



PARMA, 11 APRILE 2012

*Verifiche sismiche dell'argine destro del fiume Po*

## **AMPLIFICAZIONE SISMICA LOCALE**

**&**

## **PROVE DINAMICHE IN CENTRIFUGA**

*Prof. Ing. Vincenzo Fioravante*

*Dott. Ing. Daniela Giretti*

### **AMPLIFICAZIONE SISMICA LOCALE**

**PARMA  
11.4.2012**

SEZIONI ANALIZZATE: dalla 61\_FE alla 107\_RO (43 siti)

sequenza litostratigrafica caratteristica di ogni sito definita sulla base del modello geologico dei terreni di fondazione delle arginature elaborato dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna e dei risultati della campagna di prove geotecniche in sito

#### **3 GRUPPI LITOLOGICI PRINCIPALI**

(A-AL) argille, argille limose e argille con limo

(L-LA) limi, limi argillosi e limi con argilla

(S-SL) sabbie, sabbie limose e sabbie con limo

Alcune sequenze litostratigrafiche ed i *profili di rigidezza* sono simili e le sezioni corrispondenti sono state accorpate:

- 13 sequenze tipo nella macro-area Ferrara
- 6 sequenze tipo nella macro-area Ro

**RIGIDEZZA DEL TERRENO da  $V_S$**

Macro-aree di Ferrara e Ro: 9 prove down-hole (DH e SCPT) alcune delle quali eseguite a partire dalla sommità arginale, spinte fino alla massima profondità di 50 m da p.c.

I risultati di tali prove sono stati *integrati* con i risultati di 30 prove SCPTu realizzate dalla Provincia di Ferrara, in ambiti deposizionali del tutto analoghi:

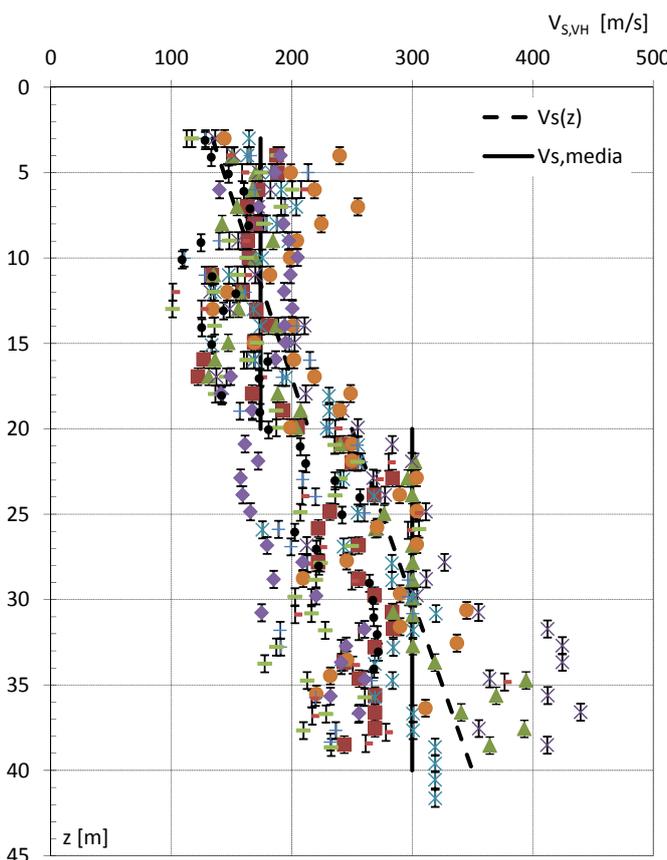
3 prove in località di Ravalle, Casaglia e Francolino

11 prove realizzate lungo il Canale Boicelli

6 prove lungo il Po di Volano nella città di Ferrara

10 prove realizzate lungo il Po di Volano nelle località di Contrapò, Fossalta, Sabbioncello, Migliarino e Ostellato, in corrispondenza dei ponti di attraversamento

Profondità indagate  $z = 35 - 45$  da p.c.



**Tipologia prevalente**

**Terreni fini  $z < 10-15$ m**

$V_S < 200$  m/s

**T. sabbiosi  $15\text{m} < z < 50\text{m}$**

$200-250$  m/s  $< V_S < 400$  m/s

$$G_0 = \rho V_S^2 \approx a(\sigma'_v)^{0.5}$$

t. omogenei  $V_S$  cresce con la radice quarta di  $z$

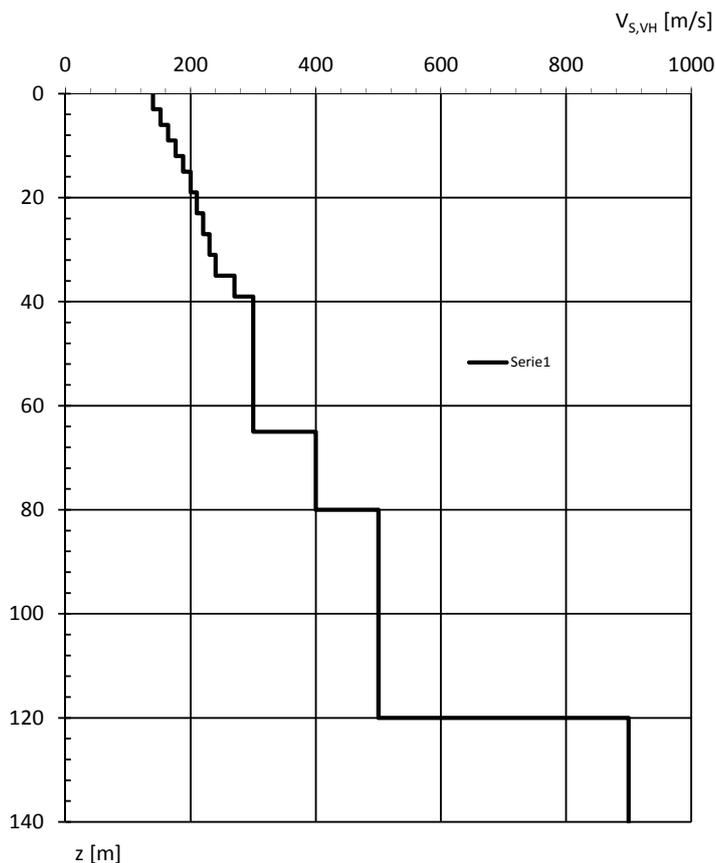
**Interpolazioni lineari:**

**per i terreni fini**

$$V_S(z) = 120 + 4.7 * z \text{ (m/s)}$$

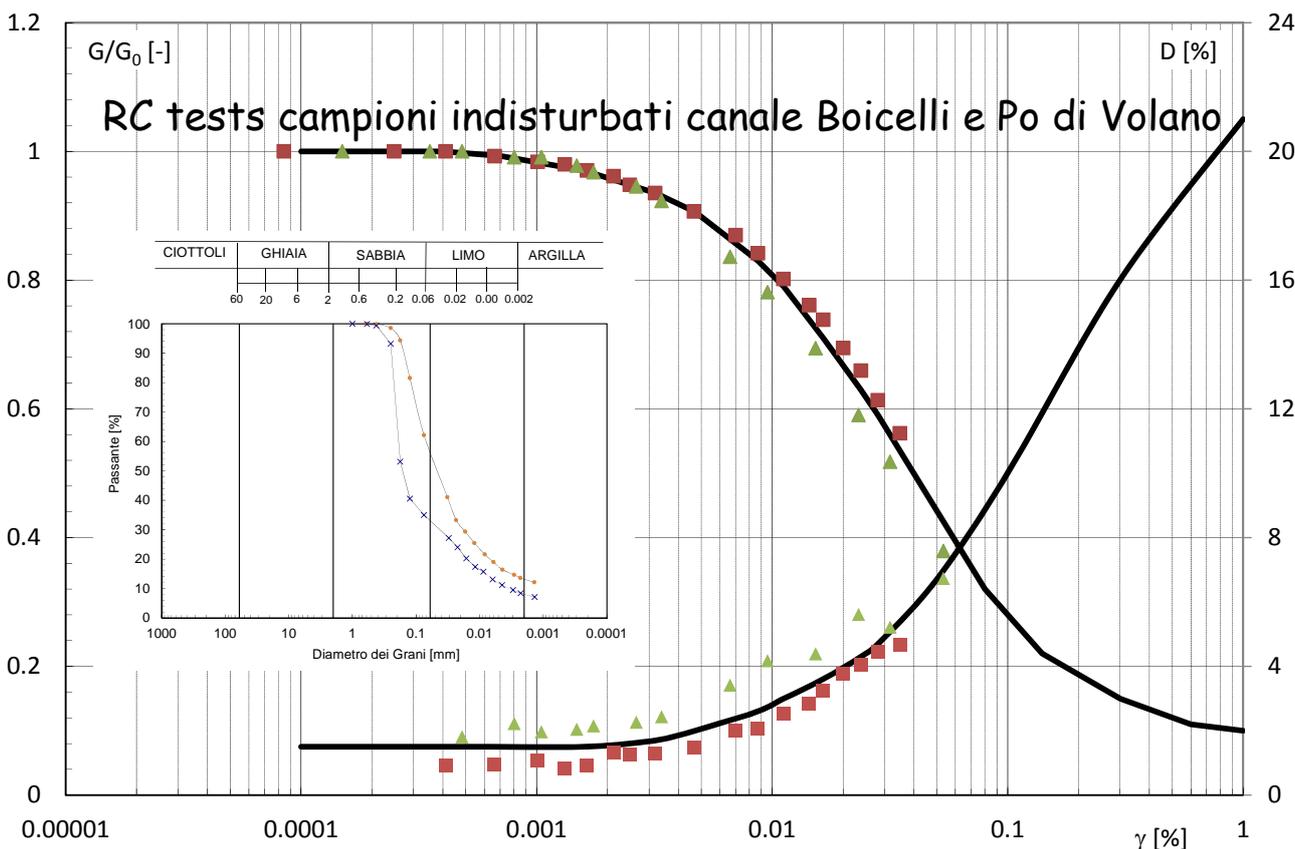
**per le sabbie**

$$V_S(z) = 150 + 5.0 * z \text{ (m/s)}$$

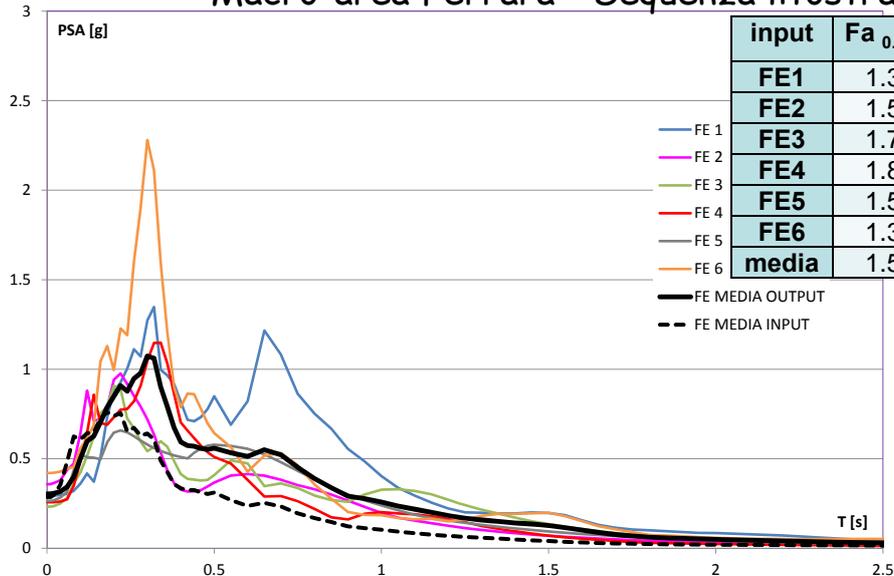


**$z > 50m$**   
 risultati di CH profonda  
 150 m, realizzata in  
 località Casaglia (N-O di  
 Ferrara) per INGV

a  $z = 120 m$  da p.c. locale  
 $V_s > 800 m/s$   
 substrato sismico



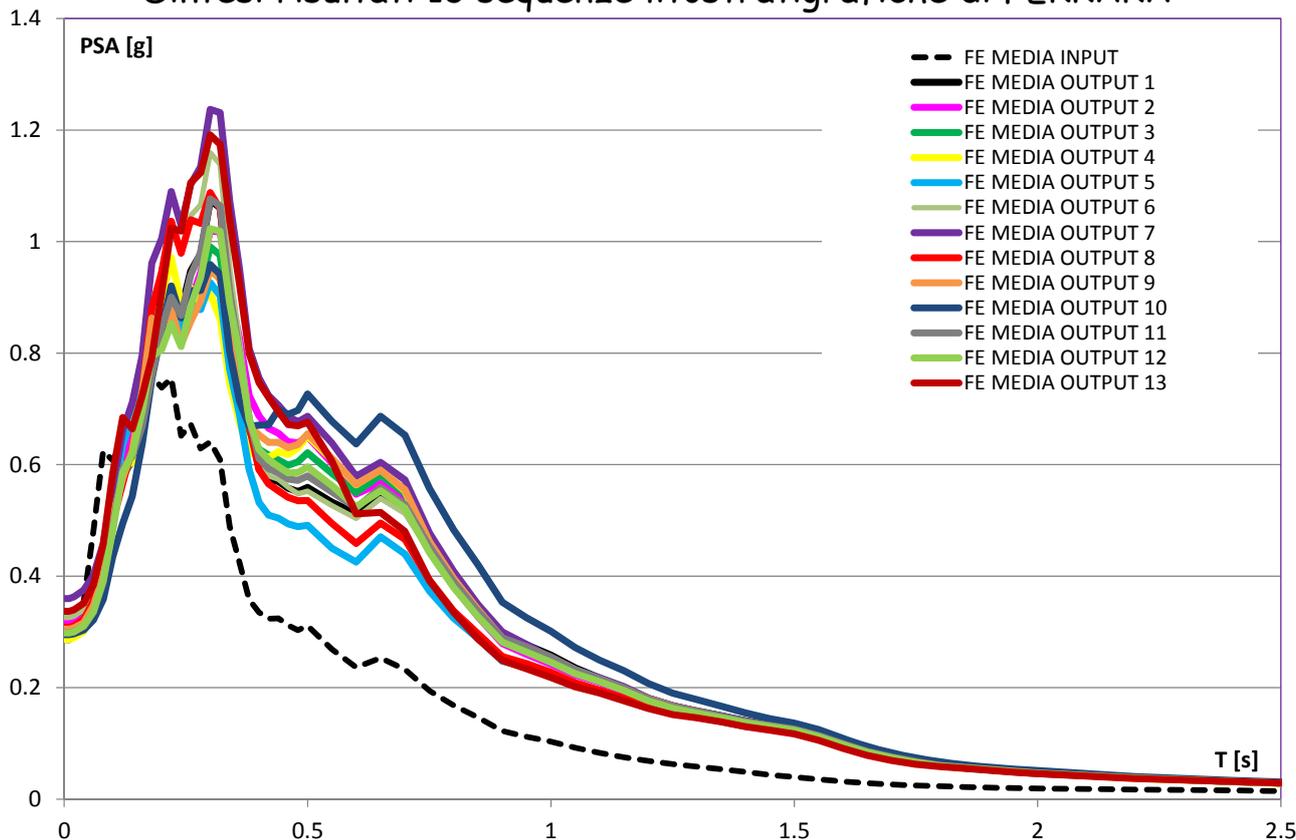
## Macro-area Ferrara - Sequenza litostratigrafica n.1



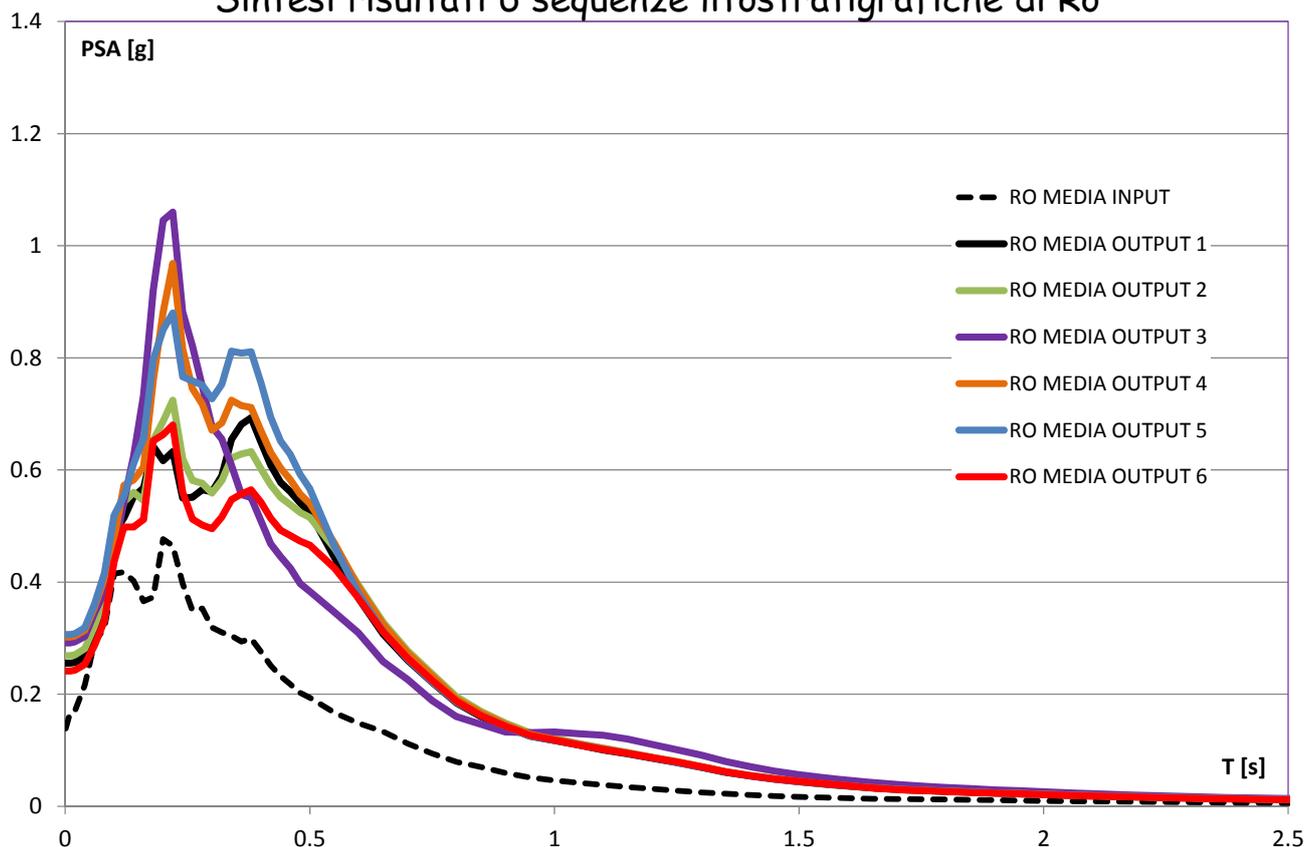
input	Fa <sub>0.1-0.5</sub>	Fa <sub>0.5-1.5</sub>	FH <sub>0.1-0.5</sub>	FH <sub>0.5-1.5</sub>
FE1	1.35	2.18	1.27	2.07
FE2	1.59	2.48	1.41	2.47
FE3	1.77	2.75	1.58	2.71
FE4	1.86	2.66	1.70	2.60
FE5	1.50	2.30	1.35	2.25
FE6	1.36	2.29	1.23	2.17
media	1.57	2.44	1.42	2.38

input	PGA	PGV	PGD	d <sub>90</sub>	I <sub>a</sub>	SI	SI <sub>05</sub>	SI <sub>15</sub>	P <sub>d,90</sub>
	[g]	[m/s]	[m]	[s]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[ms]
FE1	0.29	0.26	0.04	12.21	1.67	1.10	0.1543	0.6609	0.29
FE2	0.36	0.19	0.03	2.97	0.38	0.51	0.0988	0.2999	0.36
FE3	0.23	0.18	0.02	3.98	0.41	0.69	0.0959	0.4189	0.23
FE4	0.26	0.17	0.02	3.63	0.54	0.51	0.1407	0.2865	0.26
FE5	0.26	0.22	0.03	1.48	0.27	0.62	0.0984	0.3757	0.26
FE6	0.42	0.27	0.04	3.96	1.94	0.82	0.2060	0.3796	0.42

## Sintesi risultati 13 sequenze litostratigrafiche di FERRARA



## Sintesi risultati 6 sequenze litostratigrafiche di Ro



Sequenza litostratigrafica	Sezioni FE	Fa 0.1-0.5	Fa 0.5-1.5	FH 0.1-0.5	FH 0.5-1.5	gruppo
1	63, 64, 65, 67	1.57	2.44	1.42	2.38	FE1
2	66, 71	1.63	2.41	1.46	2.37	FE1
3	82, 83	1.56	2.47	1.41	2.42	FE1
4	73, 85, 86, 87, 88, 89	1.52	2.45	1.38	2.41	FE1
5	68	1.45	2.12	1.36	2.03	FE2
6	74, 75	1.66	2.41	1.52	2.35	FE3
7	61, 62, 79, 84	1.86	2.53	1.68	2.50	FE4
8	69	1.62	2.20	1.48	2.13	FE3
9	70	1.56	2.47	1.41	2.43	FE1
10	72	1.60	2.88	1.41	2.83	FE5
11	76, 80	1.58	2.44	1.42	2.38	FE1
12	81	1.56	2.39	1.41	2.34	FE1
13	90	1.80	2.22	1.62	2.19	FE6

Sequenza litostratigrafica	Sezioni RO	Fa 0.1-0.5	Fa 0.5-1.5	FH 0.1-0.5	FH 0.5-1.5	gruppo
1	98, 103, 105, 107	1.96	2.58	1.77	2.58	RO1
2	94, 95, 101	1.92	2.67	1.76	2.67	RO1
3	92, 97, 99	1.86	2.04	1.83	2.01	RO2
4	93, 96	2.22	2.67	2.04	2.68	RO3
5	91, 100, 106	2.37	2.63	2.15	2.64	RO3
6	102, 104	1.73	2.56	1.60	2.54	RO4

## ORIGINS OF PHYSICAL MODELLING

**Modello** = appropriata semplificazione della realtà

**Modello Fisico** = riproduzione semplificata di una realtà o di parte di essa

In architettura la modellazione fisica nasce nel *Rinascimento* (da *modulus* = misura piccola)

i modelli strutturali “**scientifici**” nascono con Galilei, ma solo grazie alla **teoria matematica della similitudine** diventarono, tre secoli dopo, veramente “scientifici”

Nel *Rinascimento* si modellavano solo le **dimensioni**

Nei modelli strutturali moderni (1930-'50) anche **forze e spostamenti**

## ON PHYSICAL MODELLING

◀... **la distribuzione delle sollecitazioni interne in una struttura dipende esclusivamente:**

- dal tipo della struttura stessa
- dai modi con cui le forze agiscono su di essa

non dalla scala metrica dei sistemi **agente** o **resistente**

In conseguenza **un modello** (ripetizione in scala di una struttura) sollecitato da un sistema di forze in **appropriata similitudine meccanica**, verrà a trovarsi in uno stato di equilibrio interno analogo a quello della vera struttura

Basterà allora disporre di apparecchiature adatte a leggere e **misurare** gli stati di sollecitazione nelle varie parti del modello, per conoscere direttamente (a parte il rapporto di scala) lo **stato di equilibrio** interno della struttura reale ➤

(Nervi, 1955)

## SILIMITUDE LAWS

Sistemi *fisicamente simili* : rapporto costante di grandezze della stessa natura fisica in punti geometricamente corrispondenti

Completa similitudine (**modello vs. prototipo**): rispettate tutte le relazioni di scala con cui il modello riproduce le **grandezze fisiche**

ovvero quando i **rapporti adimensionali** tra le grandezze che caratterizzano il problema assumono nel modello l'identico valore numerico che presentano nel prototipo

**n** : grandezze fisiche da cui dipende il problema

**q** : grandezze fondamentali dimensionalmente indipendenti

**m = n - q** : rapporti adimensionali corrispondenti a **m** grandezze derivate  $\Pi$  che si possono esprimere come  $\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_m)$

La similitudine è verificata se:

$$(\Pi_i)_{\text{modello}} = (\Pi_i)_{\text{prototipo}}$$

$$\Pi_i^* = (\Pi_i)_{\text{prototipo}} / (\Pi_i)_{\text{modello}} = 1$$

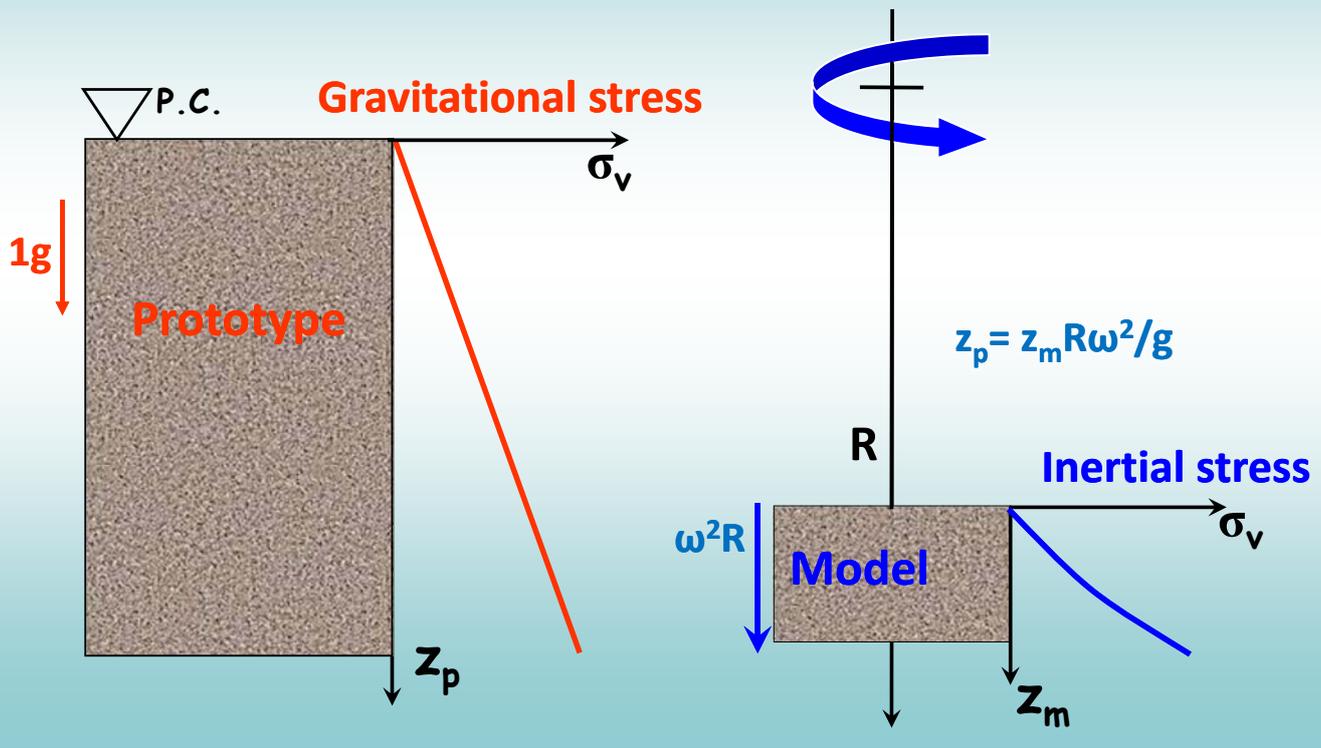
## Mechanical Similitude: 3 d.o.f. L, F, T (or L, M, T)

Force	Non-dimensional ratio $(\Pi_i)_{\text{model}} = (\Pi_i)_{\text{prototype}}$	Similitude $X^* = X_p / X_m$
Surface: $P = p \cdot L^2$	$\Pi_1 = P / (p \cdot L^2)$	$p^* = P^* / L^{*2}$
Volume: $W = \gamma \cdot V = \gamma \cdot L^3$	$\Pi_2 = W / (\gamma \cdot L^3)$	$W^* = \gamma^* \cdot L^{*3} = \rho^* \cdot g^* \cdot L^{*3}$ $\sigma^* = \rho^* (g^*) L^*$
Derivated: $F = \sigma A = \sigma L^2$	$\Pi_3 = F / (\sigma L^2)$	$F^* = \sigma^* L^{*2}$ Stress $\Rightarrow \sigma^* = F^* / L^{*2}$ Yielding $\Rightarrow \sigma_y^* = \sigma^*$ Failure $\Rightarrow \tau^* = \sigma^*$ Elastic modulus $\Rightarrow E^* = \sigma^*$
Inertia: $F = m \cdot a$	$\Pi_4 = F / (m a)$	$F^* = M^* a^*$ Time $t^* = L^* (\rho^* / \sigma^*)^{1/2}$ Frequency $f^* = 1/T^* = (\sigma^* / \rho^*)^{1/2} / L^*$ Velocity $v^* = L^* / T^* = (\sigma^* / \rho^*)^{1/2}$ Acceleration $a^* = L^* / T^{*2} = \sigma^* / (\rho^* L^*)$

**TERRENO = COMPORTAMENTO NON LINEARE DIPENDENTE DA LITOLOGIA E SFORZI**  
 Se terreno modello = prototipo ( $\rho^* = 1$ ) è possibile simulare correttamente nel modello il comportamento reale del terreno, senza conoscere il suo legame costitutivo, imponendo  $\sigma^* = 1 \rightarrow g^* L^* = 1$

$$\text{se } L^* = N \rightarrow g^* = 1/N$$

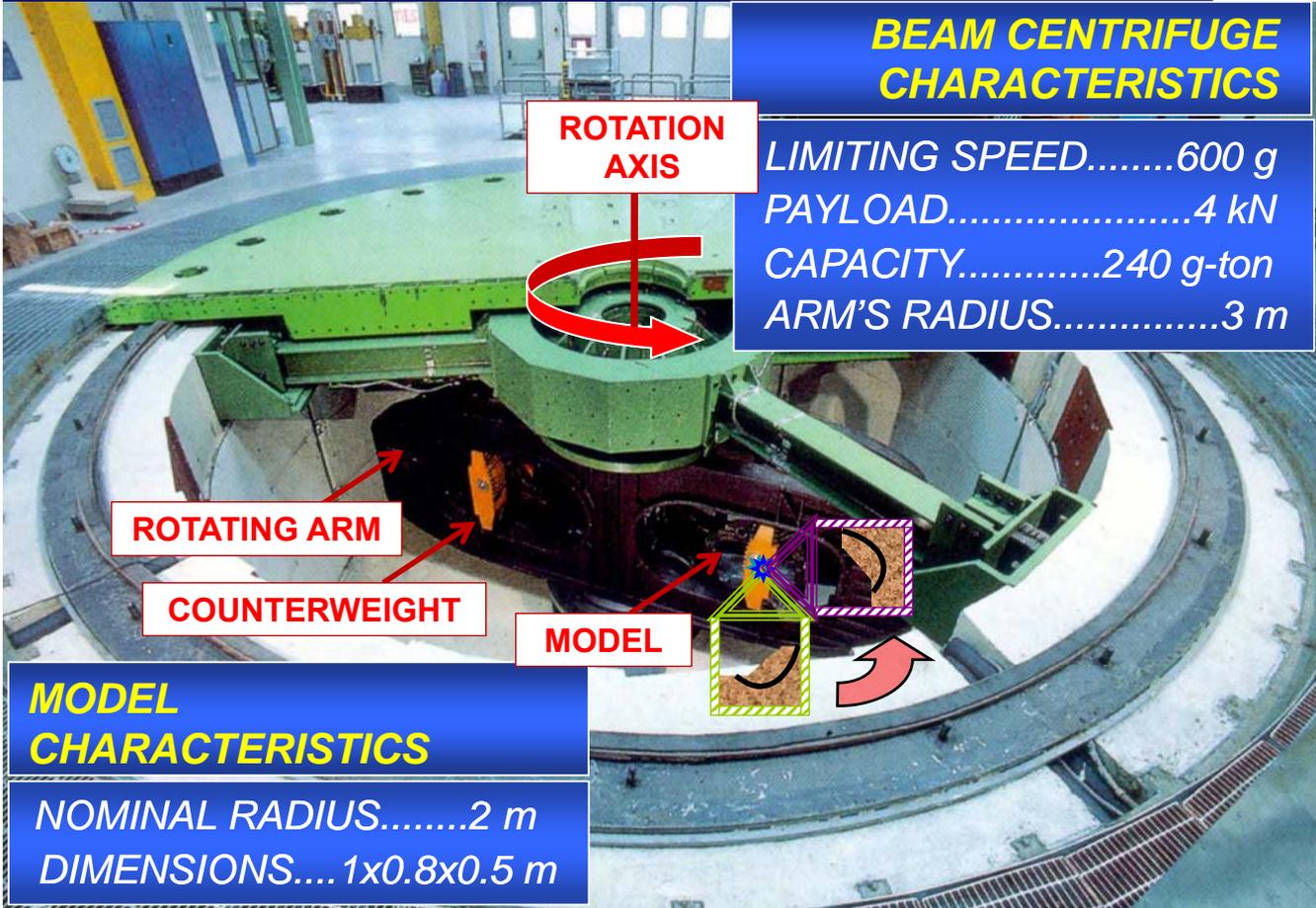
$$(\sigma_v)_{\text{prot}} = \rho g z_p \approx \rho (Ng)(z_p/N) \approx \rho Ng z_m = (\sigma_v)_{\text{mod}}$$



THE SCALING FACTORS

	Variable	Scale factor $X^* = X_{\text{prototype}} / X_{\text{model}}$	1g model	Ng model
L	Length	$L^*$	N	N
$\rho$	Soil density	$\rho^*$	1	1
$\varepsilon$	Strain	$\varepsilon^*$	$N^{1-\alpha}$	1
$\sigma$	Stresses (effective and total)	$\sigma^* = x^* \rho^* g^*$	N	1
G	Stiffness	$G^* = x^* \rho^* g^* / \varepsilon^*$	$N^\alpha$	1
$\rho_f$	Fluid density	$\rho^*$	1	1
p	Fluid pressure	$p^* = x^* \rho^* g^*$	N	1
u	Soil displacement (continuum)	$u^* = x^* \varepsilon^*$	$N^{2-\alpha}$	N
v	Velocity	$v^* = (x^* \varepsilon^* g^*)^{0.5}$	$N^{1-\alpha/2}$	1
$\ddot{u}$	Acceleration	$g^*$	1	$N^{-1}$
t	Time (consolidation)	$t^* = \mu^* L^2 / G^*$	1	$N^2$
t	Time (creep)	$t^*$	1	1
t	Time (dynamic)	$t^* = (x^* \varepsilon^* / g^*)^{0.5}$	$N^{1-\alpha/2}$	N
$\mu$	Dynamic viscosity of fluid	$\mu^* = \rho^* (g^* / x^* \varepsilon^*)^{0.5}$	$N^{((\alpha/2)-1)}$	$N^{-1}$
$K_f$	Compressibility modulus of soil	$K_f^* = x^* \rho^* g^* / \varepsilon^*$	$N^\alpha$	1

# THE ISMGEO GEOTECHNICAL CENTRIFUGE



## BEAM CENTRIFUGE CHARACTERISTICS

LIMITING SPEED.....600 g  
PAYLOAD.....4 kN  
CAPACITY.....240 g-ton  
ARM'S RADIUS.....3 m

## MODEL CHARACTERISTICS

NOMINAL RADIUS.....2 m  
DIMENSIONS....1x0.8x0.5 m

# THE ISMGEO GEOTECHNICAL CENTRIFUGE



## SHAKING TABLE CHARACTERISTIC

*one degree of freedom  
frequency up to 500Hz  
100 g centrifuge acceleration  
two 50 kN integrated actuators  
peak displacement: +/- 6.35 mm  
peak velocity: 0.9 m/s  
moving mass: 3.50kN  
max acceleration: 50 g  
full load acceleration: 16 g*

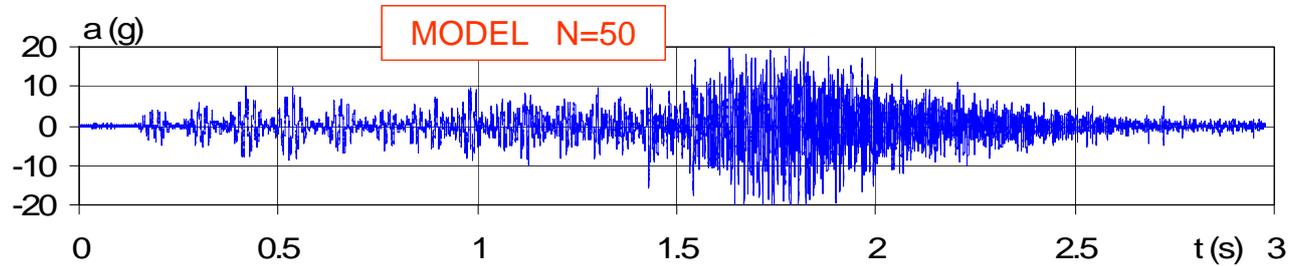
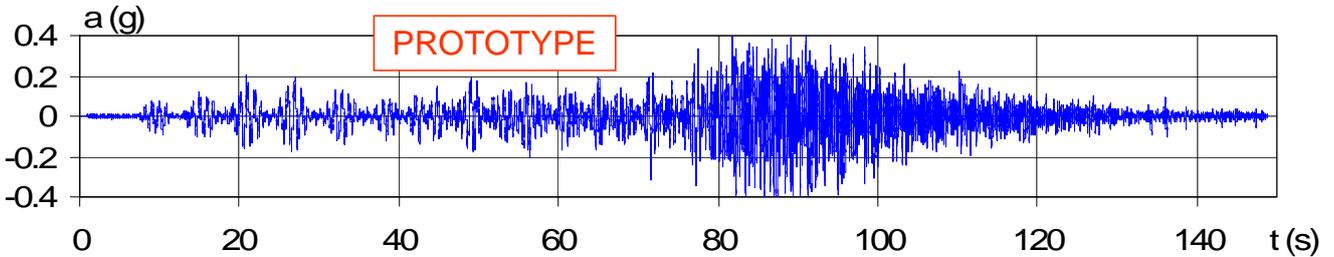
**INSTALLED ON THE RIGID CENTRIFUGE ARM**

# DYNAMIC PROCESSES

## SCALE FACTORS

linear dimension:  $L^* = N$     acceleration:  $a^* = N^{-1}$     frequency:  $f^* = N^{-1}$   
 velocity:  $v^* = 1$     time (dynamic):  $t^* = N$     time (diffusion):  $t^* = N^2$

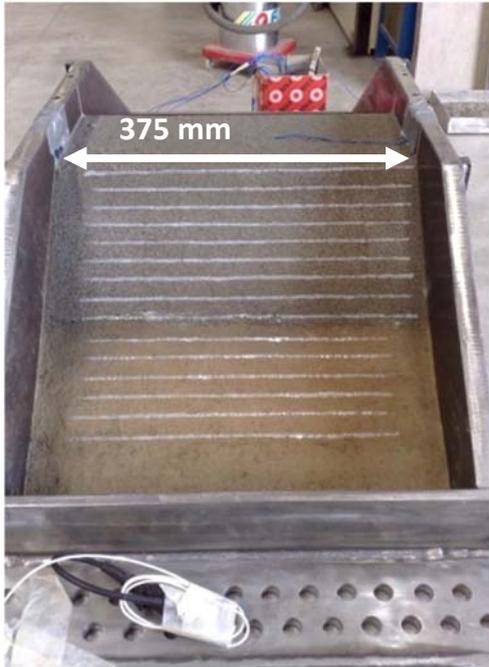
N=50	Heartquake	cycles	$f$	A	t
	Prototype	10	1	0,1 m	10 s
	Model	10	50	2 mm	0,2 s



## Costruzione modello fisico - Fattore di scala geometrico: N = 50



Fattore di scala geometrico:  $N = 50$



**Terreni usati**  
**limo** (circa 120 kg)  
 dalle carote estratte all'interno dei corpi arginali nei sondaggi S28, S50, S59, S57, S62, S90

**sabbia** (circa 50 kg)  
 dalla carote estratte nei terreni di fondazione degli argini nei sondaggi S50, S57, S62

**Strumentazione:**

5 accelerometri nel corpo arginale  
 1 accelerometro sulla base rigida  
 2 trasduttori cedimenti verticali

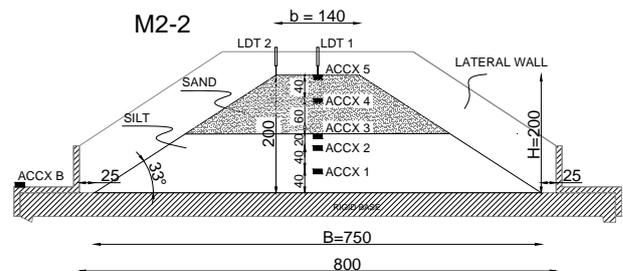
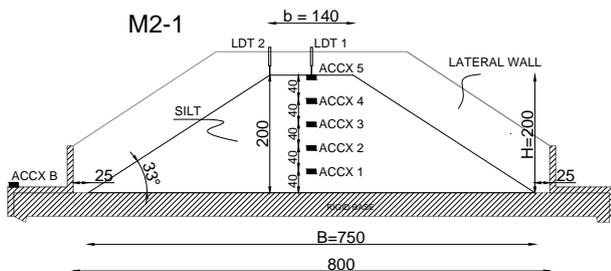
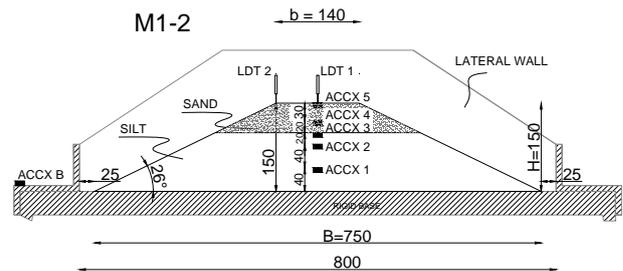
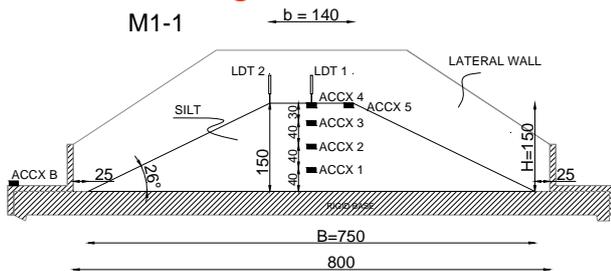
	$D_{50}$ [mm]	$U_c$ [-]	$\gamma_n$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$w$ [%]	$e$ [-]	$\phi'_{cv}$ [°]	$G_0$ [MPa]
silt	0.025	35.2	15.4	10	0.9	30	30-45
sand	0.39	3.16	16	5	0.7	35.4	20-30

**SCHEMI PROVE IN CENTRIFUGA**

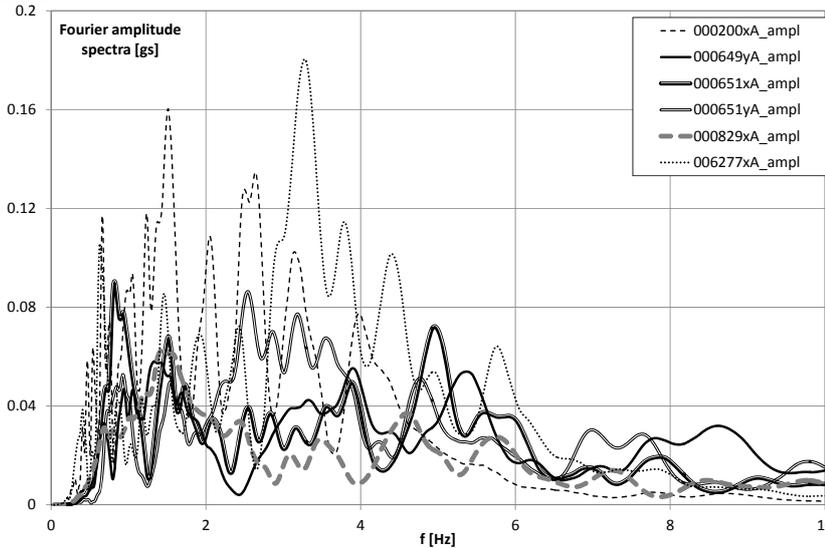
**PARMA**  
**11.4.2012**

Fattore di scala geometrico:  $N = 50$

x shaking direction



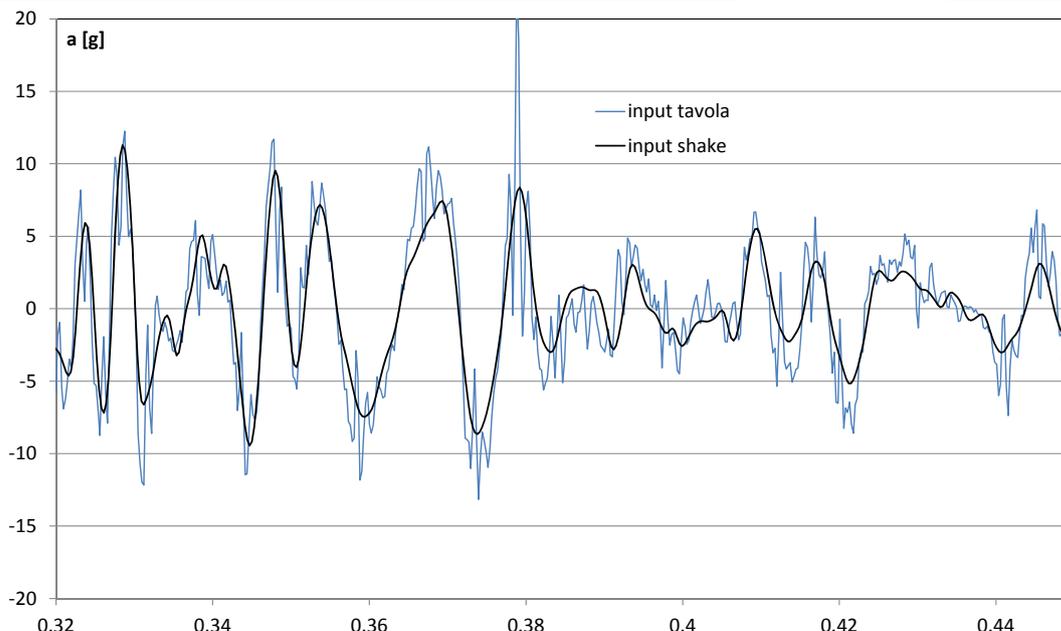
Model	Soil	B		b		H		$H_i$		$H_s$		$\alpha$ [°]
		mod [mm]	prot [m]									
M1-1	silt	750	37.5	140	7	150	7.5	150	7.5	-	-	26
M1-2	silt/sand	750	37.5	140	7	150	7.5	100	5	50	2.5	
M2-1	silt	750	37.5	140	7	200	10	200	10	-	-	33
M2-2	silt/sand	750	37.5	140	7	200	10	100	5	100	5	



## PROCEDURA x INPUT TAVOLA Con SHAKE

1. Scelta  $V_S(z)$  CASAGLIA
2. Uso  $G(\gamma)$  e  $D(\gamma)$  disponibili
3. Input bedrock FE 1  $\rightarrow$  6
4. Output 6 acc. free field
5. Scelta di 4: N.1\*, 2\*, 3\* e 6\*
6. Esecuzione 4x4 prove con acc. 1\*, 2\*, 3\* e 6\* usati come input tavola

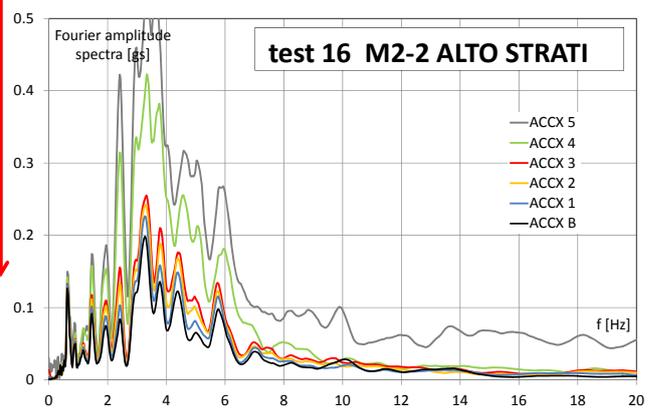
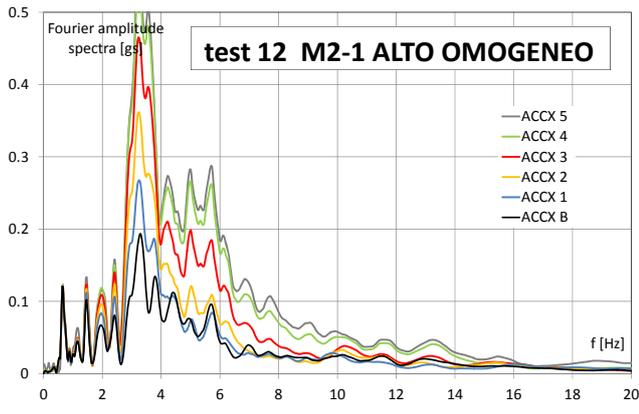
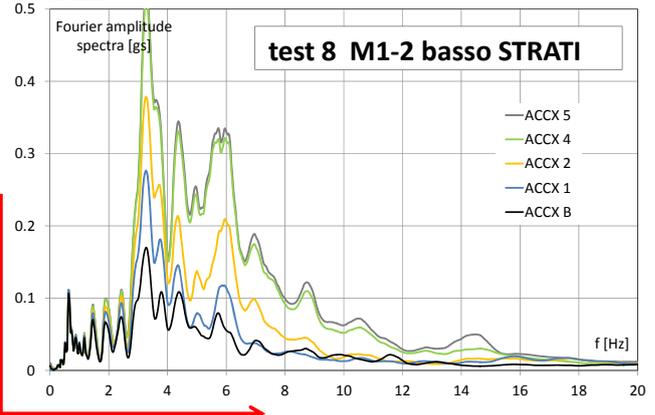
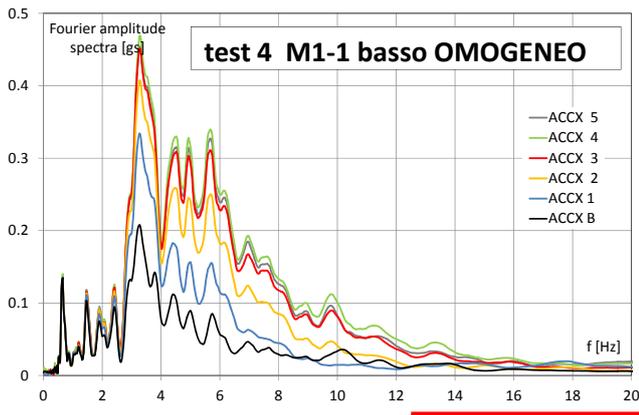
Test	Model	Accelerogram code	N.	Test	Model	Accelerogram code	N.
1	M1-1	000200xA_ampl	1*	9	M2-1	000200xA_ampl	1*
2		000649yA_ampl	2*	10		000649yA_ampl	2*
3		000651xA_ampl	3*	11		000651xA_ampl	3*
4		006277xA_ampl	6*	12		006277xA_ampl	6*
5	M1-2	000200xA_ampl	1*	13	M2-2	000200xA_ampl	1*
6		000649yA_ampl	2*	14		000649yA_ampl	2*
7		000651xA_ampl	3*	15		000651xA_ampl	3*
8		006277xA_ampl	6*	16		006277xA_ampl	6*



### Trattamento segnale

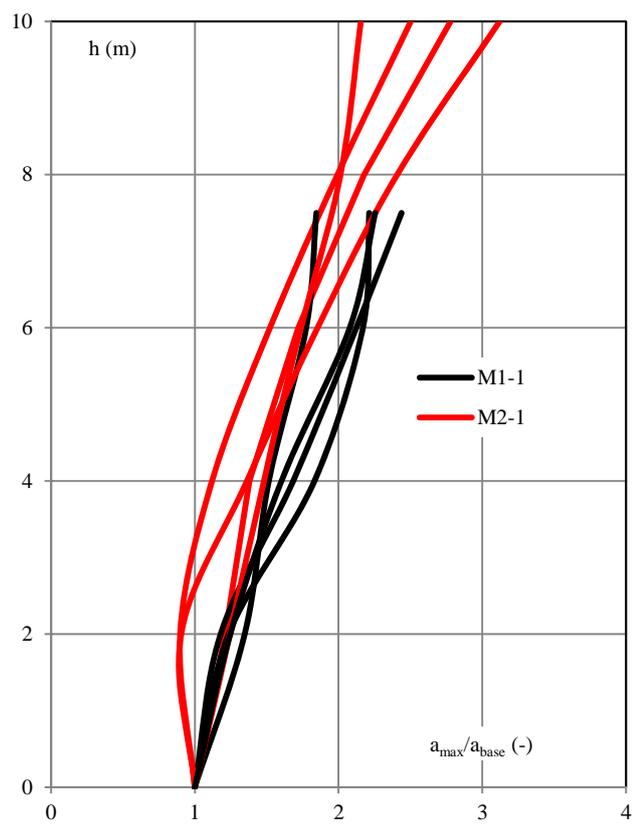
- ✓ le registrazioni di tutti gli accelerometri sono state corrette sottraendo dalle misure di accelerazione il valor medio del segnale
- ✓ è stata considerata una finestra di registrazione corrispondente alla durata dello shock sismico
- ✓ per tutti i segnali accelerometrici misurati sono stati computati gli spettri di Fourier mediante utilizzo dell'algoritmo delle FFT, includendo l'operazione di tapering
- ✓ gli spettri sono stati lisciati utilizzando uno smoothing logaritmico con finestra triangolare

**PROTOTYPE SCALE**

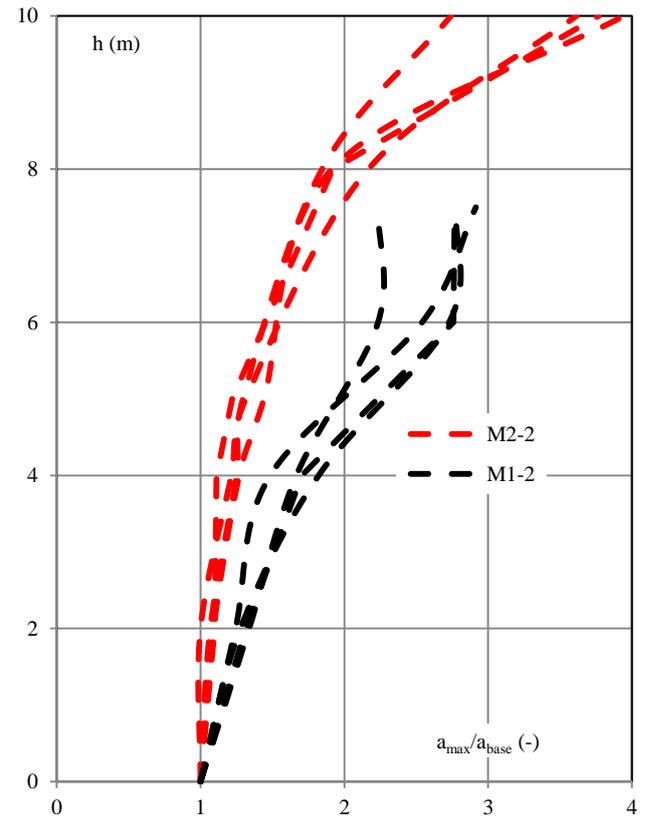


**Profili  $a_{max}/a_{base}$  - 16 PROVE**

**OMOGENEO**



**STRATIFICATO**



SIMULAZIONE FISICA DINAMICA studio/analisi effetti

1. Forma: da trapezoidale a forma con banche
2. Stratigrafici: inversione sabbia/limo
3. Suzione sulla stabilità e sul profilo di  $G_0$

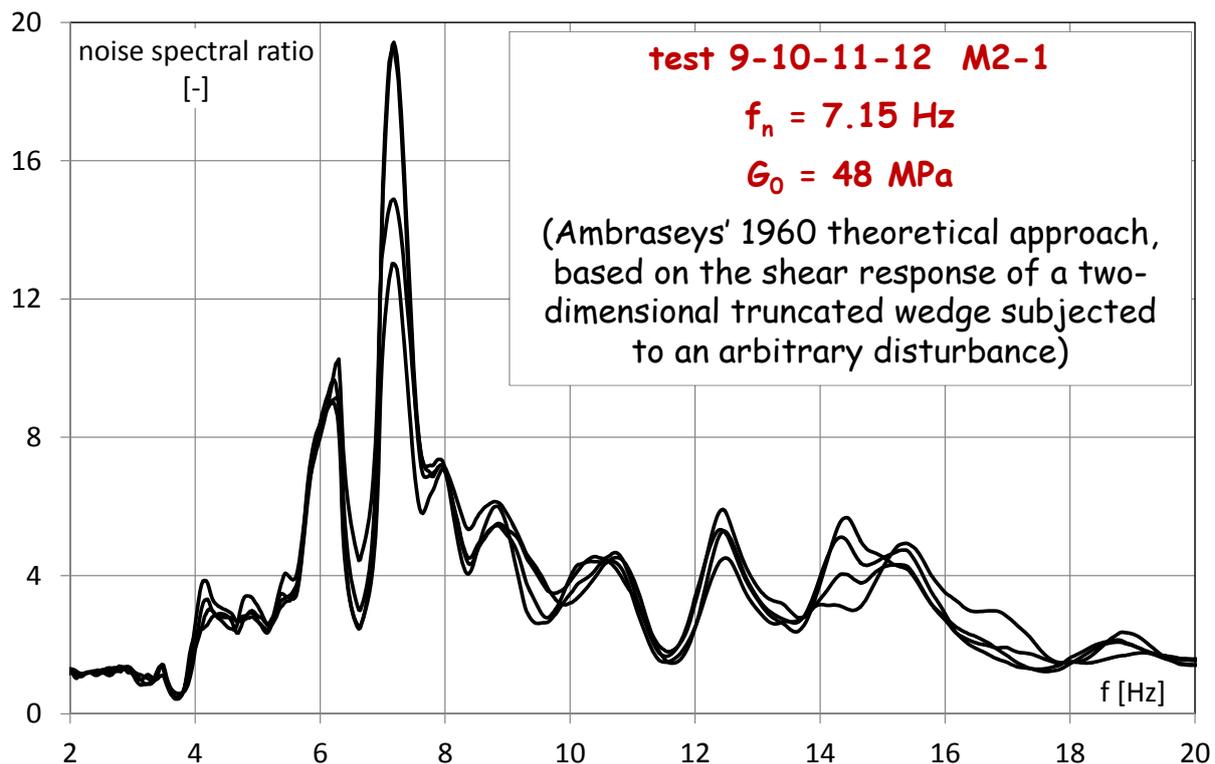
SIMULAZIONE NUMERICA

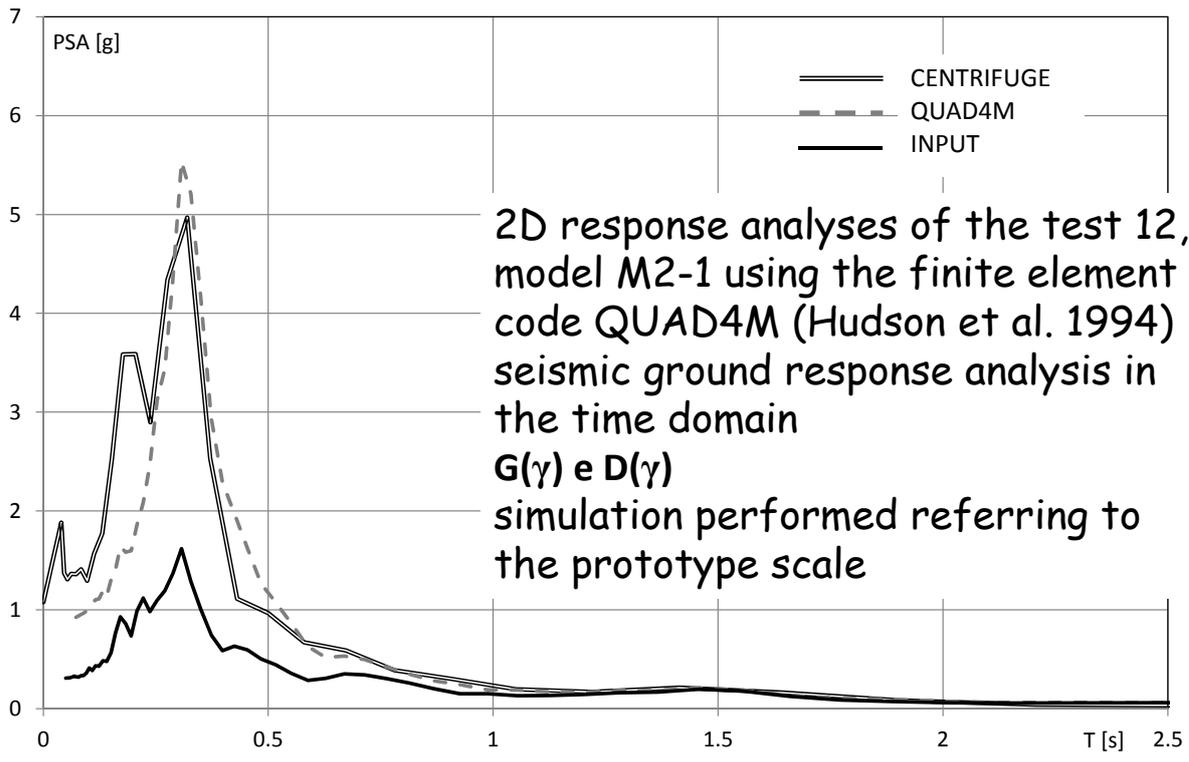
Programma FEM 2D come QUAD4M per simulazioni prove sperimentali

FINALITÀ

Validazione e taratura modelli dinamici complessi o semplificati modelli pseudo-dinamici

PROTOTYPE SCALE





2D response analyses of the test 12, model M2-1 using the finite element code QUAD4M (Hudson et al. 1994) seismic ground response analysis in the time domain  
**G( $\gamma$ ) e D( $\gamma$ )**  
simulation performed referring to the prototype scale