



LA MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO PER LA
PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E LA PROGETTAZIONE EDILIZIA.
L'ESEMPIO DI FIVIZZANO

Firenze 9 settembre 2016 – Cenacolo di Santa Apollonia – Auditorium Sala Poccetti

*Le analisi di risposta sismica locale per la
definizione della carta di microzonazione
sismica di terzo livello*



Relatori: Prof. Ing. Alessandro Pagliaroli & Prof. Ing. Giovanna Vessia

Attività di Microzonazione Sismica a livello 3: il ruolo della Risposta Sismica Locale

Gli studi di MS rappresentano un complesso insieme di attività e procedure atte a definire mediante parametri quantitativi, aree a pericolosità omogenea al sito a grande scala (1:5000; 1:2000). In Italia, tali studi sono basati su una pericolosità di base calcolata su tempi di ritorno di 475 anni.

Caratterizzazione geo-strutturale dell'area per formulare il modello geologico del sito e la presenza di faglie attive

Caratterizzazione geofisica ed idro-geo-meccanica per la formulazione del modello geotecnico-sismico del sito

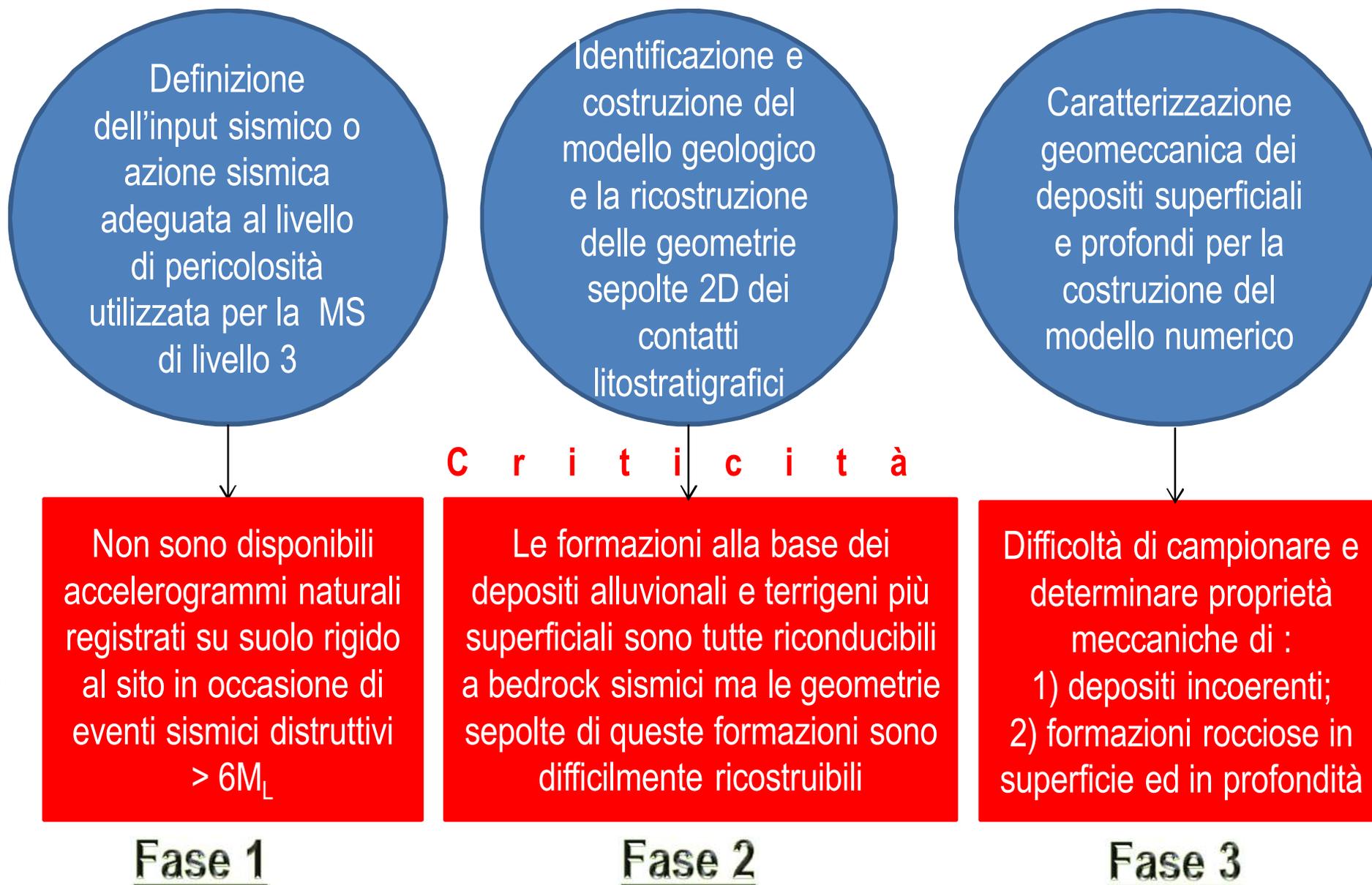
Costruzione del modello numerico per le analisi di Risposta Sismica Locale e calcolo dei parametri utili ai fini della MS

Rappresentazione cartografica e spazializzazione superficiale con strumenti GIS dei parametri indicativi della pericolosità locale calcolati per punti o lungo sezione verticali bidimensionali

In questa presentazione analizzeremo in dettaglio le modalità di esecuzione delle analisi numeriche comunemente note con il nome di **studi di risposta sismica locale (RSL)**.
Il caso di studio di Fivizzano (MS) ha rappresentato una occasione per riflettere e superare alcune criticità delle RSL in territori geologicamente complessi come quelli Appenninici e peri-Appenninici caratterizzati da elevata pericolosità sismica.

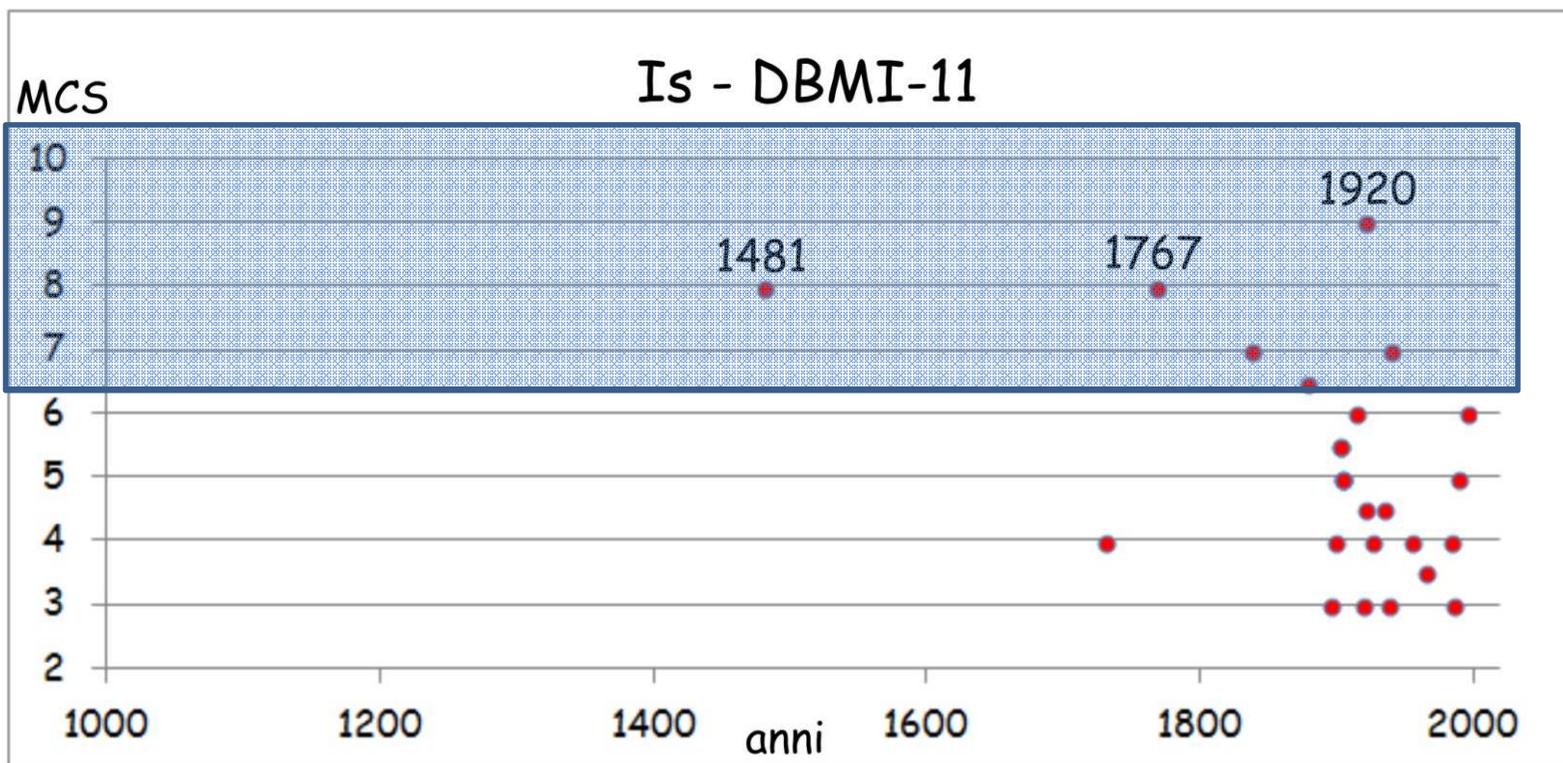
Attività di Microzonazione Sismica a livello 3: il ruolo della Risposta Sismica Locale

Di seguito sono evidenziate le fasi di lavoro da salienti per la costruzione del modello numerico da utilizzare nelle simulazioni di RSL. Le criticità evidenziate sono relative al comune di Fivizzano



FASE 1: INPUT SISMICO

Distribuzione temporale degli eventi sismici con $I > 6$ nella Lunigiana-Garfagnana dal 1400.



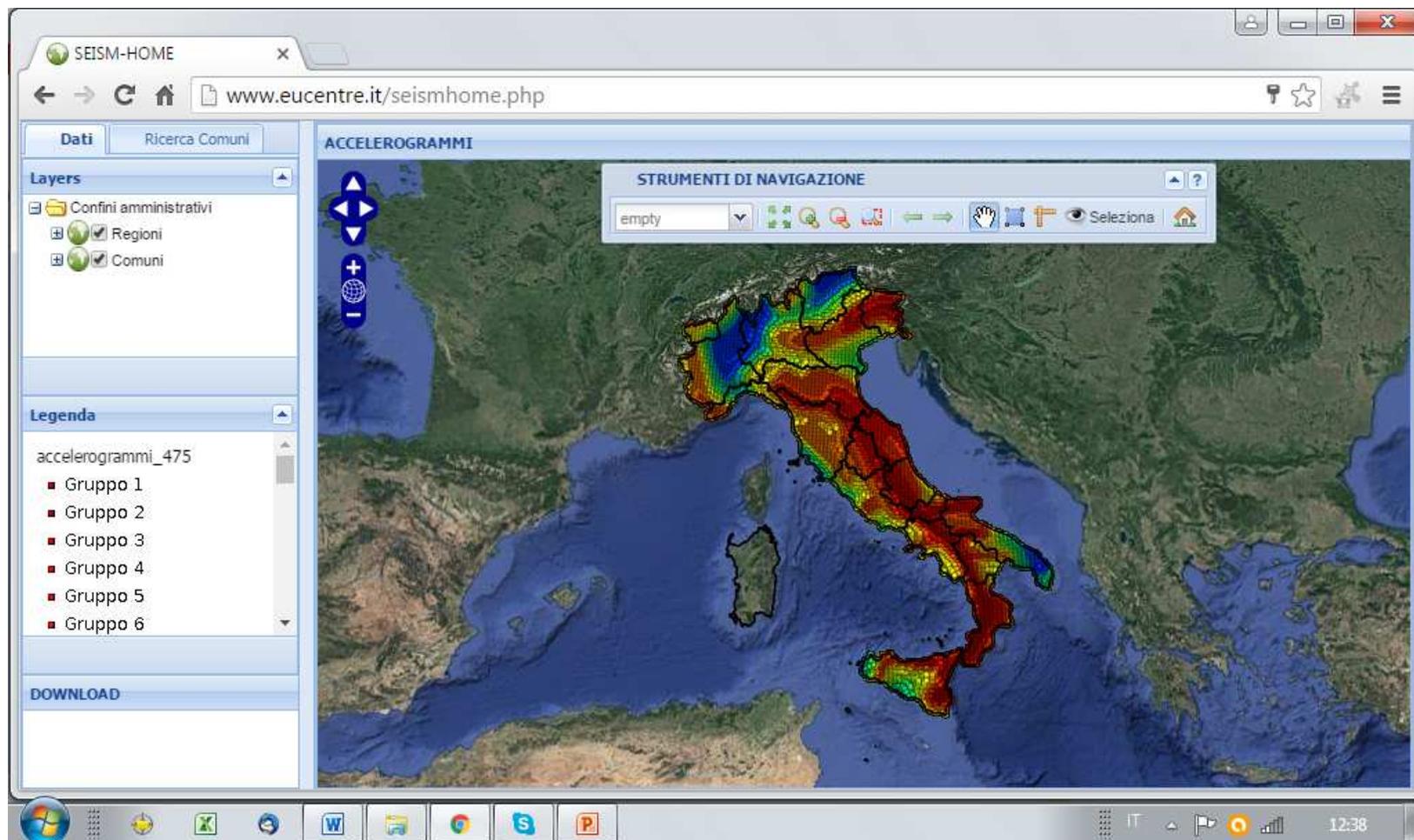
FASE 1: INPUT SISMICO

Il più recente di queste eventi mediamente forti è il terremoto del 7 settembre 1920 ($M_w=6.5$) che causò 171 morti (45 a Fivizzano, $I=IX$ MCS), mentre i feriti furono 650 (di cui 300 a Fivizzano) e migliaia i senzatetto (La Nazione, 19/9/1920)



FASE 1: INPUT SISMICO

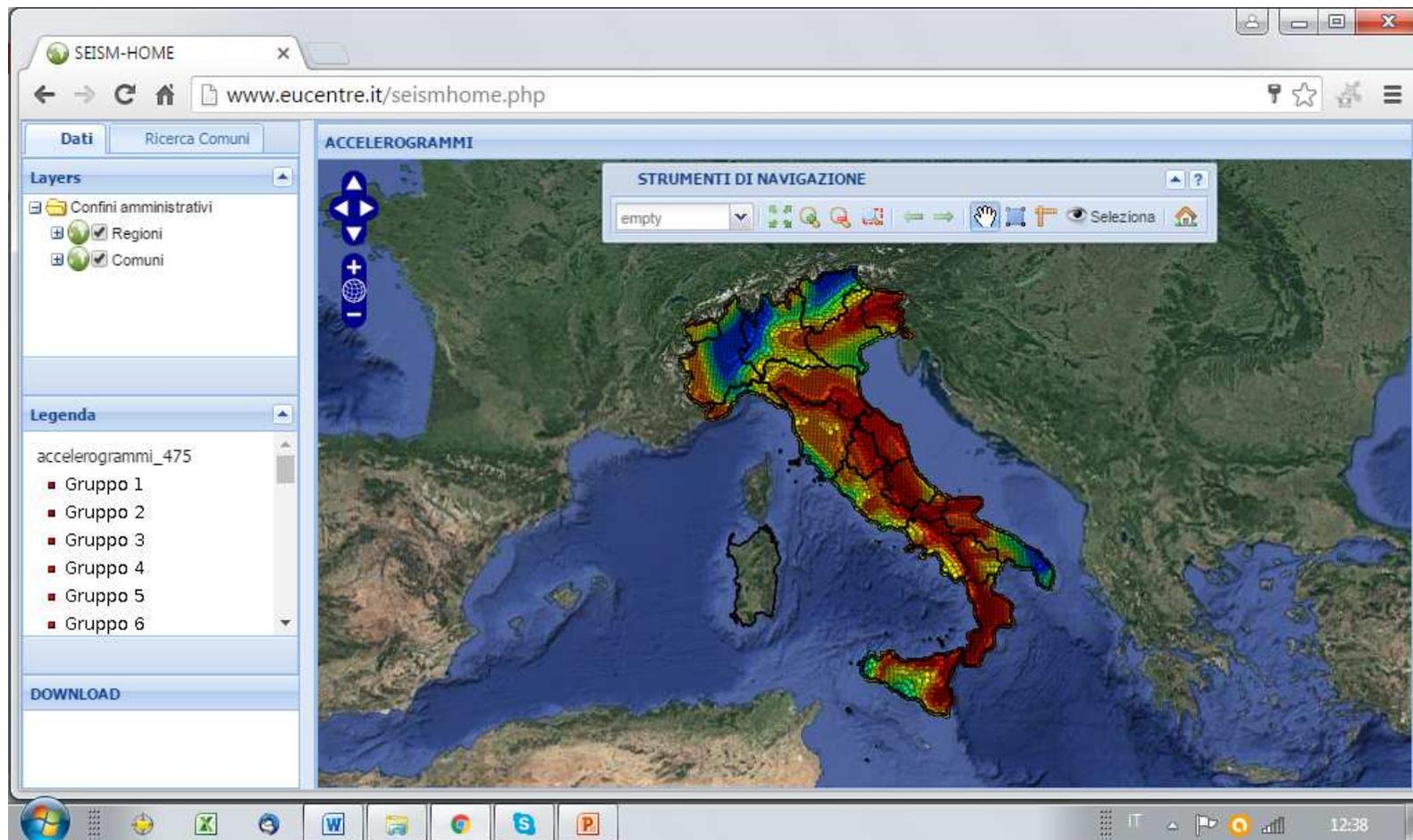
L'input sismico è stato definito mediante il codice di calcolo SCALCONA 2.0 (*SCALing of COmpatible Natural Accelerograms*) che, in funzione del sito e del periodo di ritorno considerato, restituisce una combinazione di sette accelerogrammi compatibili con gli spettri NTC08 per condizioni di roccia piana affiorante (Cat. A – T1 NTC08) (Zuccolo et al., 2011; Rota et al., 2012; Zuccolo et al., 2012; Zuccolo et al., 2014). In particolare, per tutto il territorio toscano, è possibile selezionare differenti periodi di ritorno (30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 712 e 949 anni).



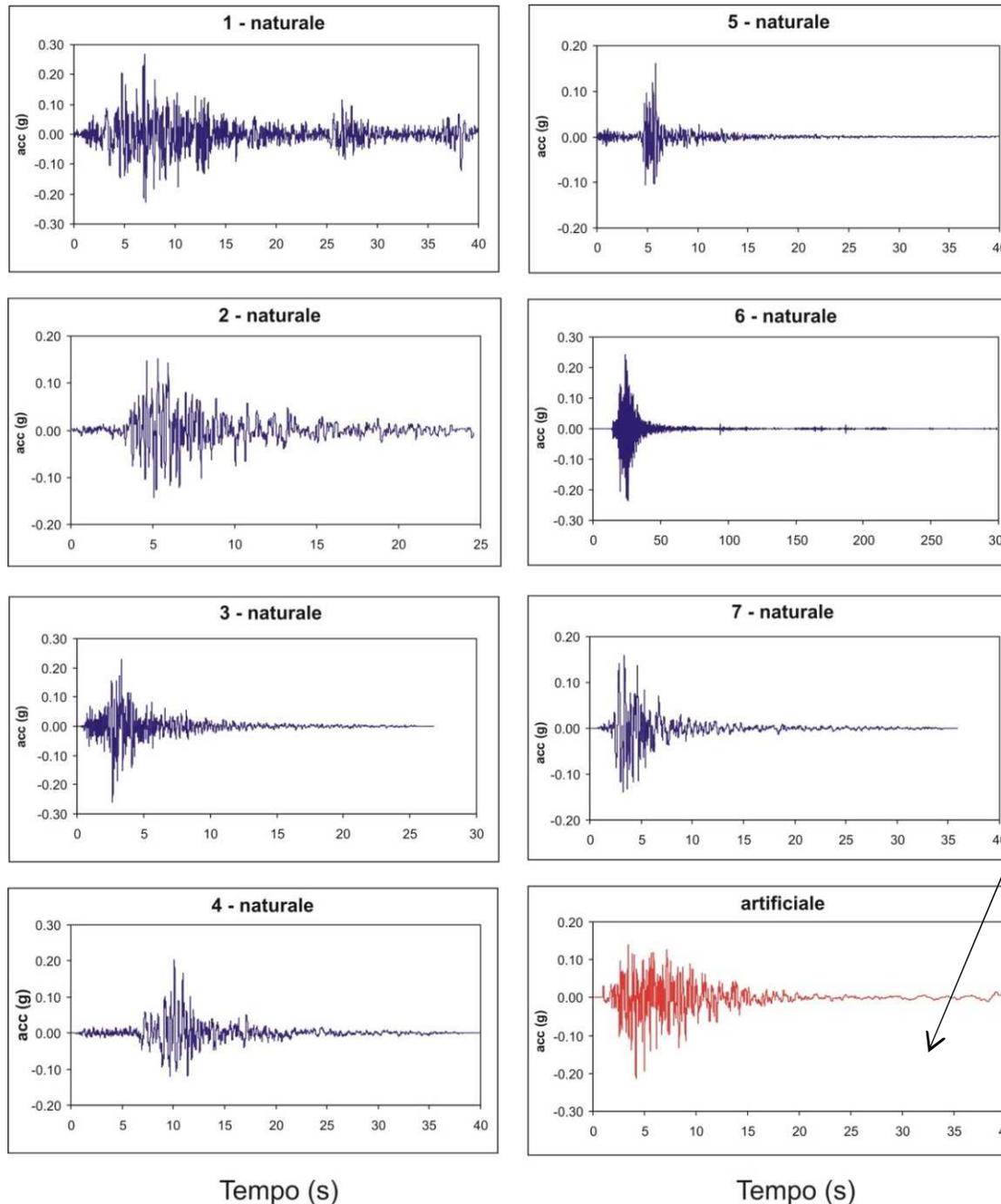
FASE 1: INPUT SISMICO

La procedura è stata messa a punto dall'Università di Pavia nell'ambito di un Accordo di Collaborazione Scientifica con la Regione Toscana (<http://www.regione.toscana.it/speciali/rischio-sismico/banche-dati>).

Il progetto è stato reso pubblico con il nome di SEISM-HOME (<http://www.eucentre.it/seism-home/>) da EUCENTRE (European Center for training and research in earthquake engineering)



FASE 1: INPUT SISMICO

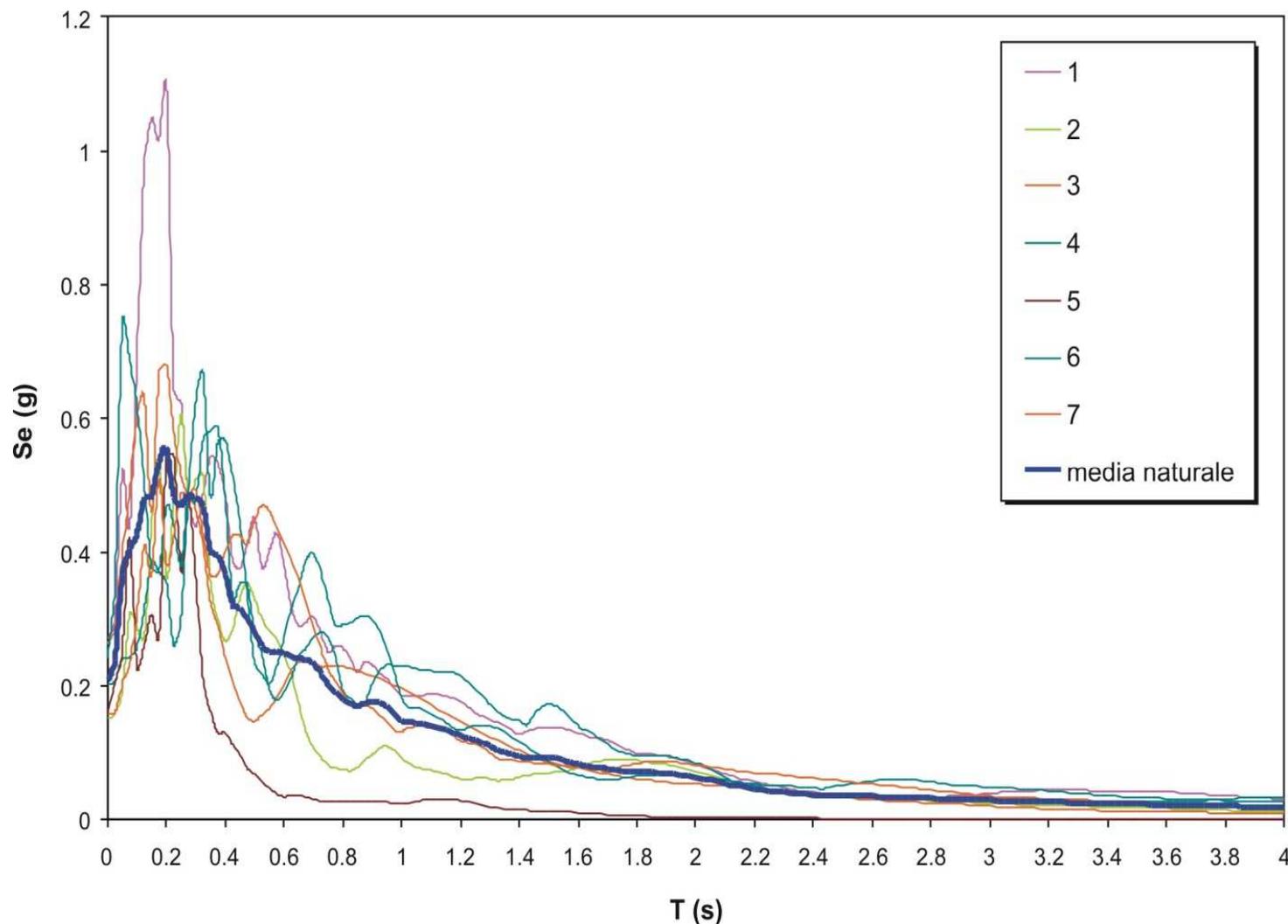


Oltre agli input sismici naturali si sono condotte analisi di RSL mediante applicazione di un segnale artificiale, generato con l'ausilio del **codice Belfagor** (Mucciarelli et al., 2004), ottenuto imponendo i vincoli di spettro-compatibilità con lo spettro di riferimento ed assegnando una coppia magnitudo-distanza dedotta dallo studio di disaggregazione (Progetto INGV-DPC S1, 2006)

per Fivizzano : M=6.2 e D=10km

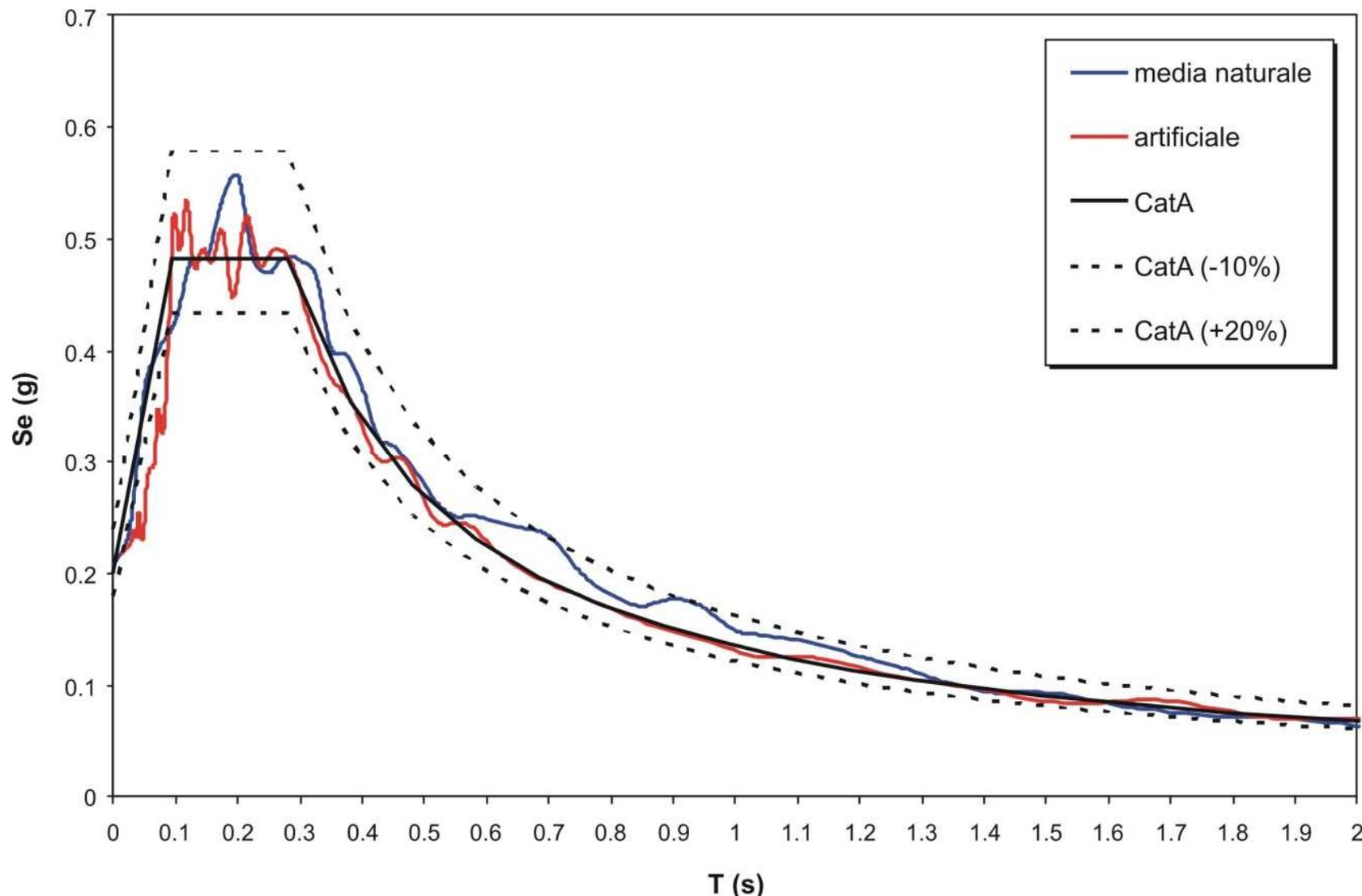
FASE 1: INPUT SISMICO

Spettri di risposta elastici (Smorzamento al 5%) degli accelerogrammi naturali utilizzati come input sismico per $T_r=475$ anni.



FASE 1: INPUT SISMICO

Confronto in termini di spettri di risposta elastici tra l'input sismico naturale (linea blu) e quello artificiale (linea rossa). Con linea nera è rappresentato, invece, lo spettro di Cat. A-T1 delle NTC08 (475 anni) per il centro abitato di Fivizzano e con linea tratteggiata la tolleranza in difetto ed in eccesso rispetto allo spettro target (spettro-compatibilità verificata nell'intervallo 0.1-2.0s).



FASE 1: INPUT SISMICO

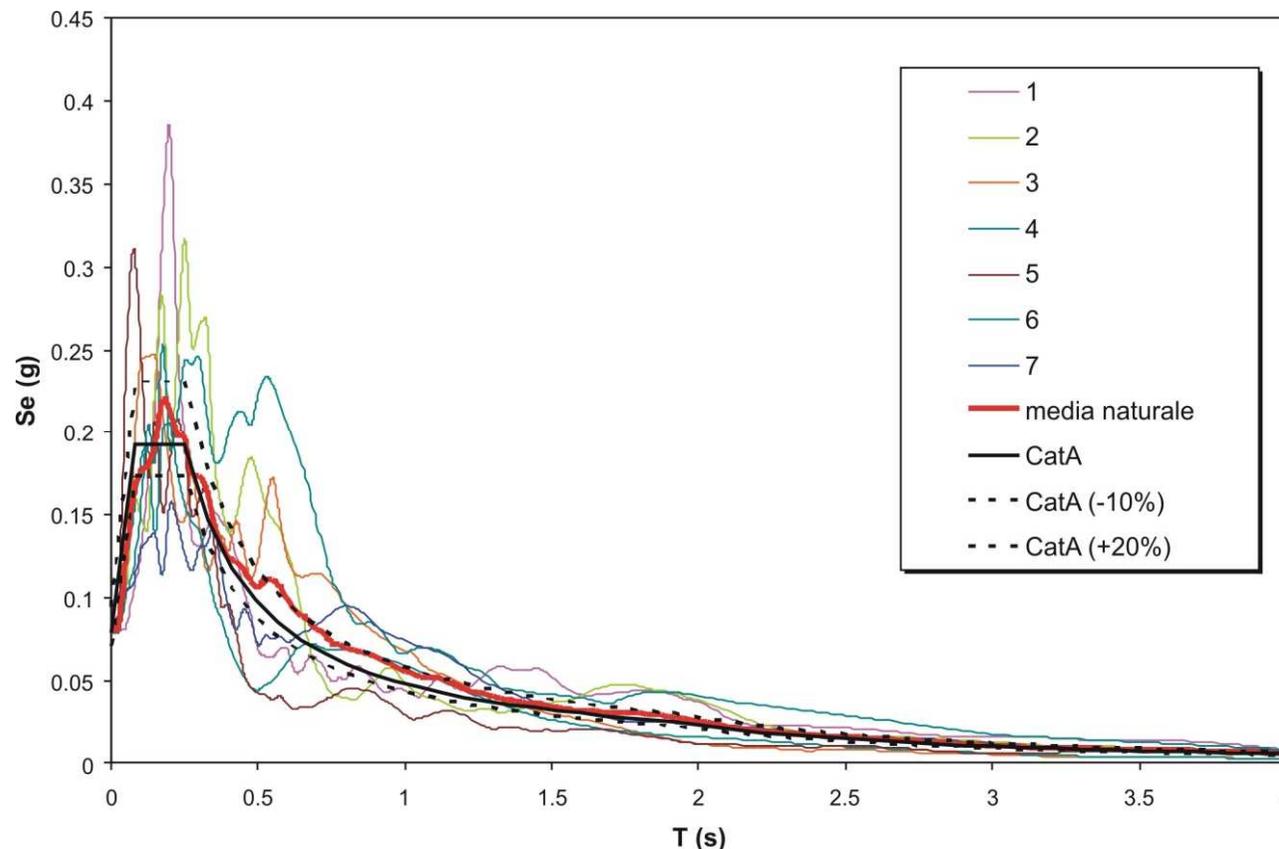
Informazioni identificative dei sette accelerogrammi naturali estratti mediante il software Scalcona 2.0 (tempo di ritorno pari a 475 anni).

n. accelerogramma	nome file	ID Stazione	Evento	data (gg/mm/aaaa)	componente	Magnitudo momento (Mw)	Distanza epicentrale (km)
1	ESD 000182xa.cor	ST54	Tabas	16/09/1978	x	6.87	11
2	ESD 000234ya.cor	ST68	Montenegro (aftershock)	24/05/1979	y	6.2	32
3	NGA 0146y.txt	Gilroy Array #1	Coyote Lake	06/08/1979	y	5.74	12.56
4	NGA 0804y.txt	Saratoga - W Valley Coll.	Loma Prieta	17/10/1989	y	6.93	83.53
5	NGA 1649y.txt	Vasquez Rocks Park	Sierra Madre	28/06/1991	y	5.61	39.6
6	KNET1 SAG00105032 01053.NS	Chinzei	Fukuoka	20/03/2005	N-S	6.6	36.18
7	ITACA 19971014_152 309ITDPC_CS C_WEC.DAT	Cascia	Umbria Marche 3rd shock	14/10/1997	E-W	5.6	22

FASE 1: INPUT SISMICO

Oltre all'analisi "ufficiale" della MS3, caratterizzata da un periodo di ritorno T_r di 475 anni, le analisi di risposta sismica sono state eseguite imponendo come input sismico accelerogrammi spettro-compatibili per periodi di ritorno propri dello Stato Limite di Esercizio (es. Stato limite di Danno, SLD), che specifico per costruzioni ordinarie corrispondono ad un $T_r = 50$ anni

Tale supplemento d'indagine si è reso necessario al fine di ottenere la risposta sismica dei terreni in oggetto per sollecitazioni paragonabili alle condizioni che, in un ottica progettuale ed ai sensi delle vigenti NTC2008, sono proprie dello Stato Limite di Esercizio (SLE).

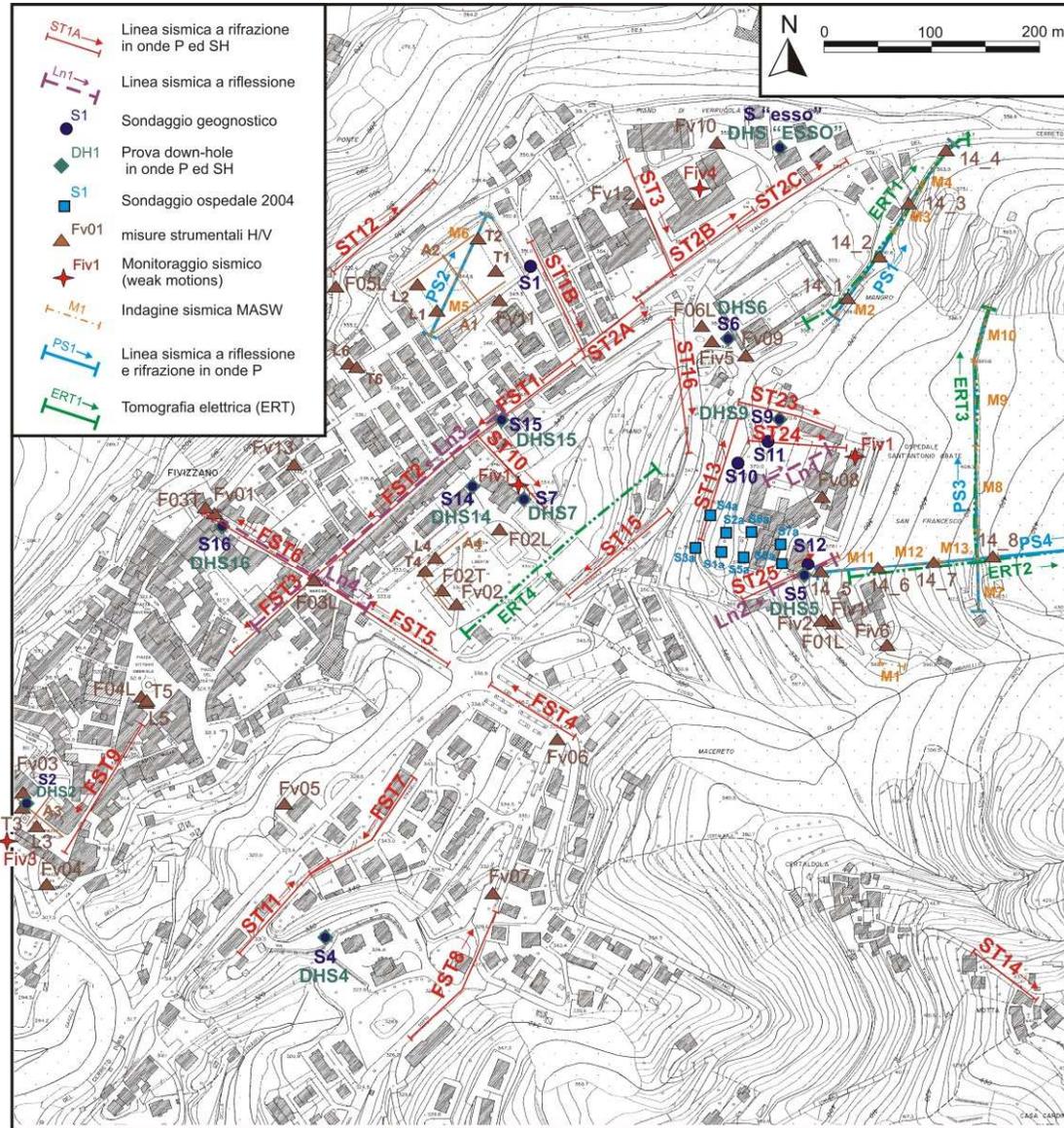


FASE 1: INPUT SISMICO

Informazioni identificative dei sette accelerogrammi naturali estratti mediante il software Scalcona 2.0 (tempo di ritorno pari a 50 anni).

n. accelerogramma	nome file	ID Stazione	Evento	data (gg/mm/aaaa)	componente	Magnitudo momento (Mw)	Distanza epicentrale (km)
1	ESD 000783ya.cor	ST228	Umbria Marche (aftershock)	03/10/1997	y	5.3	37
2	ESD 000234ya.cor	ST68	Montenegro (aftershock)	24/05/1979	y	6.2	32
3	ESD 000944xa.cor	ST99	Potenza	05/05/1990	x	5.71	37
4	NGA 0146y.txt	Gilroy Array #1	Coyote Lake	06/08/1979	y	5.74	12.56
5	NGA 0455x.txt	Gilroy Array #1	Morgan Hill	24/04/1984	x	6.19	38.63
6	ITACA 19971014_152 309ITDPC_CS C_WEC.DAT	Cascia	Umbria Marche 3rd shock	14/10/1997	E-W	5.6	22
7	ITACA 20090406_013 239ITDPC_CL N_NSC.DAT	Celano	L'Aquila mainshock	06/14/2009	N-S	6.3	31.6

FASE 2: MODELLO GEO-LITOLOGICO DEL SOTTOSUOLO DI FIVIZZANO



Le caratteristiche geologiche fondamentali di Fivizzano derivano dagli studi di Puccinelli et al. (2010) e dai risultati delle indagini condotte successivamente per la MS di livello 3 che hanno consentito di perfezionare il modello geologico e definire il modello geolitoologico, geotecnico e numerico di sottosuolo.

FASE 2: DAL MODELLO GEO-LITOLOGICO AL MODELLO GEOTECNICO-NUMERICO DI FIVIZZANO

Gli studi promossi per la ricostruzione del modello geologico-tecnico a Fivizzano sono stati finanziati dalla Regione Toscana e rientrano nel programma VEL (Valutazione Effetti Locali) e sono iniziati intorno al 2005. Sono stati svolti rilievi geologici e geomorfologici di dettaglio (1:2.000 e 1:5.000) e molte indagini geognostiche: che sono state condotte anche negli ultimi anni per la redazione degli ultimi studi di MS di livello 3:

- 23 sondaggi geognostici
- 11 prove down-hole in onde P ed SH
- 27 stese sismiche a rifrazione in onde P ed SH
- 4 sismiche a rifrazione (tomografie in onde P)
- 6 sismiche a riflessione HR in onde P
- 2 sismiche a riflessione HR in onde SH
- 13 prove MASW
- 4 Stendimenti di sismica passiva in array (ESAC)
- 45 misure di rumore a stazione singola
- 4 monitoraggi sismici (weak motions)
- 4 tomografie elettriche ERT

Tutti questi studi hanno prodotto una quantità molto consistente di dati geologici, sismici e fisico-meccanici, che hanno permesso di realizzare e vincolare un modello geologico-tecnico del sottosuolo di Fivizzano robusto e affidabile.

FASE 2: MODELLO GEOTECNICO-NUMERICO DEL SOTTOSUOLO DI FIVIZZANO LUNGO 5 SEZIONI RAPPRESENTATIVE

L'obiettivo delle indagini condotte è stato quello di:

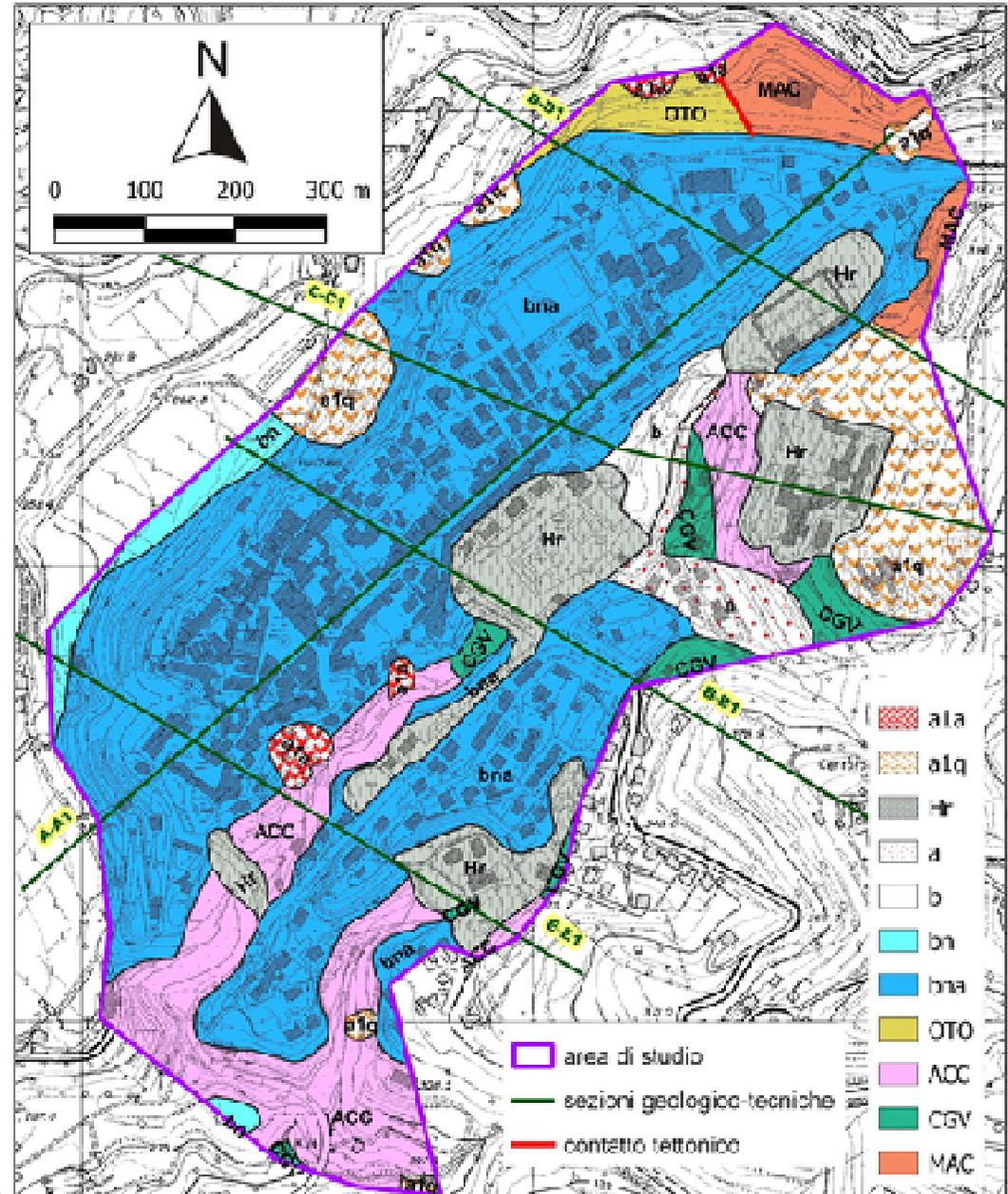
- 1) ricostruire le geometrie dei litotipi investigati;
- 2) misurare i valori dei parametri fisico-meccanici (dalle indagini geofisiche e geotecniche);
- 3) caratterizzare il comportamento non lineare: curve $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$;

FASE 2: DAL MODELLO GEO-LITOLOGICO AL MODELLO GEOTECNICO-NUMERICO DI FIVIZZANO

La figura mostra la localizzazione delle indagini realizzate nel fino ad oggi con il supporto logistico e finanziario della Regione Toscana.

La ricostruzione dei modelli di sottosuolo ha comportato un complesso lavoro di interpretazione, confronto e armonizzazione di tutti i dati raccolti. Questo lavoro è stato svolto con il contributo e la collaborazione di tutte le persone nel gruppo di lavoro e nelle sue attività a Fivizzano.

Il risultato di questo lavoro di gruppo consiste in una **carta geologica di sintesi** e in una **serie di 5 sezioni** posizionate e realizzate in modo da rappresentare le caratteristiche del sottosuolo e da costituire le sezioni di riferimento per le elaborazioni e gli approfondimenti successivi attraverso le simulazioni numeriche.



FASE 2: DAL MODELLO GEO-LITOLOGICO AL MODELLO GEOTECNICO-NUMERICO DI FIVIZZANO

Nella zona di Fivizzano affiorano numerose unità litostratigrafiche, appartenenti al substrato e alla copertura. In profondità si ritrova questa varietà di bedrock geologici e sismici che ha fatto ravvisare nella modellazione delle sezioni geotecniche e numeriche 1D e 2D la necessità di tener conto della sovrapposizione di diversi substrati con proprietà sismiche diverse, geometrie e spessori variabili al di sotto delle coperture alluvionali nella risposta sismica locale.

Si riassumono brevemente le diverse unità riconosciute nel centro urbano di Fivizzano:

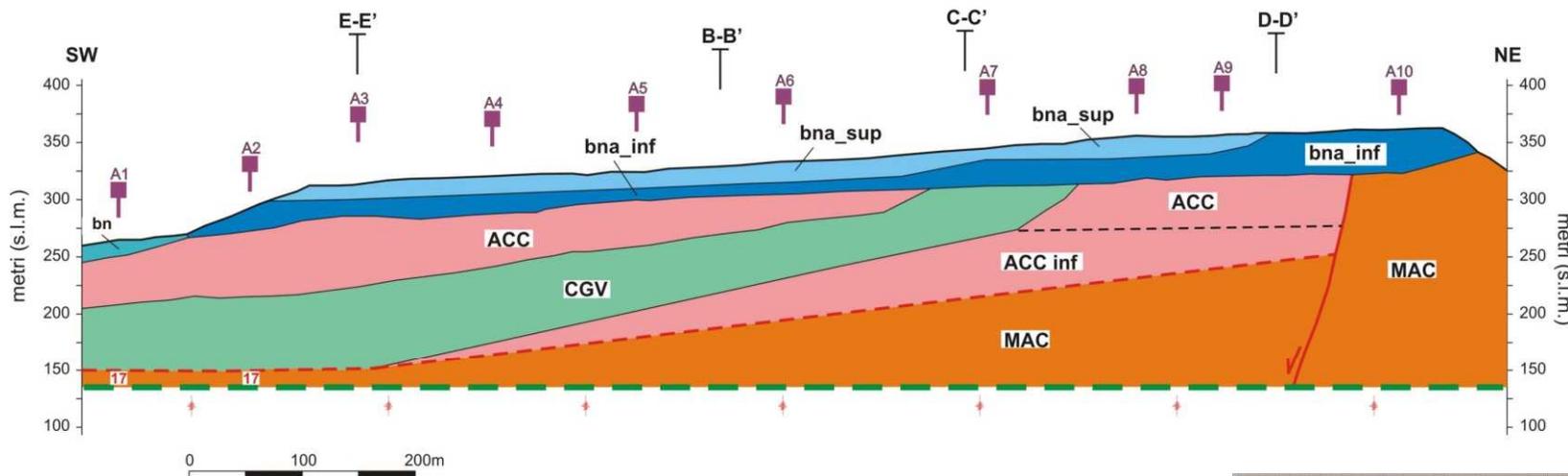
Depositi di copertura quaternari - Nella zona studiata affiorano depositi quaternari dovuti essenzialmente all'azione della gravità e delle acque correnti superficiali. Sono presenti depositi alluvionali, sia terrazzati che di fondovalle, depositi di frana, depositi detritici e depositi di origine antropica.

Alluvioni terrazzate (bn): depositi eterometrici costituiti da ghiaie, ciottoli e blocchi, sabbie e limi.

FASE 2: PASSAGGIO DAL MODELLO GEO-LITOLOGICO A QUELLO GEOTECNICO-NUMERICO NELLA SEZIONE AA'

MEDIA SEZIONE A-A'

Litologia	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso di volume (kN/m ³)	curve dinamiche (G/G0 e D)
bn (alluvioni terrazzate recenti)	1385	560	20.0	Rollins et al. 1998 (gravel)
bna sup (Alluvioni terrazzate antiche - livello superiore)	866	435	20.0	
bna inf (Alluvioni terrazzate antiche - livello inferiore)	1363	648	21.6	
ACC - livello superiore (Argille e Calcari di Canetolo)	2698	1005	22.5	linear D= 1%
ACC - livello inferiore (Argille e Calcari di Canetolo)	3433	1475	23.0	linear D= 0.5%
CGV (Calcari del Gruppo del vescovo)	3617	1648	23.0	
MAC (Arenarie del Macigno)	3600	1780	24.0	



■ Alluvioni terrazzate recenti (bn)

■ Alluvioni terrazzate antiche (bna) - livello superiore

■ Alluvioni terrazzate antiche (bna) - livello inferiore

■ Argille e calcari di Canetolo (ACC)

■ Calcari del Gruppo del Vescovo (CGV)

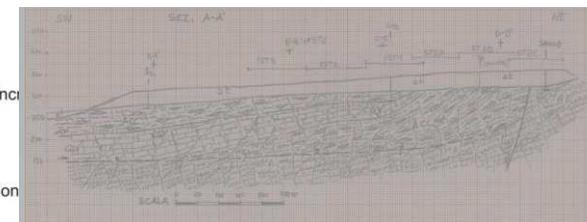
■ Arenarie del Macigno (MAC)

--- Discontinuità sismostratigrafica presunta dalla stesa sismica St16

■ A1 Punto di controllo 1D delle analisi di RSL

--- Quota di imposizione degli input sismici

B-B' Inc
a) Con
b) Con



FASE 2: MODELLO GEOTECNICO-NUMERICO DEL SOTTOSUOLO DI FIVIZZANO LUNGO 5 SEZIONI RAPPRESENTATIVE

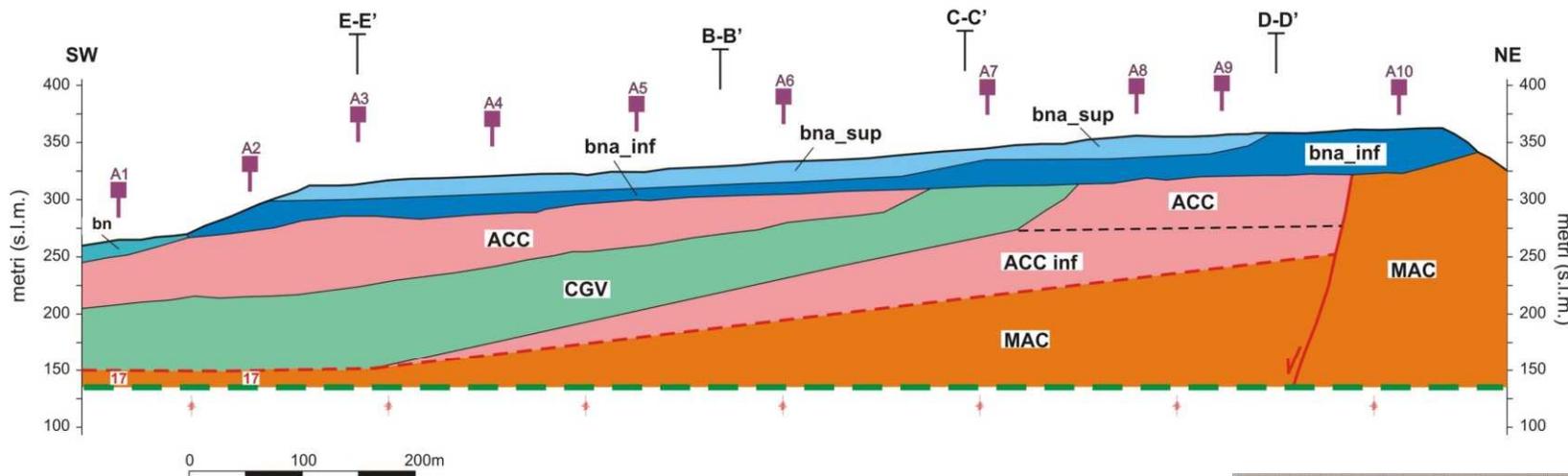
Dall'osservazione delle sezioni è possibile notare alcuni aspetti salienti del modello geolitologico desunto:

- le unità appartenenti ai depositi terrazzati antichi (bna) sono state distinte in due facies, poiché differenti sotto il profilo sismostratigrafico;
- anche le Argille e Calcari di Canetolo (ACC) sono state distinte sotto il profilo sismostratigrafico in due unità;
- le Arenarie del Macigno (MAC), affioranti nel settore Nord dell'area, approfondiscono notevolmente per motivi di natura tettonica verso sud, dove sono sormontate dalle formazioni dell'Unità di Canetolo;
- le formazioni costituenti il bedrock sismico e geologico dell'area sono in contatto tra loro tramite lineamenti tettonici (prevalentemente sepolti e dedotti dall'interpretazione delle indagini geofisiche realizzate nell'area);
- l'Unità tettonica Canetolo è presente nell'area mediante alternanza tra le formazioni delle Argille e Calcari di Canetolo (ACC) ed i Calcari del Gruppo del Vescovo (CGV);

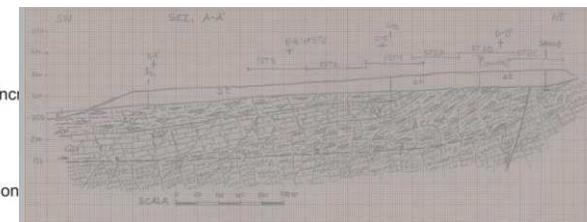
FASE 2: PASSAGGIO DAL MODELLO GEO-LITOLOGICO A QUELLO GEOTECNICO-NUMERICO NELLA SEZIONE AA'

MEDIA SEZIONE A-A'

Litologia	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso di volume (kN/m ³)	curve dinamiche (G/G0 e D)
bn (alluvioni terrazzate recenti)	1385	560	20.0	Rollins et al. 1998 (gravel)
bna sup (Alluvioni terrazzate antiche - livello superiore)	866	435	20.0	
bna inf (Alluvioni terrazzate antiche - livello inferiore)	1363	648	21.6	
ACC - livello superiore (Argille e Calcari di Canetolo)	2698	1005	22.5	linear D= 1%
ACC - livello inferiore (Argille e Calcari di Canetolo)	3433	1475	23.0	linear D= 0.5%
CGV (Calcari del Gruppo del vescovo)	3617	1648	23.0	
MAC (Arenarie del Macigno)	3600	1780	24.0	

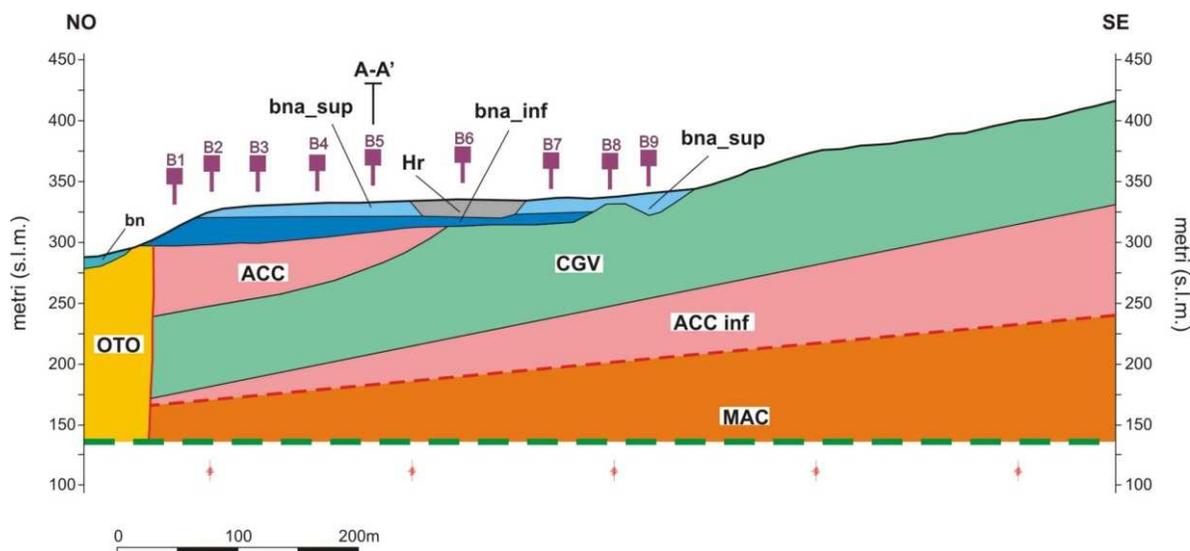


- Alluvioni terrazzate recenti (bn)
- Alluvioni terrazzate antiche (bna) - livello superiore
- Alluvioni terrazzate antiche (bna) - livello inferiore
- Argille e calcari di Canetolo (ACC)
- Calcari del Gruppo del Vescovo (CGV)
- Arenarie del Macigno (MAC)
- Discontinuità sismostratigrafica presunta dalla stesa sismica St16
- Punto di controllo 1D delle analisi di RSL
- Quota di imposizione degli input sismici

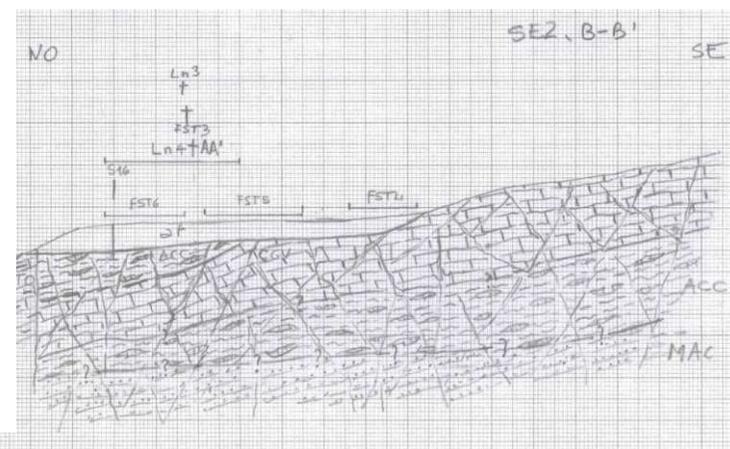


FASE 2: PASSAGGIO DAL MODELLO GEO-LITOLOGICO A QUELLO GEOTECNICO-NUMERICO NELLA SEZIONE BB'

MEDIA SEZIONE B-B'				
Litologia	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso di volume (kN/m3)	curve dinamiche (G/G0 e D)
hr (riporto)	655	355	21.5	riporto - Garfagnana
bn (alluvioni terrazzate recenti)	1385	560	20.0	
bna sup (Alluvioni terrazzate antiche - livello superiore)	1040	470	20.0	Rollins et al. 1998 (gravel)
bna inf (Alluvioni terrazzate antiche - livello inferiore)	1335	725	21.6	
ACC - livello superiore (Argille e Calcari di Canetolo)	2700	1160	22.5	linear D= 1%
ACC - livello inferiore (Argille e Calcari di Canetolo)	3150	1475	23.0	
CGV (Calcari del Gruppo del vescovo)	3398	1518	23.0	linear D= 0.5%
OTO (Flysch di Ottone)	2975	1290	23.0	
MAC (Arenarie del Macigno)	3600	1780	24.0	



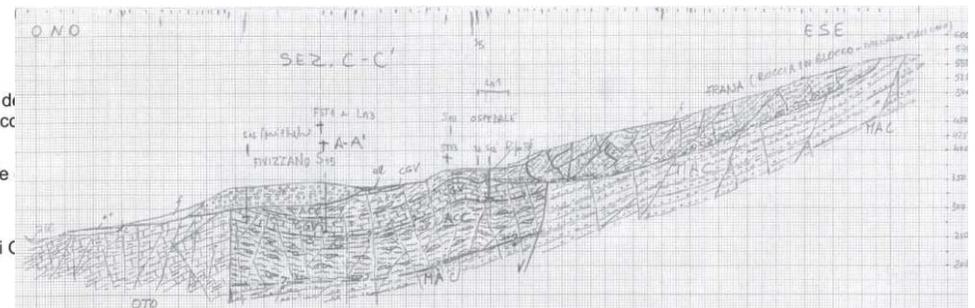
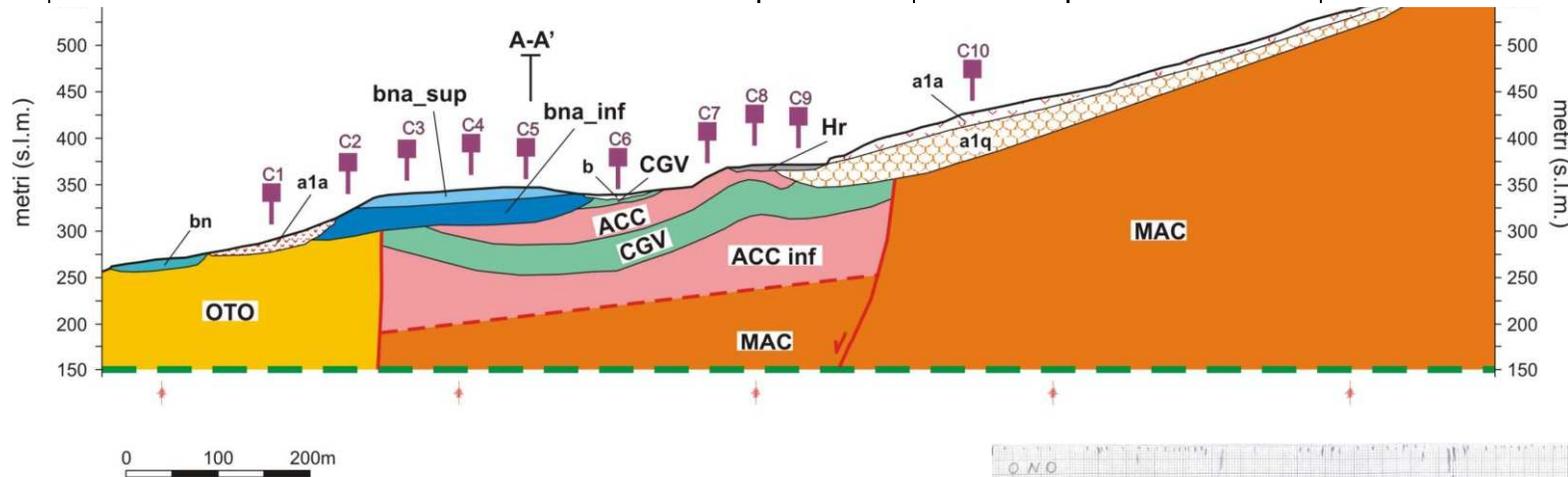
- Depositi di riporto (Hr)
- Argille e calcari di Canetolo (ACC)
- Punto di controllo 1D delle analisi di RSL
- Alluvioni terrazzate recenti (bn)
- Calcari del Gruppo del Vescovo (CGV)
- Quota di imposizione degli input sismici
- Alluvioni terrazzate antiche (bna) - livello superiore
- Arenarie del Macigno (MAC)
- Incrocio con altra sezione geologica
- Alluvioni terrazzate antiche (bna) - livello inferiore
- Flysch di Ottone (OTO)
- Contatto tettonico: a) certo, b) presunto



FASE 2: PASSAGGIO DAL MODELLO GEO-LITOLOGICO A QUELLO GEOTECNICO-NUMERICO NELLA SEZIONE CC'

MEDIA SEZIONE C-C'

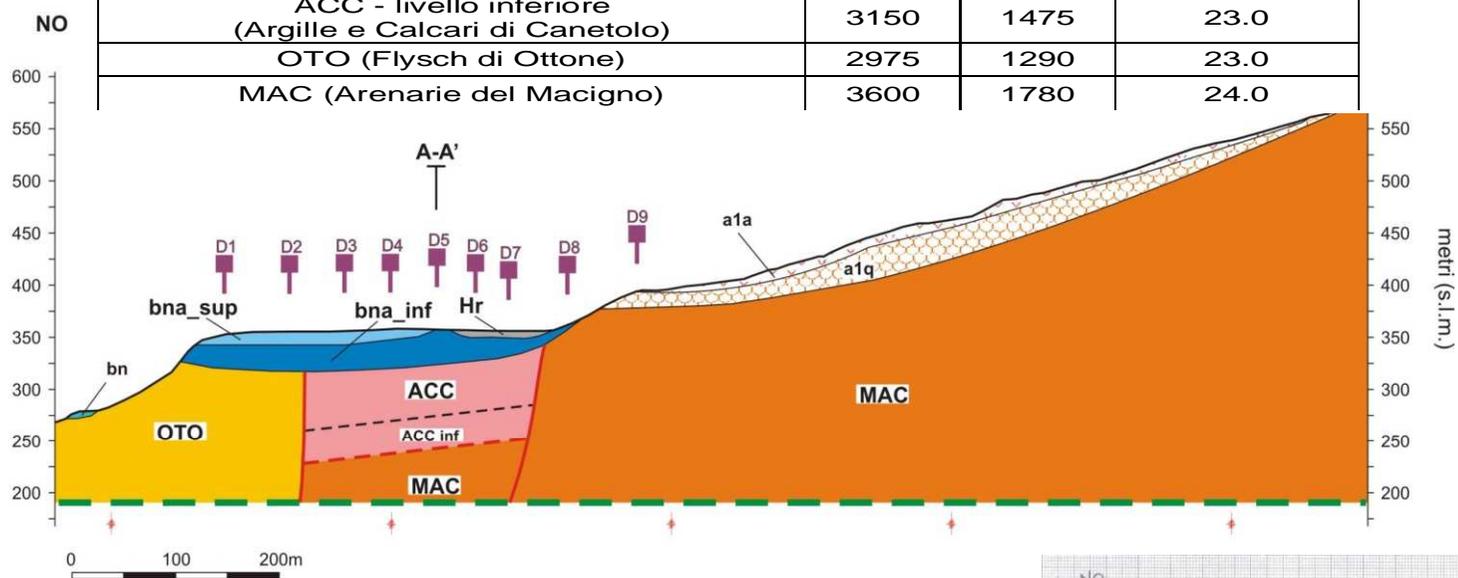
Litologia	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso di volume (kN/m ³)	curve dinamiche (G/G0 e D)
hr (riporto)	435	180	18.0	riporto - Garfagnana
a1a (frana attiva) - a1q sup (frana in roccia quiescente)	1800	520	21.6	Rollins et al. 1998 (gravel)
a1q inf (frana in roccia quiescente)	1810	980	22.5	Macigno Castelnuovo
b (alluvioni attuali)	1100	300	19.0	Alluvioni attuali Lunigiana
bn (alluvioni terrazzate recenti)	1385	560	20.0	Rollins et al. 1998 (gravel)
bna sup (Alluvioni terrazzate antiche - livello superiore)	848	468	20.0	
bna inf (Alluvioni terrazzate antiche - livello inferiore)	1225	678	21.6	
ACC - livello superiore (Argille e Calcari di Canetolo)	3135	1230	22.5	linear D= 0.5%
ACC - livello inferiore (Argille e Calcari di Canetolo)	3150	1475	23.0	
CGV (Calcari del Gruppo del vescovo)	3465	1667	23.0	
OTO (Flysch di Ottone)	2975	1290	23.0	
MAC (Arenarie del Macigno)	3600	1780	24.0	



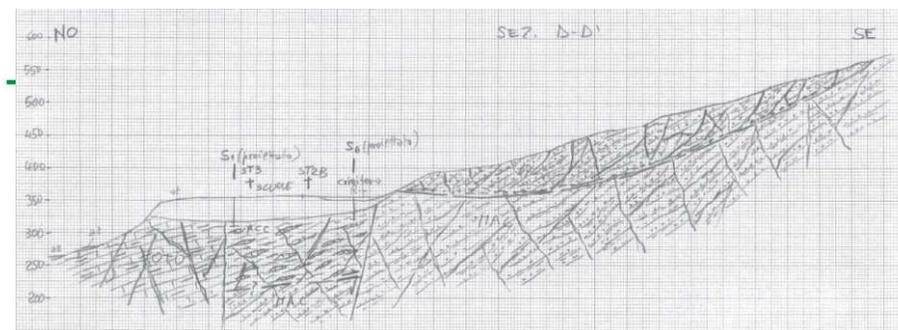
FASE 2: PASSAGGIO DAL MODELLO GEO-LITOLOGICO A QUELLO GEOTECNICO-NUMERICO NELLA SEZIONE DD'

MEDIA SEZIONE D-D'

Litologia	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso di volume (kN/m3)	curve dinamiche (G/G0 e D)
hr (riporto)	965	260	18.0	riporto - Garfagnana
a1a (frana attiva)	1800	520	21.6	Rollins et al. 1998 (gravel)
a1qinf (frana in roccia quiescente)	1810	980	22.5	Macigno Castelnuovo
bn (alluvioni terrazzate recenti)	1385	560	20.0	Rollins et al. 1998 (gravel)
bna sup (Alluvioni terrazzate antiche - livello superiore)	1000	350	20.0	
bna inf (Alluvioni terrazzate antiche - livello inferiore)	1205	613	21.6	
ACC - livello superiore (Argille e Calcari di Canetolo)	2410	840	22.5	linear D= 1%
ACC - livello inferiore (Argille e Calcari di Canetolo)	3150	1475	23.0	linear D= 0.5%
OTO (Flysch di Ottone)	2975	1290	23.0	
MAC (Arenarie del Macigno)	3600	1780	24.0	

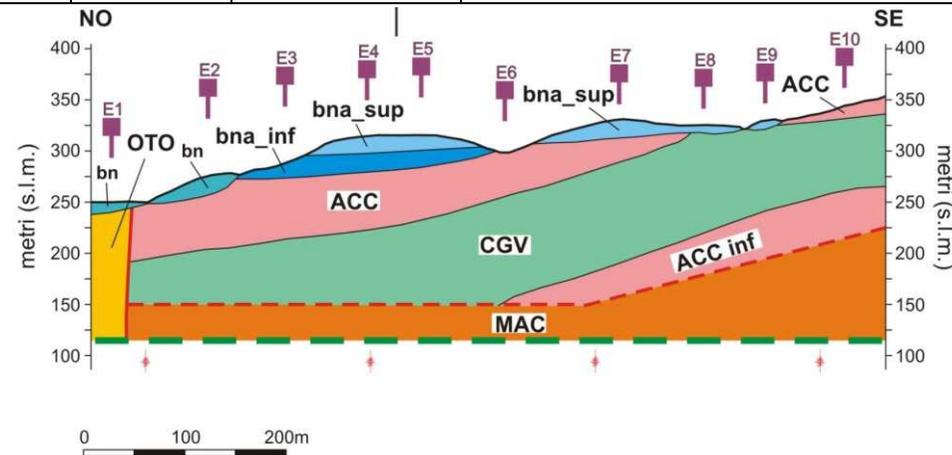
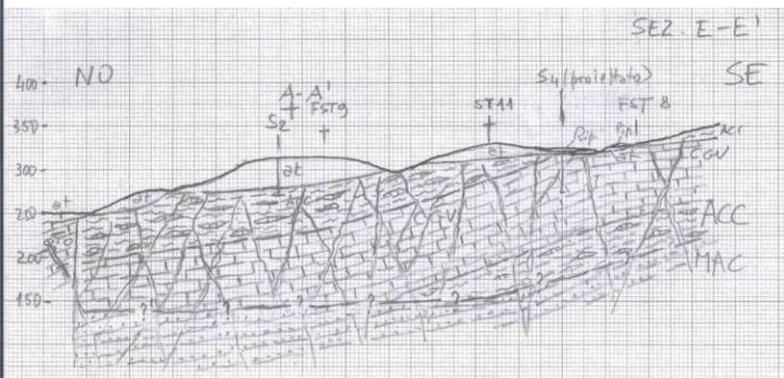


- Depositi di riporto (Hr)
- Corpo di frana attiva (a1a)
- Corpo di frana quiescente (a1q)
- Alluvioni terrazzate recenti (bn)
- Alluvioni terrazzate antiche (bna) - livello superiore
- Alluvioni terrazzate antiche (bna) - livello inferiore
- Argille e calcari di Canetolo (ACC)
- Arenarie del Macigno (MAC)
- Flysch di Ottone (OTO)
- Punto di controllo 1D delle analisi di RSL
- Discontinuità sismostratigrafica presunta dalla stesa sismica St16



FASE 2: PASSAGGIO DAL MODELLO GEO-LITOLOGICO A QUELLO GEOTECNICO-NUMERICO NELLA SEZIONE EE'

MEDIA SEZIONE E-E'				
Litologia	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso di volume (kN/m ³)	curve dinamiche (G/G0 e D)
bn (alluvioni terrazzate recenti)	1385	560	20.0	Rollins et al. 1998 (gravel)
bna sup (Alluvioni terrazzate antiche - livello superiore)	878	458	20.0	
bna inf (Alluvioni terrazzate antiche - livello inferiore)	1320	570	21.6	
ACC - livello superiore (Argille e Calcari di Canetolo)	2768	958	22.5	linear D= 1%
ACC - livello inferiore (Argille e Calcari di Canetolo)	3150	1475	23.0	linear D= 0.5%
CGV (Calcari del Gruppo del vescovo)	3820	1685	23.0	
OTO (Flysch di Ottone)	2975	1290	23.0	
MAC (Arenarie del Macigno)	3600	1780	24.0	



- Alluvioni terrazzate recenti (bn)
- Alluvioni terrazzate antiche (bna) - livello superiore
- Alluvioni terrazzate antiche (bna) - livello inferiore
- Flysch di Ottone (OTO)
- Argille e calcari di Canetolo (ACC)
- Arenarie del Macigno (MAC)
- Calcari del Gruppo del Vescovo (CGV)
- Punto di controllo 1D delle analisi di RSL
- Quota di imposizione degli input sismici
- Incrocio con altra sezione geologica
- Contatto tettonico: a) certo, b) presunto

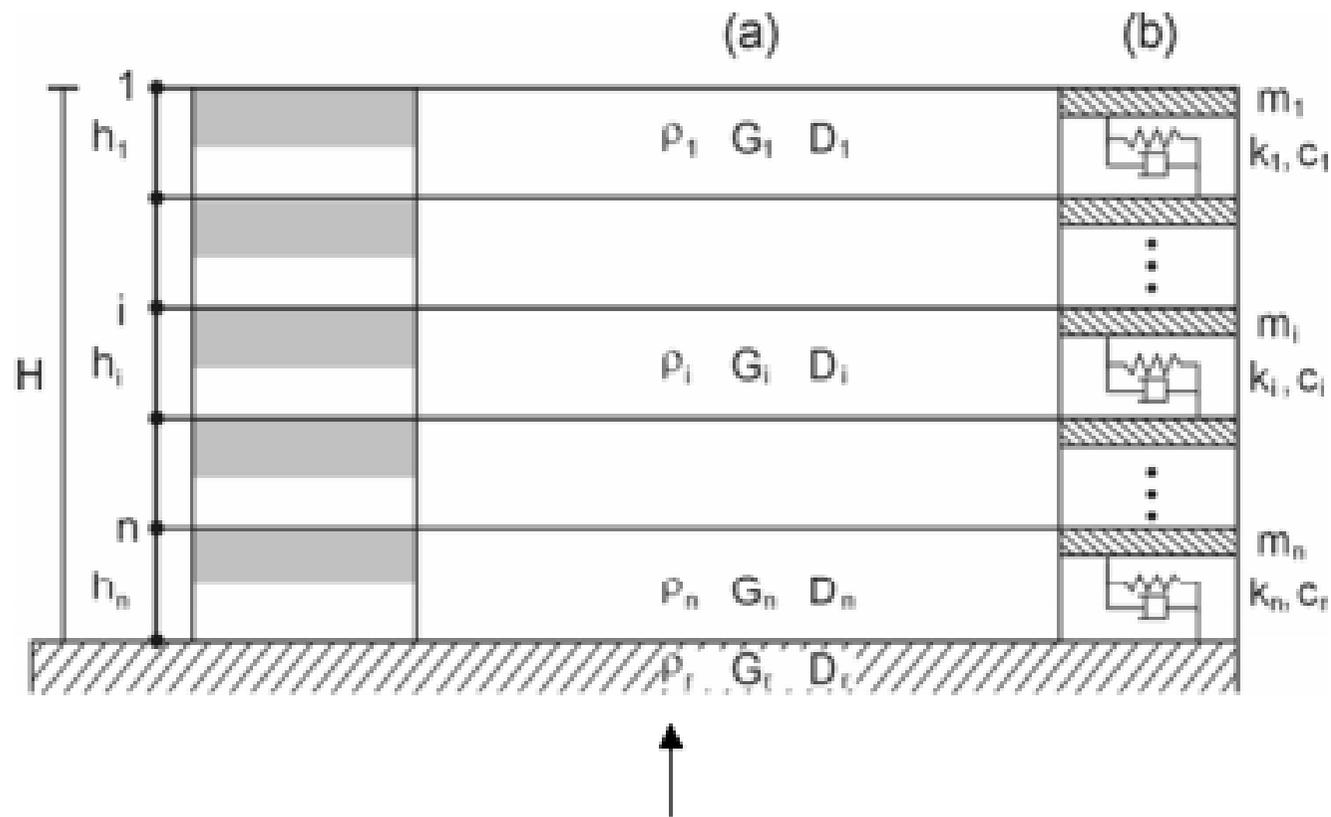
FASE 2: MODELLO GEOTECNICO-NUMERICO DEL SOTTOSUOLO DI FIVIZZANO LUNGO 5 SEZIONI RAPPRESENTATIVE

In tabella sono illustrati i dati medi per l'intero centro abitato di Fivizzano, in termini di valori di V_p , V_s , peso di volume e curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato (G/G_0) e di incremento del rapporto di smorzamento $D(\gamma)$.

Litologia	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Peso di volume (kN/m ³)	curve dinamiche (G/G_0 e D)
hr (riporto)	644	279	19.4	riporto - Garfagnana
a1a (frana attiva)	1650	430	21.6	Rollins et al. 1998 (gravel)
a1qinf (frana in roccia quiescente)	1810	980	22.5	Macigno Castelnuovo
b (alluvioni attuali)	1100	300	19.0	Alluvioni attuali Lunigiana
bn (alluvioni terrazzate recenti)	1385	560	20.0	Rollins et al. 1998 (gravel)
bna sup (Alluvioni terrazzate antiche - livello superiore)	1037	444	20.0	
bna inf (Alluvioni terrazzate antiche - livello inferiore)	1343	661	21.6	
ACC - livello superiore (Argille e Calcari di Canetolo)	2521	950	22.4	linear $D= 1\%$
ACC - livello inferiore (Argille e Calcari di Canetolo)	3433	1475	23.0	linear $D= 0.5\%$
CGV (Calcari del Groppo del vescovo)	3529	1616	23.0	
OTO (Flysch di Ottone)	2975	1290	23.0	
MAC (Arenarie del Macigno)	3600	1780	24.0	

FASE 4: CODICI DI CALCOLO E PARAMETRI DI OUTPUT UTILI PER LA COSTRUZIONE DELLE CARTE DI MS DI LIVELLO 3'

Il codice monodimensionale **Strata** (Kottke and Rathje, 2008) calcola la risposta sismica di un deposito stratificato orizzontalmente, a comportamento visco-elastico, poggiante su bedrock deformabile a superficie orizzontale, soggetto alla propagazione verticale di onde di taglio. Il codice opera nel dominio delle frequenze analogamente al codice SHAKE e sue successive modificazioni (Schnabel et. Al. 1972, Idriss & Sun, 1992).



FASE 4: CODICI DI CALCOLO E PARAMETRI DI OUTPUT UTILI PER LA COSTRUZIONE DELLE CARTE DI MS DI LIVELLO 3'

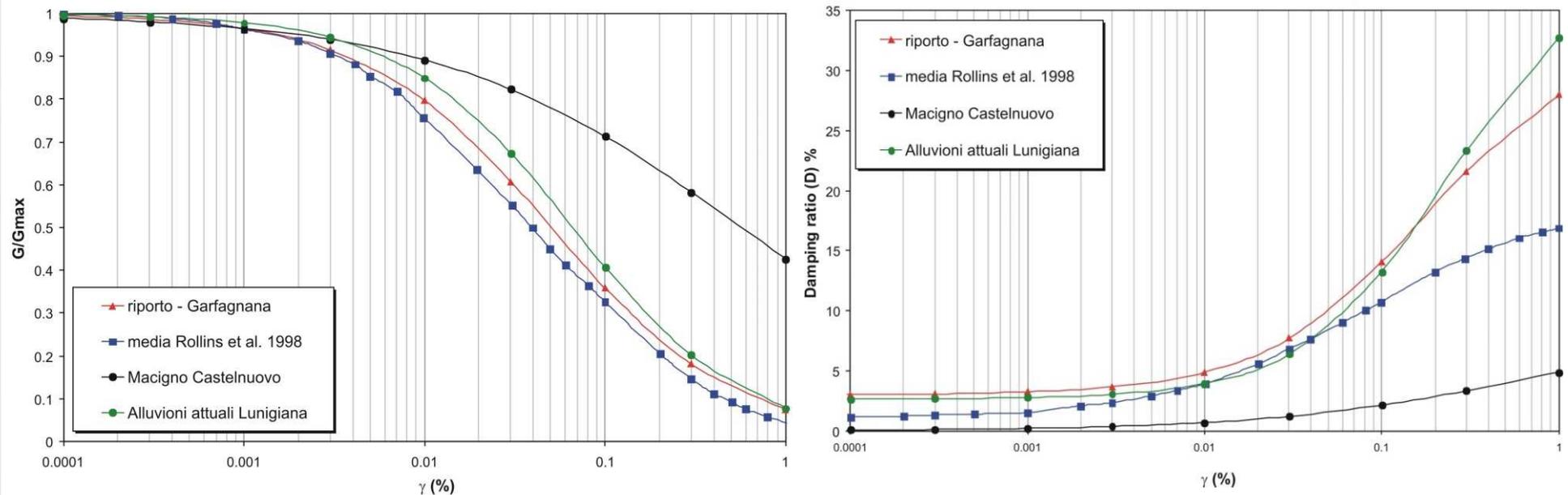
Il codice bidimensionale **QUAD4M** (Hudson et al., 1994) costituisce una modifica di QUAD-4 originariamente sviluppato da Idriss et al. (1973) presso l'Università di Berkeley. Esso consente di effettuare analisi di risposta sismica locale di tipo bidimensionale, lineari equivalenti, con il metodo degli elementi finiti. Il deposito viene discretizzato in una mesh di elementi di forma triangolare o quadrangolare, consentendo una efficace modellazione della variazione geometrica del contatto deposito-basamento, così come delle irregolarità della superficie topografica e dei contatti stratigrafici.

Le 5 sezioni numeriche sottoposte ad analisi di risposta sismica locale sono state discretizzate mediante elementi finiti triangolari, le cui dimensioni massime sono state selezionate secondo la regola (Kuhlemeyer e Lysmer, 1973):

$$D_{max} = \lambda / k = (T V_s) / k \quad (1)$$

dove V_s è la velocità di propagazione delle onde di taglio (ricavata dalle indagini geofisiche dirette ed illustrate nei precedenti capitoli) e T è il periodo corrispondente alla più corta onda sismica propagabile e posto pari a 0.05s (frequenza massima propagata pari a 20Hz). Tale periodo è quindi il minor periodo per cui si può ritenere attendibile il dato di output. Il coefficiente k è stato posto pari a 8 (Lanzo & Silvestri, 1999).

FASE 3: CARATTERIZZAZIONE DEI DEPOSITI INCOERENTI SUPERFICIALI E DEI MATERIALI ROCCIOSI IN PROFONDITA'



Le curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato (G/G_0) e di incremento del rapporto di smorzamento $D(\gamma)$ utilizzate per simulare il comportamento non lineare dei terreni mediante il legame costitutivo lineare equivalente, sono state desunte principalmente dalla banca dati realizzata in ambito VEL su terreni analoghi, sotto il profilo fisico-meccanico, a quelli indagati e campionati in Toscana settentrionale.

A causa delle caratteristiche grossolane dei terreni di copertura (prevalentemente di natura ghiaioso-sabbiosa), non è stato possibile prelevare a Fivizzano campioni indisturbati, necessari per la realizzazione di prove geotecniche di laboratorio in campo dinamico.

La curva relativa alle alluvioni recenti ed antiche, prevalentemente ghiaiose, è stata scelta da bibliografia internazionale (Rollins et al., 1998).

FASE 3: CARATTERIZZAZIONE DEI DEPOSITI INCOERENTI SUPERFICIALI E DEI MATERIALI ROCCIOSI IN PROFONDITA'

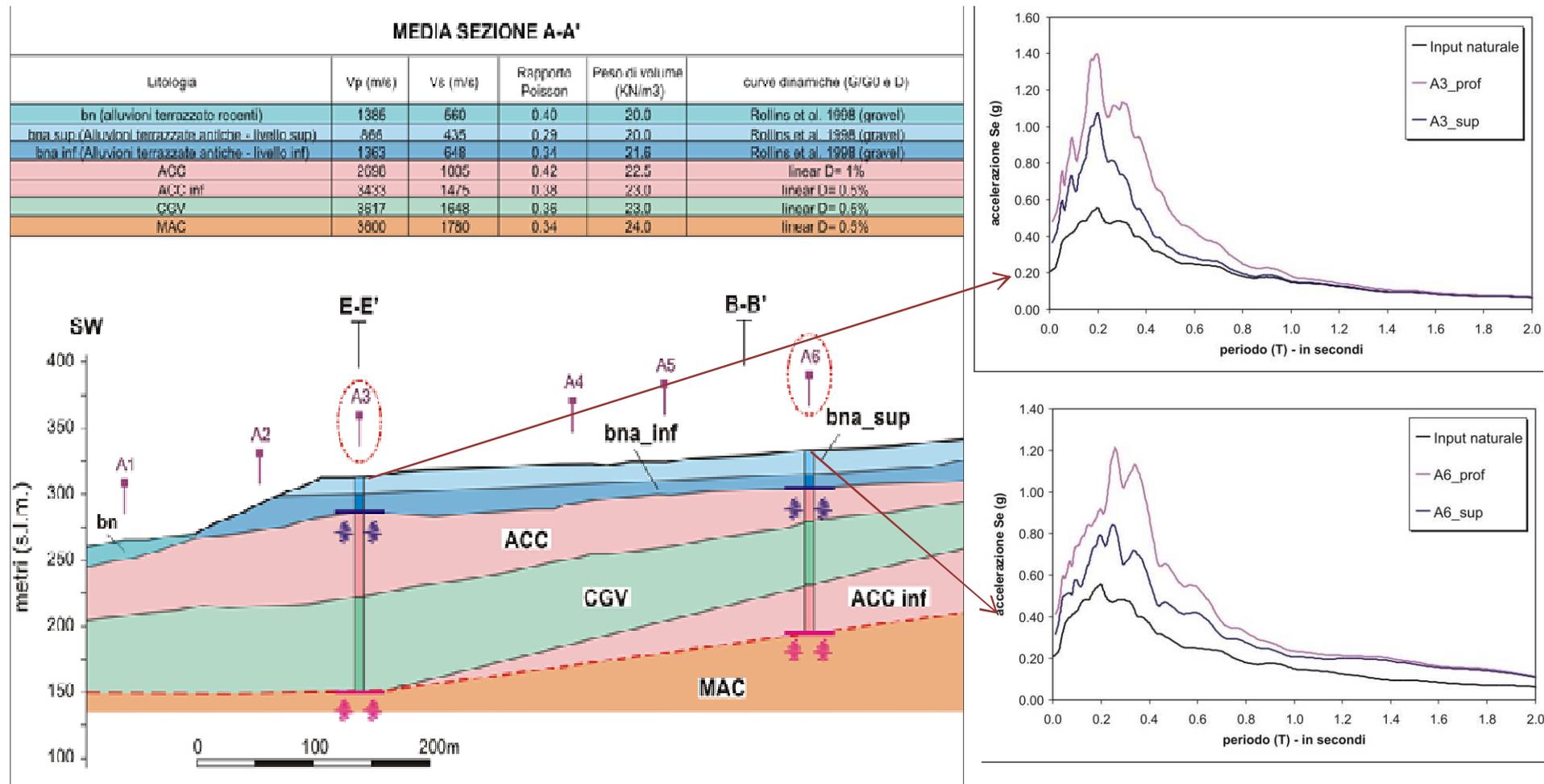
In particolare:

- per i depositi di riporto (hr) è stata scelta una media delle curve dinamiche relative ai riporti analizzati nell'attigua area della Garfagnana;
- per le alluvioni attuali (b) di natura sabbioso-limosa si è optato per le curve medie di analoghi terreni campionati nell'area della Lunigiana;
- per i terreni relativi al fenomeno gravitativo quiescente rilevato nel settore orientale dell'area di studio (a1q) di natura arenacea e caratterizzati da un comportamento litoide si è utilizzata la curva relativa alle arenarie del Macigno nel comune di Castelnuovo Garfagnana (LU);
- per i depositi di frana attiva (a1a) e per le alluvioni recenti (bn) e antiche (bna) è stata scelta la già citata curva di letteratura per terreni ghiaiosi (Rollins et al., 1998).

Di seguito si mostra un esempio delle proprietà meccaniche utilizzate ed assegnate ai diversi domini litologici individuati nell'ambito del modello numerico implementato.

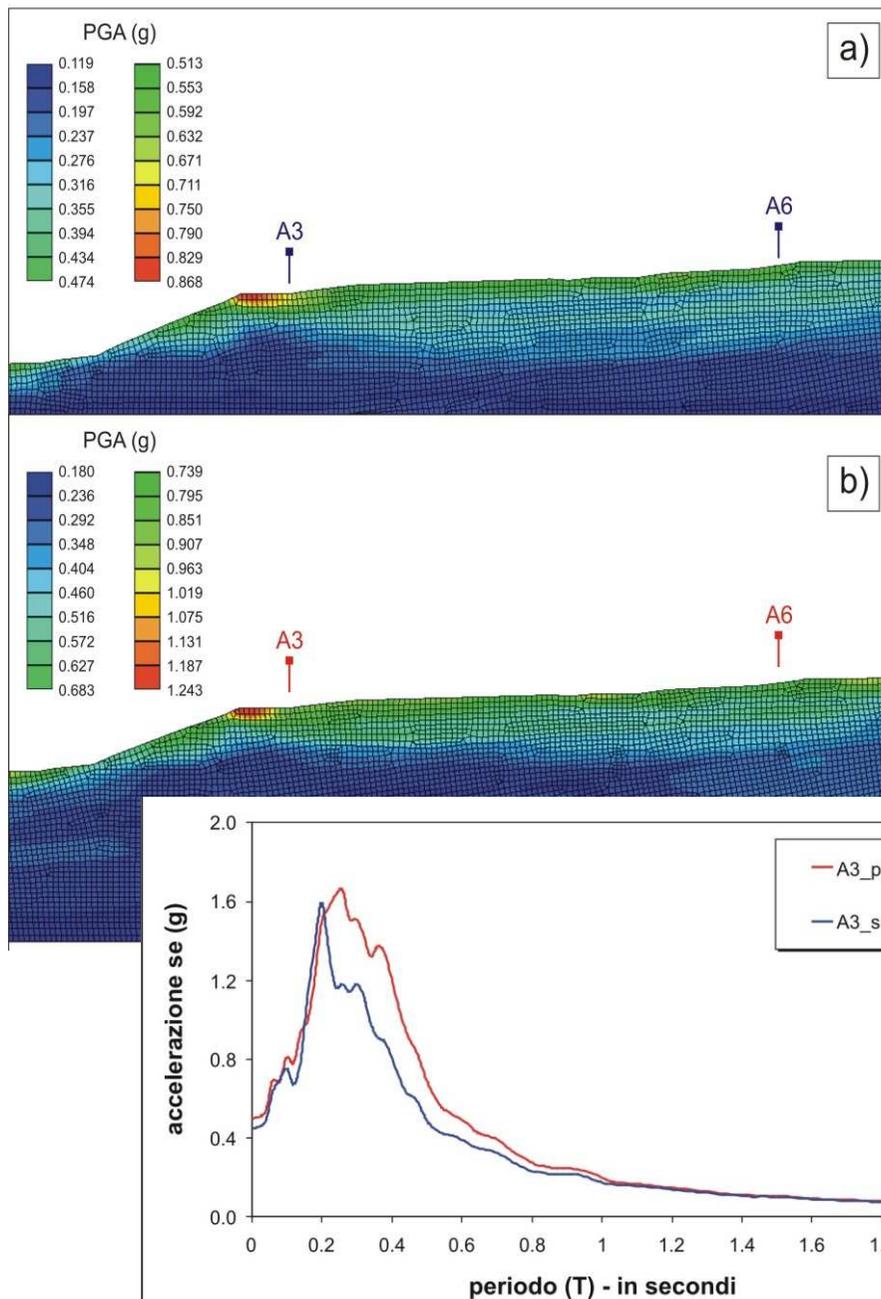
Inoltre, sono stati condotti degli studi di sensitività sul modello numerico prima di eseguire le analisi definitive.

FASE 3: ANALISI DI SENSITIVITA' DEL MODELLO NUMERICO



Analisi 1D preliminare per alcune verticali della sezione A-A'. Come è possibile notare, in entrambi i casi (punti A3 ed A6) l'analisi con bedrock "profondo" restituisce spettri di risposta più conservativi dell'omologa analisi con bedrock "superficiale"

FASE 3: ANALISI DI SENSITIVITA' DEL MODELLO NUMERICO

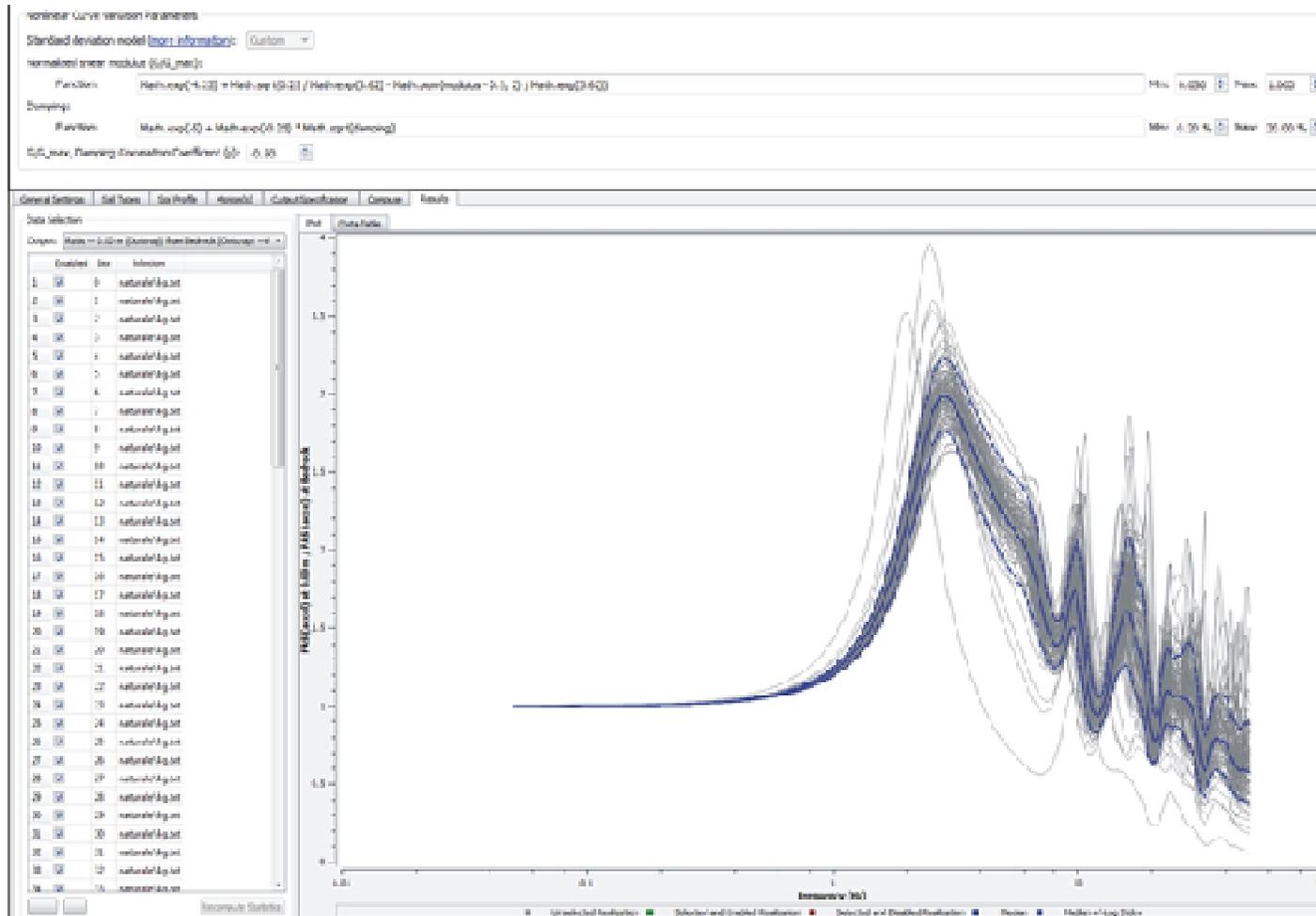


Valori di *PGA* relativi all'analisi 2D con l'input sismico 1 per l'analisi "superficiale" (a) e "profonda" (b) della sezione AA' - I valori sono normalizzati rispetto ai minimi e massimi relativi ad ogni singola sezione

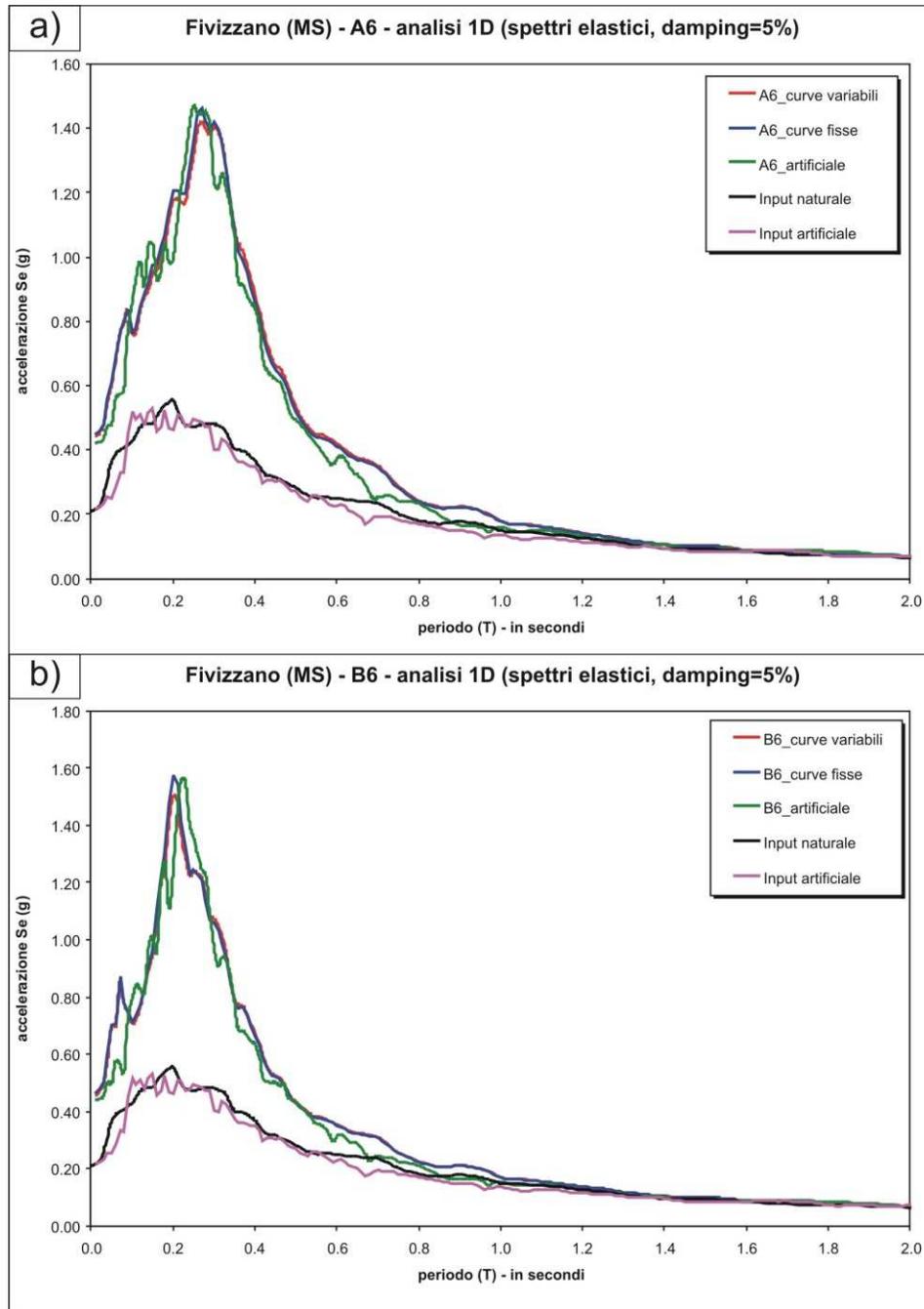
Confronto in termini di spettri di risposta medi per i nodi A3 ed A6

FASE 3: ANALISI DI SENSITIVITA' DEL MODELLO NUMERICO

Al fine di valutare l'influenza delle curve dinamiche sul risultato delle analisi numeriche (in considerazione del fatto che tali dati non sono stati acquisiti direttamente dai terreni oggetto di studio), le analisi monodimensionali sono state eseguite utilizzando il tool del software STRATA che consente di tener conto della variabilità delle proprietà dei terreni (in luogo dell'uso del solo valore medio) mediante approccio MonteCarlo (100 simulazioni e valori medi $\pm \sigma$).



FASE 3: ANALISI DI SENSITIVITA' DEL MODELLO NUMERICO

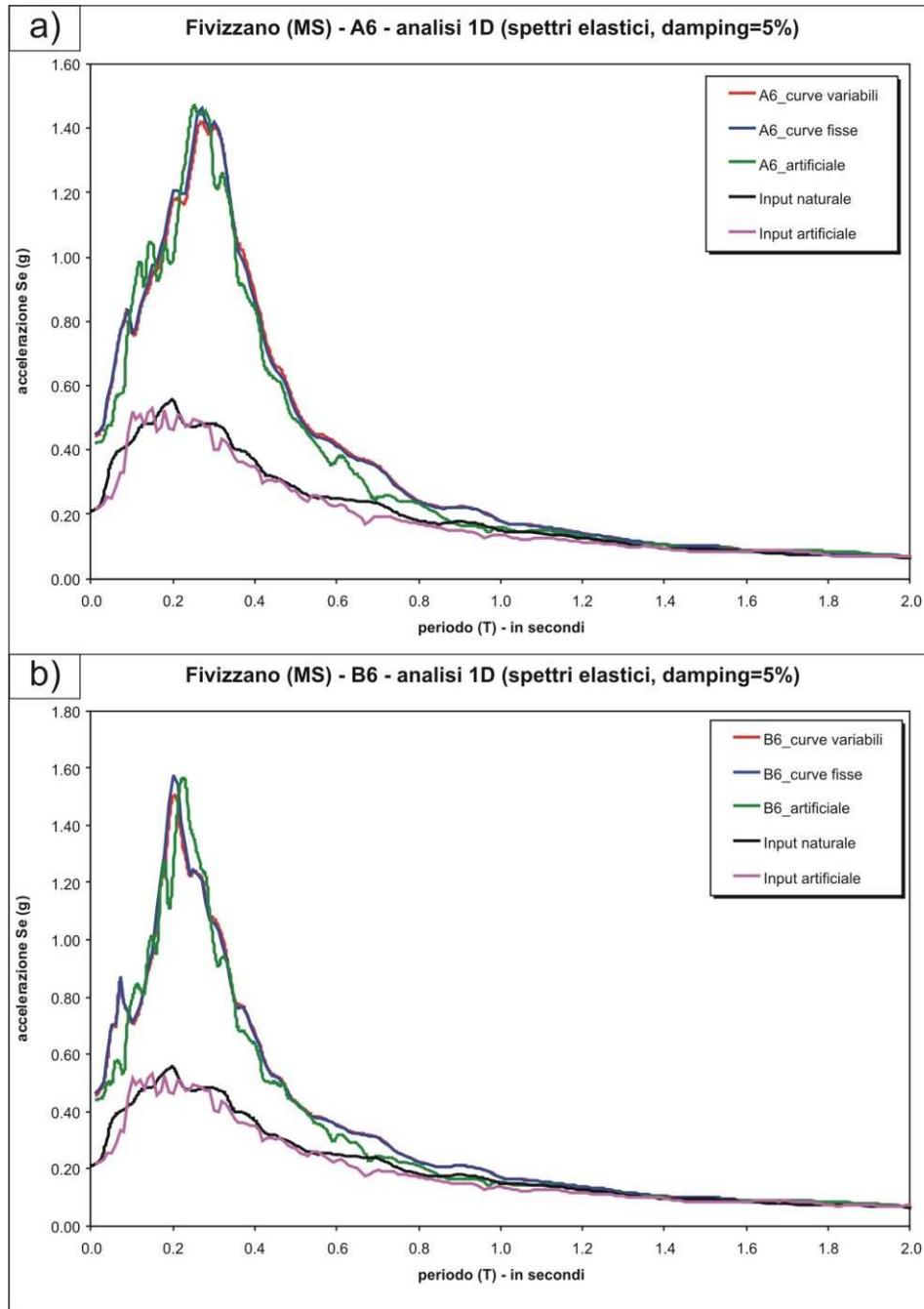


Nel caso in esame, sono state fatte variare le curve dinamiche associate alle coperture (principalmente alluvioni e depositi di riporto) imponendo, rispetto ai valori medi utilizzati per le analisi 2D, assegnati limiti inferiore e superiore di variazione.

In particolare la distribuzione statistica delle curve segue il modello di Darendeli (2001), implementato in Strata. A basse deformazioni la distribuzione normale è troncata per evitare valori fisicamente non possibili

Poiché i risultati delle analisi eseguite con curve variabili hanno prodotto storie temporali e spettri di risposta simili in valore medio rispetto a quelli ottenuti con le analisi con curve fisse, si è proceduto mantenendo fisso il valore delle curve G/G_0 e D nelle analisi numeriche utilizzate per la microzonazione.

FASE 3: ANALISI DI SENSITIVITA' DEL MODELLO NUMERICO



Si è proceduto al confronto tra gli spettri di risposta delle modellazioni numeriche (effettuate mediante l'imposizione di un input sismico costituito da accelerogrammi naturali con omologhe analisi condotte utilizzando un accelerogramma artificiale come input sismico.

Da questo confronto, mostrato sinteticamente in figura, è possibile affermare come nell'area di Fivizzano, sulla base delle analisi effettuate, l'utilizzo dell'input naturale e di quello artificiale portino a risultati del tutto simili, almeno in termini di spettri di risposta elastici

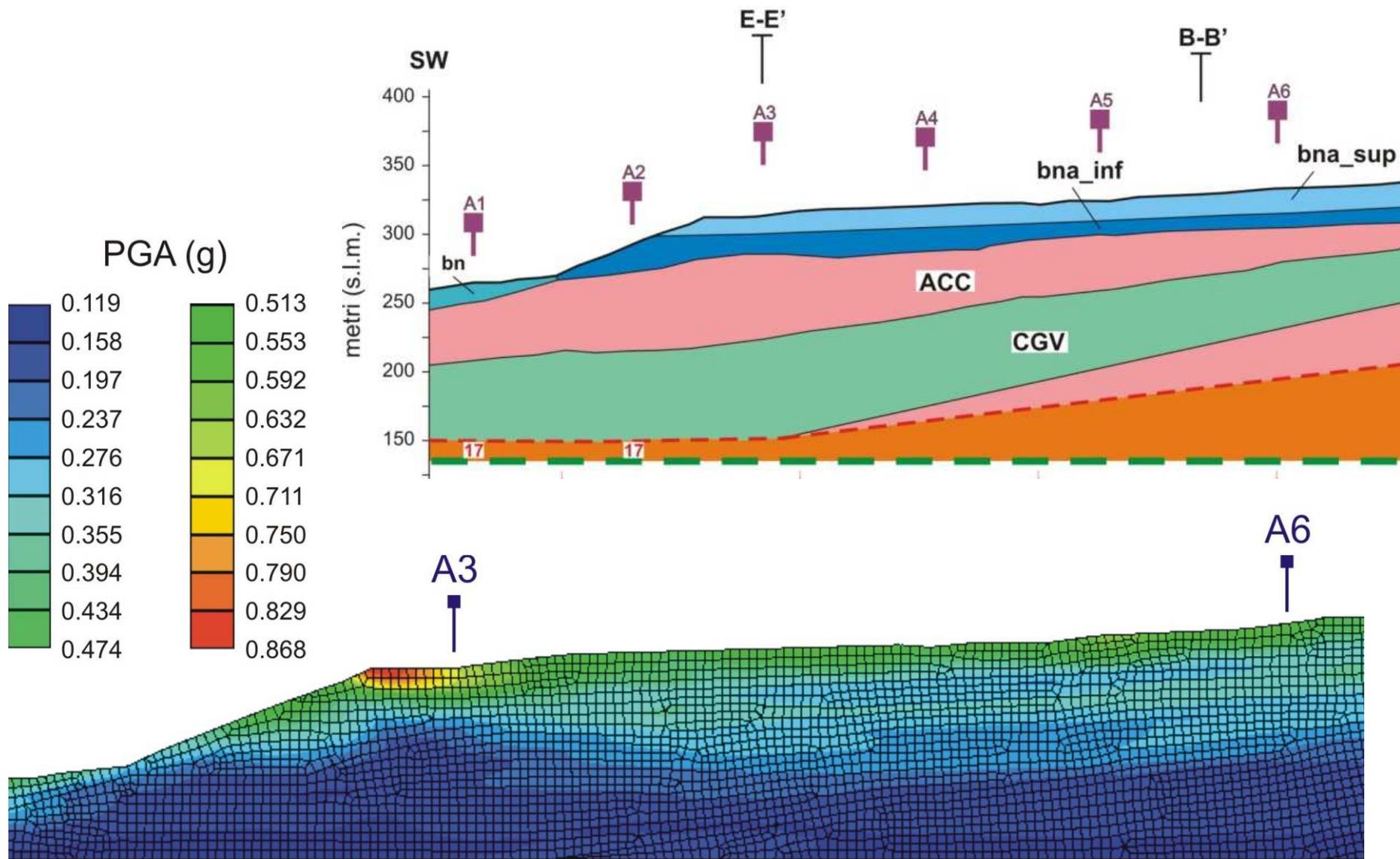
FASE 4: CODICI DI CALCOLO E PARAMETRI DI OUTPUT UTILI PER LA COSTRUZIONE DELLE CARTE DI MS DI LIVELLO 3'

In ogni problema di propagazione di onde sismiche, parte dell'energia si allontana indefinitamente dalla regione di interesse verso il semispazio circostante per fenomeni di rifrazione e riflessione dando luogo ad una "perdita" di energia indicata come **smorzamento di radiazione**. I confini della zona discretizzata (mesh) devono quindi modellare il più accuratamente possibile questa aliquota di energia persa per radiazione.

In QUAD4M alla base del modello sono presenti smorzatori viscosi (assenti nella versione precedente QUAD-4), implementati secondo la formulazione di Lysmer e Kuhlemeyer (1969). Essi consentono un pressoché completo assorbimento delle onde di volume che incidono sul contorno con angoli maggiori di 30° mentre sono meno efficienti (assorbimento non completo) per angoli di incidenza più bassi e per le onde di superficie.

Ai lati del modello è invece possibile imporre unicamente contorni di tipo cinematico (cerniere e carrelli). Poiché l'energia che giunge a questi confini viene completamente riflessa la perdita per radiazione può essere simulata solo **tramite un adeguato allontanamento dei confini dalla regione**.

FASE 4: CODICI DI CALCOLO E PARAMETRI DI OUTPUT UTILI PER LA COSTRUZIONE DELLE CARTE DI MS DI LIVELLO 3'



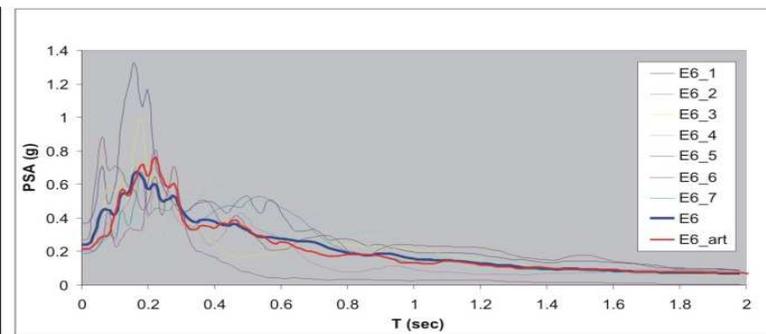
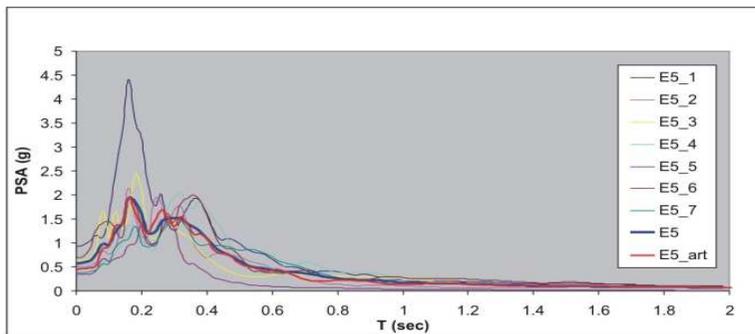
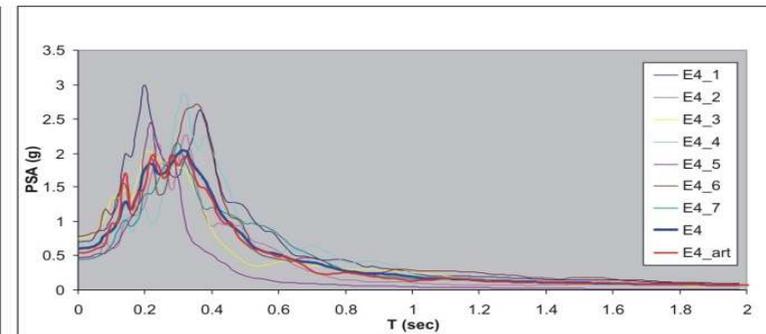
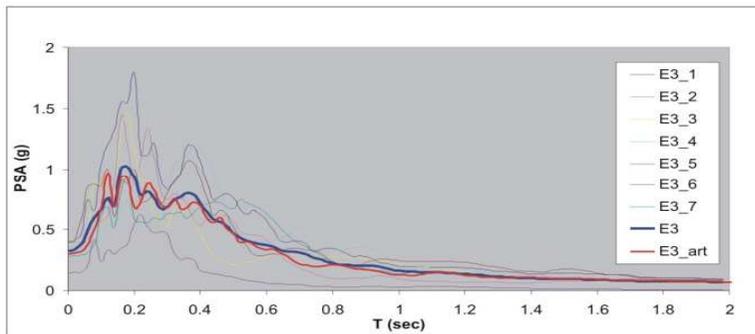
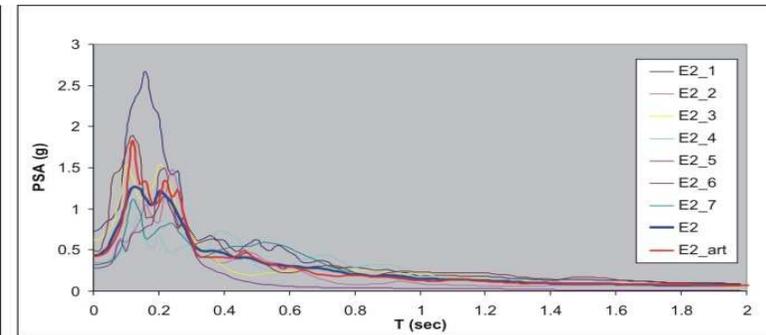
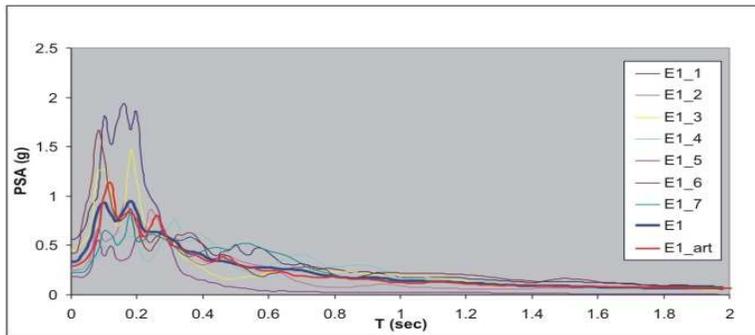
FASE 4: CODICI DI CALCOLO E PARAMETRI DI OUTPUT UTILI PER LA COSTRUZIONE DELLE CARTE DI MS DI LIVELLO 3'

I parametri che sono stati utilizzati e calcolati a partire dagli spettri di risposta derivati dalle simulazioni numeriche 1D e 2D hanno le seguenti espressioni:

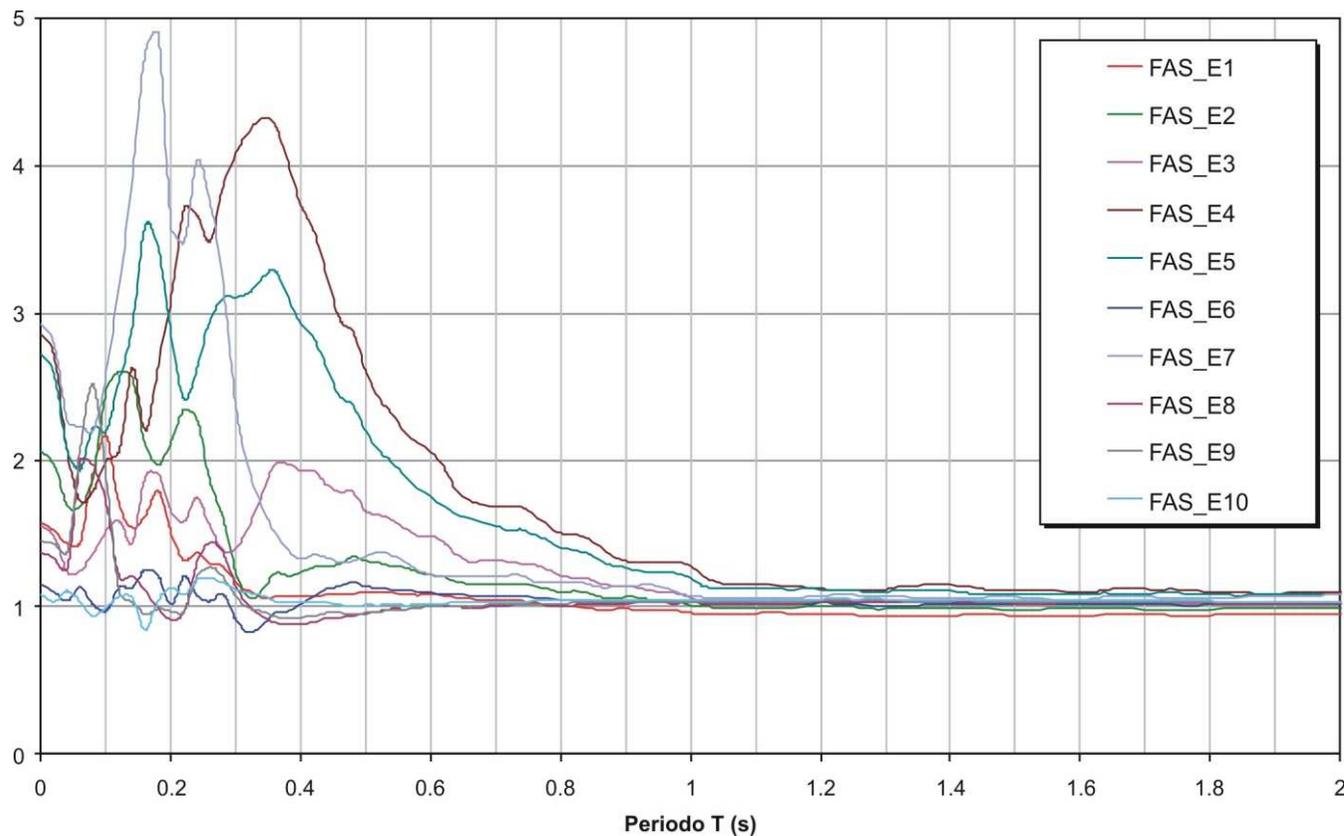
$$\begin{aligned}
 FH_{(0,1 \div 0,5)} &= \frac{\int_{0,1}^{0,5} PSV_{out}(T) dT}{\int_{0,1}^{0,5} PSV_{in}(T) dT} & FH_{(1,0 \div 2,0)} &= \frac{\int_{1,0}^{2,0} PSV_{out}(T) dT}{\int_{1,0}^{2,0} PSV_{in}(T) dT} & FH_{(0,1 \div 2,5)} &= \frac{\int_{0,1}^{2,5} PSV_{out}(T) dT}{\int_{0,1}^{2,5} PSV_{in}(T) dT} \\
 FHa_{(0,5 \div 1,0)} &= \frac{\int_{0,5}^{1,0} PSA_{out}(T) dT}{\int_{0,5}^{1,0} PSA_{in}(T) dT} & FHa_{(0,1 \div 0,5)} &= \frac{\int_{0,1}^{0,5} PSA_{out}(T) dT}{\int_{0,1}^{0,5} PSA_{in}(T) dT} & FHa_{(0,5 \div 1,0)} &= \frac{\int_{0,5}^{1,0} PSA_{out}(T) dT}{\int_{0,1}^{0,5} PSA_{in}(T) dT}
 \end{aligned}$$

FH è il valore del fattore di amplificazione calcolato come intensità di Housner (Housner, 1959) per quattro differenti intervalli di integrazione (0.1-0.5s, 0.5-1.0s, 1.0-2.0s e 0.1-2.5s); FHa è un fattore simile a quello proposto da Housner ma calcolato sullo spettro di pseudo-accelerazione (PSA) anziché sullo spettro di pseudo-velocità.

FASE 4: RISULTATI 1D E 2D



Spettri di risposta elastici relativi a 6 punti di output rappresentativi per la sezione E-E'. Per ognuno dei punti di output sono rappresentati i 7 singoli spettri elastici di output ed il relativo spettro medio (curva blu). E' proposto in figura anche il confronto con l'output, per il medesimo punto, ottenuto mediante l'utilizzo dell'input sismico sintetico.



Funzioni di amplificazione spettrale (FAS) relativi a 10 punti di output rappresentativi per la sezione E-E'

FASE 4: CODICI DI CALCOLO E PARAMETRI DI OUTPUT UTILI PER LA COSTRUZIONE DELLE CARTE DI MS DI LIVELLO 3'

I FA ed FV sono i fattori proposti dagli ICMS 2008:

FA, a basso periodo (determinato intorno al periodo proprio per il quale si ha il massimo della risposta in accelerazione);

FV, a periodo proprio (per il quale si ha la massima risposta in pseudovelocità).

La procedura per il calcolo dei precedenti fattori è di seguito illustrata:

- 1) Si determina il periodo di massimo valore dello spettro di input (TA_i) e di quello di output (TA_o);
- 2) Si calcolano il valori medi degli spettri di input ($SA_{m,i}$) e di output ($SA_{m,o}$) nell'intorno di Ta_i e Ta_o :

$$SA_m = \frac{1}{TA} \cdot \int_{0.5TA}^{1.5TA} SA(T) dT$$

dove:

SA_m è il valore medio dello spettro e può essere $SA_{m,i}$ o $SA_{m,o}$;

$SA(T)$ è lo spettro di risposta elastico in accelerazione pari a SA_i per l'input, SA_o per l'output;

TA vale TA_i per l'input TA_o per l'output

Gli FA ed FV (calcolati solo per i nodi relativi alle sezioni A-A' e C-C').

FASE 4: CODICI DI CALCOLO E PARAMETRI DI OUTPUT UTILI PER LA COSTRUZIONE DELLE CARTE DI MS DI LIVELLO 3'

4) Si determinano i periodi (TV_i) e (TV_o) di massimo valore degli spettri di pseudovelocità così definiti:

$$SV(T) = SA(T) * \frac{T}{2\pi}$$

$SV(T)$ corrisponde rispettivamente a $SV_i(T)$ per l'input e $SV_o(T)$ per l'output.

5) Si calcolano i valori medi degli spettri ($SV_{m,i}$) e ($SV_{m,o}$) nell'intorno di TV_i e TV_o

$$SV_m = \frac{1}{0.4 * TV} \int_{0.8TV}^{1.2TV} SV(T) dT$$

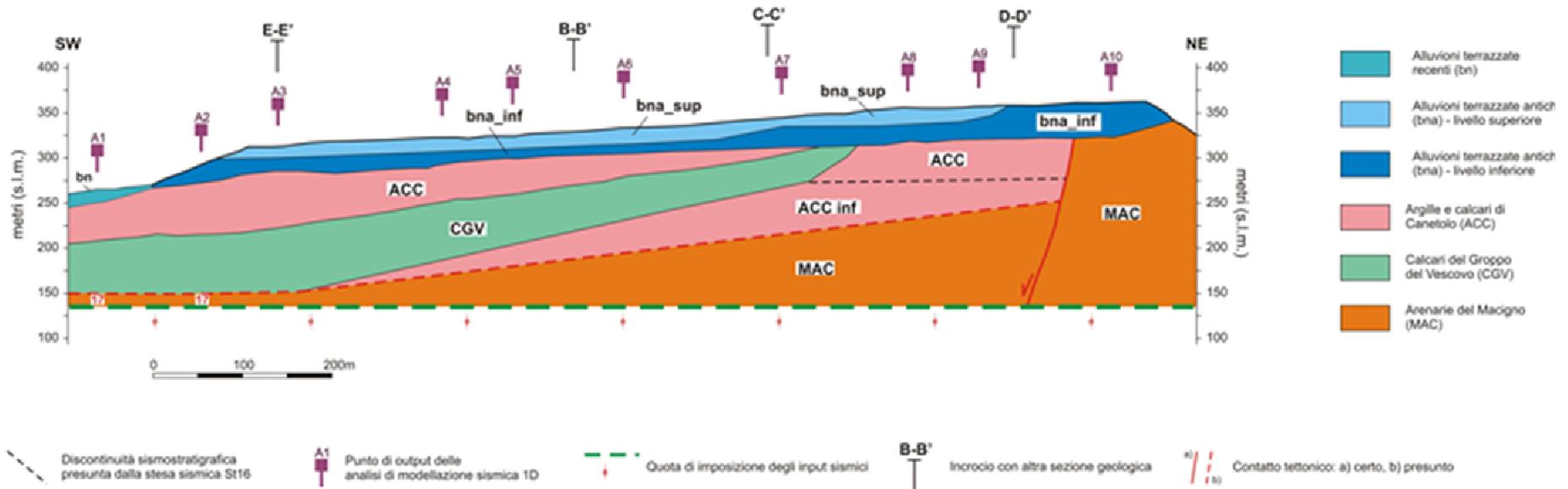
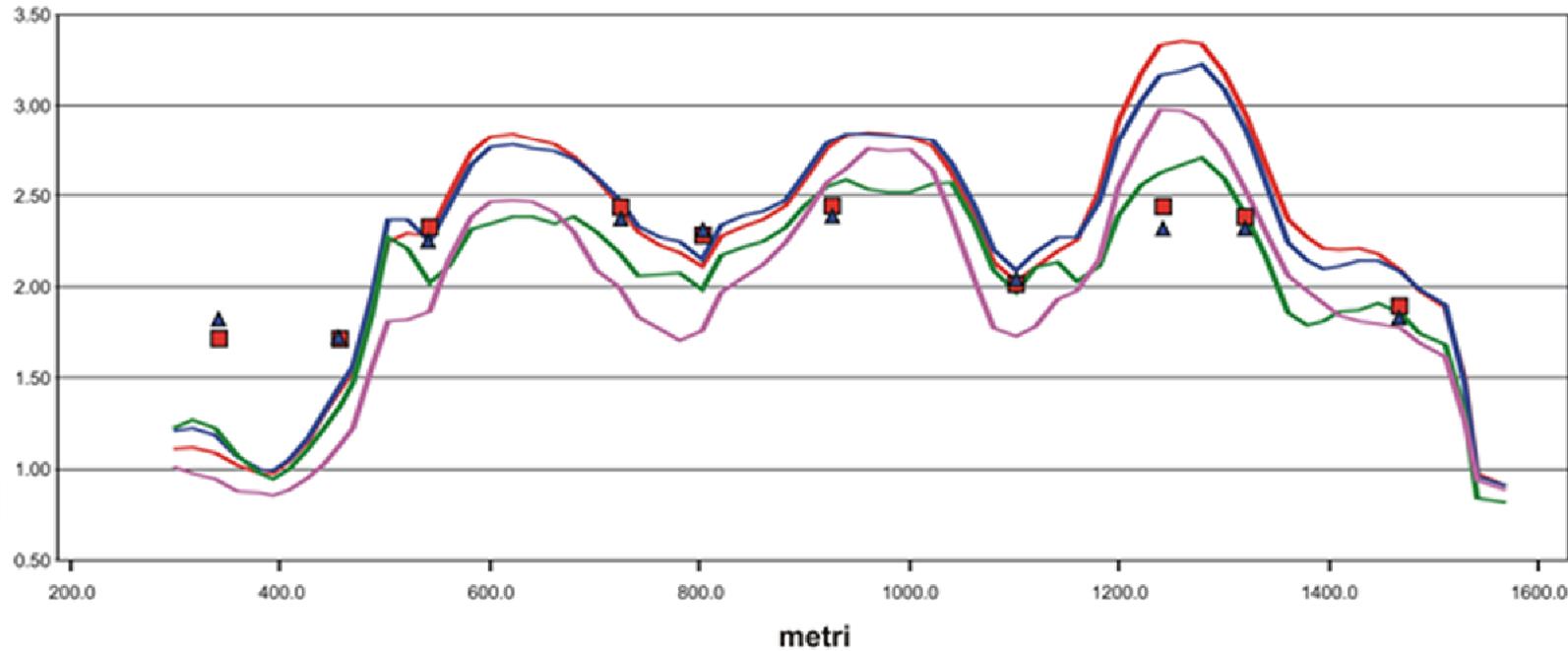
SV_m è il valore medio dello spettro e può essere $SV_{m,i}$ o $SV_{m,o}$;
 TV può essere TV_i e TV_o rispettivamente per l'input e l'output. L'intervallo di integrazione è ridotto rispetto a quello dell'accelerazione perché lo spettro di velocità ha, generalmente, un andamento più regolare.

Il valore di FA è pari al rapporto $SA_{m,o} / SA_{m,i}$

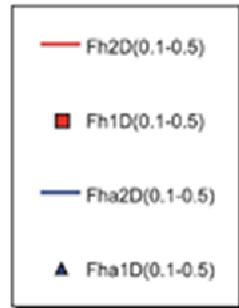
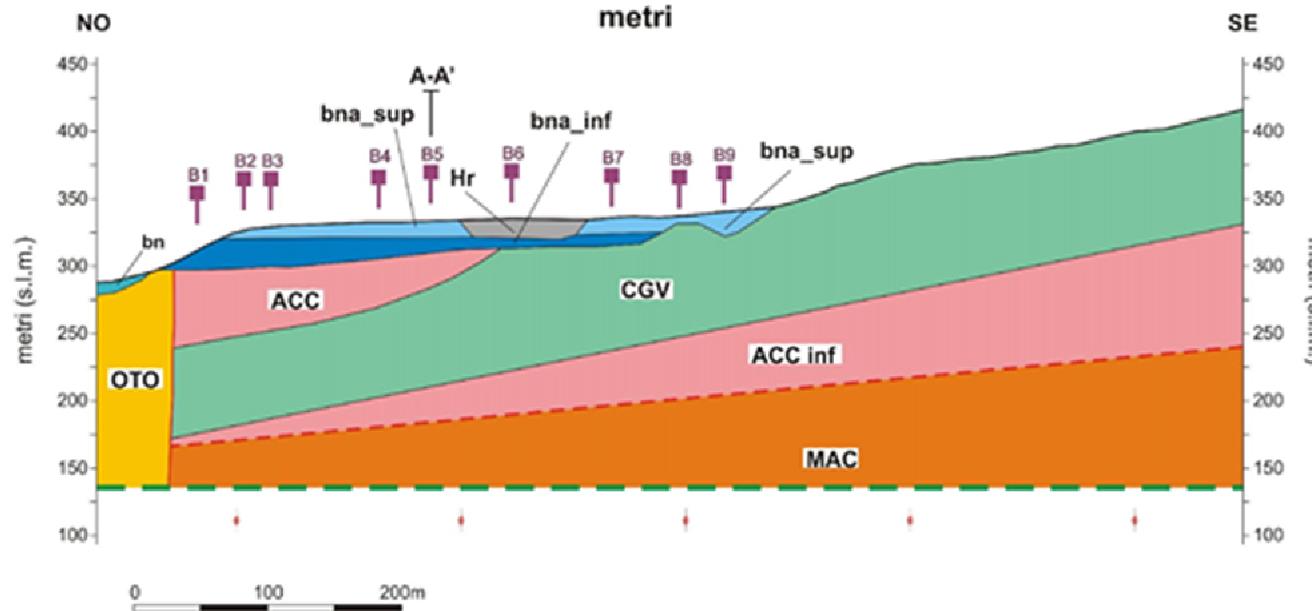
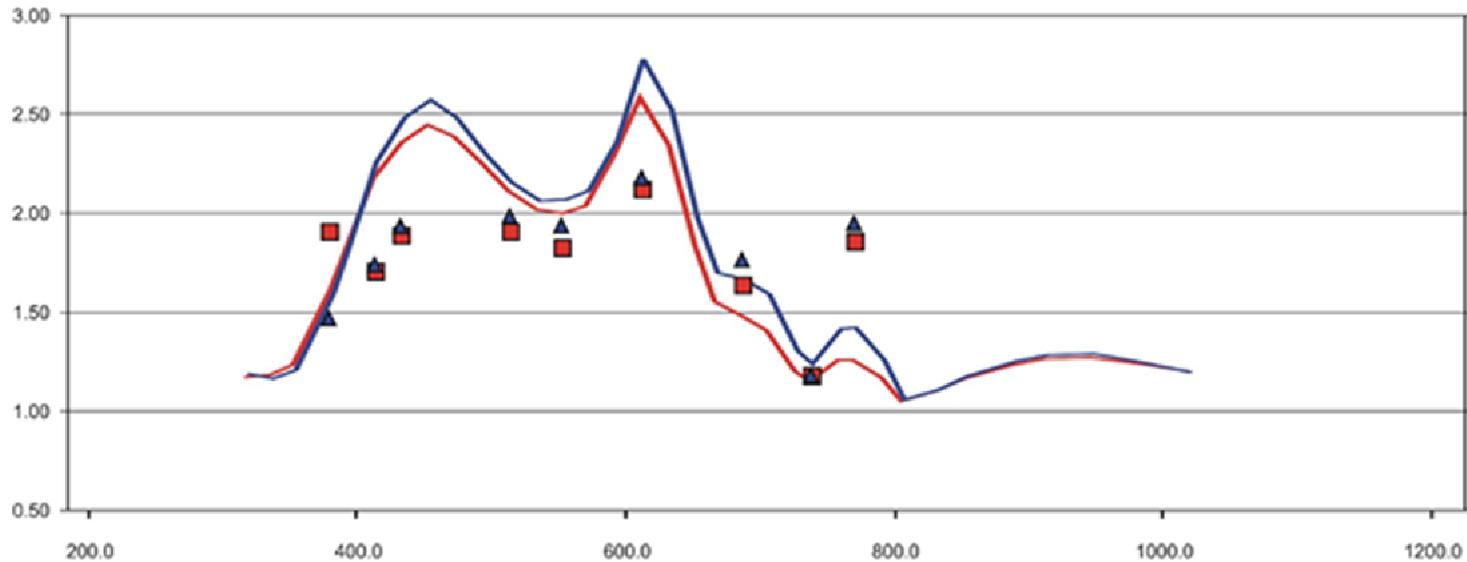
Il valore di FV è pari al rapporto $SV_{m,o} / SV_{m,i}$

Gli FA ed FV sono stati calcolati solo per i nodi relativi alle sezioni A-A' e C-C'. Occorre infine ricordare che i fattori FA e FV, per come sono definiti, non sono associabili ad un intervallo di periodi prefissato come accade per quelli definiti in termini di intensità di Housner.

FASE 4: SINTESI DEI RISULTATI 1D E 2D NELLA SEZIONE AA'

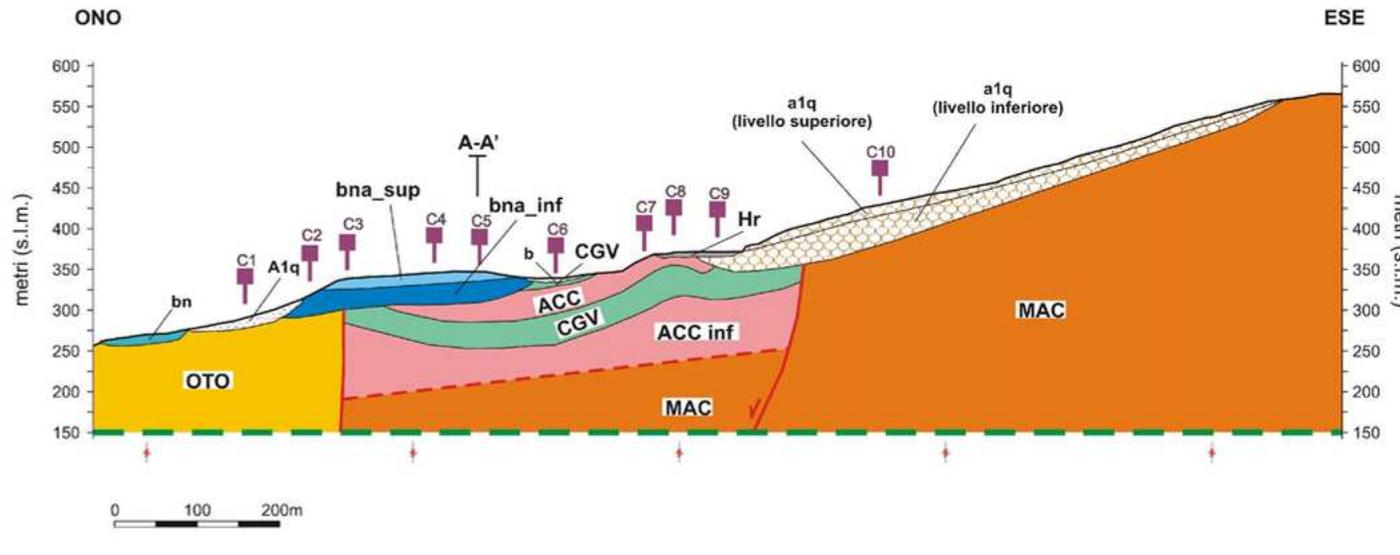
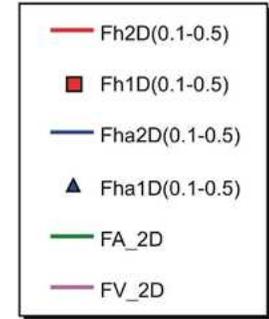
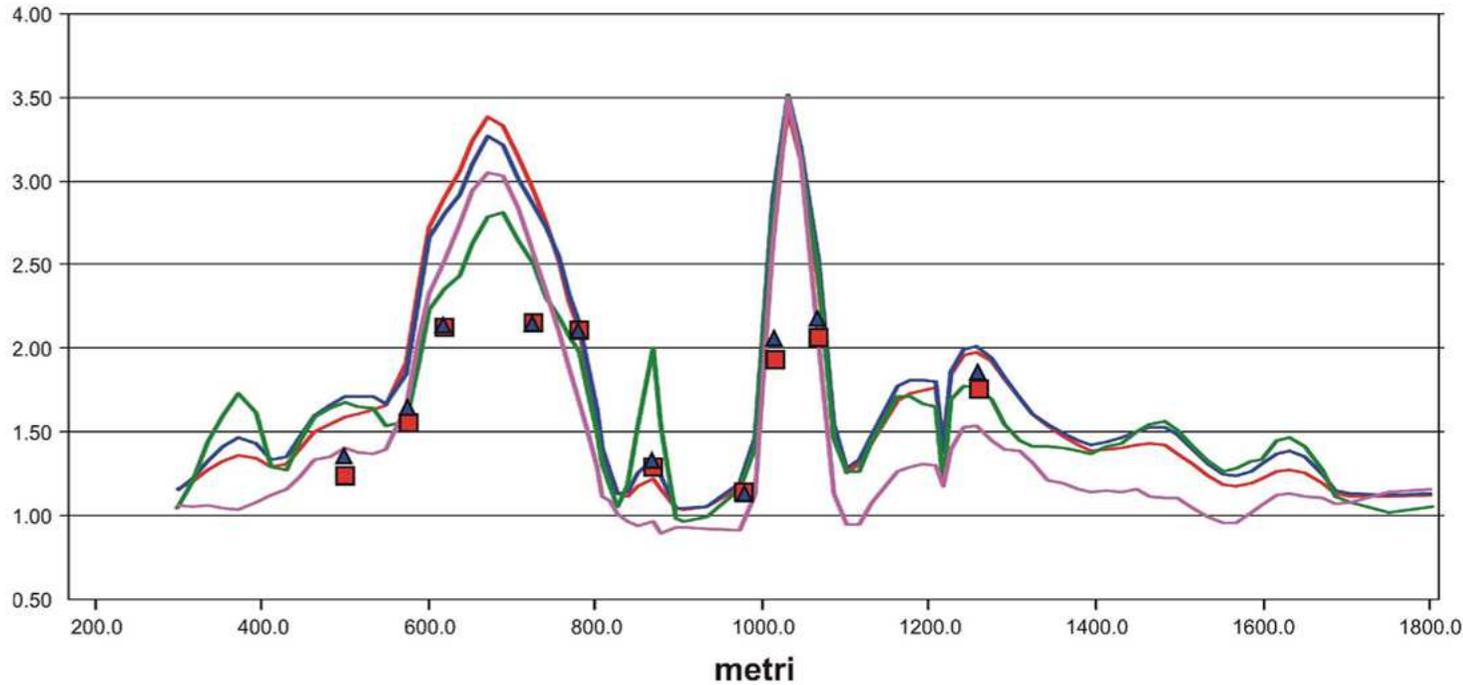


FASE 4: SINTESI DEI RISULTATI 1D E 2D NELLA SEZIONE BB'



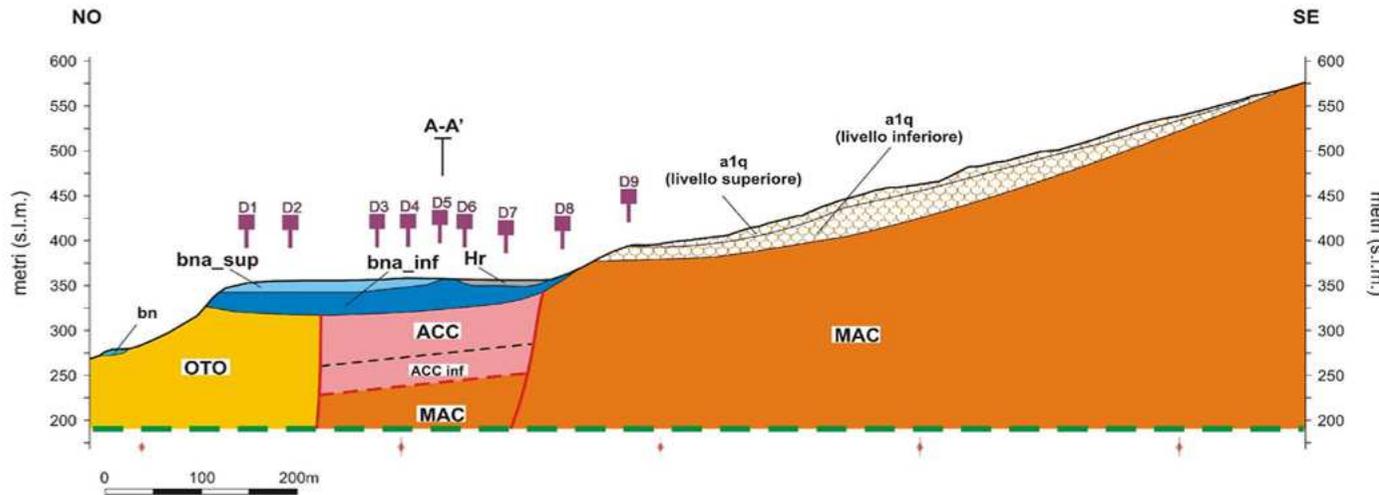
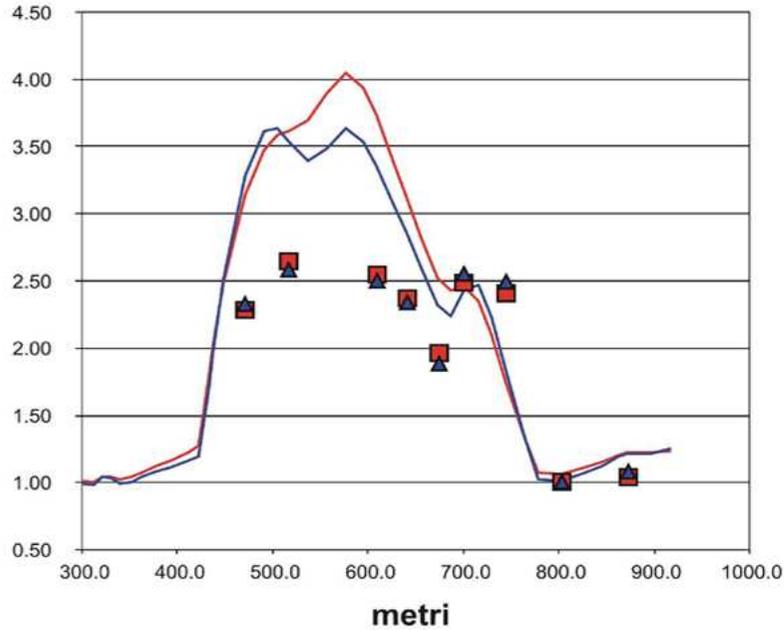
■ Punto di output delle analisi di modellazione sismica 1D
 - - - Quota di imposizione degli input sismici
 ↑ A-A' Incrocio con altra sezione geologica
 // Contatto tettonico: a) certo, b) presunto

FASE 4: SINTESI DEI RISULTATI 1D E 2D NELLA SEZIONE CC'



■ C1 Punto di output delle analisi di modellazione sismica 1D
 - - - Quota di imposizione degli input sismici
 | A-A' Incrocio con altra sezione geologica
 ||| a) / b) Contatto tettonico: a) certo, b) presunto

FASE 4: SINTESI DEI RISULTATI 1D E 2D NELLA SEZIONE DD'



- Depositi di riporto (Hr)
- Corpo di frana quiescente (a1q)
- Alluvioni terrazzate recenti (bn)
- Alluvioni terrazzate antiche (bna) - livello superiore
- Alluvioni terrazzate antiche (bna) - livello inferiore
- Argille e calcari di Canetolo (ACC)
- Arenarie del Macigno (MAC)
- Flysch di Ottone (OTO)

Discontinuità sismostratigrafica presunta dalla stessa sismica S116

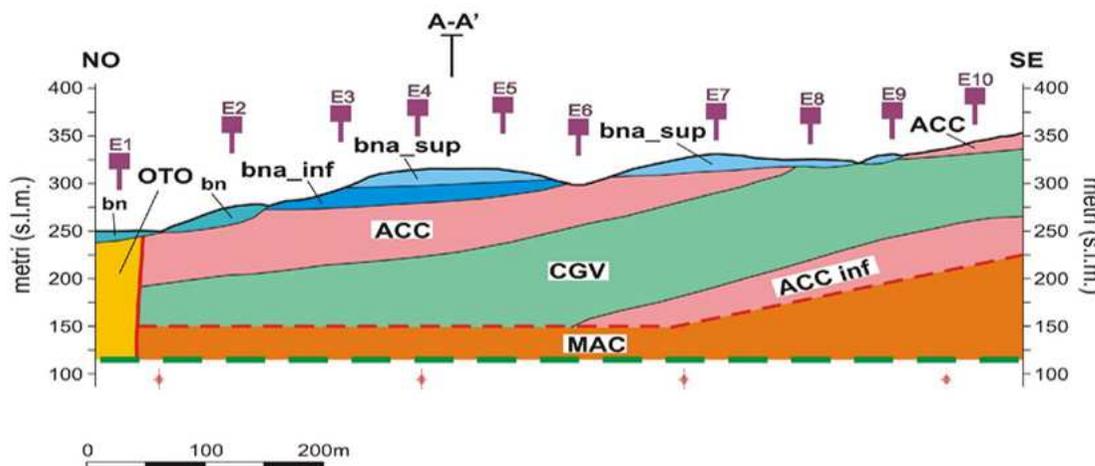
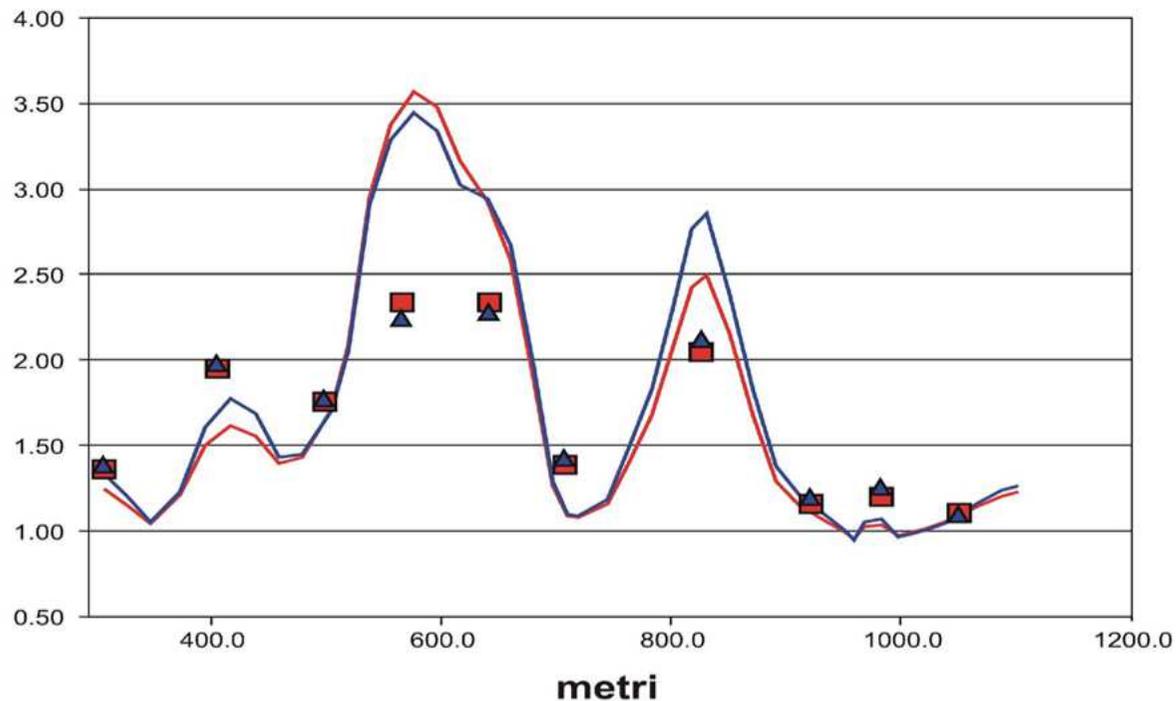
Punto di output delle analisi di modellazione sismica 1D

Quota di imposizione degli input sismici

Incrocio con altra sezione geologica

Contatto tettonico: a) certo, b) presunto

FASE 4: SINTESI DEI RISULTATI 1D E 2D NELLA SEZIONE EE'



- Fh2D(0.1-0.5)
- Fh1D(0.1-0.5)
- Fha2D(0.1-0.5)
- Fha1D(0.1-0.5)
- Alluvioni terrazzate recenti (bn)
- Alluvioni terrazzate antiche (bna) - livello superiore
- Alluvioni terrazzate antiche (bna) - livello inferiore
- Flysch di Ottone (OTO)
- Argille e calcari di Canetolo (ACC)
- Arenarie del Macigno (MAC)
- Calcari del Gruppo del Vescovo (CGV)

D1 Punto di output delle analisi di modellazione sismica 1D

Quota di imposizione degli input sismici

A-A' Incrocio con altra sezione geologica

a) / b) Contatto tettonico: a) certo, b) presunto

CONCLUSIONI

Dall'osservazione dell'andamento dei fattori illustrati è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- 1) L'amplificazione locale nell'area fivizzanese si dimostra da elevata a molto elevata ad esclusione delle aree (di estensione limitata) in cui il substrato sismico è affiorante o dove le coperture sismiche di natura alluvionale o detritica sono esigue;
- 2) I periodi amplificati sono tutti al di sotto di 0.8s pertanto i fattori di Amplificazione di Housner significativi sono quelli calcolati nell'intervallo 0.1-0.5s;
- 3) FH ed FH_a derivanti dalle analisi 2D mostrano un andamento simile con massimi di amplificazione posti in corrispondenza del terrazzo costituito da depositi alluvionali antichi (bna) e dei depositi di riporto su cui è ubicata l'area ospedaliera (in corrispondenza dei punti C8 e C9), dove i fattori di amplificazione eccedono il valore di 2.5 con picchi fino a 3.5;
- 4) L'andamento dei fattori FA ed FV si mostra in buon accordo con i fattori precedentemente indicati anche se sottostimano l'amplificazione;
- 6) Le analisi 1D forniscono fattori di amplificazione inferiori a quelli delle analisi 2D pur cogliendo la variazione dell'amplificazione lungo la sezione e quindi la differenziazione quantitativa tra le varie zone. Le maggiori sottostime si hanno dove i fenomeni di amplificazione 2D legati alla morfologia superficiale e sepolta sono particolarmente pronunciati (si vedano ad esempio le progressive 700 m e 1000 m per la sezione C-C' oppure l'andamento attorno alla progressiva 600m per la sezione E-E').

Lezioni apprese dalla MS di terzo livello a Fivizzano:

- 1) Il parametro di normativa V_{S30} non è rappresentativo delle caratteristiche sismiche del sottosuolo
- 2) Le analisi 1D non forniscono le condizioni di amplificazioni più cautelative...e a volte non riescono ad essere predittive
- 3) Le indagini per le MS di livello 3 è bene che siano differenziate ma ridondanti in punti rappresentativi del sottosuolo nonché spinte ben oltre i «30 m»

Questioni aperte:

- 1) Uso di input naturali registrati presso stazioni sismiche non poste su roccia o peggio di cui non si conosce la classificazione sismica dei depositi su cui è stata installata
- 2) Uso di accelerogrammi artificiali
- 3) Necessità di installare array sismici in foro e superficie iniziare a misurare le vere accelerazioni massime registrate sia al bedrock che in superficie per poter verificare la veridicità delle RSL da utilizzare nelle MS di livello 3

GRAZIE DELL'ATTENZIONE!

