



POLITECNICO
DI TORINO



Compagnia
di San Paolo



FONDAZIONE CRC



Giovani
Ingegneri
Cuneo

Centro Congressi del Santuario di Vicoforte 15-16 GIUGNO 2017

MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Indagini Geotecniche e Monitoraggio dei Beni Architettonici

Carlo G. LAI

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura
Università degli Studi di Pavia

Santuario di Vicoforte
15–16 Giugno 2017



DICAr

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura
Università degli Studi di Pavia



- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del modello di sottosuolo*
- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del terremoto di progetto*
- *Caso di studio 1: minareto islamico di Jam (Afghanistan)*
- *Caso di studio 2: tempio induista di Kancheepuram (India meridionale)*
- *Caso di studio 3: torre di Pisa (Campo dei Miracoli, Pisa)*
- *Caso di studio 4: tempio di Marte Ultore (Roma)*
- *Caso di studio 5: santuario "Regina Montis Regalis" di Vicoforte*
- *Considerazioni finali*

- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del modello di sottosuolo*
- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del terremoto di progetto*
- *Caso di studio 1: minareto islamico di Jam (Afghanistan)*
- *Caso di studio 2: tempio induista di Kancheepuram (India meridionale)*
- *Caso di studio 3: torre di Pisa (Campo dei Miracoli, Pisa)*
- *Caso di studio 4: tempio di Marte Ultore (Roma)*
- *Caso di studio 5: santuario "Regina Montis Regalis" di Vicoforte*
- *Considerazioni finali*

⇒ OBIETTIVI DELLE INDAGINI GEOTECNICHE

- Definizione modello geotecnico del sito di costruzione → CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

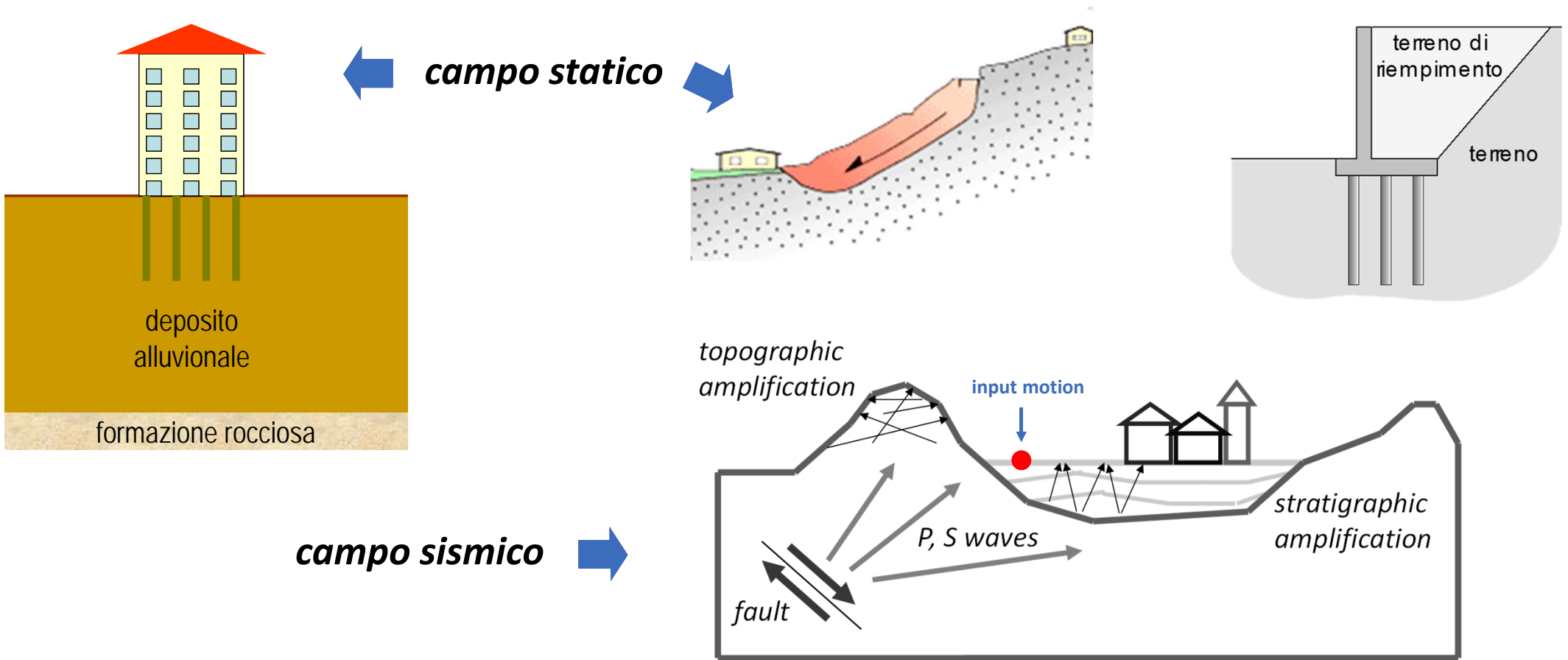
Attività di fondamentale importanza per la ricostruzione delle caratteristiche:

1. geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche
2. litostratigrafiche, strutturali e geometriche
3. geotecniche (proprietà fisiche, parametri di stato/comportamento)

finalizzate alla definizione di un modello geologico-geotecnico del sito oggetto di studio al fine di valutare:

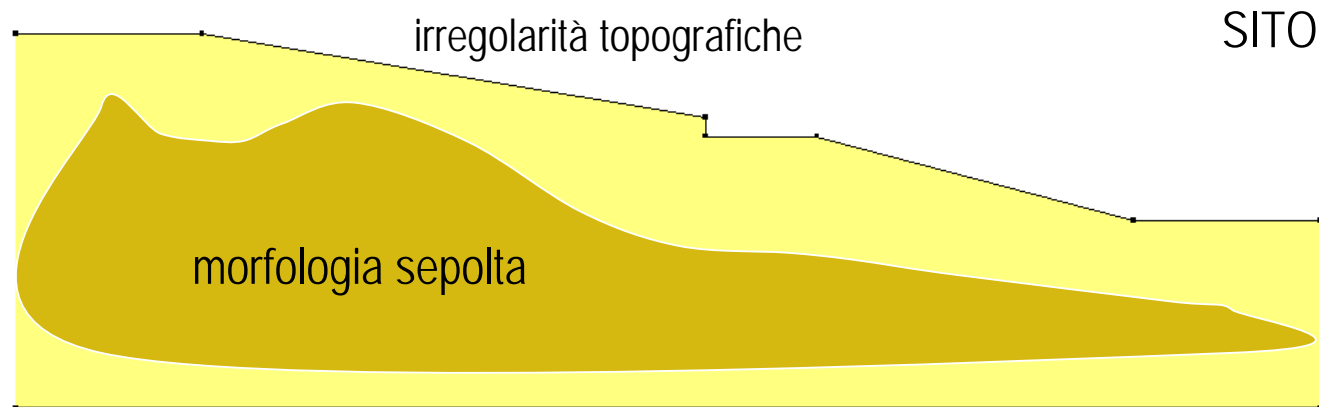
1. risposta statica di strutture e opere geotecniche → *progettazione fondazioni*
2. definizione azione sismica → *terremoto di progetto*
3. risposta sismica di strutture e opere geotecniche → *interazione suolo-struttura*
4. stabilità geotecnica del sito → *subsidenza, liquefazione, frane, rottura faglie*

⇒ **DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOTECNICO: CAMPI DI APPLICAZIONE**

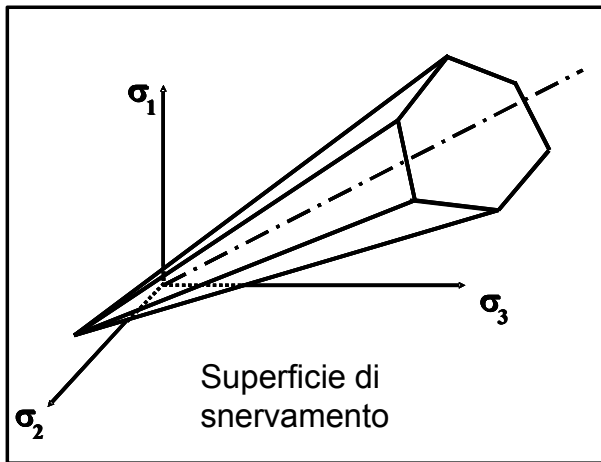


⇒ DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOTECNICO: SIGNIFICATO

- **Morfologia superficiale e sepolta (riconoscere formazioni omogenee)**
- **Geometrie dei contatti tra le formazioni geologiche**
- **Distribuzione proprietà fisiche e parametri di stato (porosità, pesi, saturazione)**
- **Distribuzione parametri comportamento (meccanico, idraulico, elettrico)**



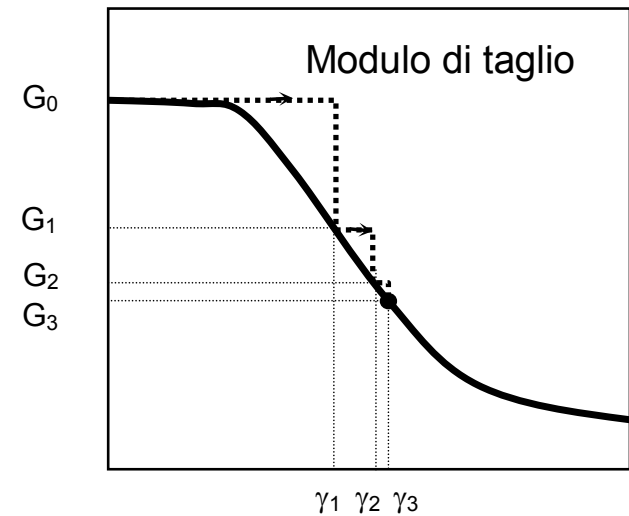
⇒ **DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOTECNICO: SIGNIFICATO**



Criterio di rottura di Mohr-Columb

$$|\tau_f| = c' + (\sigma_f - u) \tan \varphi'$$

Modello elastico lineare equivalente



SLE ⇒ Cedimenti ⇒ modello elastico ⇒ *parametri di deformabilità*

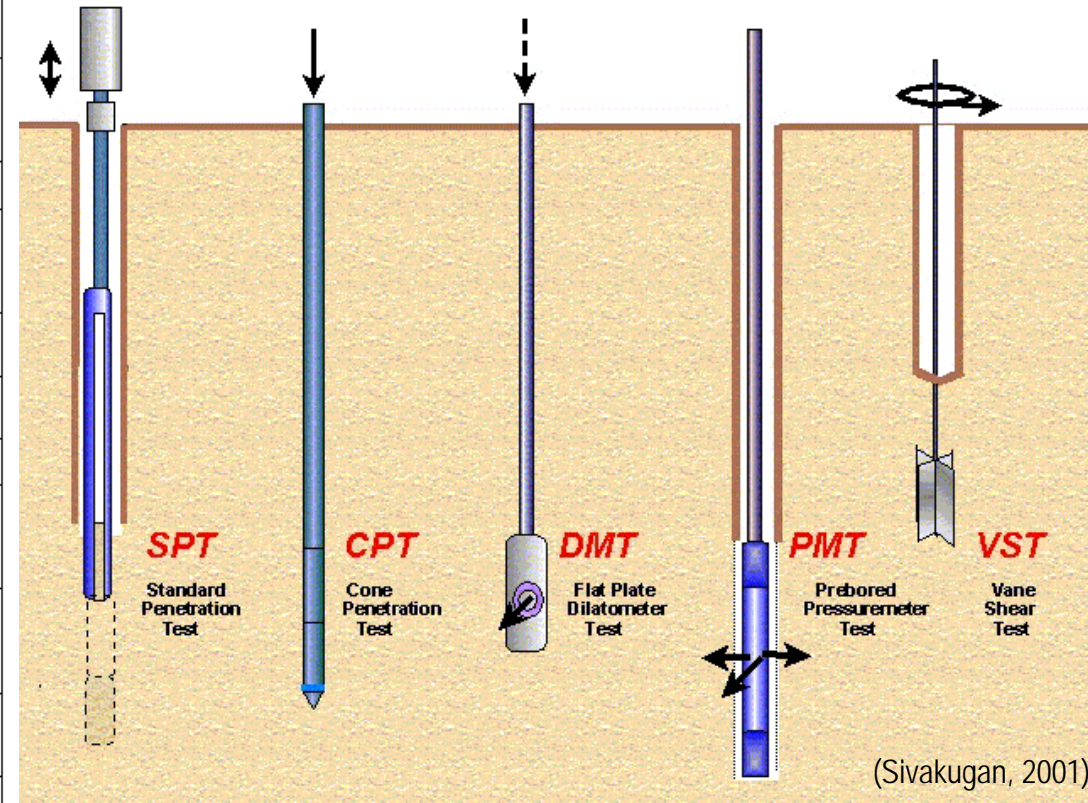
SLU ⇒ Capacità portante ⇒ modello rigido plastico ⇒ *parametri di resistenza*

⇒ **TECNICHE DI INDAGINE GEOTECNICA E GEOFISICA IN SITO**

Category	Test	Designation	Measurements	Common Applications
Non-destructive or semi-destructive tests	Geophysical tests: Seismic refraction Surface waves Crosshole test Downhole test	SR SASW CHT DHT	P-waves from surface R-waves from surface P & S waves in boreholes P & S waves with depth	Ground characterisation Small strain stiffness, G_e
	Pressuremeter test Pre-bored Self-boring	PMT SBPM	G_c , ($\psi \times \epsilon$) curve G_c , ($\psi \times \epsilon$) curve	Shear modulus, G Shear strength <i>In situ</i> horizontal stress Consolidation properties
	Plate loading test	PLT	($L \times \delta$) curve	Stiffness and strength
Invasive penetration tests	Cone penetration test Electric Piezocone	CPT CPTU	q_c , f_s q_c , f_s , u	Soil profiling Shear strength Relative density Consolidation properties
	Standard Penetration Test (energy control)	SPT	Penetration (N value)	Soil profiling Internal friction angle, ϕ'
	Flat dilatometer test	DMT	p_0 , p_1	Stiffness Shear strength
	Vane shear test	VST	Torque	Undrained shear strength, s_u
Combined tests (Invasive + Non-destructive)	Cone pressuremeter	CPMT	q_c , f_s , (+u), G_c , ($\psi \times \epsilon$)	Soil profiling Shear modulus, G Shear strength Consolidation properties
	Seismic cone	SCPT	q_c , f_s , V_p , V_s , (+u)	Soil profiling Shear strength Small strain stiffness, G_e Consolidation properties
	Resistivity cone	RCPT	q_c , f_s , ρ	Soil profiling Shear strength Soil porosity
	Seismic dilatometer		p_0 , p_1 , V_p , V_s	Stiffness (G and G_e) Shear strength

Fonte: modificata da Schnaid et al., 2004

PROVE GEOTECNICHE IN SITO



⇒ TECNICHE DI INDAGINE GEOTECNICA E GEOFISICA IN SITO

PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO



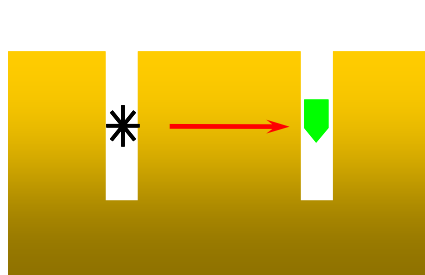
Tipo di prova	Principali vantaggi			Principali svantaggi		
	Prove in sito	Presenza in conto fattore scala	Eseguibili su ogni tipo di terreno	No alterazione stato naturale del deposito	Difficoltà di interpretazione	Difficoltà controllo condizioni al contorno
Prove di laboratorio	Misure accurate	ripetibili	Controllo condizioni al contorno	Sensibili al disturbo	Risultati sensibili al fattore scala	Difficili in terreni non coesivi



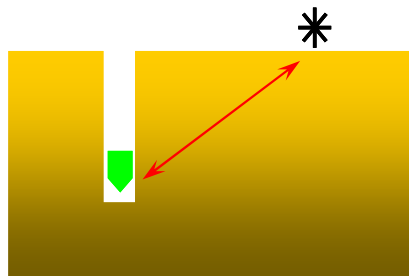
Campionamento **INDISTURBATO** dei materiali a grana-grossa (non coesivi) è difficile e richiede tecniche speciali (per es. congelamento, gel-push) non impiegabile nella pratica corrente (*onerose*)

⇒ **TECNICHE DI INDAGINE GEOTECNICA E GEOFISICA IN SITO**

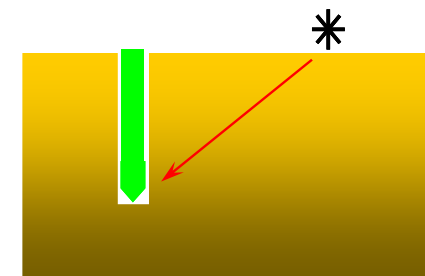
PROVE GEOFISICHE INVASIVE



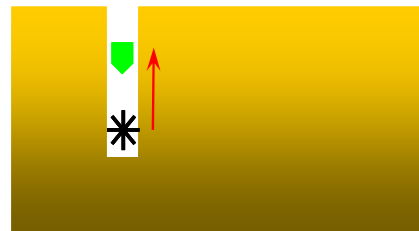
Cross-Hole
(ASTM D4428)



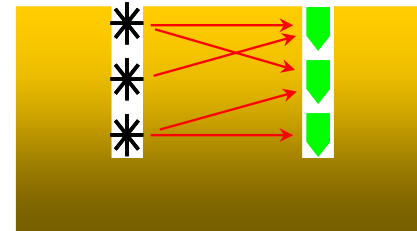
Down/Up Hole



Cono Sismico



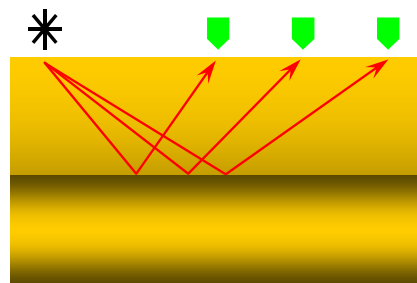
Suspension Logging



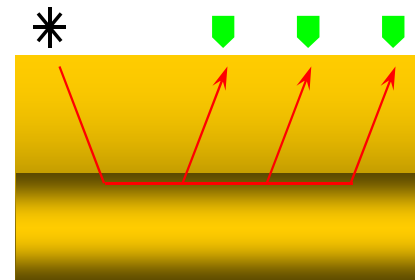
Tomografia Sismica

⇒ **TECNICHE DI INDAGINE GEOTECNICA E GEOFISICA IN SITO**

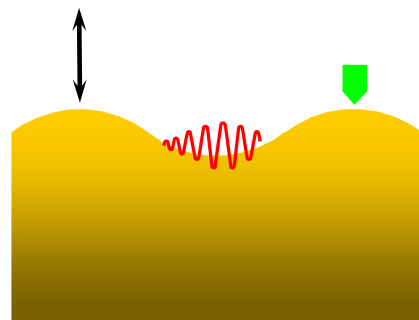
PROVE GEOFISICHE NON-INVASIVE



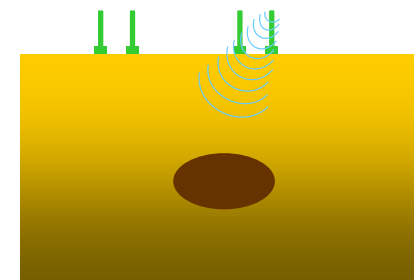
Riflessione



Rifrazione
(ASTM D5777)



SASW/MASW



GPR

⇒ TECNICHE DI INDAGINE GEOTECNICA E GEOFISICA IN SITO

EFFETTI DELLA INVASIVITÀ DELLE PROVE IN SITO

- **prove non-invasive:** minima alterazione e disturbo della struttura del terreno e delle condizioni geostatiche di sforzo iniziali. Esse includono le prove geofisiche, pressiometriche e prove di carico su piastra. Interpretazione rigorosa risultati salvo ipotesi semplificative.
- **prove invasive:** alterazione significativa con disturbo delle condizioni di geostatiche iniziali. Esse comprendono le prove penetrometriche SPT, CPT e dilatometriche DMT. Facili da usare, poco costose tuttavia rigorosa interpretazione dei risultati solo in un numero limitato di casi.

⇒ TECNICHE DI INDAGINE GEOTECNICA E GEOFISICA IN SITO

APPLICABILITÀ DELLE PROVE IN SITO

Table 1.1 The applicability and usefulness of *in situ* tests

Group	Device	Soil Parameters													Ground Type						
		Soil type	Profile	u	* φ'	s_u	I_D	m_v	c_v	k	G_o	σ_h	OCR	$\sigma-\varepsilon$	Hard rock	Soft rock	Gravel	Sand	Silt	Clay	Peat
Penetrometers	Dynamic	C	B	-	C	C	C	-	-	-	C	-	C	-	-	C	B	A	B	B	B
	Mechanical	B	A/B	-	C	C	B	C	-	-	C	C	C	-	-	C	C	A	A	A	A
	Electric (CPT)	B	A	-	C	B	A/B	C	-	-	B	B/C	B	-	-	C	C	A	A	A	A
	Piezocone (CPTU)	A	A	A	B	B	A/B	B	A/B	B	B	B/C	B	C	-	C	-	A	A	A	A
	Seismic (SCPT/SCPTU)	A	A	A	B	A/B	A/B	B	A/B	B	A	B	B	C	-	C	-	A	A	A	A
	Flat dilatometer (DMT)	B	A	C	B	B	C	B	-	-	B	B	B	C	C	C	-	A	A	A	A
	Standard penetration test (SPT)	A	B	-	C	C	B	-	-	-	C	-	C	-	-	C	B	A	A	A	A
	Resistivity probe	B	B	-	B	C	A	C	-	-	-	-	-	-	-	C	-	A	A	A	A
	Pressuremeters	Pre-bored (PBP)	B	B	-	C	B	C	B	C	-	B	C	C	C	A	A	B	B	B	A
Self boring (SBP)		B	B	A ¹	B	B	B	B	A ¹	B	A ²	A/B	B	A/B ²	-	B	-	B	B	A	B
Full displacement (FDP)		B	B	-	C	B	C	C	C	-	A ²	C	C	C	-	C	-	B	B	A	A
Others	Vane	B	C	-	-	A	-	-	-	-	-	-	B/C	B	-	-	-	-	-	A	B
	Plate load	C	-	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B	B	A	B	B	A	A	A
	Screw plate	C	C	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	-	-	-	-	A	A	A	A
	Borehole permeability	C	-	A	-	-	-	-	B	A	-	-	-	-	A	A	A	A	A	A	B
	Hydraulic fracture	-	-	B	-	-	-	-	C	C	-	B	-	-	B	B	-	-	C	A	C
	Crosshole/downhole/ surface seismic	C	C	-	-	-	-	-	-	-	A	-	B	-	A	A	A	A	A	A	A

Applicability: A=high; B=moderate; C=low; - =none.

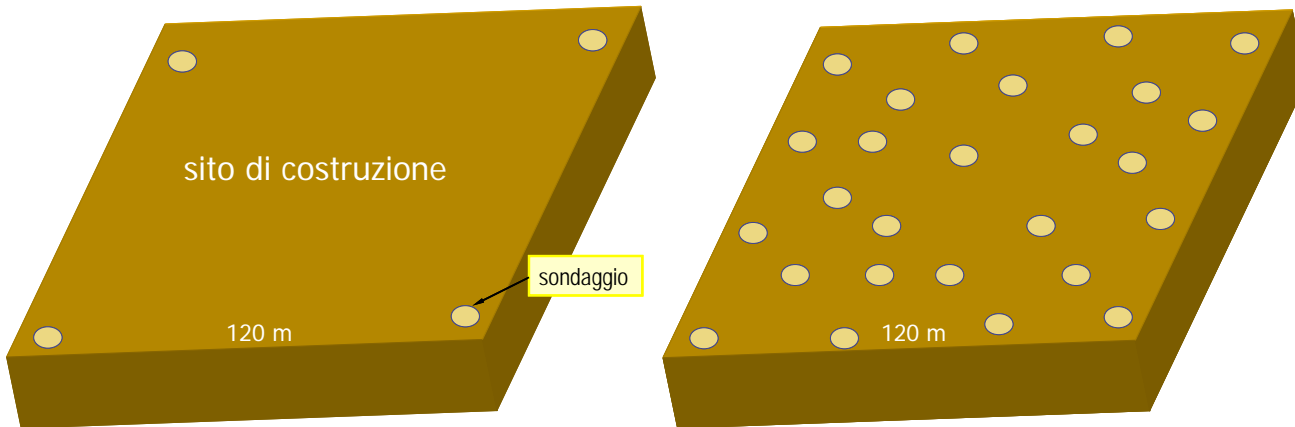
* φ' =Will depend on soil type; ¹=Only when pore pressure sensor fitted; ²=Only when displacement sensor fitted.

Soil parameter definitions: u =*in situ* static pore pressure; φ' =effective internal friction angle; s_u =undrained shear strength; m_v =constrained modulus; c_v =coefficient of consolidation; k =coefficient of permeability; G_o =shear modulus at small strains; σ_h =horizontal stress; OCR=overconsolidation ratio; $\sigma-\varepsilon$ =stress-strain relationship; I_D =density index.

(da Salgado, 2006)

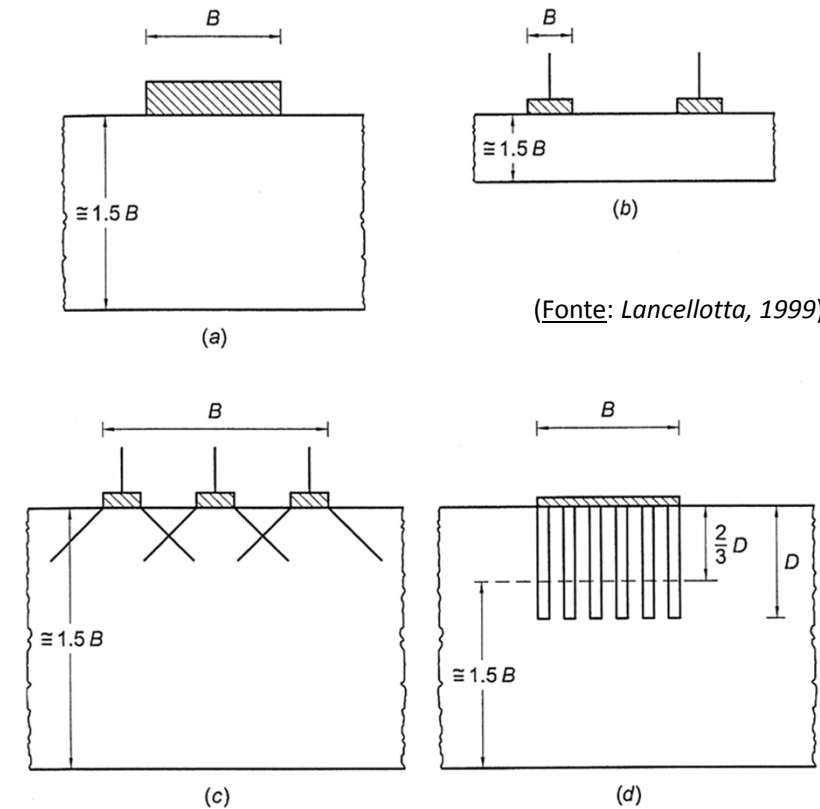
⇒ TECNICHE DI INDAGINE GEOTECNICA E GEOFISICA IN SITO

ESTENSIONE SPAZIALE DELLA CAMPAGNA DI INDAGINI



NUMERO SONDAGGI/PROVE GEOTECNICHE DIPENDE DA:

- complessità geologica/geomorfológica del sito e dalla variabilità spaziale
- tipo e importanza del progetto
- estensione prove non-invasive geofisiche → combinazione bilanciata



(Fonte: Lancellotta, 1999)

sommario

- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del modello di sottosuolo*
- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del terremoto di progetto*
- *Caso di studio 1: minareto islamico di Jam (Afghanistan)*
- *Caso di studio 2: tempio induista di Kancheepuram (India meridionale)*
- *Caso di studio 3: torre di Pisa (Campo dei Miracoli, Pisa)*
- *Caso di studio 4: tempio di Marte Ultore (Roma)*
- *Caso di studio 5: santuario "Regina Montis Regalis" di Vicoforte*
- *Considerazioni finali*

⇒ **AZIONE SISMICA** → **PERICOLOSITÀ SISMICA**



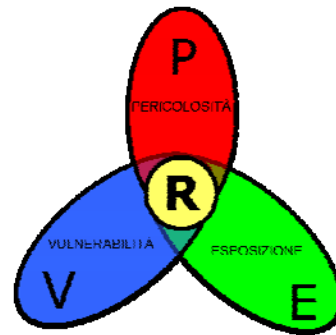
(dal rapporto GEER , 22/11/2016)

⇒ AZIONE SISMICA → PERICOLOSITÀ SISMICA

DEFINIZIONE DI RISCHIO (DISASTRI NATURALI)

La definizione (*quantitativa*) di rischio più accreditata per i disastri naturali è quella proposta nel 1972 da UNESCO che stabilisce il **RISCHIO** di un sistema come il risultato derivante dalla concomitanza di 3 variabili aleatorie:

- **pericolosità**
- **vulnerabilità**
- **esposizione**



↑
CONVOLUZIONE

$$\text{Rischio} = P \times V \times E$$

La **pericolosità** è la probabilità che un *fenomeno* di una determinata intensità si verifichi in un certo luogo, in un dato periodo di tempo.

La **vulnerabilità** è la probabilità che si verifichi un determinato livello di danno o una perdita prodotta su un certo sistema (ad es. un edificio, una struttura) da un *fenomeno* caratterizzato da una certa *pericolosità*.

L'**esposizione** rappresenta il valore economico e sociale del sistema di cui si vuole calcolare il *rischio*.

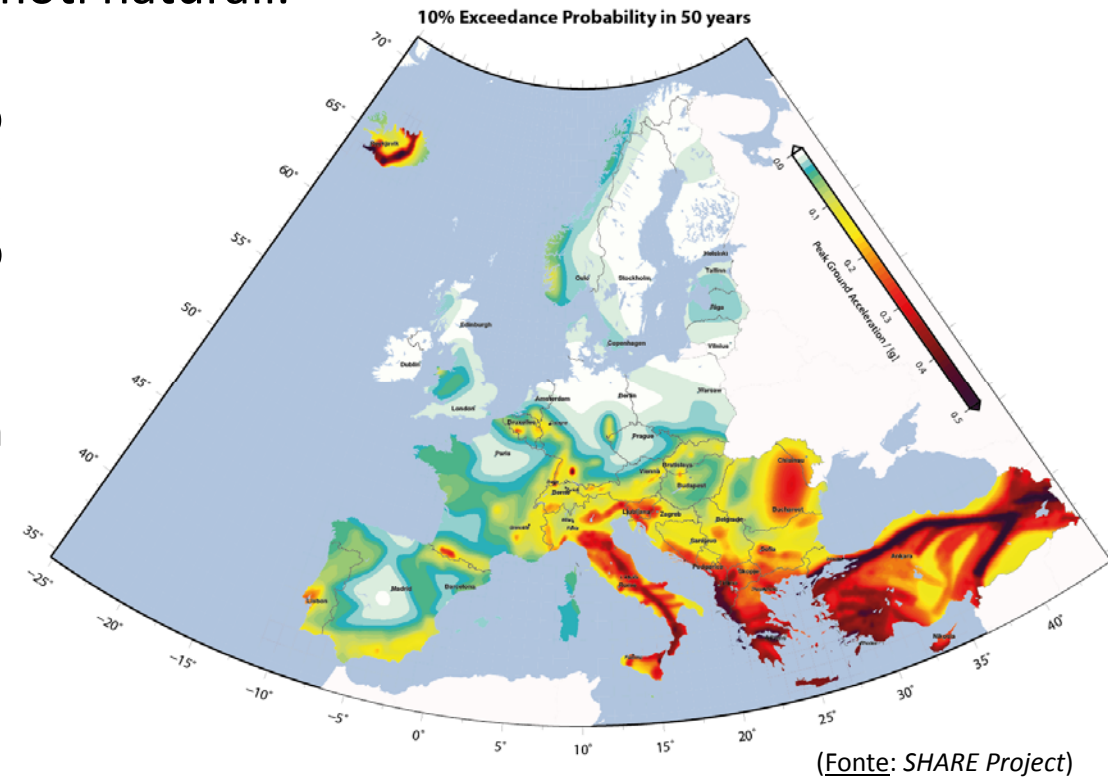
⇒ AZIONE SISMICA → PERICOLOSITÀ SISMICA

La **pericolosità sismica** è definita come la predisposizione di un luogo ad essere interessato dallo scuotimento del suolo a causa dei terremoti naturali.

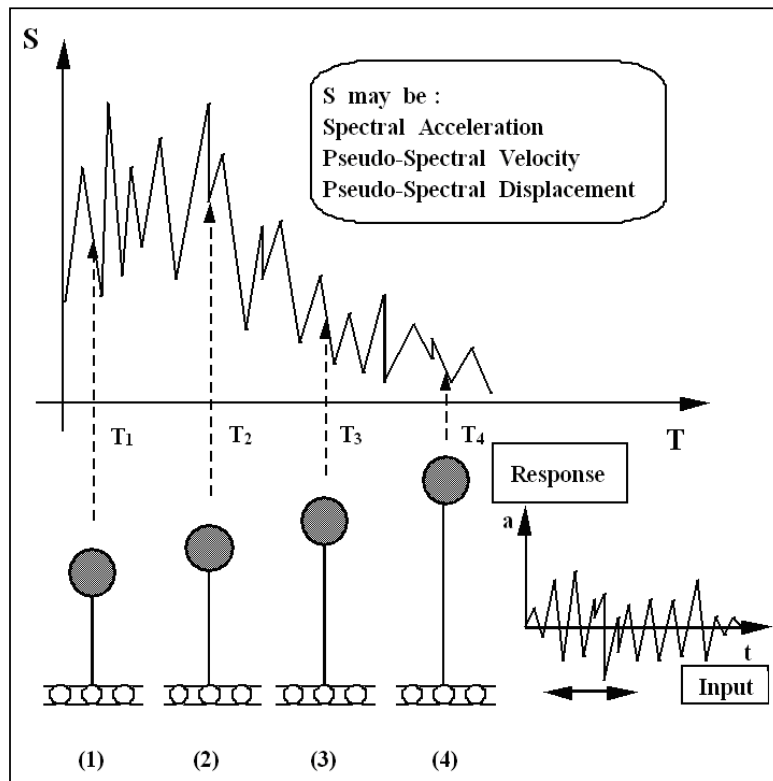
Definisce la probabilità che uno specifico parametro di scuotimento del suolo (ad es. a_{\max}) ha di essere superato in un determinato luogo entro un fissato lasso temporale.

ESEMPIO: il valore di a_{\max} su suolo rigido che ha probabilità di superamento 0.10 in 50 anni (periodo ritorno 475 anni).

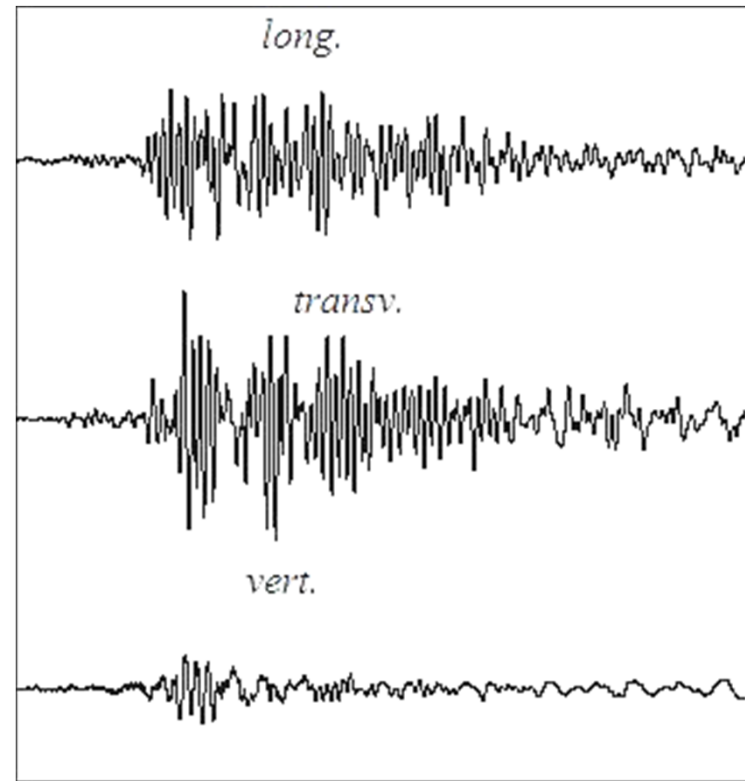
Dipende dalla sismicità regionale e dal contesto sismotettonico.



⇒ RAPPRESENTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA



spettro di risposta elastico



storie temporali (accelerogrammi)

⇒ RAPPRESENTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA

Macrozonazione sismica

T_R = periodo di ritorno ⇒ pericolosità "di base"
 a_g = accelerazione orizzontale di picco

Microzonazione sismica

amplificazione litostratigrafica
amplificazione topografica

AZIONE SISMICA

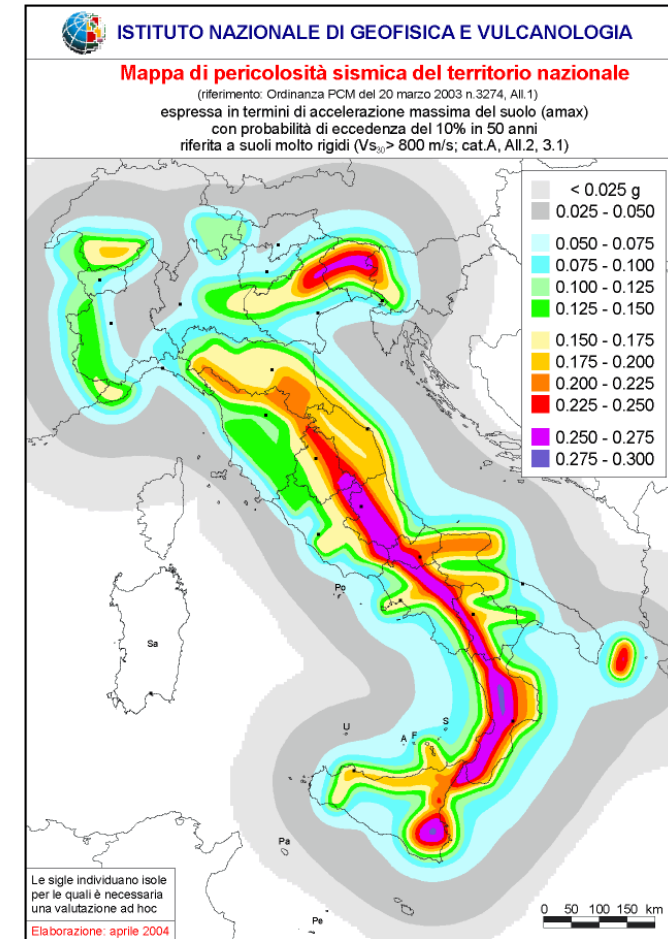
spettri di risposta

orizzontali/verticali
elastici/di verifica
accelerazioni/spostamenti

accelerogrammi

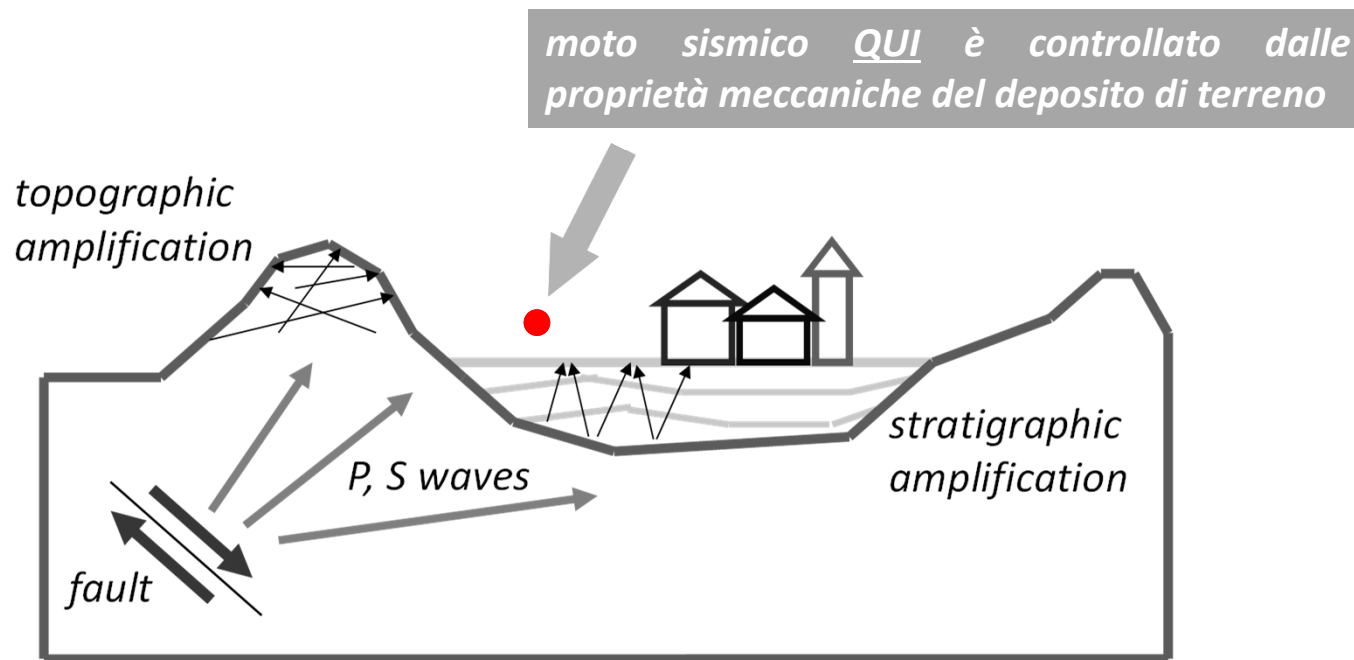
naturali
artificiali
sintetici

DIAGRAMMA DI FLUSSO
PER IL CALCOLO
DELL'AZIONE SISMICA



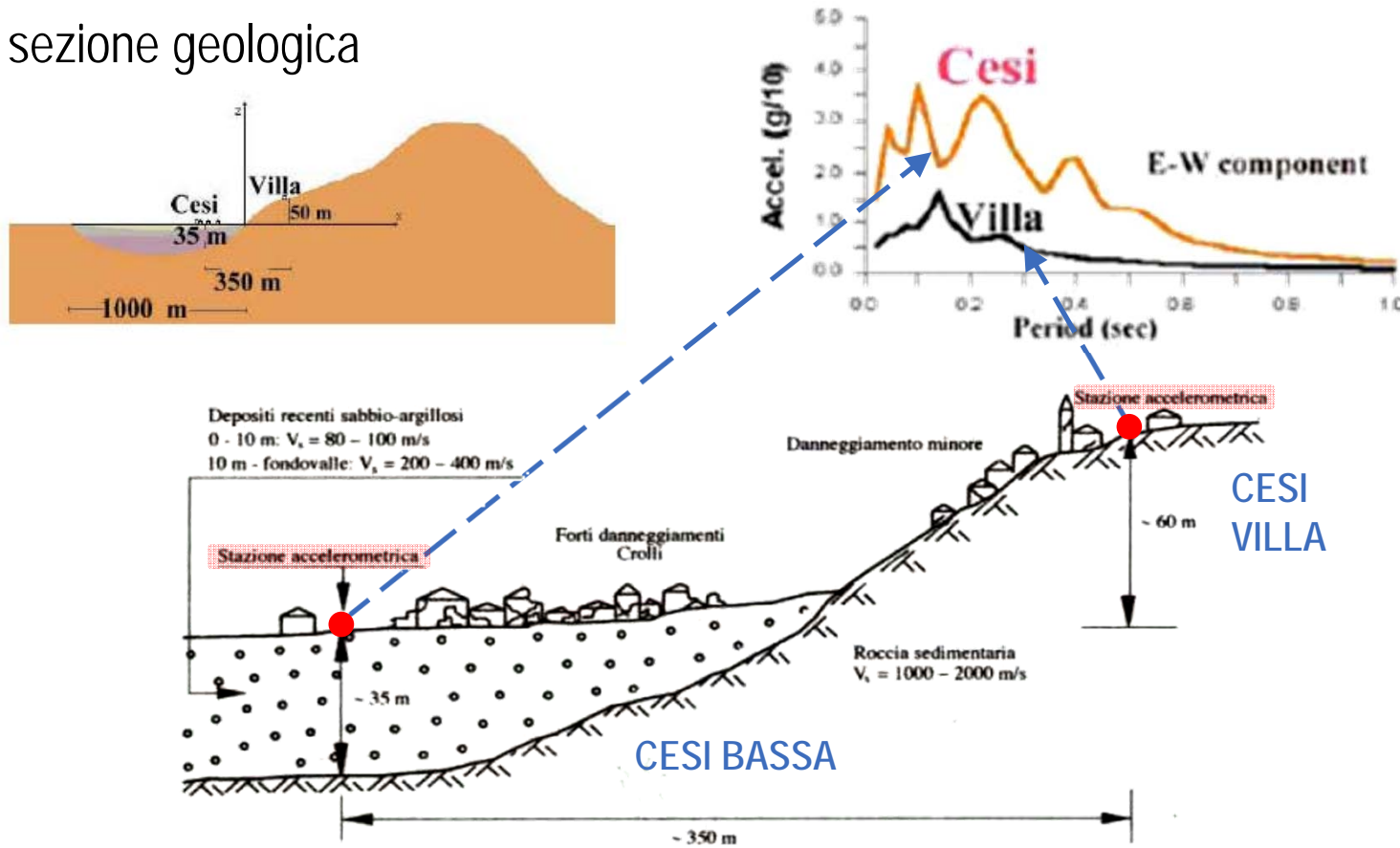
⇒ ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

- Modificazioni del moto sismico proveniente dal substrato causate da condizioni geologiche-geomorfologiche-geotecniche locali



⇒ ESEMPIO: TERREMOTO DI UMBRIA-MARCHE 26 SETTEMBRE 1997 (M 5.9)

sezione geologica



⇒ **Beni culturali: distinzione tra "terremoto di progetto" e "terremoto di soglia"**

- TERREMOTO DI PROGETTO: è rilevante per costruzioni da realizzare. La severità dello scuotimento è stabilita dalle norme in funzione dell'importanza dell'opera e dello stato limite considerato in un approccio alla progettazione di tipo prestazionale.



Minareti di Herat (Afghanistan): fotografia scattata nel 1933

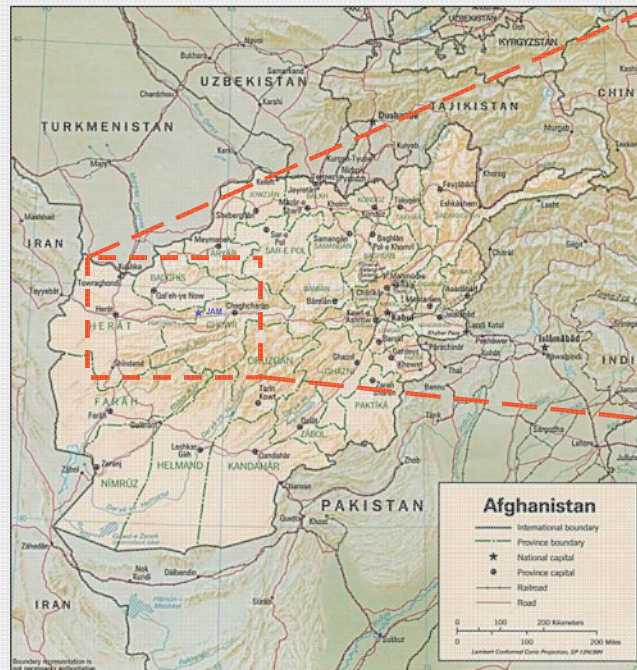
- TERREMOTO DI SOGLIA: è rilevante per le costruzioni esistenti (beni culturali). È di interesse determinare il livello di scuotimento che determina nella struttura il raggiungimento di stato limite di collasso. Per una data struttura è scritto ed è indipendente dalla sismicità del sito di costruzione (Grandori e Faccioli, 1994).

- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del modello di sottosuolo*
- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del terremoto di progetto*
- ***Caso di studio 1: minareto islamico di Jam (Afghanistan)***
- *Caso di studio 2: tempio induista di Kancheepuram (India meridionale)*
- *Caso di studio 3: torre di Pisa (Campo dei Miracoli, Pisa)*
- *Caso di studio 4: tempio di Marte Ultore (Roma)*
- *Caso di studio 5: santuario "Regina Montis Regalis" di Vicoforte*
- *Considerazioni finali*

caso di studio 1: minareto di Jam (Afghanistan)

Informazioni generali

Ubicazione del sito di Jam



**Ubicazione del Sito di
JAM in Afghanistan**

34° 23' N; 64° 31' E

(Fonte: Macchi, Lai, Menon, 1994)

Informazioni generali

Principali caratteristiche minareto:

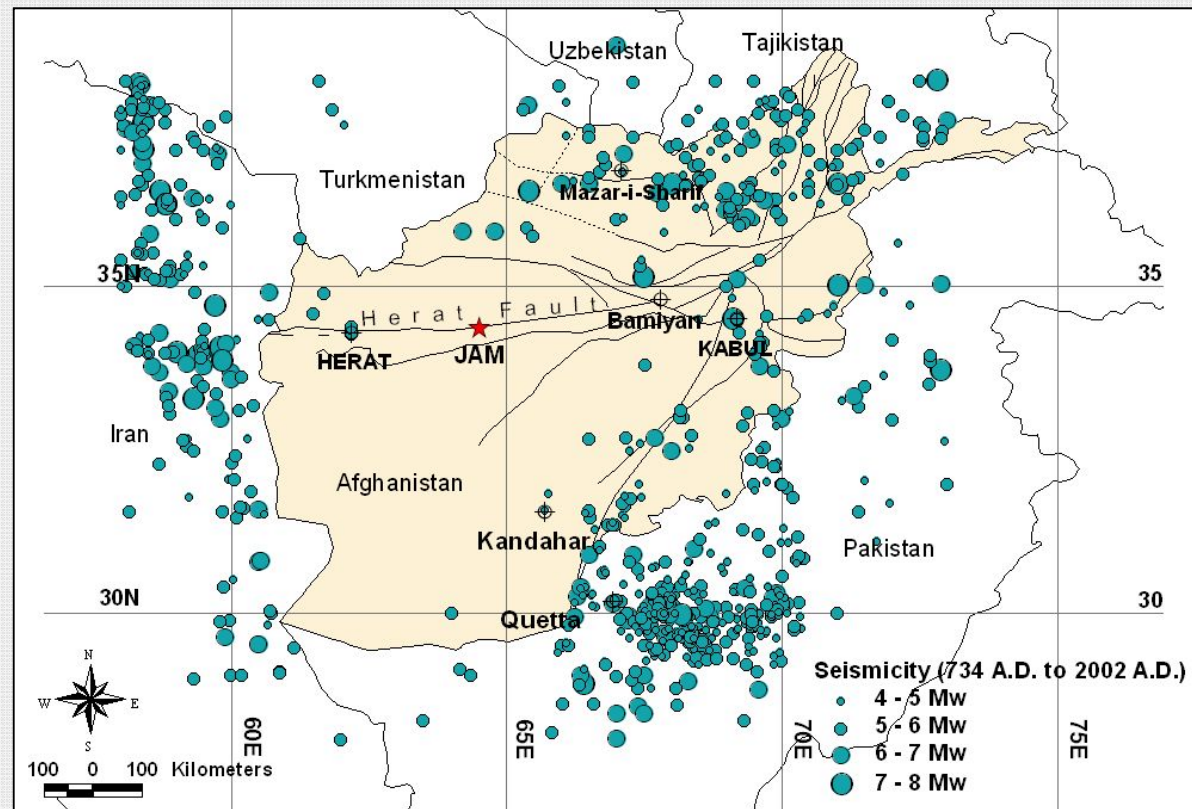
- anno costruzione 1163 - 1203 A.D. (~800 anni)
- altezza 60.4 m fuori terra
- diametro 9.80 m (base ottagonale)
- inclinato rispetto alla base di 3.4°
- persa traccia per lungo tempo (1957)
- *UNESCO* Giugno 2002 (Andrea Bruno)



(Fonte: Macchi, Lai, Menon, 1994)

caso di studio 1: minareto di Jam (Afghanistan)

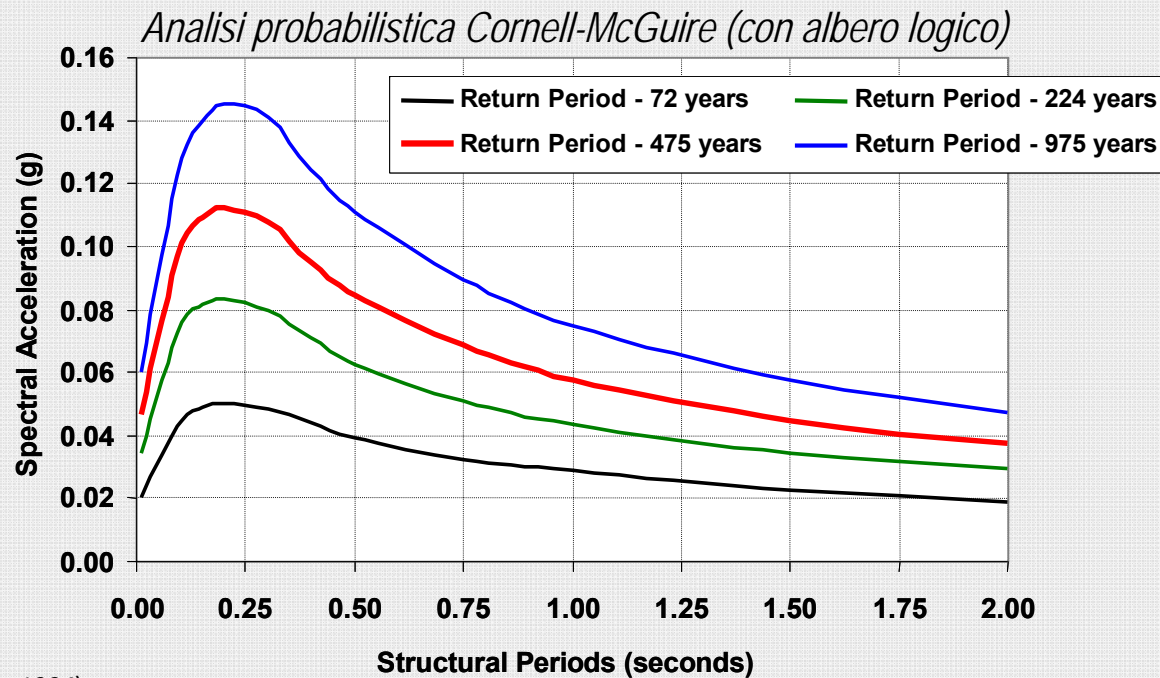
Sismicità storica dell'Afghanistan



(Fonte: Macchi, Lai, Menon, 1994)

Pericolosità sismica al sito archeologico di Jam

Spettri di risposta "a pericolosità uniforme": componente orizzontale



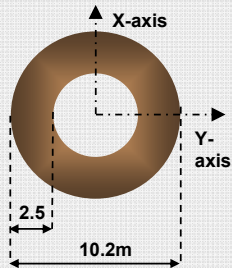
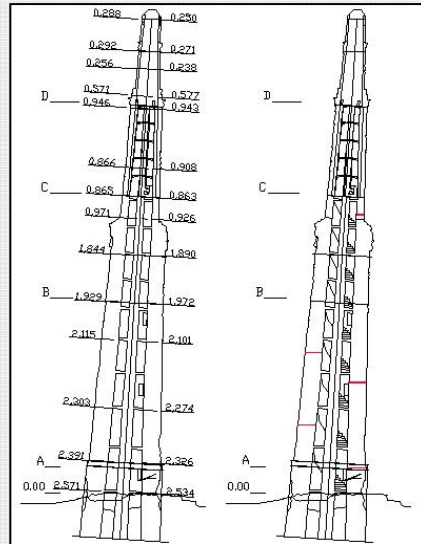
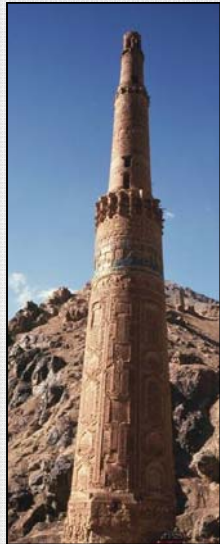
Valori di PGA

RP(yr)	PHA(g)	PVA(g)
72	0.022	0.013
224	0.032	0.019
475	0.041	0.024
975	0.041	0.024

(Fonte: Macchi, Lai, Menon, 1994)

caso di studio 1: minareto di Jam (Afghanistan)

Verifica sismica del minareto tenendo conto dell'interazione suolo-struttura



- Peso specifico muratura: 16 kN/m^3
- Modulo di Young: 3200 MPa
- Resistenza media a compressione: 4 MPa

Modello a masse concentrate

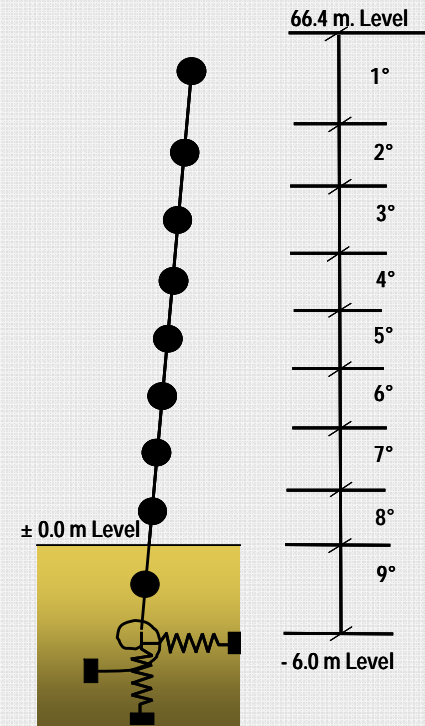
risultati analisi modale

Foundation Type	Fundamental Period (s)
Stiff Soil ($V_s = 1000 \text{ m/s}$)	1.12
Soft Soil ($V_s = 200 \text{ m/s}$)	1.31

matrice di impedenza dinamica del terreno

- $V_s = 200 \text{ m/s}$
- $V_s = 1000 \text{ m/s}$

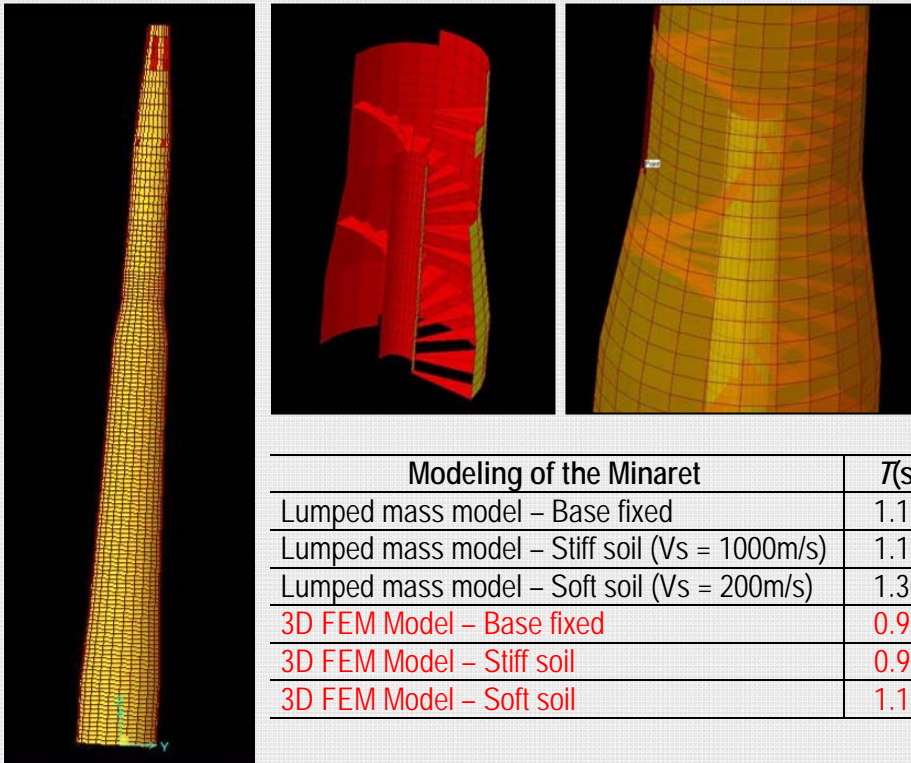
VALORI ASSUNTI!



(Fonte: Macchi, Lai, Menon, 1994)

Verifica sismica del minareto tenendo conto dell'interazione suolo-struttura

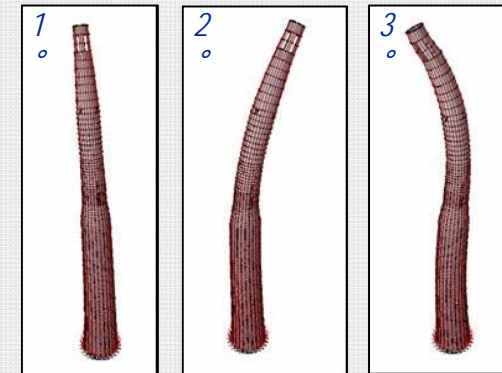
Sezioni del modello con annessa scala elicoidale



Modello 3D ad elementi finiti

- 6320 elementi guscio ("shell")
- 36894 gradi di libertà
- minareto inclinato di 3.4°

risultati analisi modale



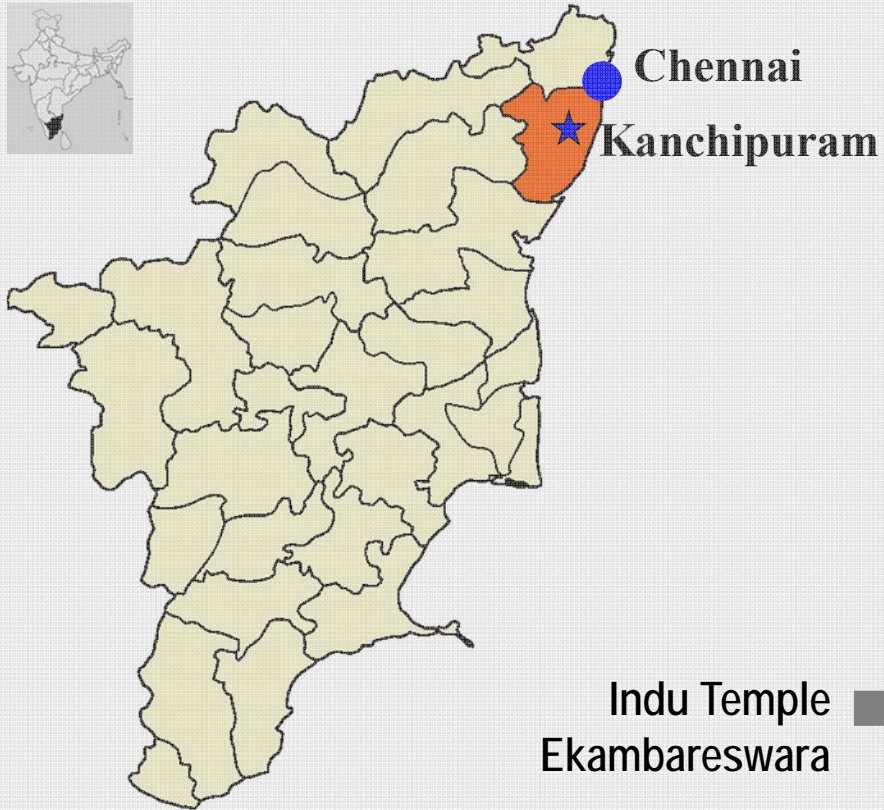
(Fonte: Macchi, Lai, Menon, 1994)

sommario

- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del modello di sottosuolo*
- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del terremoto di progetto*
- *Caso di studio 1: minareto islamico di Jam (Afghanistan)*
- *Caso di studio 2: tempio induista di Kancheepuram (India meridionale)*
- *Caso di studio 3: torre di Pisa (Campo dei Miracoli, Pisa)*
- *Caso di studio 4: tempio di Marte Ultore (Roma)*
- *Caso di studio 5: santuario "Regina Montis Regalis" di Vicoforte*
- *Considerazioni finali*

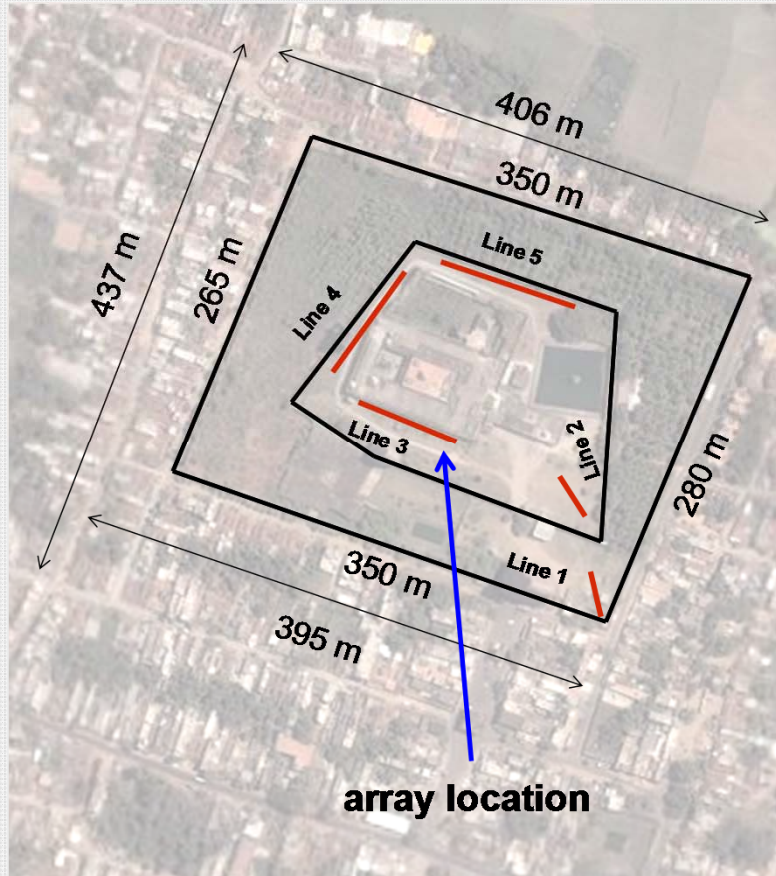
caso di studio 2: tempio di Kancheepuram (India)

Archaeological site in Southern India



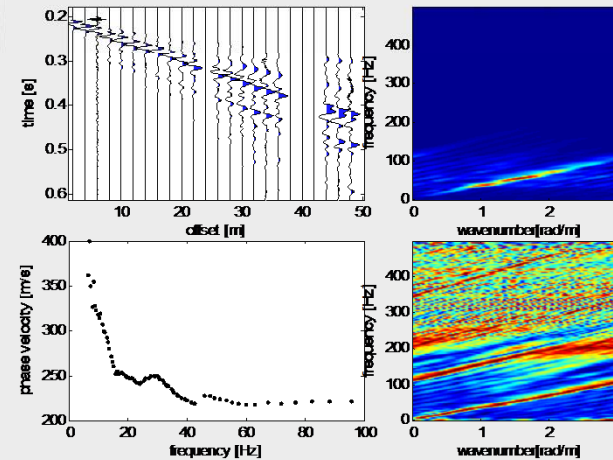
Tallest (60 meters) built in 1509 A.D

Geotechnical site characterization



Two different types of geophysical seismic tests were performed (MASW and REMI) using the same experimental set-up.

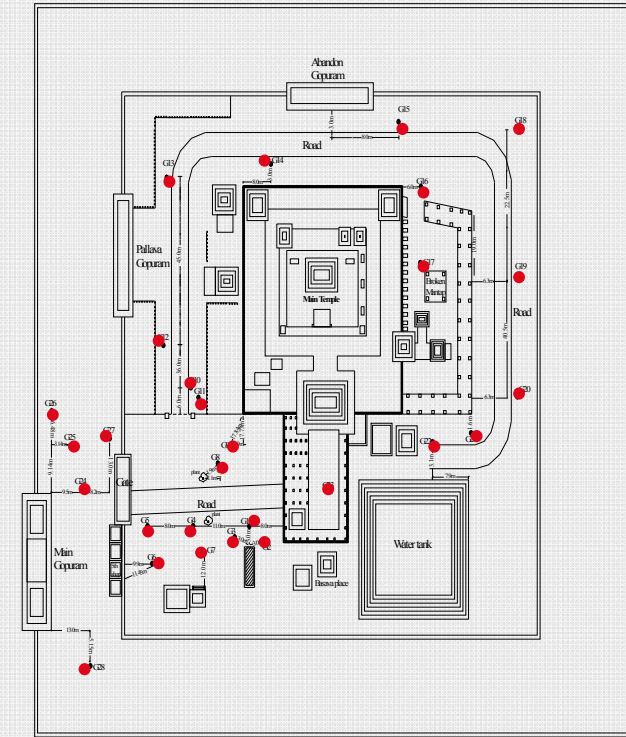
The data for **MASW** and **REMI** tests was acquired using a linear array of vertical geophones.



Geotechnical site characterization



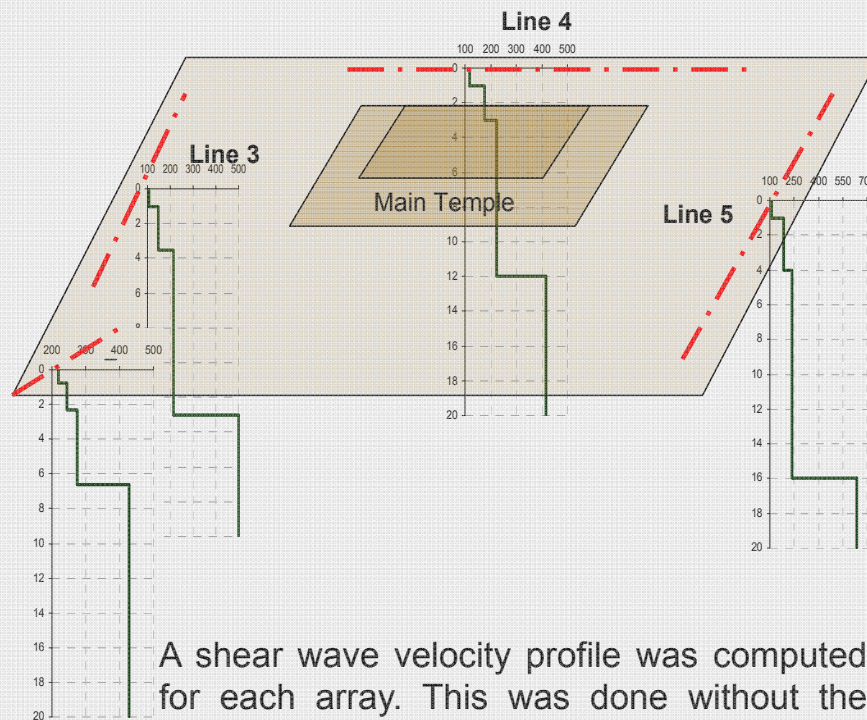
In order to identify the lithology at the site, five boreholes were excavated ranging from 10 to 20m in depth.



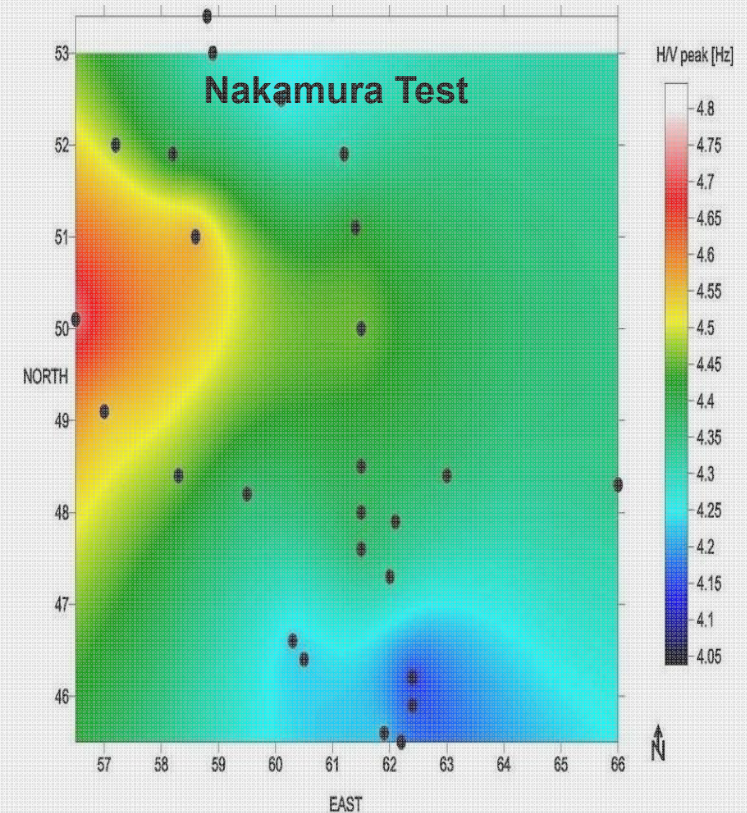
The **HVSR** technique was used as an effective tool to identify the natural frequency of the sites in order to see if there were large impedance contrast with the underlying bedrock.

Geotechnical site characterization

Shear Wave Velocity Profiles

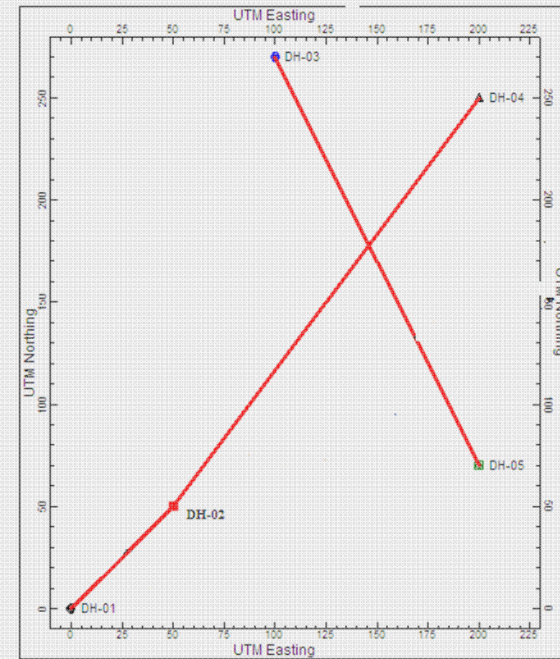
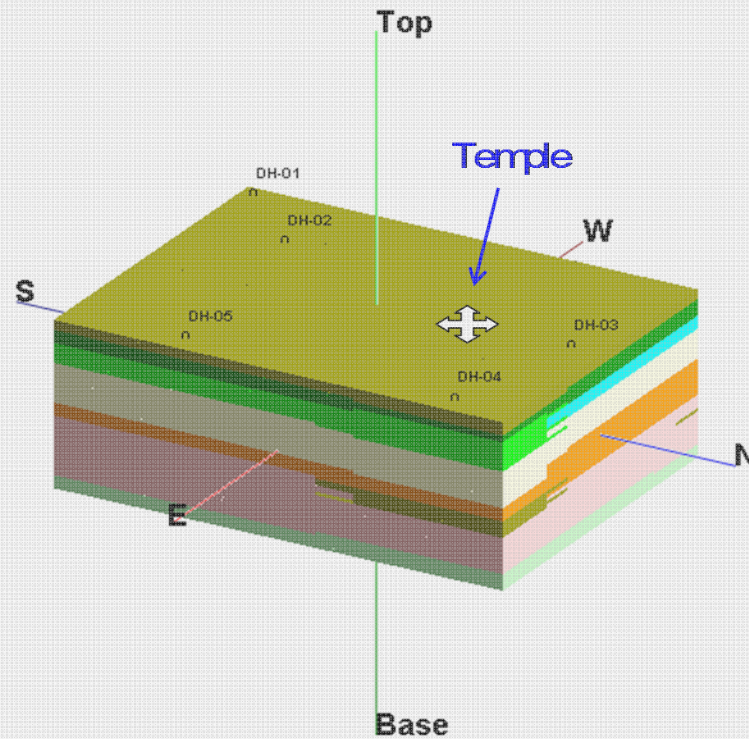


A shear wave velocity profile was computed for each array. This was done without the constraints of the thickness of the layers obtained from the boreholes.



From the Nakamura points test it can be seen that change in frequency is very small, thus the profile under the temple can be consider as a 1D.

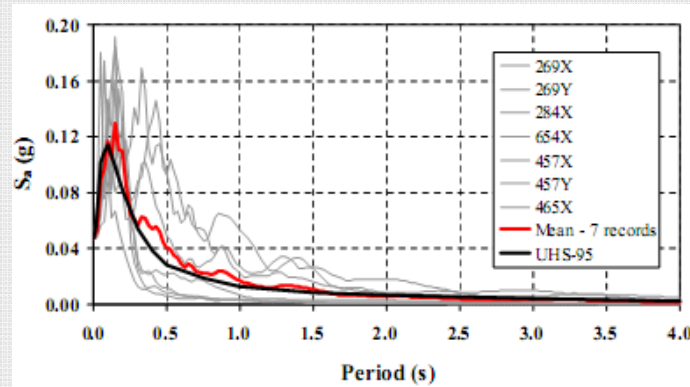
Geotechnical site characterization



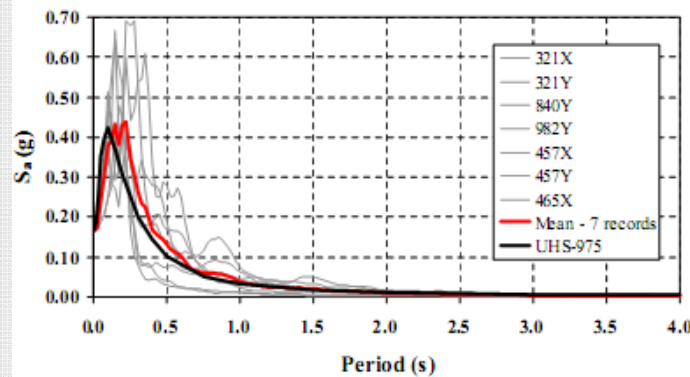
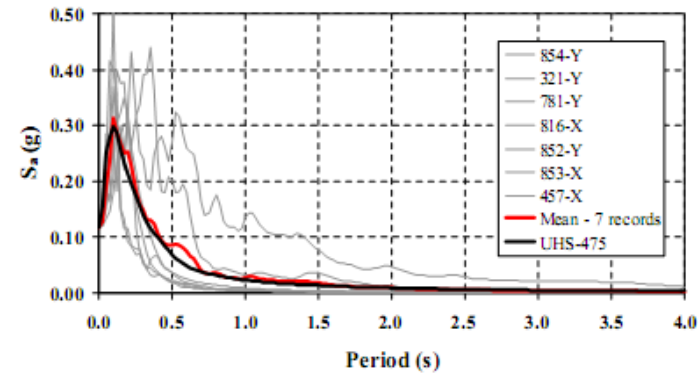
In order to create a model of the soil conditions and to determine the layer constraints at the site a series of profiles were interpolated using the information from the boreholes

Definition of seismic input on outcropping bedrock

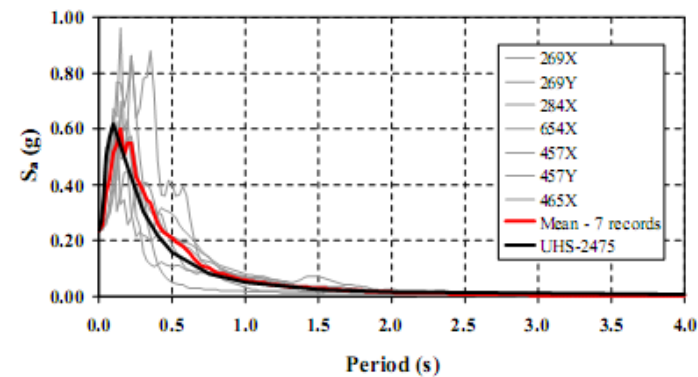
95-year Return Period



475-year Return Period



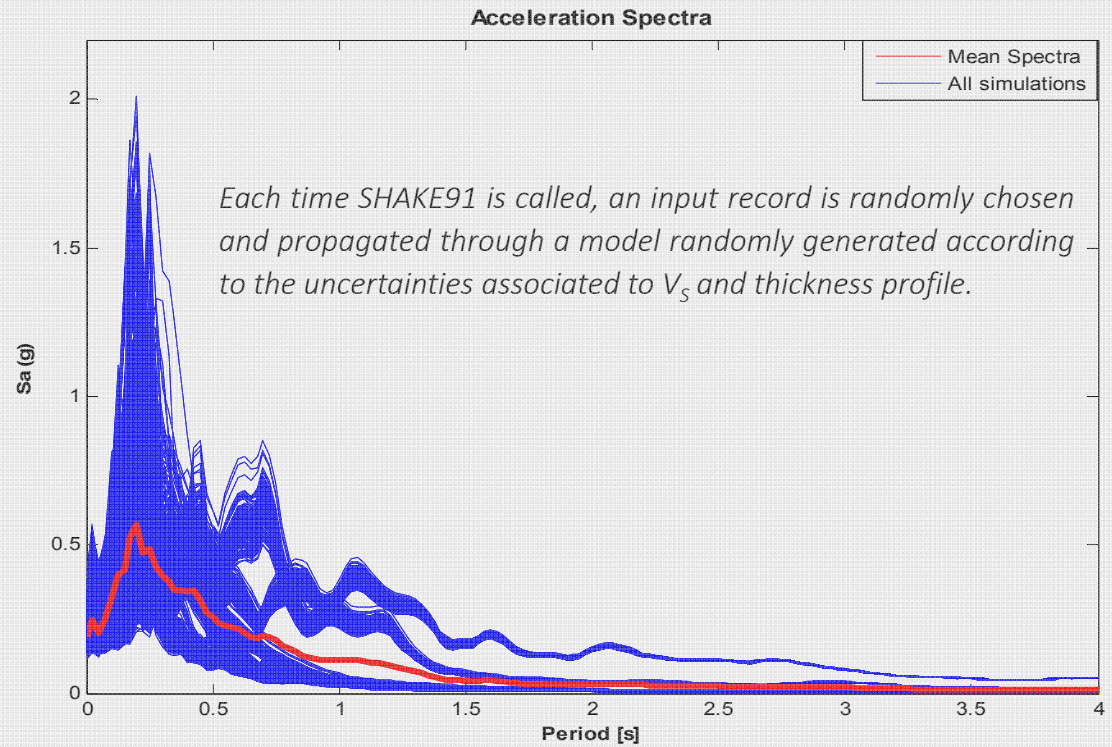
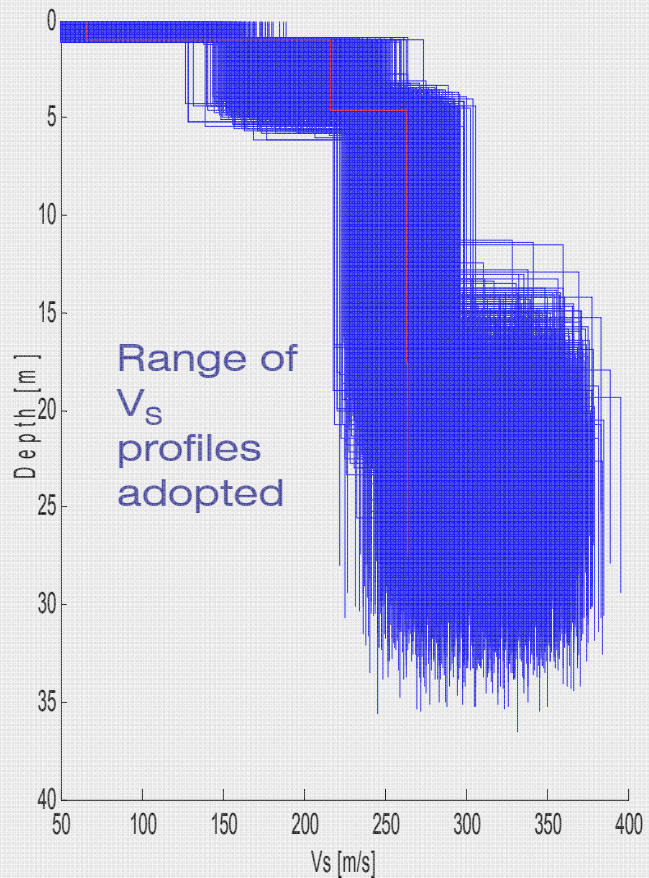
975-year Return Period



2,475-year Return Period

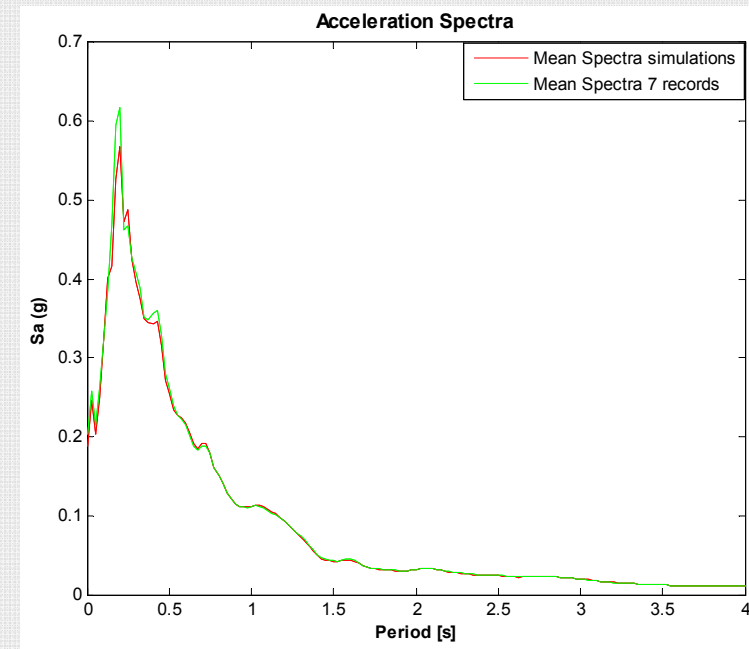
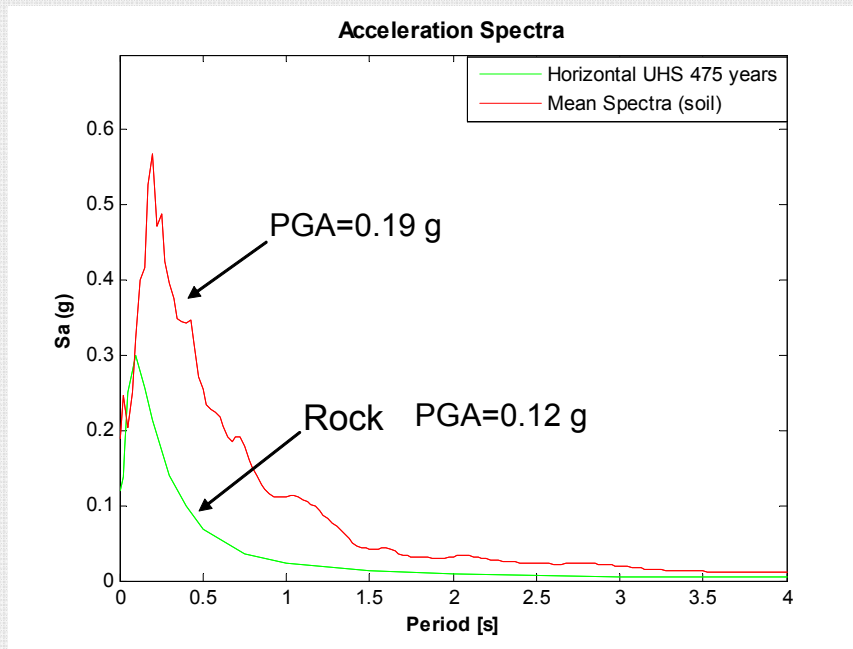
caso di studio 2: tempio di Kancheepuram (India)

Definition of seismic input at temple site



Spectrum obtained at rock site is compared with the mean spectra of all simulations. Site conditions amplify the response. PGA after propagation is 63 % higher. Peak accelerations are shifted to longer periods.

Definition of seismic input at temple site



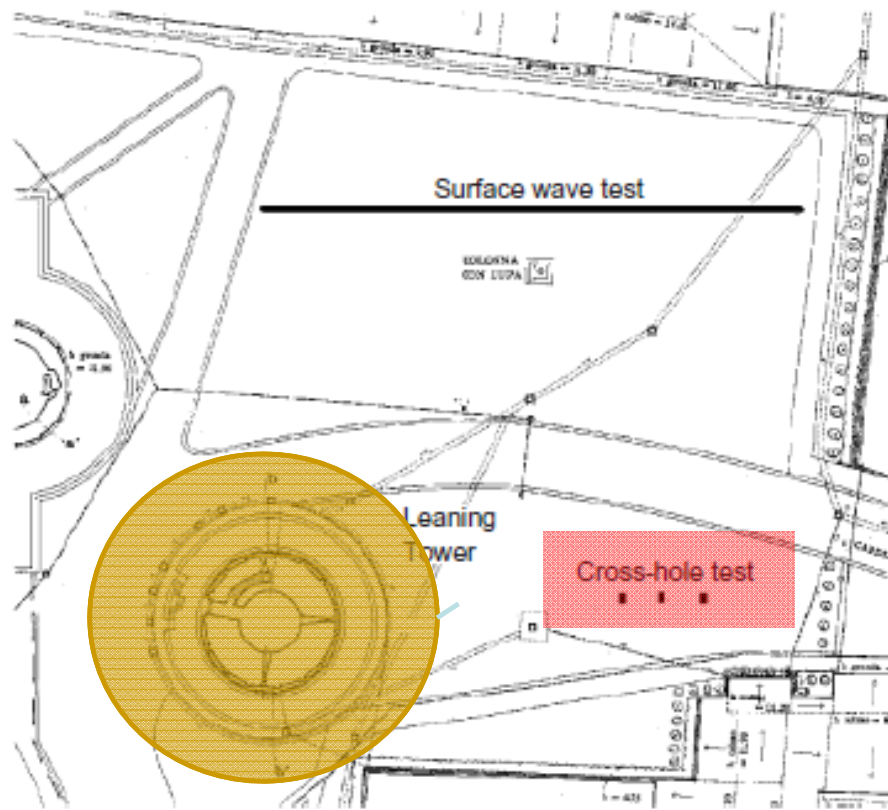
A set of 7 spectrum-compatible simulated records is selected using as a reference the mean spectrum at the free-surface. This is done to provide seismic input to carry out dynamic analyses of the temple considering the amplification due to site conditions.

sommario

- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del modello di sottosuolo*
- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del terremoto di progetto*
- *Caso di studio 1: minareto islamico di Jam (Afghanistan)*
- *Caso di studio 2: tempio induista di Kancheepuram (India meridionale)*
- ***Caso di studio 3: torre di Pisa (Campo dei Miracoli, Pisa)***
- *Caso di studio 4: tempio di Marte Ultore (Roma)*
- *Caso di studio 5: santuario "Regina Montis Regalis" di Vicoforte*
- *Considerazioni finali*

SITE GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION

Case Study: Pisa (*Campo dei Miracoli*)

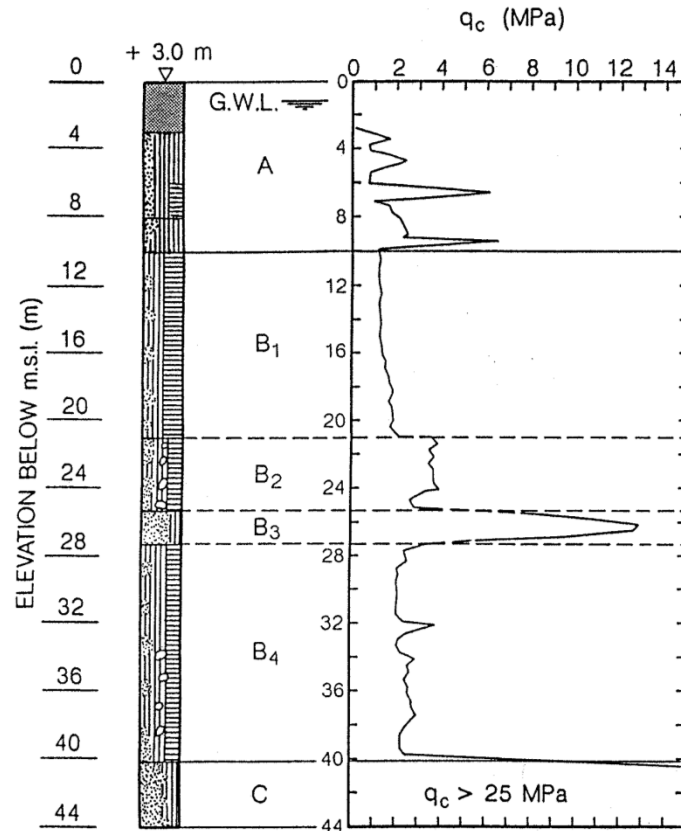


(Fonte: Foti, 2003)

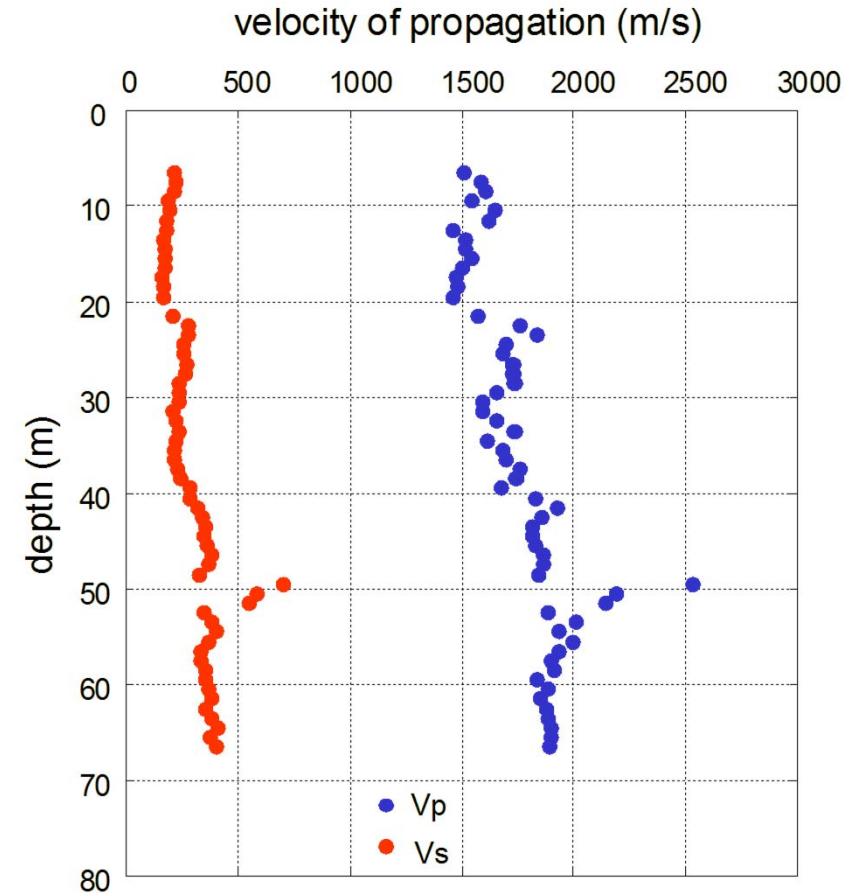


SITE GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION

Case Study: Pisa (*Campo dei Miracoli*)

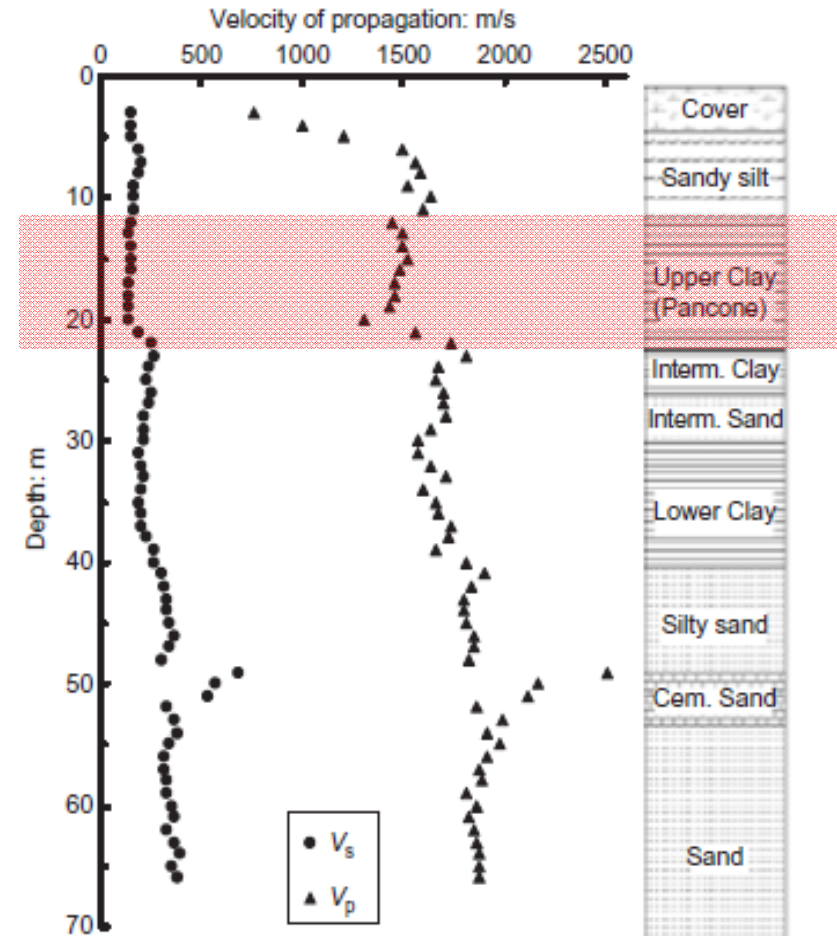
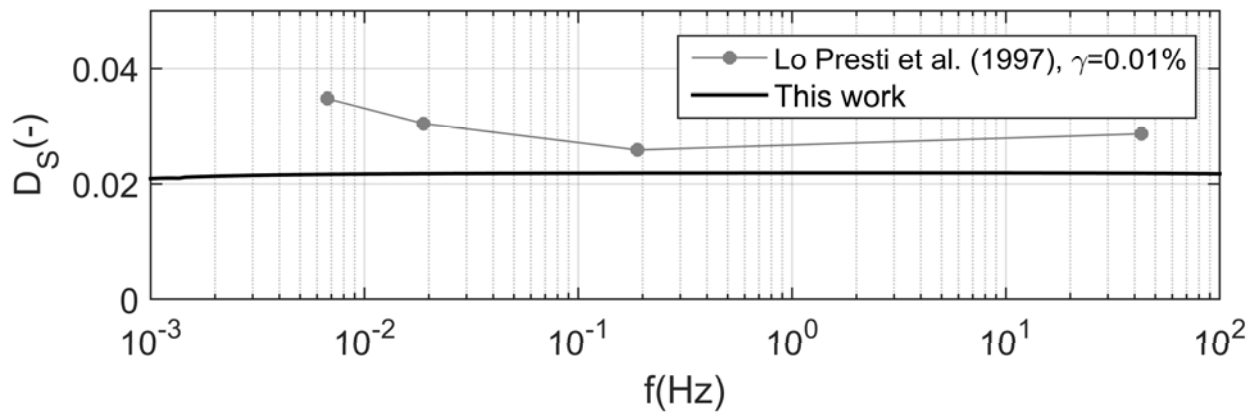
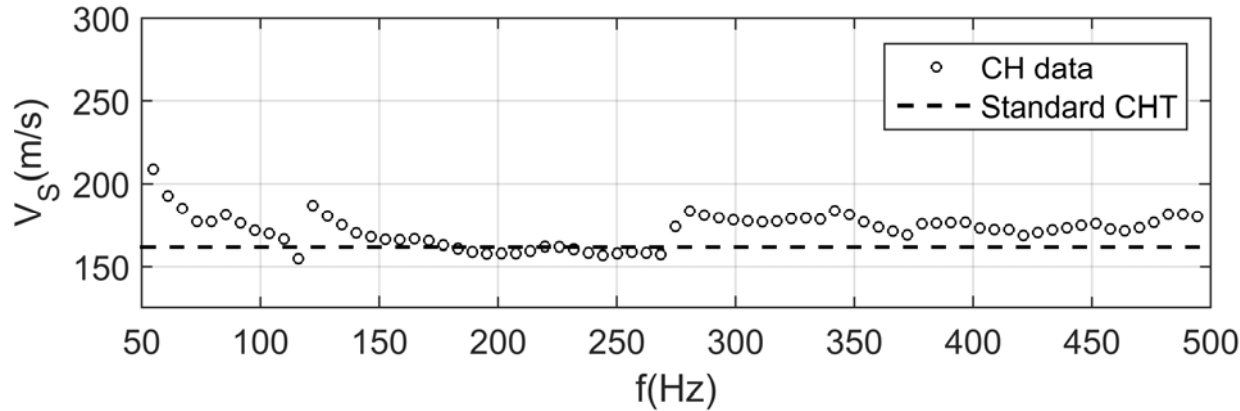


(Courtesy: Jamiolkowski, 2001)



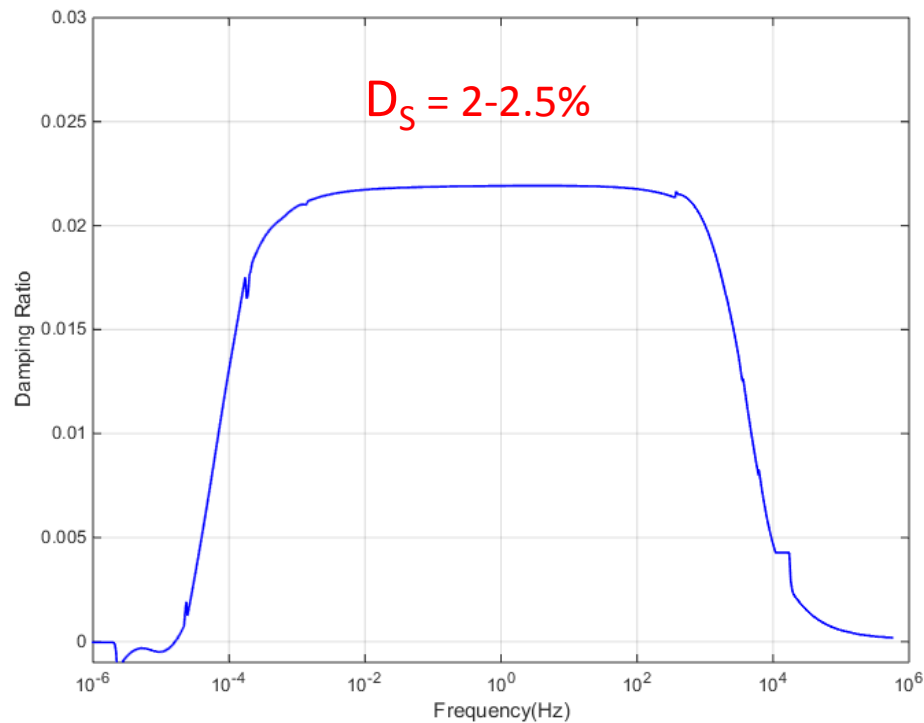
⇒ Non-conventional interpretation of CHT data

Preliminary application @ Pisa tower site

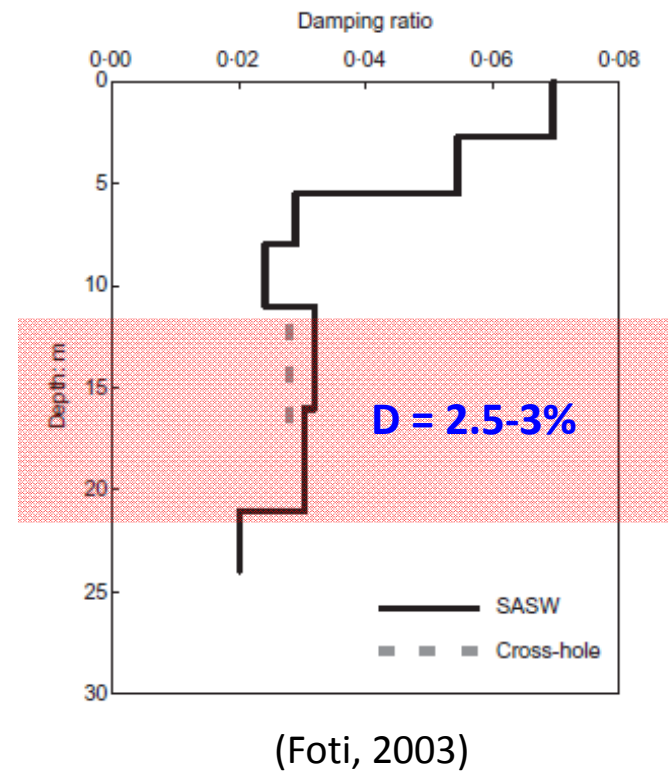


⇒ Non-conventional interpretation of CHT data

Preliminary application @ Pisa tower site



Cross-hole test Site: Pisa tower



- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del modello di sottosuolo*
- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del terremoto di progetto*
- *Caso di studio 1: minareto islamico di Jam (Afghanistan)*
- *Caso di studio 2: tempio induista di Kancheepuram (India meridionale)*
- *Caso di studio 3: torre di Pisa (Campo dei Miracoli, Pisa)*
- ***Caso di studio 4: tempio di Marte Ultore (Roma)***
- *Caso di studio 5: santuario "Regina Montis Regalis" di Vicoforte*
- *Considerazioni finali*

PROJECT FOUNDED BY REGIONE LOMBARDIA (ASTIL – 2011-2012)

Archaeological sites in Italy and India

*PARTHASARATHY TEMPLE
(CHENNAI, INDIA)*



*MARTE ULTORE TEMPLE
(ROME, ITALY)*



GEOPHYSICAL AND GEOTECHNICAL INVESTIGATION

PARTHASARATHY TEMPLE (CHENNAI, INDIA)



Aerial view of the Temple site (green dotted lines), analyzed with structural tests (green bold lines), seismic lines (black arrows, letters A through C) and Nakamura locations (red dots, letters 1-3).

Aerial view of the Temple site (green dotted lines) and fourth seismic line performed in a parking lot (black arrow, letter D)



GEOPHYSICAL AND GEOTECHNICAL INVESTIGATION

MARTE ULTORE TEMPLE (ROME, ITALY)

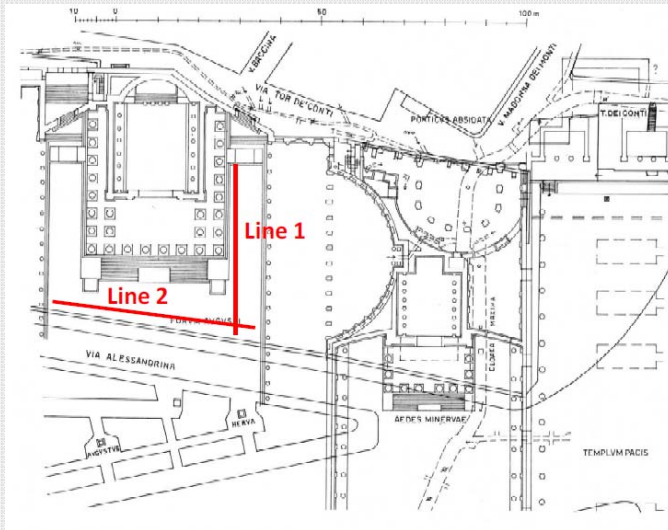


Aerial view of the temple site showing the location of the two seismic lines (Line 1 and Line 2) in the perimeter of the Marte Ultore Temple.

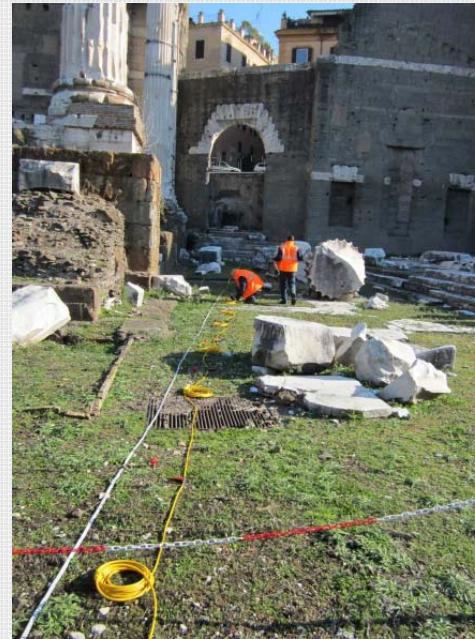
caso di studio 4: tempio di Marte Ultore (Roma)

GEOPHYSICAL AND GEOTECHNICAL INVESTIGATION

MARTE ULTORE TEMPLE (ROME, ITALY)



Architectural plan of the Forum of Augustus showing the location of the two seismic lines.



Line 1

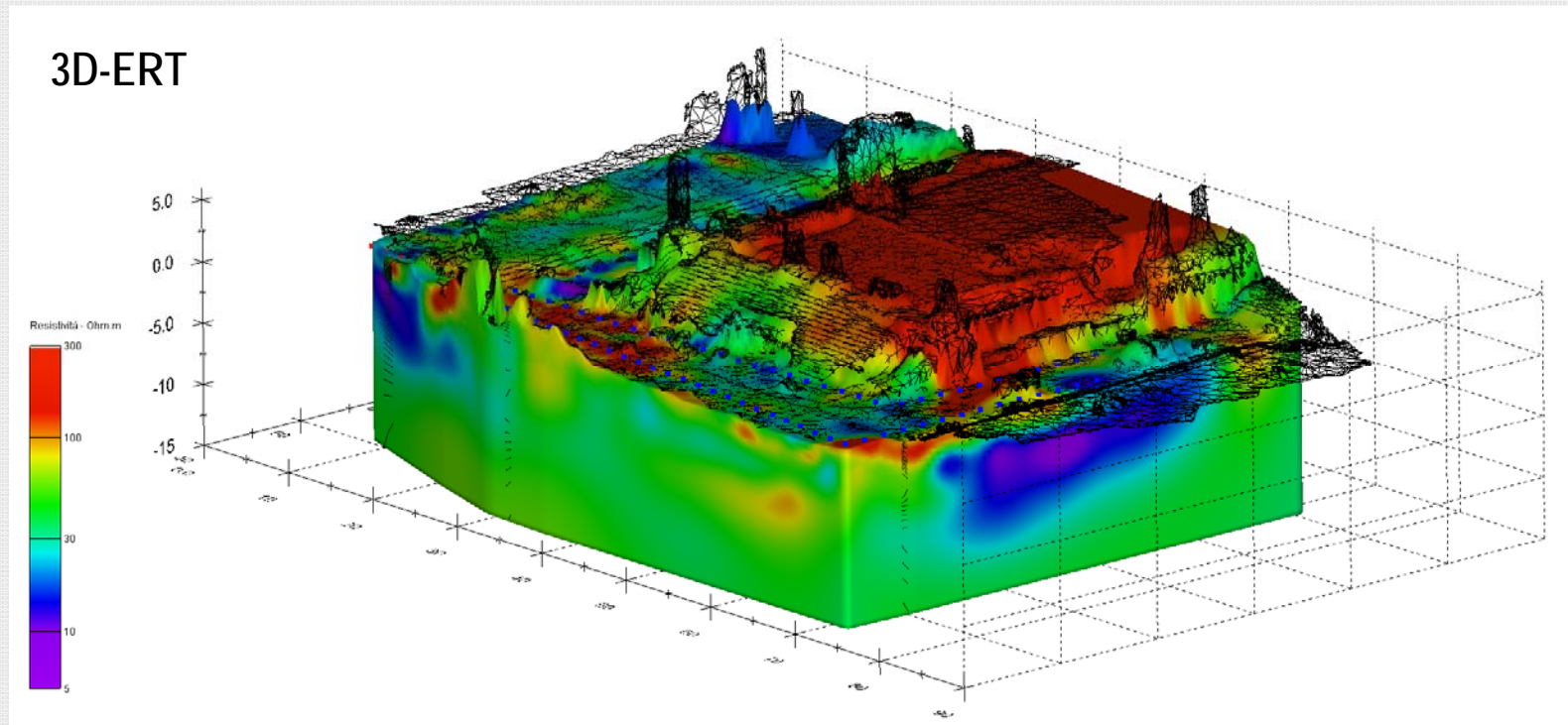


Line 2

GEOPHYSICAL AND GEOTECHNICAL INVESTIGATION

MARTE ULTORE TEMPLE (ROME, ITALY)

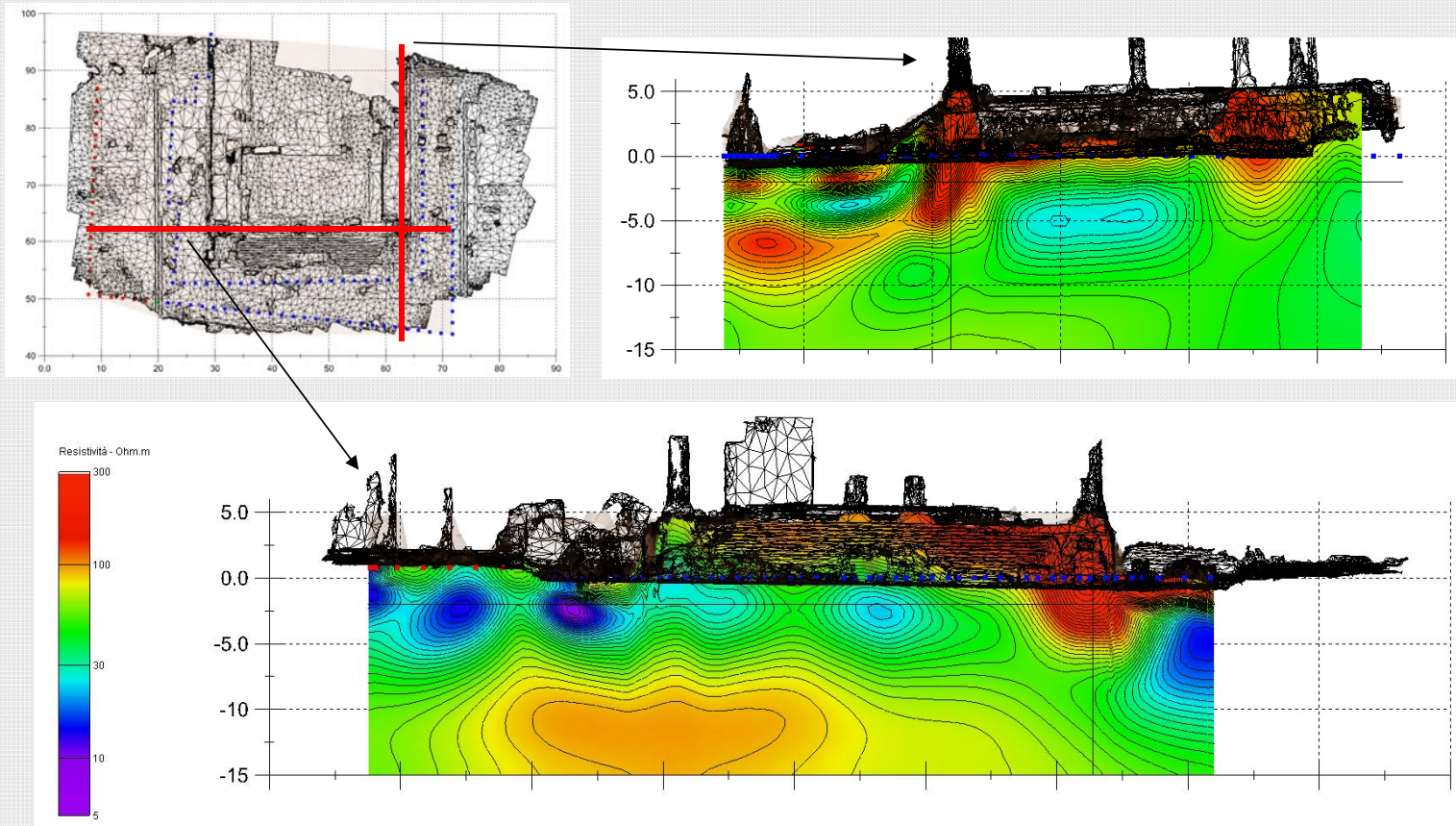
As part of the geophysical characterization campaign for the Temple of Marte Ultore, GEO Studi Astier S.r.l. performed a campaign of GPR and 3D ERT tests



caso di studio 4: tempio di Marte Ultore (Roma)

GEOPHYSICAL AND GEOTECHNICAL INVESTIGATION

MARTE ULTORE TEMPLE (ROME, ITALY)



sommario

- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del modello di sottosuolo*
- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del terremoto di progetto*
- *Caso di studio 1: minareto islamico di Jam (Afghanistan)*
- *Caso di studio 2: tempio induista di Kancheepuram (India meridionale)*
- *Caso di studio 3: torre di Pisa (Campo dei Miracoli, Pisa)*
- *Caso di studio 4: tempio di Marte Ultore (Roma)*
- *Caso di studio 5: santuario "Regina Montis Regalis" di Vicoforte*
- *Considerazioni finali*

caso di studio 5: santuario "Regina Montis Regalis" di Vicoforte



HISTORICAL BACKGROUND



"Regina Montis Regalis" Sanctuary is located at Vicoforte (CN), in the Southwest of the Piedmont region in Northern Italy

In 1596 Charles Emmanuel I of Savoy commissioned the construction of a large Sanctuary from the court architect Ascanio Vitozzi

caso di studio 5: santuario "Regina Montis Regalis" di Vicoforte

In 1692 construction works were entrusted to Francesco Gallo who built the great elliptical dome, which has major and minor diameters of 37 and 25 meters respectively



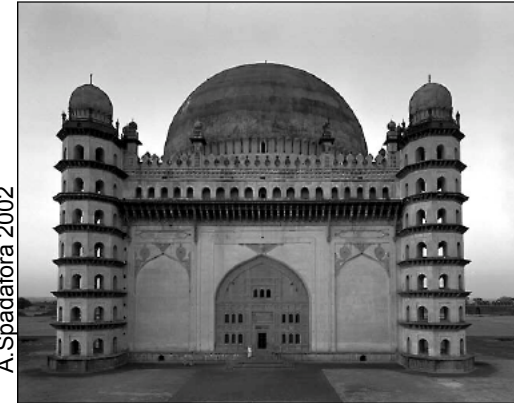
A. Spadafora 2002

S.Pietro



A. Spadafora 2002

S.Maria del Fiore



A. Spadafora 2002

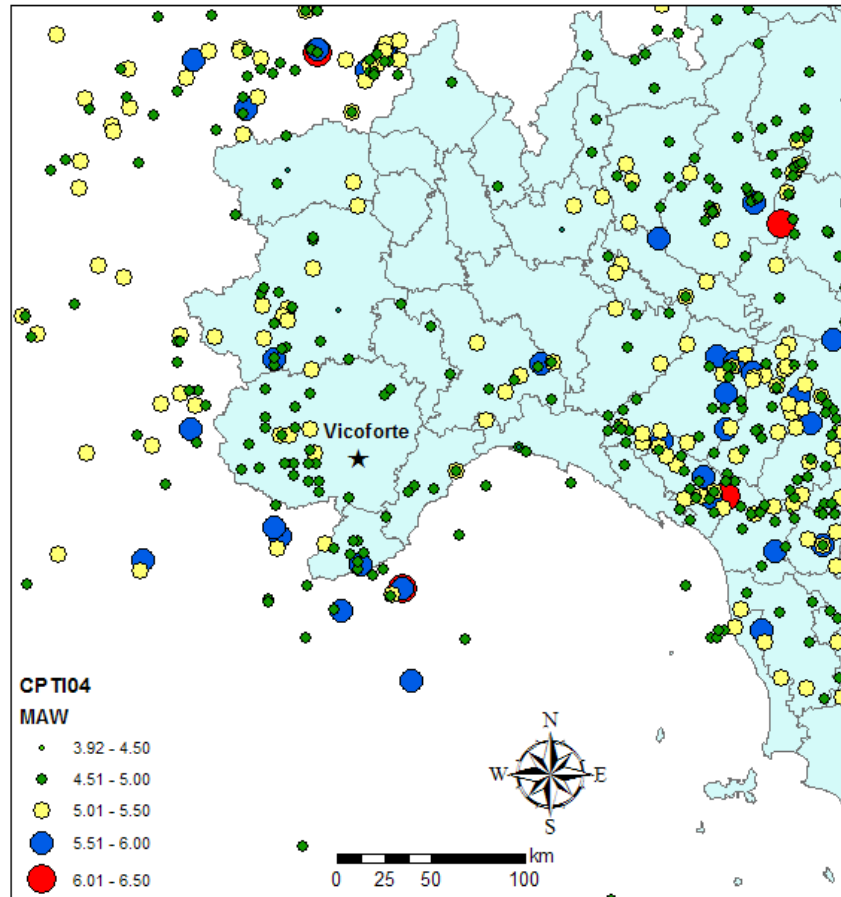
Mausoleo Gol Gumbaz

		Locality	Construction Period	Diameter	Proyect
1	Pietro	Rome (Italy)	1546-1593	42.84 m	Michelangelo
2	S.Maria del Fiore	Florence (Italy)	1423-1425	41.7 m	Brunelleschi
3	Mausoleo di Gol Gumbaz	Bijiapur (India)	1636-1660	37.9 m	Yaqut of Dabul
4	Vicoforte di Mondovi	Vicoforte (Italy)	1701-1750	37.15- 24.8 m	Gallo
5	Hagia Sofia	Istambul (Turkey)	532-537	33.23 m	Antemio di Tralles, Isidoro di Mileto

Elliptical domes

		Locality	Construction Period	Diameter	Proyect
1	Vicoforte di Mondovi	Vicoforte (Italy)	1701-1750	37.15-24.8 m	Gallo
2	S.Andrea al Quirinale	Rome (Italy)	1658	26-17 m	G.L. Bernini
3	S.Carlos alle Quatro Fontane	Rome (Italy)	1638	25-19 m	F. Borromini
4	Convento Bernardas	Alcalá (Spain)	1626	25-17.5 m	S.Plaza

EARTHQUAKE CATALOGUE



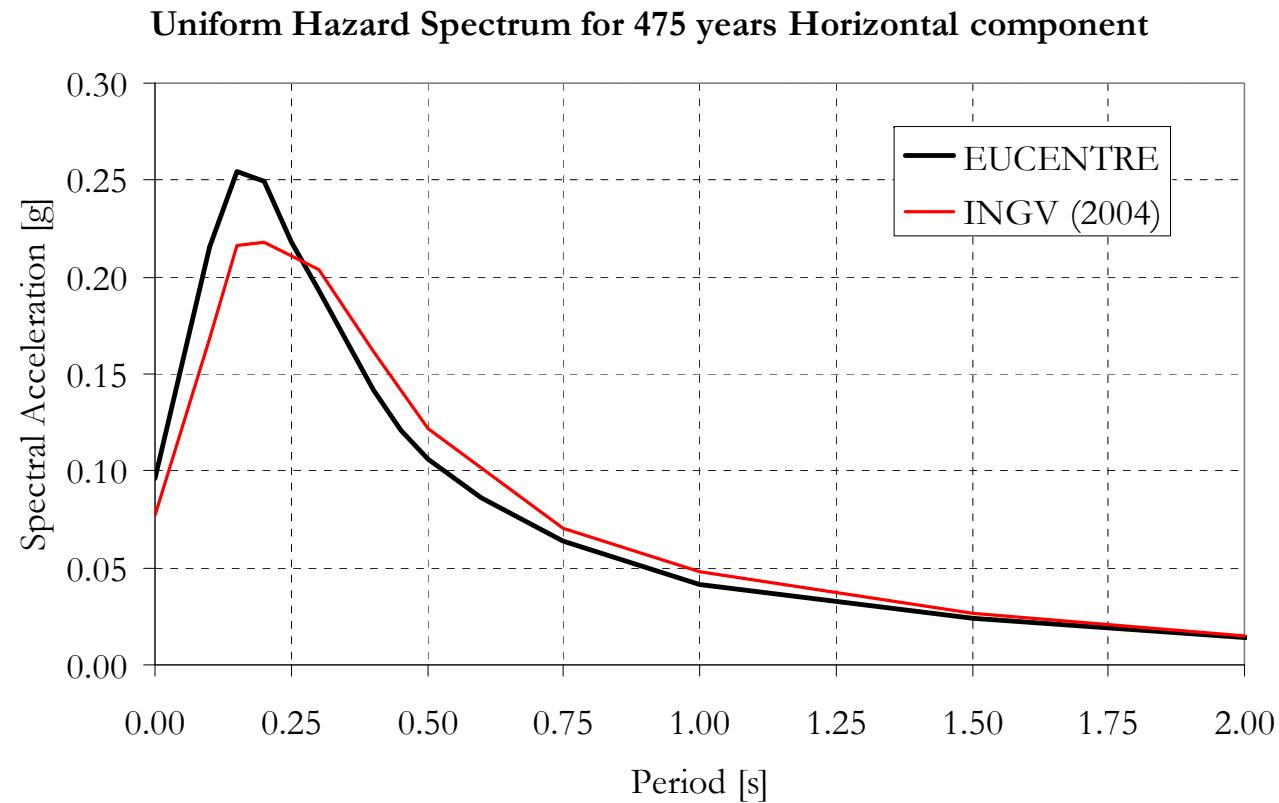
Data from INGV (2004)

Probabilistic Seismic Hazard Assessment at the Site

The earthquake catalogue covers historical and instrumentally detected seismic events in an area with radius 200 km.

CPTI04 was used as the source

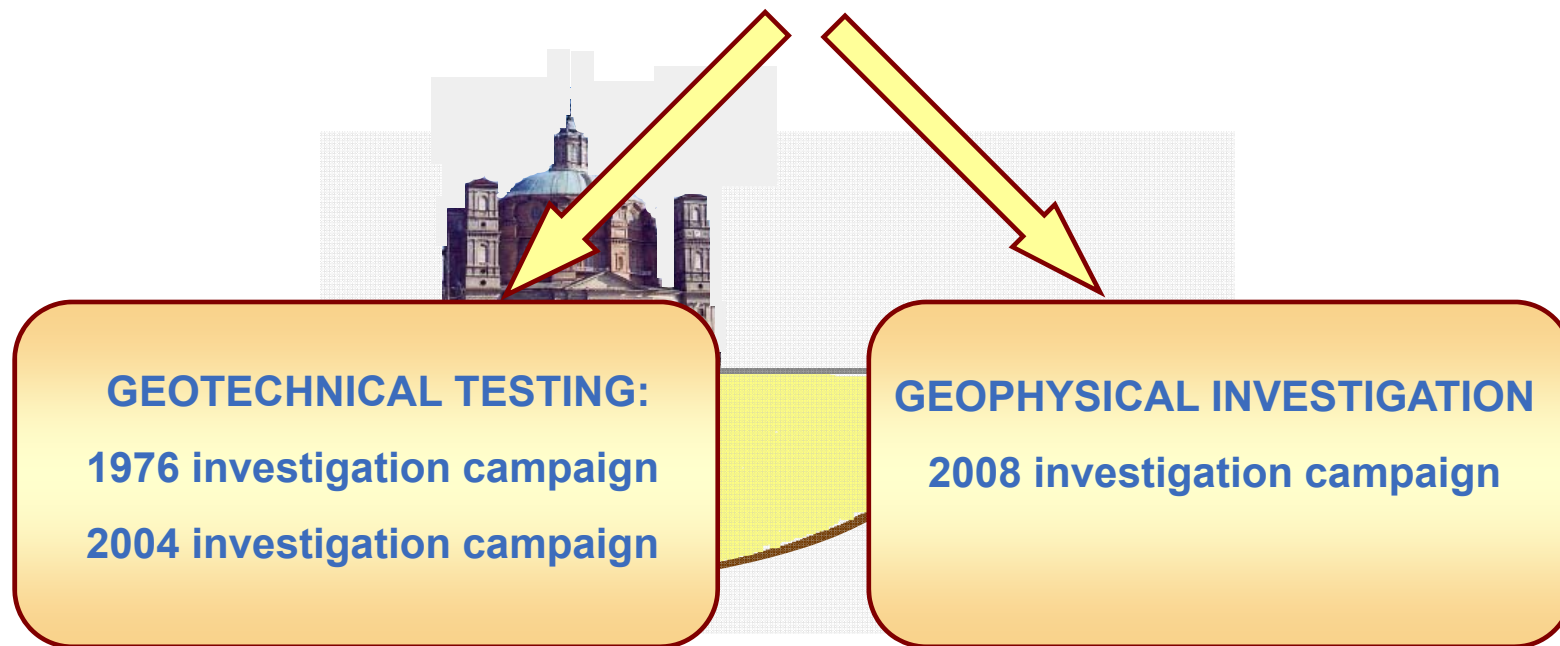
Probabilistic Seismic Hazard Assessment at the Site



Uniform Hazard Spectra for Vicoforte from logic tree for horizontal components, obtained as weighted average.

Geotechnical Characterization at the Cathedral Site

- Accurate knowledge of subsoil properties is fundamental to carry out seismic site response analysis.
- Through the years several site characterization campaigns have been performed at Vicoforte.
- The results of the different investigation campaigns were divided in two categories:



Geotechnical Characterization at the Cathedral Site

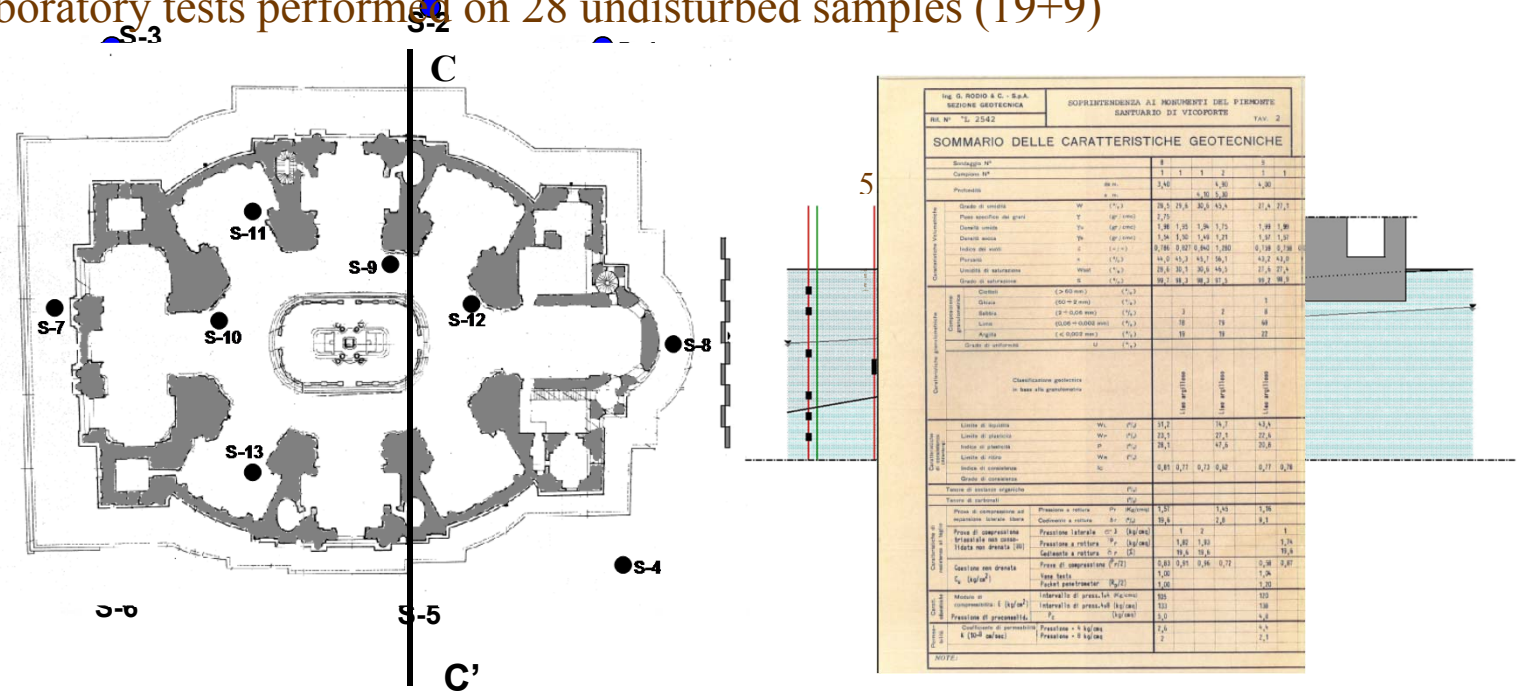
1976 investigation campaign

- Main objective was the definition of soil stratigraphy below the basilica and the definition of the foundation geometry
- Investigation campaign was conducted in 1975/1976 following the establishment of a consulting commission_(Rodio/ Bernasconi)

Tests performed:

Geotechnical Characterization at the Cathedral Site

- ~~Standard Penetration Test (SPT) depth of 10m and depth of foundations~~
- ~~laboratory tests performed on 28 undisturbed samples (19+9)~~



Campaign	Geotechnical test	Geophysical test
1976	Boreholes	
	Laboratory test	

Geotechnical Characterization at the Cathedral Site

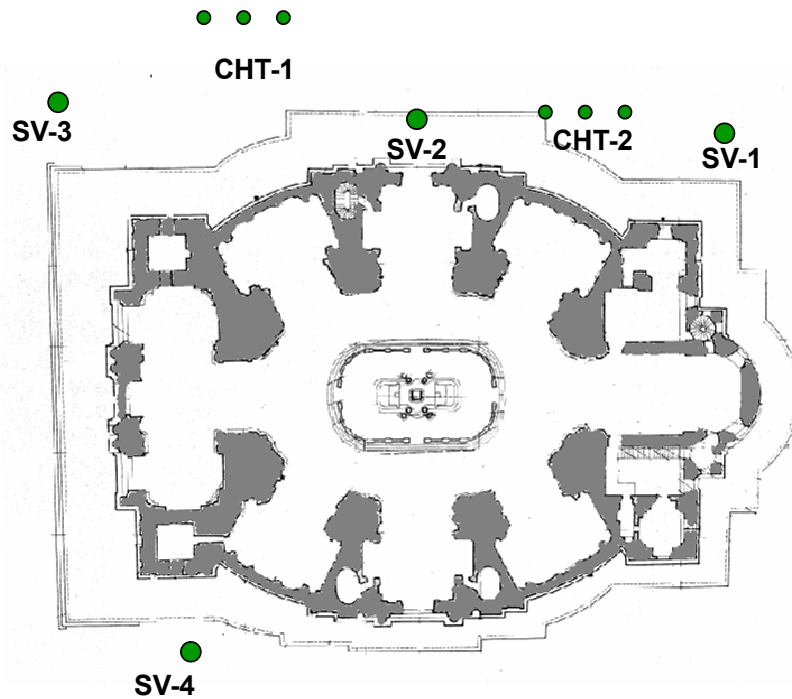
2004 investigation campaign

- Main objective was definition of subgrade reaction coefficients (*Winkler springs*) and dynamic impedance coefficients
- Tests were performed outside the trace of foundation plan view to determine geotechnical parameters before settlements
- Investigation campaign was conducted in 2004 following the establishment of a consulting commission (GDTest/Terra s.r.l)

Tests performed:

Geotechnical Characterization at the Cathedral Site

- Laboratory tests (compression and shear) on samples up to 10m



Campaign	Geotechnical test	Geophysical test
2004	Boreholes	Cross hole
	Laboratory test	

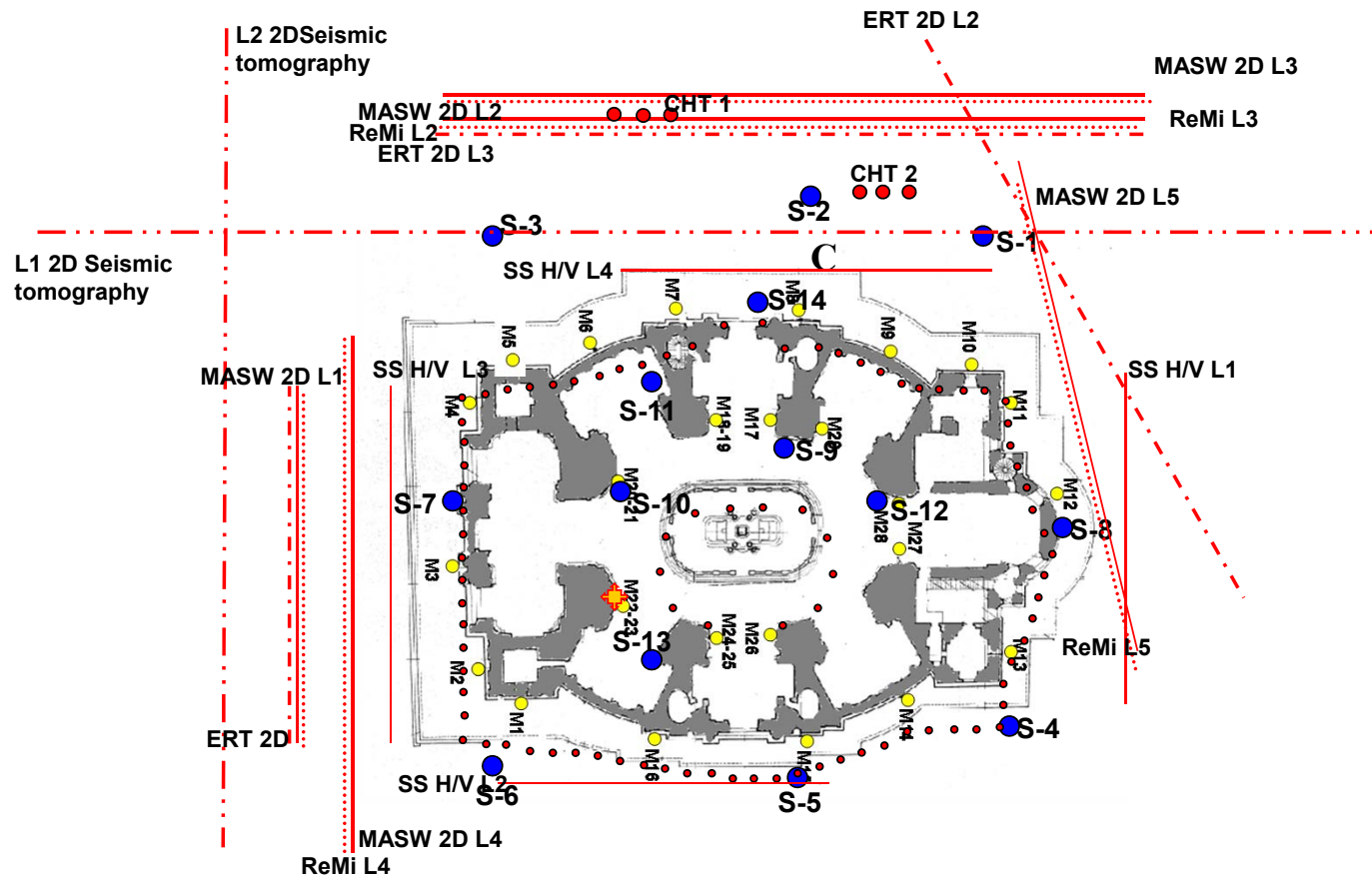
Geotechnical Characterization at the Cathedral Site

2008 investigation campaign

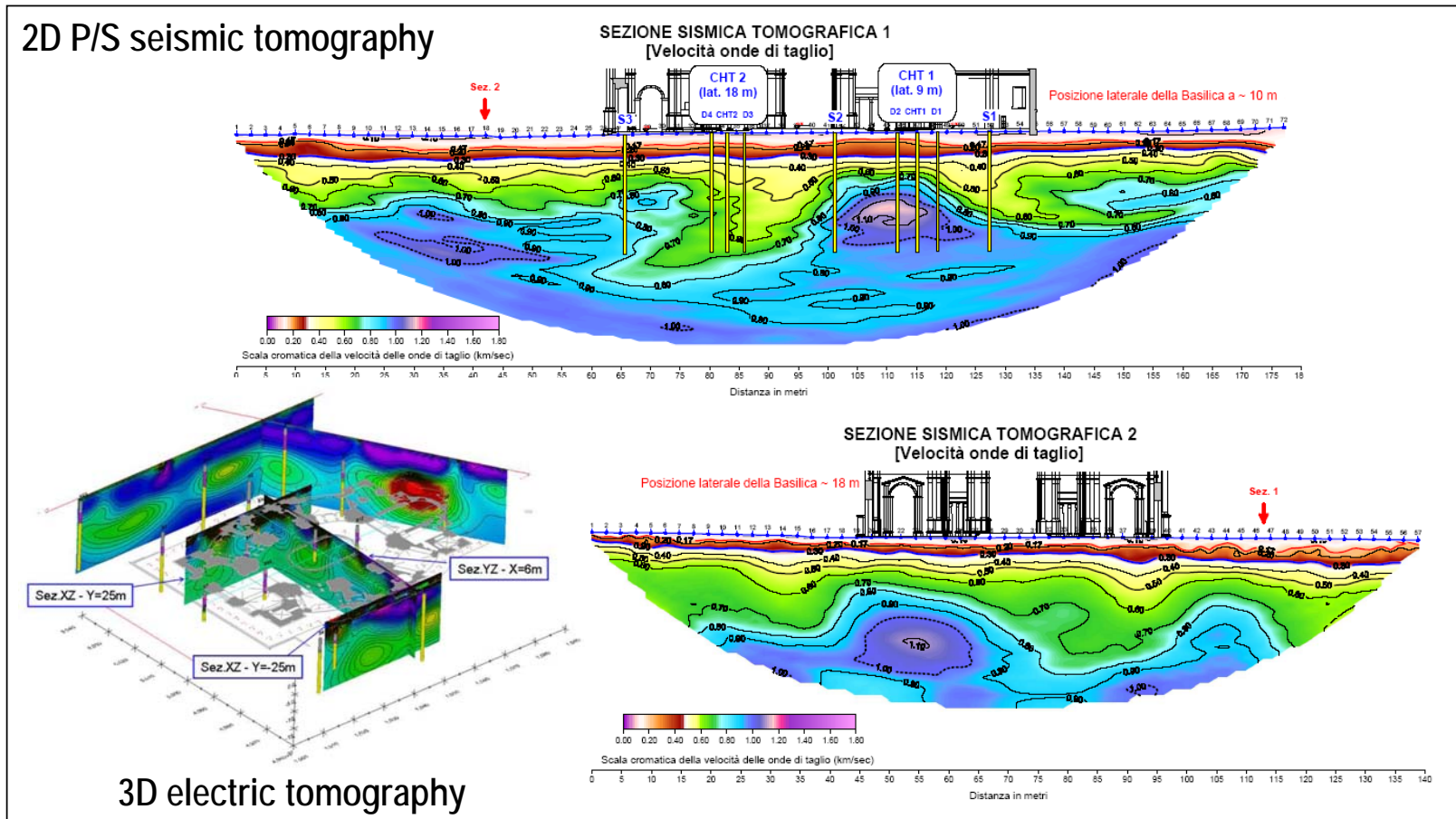
- Main objective was the geophysical characterization of the site to complement the previous campaigns.
- The campaign was conducted by Geostudi Astier and Progeo following the establishment of a consulting commission.

Tests performed:

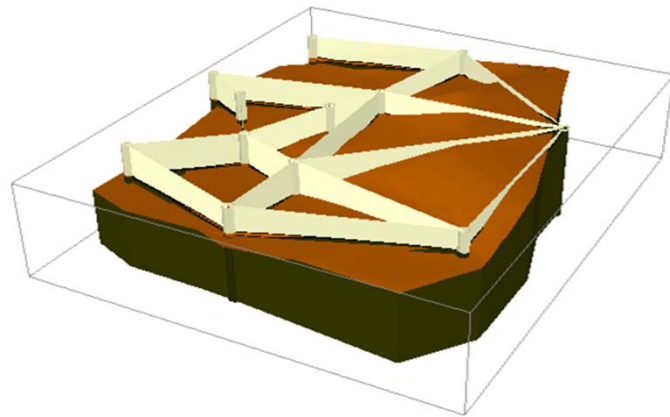
Geotechnical Characterization at the Cathedral Site



Geotechnical Characterization at the Cathedral Site

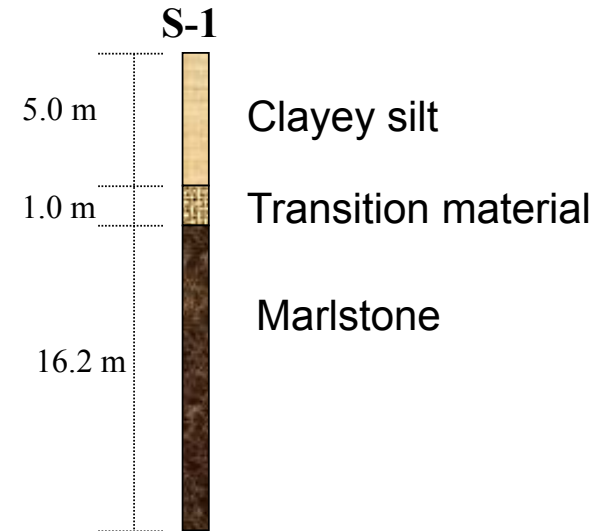
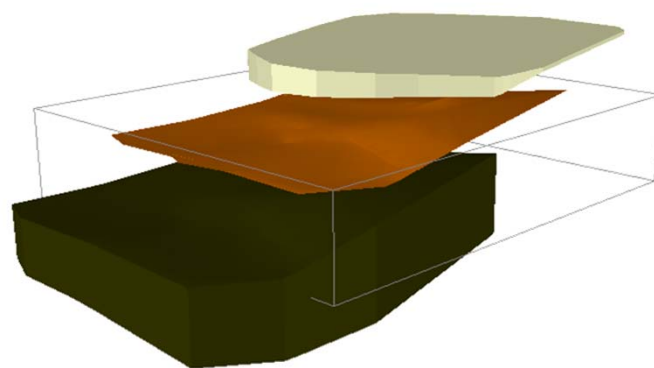


Geotechnical Modeling at the Cathedral Site



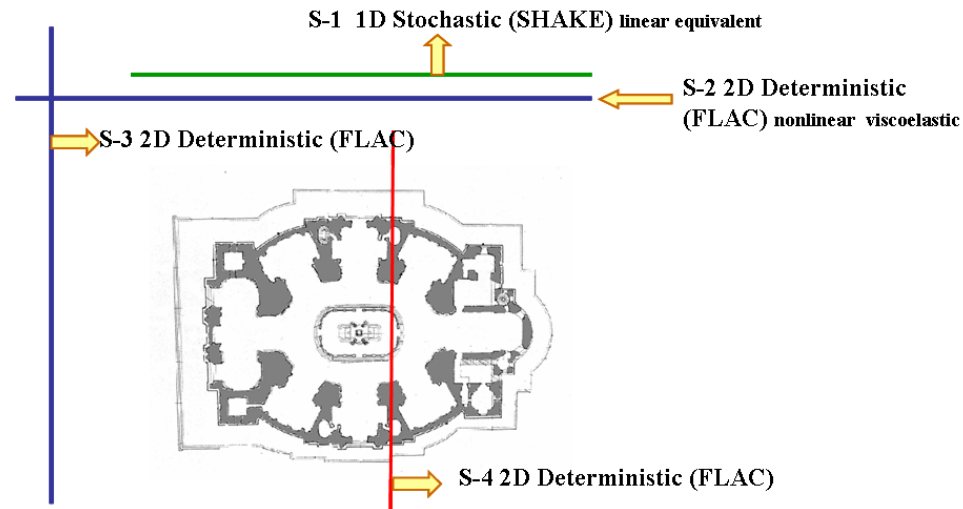
Lithostratigraphic reconstruction of soil deposit below the cathedral.

A 3D subsoil model was obtained by interpolating the lithological data from borehole and geophysical data.



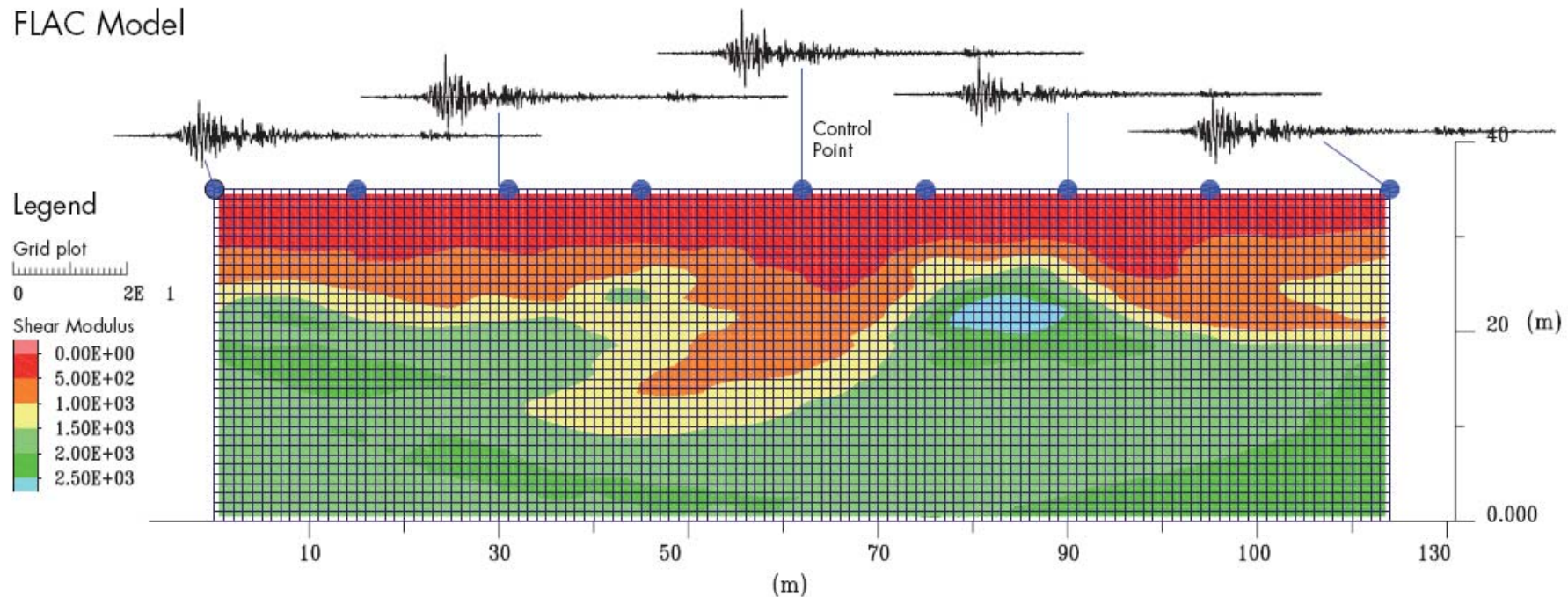
Definition of Seismic Input: Ground Response Analysis at the Site

Given the characteristics of subsoil at the site, 4 different sections were chosen to carry out GRA:



Section	Direction	Test used to generate section	Type of Analysis	Software used
S-1	NS-outside the Basilica	Boreholes/Cross hole/ MASW	1D Stochastic	SHAKE
S-2	NS-outside the Basilica	2D Seismic Tomography	2D Deterministic	FLAC
S-3	EW-outside the Basilica	2D Seismic Tomography	2D Deterministic	FLAC
S-4	EW-below the Basilica	Boreholes/ Geostatistics	2D Deterministic	FLAC

Definition of Seismic Input: Ground Response Analysis at the Site

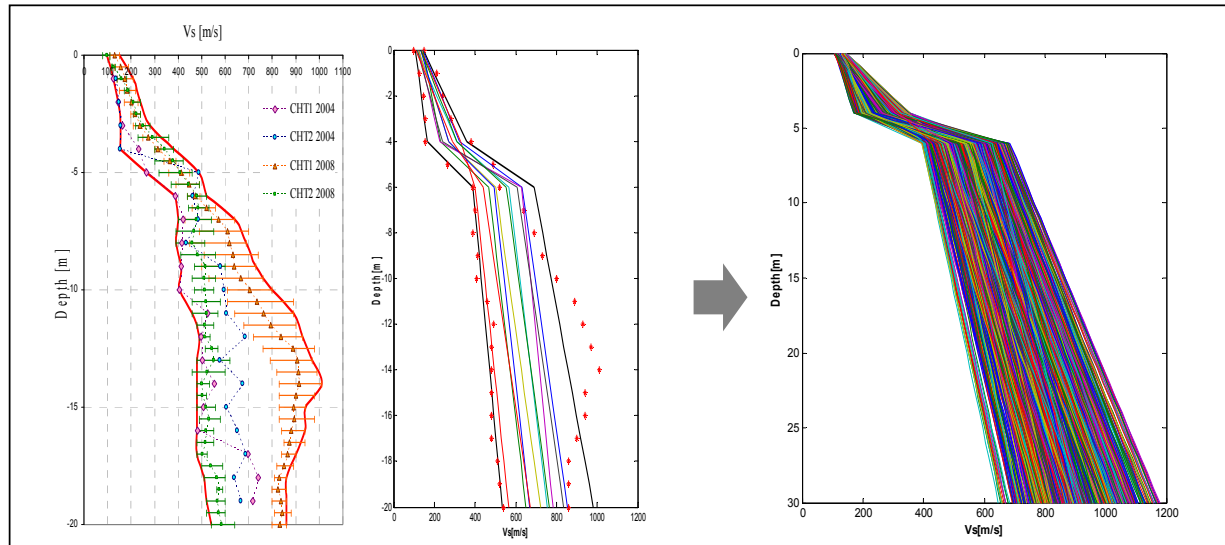
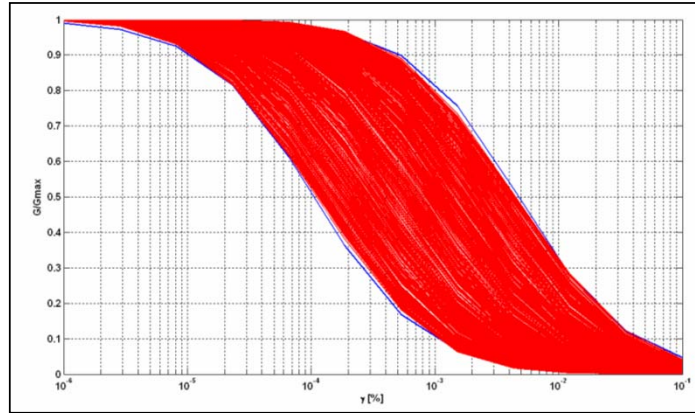


Cathedral of Vicoforte: 2D ground response analysis for a N-S vertical cross-section outside the footprint of the basilica. Elastic moduli were obtained from 2D seismic tomography

Definition of Seismic Input: Ground Response Analysis at the Site

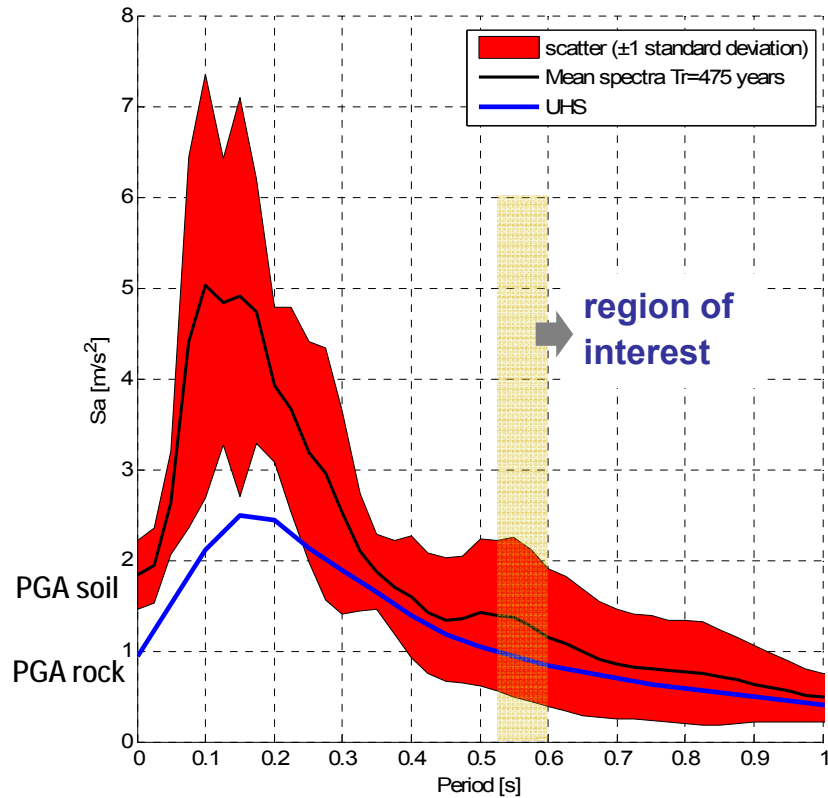
Stochastic site response analysis:

- Seismic excitation
- Thickness of individual layers.
- V_S for each layer.
- Density of each material
- G/G_{max} /Damping degradation curves



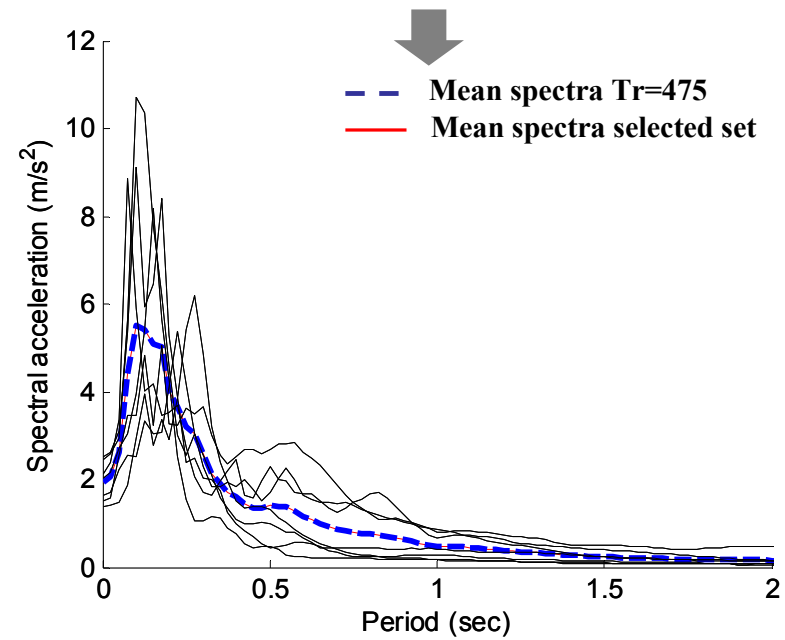
Definition of Seismic Input: Ground Response Analysis at the Site

Stochastic site response analysis



Mode of vibration	Frequency (Hz)
1	1.67
2	1.77
3	1.78

Selection of time histories from stochastic site response analysis

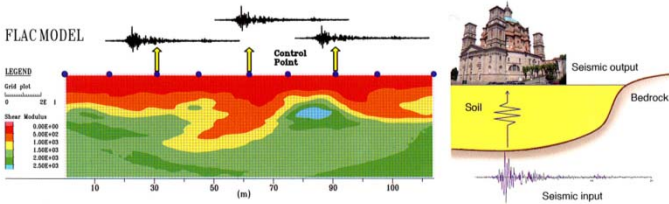
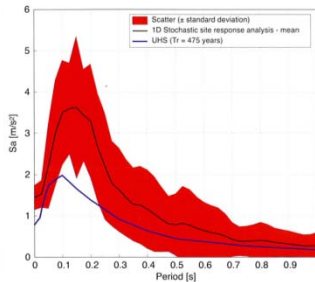


caso di studio 5: santuario "Regina Montis Regalis" di Vicoforte



C.G. LAI, M. CORIGLIANO,
H. SANCHEZ LIZÁRRAGA
L. SCANDELLA

Definition of Seismic Input at the
"Regina Montis Regalis"
Basilica of Vicoforte, Northern Italy



IUSS Press

Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia

← RAPPORTO SCIENTIFICO

Il lavoro è stato svolto nel 2009 da EUCENTRE (Pavia) attraverso un contratto di ricerca sottoscritto con l'Amministrazione del Santuario per la definizione dell'input sismico alla Basilica "Regina Montis Regalis".

La ricerca è stata finanziata dalla "Fondazione Cassa di Risparmio di Cuneo" che si ringrazia per il supporto.

La naturale prosecuzione del lavoro è la valutazione della risposta sismica strutturale della Basilica soggetta a input sismico definito in questo studio.

caso di studio 5: santuario "Regina Montis Regalis" di Vicoforte

ARTICOLO
SCIENTIFICO



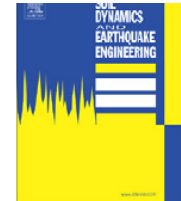
ELSEVIER

Soil Dynamics and Earthquake Engineering 31 (2011) 757–772

Contents lists available at ScienceDirect

Soil Dynamics and Earthquake Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/soildyn



Ground shaking scenarios at the town of Vicoforte, Italy

L. Scandella ^{a,*}, C.G. Lai ^a, D. Spallarossa ^{b,1}, M. Corigliano ^a

^a European Centre for Earthquake Engineering (EUCENTRE), via Ferrata 1, Pavia, Italy

^b Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse (DIPTERIS), University of Genoa, Viale Benedetto XV 5, 16132 Genoa, Italy

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 February 2010

Received in revised form

25 November 2010

Accepted 1 December 2010

ABSTRACT

Vicoforte is a small town in Northern Italy, which hosts a Cathedral with the world's largest elliptical dome. The name of the Basilica is "Regina Montis Regalis" and it is of extraordinary architectural and structural importance. The main objective of this study is the definition of the seismic hazard at the site of Vicoforte following a deterministic approach. Although Vicoforte is located in an area of moderate seismicity, the calculation of the most unfavourable seismic ground shaking scenarios is of great interest due to the importance of the Basilica and its vulnerability to even a moderate seismic excitation.

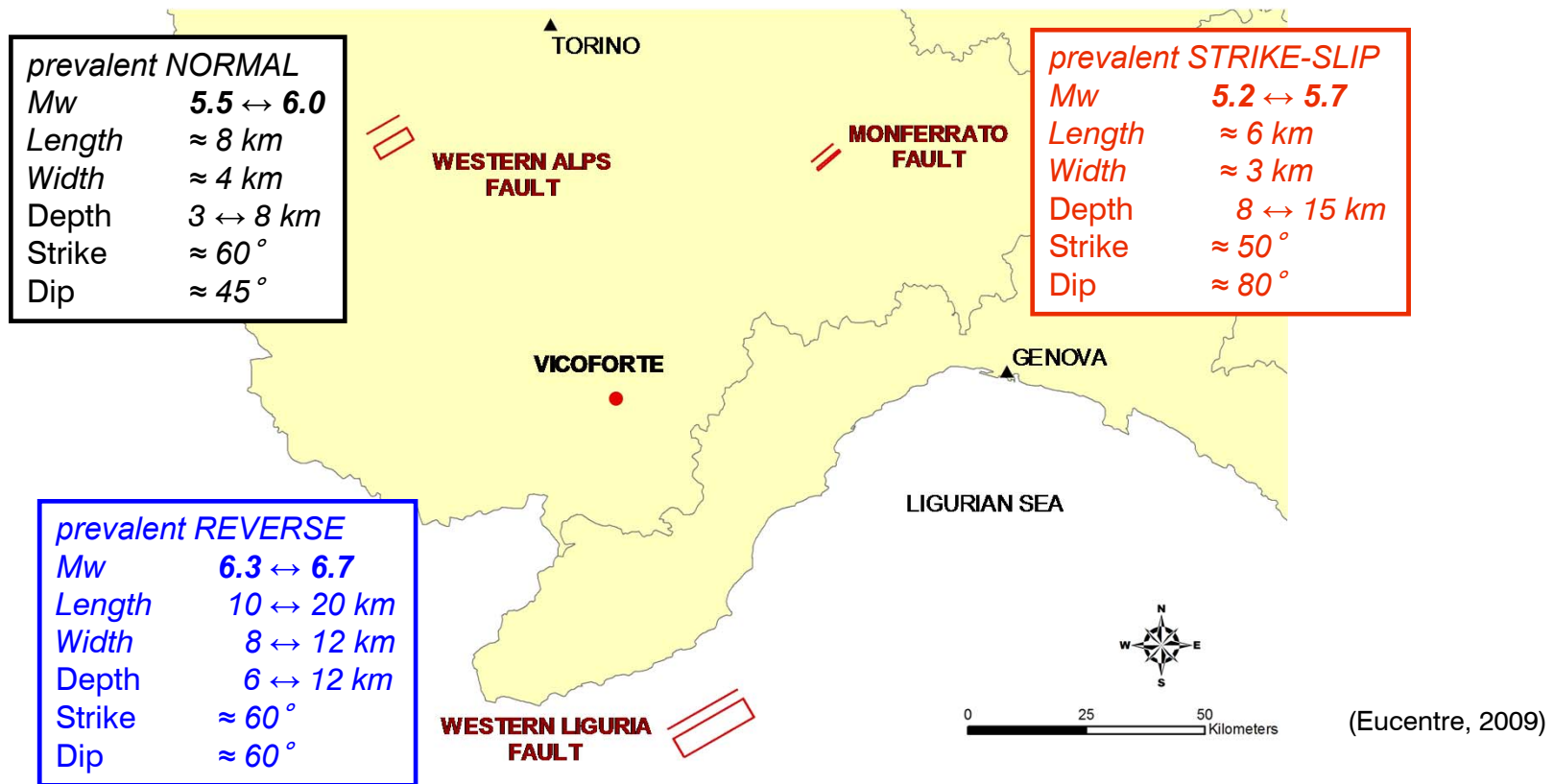
The closest active faults to Vicoforte were identified in order to simulate the potentially most severe ground shaking scenarios compatibly with the tectonic and seismic setting of the region. Subsequently, numerical simulations were conducted through finite faults numerical models using two different approaches: the extended kinematic source model of Hisada and Bielak [24] and the stochastic method of Motazedian and Atkinson [38]. They, respectively, simulate the low and high frequency ranges of predicted ground motion. The numerical models used for the simulations were calibrated by a comparison between synthetic results and recorded data. A parametric study was finally carried out to identify the most critical fault rupture mechanisms.

© 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

SYNTHETIC SEISMOGRAMS FROM EARTHQUAKE SIMULATION

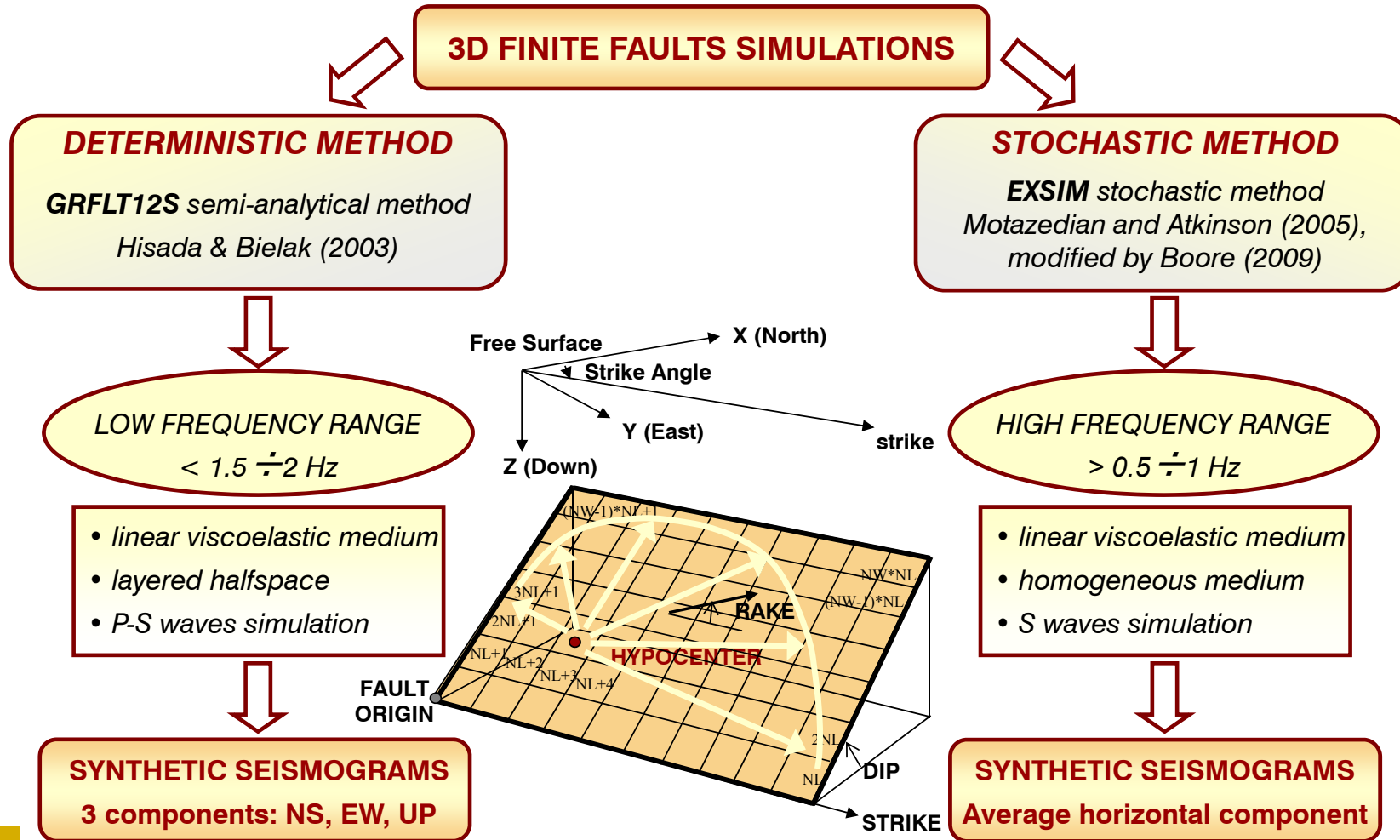
Example: Vicoforte, (Italy) - fault identification for kinematic simulations

Three seismic faults were identified based on historical events and seismotectonic interpretations

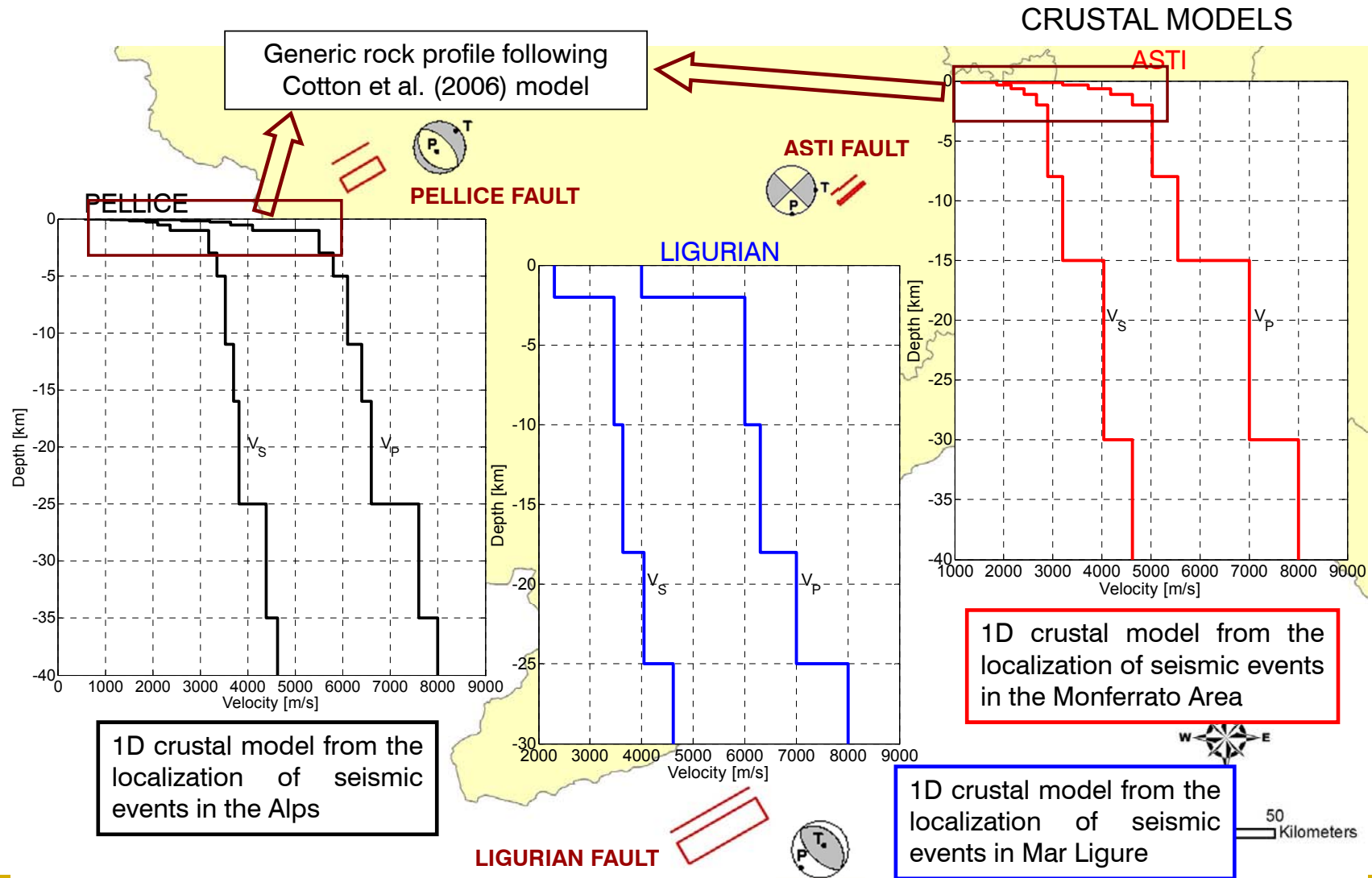


SYNTHETIC SEISMOGRAMS FROM EARTHQUAKE SIMULATION

Example: Vicoforte, (Italy) - fault identification for kinematic simulations



SYNTHETIC SEISMOGRAMS FROM EARTHQUAKE SIMULATION

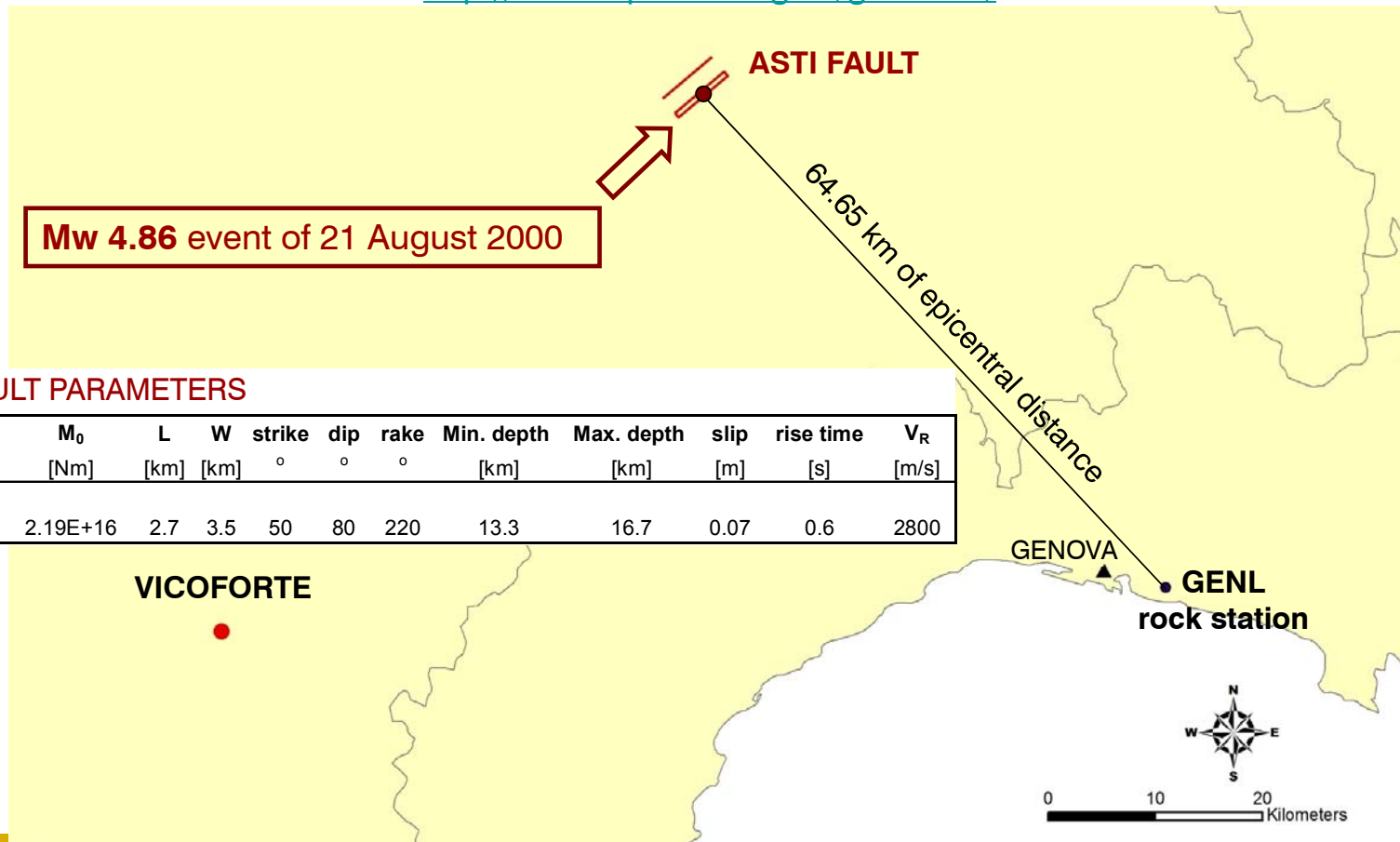


SYNTHETIC SEISMOGRAMS FROM EARTHQUAKE SIMULATION

CALIBRATION OF SYNTHETIC SEISMOGRAMS

RSNI: Regional Seismic network of Northwestern Italy

<http://www.dipteris.unige.it/geofisica/>

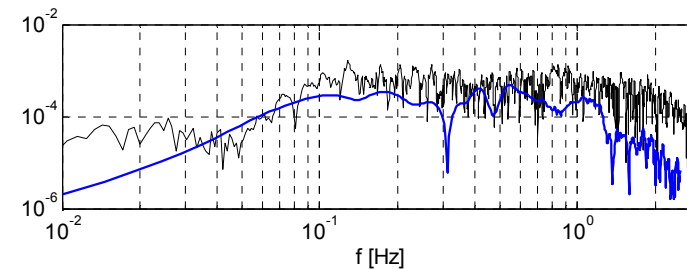
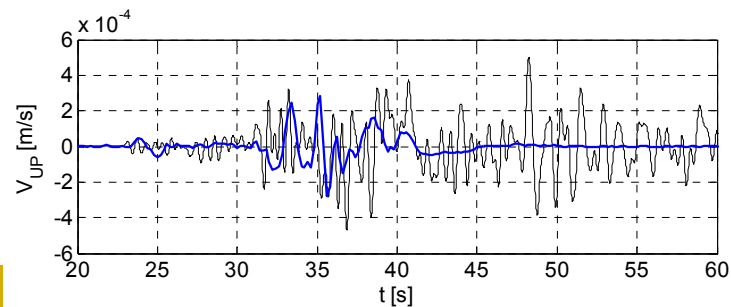
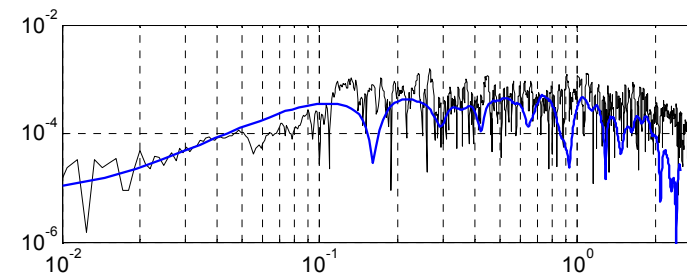
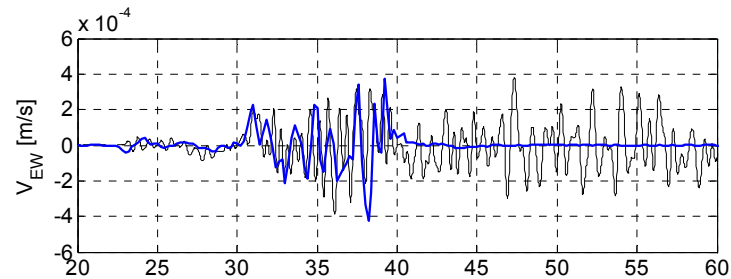
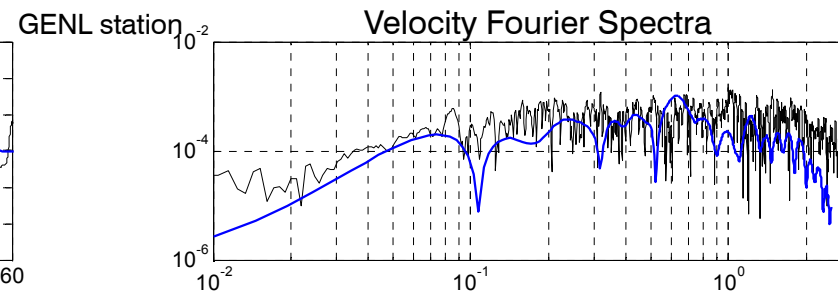
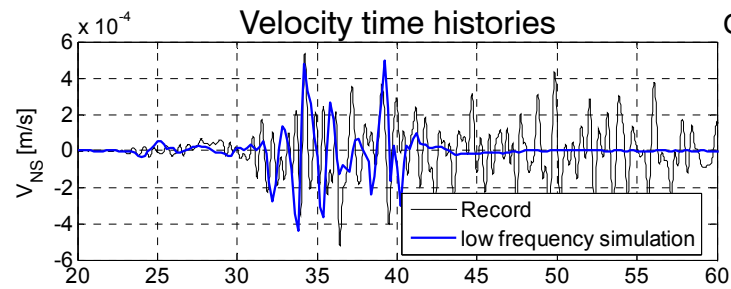


SYNTHETIC SEISMOGRAMS FROM EARTHQUAKE SIMULATION

CALIBRATION OF SYNTHETIC SEISMOGRAMS

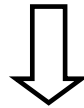
Mw 4.86 event of 21 August 2000

Comparison between GENL RECORDS and SYNTHETIC LOW FREQUENCY RESULTS

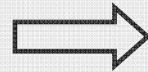


SYNTHETIC SEISMOGRAMS FROM EARTHQUAKE SIMULATION

SIMULATIONS OF THE POTENTIALLY MOST SEVERE GROUND SHAKING SCENARIOS



ASTI FAULT



$M_w = 5.5$ \Rightarrow $T_R \approx 475$ years

PELLICE FAULT



$M_w = 5.7$ \Rightarrow $T_R \approx 690$ years

LIGURIAN FAULT



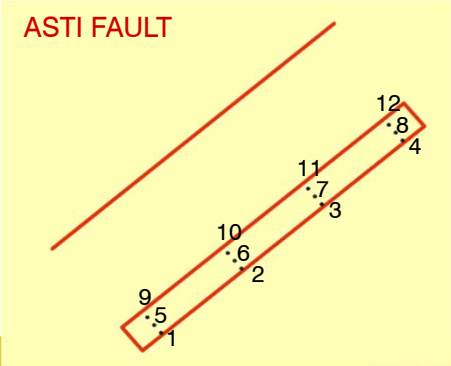
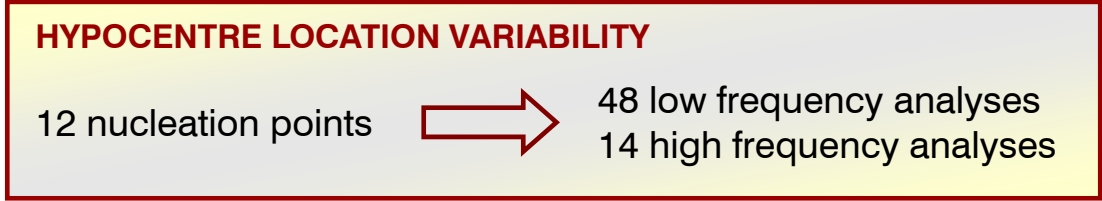
$M_w = 6.5$ \Rightarrow $T_R \approx 2475$ years

SYNTHETIC SEISMOGRAMS FROM EARTHQUAKE SIMULATION

FINITE FAULTS PARAMETRIC ANALYSES



Mw	M ₀ [Nm]	L [km]	W [km]	Min. depth [km]	Max. depth [km]	strike °	dip °	rake °	slip _{Hisada} [m]	rise time [s]	V _R [m/s]	slip _{EXSIM} [m]	V _{S_EXSIM} [m/s]	stess drop [bar]	k
5.5	2.00E+17	6	3	10	13	50	80	0	0.31	0.6	2400				
5.5	2.00E+17	6	3	10	13	50	80	150	0.31	0.6	2400				
5.5	2.00E+17	6	3	10	13	50	80	180	0.31	0.6	2400	0.32	3200	63.65	0.01
5.5	2.00E+17	6	3	10	13	50	80	210	0.31	0.6	2400				
								LOW FREQUENCY ANALYSIS				HIGH FREQUENCY ANALYSIS			



SYNTHETIC SEISMOGRAMS FROM EARTHQUAKE SIMULATION

FINITE FAULTS PARAMETRIC ANALYSES

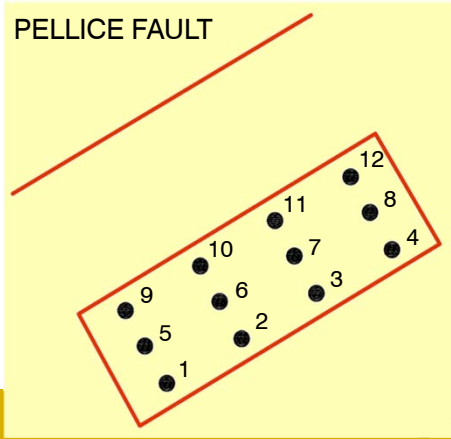


Mw	M ₀ [Nm]	L [km]	W [km]	Min. depth [km]	Max. depth [km]	strike °	dip °	rake °	slip _{Hisada} [m]	rise time [s]	V _R [m/s]	slip _{EXSIM} [m]	V _{S_EXSIM} [m/s]	stess drop [bar]	k
5.7	3.98E+17	8	4	3	5.9	60	45	-45	0.4	0.7	2600				
5.7	3.98E+17	8	4	3	5.9	60	45	-90	0.4	0.7	2600	0.41	3350	53.57	0.01
5.7	3.98E+17	8	4	3	5.9	60	45	-135	0.4	0.7	2600				

LOW FREQUENCY ANALYSIS HIGH FREQUENCY ANALYSIS

HYPOCENTRE LOCATION VARIABILITY

12 nucleation points \Rightarrow 36 low frequency analyses
14 high frequency analyses



SYNTHETIC SEISMOGRAMS FROM EARTHQUAKE SIMULATION

FINITE FAULTS PARAMETRIC ANALYSES

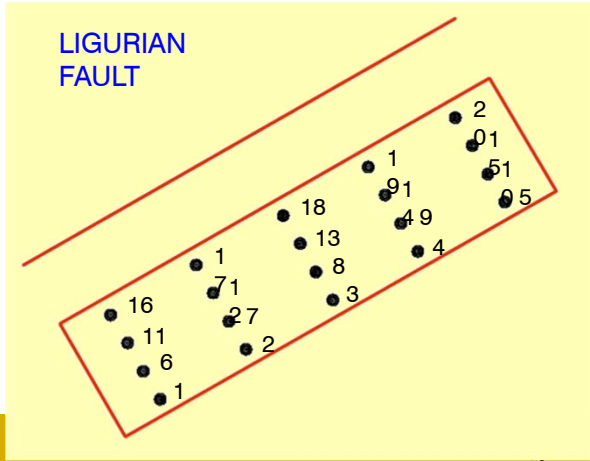


Mw	M ₀ [Nm]	L [km]	W [km]	Min. depth [km]	Max. depth [km]	strike °	dip °	rake °	slip _{Hisada} [m]	rise time [s]	V _R [m/s]	slip _{EXSIM} [m]	V _{S_EXSIM} [m/s]	stess drop [bar]	k
6.3	6.31E+18	17	9	4.1	11.9	60	60	45	1.24	1.4	2600				
6.3	6.31E+18	17	9	4.1	11.9	60	60	90	1.24	1.4	2600				
6.3	6.31E+18	17	9	4.1	11.9	60	60	135	1.24	1.4	2600	1.18	3550	81	0.01

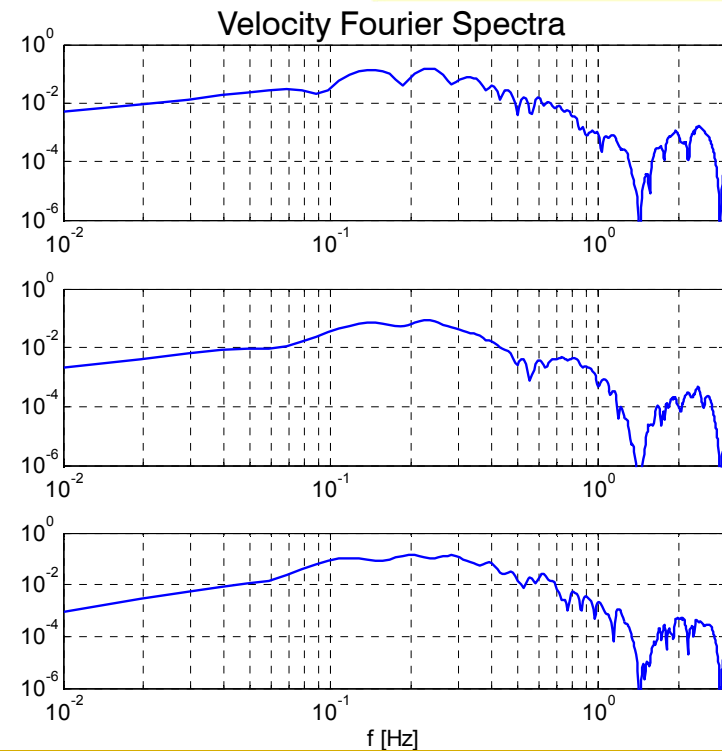
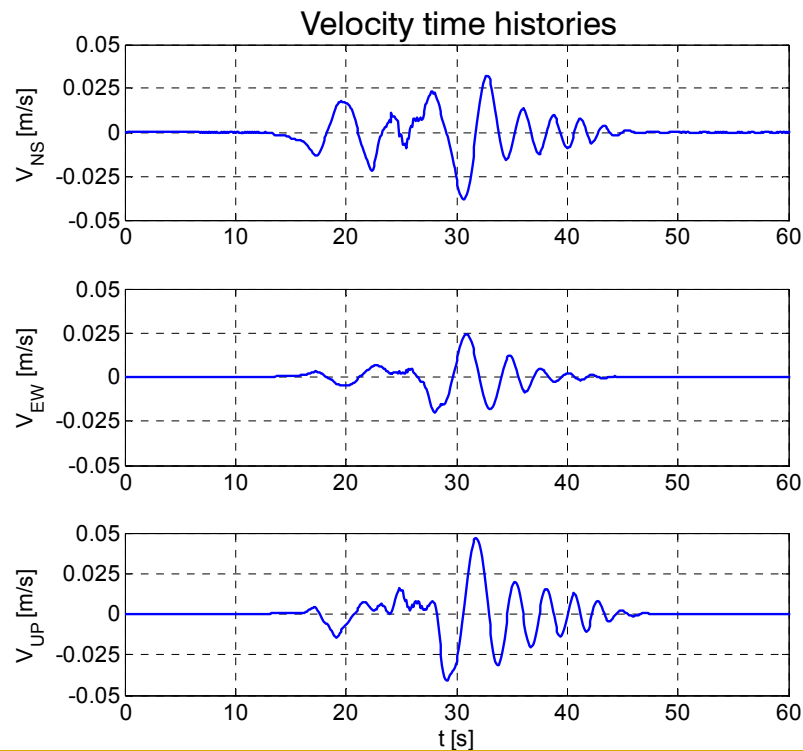
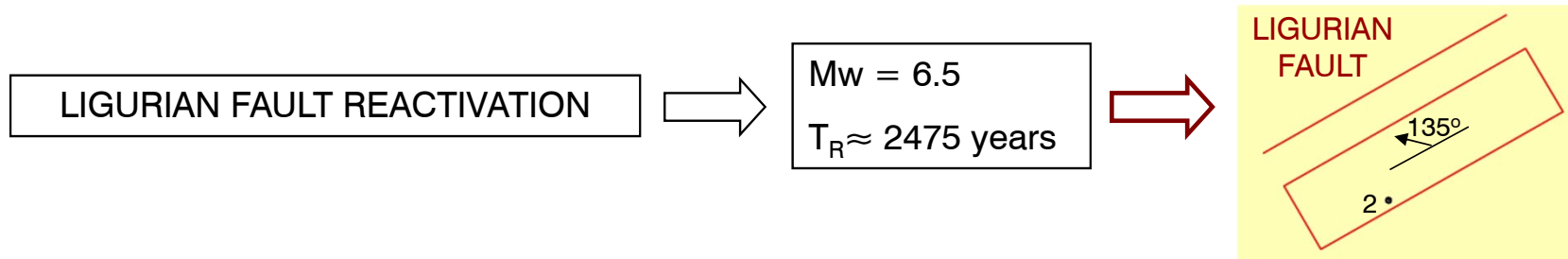
LOW FREQUENCY ANALYSIS
HIGH FREQUENCY ANALYSIS

TOTAL N. OF ANALYSES
 144 low frequency analyses
 50 high frequency analyses

HYPOCENTRE LOCATION VARIABILITY
 12 nucleation points \Rightarrow 60 low frequency analyses
 22 high frequency analyses

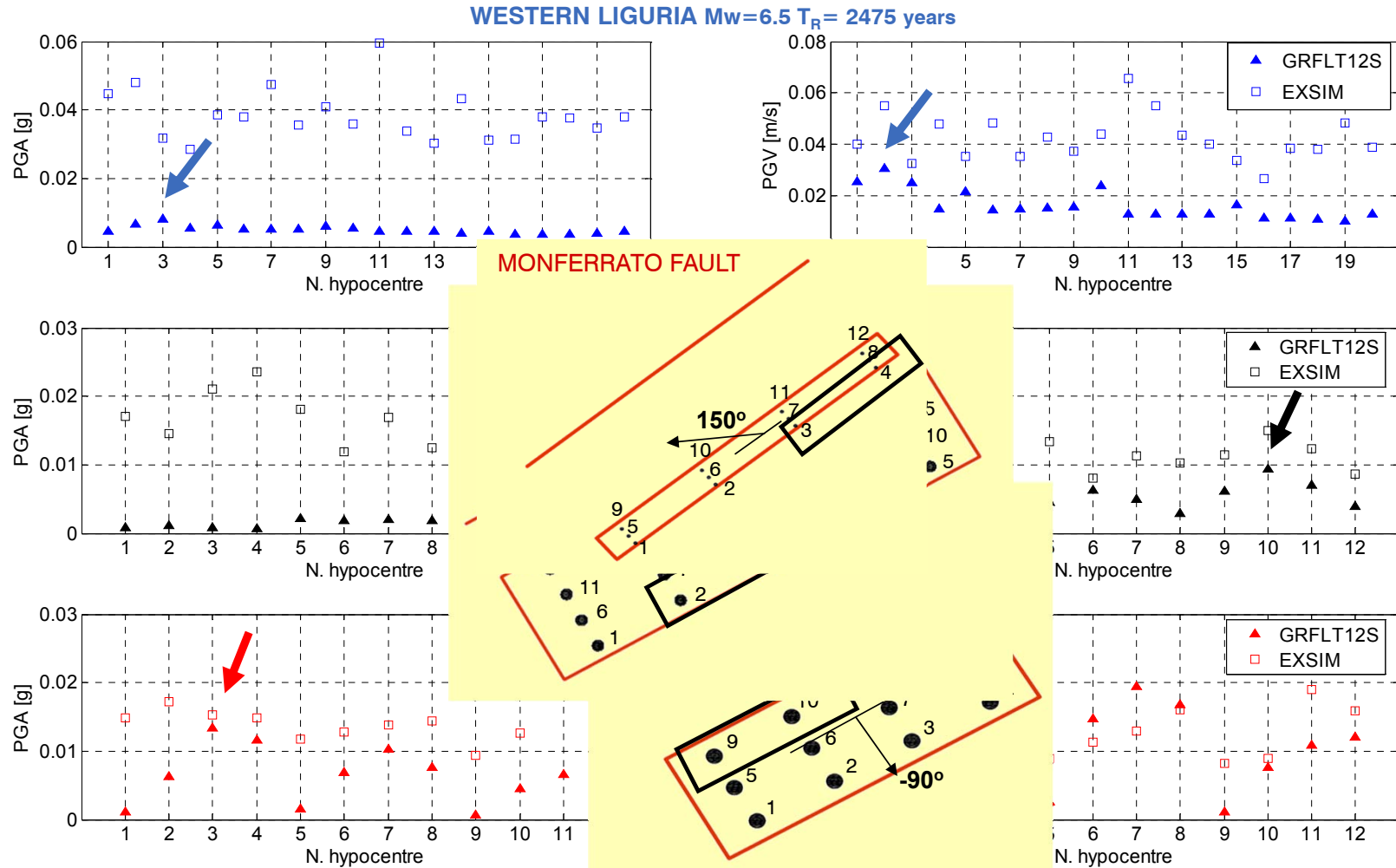


SYNTHETIC SEISMOGRAMS FROM EARTHQUAKE SIMULATION



SYNTHETIC SEISMOGRAMS FROM EARTHQUAKE SIMULATION

The high frequency method does not reproduce the directivity effect



sommario

- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del modello di sottosuolo*
- *Obiettivi delle indagini geotecniche: definizione del terremoto di progetto*
- *Caso di studio 1: minareto islamico di Jam (Afghanistan)*
- *Caso di studio 2: tempio induista di Kancheepuram (India meridionale)*
- *Caso di studio 3: torre di Pisa (Campo dei Miracoli, Pisa)*
- *Caso di studio 4: tempio di Marte Ultore (Roma)*
- *Caso di studio 5: santuario "Regina Montis Regalis" di Vicoforte*
- ***Considerazioni finali***

- **Caratterizzazione geotecnica** richiede utilizzo di una combinazione di dati e info da rilievo geologico, indagini geotecniche e geofisiche.
- Obiettivo è costruzione di **modello geologico-geotecnico del sito**. Ci deve essere compatibilità tra livello di raffinatezza del modello, tipo di analisi e rilevanza problema.
- Giusto equilibrio **estensione indagine** e tipologia dipende da complessità e importanza del problema da studiare. Nel caso dei **beni culturali** uso indagini non-invasive è prioritario !
- **Prove geofisiche sismiche** eccellente mezzo d'indagine per determinare i **moduli elastici** del terreno a piccole deformazioni e di stato iniziali (ad es. porosità). Progressi continui !
- **Migliori risultati** si ottengono interpretando stessi dati sperimentali con **diversi modelli costitutivi** massimizzando in questo modo le informazioni estratte dalle misure.



POLITECNICO
DI TORINO



Compagnia
di San Paolo



FONDAZIONE CRC



Giovani
Ingegneri
Cuneo

Centro Congressi del Santuario di Vicoforte 15-16 GIUGNO 2017

MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Grazie per l'attenzione !



DICAr

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura
Università degli Studi di Pavia





POLITECNICO
DI TORINO



Compagnia
di San Paolo



FONDAZIONE CRC



Giovani
Ingegneri
Cuneo

Centro Congressi del Santuario di Vicoforte 15-16 GIUGNO 2017

MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Indagini Geotecniche e Monitoraggio dei Beni Architettonici

Carlo G. LAI

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura
Università degli Studi di Pavia

Santuario di Vicoforte
15–16 Giugno 2017



DICAr

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura
Università degli Studi di Pavia

