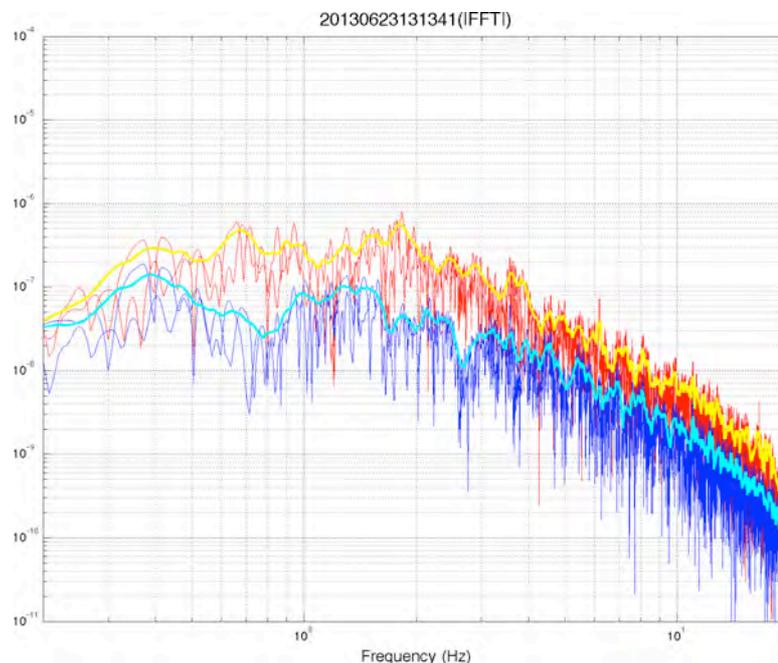




Studio sismologico per la caratterizzazione della risposta sismica di sito ai fini della microzonazione sismica di alcuni comuni della Regione Emilia Romagna

Relazione sull'attività svolta



Responsabile scientifico del progetto: *Giovanna Laurenzano*

Autori: *Giovanna Laurenzano ed Enrico Priolo*

con la collaborazione di: *Carla Barnaba, Maria Rosaria Gallipoli¹, Peter Klin, Marco Mucciarelli e Marco Romanelli*

¹IMAA-CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale)

Visto e approvato,
il Direttore della Sezione Scientifica CRS:

Prof. Marco Mucciarelli

Studio sismologico per la caratterizzazione della risposta sismica di sito ai fini della microzonazione sismica di alcuni comuni della Regione Emilia Romagna

Relazione sull'attività svolta

OGS (Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale) –
Sezione Scientifica Centro di Ricerche Sismologiche (CRS)

con la collaborazione del

¹IMAA-CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Metodologie per
l'Analisi Ambientale)

Responsabile scientifico del progetto: *Giovanna Laurenzano*

Autori: *Giovanna Laurenzano ed Enrico Priolo*

con la collaborazione di: *Carla Barnaba, Maria Rosaria Gallipoli¹, Peter Klin,
Marco Mucciarelli e Marco Romanelli*

Visto e approvato:

il Direttore della Sezione Scientifica CRS
Prof. *Marco Mucciarelli*

Indice

SOMMARIO	1
1. Introduzione	3
2. Stazioni sismologiche e analisi di rumore sismico ambientale	6
2.1 Siti misurati	6
2.2 Rapporti spettrali H/V da misure di rumore sismico	8
3. Modellazioni numeriche	11
3.1 Definizione dei modelli	12
3.2 Validazione del modello crostale per l'Emilia	14
3.3 Validazione dei modelli di sito di Mirandola e Casaglia	21
3.4 Risultati delle modellazioni	29
4. Calcolo della risposta sismica spettrale da registrazioni di terremoti	35
4.1 Analisi e confronto tra rapporti spettrali superficie/bedrock calcolati per il sito di Casaglia	36
4.2 Funzioni di trasferimento per la conversione delle registrazioni a registrazioni su sito di trasferimento	39
4.3 Calcolo dei rapporti spettrali con il Generalized Inversion Method (GIT)	44
5. Spettri di risposta di sito e amplificazioni spettrali di risposta	47
6. Conclusioni	55
Appendice A	57
Appendice B	63
Appendice C	69
Bibliografia	75

Sommario

In questo documento sono presentati i risultati ottenuti nell'ambito dello studio geofisico-sismologico per la caratterizzazione della risposta sismica di sito di alcune località della Regione Emilia Romagna colpite dalla sequenza sismica del maggio 2012, per finalità di microzonazione sismica. La risposta sismica di sito è stata stimata attraverso l'integrazione di modelli teorici risolti numericamente e di dati sperimentali di terremoti registrati da un insieme di stazioni sismiche.

Sono stati costruiti modelli numerici rappresentativi dei siti di Mirandola (MO) e Casaglia (FE), nonché un modello di un sito virtuale di riferimento in classe A rappresentativo per l'area emiliana. I modelli numerici sono stati preventivamente sottoposti ad una rigorosa procedura di validazione. Con le modellazioni numeriche è stata calcolata l'amplificazione spettrale per i due siti e le funzioni di trasferimento tra ricevitori in profondità e in superficie (funzioni interferometriche) e ricevitori in superficie tra i siti studiati e il sito virtuale in classe A.

Per calcolare la risposta di sito sono state poi usate registrazioni di terremoti. I dati, per questa parte, provengono dalle registrazioni di un insieme di strumenti installati sul territorio dall'OGS e dal CNR. Un elemento di particolare interesse è costituito dalla coppia di stazioni esistenti a Casaglia rispettivamente in profondità e in superficie. Attraverso le registrazioni selezionate per queste stazioni è stata costruita la funzione interferometrica sperimentale per il sensore in profondità. Il confronto tra le funzioni interferometriche sperimentale e sintetica mostra che il modello costruito per Casaglia può essere ancora migliorato e che questa operazione è necessaria anche per poter usare correttamente le risposte stimate per via sperimentale.

Una volta definite le funzioni di trasferimento che permettono di convertire le registrazioni in pozzo in registrazioni in superficie su suolo in classe A, sono state calcolate le risposte di sito dalle registrazioni di terremoti con il metodo GIT, gli spettri di risposta specifici di sito e le curve di amplificazione spettrale di risposta, elementi questi ultimi di diretto utilizzo per la microzonazione sismica.

La peculiarità di questo studio sta nel fatto che esso combina l'utilizzo di dati sperimentali con modelli numerici, non solo per estendere e generalizzare il più

possibile la portata dei risultati, ma anche per operare un controllo incrociato tra dati sperimentali e speculazioni teoriche in alcuni passaggi chiave. Tuttavia questo studio ha anche alcune limitazioni, la principale delle quali sta nel fatto che sia i modelli numerici adottati sia il metodo GIT operano in campo lineare e per moti deboli del suolo.

1. Introduzione

In questo documento sono presentati i risultati ottenuti nell'ambito dello studio geofisico-sismologico per la caratterizzazione della risposta sismica di sito di alcune località della Regione Emilia Romagna colpite dalla sequenza sismica del maggio 2012, per finalità di microzonazione sismica. La risposta sismica di sito è stata stimata attraverso l'integrazione di modelli teorici risolti numericamente e di dati sperimentali di terremoti registrati da un insieme di stazioni sismiche.

Una delle maggiori difficoltà da superare con l'approccio sperimentale è quello della mancanza di siti di riferimento su roccia (classe A). Infatti, non solo per l'area di pianura ma anche per quella collinare appenninica non sono reperibili siti sufficientemente vicini alle stazioni di registrazione (ovvero, a distanza non superiore a poche decine di km) che possano fungere da riferimento con registrazioni rappresentative dell'input sismico su roccia. Questo è uno dei motivi per cui si è reso necessario l'uso di modelli numerici, i quali sono stati utilizzati non solo per calcolare i sismogrammi sintetici relativi a una serie di eventi, presso i siti investigati, ma anche per calcolare i sismogrammi per i medesimi eventi presso un "sito di riferimento virtuale" che rappresentasse al meglio le caratteristiche dei siti rocciosi della catena appenninica emiliana.

L'approccio numerico adottato per le modellazioni si basa sul metodo d'integrazione dei numeri d'onda (*Wavenumber Integration Method*, Herrmann (1996a, 1996b)). Esso risolve l'equazione completa delle onde sismiche con attenuazione in un mezzo 3D stratificato orizzontalmente. Il metodo non tiene conto di eventuali fenomeni di dissipazione anelastica (non-linearità), quindi 1) per eventi forti l'amplificazione calcolata rappresenta una stima conservativa in ampiezza rispetto a quella reale e 2) le frequenze di risonanza reali possono risultare leggermente inferiori rispetto a quelle calcolate. Il metodo, tuttavia, offre alcuni notevoli vantaggi quali la generazione di sismogrammi che partono dalla sorgente e includono tutto il percorso attraversato dal campo d'onda e tutte le sue fasi (ad esempio le onde P e le onde di superficie) in tutta la banda di frequenze eccitata dalla sorgente. Inoltre possono essere calcolate le risposte

sia in superficie che in profondità, aspetto questo che, come si vedrà, risulta centrale in questo studio.

Sono stati costruiti i modelli numerici presso due siti, rispettivamente Casaglia (FE) e Mirandola (MO), presso i quali sono disponibili delle registrazioni di terremoti. Per il sito di Mirandola sono stati modellati alcuni eventi della sequenza emiliana del 2012 registrati da una stazione accelerometrica installata dal CNR. Per questi eventi è stato fatto uno studio preliminare teso a validare l'intera procedura di modellazione, sia per quanto riguarda il modello strutturale sia per quanto riguarda tutta la parametrizzazione numerica.

Per entrambi i siti sono stati costruiti modelli 1D che rappresentano al meglio le conoscenze più aggiornate sulla geologia locale. In questa fase è stato fondamentale il contributo fornito dal Servizio Geologico della Regione Emilia Romagna che ha fornito gran parte delle informazioni. Inoltre, è stato costruito un modello rappresentativo di un sito di riferimento virtuale caratterizzato da suolo in Classe A (roccia) tipico dell'area appenninica, caratterizzato da una bassa velocità delle onde S in prossimità della superficie.

Attraverso le modellazioni è stato costruito un insieme di sismogrammi sintetici con i quali sono stati valutati, attraverso la tecnica dei rapporti spettrali, sia le amplificazioni dei siti sia le funzioni di trasferimento medie tra ricevitori in profondità e superficie (funzioni interferometriche) e tra modelli rappresentativi di suolo e roccia. Alcune di queste funzioni di trasferimento teoriche sono state utilizzate, successivamente, per integrare nelle parti mancanti le risposte calcolate su base sperimentale.

Per quanto riguarda la parte sperimentale, sono stati utilizzati i dati registrati dalle seguenti stazioni:

- 9 stazioni della una rete temporanea realizzata dall'OGS durante la sequenza sismica del 2012 e re-installate in parte (4 stazioni) nel mese di marzo 2013.
- sito di Mirandola (MO), una stazione accelerometrica temporanea installata dal CNR durante la sequenza sismica del 2012;
- sito di Casaglia (FE), sismometro *very broad-band* in pozzo a profondità di 135 m re-installato nel mese di marzo 2013 e una stazione temporanea in superficie (OG010) parte del gruppo di 4 stazioni re-installato a marzo 2013.

Il dataset di registrazioni selezionato comprende una serie di eventi della sequenza emiliana del 2012 e una serie di eventi del 2013 tra cui le scosse principali della sequenza occorsa in Garfagnana a fine giugno 2013.

Con i dati sperimentali sono state eseguite due operazioni. Per prima cosa, con le registrazioni delle due stazioni di Casaglia (pozzo e superficie) sono stati calcolati i rapporti spettrali (funzioni interferometriche), e questi sono stati confrontati con quelli

calcolati attraverso i modelli. Poi, le funzioni di trasferimento calcolate attraverso i modelli sono state usate per riferire le registrazioni al sito di riferimento virtuale rappresentativo di roccia (suolo classe A).

Successivamente, utilizzando le registrazioni disponibili presso tutte le stazioni sono state calcolate le risposte spettrali specifiche di sito per i siti misurati. Il metodo usato, il *Generalized Inversion Method* (Andrews, 1986), ulteriormente sviluppato dagli autori del presente rapporto, è un'estensione del metodo dei rapporti spettrali rispetto al sito di riferimento che permette di gestire registrazioni asincrone. Una parte importante di studio è dedicata, ovviamente, a un confronto critico tra le risposte di sito calcolate per via teorico/numerica e quelle calcolate con i dati sperimentali.

L'ultima parte di studio riguarda l'elaborazione delle informazioni prodotte in prodotti direttamente utilizzabili per la microzonazione sismica. In accordo con gli *indirizzi e criteri per la microzonazione sismica* (Gruppo di Lavoro MS, 2008) è stata considerata un'azione sismica definita da 5 accelerogrammi rappresentativi e sono stati calcolati gli spettri di risposta specifici di sito e le curve di amplificazione di risposta spettrale. Queste quantità possono essere confrontate direttamente con gli spettri di normativa e forniscono un elemento quantitativo che può essere usato direttamente all'interno di un apparato normativo.

Questo rapporto scientifico rappresenta la descrizione dell'attività svolta e dei risultati ottenuti durante lo studio. Il presente rapporto è organizzato in sei capitoli. Nel **Capitolo 2** viene fornito uno sguardo d'insieme sulle strumentazioni installate e utilizzate per questo studio nonché su alcune informazioni di base dedotte dai dati, come ad esempio i rapporti spettrali H/V stimati da rumore sismico. Nel **Capitolo 3** si introducono i modelli sviluppati presso i siti, si descrivono le modellazioni numeriche effettuate e si riassumono i principali risultati. Il **Capitolo 4** descrive come viene calcolata la risposta di sito con l'uso congiunto di dati osservati e modellazioni numeriche. Nel **Capitolo 5** viene descritta la procedura di calcolo degli spettri di risposta e dei fattori di amplificazione. La descrizione completa di tutti i siti è fornita nelle **Appendici A, B, e C**.

2. Stazioni sismologiche e analisi di rumore sismico ambientale

2.1 Siti misurati

Come già accennato nell'Introduzione, il dataset di registrazioni sismometriche usate per il presente studio si riferisce a un insieme di stazioni piuttosto eterogeneo, che può essere così descritto:

1. primo gruppo di stazioni temporanee installate dall'OGS durante la sequenza sismica dell'Emilia del 2012 (9 stazioni, periodo 21/5-23/7/2012) e già descritte in Priolo et al. (2012);
2. secondo gruppo di stazioni temporanee re-installate dall'OGS specificatamente per questo studio nel 2013 (4 stazioni, installate il 7/2/2013 e tuttora operanti). Questo gruppo comprende la stazione OG010 installata presso il sito di Casaglia alla superficie del pozzo che ospita il sensore della stazione FERB (cfr. più avanti);
3. stazione accelerometrica installata temporaneamente dal CNR durante la sequenza sismica del 2012 presso il sito di Mirandola (MO), a circa 5 m dalla stazione della RAN, presso la cabina ENEL, per verificare il funzionamento della stazione permanente.
4. presso il sito di Casaglia (FE), la stazione permanente (FERB), co-gestita da OGS e INGV, che comprende un sismometro *very broad-band* posto in pozzo posto a profondità di 135 m, re-installato a fine dicembre 2012. Come detto, alla superficie del pozzo è stata installata in seguito la stazione temporanea OG010.
5. infine, nel mese di settembre 2012 sono state effettuate misure di rumore sismico all'interno del comprensorio industriale di Ferrara gestito da IFM (ex Petrolchimico).

La **Tabella 1** fornisce un quadro sintetico delle stazioni e della strumentazione installata, mentre la disposizione delle stazioni sul territorio è mostrata in **Figura 1**. Informazioni

più dettagliate riguardo al Gruppo 1 e parte del Gruppo 2 sono date in Priolo et al. (2012). Riguardo alla stazione permanente di Casaglia si rimanda a Pesaresi et al. (2012).

Gruppo 1 – Stazioni temporanee OGS Fase 1 (periodo 21/5-23/7/2013)

Codice	Sito	Unità di Acquisizione	Sensore	Noise	Eqk
OG001	Cona - Ospedale Nuovo	Nanometrics Orion	Sismometro - Lennartz 1s 3Dlite	X	X
OG002	Comune di Ferrara - Lavori Pubblici	Nanometrics Orion	Sismometro -Lennartz 1s 3Dlite	X	-
OG003	S. Agostino	Reftek 130	Accelerometro - Episensor FBA	X	-
OG004	Ficarolo (RO)	Reftek 130	Sismometro -Lennartz 5s	X	X
OG005	Poggio Renatico	Nanometrics Orion	Sismometro -Lennartz 1s 3Dlite	X	X
OG006	Vigarano Pieve	Nanometrics Orion	Sismometro -Lennartz 1s 3Dlite	X	X
OG007	Aguscello	Nanometrics Orion	Sismometro -Lennartz 1s 3Dlite	X	X
OG008	Mirabello	Nanometrics Orion	Sismometro -Lennartz 1s 3Dlite	X	X
OG009	S. Carlo	Reftek 130	Accelerometro - Episensor	X	-

Gruppo 2 – Stazioni temporanee OGS Fase 2 (periodo 7/2/2013- ancora attive)

Codice	Sito	Unità di Acquisizione	Sensore	Noise	Eqk
OG002	Comune di Ferrara - Lavori Pubblici (altro sito)	Nanometrics Orion	Sismometro -Lennartz 1s 3Dlite	X	-
OG006	Vigarano Pieve	Nanometrics Orion	Sismometro -Lennartz 1s 3Dlite	-	X
OG007	Aguscello	Nanometrics Orion	Sismometro -Lennartz 1s 3Dlite	-	X
OG008	Mirabello	Nanometrics Orion	Sismometro -Lennartz 1s 3Dlite	-	X
OG010	Caraglia (superficie)	Nanometrics Orion	Sismometro -Lennartz 5s	X	X

Gruppo 3 – Presso stazione accelerometrica DNPC di Mirandola (attiva maggio/giugno 2012)

Codice	Sito	Unità di Acquisizione	Sensore	Noise	Eqk
MIR	Mirandola	Nanometrics Etna	Accelerometro - Episensor	-	X
MIR	Mirandola	Tromino		X	-

Gruppo 4 – Stazione permanente di Casaglia (attiva da fine dicembre 2012)

Codice	Sito	Unità di Acquisizione	Sensore	Noise	Eqk
FERB	Casaglia (fondo pozzo)	Guralp DM24	Sismometro Very Broad Band- Guralp CMG 3BT (360 s) Accelerometro - Guralp CMG-5T	-	X

Gruppo 5 - IFM - Comprensorio industriale di Ferrara (ex-Petrolchimico) (settembre 2012)

Codice	Sito	Unità di Acquisizione	Sensore	Noise	Eqk
IFM_A1	Lato Nord-Ovest	Nanometrics Orion	Sismometro -Lennartz 1s 3Dlite	X	-
IFM_B1	Lato Nord-Ovest	Nanometrics Orion	Sismometro -Lennartz 1s 3Dlite	X	-
IFM_N3	Ingrsso Sud-Ovest	Tromino	Sismometro interno al Tromino	X	-

Tabella 1 – Stazioni utilizzate nel presente studio. Le due colonne a sinistra indicano il tipo di misura disponibile.

Le stazioni delle reti temporanee (gruppi 1 e 2) hanno avuto alcuni malfunzionamenti, per cui solo parte dei segnali registrati sono utilizzabili.

Le registrazioni di terremoti utilizzate nelle varie parti di questo studio saranno descritte nei successivi capitoli.

2.2 Rapporti spettrali H/V da misure di rumore sismico

Presso i siti strumentati in superficie sono state fatte delle analisi di rumore sismico ambientale (microtremore) attraverso il calcolo dei rapporti spettrali tra componente orizzontale verticale H/V, con il metodo noto in letteratura come “metodo di Nakamura”. La **Figura 2** mostra una sintesi dei rapporti H/V stimati, allineati lungo i due transetti ideali visualizzati in **Figura 1**.

Oltre ai siti presentati in **Figura 1**, sono state anche effettuate delle misure di rumore all'interno del comprensorio industriale di Ferrara gestito dall'IFM (ex Petrolchimico). La **Figura 3** mostra le ubicazioni dei siti misurati e i rapporti spettrali H/V stimati.

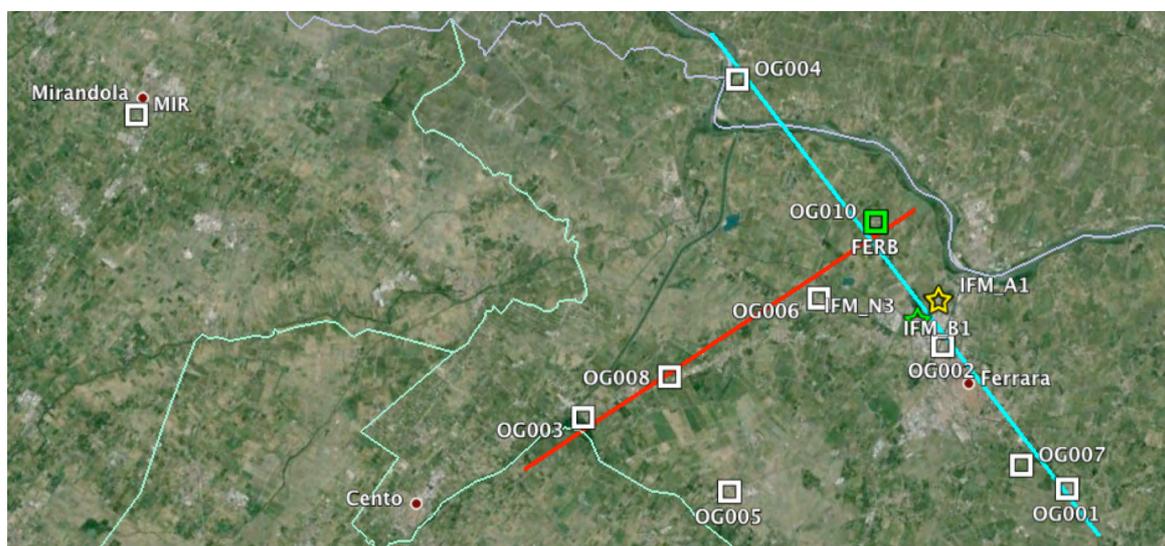


Figura 1 - Mappa dell'area studio con evidenza dei siti delle stazioni sismologiche utilizzate. Le linee rossa e azzurra indicano i due transetti ideali riferiti in Figura 2.

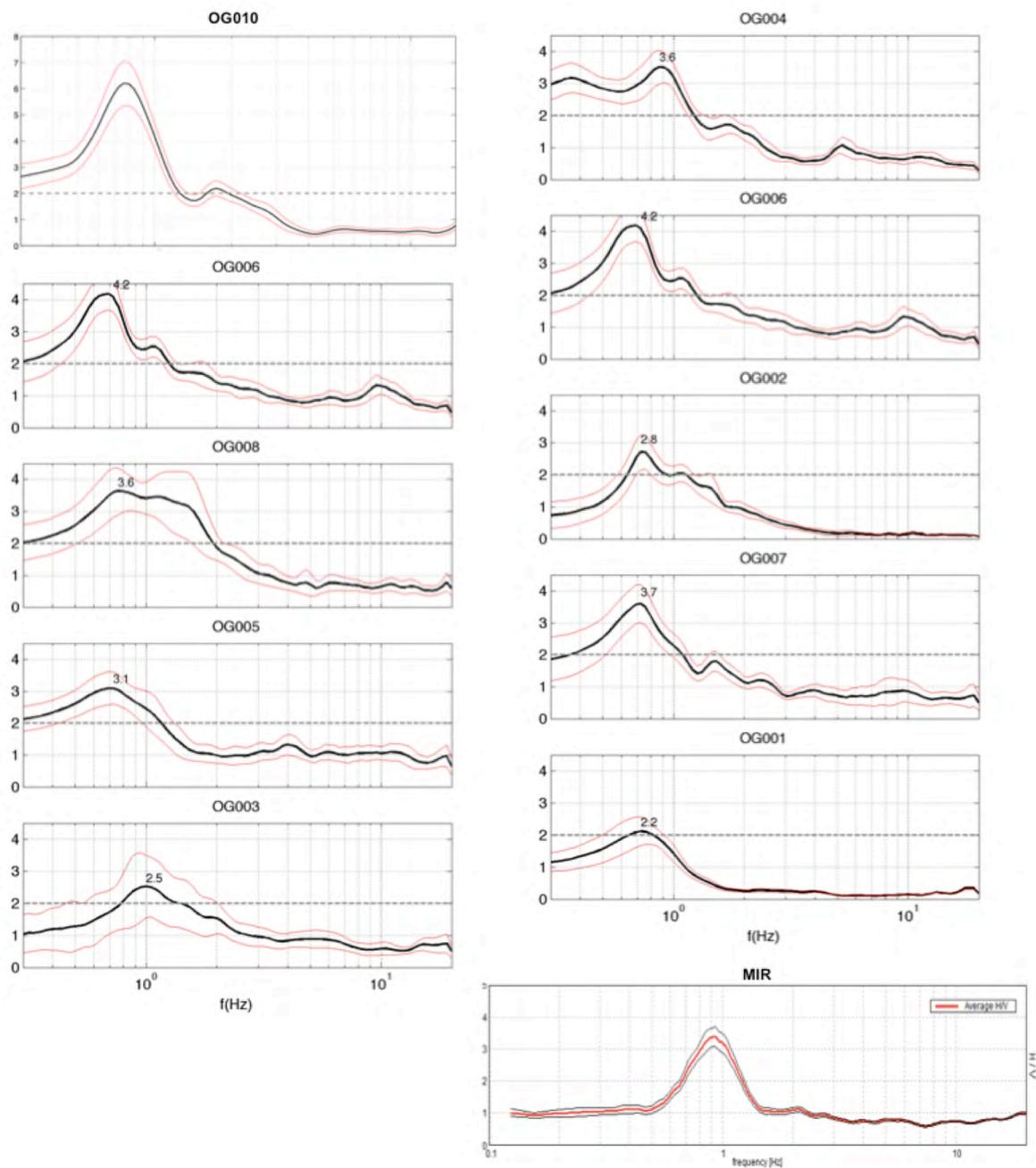


Figura 2 – Rapporti spettrali H/V calcolati presso i siti strumentati in superficie (cfr. anche Tabella 1 e Figura 1). I siti sono raggruppati e ordinati secondo i due allineamenti mostrati in Figura 1. Colonna a sinistra: transetto orientato SSO-NNE; colonna a destra: transetto orientato ESE-ONO. In basso a destra, fuori allineamento, il rapporto H/V del sito di Mirandola (MIR). Si noti, infine, che le scale di rappresentazione dei siti OG010 e MIR sono leggermente differenti da quelle degli altri siti.

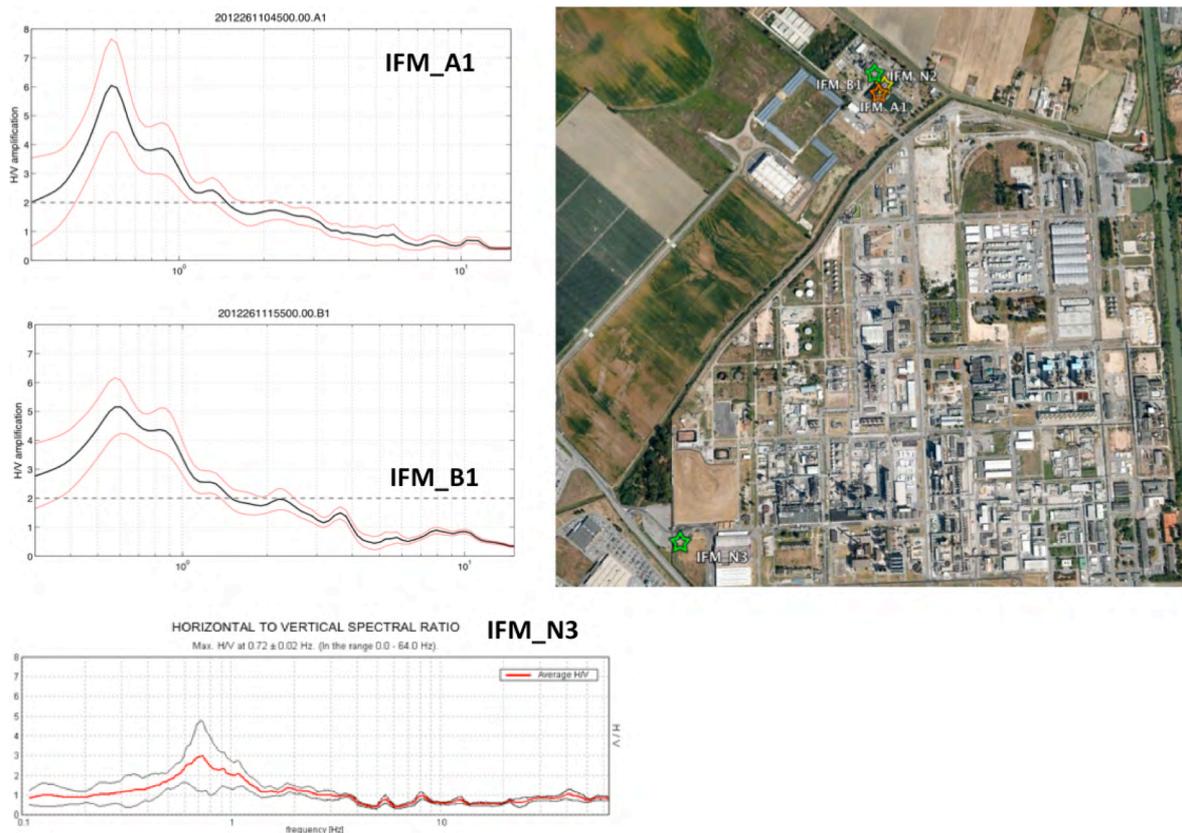


Figura 3 – Rapporti spettrali H/V da rumore sismico ambientale stimati per tre siti ubicati all'interno del comprensorio del polo industriale di Ferrara gestito da IFM (ex-Petrolchimico).

Valutiamo ora complessivamente i rapporti H/V stimati per i siti presentati in questo rapporto (**Figure 2 e 3**). Ricordiamo che le misure effettuate presso i siti OG001-OG009 erano già state discusse in Priolo et al. (2012). Considerando dunque tutte le misure, si riconosce una grande omogeneità di tutti i rapporti H/V: essi sono caratterizzati da un unico picco in bassa frequenza (compreso tra 0.6 e 1.2 Hz), più o meno accentuato ma comunque ben evidente. Considerando i transetti ideali, il picco diventa più netto e forte (con valori da 4 a 6) subito a O-NO di Ferrara, nell'area che comprende i siti di Vigarano Pieve (OG006), Casaglia (OG010) e il lato Ovest del comprensorio industriale IFM_A1-A2), e più in là presso il sito di Mirandola (MIR). Allontanandosi dalla zona a O-NO di Ferrara verso Sud o verso Est lungo i transetti, il picco si indebolisce gradualmente. Il quadro delineato è coerente con quello di dorsali sepolte che culminano approssimativamente nelle aree di Casaglia e Mirandola. Per nessuno dei siti, i rapporti H/V mostrano picchi nella banda medio-alta delle frequenze, segno della mancanza di importanti contrasti di impedenza acustica nei suoli più superficiali.

3. Modellazioni numeriche

Le modellazioni numeriche sono utilizzate per calcolare la risposta sismica dei siti di Casaglia e Mirandola. Questa operazione è effettuata calcolando, per una serie di eventi, il rapporto spettrale medio tra i sismogrammi sintetici calcolati presso i siti investigati e quelli calcolati presso un “sito di riferimento virtuale” che rappresenti al meglio le caratteristiche medie dei siti di classe A rocciosi della catena appenninica emiliana.

Le modellazioni numeriche sono effettuate con il *Wavenumber Integration Method (WIM)* (Herrmann and Wang, 1985; Herrmann, 1996a, b), un metodo che risolve l'equazione completa delle onde 3-D in un mezzo a strati piani paralleli. I sismogrammi calcolati con il WIM contengono sia le onde di corpo sia le onde di superficie e interfaccia, e rappresentano la soluzione completa per la struttura geologica ed il meccanismo di faglia simulato, sia nel *near-field* che nel *far-field* della sorgente.

Come già anticipato, nel presente studio le modellazioni hanno avuto anche la finalità di ovviare alla mancanza di un reale sito di riferimento su roccia. Avendo a disposizione le registrazioni effettuate presso il sito di Casaglia dal sismometro della stazione FERB posto alla profondità di 135 m in corrispondenza del bedrock roccioso, il problema della mancanza del sito di riferimento in superficie può essere affrontato nel determinare la funzione spettrale di trasferimento tra il ricevitore posto in profondità ed un ricevitore posto alla superficie di un ipotetico sito caratterizzato da suolo in classe A, rappresentativo per l'area emiliana.

La procedura che ha portato alla modellazione numerica è stata preceduta da una fase di definizione e validazione dei modelli di velocità, che si è articolata nei seguenti punti:

- Definizione dei modelli strutturali per l'area di studio e dei modelli superficiali per i siti di Casaglia e di Mirandola;
- Validazione dei modelli crostali tramite calcolo di scenari del moto del suolo per alcuni eventi della sequenza emiliana e confronto con alcune registrazioni;
- Validazione dei modelli di sito tramite confronto tra registrazioni e sintetici per alcuni eventi registrati dalle stazioni di Mirandola e di Casaglia.

Nell'ultimo paragrafo del capitolo verranno infine descritti i risultati ottenuti attraverso le modellazioni.

3.1 Definizione dei modelli

Sono stati definiti e testati diversi modelli strutturali, che presentano differenze nel grado di complessità e dettaglio. Tutti i modelli descritti sono a strati piani paralleli, e sono definiti in termini di velocità delle onde P ed S, densità ed attenuazione (fattori Qp e Qs).

In una prima fase si è provveduto a valutare e confrontare il moto del suolo calcolato con i modelli strutturali più recenti disponibili in letteratura per l'area emiliana della Pianura Padana. In particolare, sono stati considerati i modelli introdotti da Vuan et al (2011) e Malagnini et al (2012), denominati di seguito rispettivamente V11 e M12 (**Figura 4** e **Tabella 2**). A seguito di alcune verifiche condotte in fase preliminare, il modello M12 è risultato più adatto a rappresentare la struttura profonda ($z > 1$ km) dell'area studio.

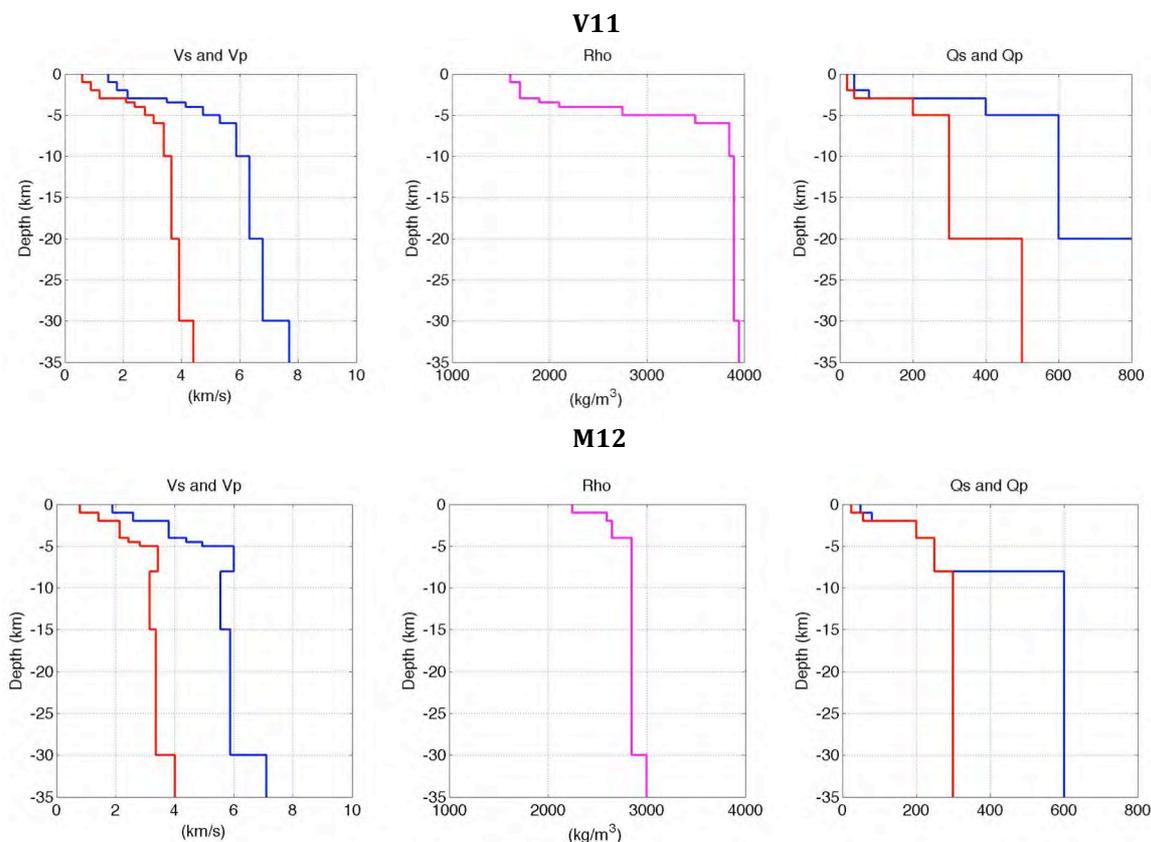


Figura 4 – Modelli crostali: in alto Vuan et al (2011), in basso Malagnini et al (2012). Da sinistra a destra: velocità delle onde P ed S, densità e fattore di qualità (inverso dell'attenuazione) Qp e Qs.

V11

H (Km)	VP(Km/s)	VS(Km/s)	$\rho(\text{gr/cm}^3)$	QP	QS
1.0	1.50	0.60	1.60	40	20
1.0	1.80	0.90	1.70	40	20
1.0	2.16	1.20	1.70	80	40
0.5	3.50	2.10	1.90	400	200
0.5	4.15	2.40	2.10	400	200
1.0	4.75	2.75	2.75	400	200
1.0	5.33	3.05	3.50	600	300
4.0	5.88	3.40	3.85	600	300
10.0	6.34	3.67	3.90	600	300
10.0	6.80	3.93	3.90	1000	500
6.0	7.70	4.41	3.95	1000	500

M12

H (Km)	VP(Km/s)	VS(Km/s)	$\rho(\text{gr/cm}^3)$	QP	QS
1.00	1.90	0.80	2.25	50	25
1.00	2.60	1.43	2.60	80	56
2.00	3.80	2.14	2.65	200	200
0.50	4.40	2.44	2.85	250	250
0.50	4.94	2.82	2.85	250	250
3.00	6.01	3.43	2.85	250	250
7.00	5.55	3.15	2.85	600	300
15.00	5.88	3.36	2.85	600	300
6.00	7.11	4.01	3.00	600	300

Tabella 2 – Modelli crostali: in alto Vuan et al (2011), in basso Malagnini et al (2012). Sono indicati i seguenti parametri, da sinistra a destra: spessore dello strato, velocità delle onde P, velocità delle onde S, densità, fattore di qualità (inverso dell'attenuazione) delle onde P e delle onde S.

Entrambi i modelli precedenti sono modelli crostali specifici per l'area della Pianura Padana ma risolvono la parte più superficiale ($z < 1$ km), caratterizzata da suoli a bassa velocità. In conseguenza, per stimare l'amplificazione dei suoli sono stati definiti due modelli di dettaglio, uno per la zona di Mirandola (M12_MIR) e una per quella di Casaglia (M12_CAS), che tengono conto di tutte le informazioni di tipo geologico-geofisico provenienti da diversi studi eseguiti nelle due aree (down hole, analisi ESAC, perforazioni, ...). E' stato poi definito il modello rappresentativo del sito di riferimento virtuale su roccia (denominato M12_CA, classe A) per l'area emiliana. Come detto, tutti e tre i modelli adottano la medesima struttura profonda, derivata dal modello M12 (Malagnini et al, 2012).

I modelli di sito sono stati definiti insieme al Dott. Martelli del Servizio Geologico della Regione Emilia e raccolgono le informazioni disponibili più aggiornate al mese di luglio 2013. In particolare essi tengono conto di dati di pozzo acquisiti durante l'estate 2013, e quindi aggiornano ulteriormente i modelli introdotti nell'ambito del Progetto S2 (2013) da vari autori (consultare ad esempio Faccioli et al (2013)). Le **Figure 5-6** e le **Tabelle**

3-4 descrivono le parametrizzazioni dei due modelli. Essi sono caratterizzati da importanti discontinuità nei primi 150 metri. A circa 95 m, ambedue presentano un importante incremento di VS, che passa da 350-400 m/s a 600 m/s. A Mirandola questa interfaccia corrisponde al passaggio a sedimenti più consolidati e contestualmente a un cambio di granulometria, mentre a Casaglia corrisponde al passaggio da sedimenti alluvionali a sabbie costiere. La seconda discontinuità importante corrisponde al tetto dei depositi marini consolidati, collocata alla profondità di 113 m a Mirandola e a 130 m a Casaglia. Si noti, infine, che i modelli descrivono la presenza di suoli saturi d'acqua ($VP=1580$ m/s) a partire da 7 m e 10 m rispettivamente a Mirandola e Casaglia.

Il modello CA (**Figura 7** e **Tabella 5**) simula un sito su roccia (Classe A) tipico dell'area Appenninica e caratterizzato dalle basse velocità delle litologie rocciose e elevato degrado superficiale. Esso combina le caratteristiche di un suolo di classe A (valore di VS30 pari a 800 m/s) con una struttura superficiale rappresentativa di un gradiente di velocità crescente con la profondità. Nei 30 m superficiali la velocità S cresce gradualmente dai 500 m/s del sottile strato a bassa velocità, ai 1000 m/s del basamento roccioso vero e proprio. Il modello, infine, prevede suoli saturi d'acqua a partire da 9 m di profondità.

3.2 Validazione del modello crostale per l'Emilia

Al fine di testare le differenze tra il livello di moto del suolo stimato dai diversi modelli crostali (V11 e M12) e di analizzare la distribuzione areale dello scuotimento durante la sequenza sismica emiliana del 2012 si è deciso di procedere preliminarmente a eseguire alcune modellazioni di scenario, cioè calcolando il moto del suolo su una griglia densa di punti. Tali modellazioni permettono di fornire una visione d'insieme dell'effetto prodotto dai diversi modelli fisici e meccanismi di sorgente. L'area d'indagine, indicata in **Figura 8**, è un quadrato di 50 km di lato centrato sulla sorgente del terremoto di riferimento. I ricevitori sono 441 e coprono quest'area con un passo spaziale di 2.5 km.

Come eventi di riferimento sono stati scelti due eventi per i quali si disponeva delle registrazioni presso le stazioni della rete temporanea dell'OGS (codice ZR) e presso la stazione di Mirandola (ENEL), cioè l'evento $M=5.8$ del 29 maggio 07:00:03 e l'evento $M=3.9$ del 31 maggio 19:04:04. I parametri di sorgente di questi eventi sono riportati in **Tabella 6**. Entrambi hanno le caratteristiche tipiche degli eventi emiliani, cioè faglia inversa con angolo di dip elevato e orientazione circa EW.

In queste, come in tutte le modellazioni dello studio, è stato considerato un modello di sorgente puntuale, cioè la sorgente si concentra in un punto dello spazio. Dunque non vengono riprodotti eventuali effetti legati all'estensione finita della faglia. La storia temporale della sorgente è parametrizzata sulla base della stima della durata media della

rottura sull'intera superficie di faglia, ottenuta dalle classiche leggi di scala (Wells and Coppersmith, 1994; Sommerville et al., 1999, Heaton, 1990).

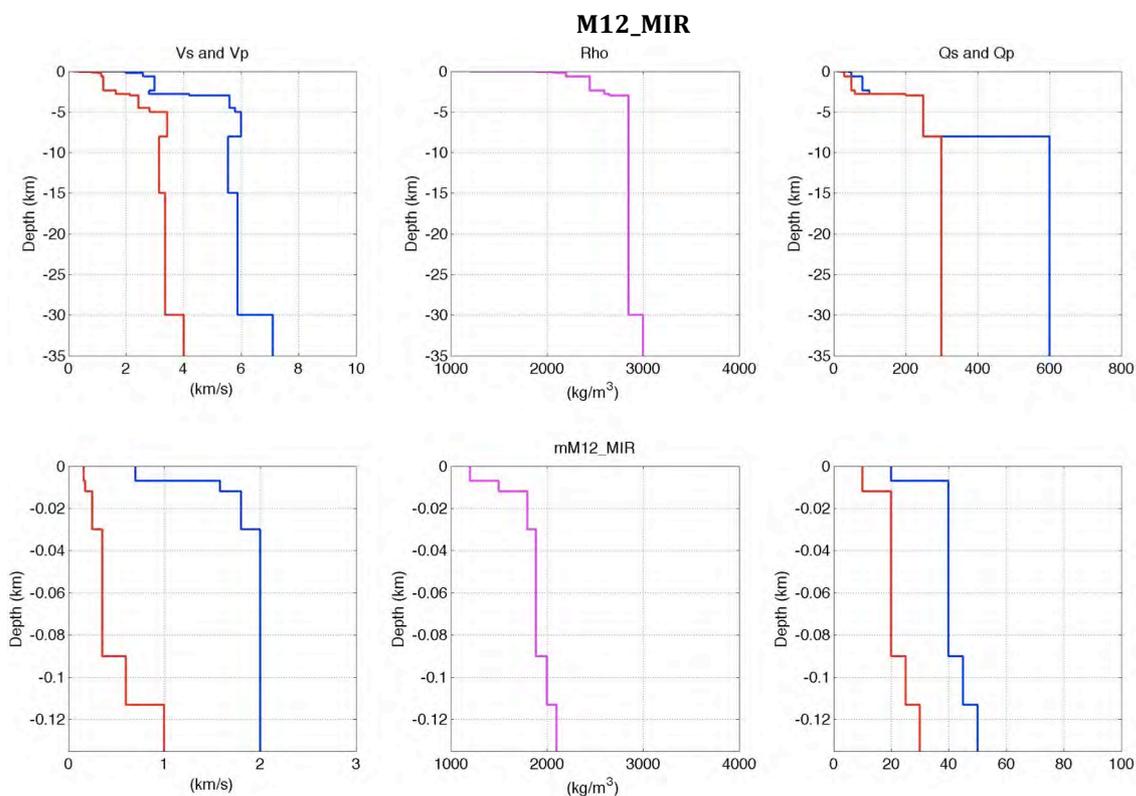


Figura 5 – Modello strutturale di dettaglio definito per la località di Mirandola. In alto: modello intero, in basso dettaglio della parte più superficiale (primi 135 metri). Altri dettagli come in Figura 4.

M12_MIR

H (Km)	VP(Km/s)	VS(Km/s)	ρ (gr/cm ³)	QP	QS
0.007	0.70	0.16	1.20	20	10
0.005	1.58	0.17	1.50	40	10
0.018	1.80	0.25	1.80	40	20
0.060	2.00	0.35	1.89	40	20
0.023	2.00	0.60	2.00	45	25
0.127	2.00	1.00	2.10	50	30
0.430	2.60	1.14	2.20	50	30
1.690	3.00	1.21	2.45	80	50
0.440	2.80	1.66	2.60	100	60
0.200	4.20	2.14	2.65	200	200
1.500	5.60	2.44	2.85	250	250
0.500	5.80	2.82	2.85	250	250
3.000	6.01	3.43	2.85	250	250
7.000	5.55	3.15	2.85	600	300
15.000	5.88	3.36	2.85	600	300
6.000	7.11	4.01	3.00	600	300

Tabella 3. Modello di dettaglio per l'area di Mirandola. Altri dettagli come in Tabella 2.

M12_CAS

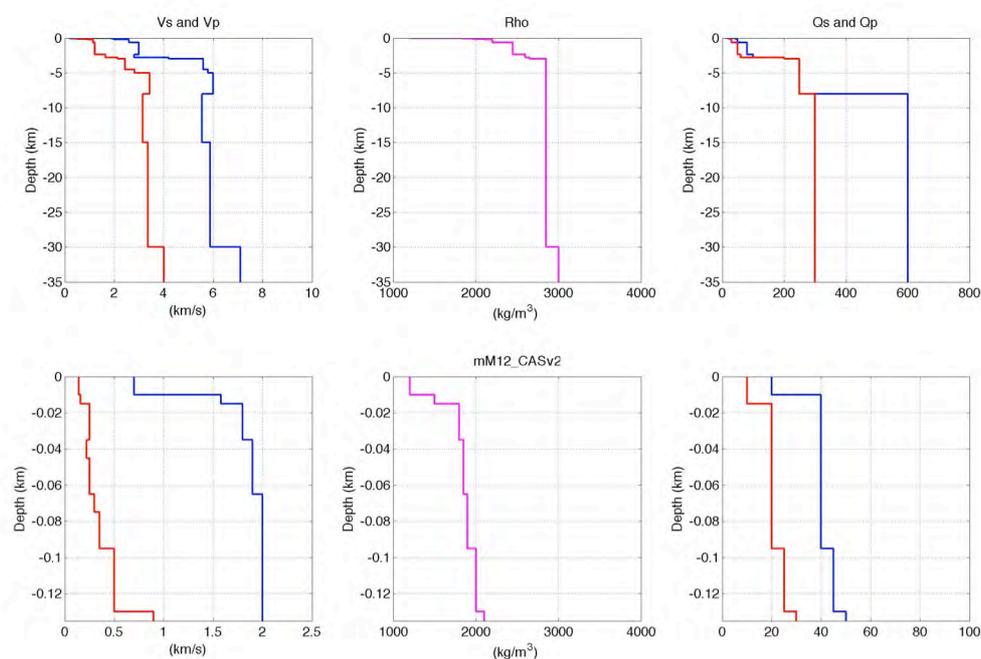


Figura 6 – Modello strutturale di dettaglio definito per la località di Casaglia. In alto: modello intero, in basso dettaglio della parte più superficiale (primi 135 metri). Altri dettagli come in Figura 4.

M12_CAS

H (Km)	VP(Km/s)	VS(Km/s)	$\rho(\text{gr}/\text{cm}^3)$	QP	QS
0.010	0.70	0.14	1.20	20	10
0.005	1.58	0.16	1.50	40	10
0.020	1.80	0.25	1.80	40	20
0.010	1.90	0.22	1.85	40	20
0.020	1.90	0.25	1.85	40	20
0.010	2.00	0.30	1.90	40	20
0.020	2.00	0.35	1.90	40	20
0.035	2.00	0.50	2.00	45	25
0.110	2.00	0.90	2.10	50	30
0.430	2.60	1.14	2.20	50	30
1.690	3.00	1.21	2.45	80	50
0.440	2.80	1.66	2.60	100	60
0.200	4.20	2.14	2.65	200	200
1.500	5.60	2.44	2.85	250	250
0.500	5.80	2.82	2.85	250	250
3.000	6.01	3.43	2.85	250	250
7.000	5.55	3.15	2.85	600	300
15.000	5.88	3.36	2.85	600	300
6.000	7.11	4.01	3.00	600	300

Tabella 4. Modello di dettaglio per l'area di Casaglia. Altri dettagli come in Tabella 2.

M12_CA

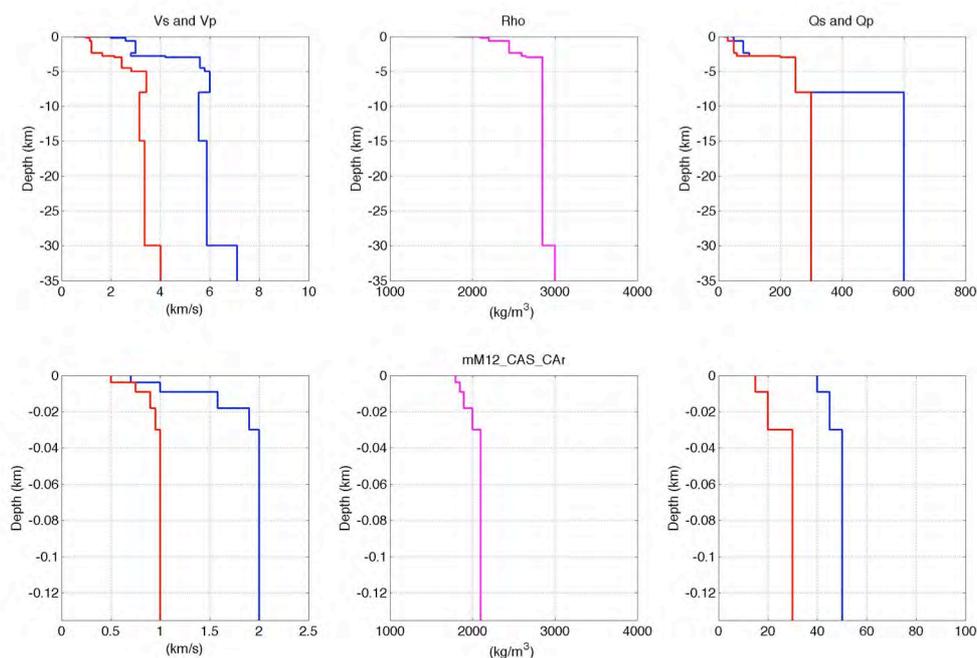


Figura 7 – Modello strutturale di dettaglio definito per il sito virtuale su roccia (Classe A). In alto: modello intero, in basso dettaglio della parte più superficiale (primi 135 metri). Altri dettagli come in Figura 4.

M12_CA

H (Km)	VP(Km/s)	VS(Km/s)	ρ (gr/cm ³)	QP	QS
0.004	0.70	0.50	1.80	40	15
0.005	1.00	0.75	1.85	40	15
0.009	1.58	0.90	1.90	45	20
0.012	1.90	0.95	2.00	45	20
0.210	2.00	1.00	2.10	50	30
0.430	2.60	1.14	2.20	50	30
1.690	3.00	1.21	2.45	80	50
0.440	2.80	1.66	2.60	100	60
0.200	4.20	2.14	2.65	200	200
1.500	5.60	2.44	2.85	250	250
0.500	5.80	2.82	2.85	250	250
3.000	6.01	3.43	2.85	250	250
7.000	5.55	3.15	2.85	600	300
15.000	5.88	3.36	2.85	600	300
6.000	7.11	4.01	3.00	600	300

Tabella 5. Modello di dettaglio definito per il sito virtuale su roccia (Classe A). Altri dettagli come in Tabella 2.

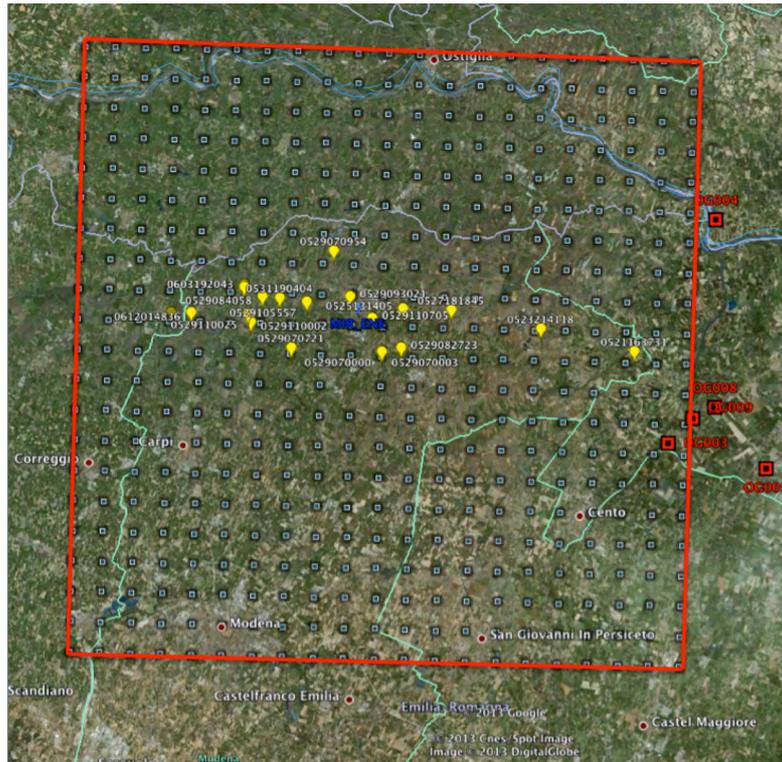


Figura 8 – Mappa che rappresenta l’area di indagine e l’ubicazione dei 441 ricevitori per i quali sono stati calcolati i sismogrammi sintetici. Sono indicati gli epicentri degli eventi principali della sequenza emiliana, tra i quali quello dell’evento M=5.8 20120529070003 (in giallo), le stazioni della rete temporanea ZR e la stazione di Mirandola presso la cabina ENEL.

evento	lat	lon	h(km)	M	strike	dip	rake
20120529070003	44.85	11.09	10.2	5.8	274	64	89
20120531190404	44.89	10.98	8.7	4.2	97	49	92

Tabella 6. Eventi utilizzati nelle modellazioni di scenario. h indica la profondità ipocentrale.

I sismogrammi sintetici – nelle tre componenti EW, NS e Z - sono stati calcolati in ogni ricevitore per i diversi modelli strutturali e i due eventi di riferimento. La **Figura 9** mostra le mappe di PGA (*Peak Ground Acceleration*) ottenute per la componente NS per i due modelli crostali V11 e M12 e per l’evento M=3.9 del 31 maggio ore 19:04:04. Si vede che la distribuzione di PGA presenta due lobi di massimo a sud e nord rispetto alla sorgente (che si trova al centro della mappa) e corrisponde direttamente al profilo di radiazione per il meccanismo focale imposto. Le differenze in ampiezza sono invece riconducibili ai parametri fisici dei due modelli, che differiscono in modo marcato soprattutto per i valori di attenuazione (fattore di qualità Q) degli strati più superficiali (cfr. **Figure 5-6** e **Tabelle 4-5**).

La **Figura 10** mostra invece le mappe di PGA delle tre componenti, calcolate col modello M12, per l’evento M=5.8 del 29 maggio 07:00:03. Si nota molto bene il pattern di radiazione dovuto al meccanismo di sorgente. La stessa figura mostra anche, come

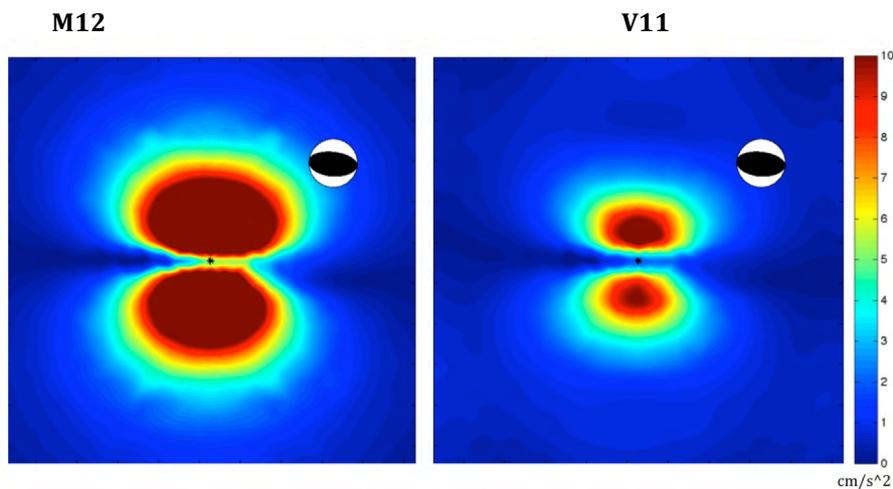


Figura 9 - Mappe di PGA (componente NS) ottenute con il modello strutturale M12 (a sinistra) e V11 (a destra) per l'evento $M=3.9$ del 31 maggio, ore 19:04:04. E' indicato il meccanismo focale della sorgente (Saraò and CRS staff, 2009). L'area raffigurata si riferisce al quadrato rosso indicato in Figura 8.

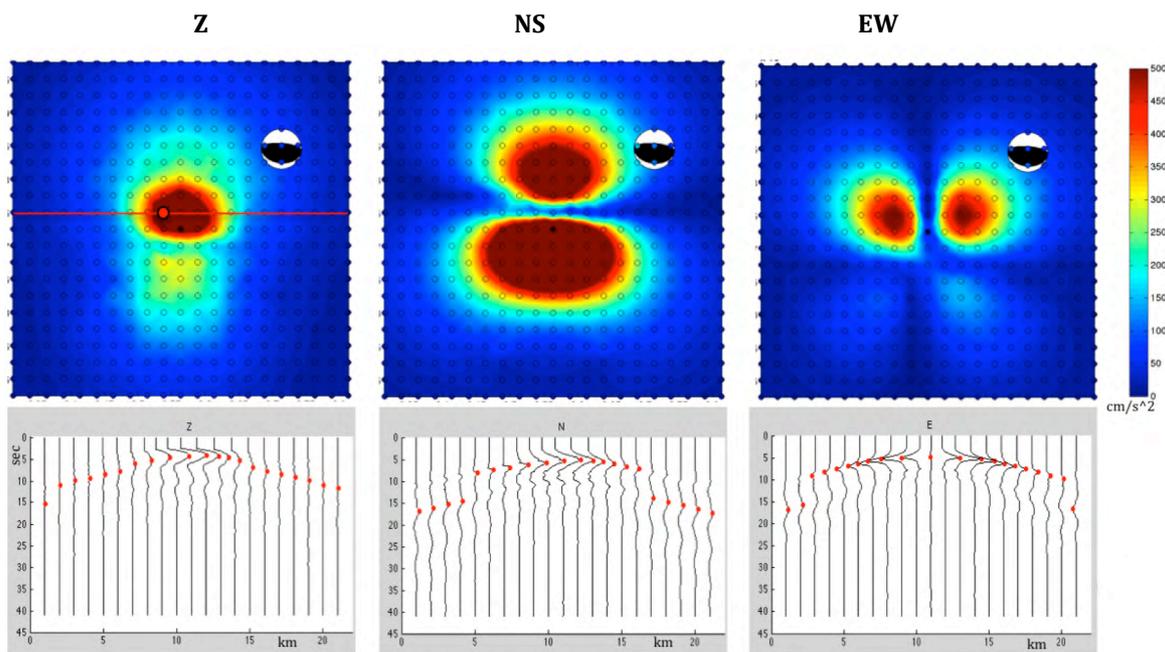


Figura 10 - In alto: mappe di PGA (da sinistra a destra: componente verticale, NS ed EW) ottenute con il modello strutturale M12 per l'evento $M=5.8$ del 29 maggio 07:03:00. Il meccanismo focale della sorgente è tratto da Saraò and CRS staff (2009). Il cerchio rosso indica la posizione della stazione di Mirandola rispetto all'epicentro. In basso: sismogrammi sintetici ottenuti lungo la sezione indicata dalla linea rossa (i puntini rossi indicano la posizione del picco in ampiezza).

esempio, i sismogrammi sintetici calcolati nei ricevitori posizionati lungo la linea rossa (con spaziatura 2.5 km). Questo permette di riconoscere come la forma d'onda cambi rapidamente a brevissima distanza sia in forma che in ampiezza. Si noti ad esempio il

cambio di polarità nella componente EW, lungo un piano NS che passa attraverso la sorgente, con ampiezze paragonabili da una parte e dall'altra del piano nodale. Il cerchio rosso nel primo pannello a sinistra indica invece la posizione relativa all'epicentro della stazione accelerometrica di Mirandola (ENEL), che ha registrato l'evento. Osservando gli altri pannelli, si noterà che il ricevitore/stazione di Mirandola si trova proprio su un piano nodale della componente NS e molto vicino a un piano nodale della componente EW. Ciò comporta una possibile elevata instabilità dei sismogrammi (siano essi calcolati o registrati) dovuta al fatto che minime variazioni della posizione o del meccanismo della sorgente rispetto al ricevitore (siano esse causate da una interpretazione non precisa o intrinseche nella fenomenologia realmente verificatasi) possono portare a repentini cambiamenti di segno e forti variazioni di ampiezza.

La **Figura 11** mostra nel dettaglio il confronto tra i sismogrammi in spostamento e spettri di Fourier sintetici (in rosso) e dedotti dagli accelerogrammi registrati mediante doppia integrazione (in nero). Come si può notare, il confronto è buono sia in termini di ampiezze che di polarità, tenendo in considerazione il modello semplificato di sorgente che è stato utilizzato.

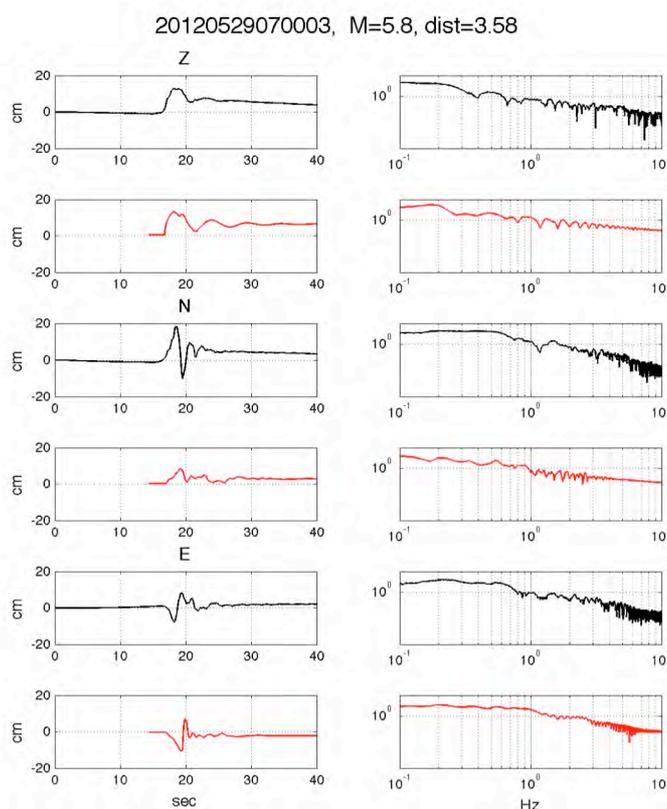


Figura 11 - Confronto tra i sismogrammi sintetici in spostamento(a sinistra) e spettri di Fourier (a destra) registrati (in nero) e calcolati (in rosso) presso la stazione di MIR_ENEL con il modello crostale M12.

3.3 Validazione dei modelli di sito di Mirandola e di Casaglia.

La seconda fase dello studio riguarda il confronto (sia in tempo che in frequenza) tra i sismogrammi relativi a un insieme eventi della sequenza dell'Emilia registrati dalle stazioni di Casaglia e Mirandola con quelli calcolati con modellazione numerica utilizzando i modelli di dettaglio definiti per le due località. Tali modelli, essendo caratterizzati da un maggior numero di strati, di spessore a volte anche molto ridotto, e da bassi valori di velocità VP e VS vicino alla superficie, comportano uno sforzo computazionale molto più elevato in termini di tempo di calcolo. Per questa ragione sono stati calcolati solamente i sismogrammi per i singoli ricevitori corrispondenti alle stazioni di Mirandola e Casaglia. In ambedue i casi, i sismogrammi sono stati calcolati sia in superficie che alla profondità di 135 m, che corrisponde alla posizione in pozzo della stazione di Casaglia FERB.

I 15 eventi modellati presso la stazione di Mirandola appartengono tutti alla sequenza dell'Emilia del 2012 e hanno magnitudo maggiore di 3.8. La **Figura 12** e la **Tabella 7** riassumono tutti i parametri relativi a tali eventi.

Per quanto riguarda la stazione di Casaglia, essa è stata operativa dal 2013 e quindi non ha registrato la sequenza emiliana di maggio-giugno 2012. Sono stati quindi considerati meno eventi, complessivamente 7, di cui 4 eventi della Garfagnana, un evento nel ferrarese e due eventi più distanti, rispettivamente occorsi nel Pordenonese e in Slovenia. La **Figura 13** e la **Tabella 8** ne riassumono tutti i parametri.

Le **Figure 14-17** confrontano, come esempio, i sismogrammi e gli spettri in ampiezza registrati (in nero) e simulati (in rosso) per le tre componenti presso la stazione MIR_ENEL. Qualitativamente si riconosce un buon accordo sia in ampiezza che nel dominio delle frequenze, e questo consente di considerare sufficientemente accurate e affidabili le parametrizzazioni e la procedura di modelling adottate.

Le **Figure 18-19** confrontano invece i sintetici calcolati e le registrazioni effettuate dalle stazioni di Casaglia OG010 (in superficie) e FERB (in pozzo a 135 m di profondità) per due eventi della Garfagnana. I dati mostrati sono in spostamento espresso in cm.

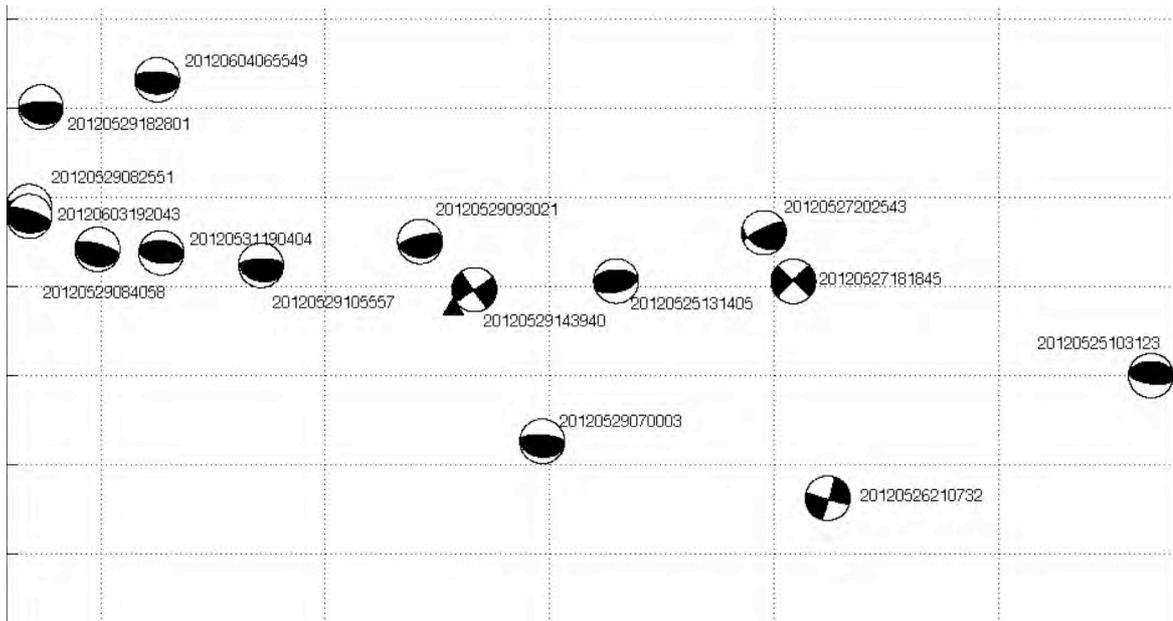


Figura 12. Eventi utilizzati per la validazione del modello della stazione di MIR_ENEL (triangolo nero) (vedi tabella). Tutti gli eventi appartengono alla sequenza emiliana di maggio-giugno 2012.

evento	lat	lon	h(km)	M	strike	dip	rake	dist(km)
20120604065549	44.93	10.98	5.0	3.8	273	58	91	8.4
20120525131405	44.88	11.11	10.0	4.0	269	45	99	3.7
20120527181845	44.88	11.16	4.7	4.0	314	90	-175	7.6
20120529070003	44.85	11.09	10.2	5.8	274	64	89	3.6
20120529082551	44.90	10.94	3.2	4.5	279	68	91	9.7
20120529084058	44.89	10.96	5.3	4.2	285	68	91	8.0
20120529093021	44.89	11.05	1.2	4.2	255	67	81	1.7
20120529105557	44.89	11.01	6.8	5.3	269	65	83	4.4
20120531190404	44.89	10.98	8.7	4.2	97	49	92	6.6
20120603192043	44.90	10.94	9.2	5.1	288	67	95	9.7
20120525103123	44.86	11.26	6.1	3.9	99	57	95	15.6
20120526210732	44.84	11.17	10.4	3.8	107	86	-174	9.4
20120527202543	44.89	11.15	4.1	3.8	244	72	64	7.1
20120529143940	44.88	11.07	20.6	3.9	56	89	-5	0.6
20120529182801	44.92	10.95	2.7	3.9	267	68	83	10.2

Tabella 7. Eventi utilizzati per le modellazioni presso la stazione MIR_ENEL

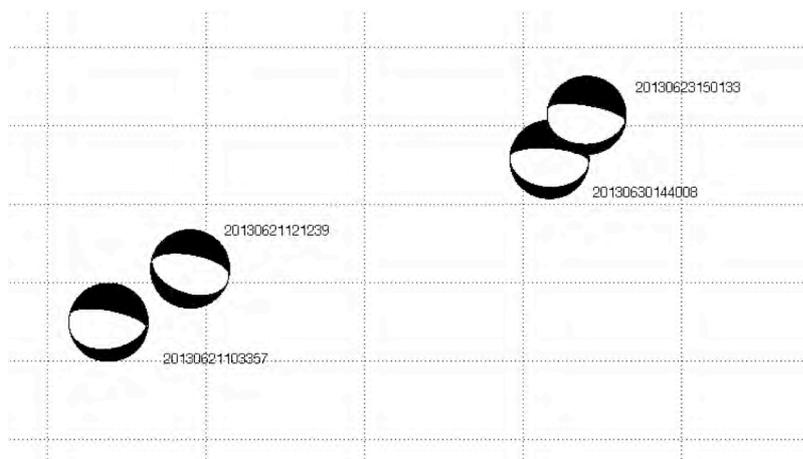


Figura 13. Eventi utilizzati per la validazione del modello della stazione di Casaglia (stazioni OG010 e FERB) appartenenti alla sequenza della Garfagnana di giugno 2013 e distanti circa 150 km dalla stazione di registrazione . Oltre a questi, è stato utilizzato un evento della sequenza emiliana e due eventi molto distanti occorsi nel Pordenonese e in Slovenia (cfr. Tabella 8).

evento	lat	lon	h(km)	M	strike	dip	rake	dist(km)
20130630144008	44.17	10.21	9.8	4.4	274	64	-90	133.6
20130623150133	44.18	10.21	9.5	4.4	280	67	-85	132.9
20130621121239	44.16	10.15	10.0	4.0	280	57	-95	138.0
20130621103357	44.15	10.14	5.1	5.2	281	63	-80	139.2
20130504051108	44.87	11.45	8.0	3.8	263	68	66	8.4
20130616200500	45.78	14.83	10.0	4.2	253	53	59	275.0
20130212181243	46.31	12.57	9.7	3.8	234	51	64	178.0

Tabella 8. Eventi utilizzati per le modellazioni delle stazioni di Casaglia OG010 e FERB.

20120603192043, M=5.1, dist=9.66

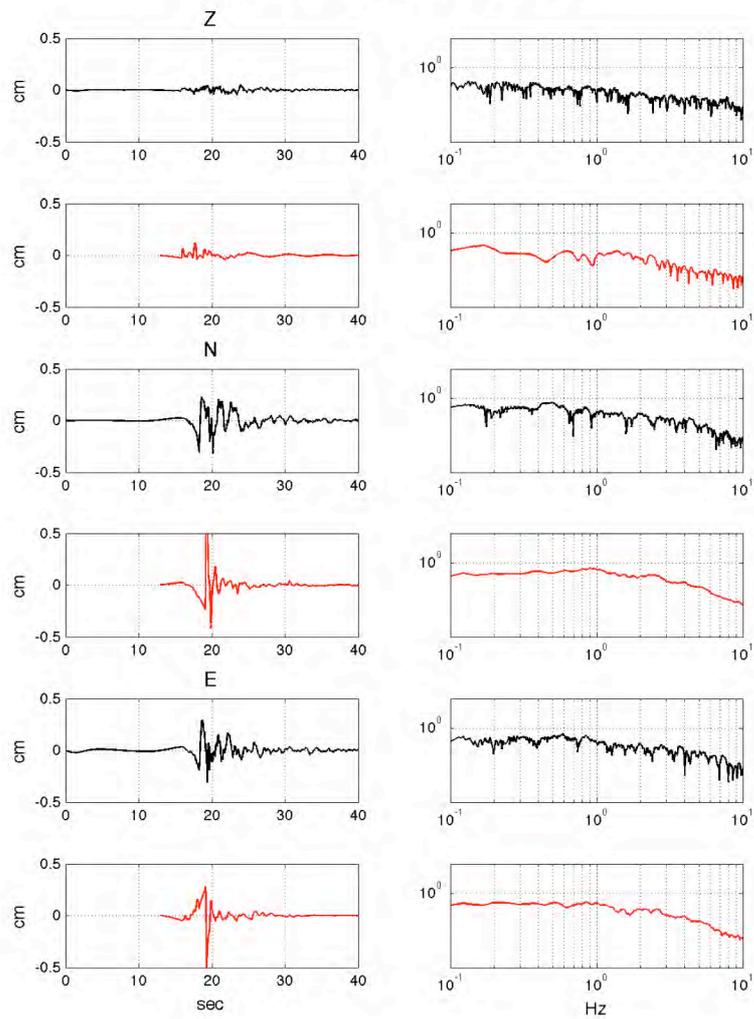


Figura 14. Stazione di Mirandola MIR_ENEL. Evento ML5.1 del 03/06/2012 ore 19:20:43 della sequenza emiliana del 2012. Confronto tra sintetici (in rosso) e registrazioni (in nero) di spostamento (unità in cm). A sinistra e destra sono mostrati rispettivamente i sismogrammi in tempo e gli spettri di ampiezza).

20120527181845, M=4, dist=7.616

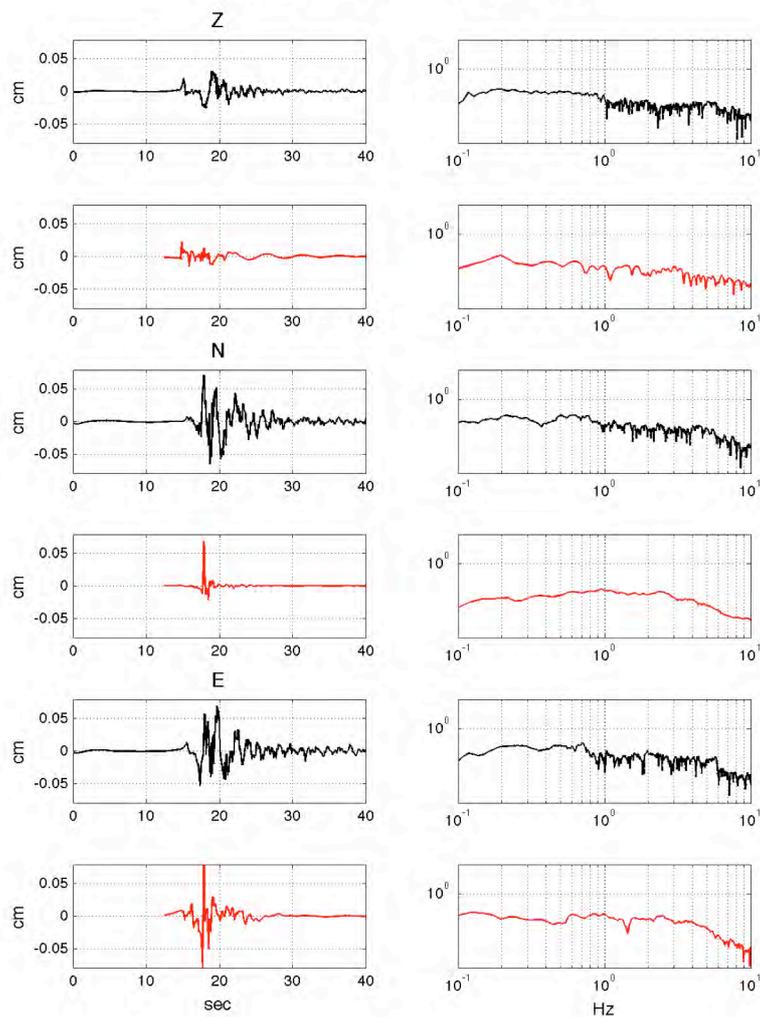


Figura 15. Stazione di Mirandola MIR_ENEL. Evento ML4.0 del 27/05/2012 ore 18:18:45 della sequenza emiliana del 2012. Altri dettagli come in Figura 14.

20120525103123, M=3.9, dist=15.626

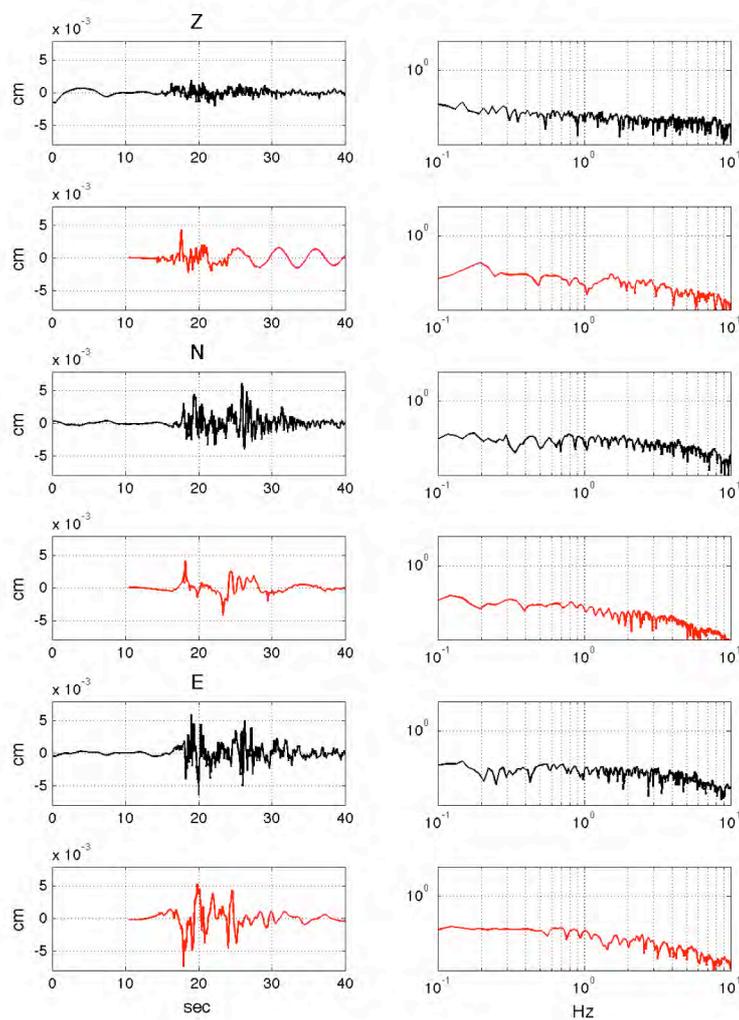


Figura 16. Stazione di Mirandola MIR_ENEL. Evento ML3.9 del 25/05/2012 ore 10:31:23 della sequenza emiliana del 2012. Altri dettagli come in Figura 14.

20120604065549, M=3.8, dist=8.359

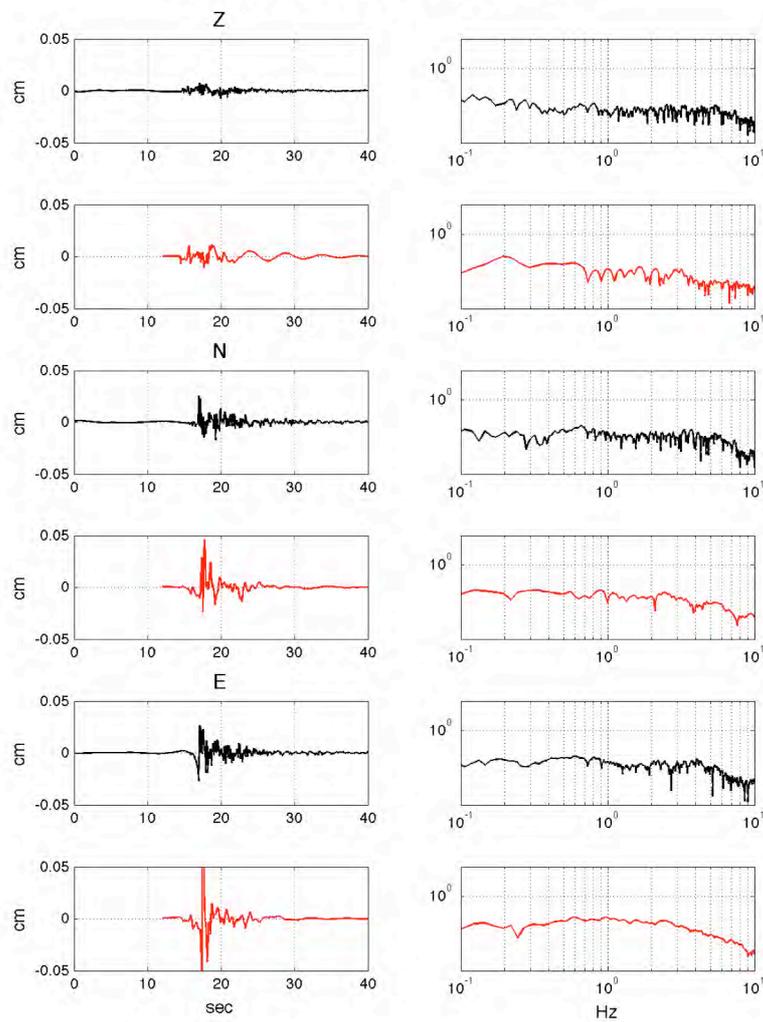


Figura 17. Stazione di Mirandola MIR_ENEL. Evento ML3.8 del 04/06/2012 ore 06:55:49 della sequenza emiliana del 2012. Altri dettagli come in Figura 14.

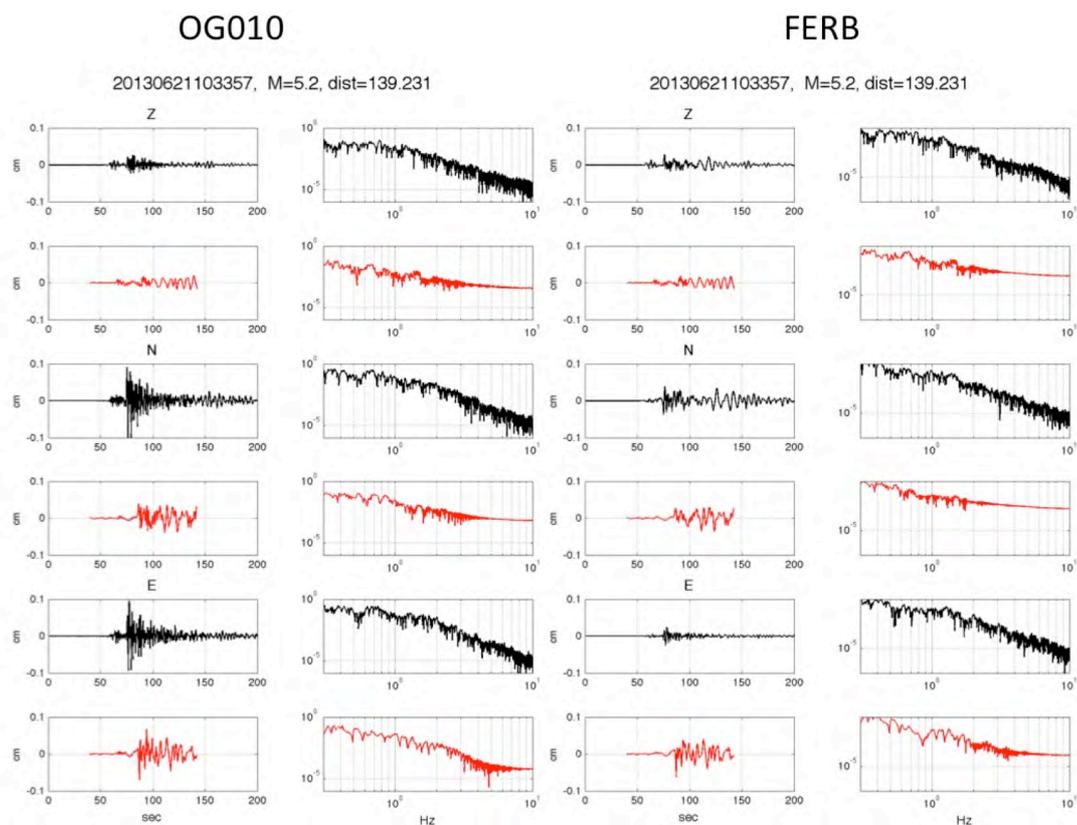


Figura 18 – Confronto tra i sismogrammi sintetici in spostamento in tempo e in spettro di ampiezza (cm), registrati (in nero) e calcolati (in rosso) presso le stazioni di Casaglia in superficie (OG010) e in profondità (FERB). Evento M=5.2 del 21/06/2013 ore 10:33:57 appartenente alla sequenza della Garfagnana di giugno 2013.

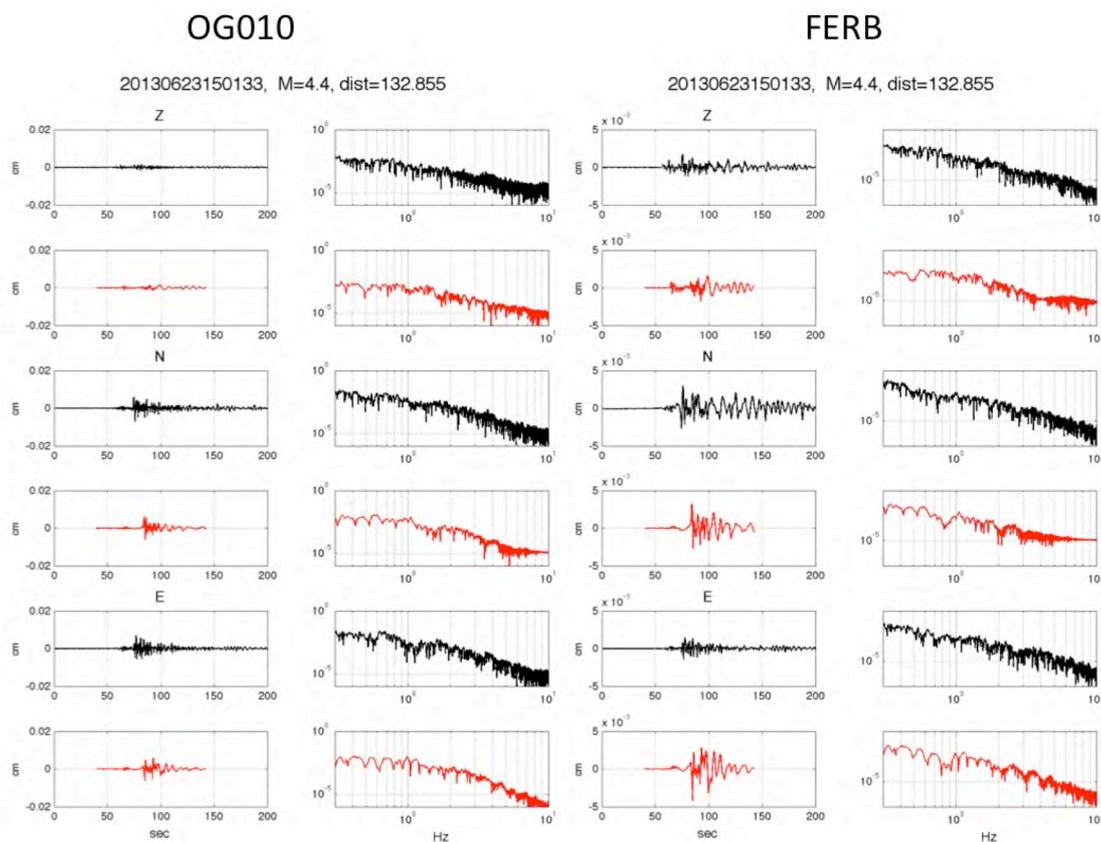


Figura 19 - Come in Figura 18 ma per evento M=5.2 del 21/06/2013 ore 10:33:57 appartenente alla sequenza della Garfagnana di giugno 2013.

3.4 Risultati delle modellazioni

Con i sismogrammi sintetici ottenuti con le modellazioni numeriche sono stati calcolati i rapporti spettrali tra ricevitore in superficie e ricevitore in profondità per i due modelli rappresentativi dei siti di Casaglia e Mirandola e per il modello rappresentativo del sito di riferimento virtuale in classe A. La **Figura 20** mostra una rappresentazione schematica dei modelli e della posizione dei ricevitori.

Le **Figure 21-23** mostrano i rapporti spettrali medi calcolati tra il ricevitore in superficie e quello posto in profondità (R_{sup}/R_{bed} e CA_{sup}/CA_{bed}). Le curve mostrano entrambe le componenti verticale e orizzontale (ottenuta come massimo delle due componenti orizzontali). I rapporti spettrali medi sono stimati dai sintetici ottenuti singolarmente per le diverse sorgenti simulate (mostrati in background con colore grigio). Poiché la

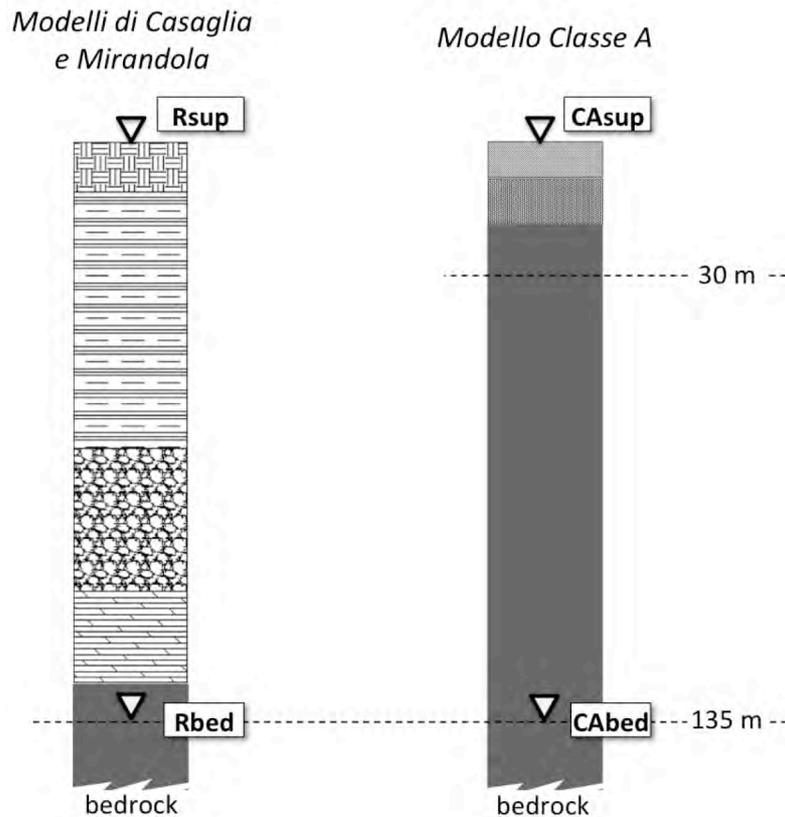


Figura 20 – Rappresentazione schematica dei modelli di sito di Casaglia e Mirandola e del modello rappresentativo del sito virtuale di riferimento in classe A. Sono evidenziati i ricevitori posti in superficie e profondità.

finalità di questa fase è predittiva –la validazione è già stata descritta nel paragrafo precedente- le sorgenti simulate e utilizzate per il calcolo dei rapporti spettrali sono tutte quelle descritte nelle **Tabelle 7 e 8** (quindi 22 eventi), in modo da estendere la generalità dell’analisi.

Per i modelli di Mirandola e Casaglia, i rapporti R_{sup}/R_{bed} mostrano, per entrambe le componenti, degli evidenti picchi distribuiti con cadenza regolare. Si noti anche che per il modello in Classe A i picchi sono comunque presenti ma sensibilmente spostati verso le alte frequenze. E’ importante sottolineare che queste curve non rappresentano l’amplificazione del sito, in quanto il ricevitore posto in profondità non registra il campo “neutro”. Infatti, il campo d’onda registrato in profondità è il risultato (sovrapposizione) del campo d’onda incidente, di quello riflesso verso il basso dalla superficie libera (nonchè dalle varie interfacce intermedie) e delle onde di superficie e interfaccia che si propagano nel mezzo. Il rapporto R_{sup}/R_{bed} rappresenta quindi il campo d’interferenza registrato in profondità e valutato rispetto a quanto osservato in superficie. Alla posizione del ricevitore in profondità, l’interferenza genera dei buchi spettrali molto evidenti (rappresentativi dei cosiddetti *ghost*) che nel rapporto tra i due ricevitori danno

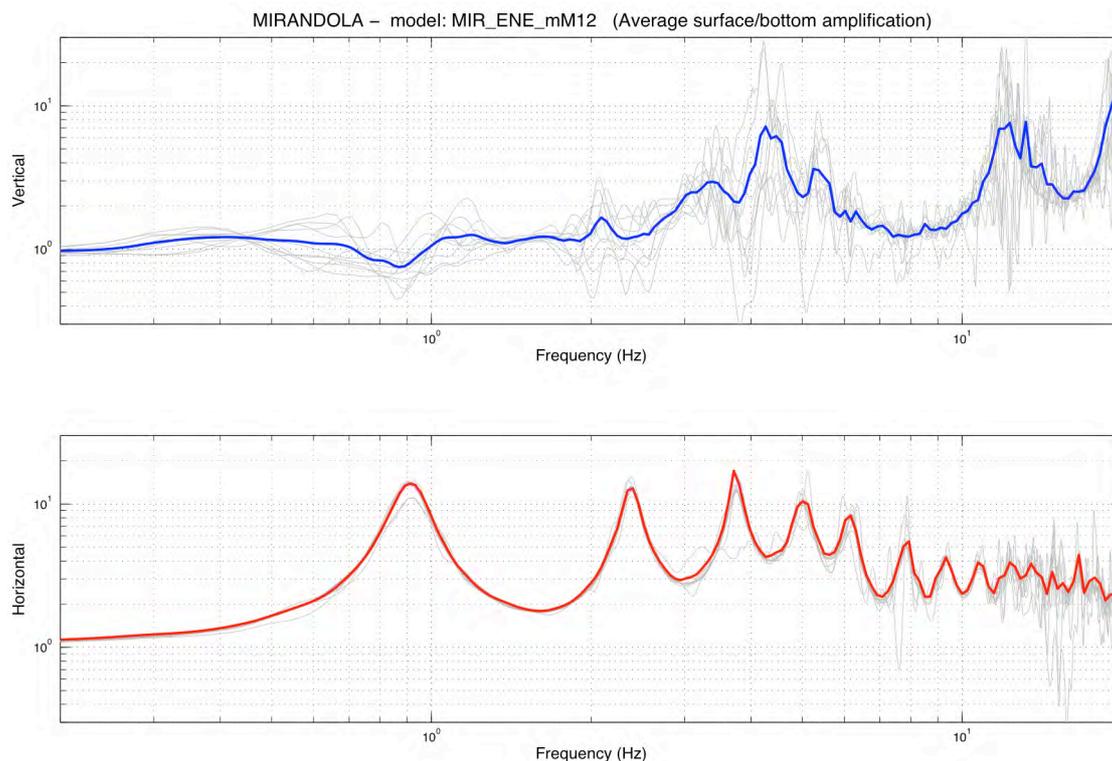


Figura 21 – Modello di sito di Mirandola. Rapporti spettrali medi calcolati tra il ricevitore in superficie e quello posto in profondità (R_{sup}/R_{bed}). In alto e in basso, rispettivamente, le componenti verticale (blu) e orizzontale (rosso). Le curve grigie in background mostrano i rapporti spettrali ottenuti singolarmente per le diverse sorgenti simulate.

luoghi ai picchi. La **Figura 24** mostra un esempio degli spettri di Fourier calcolati presso i due siti per un evento campione. Si noti la similitudine nella forma e nella posizione dei buchi spettrali, nonostante la diversa posizione ricevitore/sorgente e la struttura moderatamente diversa del modello superficiale. Questi concetti saranno ripresi nuovamente più avanti (**Capitolo 4**) quando si mostreranno i dati effettivamente registrati dalle stazioni.

Le **Figure 26-27** mostrano i rapporti spettrali calcolati per i modelli di Mirandola e Casaglia tra il ricevitore posto alla superficie del sito e quello posto alla superficie del sito di riferimento virtuale in Classe A (R_{sup}/CA_{sup} , nello schema di **Figura 20**). Queste curve rappresentano le effettive curve di amplificazione spettrale dei siti, e costituiscono pertanto uno dei principali risultati di questo studio.

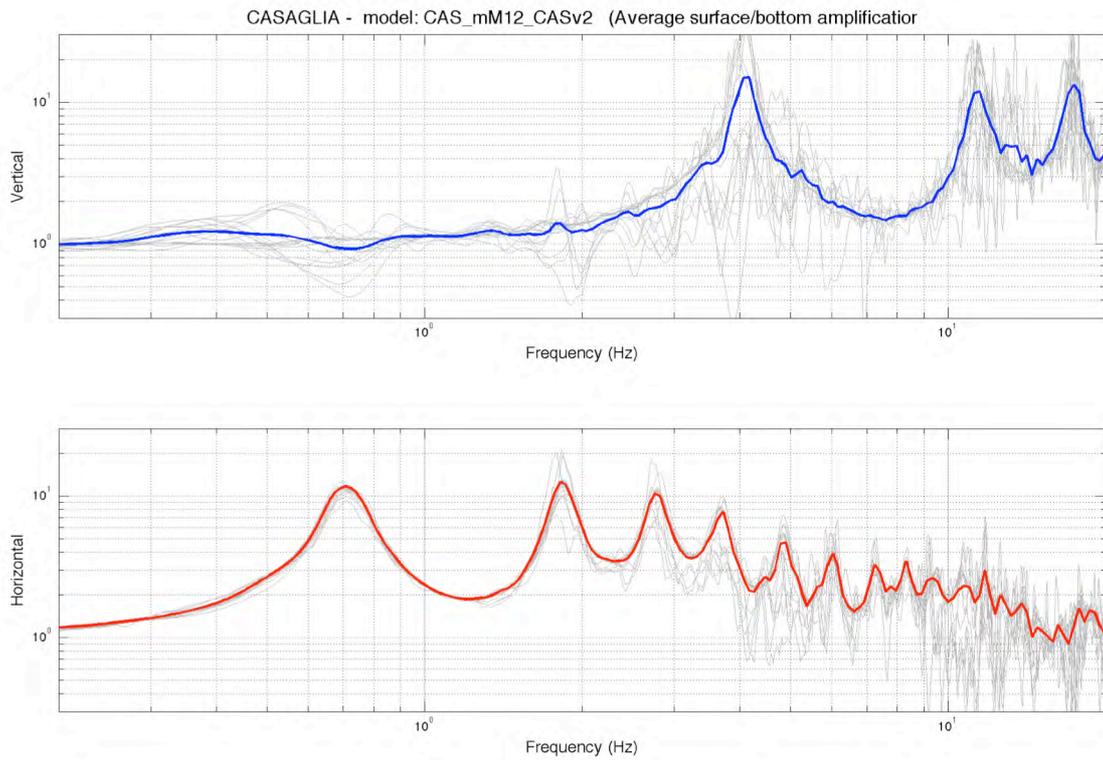


Figura 22 – Modello di sito di Casaglia. Rapporti spettrali medi calcolati tra il ricevitore in superficie e quello posto in profondità (Rsup/Rbed). Altri dettagli come in Figura 21.

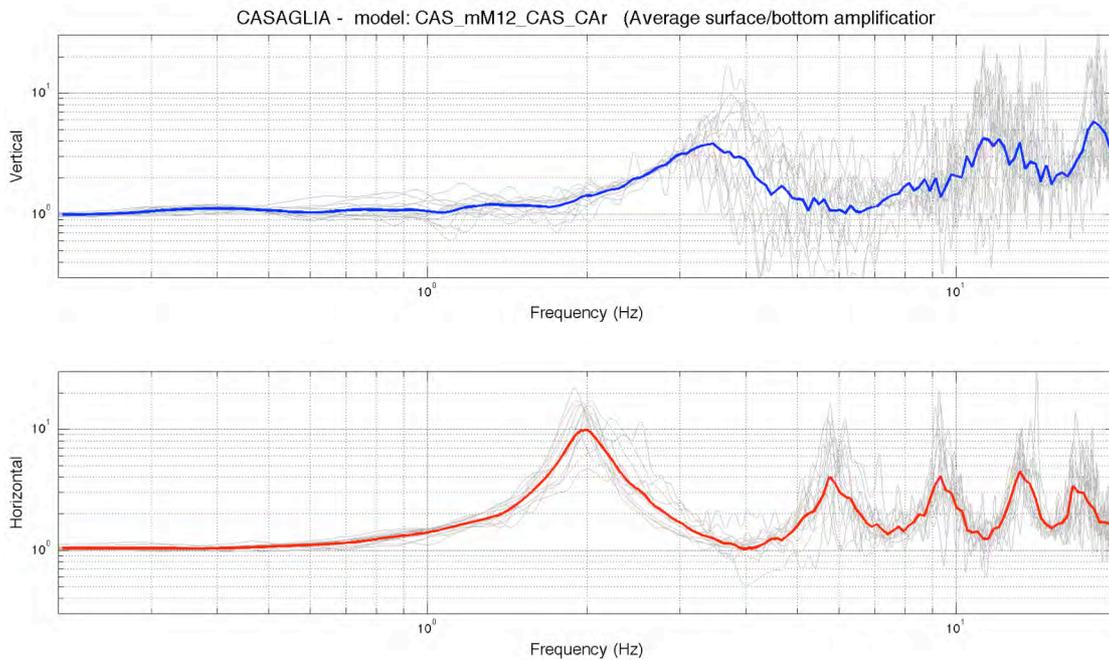


Figura 23 – Modello del sito virtuale di riferimento in Classe A. Rapporti spettrali medi calcolati tra il ricevitore in superficie e quello posto in profondità (CASup/CABed). Altri dettagli come in Figura 21.

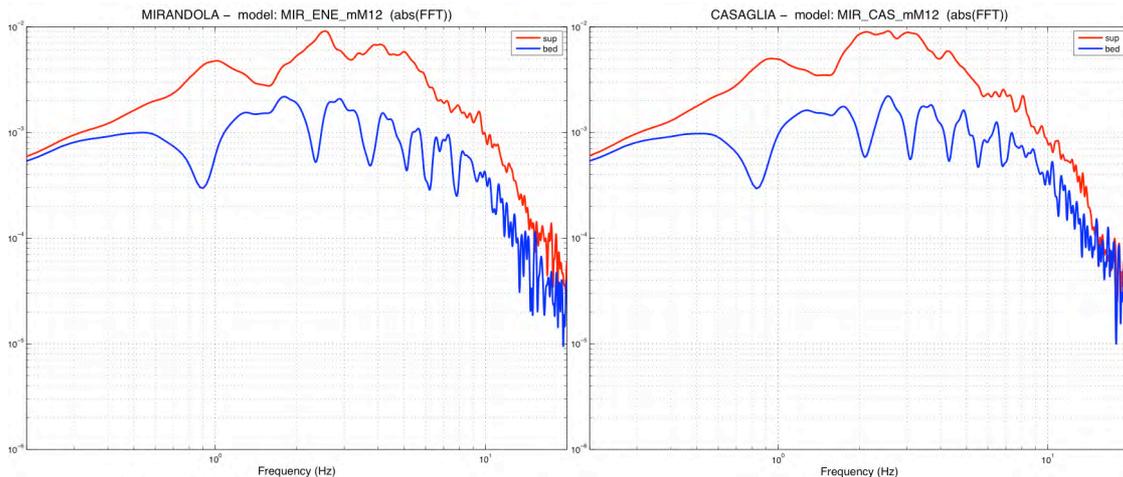


Figura 24 – Spettri di ampiezza (componente orizzontale) calcolati per il ricevitore in superficie (rosso) e in profondità (blu) per i modelli di Mirandola (sinistra) e Casaglia (destra). L'esempio si riferisce alla simulazione dell'evento n. 8 della Tabella 7 (29/05/2012 ore 10:55:57).

Si noterà che i due siti hanno caratteristiche amplificative molto simili, con un livello medio di amplificazione compreso tra 2 e 3 che si estende su tutta la banda 0.6-5 Hz. Entrambi i siti hanno un picco in bassa frequenza (Mirandola a 0.9-1.0 Hz, Casaglia a 0.7-0.8 Hz) che arriva a un'ampiezza di circa 3. A frequenze superiori i due siti mostrano comportamenti moderatamente differenti: Mirandola ha due picchi moderati centrati a frequenza 2.4 Hz e 4 Hz e con valori rispettivamente pari a circa 4 e 3.5. Casaglia invece presenta un unico lobo molto più esteso in banda con massimo pari a circa 4 alla frequenza di circa 2.5 Hz. È interessante notare anche la risposta sostanzialmente neutra della componente verticale, che, solo per il sito di Casaglia, mostra una debole amplificazione in alta frequenza.

È stata anche verificata la stabilità delle curve di amplificazione stimate rispetto a diverse caratterizzazioni del sito di riferimento virtuale in Classe A, calcolando le risposte per due modelli con strati superficiali resi progressivamente più rigidi fino a un massimo $VS = 750$ m/s per lo strato più superficiale. I risultati ottenuti sono molto simili a quelli delle **Figure 25-26** e confermano la stabilità delle stime.

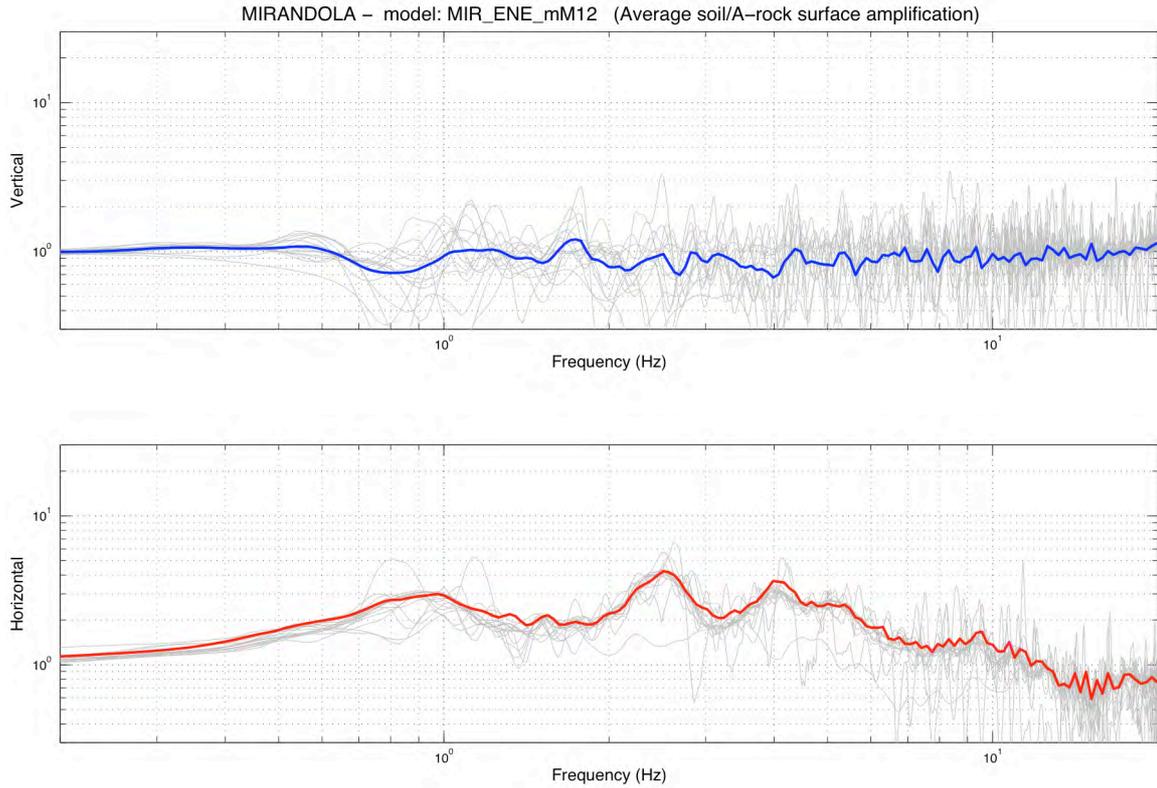


Figura 25 – Amplificazione spettrale stimata per il sito di Mirandola. Altri dettagli come in Figura 21 o nel testo.

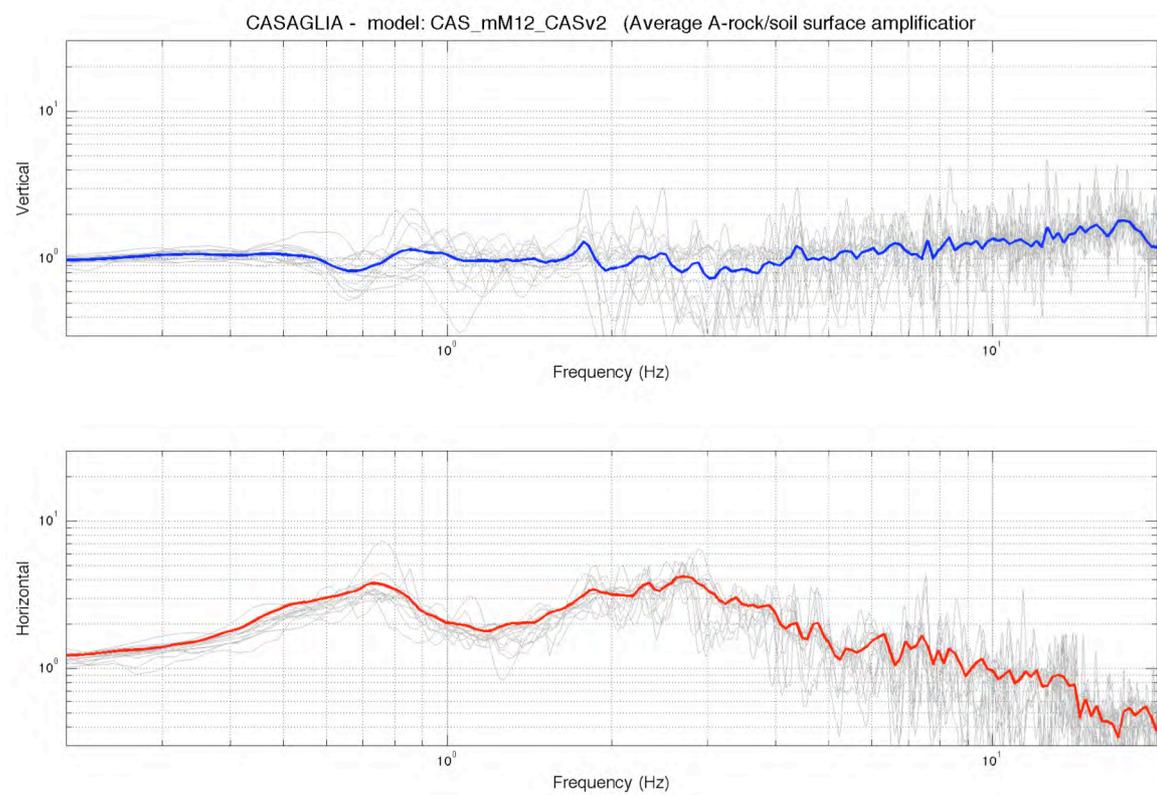


Figura 26 – Amplificazione spettrale stimata per il sito di Casaglia. Altri dettagli come in Figura 21 o nel testo.

4. Calcolo della risposta sismica spettrale da registrazioni di terremoti

Questo capitolo descrive come sono state calcolate le risposte sismiche dei siti investigati utilizzando le registrazioni di terremoti delle stazioni locali. Come anticipato nell'**Introduzione**, una delle maggiori difficoltà da superare con l'approccio sperimentale è quello della mancanza di siti di riferimento su roccia (classe A). Infatti, non solo per l'area di pianura ma anche per quella collinare appenninica non sono reperibili siti sufficientemente vicini alle stazioni di registrazione che possano fungere da riferimento dell'input sismico su roccia. Questo è uno dei motivi per cui si è reso necessario l'uso di modelli numerici, i quali sono stati utilizzati per "trasferire" alcune registrazioni al sito di riferimento virtuale. Quest'operazione è stata effettuata facendo riferimento al sito di Casaglia, dove dai primi mesi del 2013 sono disponibili dati registrati da due stazioni poste rispettivamente in profondità e superficie. La prima, FERB, appartiene alla rete permanente gestita dall'OGS e il sensore è collocato in pozzo a 135 m di profondità a livello del bedrock sismico (Miocene). La seconda, OG010, è una stazione temporanea posta in superficie vicino alla bocca del pozzo, proprio con lo scopo di creare un dataset di coppie di registrazioni bedrock/superficie. La disponibilità e l'analisi di questi dati è di grande valore e costituisce uno dei principali elementi che caratterizzano questo studio.

La procedura seguita per il calcolo della risposta spettrale di sito per via sperimentale si compone dei seguenti passi:

1. Analisi e confronto tra i rapporti spettrali superficie/bedrock calcolati per il sito di Casaglia;
2. Definizione delle funzioni di trasferimento per la conversione delle registrazioni in pozzo presso il sito di Casaglia (FERB) a registrazioni su sito di riferimento;
3. Calcolo dei rapporti spettrali con il *Generalized Inversion Method* (GIT);
4. Definizione delle funzioni di amplificazione spettrale;

5. Selezione di accelerogrammi rappresentativi dell'input sismico secondo gli *Indirizzi e criteri di microzonazione*;
6. Calcolo degli spettri di risposta e dei fattori di amplificazione specifici di sito.

In questo capitolo sarà data una descrizione delle procedure e dei risultati ottenuti con i passi da 1 a 4, cioè fino alla stima dell'amplificazione spettrale (di Fourier) dei siti investigati. Gli ultimi due punti (5 e 6), che riguardano il calcolo degli spettri di risposta specifici di sito e sono finalizzati alla microzonazione, saranno descritti nel successivo **Capitolo 5**.

4.1 Analisi e confronto tra i rapporti spettrali superficie/bedrock calcolati per il sito di Casaglia

Per il sito di Casaglia, dove è disponibile la coppia di sensori in pozzo (FERB) e superficie (OG010), sono stati calcolati i rapporti spettrali tra registrazioni sincrone. La **Figura 27** mostra la mappa degli eventi utilizzati.

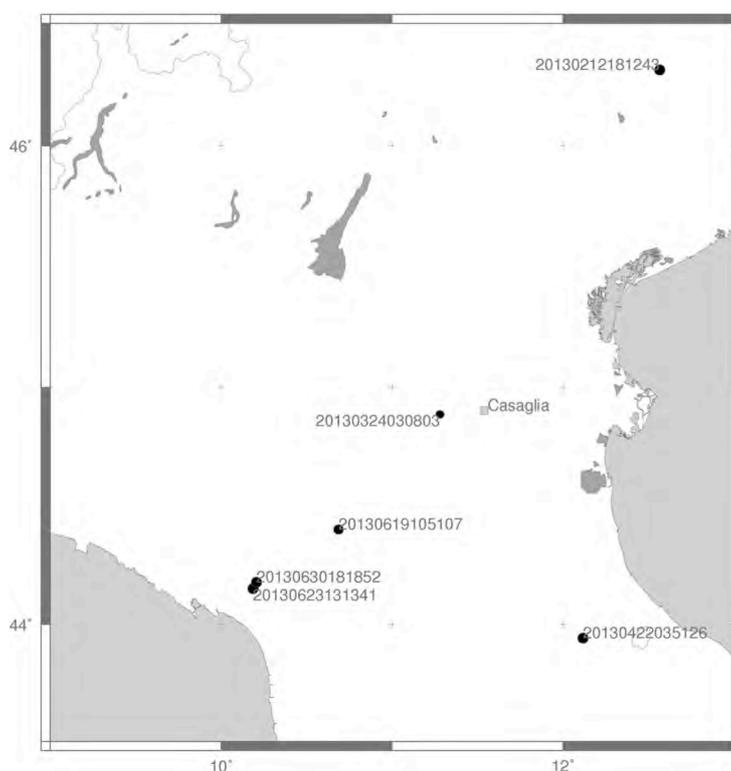


Figura 27 – Mappa degli eventi utilizzati per calcolare i rapporti spettrali sperimentali OG010/FERB.

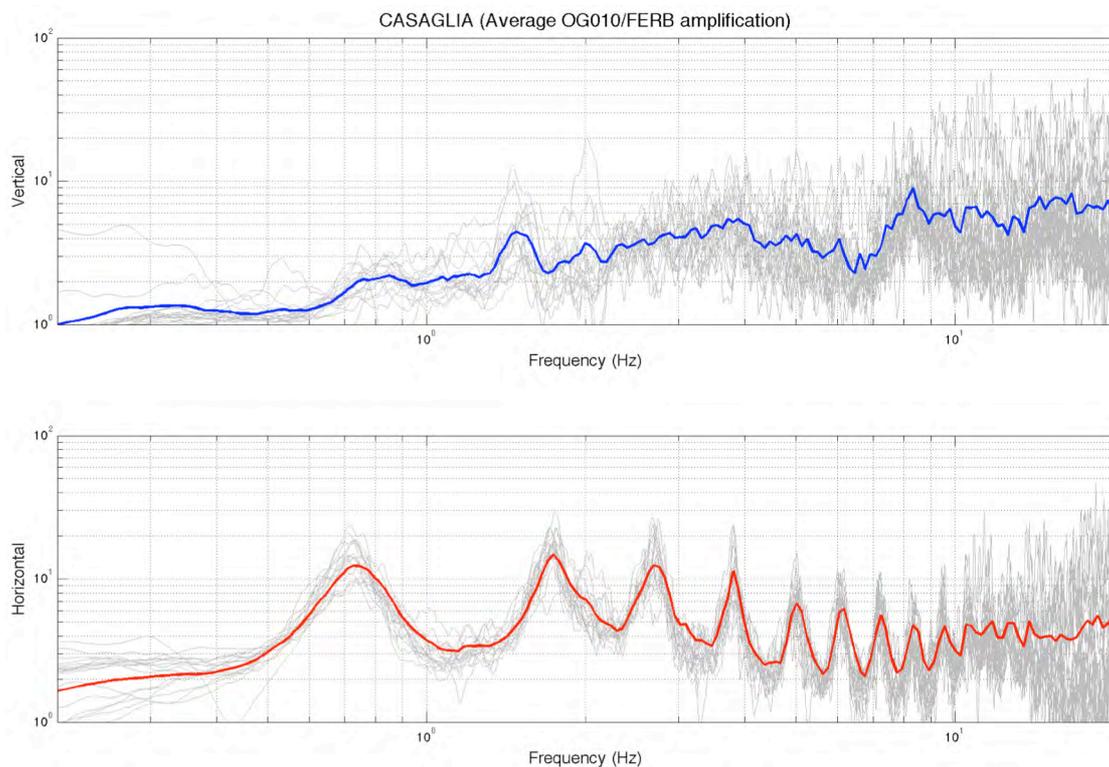


Figura 28 – Rapporti spettrali sperimentali OG010/FERB. In alto e in basso, rispettivamente, componente verticale (blu) e orizzontale (rosso). Le curve spesse e colorate rappresentano la media dei rapporti spettrali calcolati per i singoli eventi (curve grigie in secondo piano).

Le **Figure 28** e **29** mostrano rispettivamente i rapporti spettrali ottenuti relativi a due eventi registrati in sincrono in profondità e in superficie, e due esempi di spettri di Fourier.

La **Figura 28** è una delle figure più importanti di questo studio. Essa definisce la funzione di trasferimento stimata per via sperimentale tra la stazione posta in profondità a 135 m e quella posta in superficie. In pratica, la funzione di trasferimento per la componente orizzontale è una funzione periodica nel dominio delle frequenze: il primo picco si colloca a frequenza di circa 0.74 Hz e gli altri picchi seguono con cadenza regolare di circa 1.1 Hz. La forma di questa funzione è determinata principalmente a due fattori: profondità del ricevitore (z) e velocità media al di sopra di esso (V_{mean}). In pratica, il ricevitore in profondità registra un campo d'onda che, a seguito di interferenza, combina il campo d'onda entrante (*upgoing*), quello riflesso alla superficie (*downgoing*) con l'effetto delle riverberazioni interne alla stratificazione esistente sopra al ricevitore. Alla profondità del ricevitore si creano delle interferenze distruttive che si traducono in

buchi negli spettri. Questi buchi sono determinati dalle onde di corpo e caratterizzano tutte le registrazioni, soprattutto quelle dovute a eventi vicini. La **Figura 29** ne mostra due esempi: i buchi sono chiaramente riconoscibili nello spettro delle registrazioni di FERB (in blu) nonostante la diversità degli spettri. Le registrazioni in superficie di OG010 mostrano, oltre all'aumento di ampiezza dovuto alla superficie libera, i picchi di amplificazione locale.

Le posizioni dei buchi spettrali, o dei picchi nei rapporti spettrali, sono importanti per le finalità di questo studio. Per un modello omogeneo si può dimostrare che la cadenza dei picchi è regolata dalla seguente formula:

$$\Delta f = V_{mean} / (2z).$$

Considerando dunque la profondità di 135 m e la cadenza media dei picchi pari a 1.1 Hz se ne deduce una velocità media delle onde S pari a 297 m/s. Si sottolinea l'alta affidabilità di questa stima, essendo ottenuta da rilevazioni che misurano l'interferenza. Per questo motivo il rapporto spettrale medio tra le registrazioni relative a un ricevitore posto in superficie e uno posto in profondità è anche chiamato funzione interferometrica. Le funzioni interferometriche sono, per loro natura, molto sensibili alle variazioni del modello superficiale e quindi sono un ottimo strumento per verificare l'attendibilità del modello adottato per il sito.

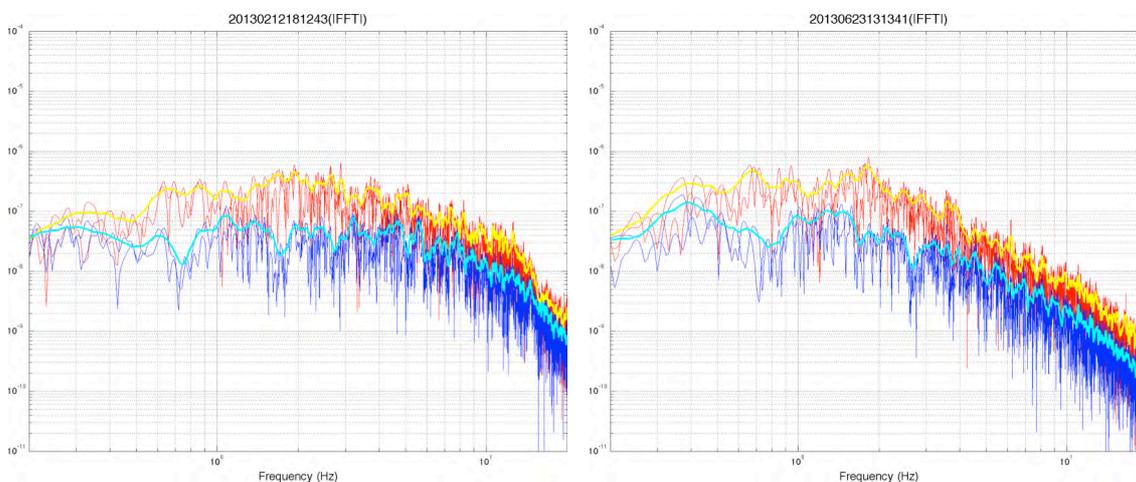


Figura 29 – Spettri di Fourier (massimo delle due componenti orizzontali) calcolati per due distinti eventi per le stazioni FERB (blu) e OG010 (rosso). Le curve azzurra e gialla sovrimposte agli spettri sono ottenute dalle precedenti con smoothing.

In **Figura 30**, i rapporti spettrali stimati tra OG010 e FERB sono confrontati con quelli calcolati attraverso le modellazioni numeriche per i siti di Casaglia e Mirandola (cfr. **Capitolo 3**). Si riconosce la notevole coerenza tra le funzioni interferometriche stimate

per via sperimentale con quelle dedotte per via numerica per il sito di Casaglia. In particolare, si noti l'ottima corrispondenza delle frequenze e delle ampiezze dei picchi che testimonia la correttezza del modello utilizzato.

Si può quindi concludere che si è trovata una buona consistenza tra le funzioni di trasferimento da bedrock a superficie stimate per via sperimentale e quelle calcolate con il modelling. Ovviamente le considerazioni appena fatte valgono per Casaglia e non per il sito di Mirandola dove le stime sperimentali non sono disponibili.

I risultati mostrati in **Figura 30** sono consistenti solo in parte con quelli del precedente studio effettuato da Margheriti et al. (2000). La curva sperimentale di questi autori (cfr. loro Figura 8) evidenzia un andamento simile con picchi alle medesime frequenze di quelle stimate in questo studio. Tuttavia si riconoscono anche delle importanti differenze: le curve stimate in questo studio, dove -lo ricordiamo- il modello è più aggiornato, predicono un rapporto spettrale superficie/bedrock con ampiezza dei primi quattro picchi di amplificazione superiore a 10 e graduale ma netto decadimento dell'ampiezza per i picchi a frequenze più alte a valori che si attestano tra 6 e 4. Invece quella stimata da Margheriti et al. (2002; Figura 10) mostra sempre dominanti i due picchi centrali, e i valori dei primi quattro picchi sono sempre inferiori a 10.

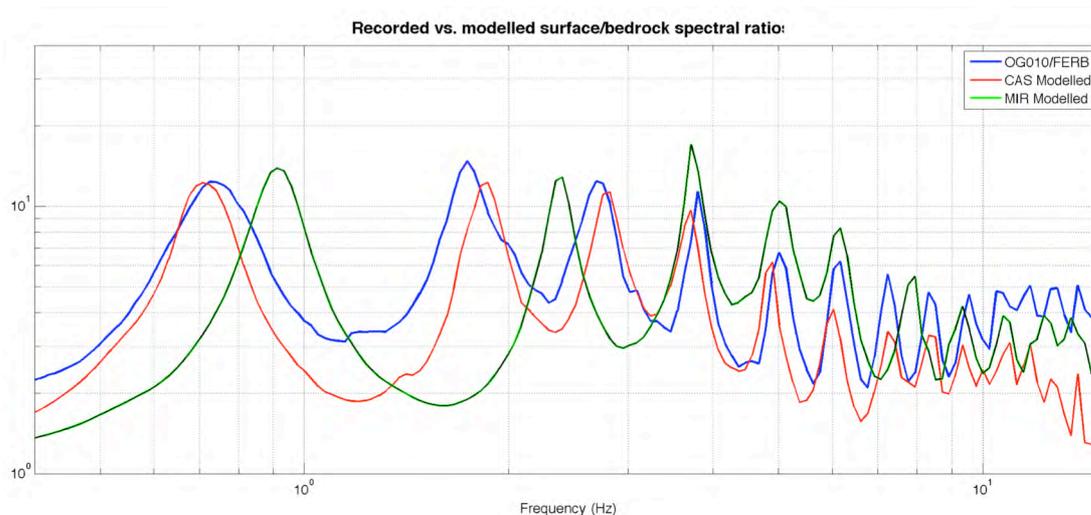


Figura 30 - Confronto tra i rapporti spettrali calcolati tra ricevitore in superficie e in pozzo rispettivamente su base sperimentale (blu, OG010/FERB) e attraverso il modelling per i modelli di Casaglia (rosso, CAS) e Mirandola (MIR, verde).

4.2 Funzioni di trasferimento per la conversione delle registrazioni a registrazioni su sito di riferimento

Come detto, il sito di Casaglia assume un ruolo importante per questo studio, poiché, possedendo una stazione in pozzo e una in superficie, permette di studiare le relazioni esistenti tra le registrazioni simultanee effettuate da queste due stazioni. Le registrazioni

in pozzo sono un elemento importante non solo per stimare la risposta del sito (in superficie) di Casaglia ma anche per riferire le registrazioni a un sito di riferimento virtuale.

La **Figura 31** illustra lo schema secondo cui sono definite le funzioni di trasferimento che permettono di “convertire” le registrazioni effettuate dalla stazione FERB, o anche dalla stazione OG010, a registrazioni rappresentative del moto del suolo presso il sito di riferimento virtuale. Ognuno dei tratti orientati rappresentati in figura consiste nel rapporto spettrale dei sismogrammi del ricevitore di arrivo su quello di partenza.

Per ogni coppia di ricevitori, la procedura effettua i rapporti spettrali tra i rispettivi sismogrammi, ne considera lo spettro di ampiezza (per le due componenti orizzontali viene presa la media dei due valori). Le funzioni di trasferimento sono costruite mediando i rapporti spettrali relativi a differenti eventi. Qui sotto si fornisce una descrizione sintetica delle funzioni di trasferimento visualizzate in **Figura 31**:

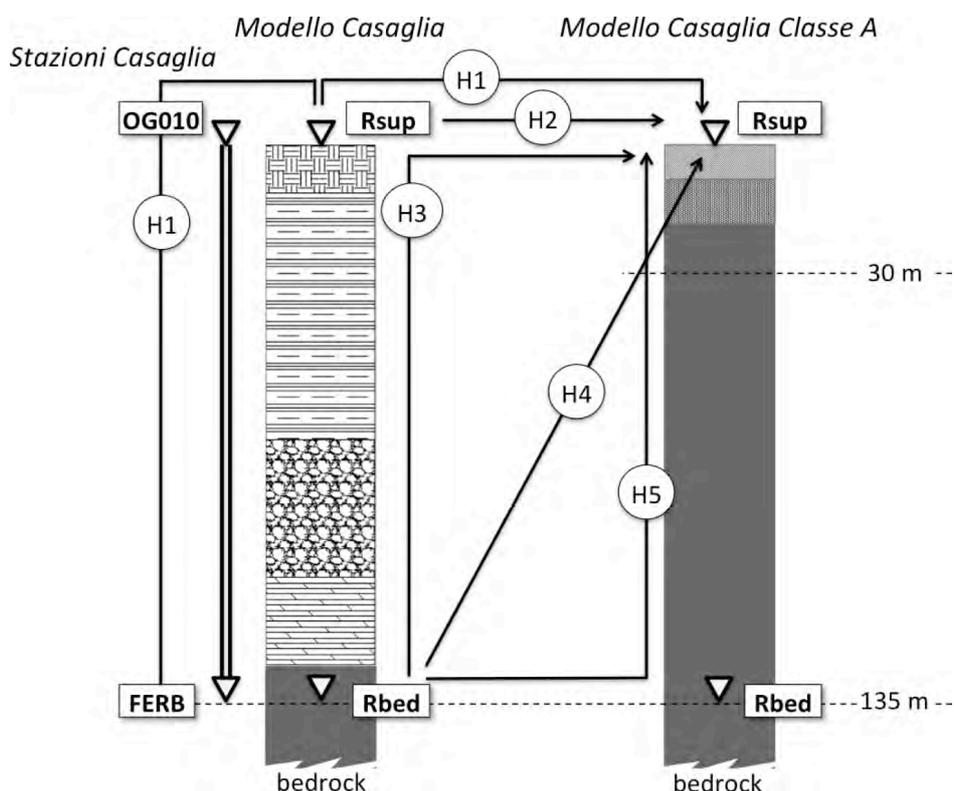


Figura 31 – Schema di calcolo delle funzioni di trasferimento (H) verso il ricevitore in superficie rappresentativo del sito di riferimento virtuale. In figura sono rappresentati: il pozzo di Casaglia (linea doppia a sinistra) con le stazioni in pozzo (FERB) e in superficie (OG010); i due modelli numerici, rispettivamente “Modello Casaglia”, che rappresenta la stratigrafia vera, e “Modello Casaglia Classe A”, che simula il medesimo modello crostale ma con i 30 m superficiali rappresentativi di un solo classe A (roccia) per l’area appenninica emiliana; i ricevitori usati per il modelling, rispettivamente nel bedrock (Rbed) e in superficie (Rsup). Le funzioni di trasferimento che permettono di “trasferire” nel dominio spettrale le registrazioni da un ricevitore verso il sito di riferimento virtuale sono indicate con H#, dove # rappresenta un numero e corrisponde a un dato percorso.

- H1** – E' una funzione a due tratti, ibrida sperimentale-sintetica. Il primo tratto, rapporto OG010/FERB, è interamente sperimentale, mentre il secondo è calcolato con le modellazioni numeriche;
- H2** – E' funzione a un tratto, interamente sintetica, e converte i sismogrammi del ricevitore in superficie del modello realistico in quelle corrispondenti al suolo in Classe A;
- H3** – E' una funzione a due tratti, interamente sintetica. Il primo tratto conduce dal bedrock alla superficie, mentre il secondo porta dal ricevitore alla superficie del sito di Casaglia al ricevitore alla superficie del sito virtuale in Classe A;
- H4** – E' una funzione a un tratto, interamente sintetica, e conduce dal bedrock del modello di Casaglia al ricevitore in superficie del sito virtuale in Classe A;
- H5** – E' una funzione a due tratti, interamente sintetica. Il primo tratto conduce dal modello di Casaglia al bedrock del modello in Classe A, mentre il secondo porta dal bedrock del modello in Classe A alla sua superficie.

Le funzioni H1, H3, H4 e H5 permettono di utilizzare le registrazioni in pozzo di FERB come registrazioni di riferimento. La funzione H2 permette invece di usare come riferimento le registrazioni di OG010. Per loro costruzione, ci si aspetta che le funzioni H3, H4, e H5, tutte costruite su base numerica, siano equivalenti. La **Figura 32** dimostra che è effettivamente così, ed evidenzia inoltre che le funzioni H3-H5 hanno una forte coerenza anche rispetto alla funzione ibrida H1.

La **Figura 33** mostra invece la funzione H2 che, operando il trasferimento tra suolo locale e suolo in classe A, ha l'effetto di de-amplificare il moto del suolo. In **Figura 34** sono mostrate infine le curve che definiscono i due tratti delle funzioni di trasferimento H1, H3 e H5.

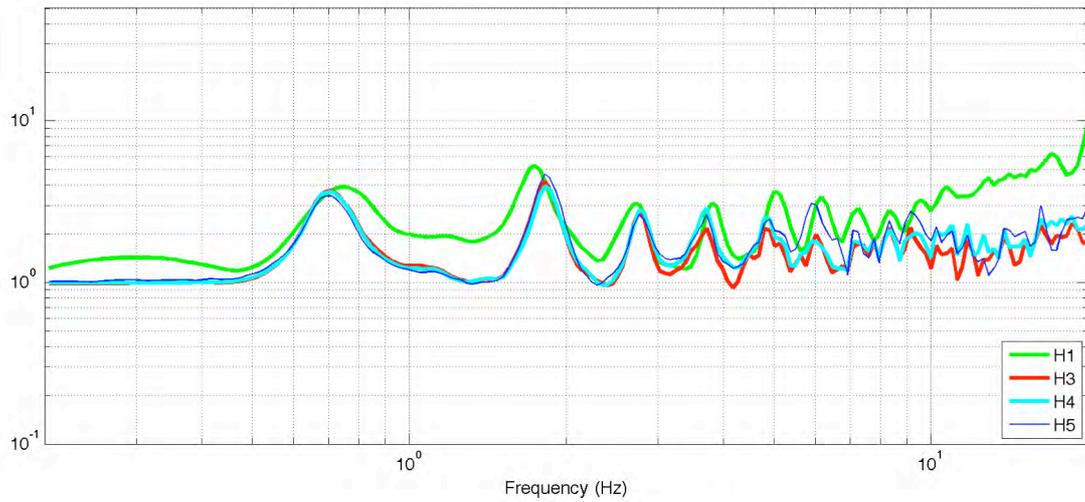


Figura 32 - Funzioni di trasferimento dal ricevitore posto nel bedrock a profondità 135 m al ricevitore posto in superficie del sito in classe A (sito di riferimento virtuale).

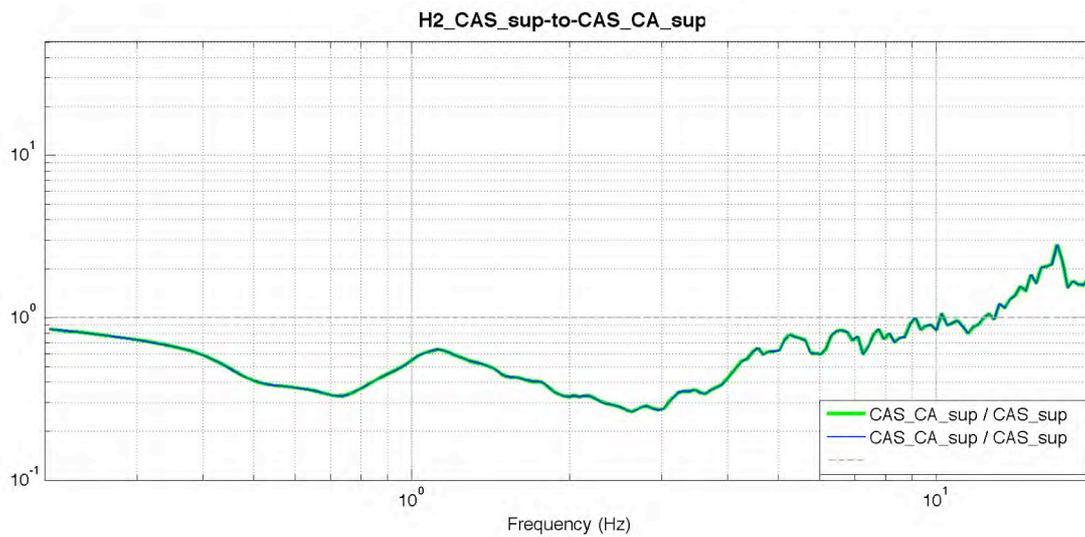


Figura 33 - Funzioni di trasferimento dal ricevitore posto in superficie del modello di Casaglia al ricevitore posto in superficie del sito in classe A (sito di riferimento virtuale).

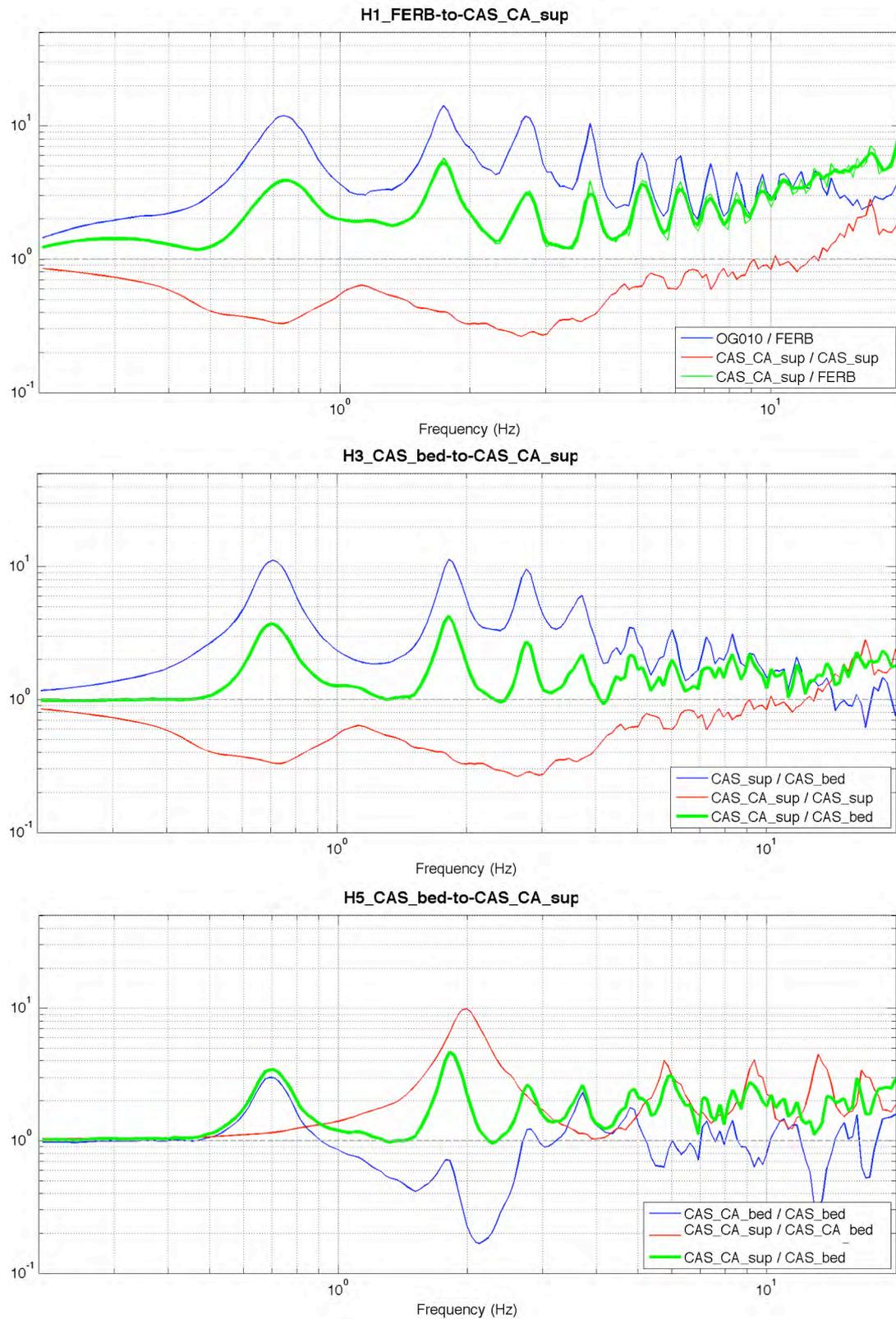


Figura 34 – Funzioni di trasferimento H1, H3 e H5 (rispettivamente dall'alto verso il basso, curve verdi) e i due tratti che concorrono alla loro composizione (in blu e rosso). Maggiori dettagli in Figura 31.

4.3 Calcolo dei rapporti spettrali con il *Generalized Inversion Method* (GIT)

Il calcolo dei rapporti spettrali da registrazioni di terremoti è il punto di partenza per definire le curve di amplificazione spettrale, gli spettri di risposta specifici per il sito e i fattori di amplificazione. A partire dalla prima procedura quantitativa proposta da Bocherdt (1970), in cui il rapporto spettrale (RSSR) è calcolato dalle registrazioni sincrone del medesimo terremoto (per le diverse componenti) presso il sito di interesse e un sito su roccia, si è passati a tecniche basate su procedure di inversione (GIT, Andrews, 1986) che permettono l'utilizzo di registrazioni asincrone (ovvero di eventi diversi) e quindi l'utilizzo di un maggior numero di eventi. Quest'ultima tecnica fornisce quindi stime di risposta spettrali più bilanciate e meno influenzate dai singoli eventi.

In questi ultimi anni, il metodo GIT è stato ulteriormente sviluppato con lo scopo di migliorare l'affidabilità dei rapporti spettrali (Laurenzano et al., 2012). Il nuovo codice di calcolo stima, per ogni registrazione, il rapporto segnale/disturbo (SNR) tra il segnale dell'evento e il segnale di rumore pre-evento, e lo usa come peso all'interno del processo d'inversione operato dal GIT. Per ogni stazione, il metodo fornisce assieme al rapporto spettrale stimato anche una curva spettrale che rappresenta la sua affidabilità, ovvero permette di stabilire con precisione la banda di frequenze all'interno della quale il rapporto spettrale è effettivamente dovuto al segnale dei terremoti e non invece al rumore locale. I grafici di amplificazione che saranno illustrati più avanti mostreranno questa curva-peso e come essa viene utilizzata.

La prima operazione per l'applicazione del GIT è quella di costruzione del dataset di terremoti registrati dalle stazioni per cui si intende stimare la risposta sismica di sito. L'estrazione delle registrazioni di terremoti dai dati di forme d'onda in continuo è effettuata sulla base della lista degli eventi del Bollettino nazionale dei terremoti (ISIDE Working Group (2010) gestito da INGV) sulla base di criteri di selezione empirica. Le forme d'onda estratte vengono quindi raccolte e organizzate per ogni stazione e ogni singolo evento, e tra queste –operazione cruciale per la buona riuscita del metodo– vengono selezionate solo quelle che presentano un rapporto segnale/rumore sufficientemente elevato. La **Figura 35** mostra la posizione degli eventi selezionati e utilizzati in questo studio.

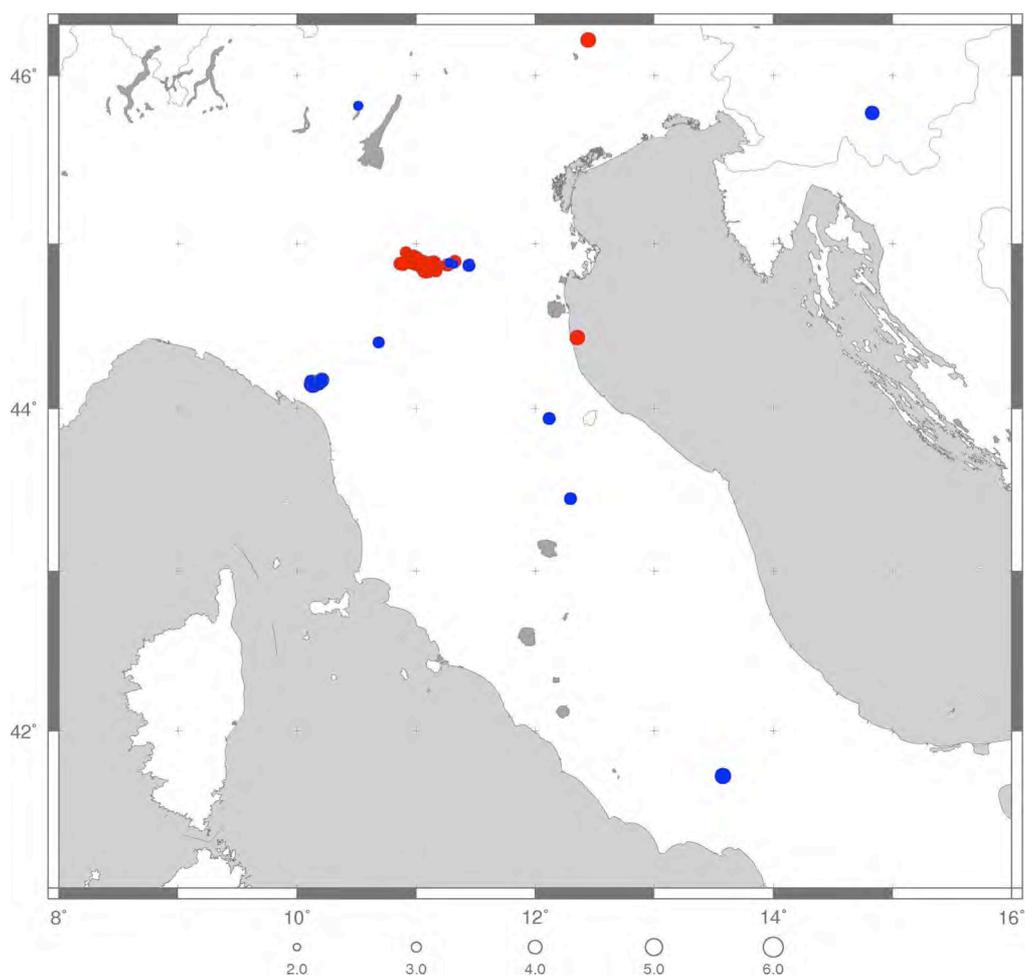


Figura 35 – Terremoti usati con il metodo GIT in questo studio per la stima della risposta sismica di sito.

Partendo dal dataset di registrazioni selezionato sono stati calcolati per tutti i siti gli spettri di Fourier che costituiscono la base per il calcolo dei rapporti spettrali. Gli spettri di Fourier vengono quindi corretti per l'attenuazione e per la funzione di sorgente in modo da riportarli a un riferimento comune. A questo punto vengono stimati i rapporti spettrali per i vari siti rispetto ai siti di riferimento assunti. Successivamente vengono costruite le curve di amplificazione spettrale, che sono ottenute dai rapporti spettrali attraverso una operazione di "smoothing" e "tapering" in frequenza per filtrare la risposta nella banda di frequenze di interesse sulla base della curva "peso", che rappresenta il rapporto segnale disturbo medio per gli eventi considerati. In questo studio sono stati ritenuti affidabili i valori dei rapporti il cui peso è maggiore di 5.

La **Figura 36** mostra i rapporti spettrali stimati per tutti i siti (in alto) e per il sito OG010 (in basso). La curva nera sottile è direttamente confrontabile con la curva rossa di **Figura 26** che rappresenta l'amplificazione calcolata per Casaglia per via puramente

numerica. Si riconosce il largo lobo di moderata amplificazione che si estende in banda da 0.4 Hz a circa 6 Hz, con due moderati picchi centrati rispettivamente intorno a 0.6 Hz e 2.5 Hz. Per scelta costruttiva, la curva di amplificazione rimuove molte “irregolarità” del rapporto spettrale calcolato con il GIT attraverso uno smoothing.

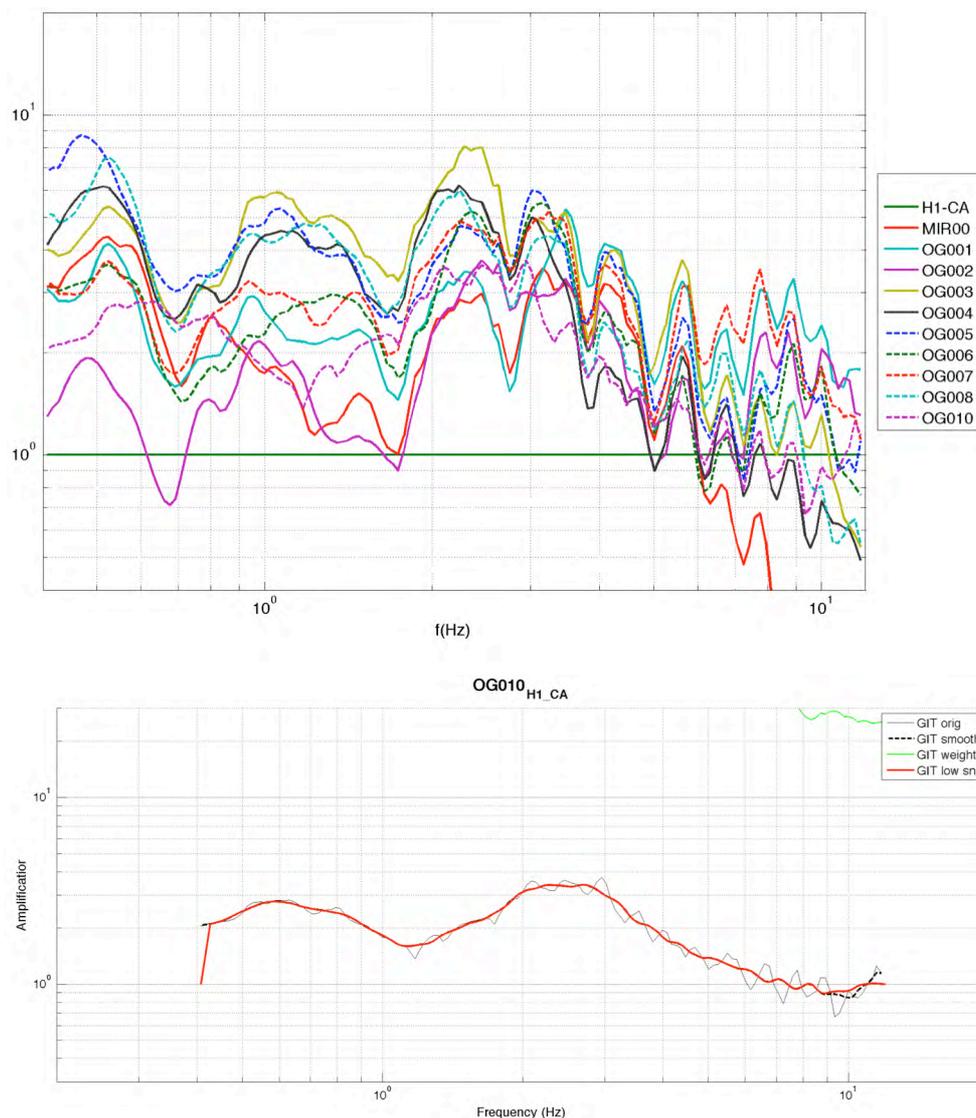


Figura 36 – Rapporti spettrali stimati con il GIT rispetto al sito di riferimento virtuale (H1_CA) per tutti i siti (in alto) e in particolare (in basso) per il sito di Casaglia (stazione OG010). Linea nera sottile: rapporto spettrale originale calcolato con GIT; linea nera spessa tratteggiata: rapporto spettrale cui è applicato lo “smoothing”; linea verde: funzione di peso che definisce l’attendibilità della stima effettuata con il GIT; linea rossa continua: curva di amplificazione spettrale risultante dopo l’operazione di filtraggio passa-basso e utilizzata per il calcolo degli spettri di risposta specifici di sito.

5. Spettri di risposta di sito e amplificazioni spettrali di risposta

Una volta che sono state stimate le amplificazioni spettrali di Fourier nel dominio delle frequenze, si può procedere con il calcolo degli spettri di risposta specifici di sito e i fattori di amplificazione spettrale di risposta. Questa è la parte di studio più direttamente legata alla microzonazione sismica.

Questa fase si svolge seguendo la seguente procedura:

1. Selezione dell'input sismico;
2. Calcolo delle accelerazioni al sito attraverso convoluzione delle storie temporali con le amplificazioni spettrali specifiche di sito (GIT);
3. Calcolo degli spettri di risposta;
4. Calcolo dello spettro di risposta medio specifico di sito e dei fattori di amplificazione spettrale.

Tutti gli spettri di risposta calcolati per questo studio assumono un valore dello smorzamento pari a 5%.

Il primo passo è la scelta dell'azione sismica di riferimento, che, in accordo agli *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica* (Gruppo di Lavoro MS, 2008), consiste nel selezionare 5 registrazioni accelerometriche caratteristiche per l'area studio. Siccome in ambito nazionale si stanno svolgendo altri studi simili, si è ritenuto opportuno seguire una strada già tracciata da altri autori per assicurare la compatibilità e confrontabilità dei risultati. Per la scelta delle storie accelerometriche che definiscono l'azione sismica ci si è dunque riferiti allo studio svolto da Faccioli et al (2013) nell'ambito del Progetto S2 (2013). La **Tabella 9** ne riassume i principali dati identificativi. I dati sono stati scaricati dalla banca dati ITACA (Working Group ITACA, 2010). La **Figura 37** mostra gli spettri di risposta relativi alle 5 storie accelerometriche assunte e lo spettro di risposta medio risultante.

Evento	Paese	Data	Lat	Long	Mw	Stazione	R (km)
Friuli	Italia	1977/09/16	46.28	12.98	5.3	SMT	9.1
Golfo di Patti	Italia	1978/04/15	38.27	15.11	6.0	NAS	33.0
Val Comino	Italia	1984/05/07	41.70	13.86	5.9	ATN	10.3
Umbria-Marche	Italia	1998/04/03	43.19	12.76	5.1	NCM	5.2
L'Aquila	Italia	2009/04/07	42.38	13.38	4.6	AQP	0.7

Tabella 9 – Principali caratteristiche degli eventi considerati per definire l'azione sismica

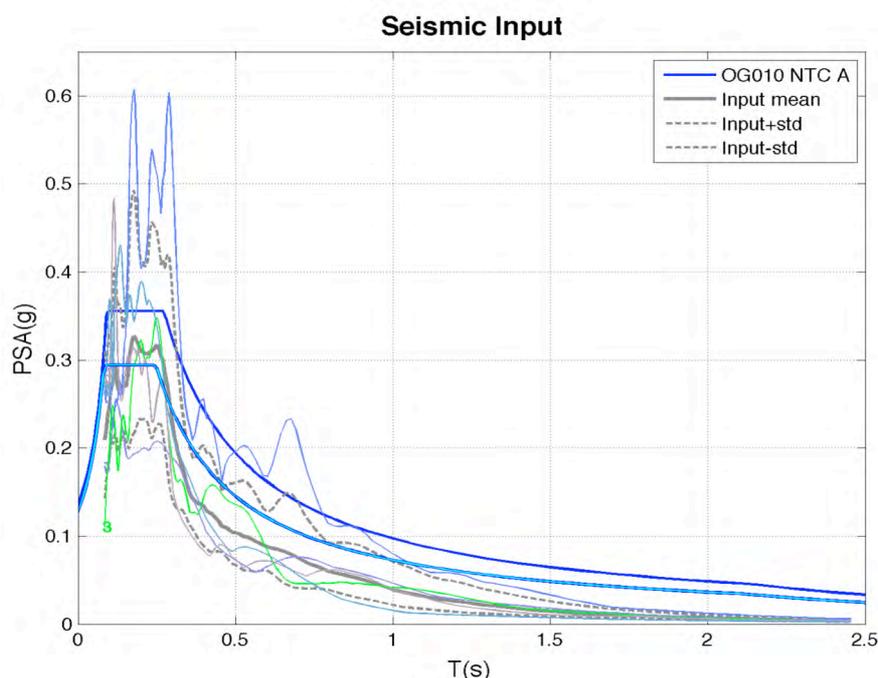


Figura 37 – Azione sismica di riferimento assunta per questo studio. Le curve sottili colorate rappresentano gli spettri di risposta delle 5 storie accelerometriche selezionate. La curva grigia spessa e le due tratteggiate rappresentano lo spettro di risposta medio e la media \pm la prima deviazione standard. In blu chiaro e scuro sono raffigurati rispettivamente lo spettro liscio corrispondente all'input sismico e lo spettro di normativa NTC-08 per Casaglia, classe di suolo A.

Dalla convoluzione di ognuna delle serie temporali assunte come azione sismica con le amplificazioni spettrali calcolate con il GIT vengono ottenute le storie temporali corrispondenti al sito, e successivamente gli spettri di risposta e lo spettro di risposta medio specifico di sito. L'**Appendice A** raccoglie singolarmente tutte le figure relative agli spettri di risposta medi specifici per tutti i siti, mentre la **Figura 38** mostra, nel pannello in alto, a scopo riassuntivo, tutti gli spettri assieme, e in quello in basso, a titolo di esempio, lo spettro calcolato per il sito di Casaglia (stazione OG010). Nella figura sono anche raffigurati gli spettri di progetto di normativa (Norme Tecniche di Costruzione – NTC, 2008) validi per Casaglia per le classi di suolo A, B e C, D ed E, e lo spettro medio

dell'azione sismica utilizzata per il calcolo, corrispondente alla media degli spettri di risposta dei sismogrammi adottati come azione sismica di riferimento.

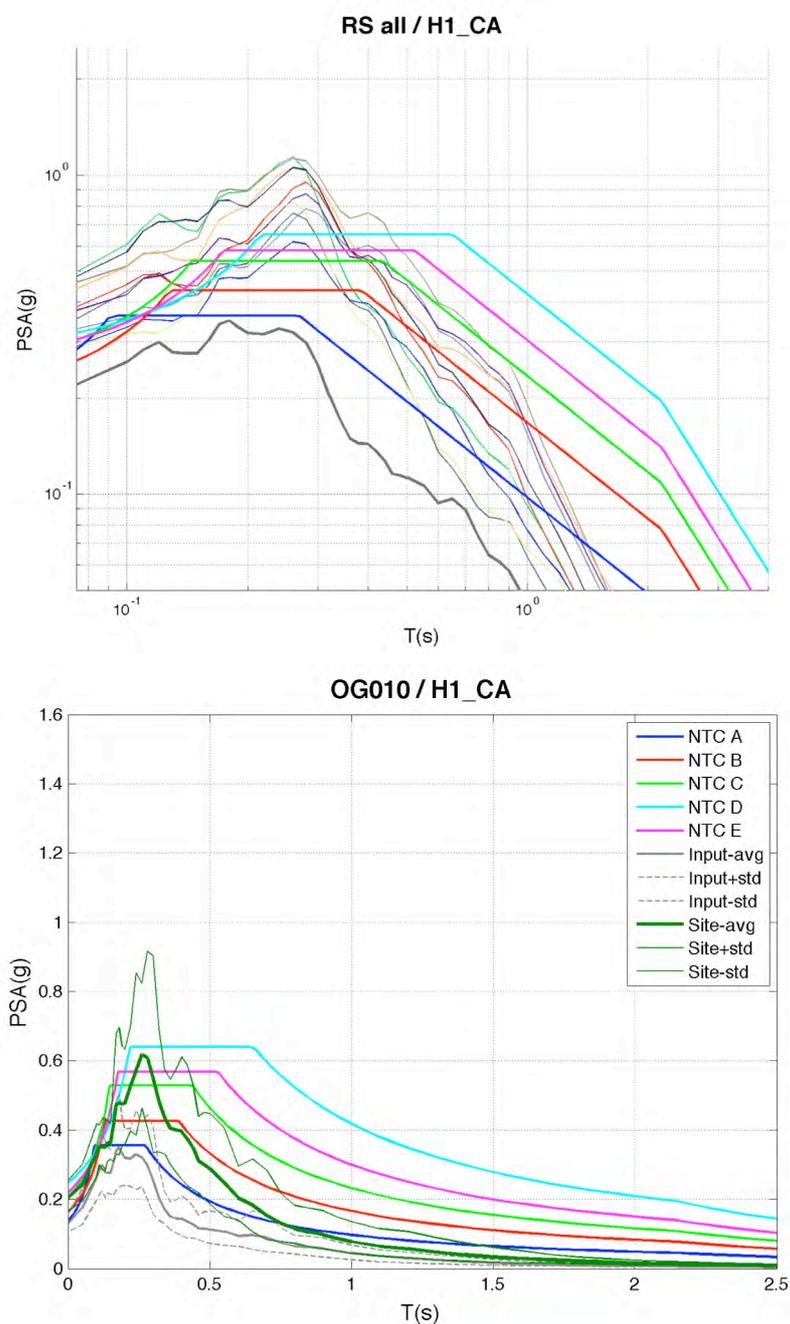


Figura 38 – Spettri di risposta specifici in accelerazione calcolati per tutti i siti (in alto) e, in basso, al sito di Casaglia (le curve verdi rappresentano lo spettro di risposta specifico di sito medio (curva grossa) e più/meno la prima deviazione standard (curve sottili)). Le curve grigie rappresentano invece lo spettro medio dell'azione sismica adottata (uguale alla media degli spettri di risposta delle storie accelerometriche assunte come rappresentative dell'azione sismica). Sono poi mostrati, per riferimento, gli spettri di normativa NTC-08 per le varie classi di suolo (rispettivamente, A = blu, B = rosso, C = verde, D = rosa, E = azzurro).

Dagli spettri di risposta specifici di sito, come quelli mostrati in **Figura 38**, si possono calcolare gli spettri lisciati. L'importanza degli spettri lisciati sta nel fatto che essi possono essere descritti in modo parametrico e possono essere confrontati direttamente con gli spettri di normativa. La procedura di lisciatura degli spettri di risposta medi adottata in questo studio è aderente a quanto riportato negli *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica* (Gruppo di Lavoro MS, 2008). Essa prevede, tra l'altro, che gli spettri di risposta di sito siano preventivamente sottoposti a uno *smoothing* in modo da ridurre eventuali irregolarità.

La **Figura 39** mostra un esempio del risultato ottenuto con la procedura di lisciatura per il sito di Casaglia (stazione OG010). Si rileva un'ottima consistenza con il sito di normativa per suolo di classe C, pur evidenziando un plateau più ristretto in banda. L'**Appendice B** raccoglie tutte le figure relative agli spettri di risposta in lisciati per tutti i siti.

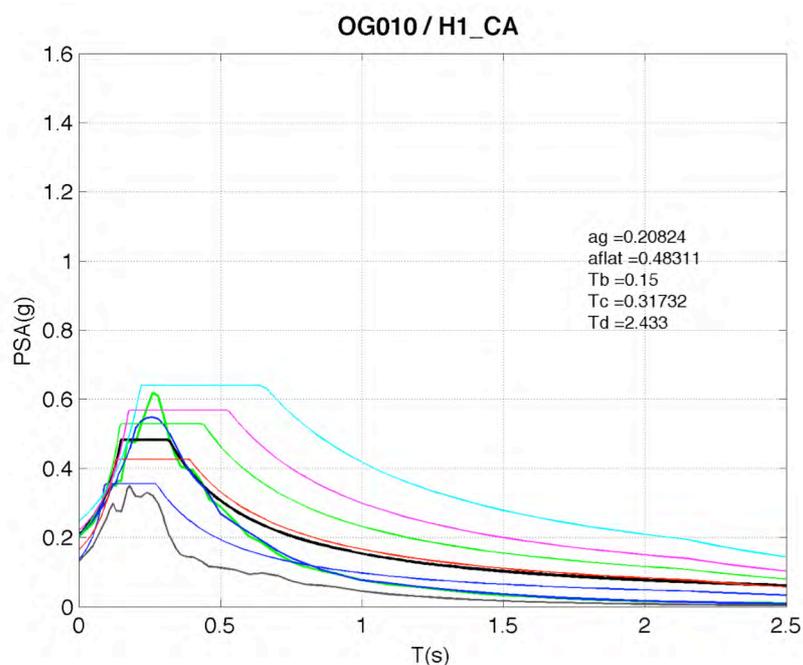


Figura 39 – Spettro di risposta di accelerazione lisciato per il sito di Casaglia, stazione OG010 (curva nera). La figura mostra anche lo spettro di risposta specifico di sito originale (curva verde) e lo spettro di risposta ottenuto dopo lo smoothing (blu), che è dato in pasto alla procedura di lisciatura. Altri dettagli come in Figura 38.

Le amplificazioni di risposta spettrale sono calcolate dal rapporto tra gli spettri di risposta in accelerazione specifici di sito e lo spettro di risposta medio relativo all'azione sismica utilizzata in input. Queste sono, a nostro parere, le quantità più importanti per la

valutazione della risposta sismica locale. Infatti, queste amplificazioni possono essere confrontate direttamente con le amplificazioni dedotte dagli spettri di normativa per le differenti classi di suolo.

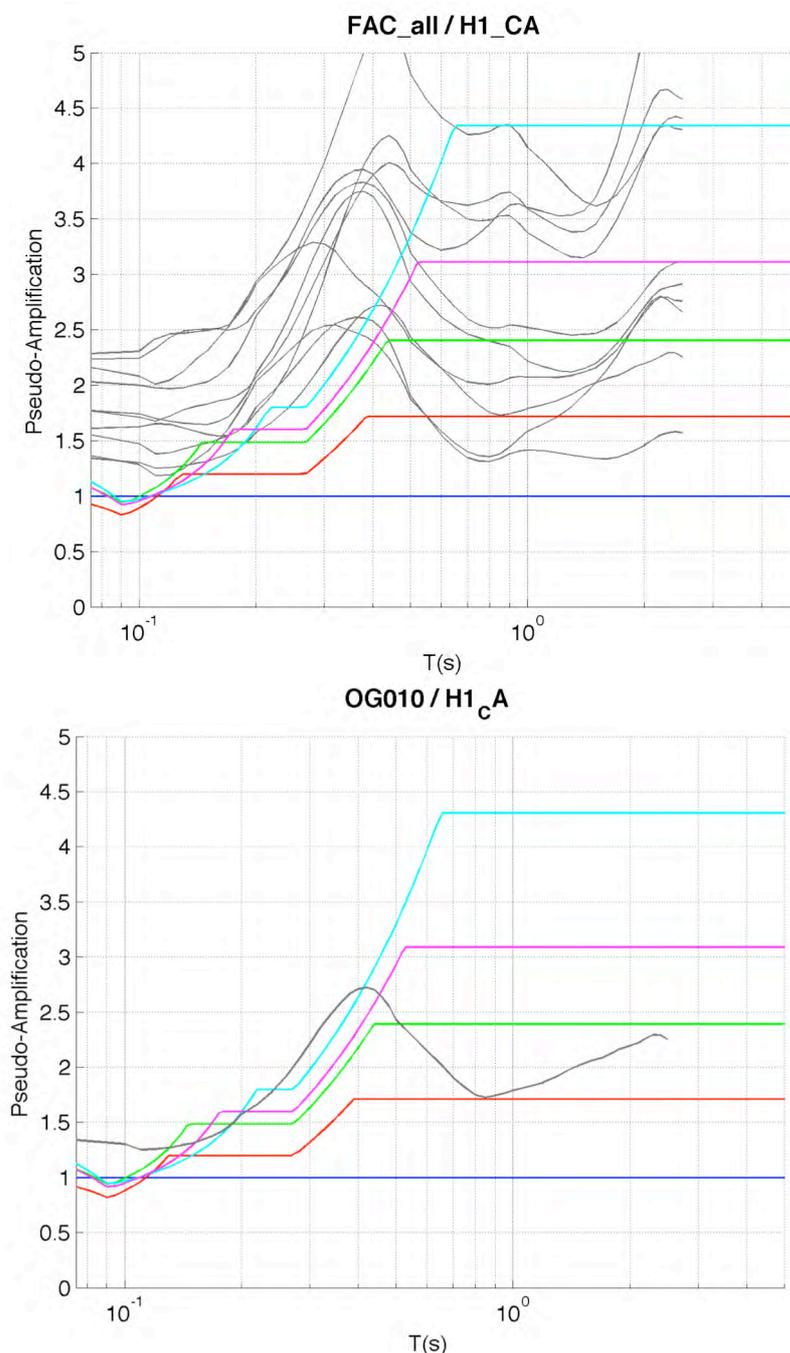


Figura 40 - Amplificazioni di risposta spettrale (linee grigie) stimate per tutti i siti (in alto) e per il sito di Casaglia, stazione OG010 (in basso). Le curve colorate mostrano le amplificazioni dedotte dagli spettri di normativa per le varie classi di suolo (rispettivamente, A = blu, B = rosso, C = verde, D = rosa, E = azzurro).

La **Figura 40** mostra, nel pannello in alto, le curve di amplificazione stimata per tutti i siti. In generale si ha un'elevata amplificazione nella banda centrale di periodi (0.3-1.5 s) che per alcuni siti raggiunge valori anche superiori a 4. L'**Appendice C** raccoglie singolarmente le figure relative alle amplificazioni di risposta spettrale in accelerazione per tutti i siti. Ogni figura riporta le amplificazioni dedotte dagli spettri di normativa per le varie classi di suolo (rispettivamente, A=blu, B=rosso, C=verde, D=rosa, E=azzurro).

Il pannello in basso di **Figura 40**, mostra, come esempio, l'amplificazione di risposta spettrale stimata per il sito di Casaglia (stazione OG010). L'amplificazione è consistente con quella di un suolo di classe C, tuttavia si riconosce un moderato picco di amplificazione a periodo 0.3-0.4 s (2.5-3.3 Hz) che raggiunge un fattore 2.5-2.7.

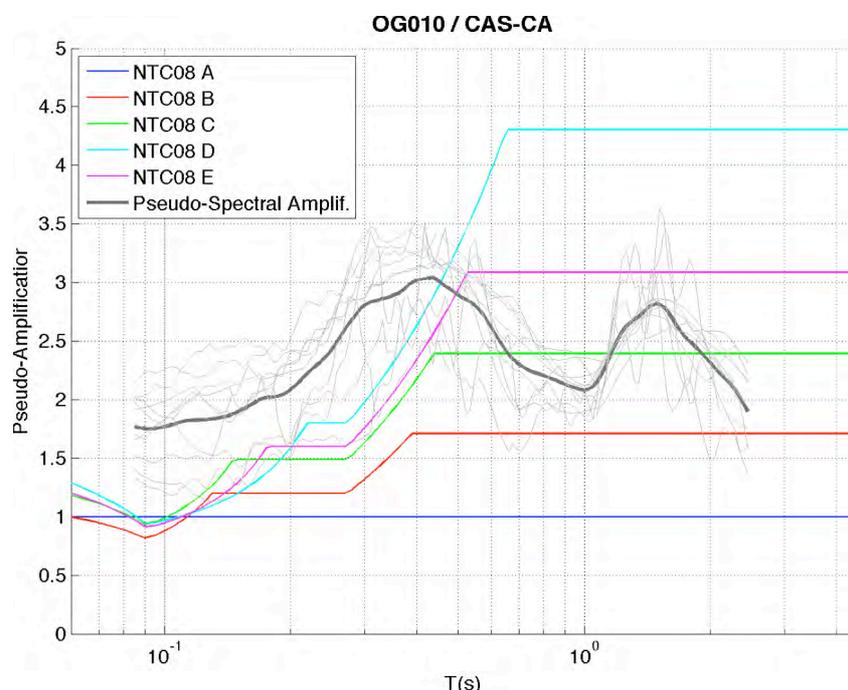


Figura 41 – Amplificazioni di risposta spettrale (linea grigia) stimata per il sito di Casaglia, stazione OG010 con le modellazioni numeriche descritte nel Capitolo 3. Le curve grigie in background mostrano le amplificazioni stimata per i singoli eventi modellati. Altri dettagli come in Figura 40.

E' interessante confrontare le curve di amplificazione spettrale stimata attraverso le due diverse strade seguite in questo studio, ovvero l'approccio basato sull'uso di registrazioni di terremoti (metodo GIT) e quello basato sulla pura modellazione numerica. Il primo caso è già stato illustrato in **Figura 40**, mentre il secondo è mostrato in **Figura 41**. Ricordiamo che la differenza tra i due approcci sta non solo nel come sono state calcolate le curve di amplificazione di Fourier ma anche nei sismogrammi usati come input. Nel primo caso questi sono costituiti da vere registrazioni la cui media

definisce l'azione sismica di riferimento; nel secondo caso si sono considerati un insieme di sismogrammi sintetici che riproducono alcuni eventi effettivamente avvenuti, ma che non rappresentano nel loro complesso un livello di input sismico necessariamente consistente con il livello di pericolosità sismica atteso per l'area.

Confrontando le due figure si riconosce che le stime ottenute su base numerica predicono un'amplificazione maggiore ai lunghi periodi. Per il resto le curve sono molto coerenti tra loro.

Un commento generale è che le stime effettuate in questo studio sia per via sperimentale sia per via teorica non tengono in considerazione fenomeni dissipativi/isteretici del suolo. Rispetto a quanto è lecito attendersi per moti forti del suolo, queste curve tendono a sovrastimare l'amplificazione nella banda dei periodi corti (orientativamente al di sotto di 1 s) e sottostimare quella nei periodi lunghi (> 1 s).

I fattori di amplificazione sono calcolati per ogni sito come media dei rapporti tra l'Intensità di Housner (SI) delle storie accelerometriche ottenute al singolo sito rispetto alle SI dei singoli terremoti selezionati in input, per le tre seguenti bande di periodi:

- 1) 0.1-0.5 s;
- 2) 0.5-1.0 s;
- 3) 0.5-2.5 s.

La **Figura 42** e la **Tabella 10** mostrano gli Fa ottenuti per tutti i siti e le tre bande considerate mentre la **Figura 43** mostra la distribuzione dei medesimi nell'area di studio sempre per le tre bande considerate. Si può notare come, per le tre bande considerate, i valori più elevati di Fa (che raggiungono, ed in alcuni casi superano il valore 4) si collochino al centro della mappa, presso i siti di Poggio Renatico (OG005), S. Agostino (OG003), Mirabello (OG008) e Ficarolo, (OG004).

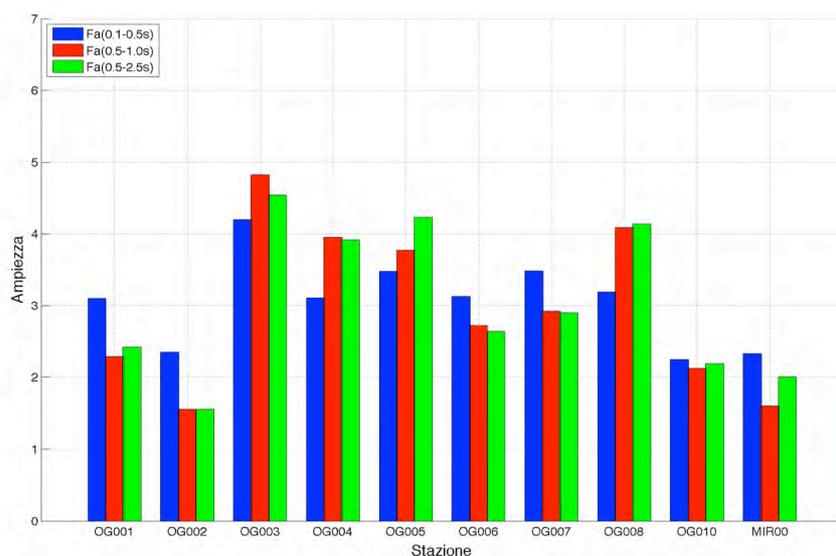


Figura 42 - Fattori di amplificazione (Fa) calcolati rispetto al sito di riferimento virtuale per le tre bande di periodi considerati (vedi legenda)

Stazioni	Fa(0.1-0.5 sec)	Fa(0.5-1.0 sec)	Fa(0.5-2.5 sec)
OG001	3.104	2.289	2.419
OG002	2.350	1.554	1.554
OG003	4.204	4.829	4.544
OG004	3.108	3.955	3.918
OG005	3.482	3.772	4.238
OG006	3.131	2.722	2.641
OG007	3.489	2.924	2.902
OG008	3.194	4.090	4.139
OG010	2.247	2.124	2.195
MIR00	2.333	1.602	2.010

Tabella 10 – Fattori di amplificazione (Fa) calcolati rispetto al sito di riferimento virtuale FERB-H1 per tre bande di periodi.

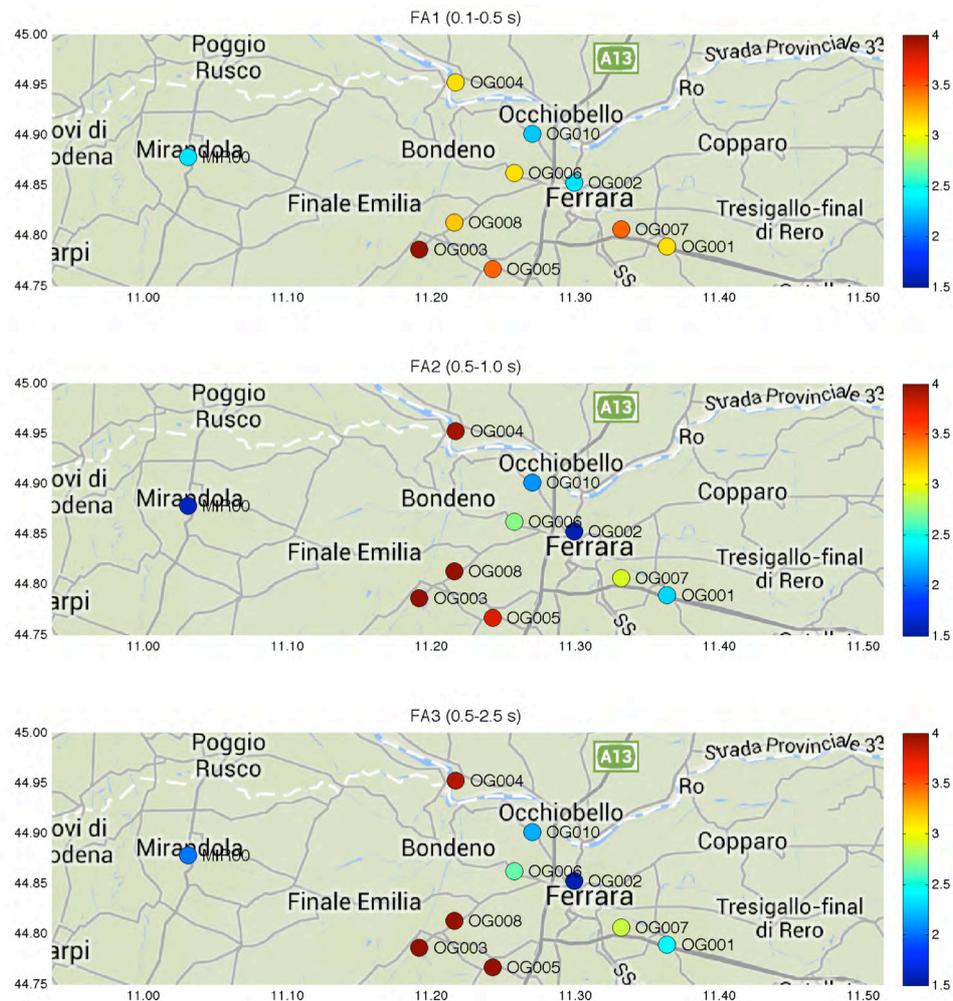


Figura 43 - Mappa dei fattori di amplificazione stimati per tutti i siti per le tre bande di periodi considerati.

6. Conclusioni

Sono stati presentati i risultati ottenuti nell'ambito dello studio geofisico-sismologico per la caratterizzazione della risposta sismica di sito di alcune località della Regione Emilia Romagna colpite dalla sequenza sismica del maggio 2012, per finalità di microzonazione sismica. La risposta sismica di sito è stata stimata attraverso l'integrazione di modelli teorici risolti numericamente e di dati sperimentali di terremoti registrati da un insieme di stazioni sismiche.

Sono stati presentati i risultati completi delle analisi svolte attraverso le simulazioni numeriche, e un campione esemplificativo, ma qualitativamente rappresentativo, delle analisi che si basano sui dati registrati. Per calcolare le risposte di sito sono state usate registrazioni di terremoti effettuate da un insieme di stazioni installate dall'OGS e dal CNR.

Dapprima lo studio ha costruito e risolto i modelli locali per i siti di Casaglia e Mirandola e ha introdotto un modello rappresentativo di un sito di riferimento virtuale in classe A per l'area emiliana. Con le modellazioni numeriche, sono state calcolate le funzioni di trasferimento tra i ricevitori in profondità e in superficie (funzioni interferometriche) e tra i ricevitori posti in superficie su suolo e il sito virtuale in classe A. Attraverso coppie di registrazioni superficie/pozzo disponibili per il sito di Casaglia, è stata costruita la funzione interferometrica sperimentale per il sensore in profondità. Il confronto tra le funzioni interferometriche sperimentale e sintetica mostra che il modello costruito per Casaglia in questo studio è estremamente accurato.

Sono state calcolate le risposte di sito dalle registrazioni di terremoti con il metodo GIT, utilizzando il sito di riferimento virtuale in classe A precedentemente costruito. Sono stati quindi calcolati gli spettri di risposta specifici di sito, le curve di amplificazione spettrale di risposta, e i fattori di amplificazione, elementi questi di diretto utilizzo per la microzonazione sismica.

I risultati ottenuti nei siti esaminati evidenziano in generale una tipologia di risposta molto simile, con amplificazioni che si concentrano sempre nella banda centrale di

periodi (0.3-1.5 s), ma con ampiezze che differiscono anche sensibilmente da sito a sito, in alcuni casi raggiungendo valori anche elevati.

La peculiarità di questo studio sta nel fatto che esso combina l'utilizzo di dati sperimentali con modelli numerici, non solo per estendere e generalizzare il più possibile la portata dei risultati, ma anche per operare un controllo incrociato tra dati sperimentali e speculazioni teoriche in alcuni passaggi chiave. Tuttavia questo studio ha anche alcune limitazioni, la principale delle quali sta nel fatto che sia i modelli numerici adottati sia il metodo GIT operano in campo lineare e per moti deboli del suolo.

Appendice A

Spettri di risposta specifici di sito

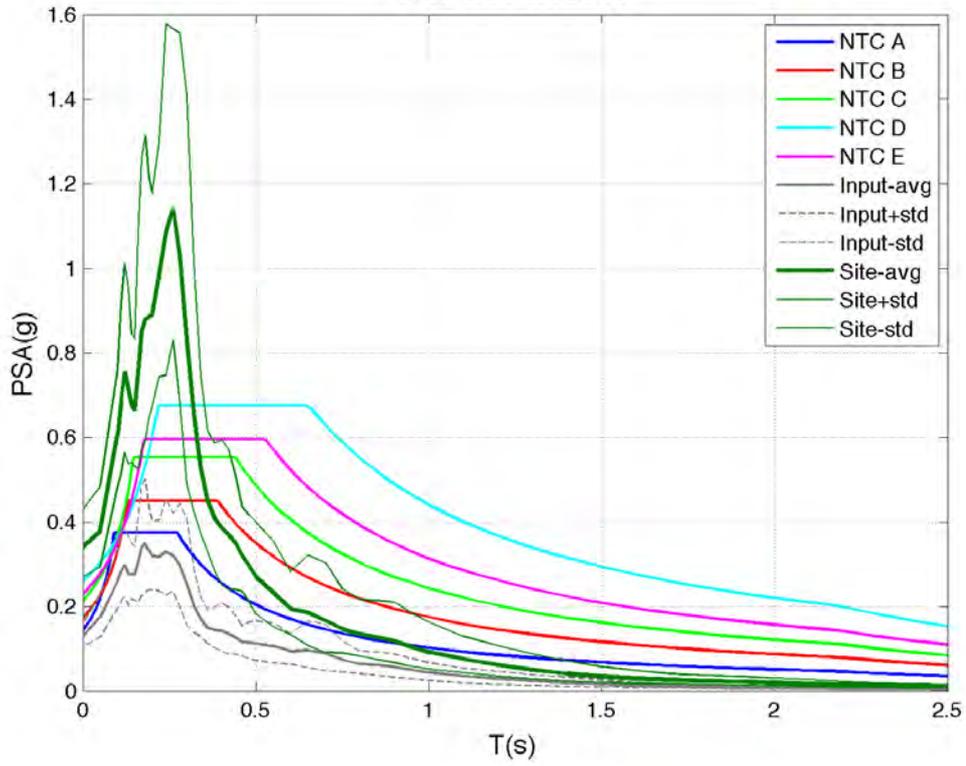
Quest'appendice raccoglie le figure che mostrano gli spettri di risposta specifici di sito per tutti i siti misurati, ponendoli anche a confronto con l'azione sismica utilizzata come input e con gli spettri di normativa NTC-08.

Le curve rappresentano le seguenti quantità:

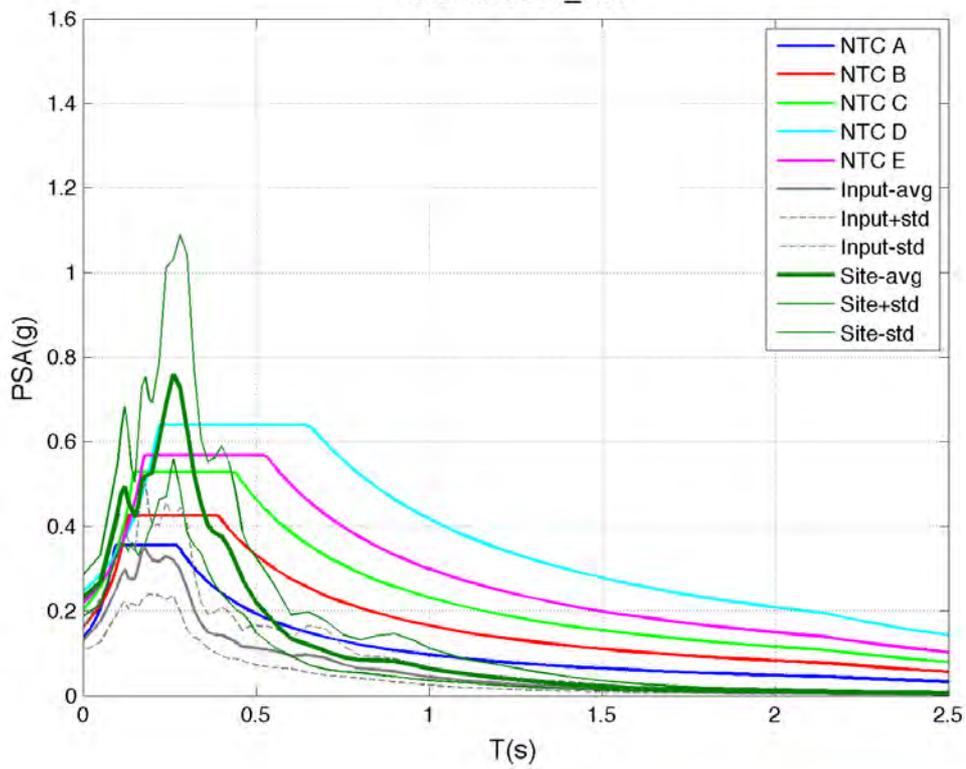
- curve grigie chiare: azione sismica in input (linea spessa: valore medio; linee tratteggiate: valore medio +/-deviazione standard);
- curve verdi: spettro di risposta specifico di sito (linea spessa: valore medio; linee tratteggiate: valore medio +/- deviazione standard);
- linee continue di vari colori: spettri di normativa NTC-08 per le varie classi di suolo.

Altre spiegazioni sono riportate nel testo.

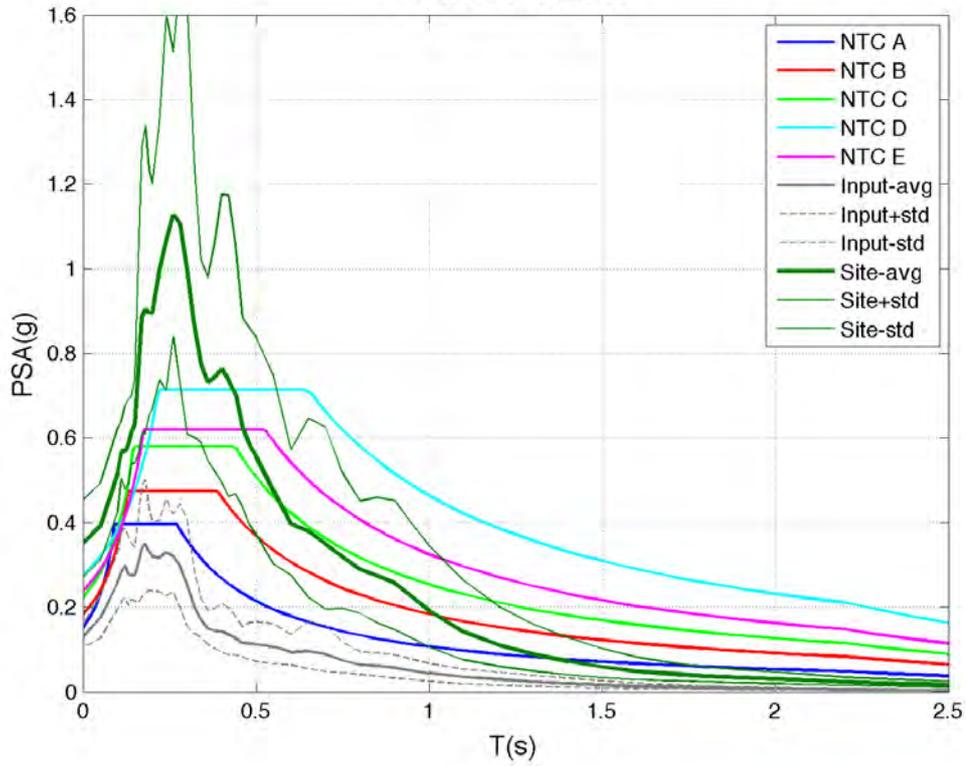
OG001 / H1_CA



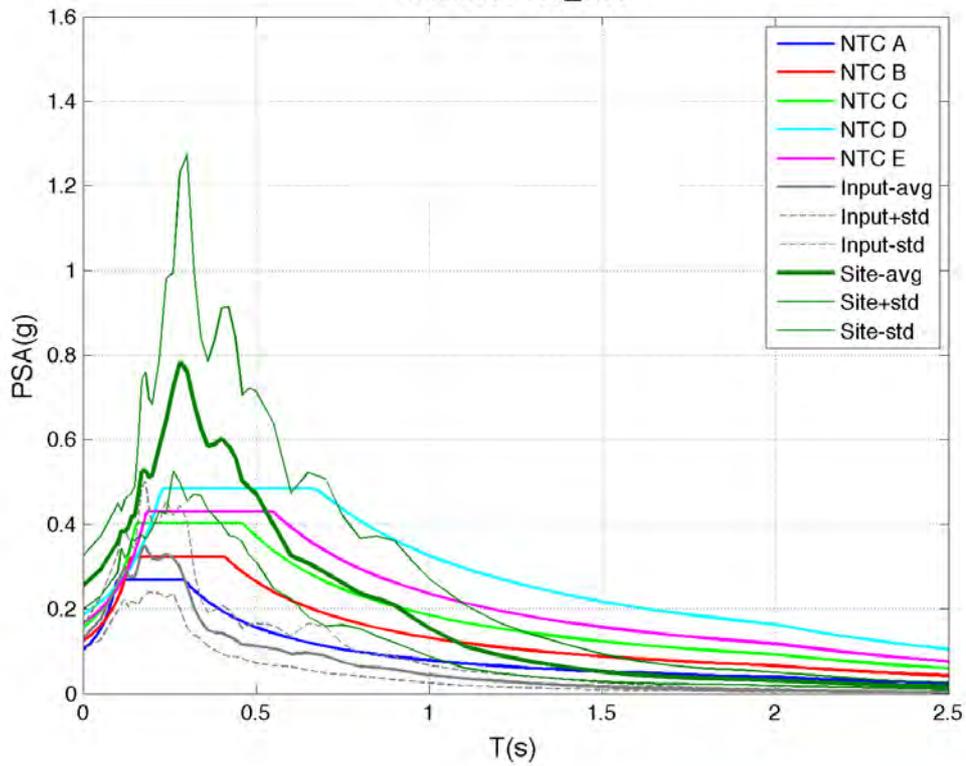
OG002 / H1_CA



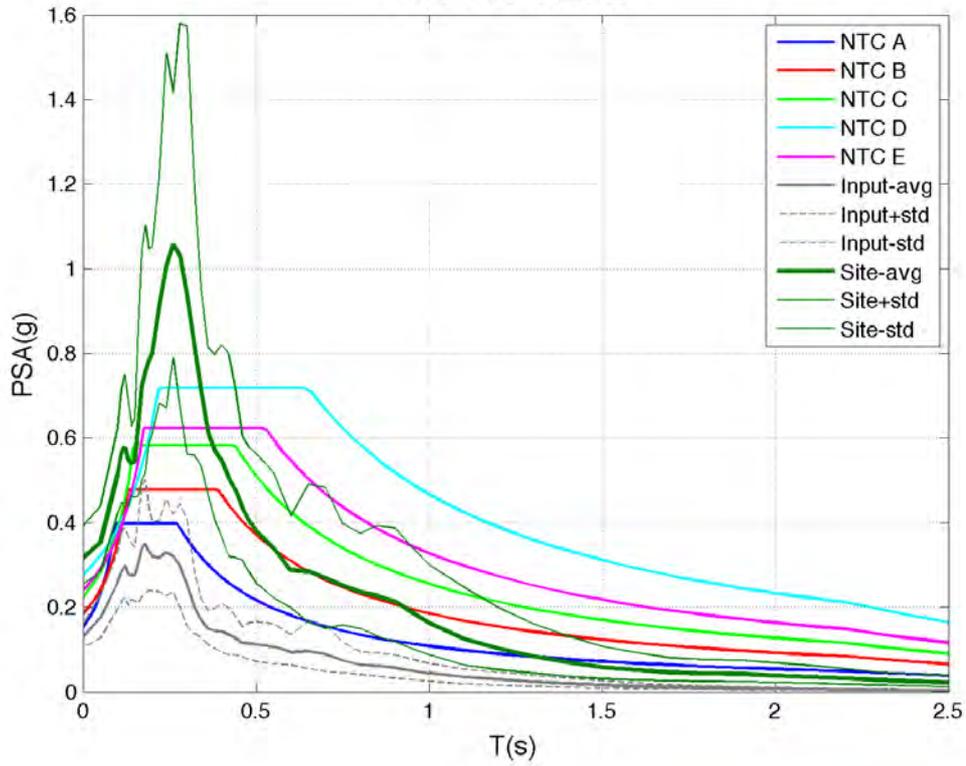
OG003 / H1_CA



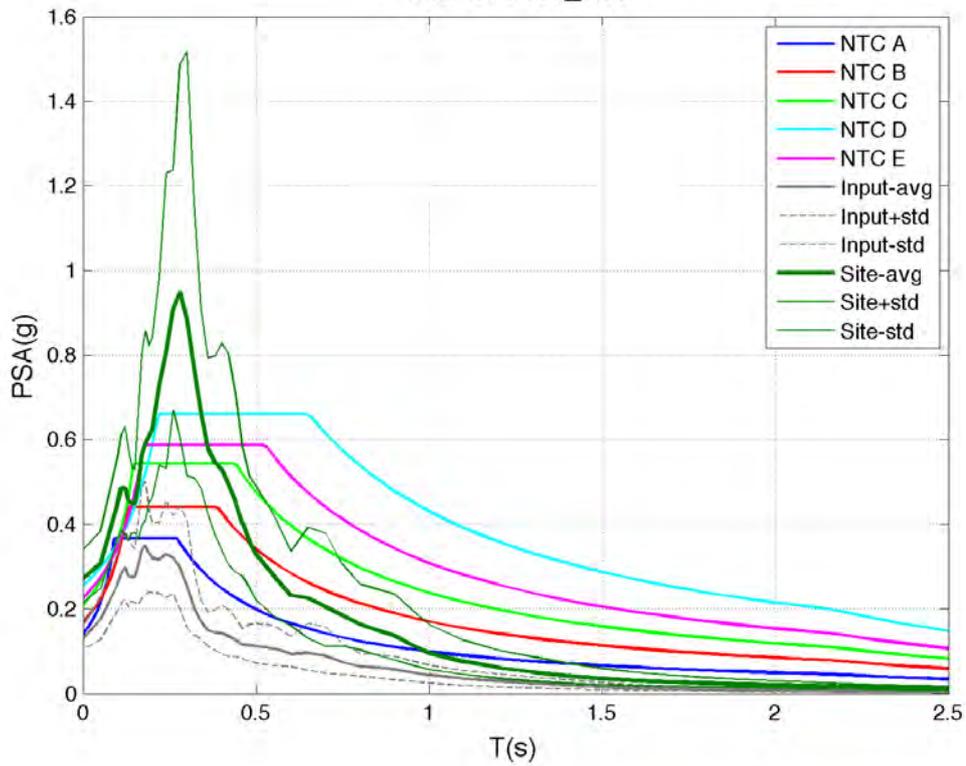
OG004 / H1_CA



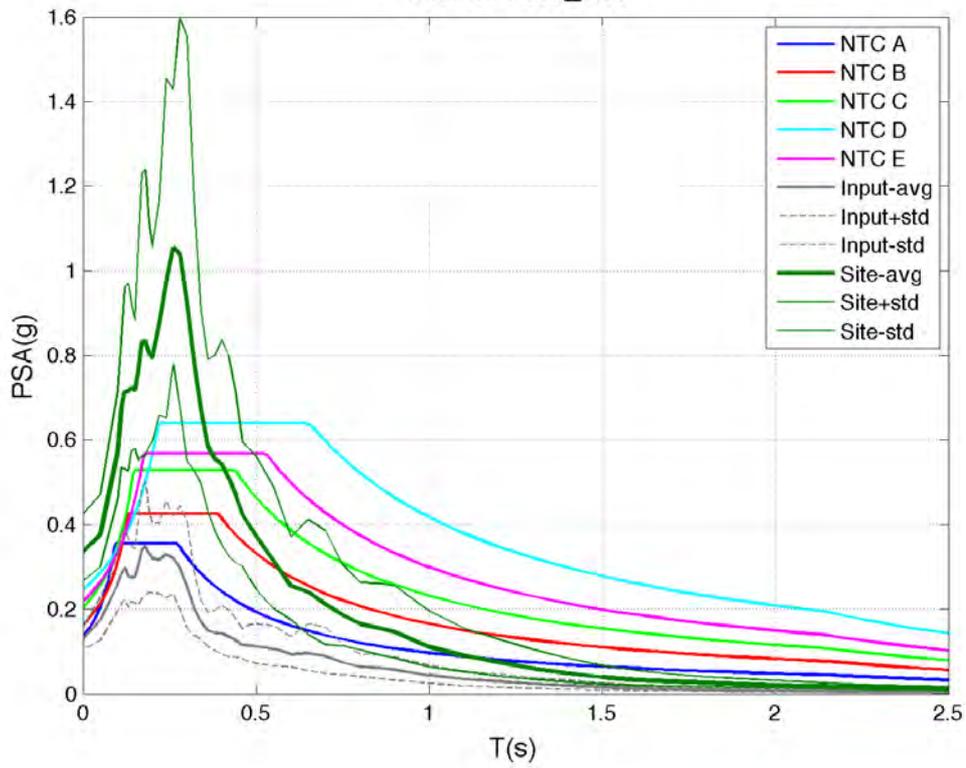
OG005 / H1_CA



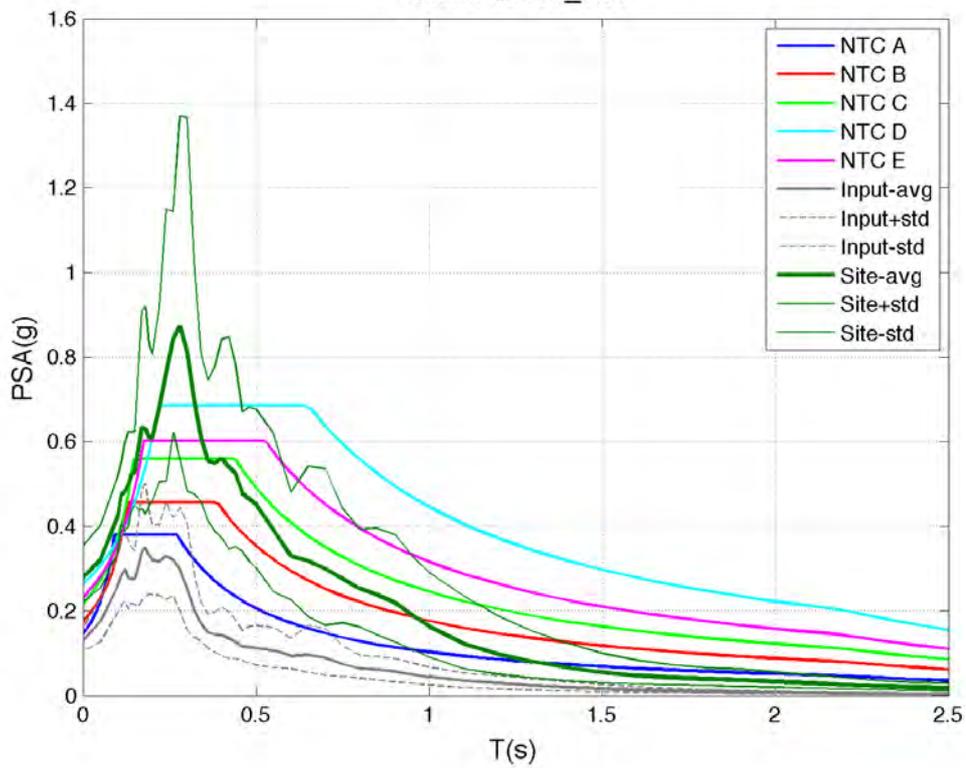
OG006 / H1_CA



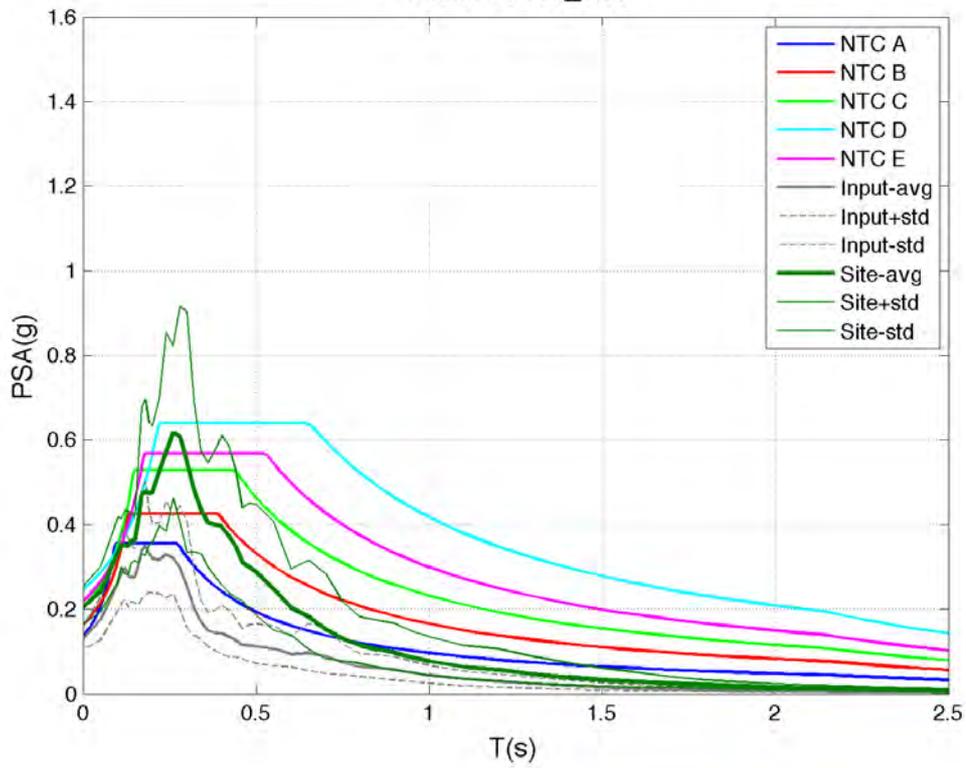
OG007 / H1_CA



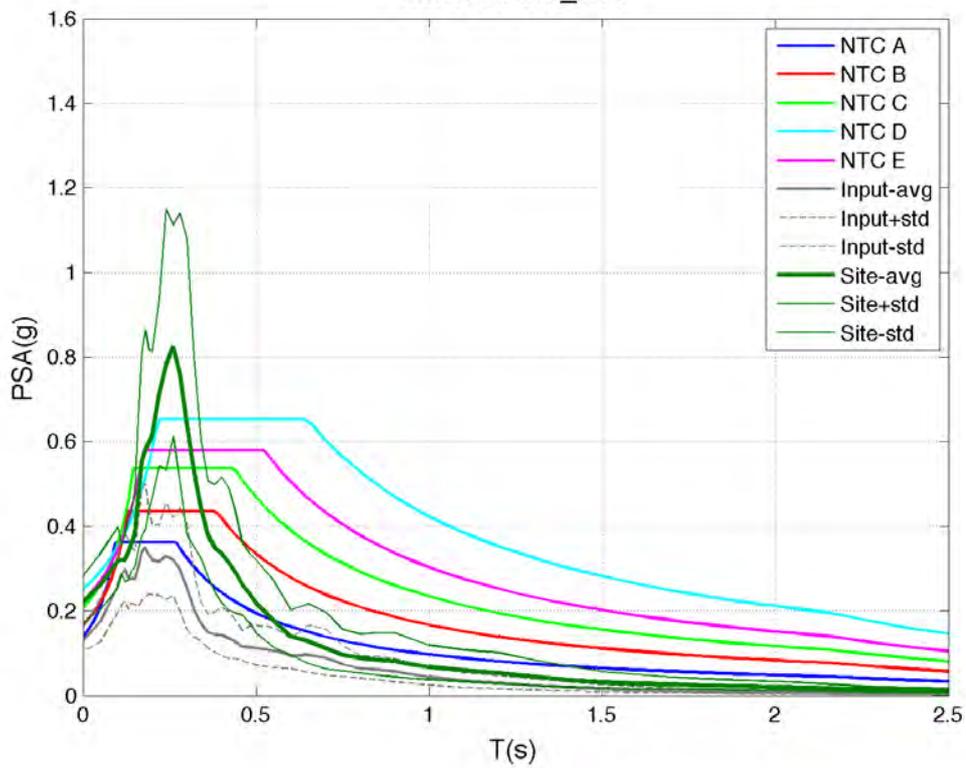
OG008 / H1_CA



OG010 / H1_CA



MIR00 / H1_CA



Appendice B

Spettri lisciati e confronto con spettri di normativa NTC-08

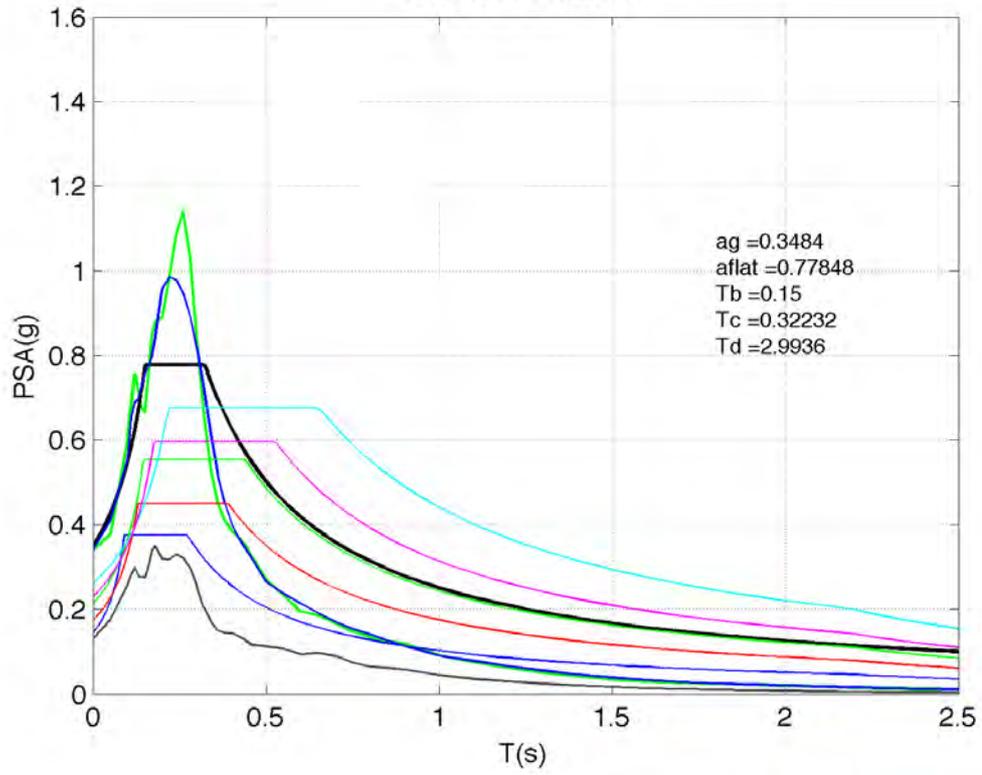
Quest'appendice raccoglie le figure che mostrano gli spettri di risposta lisciati specifici per tutti i siti misurati, ponendoli anche a confronto con gli spettri di normativa NTC-08.

Le curve rappresentano le seguenti quantità:

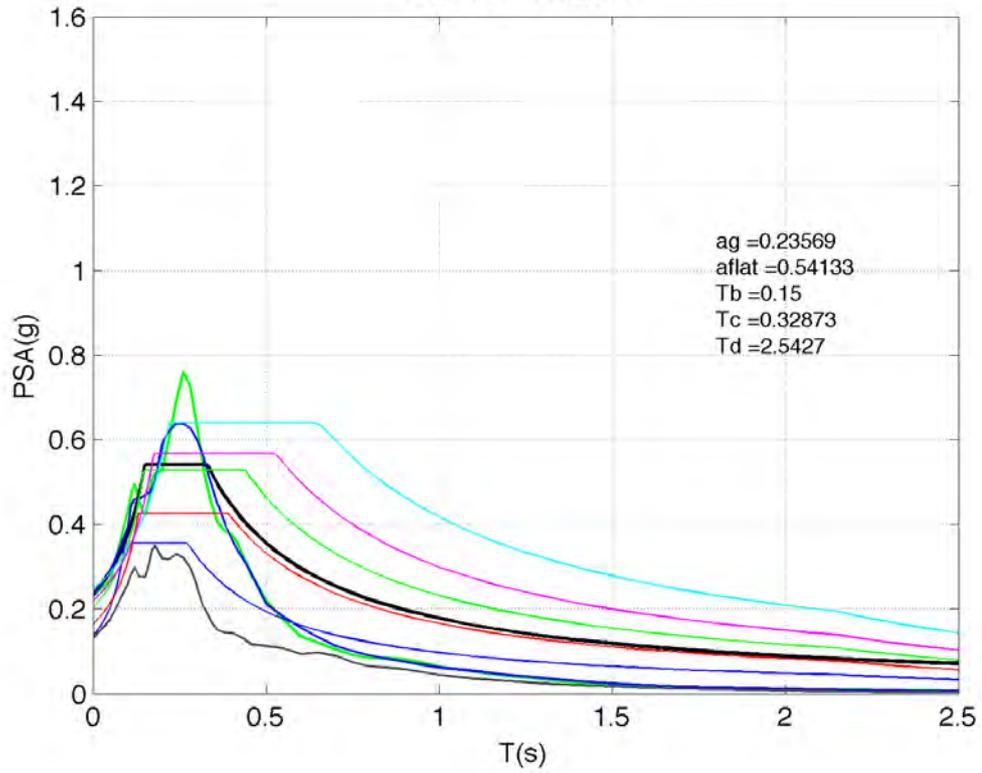
- curva verde spessa: spettro di risposta specifico di sito;
- curva blu: spettro di risposta specifico di sito con smoothing;
- curva nera spessa: spettro di risposta specifico di sito lisciato;
- curve sottili di vario colore: spettri di normativa NTC-08 per le varie classi di suolo.

Le linee di testo in alto a destra mostrano in esplicito i valori dei parametri che definiscono lo spettro lisciato. Altre spiegazioni sono riportate nel testo.

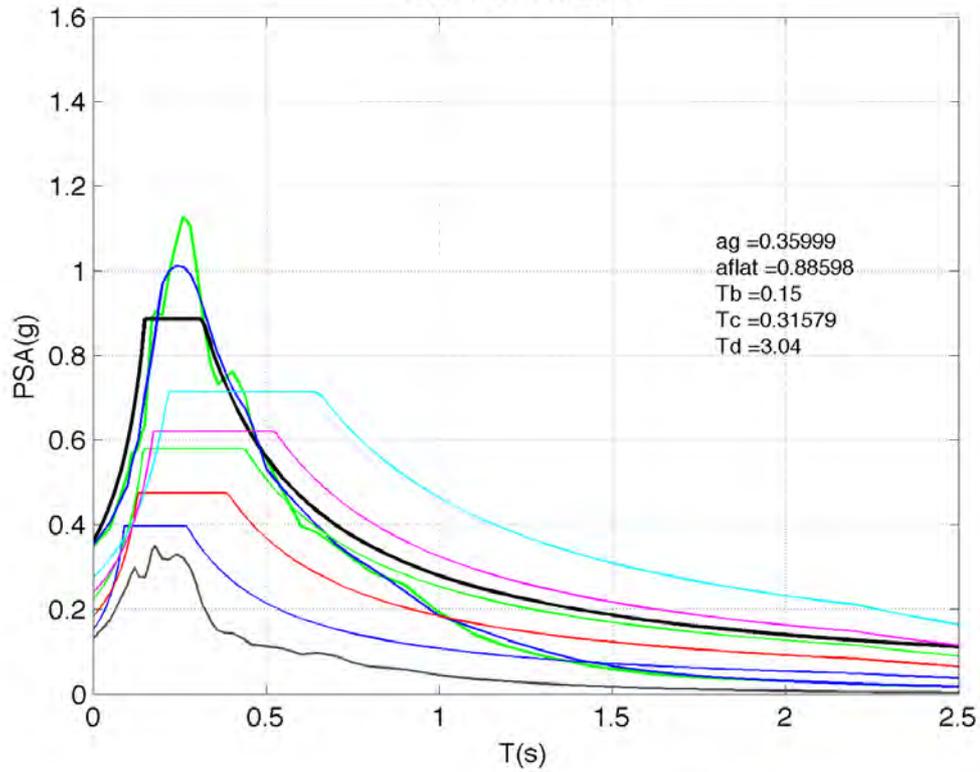
OG001 / H1_CA



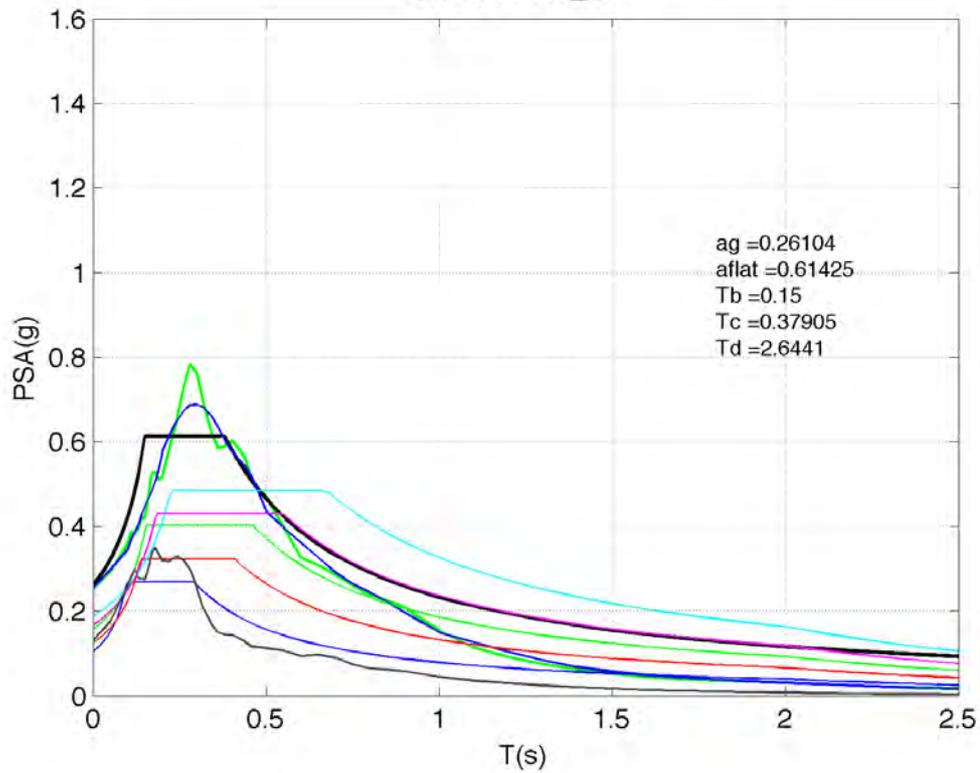
OG002 / H1_CA



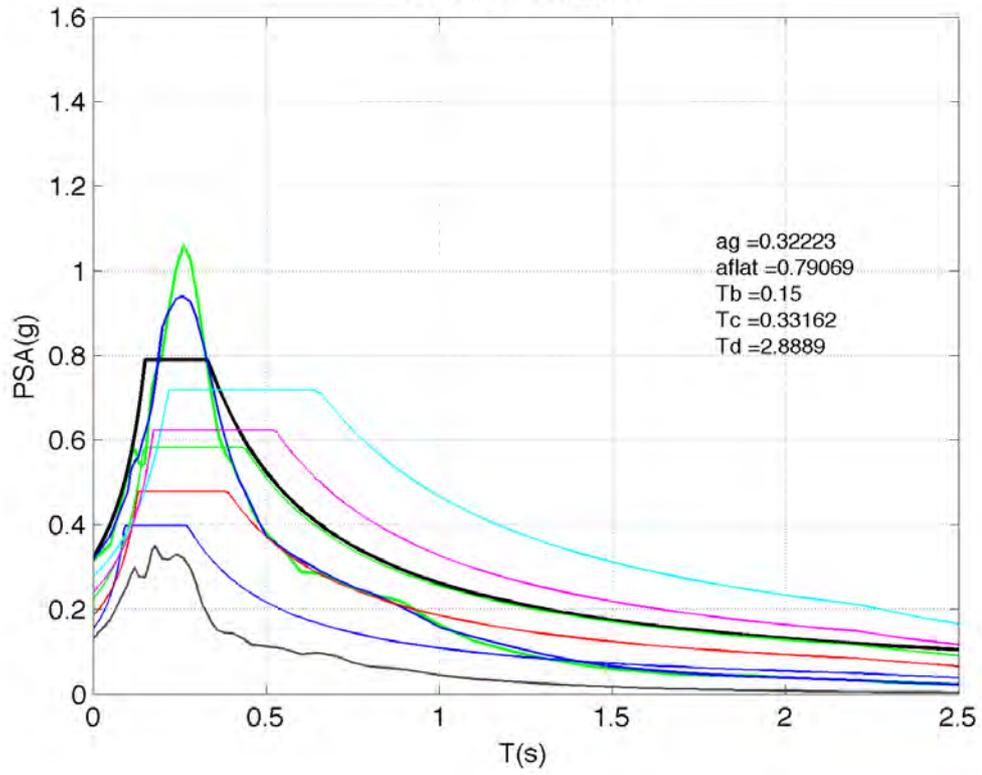
OG003 / H1_CA



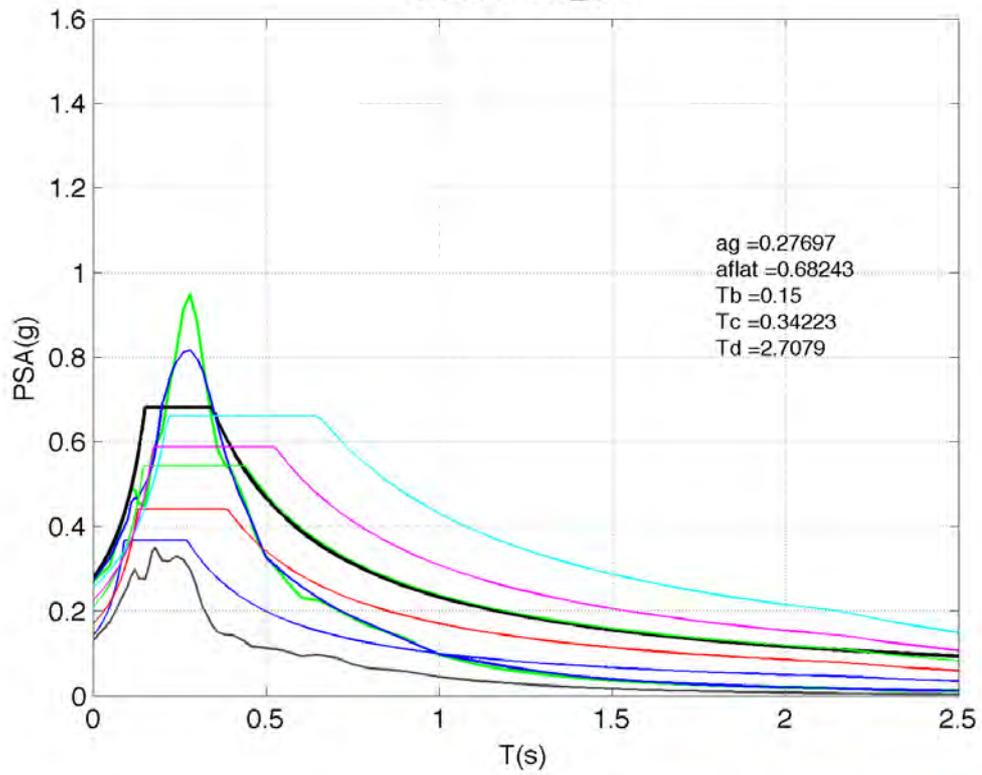
OG004 / H1_CA



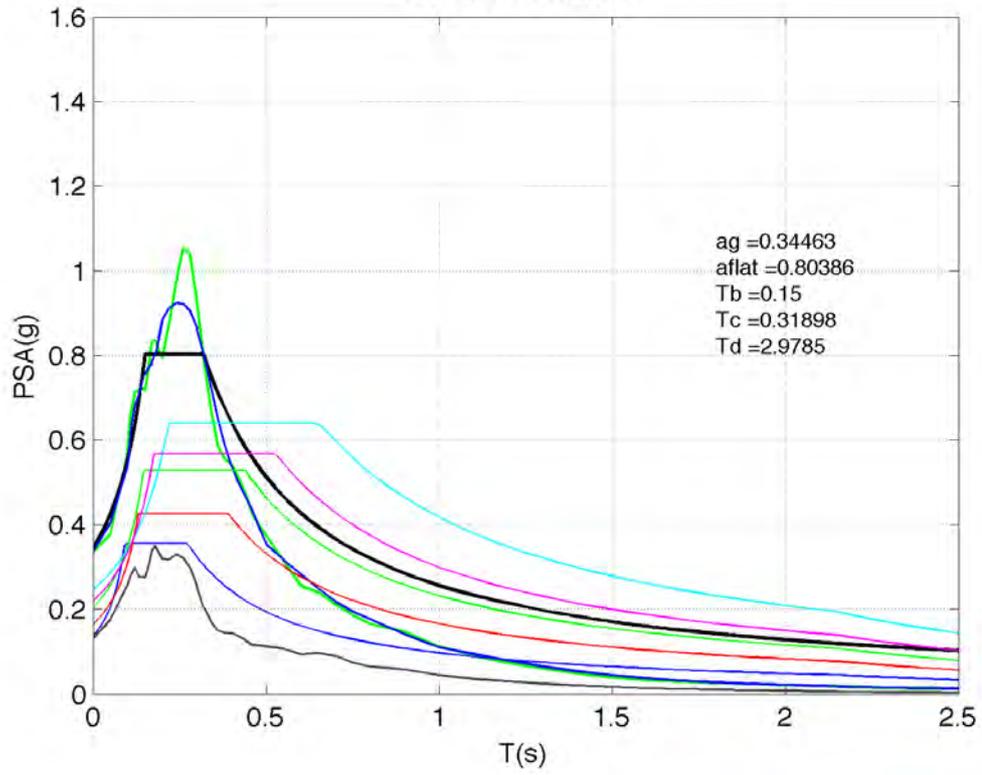
OG005 / H1_CA



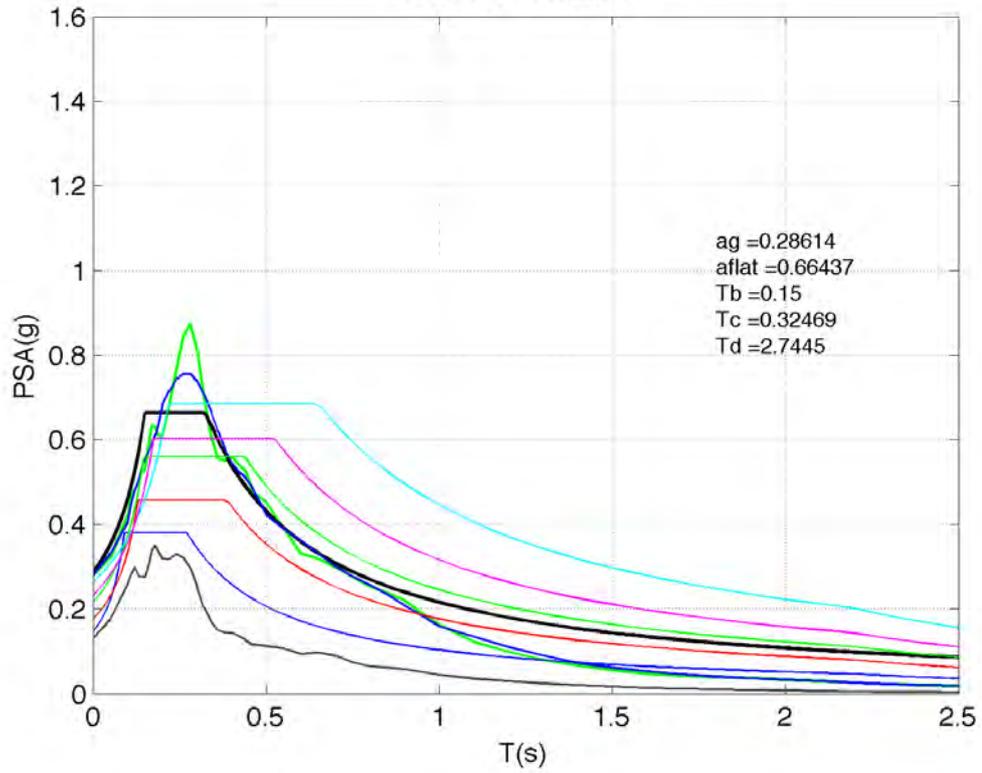
OG006 / H1_CA



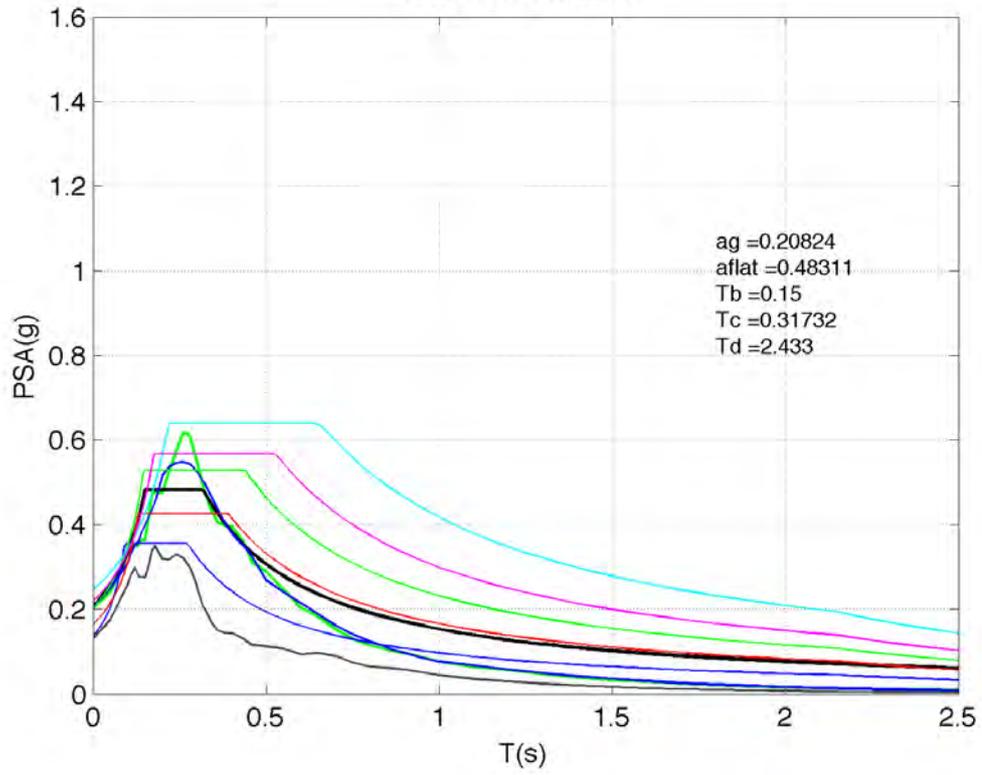
OG007 / H1_CA



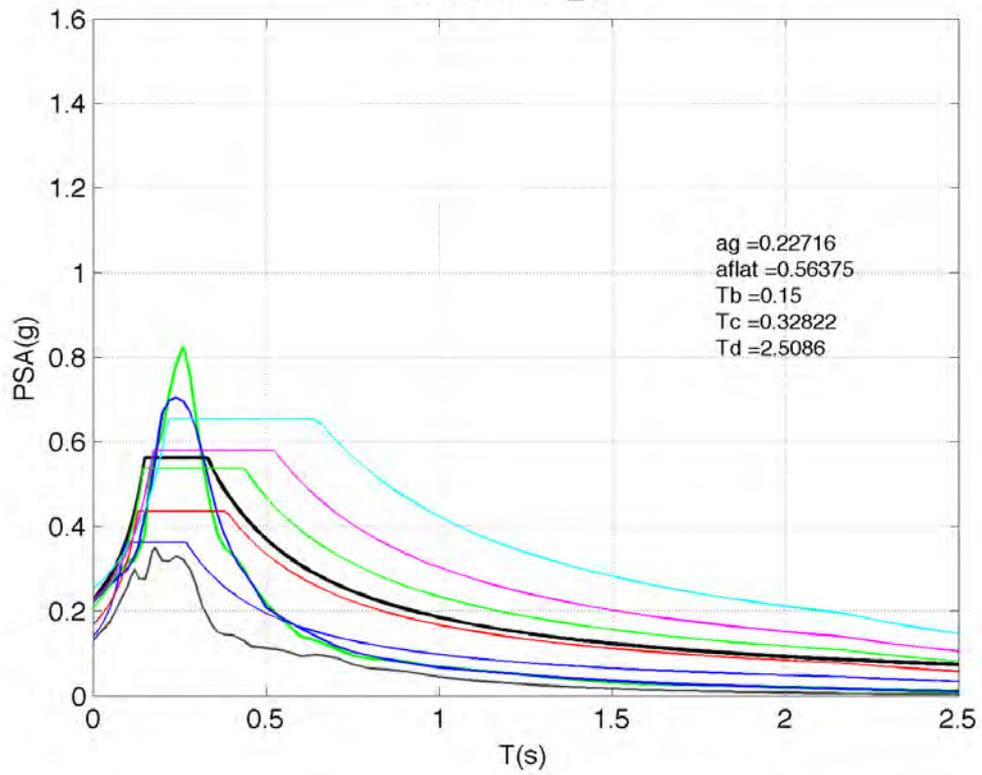
OG008 / H1_CA



OG010 / H1_CA



MIR00 / H1_CA



Appendice C

Amplificazioni di risposta spettrale e confronto con la normativa NTC-08

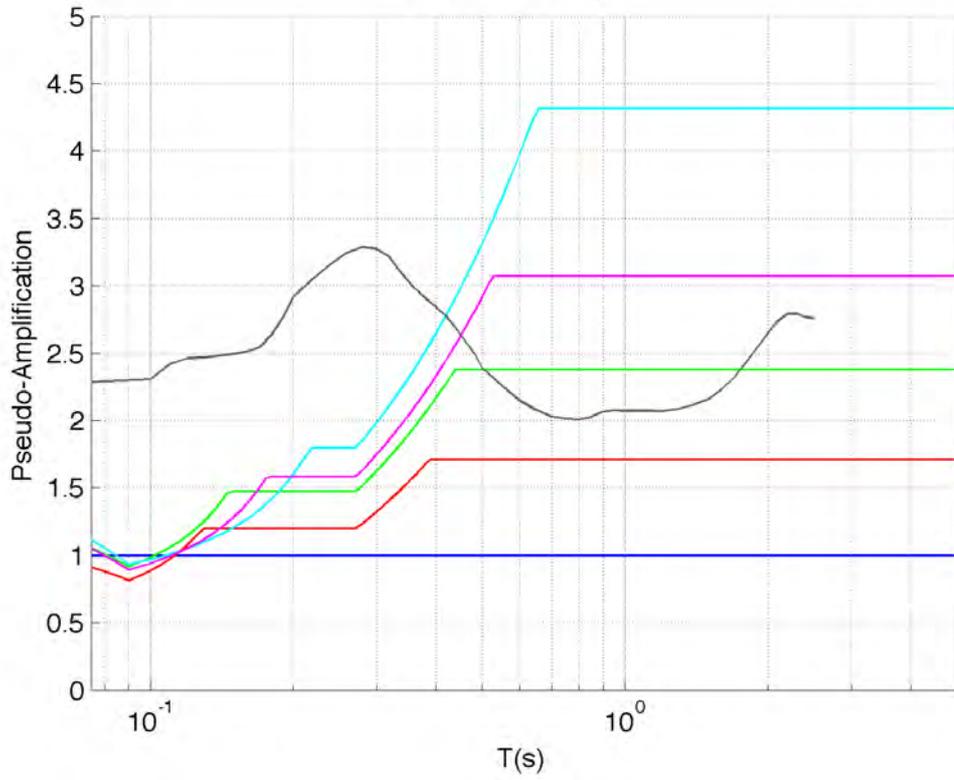
Quest'appendice raccoglie le figure che mostrano le curve di amplificazione di risposta spettrale specifiche per tutti i siti misurati, ponendole anche a confronto con le amplificazioni corrispondenti agli spettri di normativa NTC-08.

Le curve rappresentano le seguenti quantità:

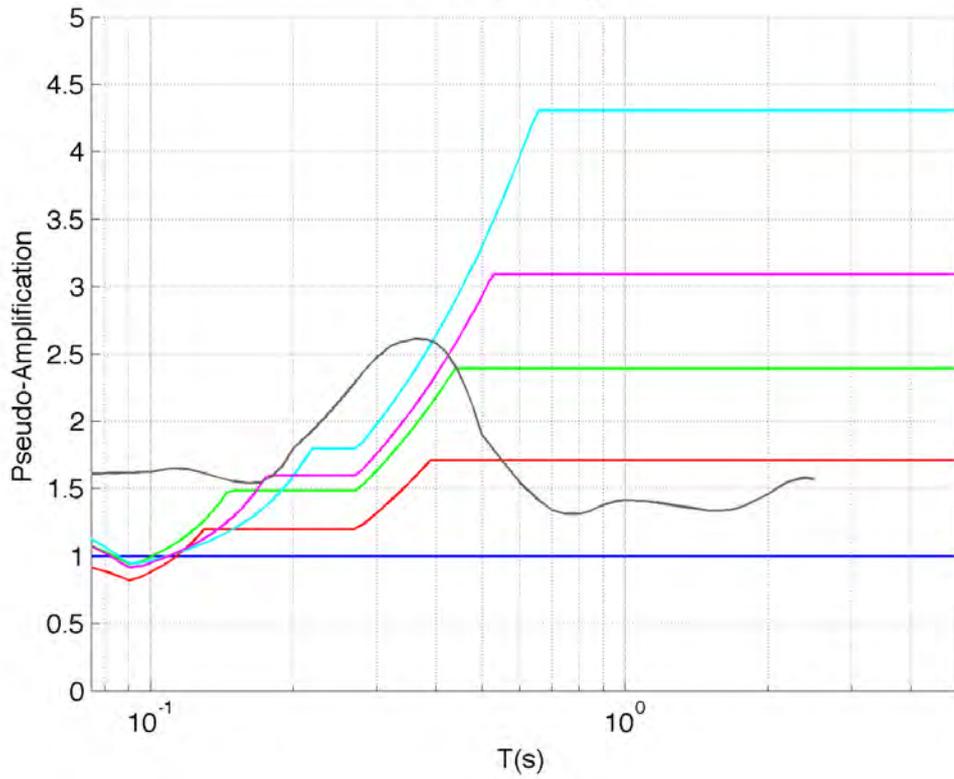
- curva grigia: curva di amplificazione di risposta spettrale specifica di sito;
- curve sottili di vario colore: curve di amplificazione spettrale dedotte dagli spettri di normativa NTC-08 per le varie classi di suolo.

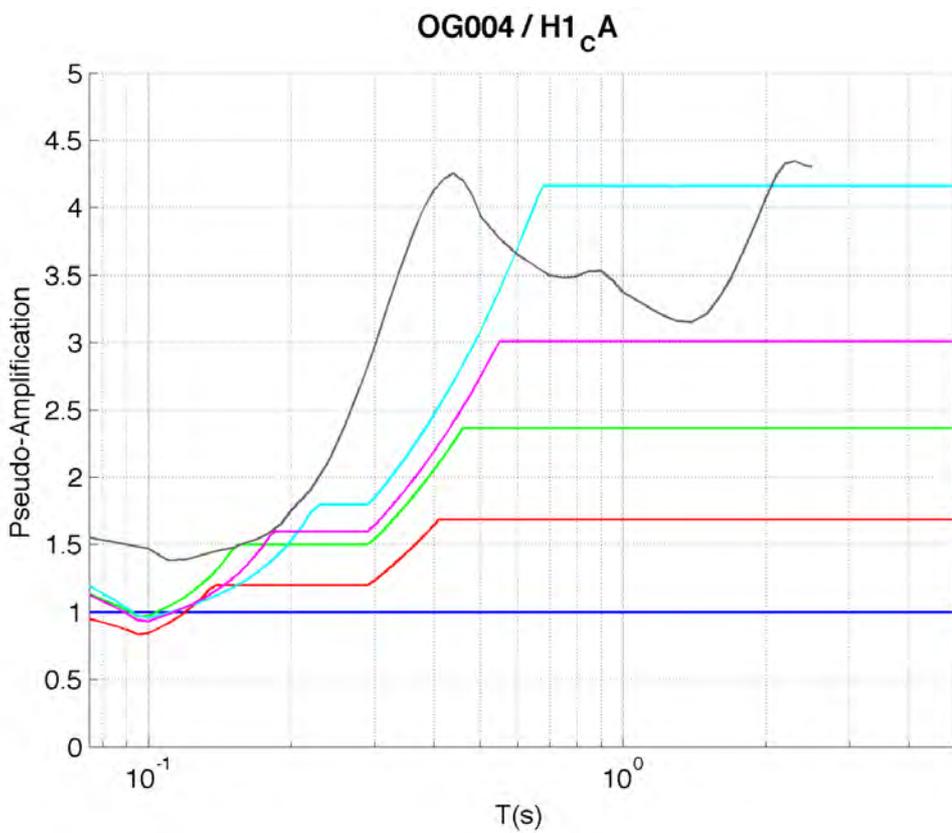
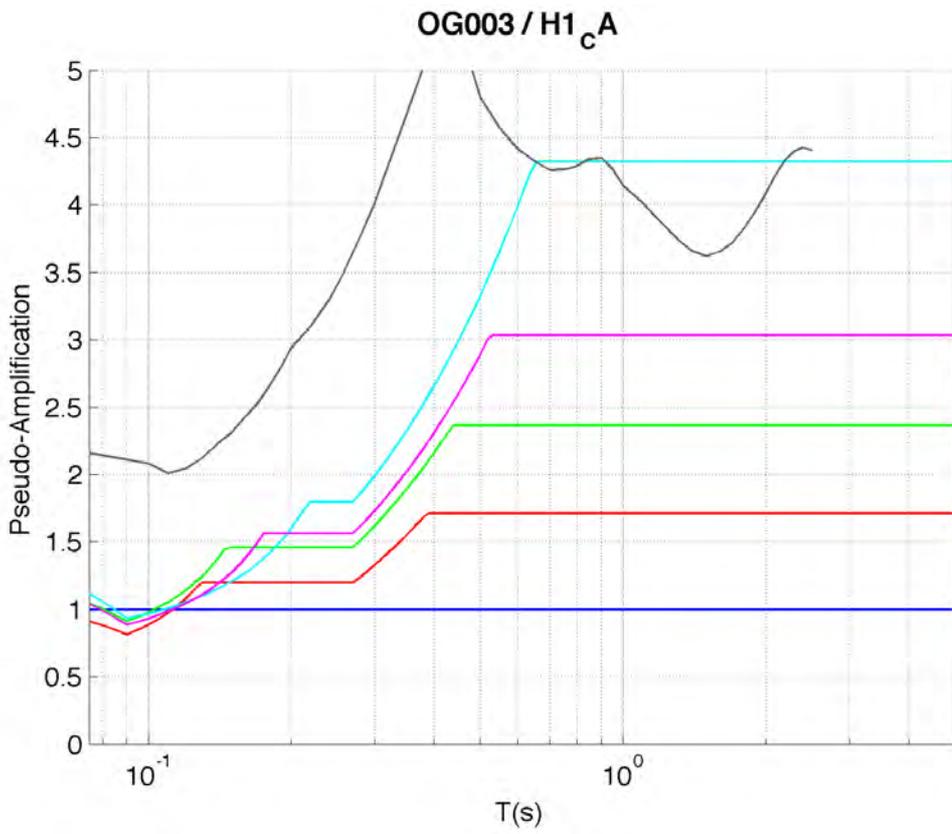
Altre spiegazioni sono riportate nel testo.

OG001 / H1_cA

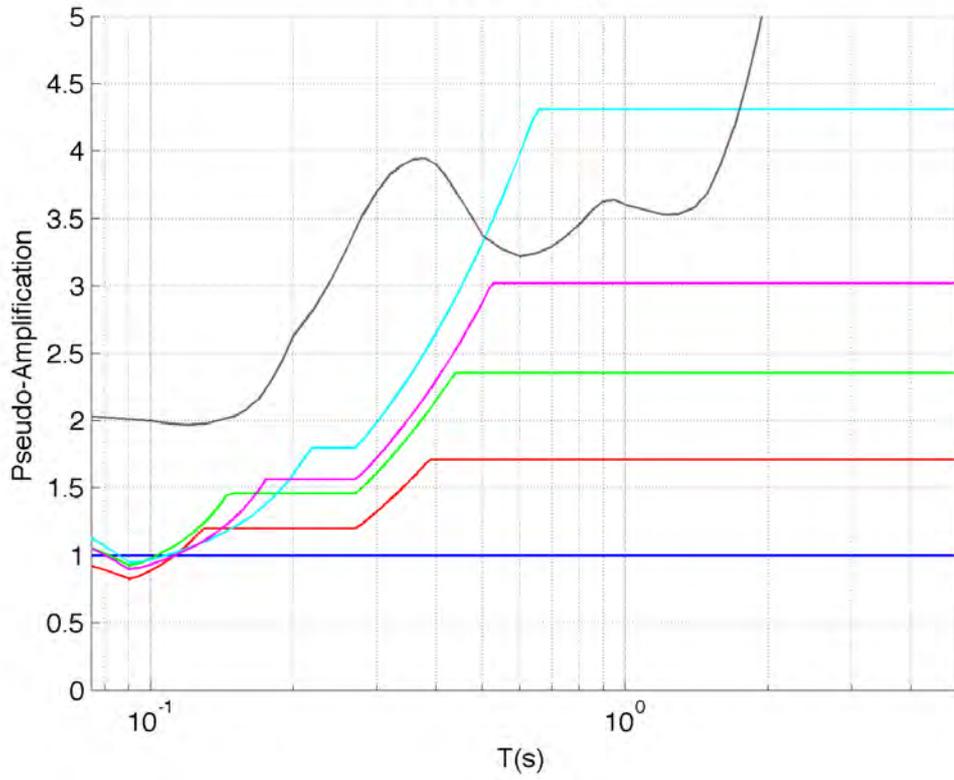


OG002 / H1_cA

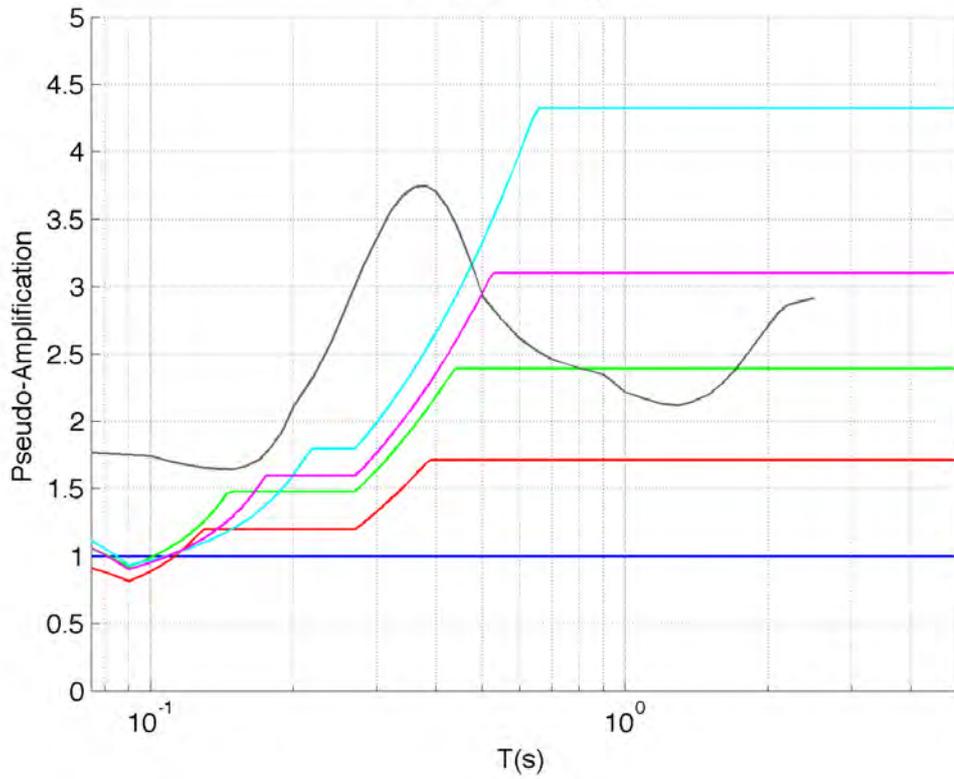




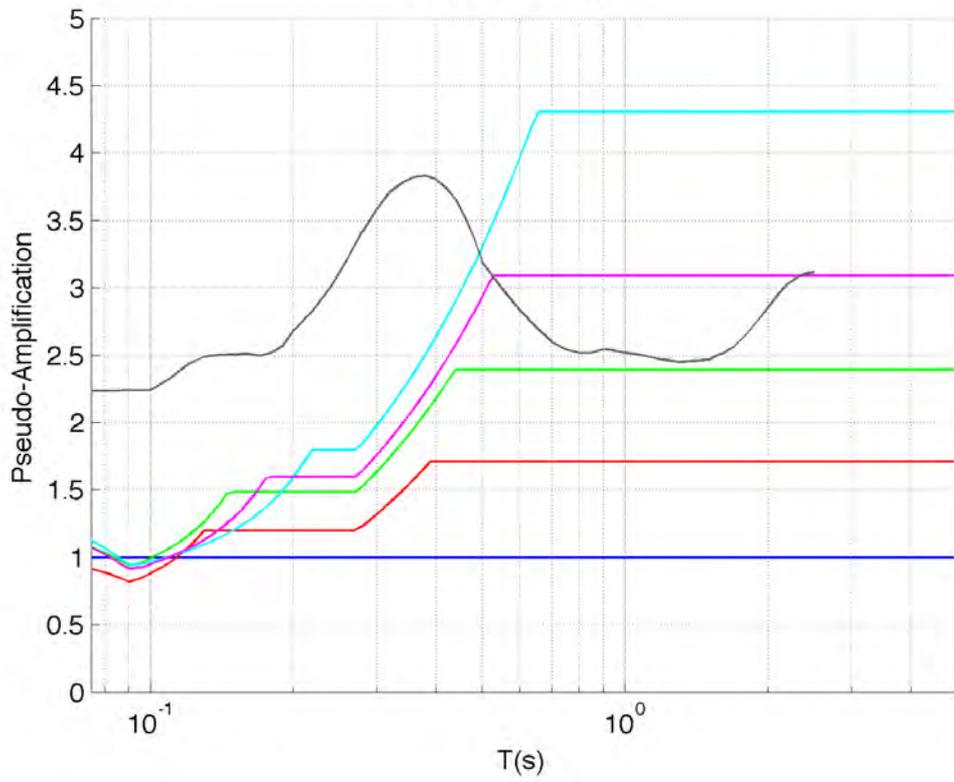
OG005 / H1_cA



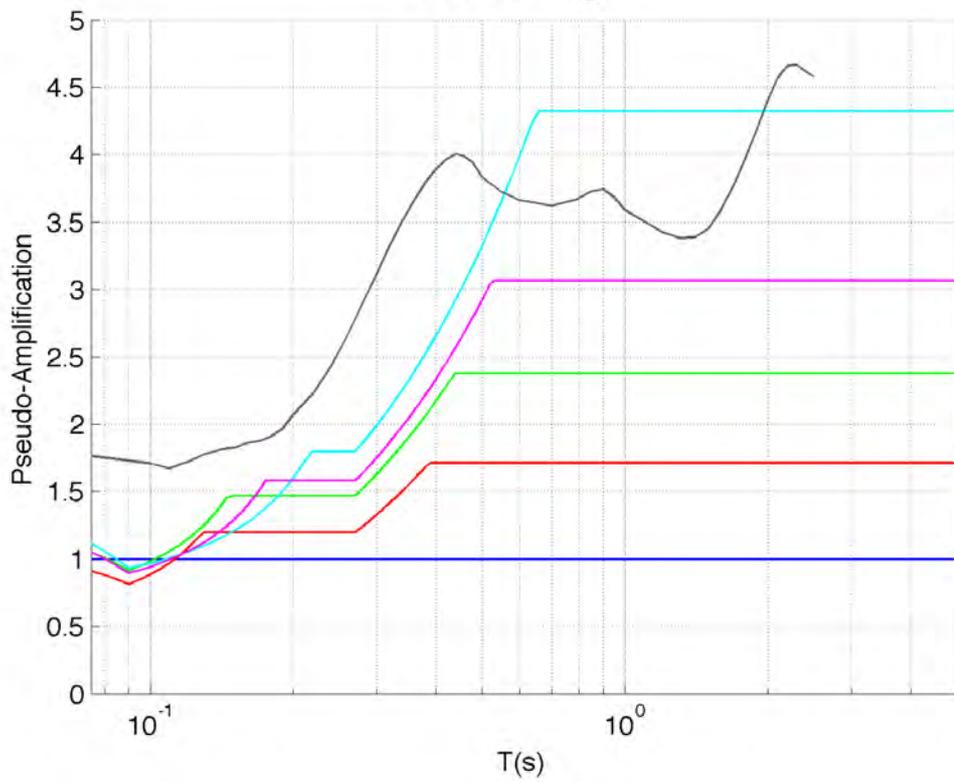
OG006 / H1_cA



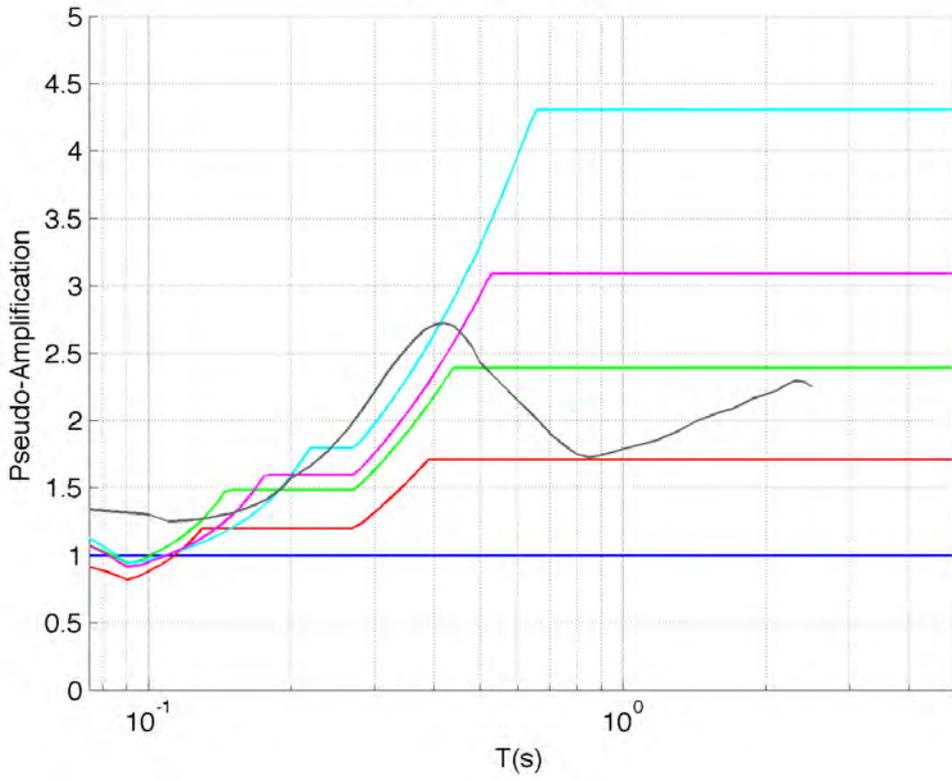
OG007 / H1_cA



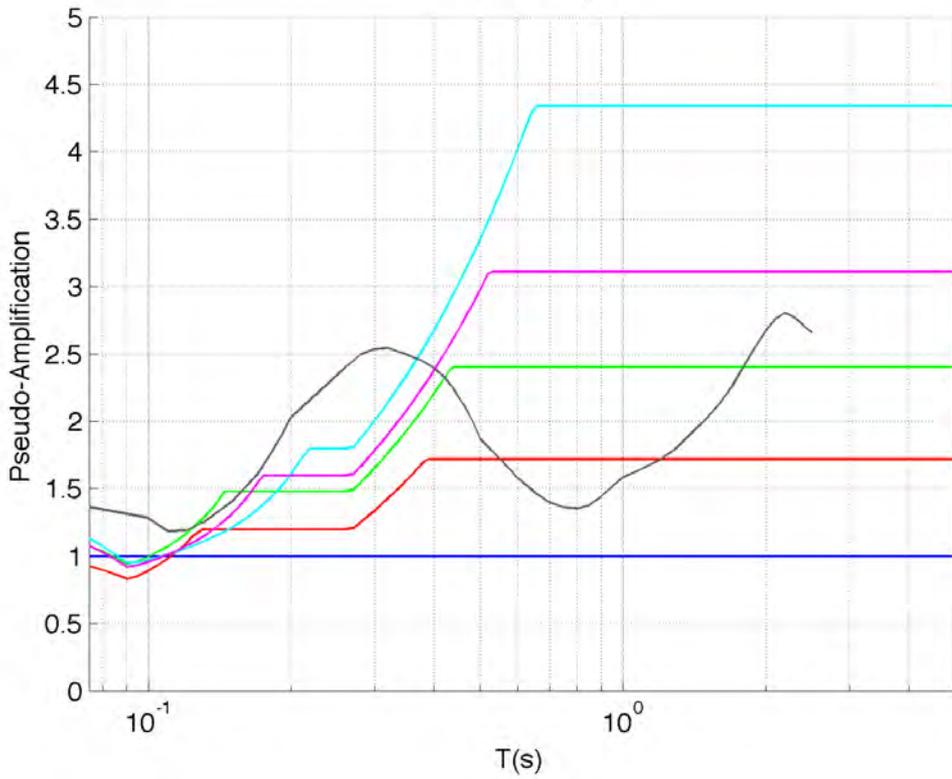
OG008 / H1_cA



OG010 / H1_cA



MIR00 / H1_cA



Bibliografia

- Andrews, D. J. (1986). Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different sizes, in *Earthquake Source Mechanics*, S. Das, J. Boatwright, and C. H. Scholz (Editors), American Geophysical Union, Washington, D.C., 259–267.
- Borcherdt, R. D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, *Bull. Seism. Soc. Am.* 60, 29–61.
- Faccioli E., R. Paolucci, C. Smerzini, M. Vanini, M. Villani (2013). Soil amplification at Mirandola and Casaglia. Restricted report for: Task4 Working Group (2013) "Deliverable 4.1 Site-specific hazard assessment in priority areas", DPC-INGV S2-2012 Project (Peruzza coord.), <https://sites.google.com/site/ingvdpc2012progettos2/deliverables/d4-1>.
- Gruppo di Lavoro MS (2008). *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e CD-ROM.
- Heaton, H., 1990. Evidence for and implications of self-healing pulses of slip in earthquake rupture. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 64, 1-20
- Herrmann, R. B., and Wang, C. Y., 1985. A comparison of synthetic seismograms. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 41-56.
- Herrmann, R. B., 1996a. Computers program in seismology. An overview of synthetic seismogram computation. Dep. of Earth and Atmospheric Sciences; Saint Louis University. Version 3.0 edition.
- Herrmann, R. B., 1996b. Computers program in seismology. Volume VI: wavenumber integration. Dep. of Earth and Atmospheric Sciences; Saint Louis University. Version 3.0 edition.
- ISIDe Working Group (INGV, 2010), Italian Seismological Instrumental and parametric database: <http://iside.rm.ingv.it>
- Laurenzano, G., E. Priolo, e P. Klin (2012). Codice MatLab® per il calcolo della risposta sismica di sito con il metodo dell'inversione generalizzata (GIT). In: M. Mucciarelli (Ed.), *Tecniche Sperimentali per la Stima dell'Amplificazione Sismica Studi teorici ed applicazioni professionali*, Aracne Ed., 61-72.
- Malagnini L., Herrmann R. B., Munafò I., Buttinelli M., Anselmi M., Akinci A. and, Boschi E. (2012). The 2012 Ferrara seismic sequence: Regional crustal structure, earthquake sources, and seismic hazard. *Geophys. Res. Lett.*, 39 (19) L19302, doi:10.1029/2012GL053214.
- Margheriti L., R.M.Azzara, M.Cocco, A.Delladio, A.Nardi (2002). Analysis of Borehole Broadband Recordings: Test Site in the Po Basin, Northern Italy. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 1454-1463.
- Norme Tecniche per le Costruzioni – NTC (2008). DM 14 gennaio 2008, Gazzetta Ufficiale, n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma (www.cslp.it).
- Priolo E., M. Romanelli, C. Barnaba, M. Mucciarelli, G. Laurenzano, L. Dall'Olio, N. Abu-Zeid, R. Caputo, G. Santarato, L. Vignola, C. Lizza and P. Di Bartolomeo (2012). The Ferrara Thrust Earthquakes of

- May-June 2012 – Preliminary Site Response Analysis at the Sites of the OGS Temporary Network. *Annals of Geophysics*, 55 (4), 7 pp. DOI: 10.4401/ag-6172.
- Pesaresi, D., Dall'Olio, L., Rovelli, A., Romanelli, M., Barnaba, C. & Abu Zeid N., 2012 "Installation of a very broad band borehole seismic station in Ferrara (Emilia)", *Atti del 31° Convegno Nazionale GNGTS*, Vol. 2, pp. 69-75, ISBN 978-88-902101-2-9.
- Progetto S2 (2013). DPC-INGV S2-2012 Project (L. Peruzza, Coord.) - Constraining Observations into Seismic Hazard, <https://sites.google.com/site/ingvdpc2012projetto2/home>
- Saràò A. and CRS staff (2013). On line catalogue of moment tensor solutions of earthquakes occurred in NE Italy and its surroundings since 2009. <http://rts.crs.inogs.it/>
- Sommerville, P., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., Kowada, A., 1999. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion. *Seism. Res. Lett.*, 70, 59-80
- Vuan A., Klin P., Laurenzano G. and Priolo, E. (2011). Far-Source long-period displacement response spectra in the Po and Venetian plains (Italy) from 3D wavefield simulations. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 101, 1055-1072.
- Wells, D. L., and Coppersmith, K. J., 1994. new empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002.
- Working Group ITACA 2010. *Data Base of the Italian strong motion records*: <http://itaca.mi.ingv.it>.