**INTERAZIONE CINEMATICA**

*sistema terreno – fondazione (elevazione  
priva di massa)*

*moto sismico al bedrock*

*spostamenti cinematici e sollecitazioni  
connesse*

**INTERAZIONE INERZIALE**

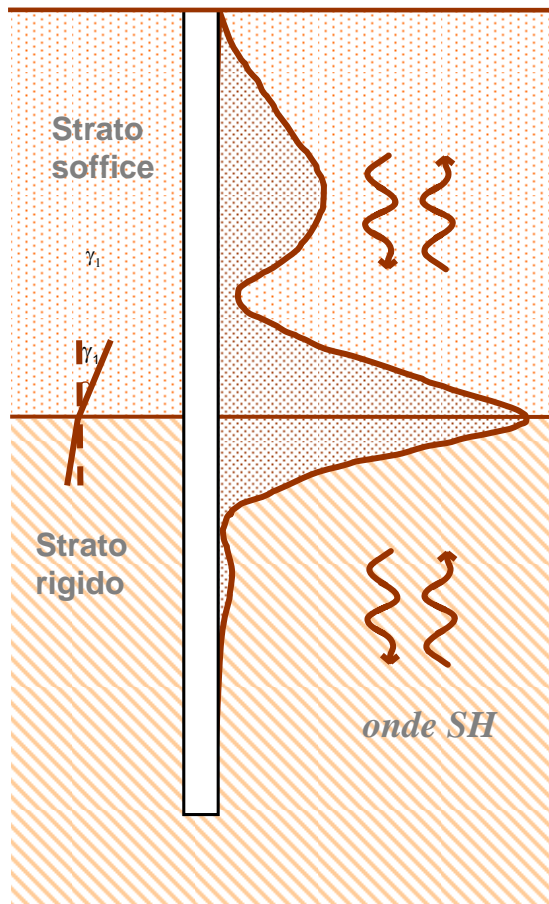
*Elevazione connessa a sistema terreno –  
fondazione privo di massa*

*Azione sismica: spostamenti cinematici*

*spostamenti inerziali e sollecitazioni in  
fondazione (superficiali)*

## Interazione sismica terreno-struttura (SSSI)

### Potenziali effetti dell' Interazione cinematica



**Danni** osservati nei pali di fondazione  
**a notevoli profondità**  
(tali da far escludere l'effetto  
dell'interazione inerziale)

**Momenti flettenti elevati**  
in corrispondenza di  
forti discontinuità meccaniche  
(**contrast** di rigidità) dei terreni  
lungo il fusto del palo  
(**anche in assenza di sovrastruttura**)

Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Premessa

Indice delle  
 attività

Pali sotto carichi  
 orizzontali statici

Modellazione  
 numerica di  
 riferimento

Pali sotto carichi  
 sismici

Modellazione  
 numerica di  
 riferimento

## Interazione Cinematica

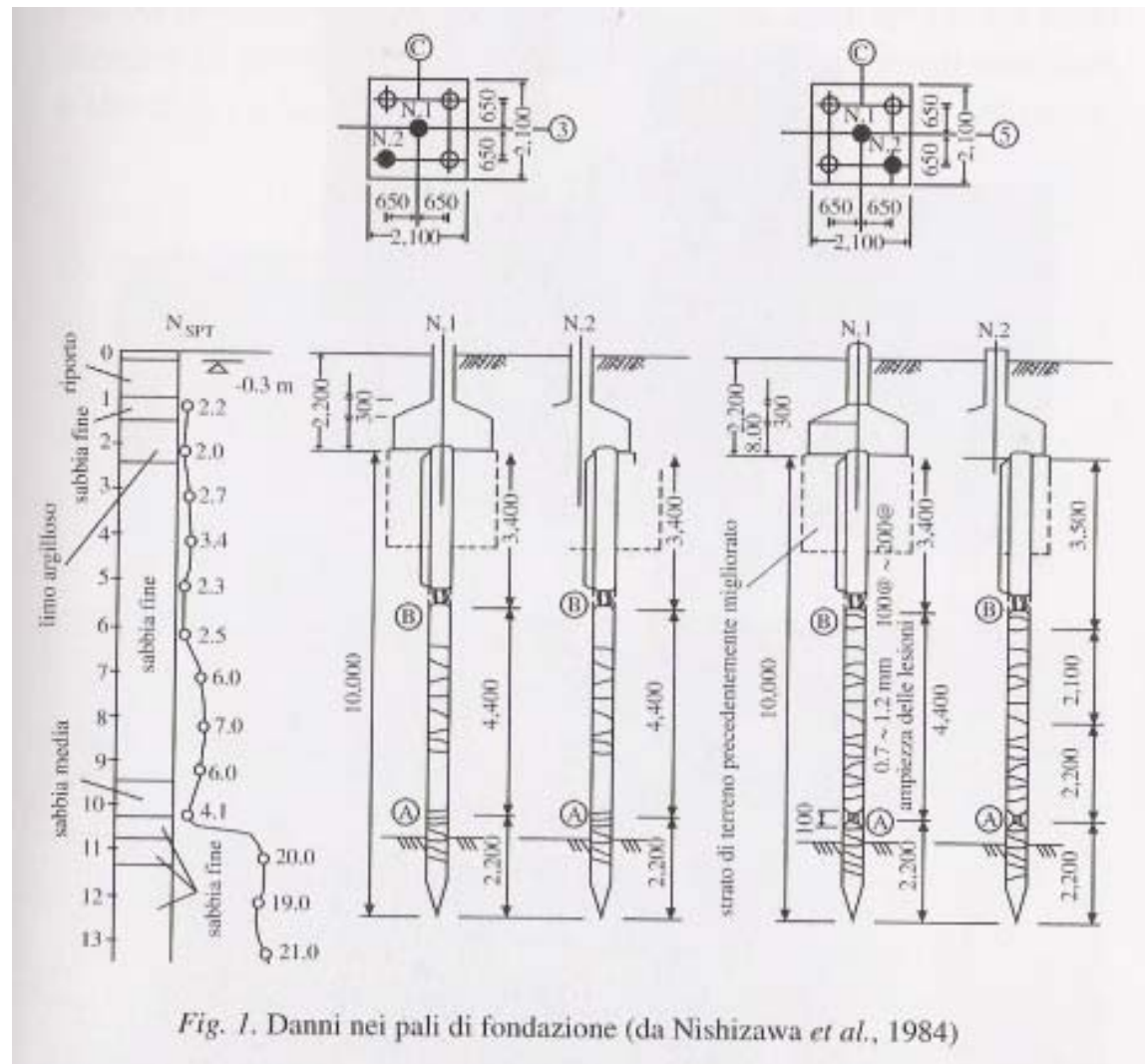


Fig. 1. Danni nei pali di fondazione (da Nishizawa *et al.*, 1984)

Terremoto di Niigata 1964



Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

## Interazione Cinematica



Fig. 2. Palo estratto dal terreno



Fig. 3. Danni riportati dal palo

*Terremoto di Niigata 1964*

# ALLEGATO 4

## 3 FONDAZIONI

### 3.3 Verifiche e criteri di dimensionamento

#### 3.3.2 *Pali e pozzi di fondazione*

I pali ed i pozzi di fondazione **devono essere progettati in modo da resistere ai seguenti due tipi di sollecitazione:**

- a) **forze inerziali**, trasmesse dalla sovrastruttura, da valutare secondo quanto indicato al punto 3.2
- b) **forze cinematiche**, derivanti dalla deformazione del terreno circostante in seguito al passaggio delle onde sismiche

# ALLEGATO 4

## 3 FONDAZIONI

I momenti flettenti di origine cinematica devono essere calcolati soltanto quando si verificano simultaneamente le seguenti condizioni:

- il profilo del terreno è di classe C, o peggiore,  
e contiene strati consecutivi con forti contrasti di rigidezza;
- la zona è a media o elevata sismicità.

I pali devono essere progettati in modo da rimanere in campo elastico.

Quando ciò non sia possibile,  
le sezioni in corrispondenza delle potenziali cerniere plastiche  
devono essere **progettate per un comportamento duttile.**

Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

## Interazione cinematica

### Quesiti primari ... ed obiettivi

1. **In quali situazioni è necessario valutare gli effetti dell'interazione cinematica**  
*(classe di sottosuolo, contrasto di rigidezza, sismicità dell'area)*
2. **Con quali strumenti si deve operare (nell'ottica del p.b.d.)**  
*(dalle analisi dinamiche .... ai metodi semplificati)*
3. **Confronto con azioni inerziali (ai fini del progetto del palo)**  
*(sincronismo degli effetti, condizioni di vincolo, sezione lungo il fusto e sezione in testa al palo)*

Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

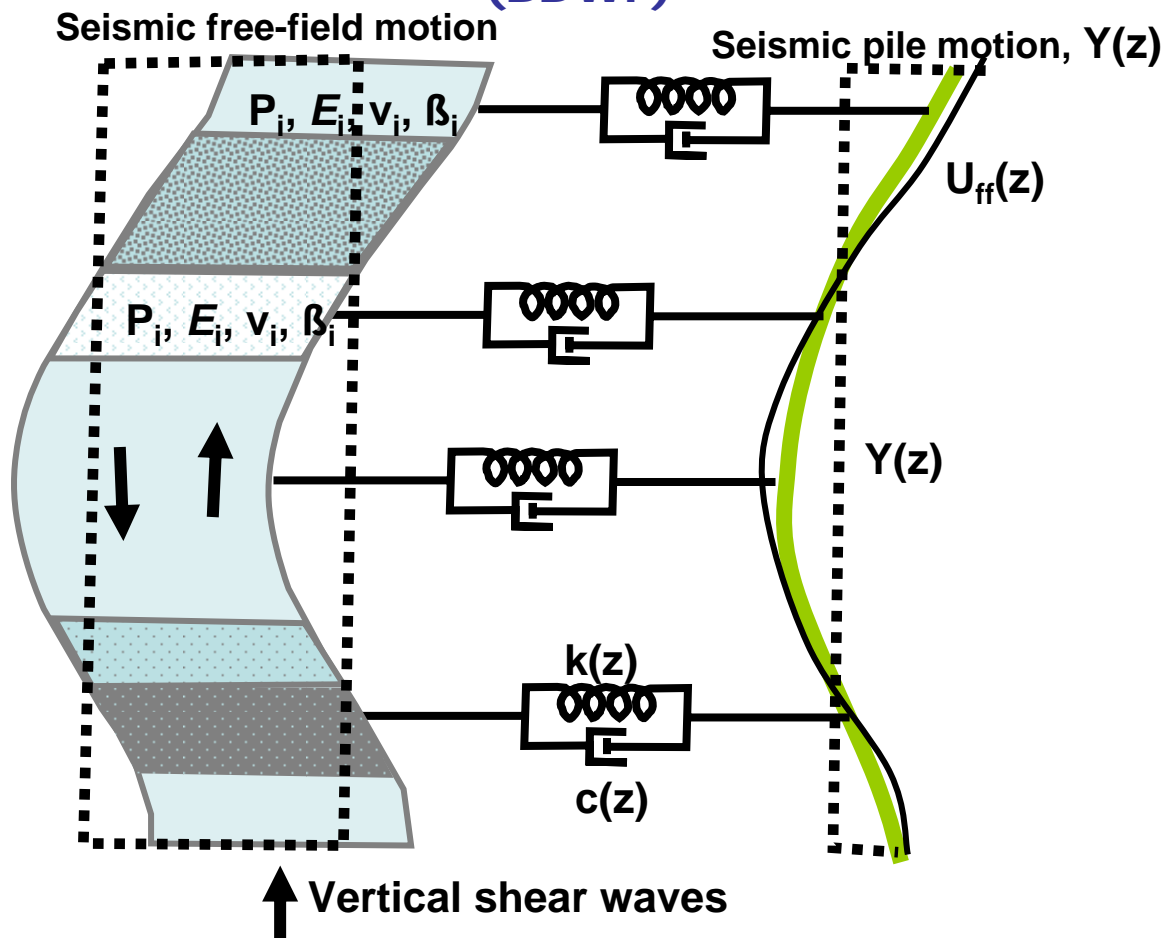
## Interazione sismica terreno-struttura (SSSI)

### Metodi di analisi per lo studio dell'interazione cinematica (SoA)

1. **Metodi semplificati**: il palo segue il moto di free-field del terreno. Solo per sottosuoli omogenei (Margason, 1977; NEHRP, 1997)
2. **Modelli alla Winkler (BDWF)**: l'interazione palo-terreno è schematizzata con un sistema di molle (lineari oppure non lineari) e smorzatori distribuiti lungo il fusto del palo (Flores-Berrones & Whitman, 1982; Kavvadas & Gazetas, 1993; Dobry & O'Rourke, 1983; Nikolaou et al., 2001)
3. **Approcci al continuo con tecniche FEM o BEM** (Kimura e Zeng, 2000; Kimura et al. 2000; Zeng e Kimura 2002; Wu e Finn, 1997; Bentley & El Naggar, 2000; Finn e Fujita, 2002)

## Interazione sismica terreno-struttura (SSSI)

### 2. Metodi di analisi per lo studio dell'interazione cinematica (BDWF)



Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

## Interazione sismica terreno-struttura (SSSI)

### Metodi di analisi per lo studio dell'interazione cinematica (BDWF): formule per il calcolo del momento all'interfaccia

Dobry & O'Rourke (1983)

$$M = 1.86 (E_p I_p)^{3/4} G_1^{1/4} \gamma_1 \mathcal{F} \quad \mathcal{F} = \frac{(c-1)(c^2-c+1)}{c^3}; \quad c = \left(\frac{G_2}{G_1}\right)^{1/4}$$

Nikolaou et al.(2001)

$$M = 0.042 \tau_c d^3 \left(\frac{L}{d}\right)^{0.3} \left(\frac{E_p}{E_1}\right)^{0.65} \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{0.5} \quad \tau_c = a_s \rho_1 h_1$$

## LR 6.4 - Modellazione numerica di riferimento

Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

### - **Modelli alla Winkler (BDWF)** LR 6.4

> approccio di Mylonakis (1997) e Nikolaou et al. (2001) vincolato all'ipotesi di linearità del palo e del terreno;

*possibilità di includere un oscillatore semplice per lo studio dell'interazione completa*

> approccio di Conte e Dente (1988, 1989) in cui si assume un comportamento non lineare ed isteretico del terreno (Ramberg&Osgood + Masing);

*possibilità di includere un oscillatore semplice per lo studio dell'interazione completa*

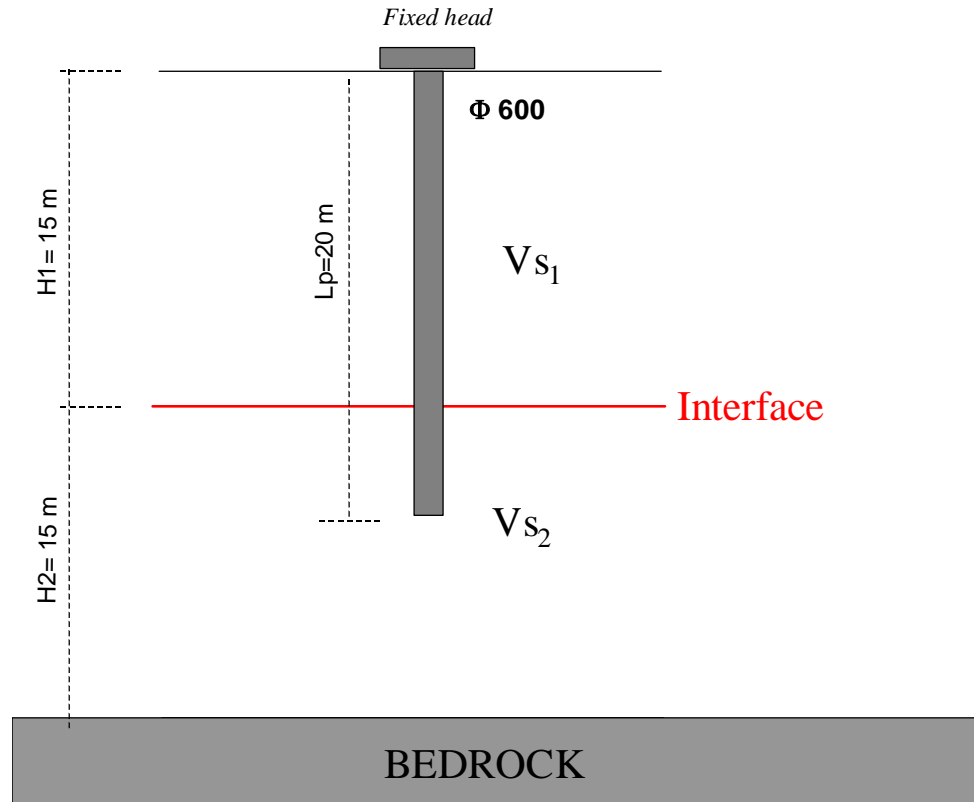
### - **Approcci al continuo** LR 6.4

> con tecniche FEM utilizzando i codici di calcolo ABAQUS 3D e VERSAT~3D (Wu e Finn, 1997)

> con tecniche BEM utilizzando i codici sviluppati presso UNICAL (Cairo, 2004; Cairo et al.2005; Cairo & Conte, 2006)



## LR 6.4 – Analisi numeriche dinamiche (BDWF) *Analisi "tipo"*



Vs1 m/s	Vs2 m/s	Vs2/Vs1	Vs,30 D	G1 KN/m2	G2 KN/m2	G2/G1
100	200	2	133	19000	76000	4
100	300	3	150	19000	171000	9
100	400	4	160	19000	304000	16

Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

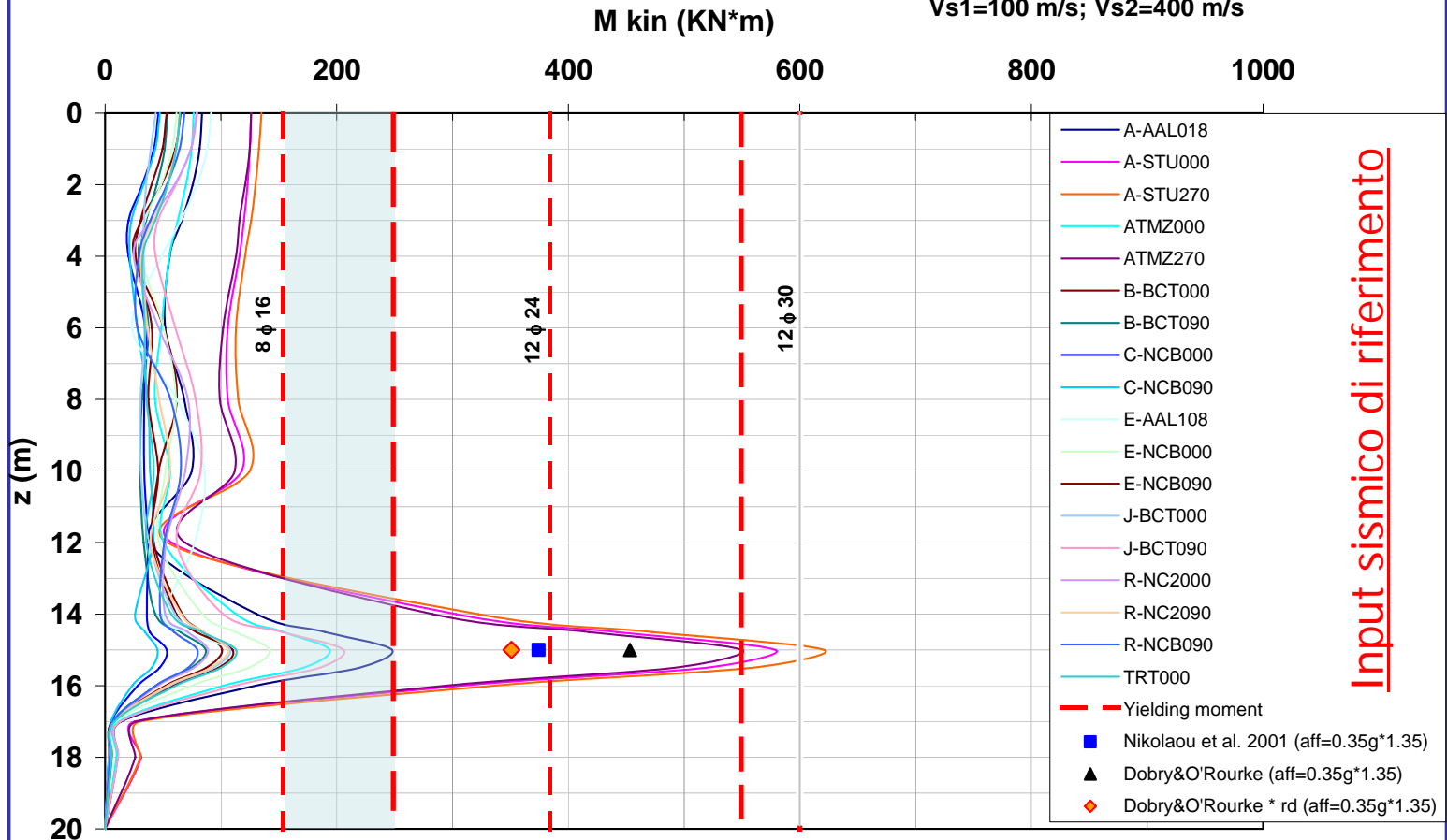
Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

## LR 6.4 – Analisi numeriche dinamiche (BDWF) Primi risultati

ZONA I ( $a_{gR}=0.35g$ ) - soil type D  
 $Vs1=100$  m/s;  $Vs2=400$  m/s



Input sismico di riferimento

Prime osservazione su:

- gli effetti della non linearità dei terreni
- gli effetti della plasticizzazione di una sezione del palo

Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

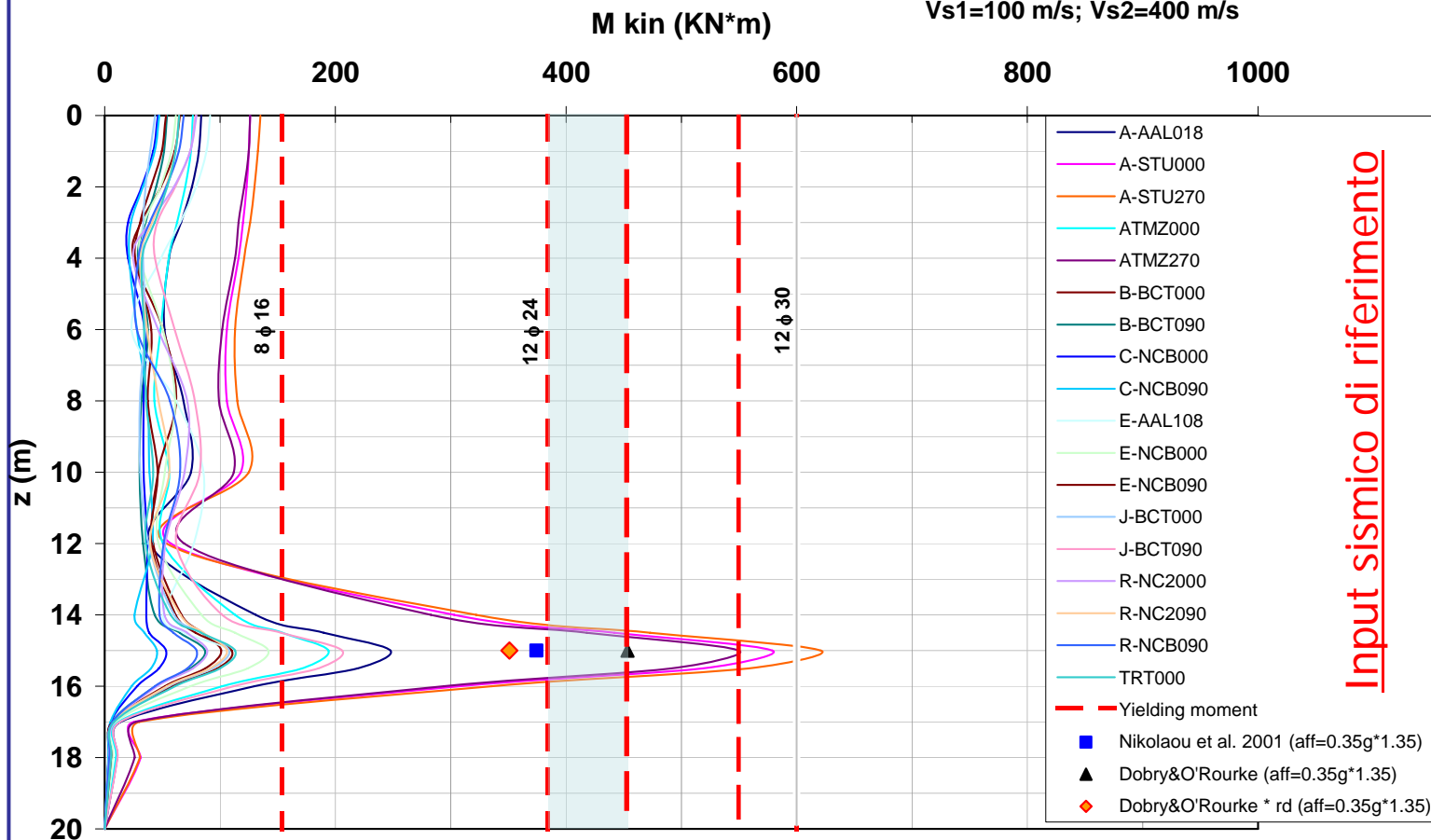
Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

## LR 6.4 – Analisi numeriche dinamiche (BDWF) Primi risultati

ZONA I ( $a_{gR}=0.35g$ ) - soil type D  
 $Vs1=100$  m/s;  $Vs2=400$  m/s



Input sismico di riferimento

Prime osservazione su:

- gli effetti della non linearità dei terreni
- gli effetti della plasticizzazione di una sezione del palo

Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

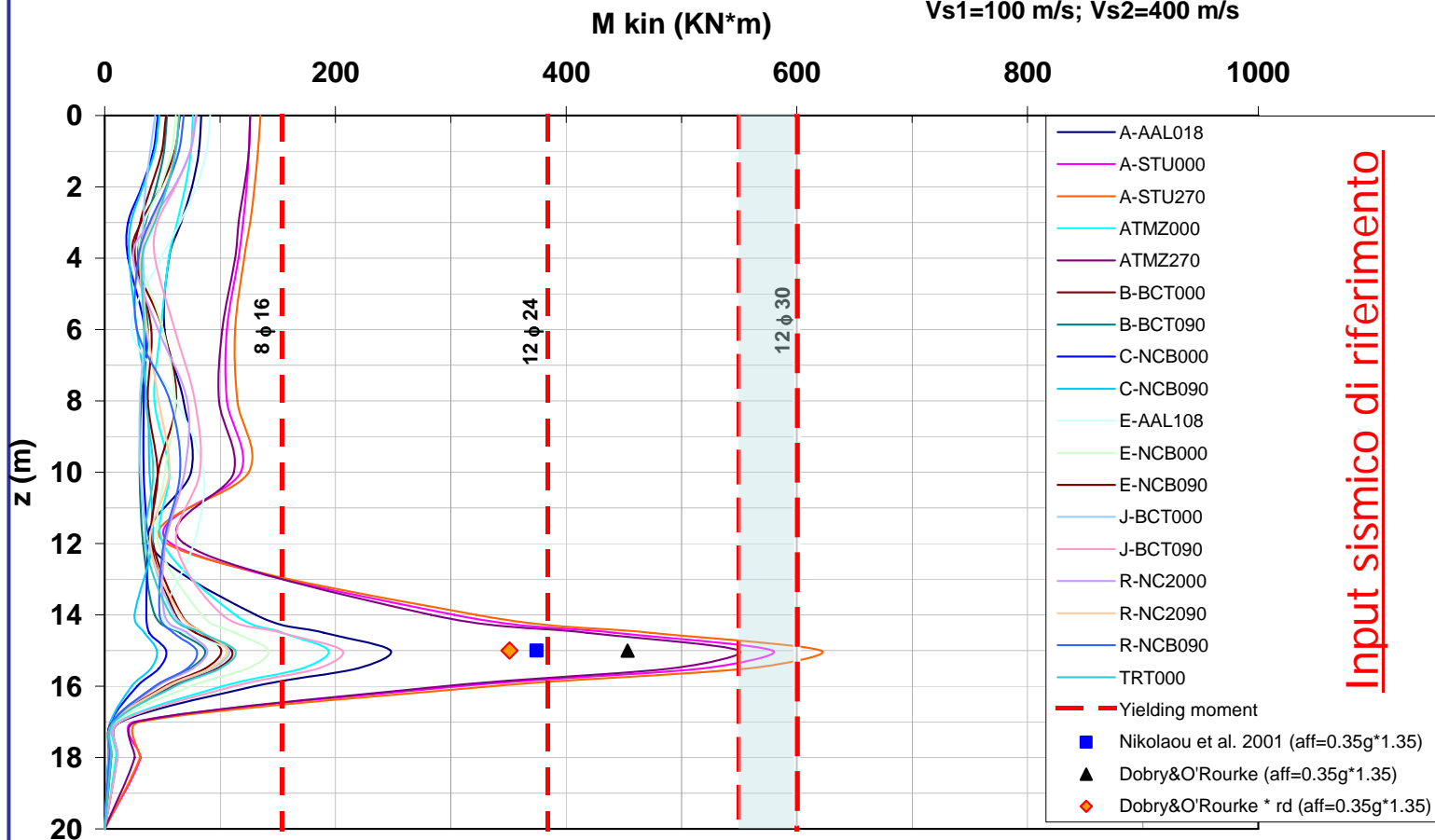
Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

## LR 6.4 – Analisi numeriche dinamiche (BDWF) Primi risultati

ZONA I ( $a_{gR}=0.35g$ ) - soil type D  
 $Vs1=100$  m/s;  $Vs2=400$  m/s



Input sismico di riferimento

Prime osservazione su:

- gli effetti della non linearità dei terreni
- gli effetti della plasticizzazione di una sezione del palo

## I anno - Prime osservazioni e spunti di riflessione

- Le analisi dinamiche effettuate per sottosuoli stratificati, sembrano evidenziare momenti da interazione cinematica importanti, anche in situazioni più generali di quelle attualmente indicate dalle Norme (rapporto delle rigidezza degli strati, classe di sottosuolo)

### *Conseguenze:*

- Imposizione di “comportamento elastico” del palo, e quindi progetti molto gravosi (posizione delle normative più recenti)  

ovvero
- Ammissibilità della plasticizzazione di una sezione del palo, e conseguente studio della fondazione modificata ?
- Necessità del conforto di dati sperimentali in vera grandezza (sic!) ovvero dell’ausilio della sperimentazione su modelli, per verificare l’attendibilità dei modelli di analisi “attualmente” utilizzati, ovvero identificarne i limiti e procedere nella direzione di analisi più approssimate

Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Premessa

Indice delle  
attività

Pali sotto carichi  
orizzontali statici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

Pali sotto carichi  
sismici

Modellazione  
numerica di  
riferimento

*Grazie dell'attenzione*