



Consiglio Nazionale delle Ricerche
ISTITUTO PER LA DINAMICA DEI PROCESSI
AMBIENTALI

Unità Organizzativa di Supporto - MILANO

Abachi per la valutazione dei fattori di amplificazione per le indagini di microzonazione sismica di secondo livello in Emilia-Romagna

A. Tento¹, L. Martelli², A. Marcellini¹

Milano, settembre 2015

¹Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali - UOS Milano

²P.O. *Sviluppo e analisi dei dati geologici per la valutazione dei rischi naturali e delle risorse energetiche*. Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli. Bologna

Introduzione

La Regione Emilia-Romagna con la delibera di Assemblea Legislativa n.112 del 2 maggio 2007, Regione Emilia-Romagna, (2007), ha introdotto gli *Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica* con i seguenti obiettivi principali:

- introdurre criteri uniformi per la protezione dal rischio sismico che tengano conto delle caratteristiche geologiche locali
- fornire una guida ai professionisti per la realizzazione di studi di microzonazione sismica

Gli indirizzi, analogamente a numerose altre regolamentazioni in vigore, definiscono tre livelli di analisi, con dettaglio e approfondimento crescenti.

In particolare il secondo livello è rivolto alla pianificazione urbanistica comunale e fornisce una suddivisione del territorio in base alla risposta sismica locale stimata tramite abachi, per l'utilizzo dei quali è richiesta una conoscenza geologica di dettaglio del territorio.

Ad esempio, ai fini della valutazione delle amplificazione sismiche, sono necessarie informazioni sulla profondità del substrato, o spessore del terreno di copertura, sul modello stratigrafico e sulla velocità di propagazione delle onde di taglio nell'intervallo di copertura.

Dalla emanazione degli indirizzi, le tabelle per la valutazione dell'amplificazione sismica sono state largamente impiegate per la redazione di carte di microzonazione sismica di secondo livello.

Esempi di utilizzo critico delle tabelle per la valutazione dei fattori di amplificazione sono riportati in Castagnetti et al. (2009), Marcellini e Tinto (2012), Marcellini et al. (2009,2012), Tinto (2009a,b).

In particolare, in Facciorusso et al. (2012) viene illustrato lo stato dell'arte dei primi quattro anni di applicazione con particolare attenzione al punto di vista dei professionisti che hanno operato sul territorio.

L'esperienza maturata nella fase di sperimentazione e, in particolare, con gli studi di microzonazione effettuati a seguito della recente crisi sismica Emiliana¹, congiuntamente con la disponibilità di nuovi dati geologici, geofisici e sismologici (banca dati geognostici del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli), rende possibile e opportuna la revisione delle tabelle per la valutazione dei fattori di amplificazione sismica.

L'aggiornamento delle tabelle per la valutazione dei fattori di amplificazione sismica, descritto in questo lavoro, ha riguardato i punti seguenti:

¹<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/speciale-terremoto/sisma-2012-ordinanza-70-13-11-2012-cartografia>

- Revisione della suddivisione del territorio regionale in ambiti geo-litologici omogenei.
- Individuazione di profili geofisici tipo relativi ad ogni ambito
- Calcolo dell'amplificazione sismica in termini di : accelerazione di massima orizzontale e intensità spettrali con T_0 compresi fra:
 1. $0.1 s \div 0.5 s$
 2. $0.5 s \div 1.0 s$
 3. $0.5 s \div 1.5 s$
- Verifica dei criteri per la trasformazione dei valori di amplificazione sismica in Fattori di Amplificazione delle tabelle.

Procedura utilizzata

Le tabelle contenute negli *Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica* predisposte per le analisi di secondo livello sono relative ai differenti ambienti geo-litologici omogenei individuati nel territorio regionale e contengono i fattori di amplificazione sismica in funzione dei seguenti parametri che caratterizzano la situazione lito-stratigrafica locale.

Si verificano due casi che dipendono dall'ambiente geo-litologico. Nel primo è necessaria la valutazione dello spessore totale dei depositi di copertura, ovvero della profondità del bedrock, H e della corrispondente velocità media calcolata con la seguente relazione:

$$V_{sH} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N h_i/V_{s_i}} \quad (1)$$

dove N è il numero di strati del profilo sismico corrispondenti alla copertura, h_i e V_{s_i} sono, rispettivamente, lo spessore e la velocità delle onde S dello strato i -esimo.

Il secondo caso prevede la valutazione di V_{s30} calcolata con la seguente relazione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^M h_i/V_{s_i}} \quad (2)$$

dove M è il numero di strati del profilo sismico fino alla profondità di 30 metri.

L'utilizzo di abachi comporta necessariamente l'individuazione di parametri di sintesi che descrivono la situazione geo-litologica a cui correlare i fattori di amplificazione. L'adeguatezza di V_{s30} è stata più volte messa in discussione, tuttavia, sia per la semplicità e la diffusione di queste misure sia perché, nel nostro caso, le relazioni fra V_{s30} e i fattori di amplificazione sono sviluppate specificatamente per i vari contesti geolitologici, si è ritenuto di continuare a utilizzare questo parametro.

I Fattori di Amplificazione sismica (F.A.) sono relativi a due parametri rappresentativi dello scuotimento sismico.

Il primo è l'accelerazione di picco orizzontale (**PGA**), il secondo è l'intensità spettrale :

$$SI = \int_{T_1}^{T_2} PSV(T_0, \xi) dT_0 \quad (3)$$

dove PSV è il pseudo spettro di risposta in velocità, T_0 è il periodo proprio e ξ è lo smorzamento.

E' stato considerato uno smorzamento ξ del 5 % e sono stati valutati tre intervalli di periodo proprio T_0 ottenendo tre valori di intensità spettrale:

SI1 : $0.1s \leq T_0 \leq 0.5s$

SI2 : $0.5s \leq T_0 \leq 1.0s$

SI3 : $0.5s \leq T_0 \leq 1.5s$

I Fattori di Amplificazione rappresentano il rapporto fra lo scuotimento sismico, espresso con i parametri sopra indicati, valutato per la condizione geo-litologica specifica e il corrispondente scuotimento relativo alla categoria di sottosuolo A. Quest'ultimo è definito nella tabella 3.2.II delle Norme Tecniche per le Costruzioni, NTC (2008), come segue:

Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di V_{s30} superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.

A questo riguardo è stato predisposto un profilo di velocità delle onde di taglio congruente con la definizione di suolo A sopra riportata e definito fino a circa 2000 metri di profondità, vedi fig. 1.

Nel territorio regionale sono stati individuati due ambienti geo-litologici omogenei principali relativi a: i) zona collinare e montana (Appennino) e ii) pianura e zona costiera che comprende anche il settore di transizione Appennino-Pianura (Margine). La fig. 2 riporta schematicamente questa suddivisione.

Utilizzando i dati geofisici e geotecnici disponibili, sono stati individuati per ogni ambiente, e relativa tipologia, i profili medi di velocità (V_s) e la loro variabilità. I profili di V_s relativi alle varie tipologie geo-litologiche che sono stati analizzati si congiungono in profondità con il profilo del suolo A.

Questi dati sono stati utilizzati per la generazione dei profili di velocità casuali impiegati per la modellazione monodimensionale della risposta sismica. La fig. 3 illustra un esempio di profili di velocità generati basandosi sul profilo medio.

Per quanto riguarda lo smorzamento, si è considerata una dipendenza casuale da V_s : $540/V_s < D < 720/V_s$, dove D è lo smorzamento percentuale per basse deformazioni. La fig. 4 mostra i profili di smorzamento corrispondenti ai profili di velocità illustrati in fig. 3.

Il comportamento non lineare dei suoli viene considerato tramite le curve di decadimento del modulo di taglio e dell'aumento dello smorzamento in funzione della deformazione, che sono disponibili per alcune litologie e sono ricavate da prove di colonna risonante. In particolare, nelle figure 5 e 6 sono riportate le curve relative ai siti sotto elencati da cui sono state derivate quelle utilizzate per il calcolo dei fattori di amplificazioni.

1. San Carlo, prof. 7.5 m. Argilla limosa
2. Crevalcore, prof. 10 m. Limo con argilla
3. San Carlo, prof. 6 m. Limo con sabbia argilloso

4. San Carlo, prof. 9.5 m. Sabbia limosa con tracce di argilla

Considerando che la finalità dell'utilizzo degli abachi è nell'ambito della pianificazione territoriale e urbanistica, si è considerata come pericolosità sismica di riferimento quella relativa al periodo di ritorno di 475 anni.

Si è verificato che il relativo spettro di risposta, Meletti e Montaldo, (2007), e Montaldo e Meletti, (2007), presenta una forma che rimane costante sul territorio della regione. Si è scelto di utilizzare gli stessi accelerogrammi di input per tutti i casi analizzati scalandoli e selezionandoli rispetto alla compatibilità del loro spettro di risposta con quello della pericolosità sismica. Quest'ultimo è relativo al valore medio degli spettri di risposta sul territorio regionale.

Gli accelerogrammi selezionati, che sono riportati in fig. 7 mentre i corrispondenti spettri di risposta sono mostrati in fig. 8 insieme a quello della pericolosità sismica, sono associati alla *superficie* del profilo del suolo A illustrato in fig. 1.

Per il calcolo della risposta sismica si è utilizzato un modello 1D considerando la non linearità dei terreni tramite uno schema lineare-equivalente, Schnabel et al., (1972).

La fig. 9 illustra la procedura utilizzata per la valutazione dei fattori di amplificazione considerando un esempio relativo alla pianura.

Nella figura vengono mostrati i fattori di amplificazione, corrispondenti alle simulazioni effettuate, in funzione di V_{s30} evidenziati rispetto al profilo medio che ha generato lo specifico profilo generato casualmente. E' inoltre evidenziato il valore del fattore di amplificazione corrispondente a 84 percentile.

La fig. 10, sempre per per il caso illustrato in fig. 9, mostra un esempio di distribuzione dei vari tipi di fattori di amplificazione ottenuti per l'intervallo $175 \text{ m/s} < V_{s30} < 225 \text{ m/s}$.

I valori corrispondenti al 84 percentile evidenziati in figura costituiscono i fattori di amplificazione riportati in prima istanza nelle tabelle per V_{s30} di 200 m/s.

I Fattori di Amplificazione delle tabelle sono quindi relativi a 84 percentile dei valori ottenuti considerando la variabilità della risposta sismica dei profili sismici individuati per ogni ambiente geo-litologico descritto in dettaglio in seguito.

Nel caso, come ad esempio in fig. 9 per $V_{s30} < 200 \text{ m/s}$, si osservi una diminuzione dei fattori di amplificazione quando V_{sH} o V_{s30} diminuiscono, causata da un significativo comportamento non lineare dei suoli, i valori definitivi riportati nelle tabelle sono mantenuti ancorati ai valori di amplificazione massima.

Ambiente Appennino

Questo ambiente è caratterizzato da depositi alluvionali con spessori fino a 50 metri che sovrastano due tipologie di substrato geologico.

In particolare sono state individuate tre casi:

1. depositi di copertura, con spessori fino a 50 metri, sovrastanti il substrato geologico rigido (depositi marini generalmente caratterizzati da $V_s > 800\text{m/s}$)
2. depositi di copertura, con spessori fino a 50 metri, sovrastanti il substrato marino non rigido (depositi marini caratterizzati da $V_s \ll 800\text{m/s}$)
3. substrato marino non rigido affiorante o sub affiorante (ovvero depositi marini caratterizzati da $V_s \ll 800\text{m/s}$, con spessore della copertura o della coltre di alterazione inferiore a 2.5 m)

Per quanto riguarda i casi 1 e 2, i fattori di amplificazione sono in funzione della spessore totale dei depositi, ovvero della profondità del bedrock, H e della corrispondente velocità media V_{sH} .

Lo spessore di copertura H deve essere almeno 2.5 m. I valori di V_{sH} considerati iniziano da 150 m/s per i depositi più superficiali.

Nel caso 3, che non prevede la presenza di terreni di copertura di spessore rilevante ($H < 2.5\text{m}$), il parametro considerato è V_{s30} , con valori a partire da 350 m/s.

Sono stati calcolati i seguenti fattori di amplificazione: PGA, SI1 e SI2.

Nelle figure 11 ÷ 23 sono riportati per ogni ambito relativo all'ambiente Appennino:

- profili medi di V_S che caratterizzano ogni caso.
- rapporto fra gli spettri di risposta in accelerazione, con smorzamento 5%, calcolati sulla superficie dei profili medi e quello relativo al *suolo A*. Sono inoltre riportati i fattori di amplificazione dei profili medi. Si noti che i valori indicati possono differire da quelli delle tabelle poiché quest'ultimi sono relativi a 84 percentile dei valori ottenuti considerando la variabilità della risposta sismica relativa ai profili sismici.
- fattori di amplificazione ottenuti con le attuali elaborazioni.

Ambiente Pianura

La revisione delle tabelle ha comportato la valutazione di nuovi dati recentemente acquisiti nell'ambito degli studi di microzonazione promossi dalla Regione Emilia-Romagna a seguito del terremoto del 2012² e immessi nella banca dati geognostici del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli. Si tratta di prove *Down-Hole* e *Cross-Hole* effettuate in sondaggi a carotaggio continuo che in alcuni casi hanno raggiunto profondità fino a 130-150 metri, e di profili di V_s ottenuti invertendo le registrazioni di rumore sismico effettuate con array.

Per l'ambiente della Pianura sono stati individuati i seguenti ambiti

PIANURA 1 Settore di pianura con sedimenti alluvionali prevalentemente fini, alternanze di limi, argille e sabbie, caratterizzato dalla presenza di una importante discontinuità stratigrafica responsabile di un significativo contrasto di impedenza a circa 100 m da p.c. Nella figura 24 sono riportati i profili di V_s , ricavati con prove *Cross-Hole* e *Down-Hole*, che sono stati utilizzati per la definizione del profilo medio $p1$ (vedi fig. 26) di questo ambito e del successivo *pianura 2*. I fattori di amplificazione sono espressi in funzione di V_{s30} che varia da 150 a 400 m/s.

PIANURA 2 Settore di pianura con sedimenti alluvionali prevalentemente fini, alternanze di limi, argille e sabbie, caratterizzato dalla presenza di una importante discontinuità stratigrafica responsabile di un significativo contrasto di impedenza a circa 100 m da p.c. e dal tetto del bedrock sismico ($V_s > 800\text{m/s}$) a circa 150 m da p.c. Si utilizza V_{s30} che varia da 150 a 400 m/s.

PIANURA 3 Settore di pianura caratterizzato da elevati spessori di sedimenti prevalentemente fini e poco consolidati, alternanze di limi, argille e sabbie di ambiente alluvionale e transizionale, con substrato rigido a profondità non inferiori a 300 m da p.c. Anche in questo caso si utilizza V_{s30} che varia da 150 a 250 m/s.

MARGINE Settore di transizione tra la zona collinare (Appennino) e la pianura caratterizzato da terreni prevalentemente fini sovrastanti orizzonti grossolani (ghiaie, ghiaie sabbiose). Il substrato geologico è generalmente costituito da sabbie marine pleistoceniche o da peliti plio-pleistoceniche (substrato non rigido). Questo ambiente è suddiviso in:

MARGINE settore A caratterizzato dallo spessore dei terreni sovrastanti gli orizzonti grossolani inferiore a 30 m da p.c. Gli strati grossolani sovrastano direttamente il substrato geologico. In questo caso si utilizza V_{sH} , compresa fra 150 e 300 m/s, dove H è la profondità, in metri dal p.c., del primo contrasto di impedenza significativo, spesso coincidente con il tetto delle ghiaie pleistoceniche.

²<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/speciale-terremoto/sisma-2012-ordinanza-70-13-11-2012-cartografia>

MARGINE settore B caratterizzato dallo spessore dei terreni fini sovrastanti gli strati di ghiaia generalmente superiore a 30 m. Gli strati grossolani sovrastano altri strati di terreni fini presenti fino al substrato. Il profilo di V_S di Viserba, riportato in fig. 25 è indicativo di questa situazione. In questo caso si utilizza V_{S30} compresa fra 170 e 400 m/s.

Per l'ambito *Margine settore A* sono stati calcolati i fattori di amplificazione per PGA, SI1 e SI2, per gli altri ambiti sono stati calcolati anche quelli relativi a SI3.

Nelle figure 26 ÷ 42 sono riportati per ogni ambito relativo all'ambiente di Pianura:

- profili medi di V_S che caratterizzano ogni caso.
- rapporto fra gli spettri di risposta in accelerazione, con smorzamento 5%, calcolati sulla superficie dei profili medi e quello relativo al *suolo A*. Sono inoltre riportati i fattori di amplificazione dei profili medi. Si noti che i valori indicati possono differire da quelli delle tabelle poiché quest'ultimi sono relativi a 84 percentile dei valori ottenuti considerando la variabilità della risposta sismica relativa ai profili sismici.
- fattori di amplificazione ottenuti con le attuali elaborazioni.

Conclusioni

Le elaborazioni riguardanti i fattori di amplificazione che sono illustrate nelle figure allegate sono sintetizzate nelle seguenti tabelle che costituiscono il risultato finale di questo lavoro.

I fattori di amplificazione riportati nelle tabelle sono relativi a 84 percentile dei valori ottenuti considerando i profili generati casualmente e opportunamente raggruppati in intervalli di Vs_H e H oppure di Vs_{30} .

Nella compilazione delle tabelle non viene considerata l'eventuale diminuzione dei fattori di amplificazione dovuta a un significativo comportamento non lineare dei suoli che è osservabile, nelle figure sopra citate, quando Vs_H o Vs_{30} diminuiscono. In questi casi i fattori di amplificazione sono mantenuti ancorati ai valori di amplificazione massima.

La revisione delle tabelle presentata in questo rapporto è stata realizzata nell'ambito delle attività previste dall'art. 17 dell'OPCM 4007/2012 (attuazione della seconda annualità del fondo per studi di riduzione del rischio sismico previsto dall'art. 11 L. 77/2009)

Tabelle Appennino

	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1.8	1.7	1.4	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
10	2.0	2.0	1.9	1.7	1.5	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
15	2.0	2.0	2.0	1.9	1.8	1.6	1.4	1.3	1.2	1.0
20	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	1.7	1.6	1.4	1.3	1.0
25	2.0	2.0	2.0	1.9	1.8	1.8	1.6	1.5	1.3	1.0
30		1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.2
35		1.9	1.9	1.9	1.9	1.7	1.6	1.4	1.4	1.2
40		1.9	1.9	1.9	1.9	1.7	1.6	1.4	1.4	1.2
50		1.9	1.9	1.9	1.9	1.8	1.6	1.4	1.4	1.2

Tabella 1: Substrato marino caratterizzato da $Vs \geq 800m/s$. Fattori di Amplificazione **PGA**. Colonna 1 $H(m)$, riga 1 $Vs_H(m/s)$

	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1.5	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
10	2.1	2.0	1.6	1.3	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
15	2.4	2.3	2.1	1.7	1.4	1.3	1.1	1.0	1.0	1.0
20	2.4	2.4	2.3	2.0	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0
25	2.4	2.4	2.4	2.2	1.9	1.7	1.5	1.3	1.2	1.0
30		2.4	2.4	2.3	2.1	1.8	1.6	1.5	1.3	1.1
35		2.3	2.3	2.3	2.2	1.9	1.7	1.5	1.4	1.2
40		2.2	2.2	2.2	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2
50		2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	1.8	1.6	1.5	1.3

Tabella 2: Substrato marino caratterizzato da $Vs \geq 800m/s$. Fattori di Amplificazione **SI1** ($0.1s \leq T_0 \leq 0.5s$). Colonna 1 $H(m)$, riga 1 $Vs_H(m/s)$

	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
10	1.3	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
15	1.6	1.4	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
20	2.6	1.9	1.5	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
25	2.9	2.5	1.9	1.4	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0
30		2.9	2.3	1.6	1.4	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0
35		3.2	2.8	1.9	1.5	1.4	1.2	1.1	1.1	1.0
40		3.4	3.1	2.4	1.8	1.5	1.4	1.2	1.1	1.0
50		3.2	3.2	2.9	2.2	1.9	1.6	1.4	1.3	1.1

Tabella 3: Substrato marino caratterizzato da $Vs \geq 800m/s$. Fattori di Amplificazione **SI2** ($0.5s \leq T_0 \leq 1.0s$). Colonna 1 $H(m)$, riga 1 $Vs_H(m/s)$

	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	2.3	2.0	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	
10	2.3	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.3	1.3	1.2	
15	2.2	2.2	2.1	2.0	1.8	1.6	1.4	1.3	1.2	
20	2.1	2.1	2.1	2.0	1.9	1.7	1.5	1.4	1.2	
25	2.1	2.1	2.1	2.0	1.9	1.8	1.6	1.4	1.3	
30		2.1	2.1	2.0	1.9	1.8	1.6	1.4	1.3	
35		2.1	2.1	2.0	1.9	1.8	1.6	1.5	1.4	1.2
40		2.0	2.0	2.0	1.9	1.8	1.6	1.5	1.4	1.2
50		1.9	1.9	1.9	1.9	1.8	1.6	1.5	1.4	1.2

Tabella 4: Substrato marino caratterizzato da $Vs < 800m/s$. Fattori di Amplificazione **PGA**. Colonna 1 $H(m)$, riga 1 $Vs_H(m/s)$

	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	2.1	1.7	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	
10	2.6	2.3	1.9	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.3	
15	2.7	2.6	2.3	1.9	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	
20	2.6	2.6	2.4	2.1	1.8	1.6	1.5	1.4	1.3	
25	2.6	2.6	2.5	2.3	2.0	1.7	1.6	1.4	1.3	
30		2.4	2.4	2.3	2.1	1.8	1.6	1.5	1.3	
35		2.4	2.4	2.3	2.2	1.9	1.7	1.5	1.4	1.2
40		2.2	2.2	2.2	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2
50		2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	1.8	1.6	1.5	1.3

Tabella 5: Substrato marino caratterizzato da $Vs < 800m/s$. Fattori di Amplificazione **SI1** ($0.1s \leq T_0 \leq 0.5s$). Colonna 1 $H(m)$, riga 1 $Vs_H(m/s)$

	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	
10	1.8	1.6	1.4	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	
15	2.3	1.9	1.6	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	
20	2.9	2.6	1.9	1.6	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	
25	3.6	3.0	2.3	1.7	1.5	1.4	1.4	1.4	1.3	
30		3.3	2.7	1.9	1.7	1.5	1.4	1.4	1.3	
35		3.5	3.0	2.2	1.8	1.6	1.5	1.4	1.3	1.1
40		3.5	3.2	2.6	2.0	1.8	1.6	1.5	1.4	1.2
50		3.3	3.3	3.0	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5	1.3

Tabella 6: Substrato marino caratterizzato da $Vs < 800m/s$. Fattori di Amplificazione **SI2** ($0.5s \leq T_0 \leq 1.0s$). Colonna 1 $H(m)$, riga 1 $Vs_H(m/s)$

$Vs_{30}(m/s) \rightarrow$	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
F.A. PGA					1.9	1.8	1.6	1.4	1.2	1.1
F.A. SI1					1.9	1.7	1.6	1.4	1.3	1.2
F.A. SI2					1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3

Tabella 7: Substrato marino caratterizzato da $Vs < 800m/s$ affiorante. Fattori di Amplificazione **PGA**, **SI1** e **SI2**

Tabelle Pianura

$Vs_{30}(m/s) \rightarrow$	150	200	250	300	350	400
F.A. PGA	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.5
F.A. SI1	1.9	1.9	1.9	1.8	1.6	1.5
F.A. SI2	3.0	2.9	2.7	2.5	2.3	2.1
F.A. SI3	3.4	3.2	2.8	2.5	2.2	2.0

Tabella 8: Pianura 1. Tabella dei Fattori di Amplificazione **PGA**, **SI1**, **SI2** e **SI3**.

$Vs_{30}(m/s) \rightarrow$	150	200	250	300	350	400
F.A. PGA	1.7	1.7	1.7	1.6	1.5	1.5
F.A. SI1	2.0	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6
F.A. SI2	3.1	3.0	2.7	2.4	2.1	2.0
F.A. SI3	3.6	3.3	2.9	2.5	2.2	2.0

Tabella 9: Pianura 2. Tabella dei Fattori di Amplificazione **PGA**, **SI1**, **SI2** e **SI3**.

	150	200	250	300	350	400
5	2.3	2.1	1.8	1.5		
10	2.3	2.2	2.0	1.8		
15	2.1	2.1	2.0	1.8		
20	2.1	2.1	2.0	1.9		
25	2.0	2.0	2.0	1.9		
30	1.9	1.9	1.9	1.9		

Tabella 10: Margine settore A. Tabella dei Fattori di Amplificazione **PGA**.
Colonna 1 $H(m)$, riga 1 $Vs_H(m/s)$

	150	200	250	300	350	400
5	2.2	1.9	1.7	1.6		
10	2.6	2.4	2.0	1.8		
15	2.6	2.5	2.2	1.9		
20	2.5	2.5	2.3	2.0		
25	2.3	2.3	2.2	2.1		
30	2.1	2.1	2.1	2.0		

Tabella 11: Margine settore A. Tabella dei Fattori di Amplificazione **SI1**.
Colonna 1 $H(m)$, riga 1 $Vs_H(m/s)$

	150	200	250	300	350	400
5	1.8	1.7	1.6	1.6		
10	2.3	2.0	1.8	1.7		
15	3.2	2.6	2.1	2.0		
20	3.5	3.1	2.5	2.1		
25	3.7	3.4	2.8	2.4		
30	3.6	3.5	3.0	2.6		

Tabella 12: Margine settore A. Tabella dei Fattori di Amplificazione **SI2**.
Colonna 1 $H(m)$, riga 1 $Vs_H(m/s)$

$Vs_{30}(m/s) \rightarrow$	150	200	250	300	350	400
F.A. PGA	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5
F.A. SI1	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6
F.A. SI2	2.9	2.8	2.5	2.3	2.1	2.0
F.A. SI3	3.3	3.1	2.7	2.4	2.2	2.0

Tabella 13: Margine settore B. Tabella dei Fattori di Amplificazione **PGA**,
SI1, **SI2** e **SI3**.

$Vs_{30}(m/s) \rightarrow$	150	200	250	300	350	400
F.A. PGA	1.3	1.3	1.3			
F.A. SI1	1.5	1.5	1.5			
F.A. SI2	2.3	2.3	2.2			
F.A. SI3	2.6	2.6	2.4			

Tabella 14: Pianura 3. Tabella dei Fattori di Amplificazione **PGA**, **SI1**, **SI2**
e **SI3**.

Riferimenti

Castagnetti S., M. Baldi, U. Baldini, R. Bevivino, C. Gianferrari, L. Martelli, A. Tento, A. Marcellini, R. Daminelli (2010). Unione Terre di Castelli: validazione della microzonazione sismica di II livello. Atti del 29° Convegno Nazionale GNGTS, Prato, 26-28 ottobre 2010. pp 314-317.

Facciorusso J., Crespellani T., Martelli L., Romani M., Manicardi A., Ugoletti C., Mazzetti G.P., Campagnoli I., Marabini S., Nonni E., Sbarzaglia D., Madiati C., Vannucchi G. (2012). Microzonazione sismica, uno strumento consolidato per la riduzione del rischio. L'esperienza della Regione Emilia-Romagna. Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, aprile 2012

Laurenzano G., E. Priolo (2013). Studio sismologico per la caratterizzazione della risposta sismica di sito ai fini della microzonazione sismica di alcuni comuni della Regione Emilia-Romagna. Rel. OGS 2013/74 Sez. CRS 26, 31 luglio 2013. Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS, Dipartimento Centro di Ricerche Sismologiche

Marcellini A., A. Tento (2012). Seismic risk reduction: the role of seismic microzonation. Proceedings Workshop in honor and memory of Prof. Giuseppe Grandori, Politecnico di Milano, 5 novembre 2012

Marcellini A., Martelli L., Tento A., Daminelli R. (2009). L'amplificazione sismica negli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica. Atti del 28° Convegno Nazionale GNGTS, Trieste, 16-19 Novembre 2009.

Marcellini A., M. Pagani, A. Tento, T. Crespellani, C. Madiati, L. Martelli, G. Manieri, G. Santangelo, M. M. Sani, M. Romani, C. Mambelli e R. Nicolini (2006). Gli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna. Atti del 25° Convegno Nazionale GNGTS, Roma, 28-30 Novembre 2006.

Marcellini A., Tento A., Daminelli R. (2009). Convenzione tra la Provincia di Rimini e CNR-IDPA per l'esecuzione di studi pilota in aree rappresentative delle condizioni geologiche e morfologiche del territorio provinciale che possono determinare effetti locali in caso di eventi sismici. Rapporto Tecnico IDPA-CNR, gennaio 2009

Marcellini A., A. Tento and R. Daminelli (2012). Seismic microzonation as a fundamental step towards seismic risk reduction. Proceedings 7th Eurogeo, Bologna, Italy.

Meletti C., Montaldo V., (2007). Stime di pericolosità sismica per diverse probabilità di superamento in 50 anni: valori di ag. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D2, <http://esse1.mi.ingv.it/d2.html>

Montaldo V., Meletti C., (2007). Valutazione del valore della ordinata spettrale a 1sec e ad altri periodi di interesse ingegneristico. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D3, <http://esse1.mi.ingv.it/d3.html>

Norme Tecniche per le Costruzioni, NTC (2008). Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008, Gazzetta Ufficiale n. 29, 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30.

Pagani M., Marcellini A., Crespellani T., Martelli L., Tento A., Daminelli R. (2006). Seismic microzonation regulations of the Emilia-Romagna region (Italy). in Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, 29 August - 01 September, 2006

Pagani M. (2007). Linee guida per la microzonazione sismica in Emilia-Romagna: Calcolo del moto di riferimento. Presentazione al workshop: Procedura per la costruzione delle tabelle di amplificazione sismica messe a punto nelle regioni Lombardia e Emilia-Romagna. Dipartimento della Protezione Civile - Ufficio Servizio Sismico, Roma. 19 aprile 2007

Regione Emilia-Romagna, (2007). Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica. Delibera dell'Assemblea Legislativa n. 112/2007

Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli (2012). <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/speciale-terremoto/sisma-2012-ordinanza-70-13-11-2012-cartografia>

Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B., (1972). SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. UCB/EERC-72/12, University of California, Berkeley, December, 102p.

Tento A. (2007). Costruzione delle tabelle per la valutazione dell'amplificazione sismica nella Regione Emilia-Romagna. Presentazione al workshop: Procedura per la costruzione delle tabelle di amplificazione sismica messe a punto nelle regioni Lombardia e Emilia-Romagna. Dipartimento della Protezione Civile - Ufficio Servizio Sismico, Roma. 19 aprile 2007

Tento A. (2009). Valutazione degli effetti di amplificazione topografica in Torriana e Verucchio (RN). Rapporto Tecnico IDPA-CNR, ottobre 2009

Tento A. (2009). Valutazione della risposta sismica in sei siti nella provincia di Modena. Rapporto Tecnico IDPA-CNR, dicembre 2009

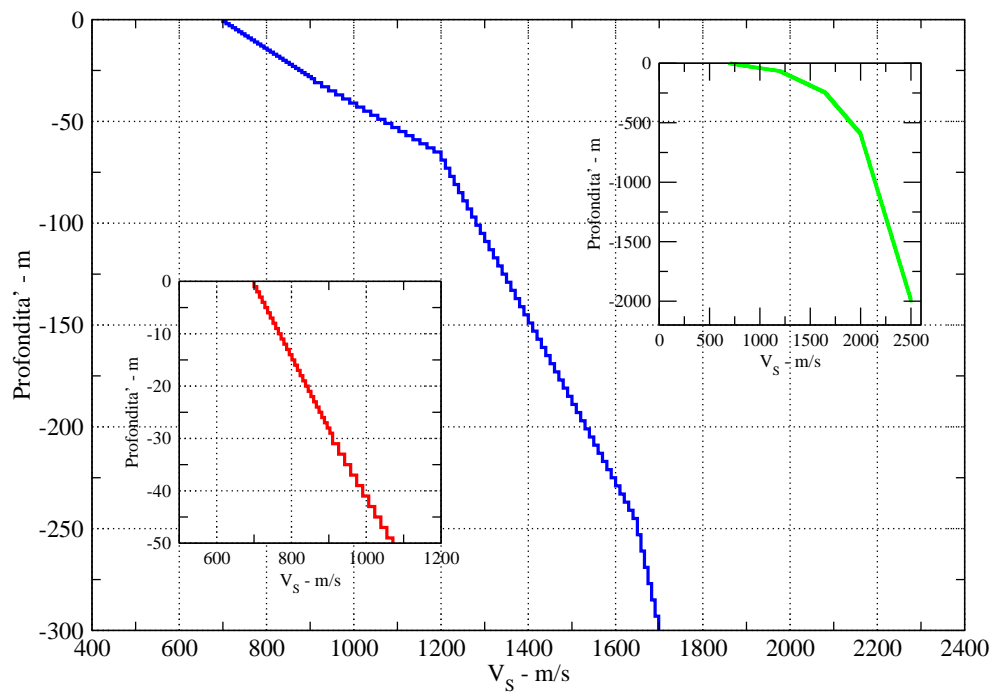


Figura 1: Profilo di riferimento relativo al *suolo A*

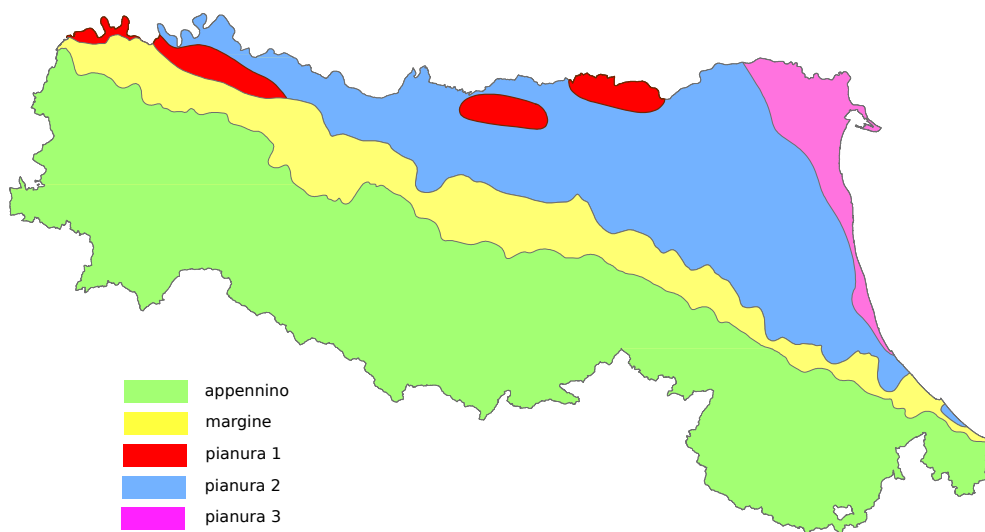


Figura 2: Localizzazione indicativa delle ambienti geomorfologici e litostratigrafici in Emilia-Romagna

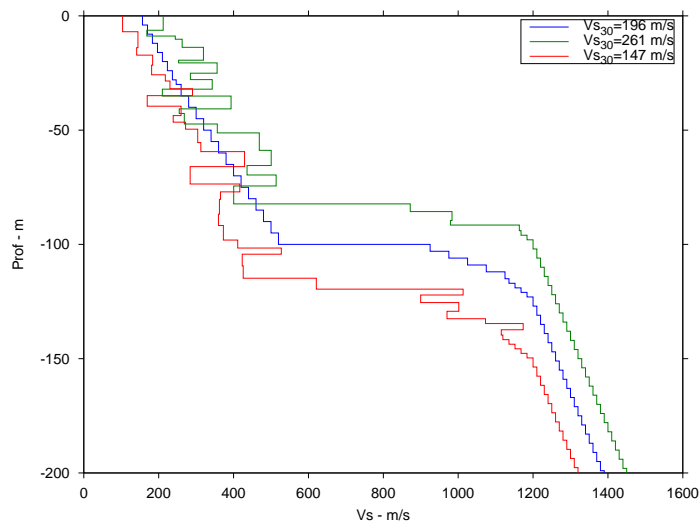


Figura 3: Profili di Vs. Linea blu : profilo medio, linee rossa e verde : profili casuali generati basandosi sul profilo medio

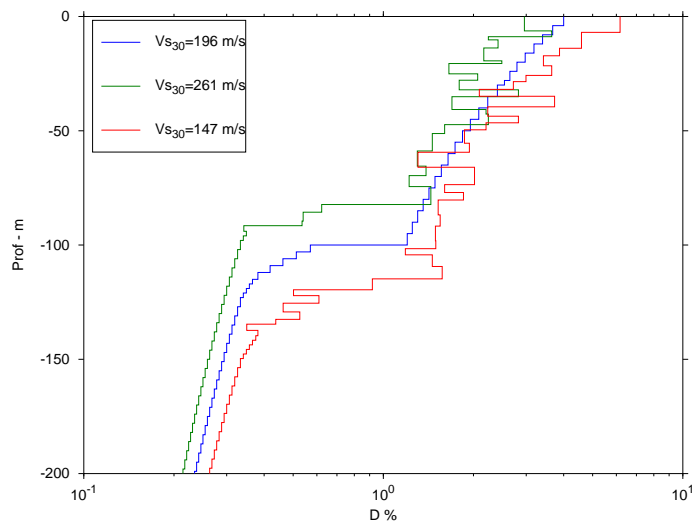


Figura 4: Profili di smorzamento percentuale corrispondenti ai profili di velocità di fig. 3. Linea blu : profilo medio, linee rossa e verde : profili casuali

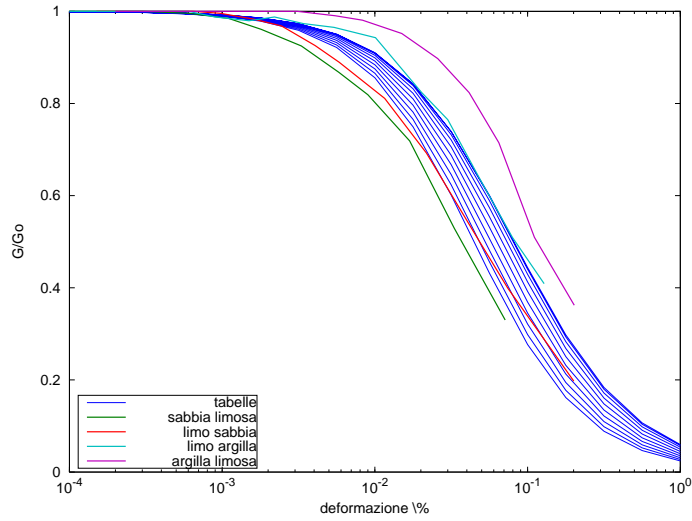


Figura 5: Curve G/G_0 in funzione della deformazione. Blu : curve utilizzate nel presente lavoro per gli strati dei depositi fino a circa 15 m. Le altre curve si riferiscono a campioni prelevati a San Carlo e Crevalcore a profondità non superiori a 10 m.

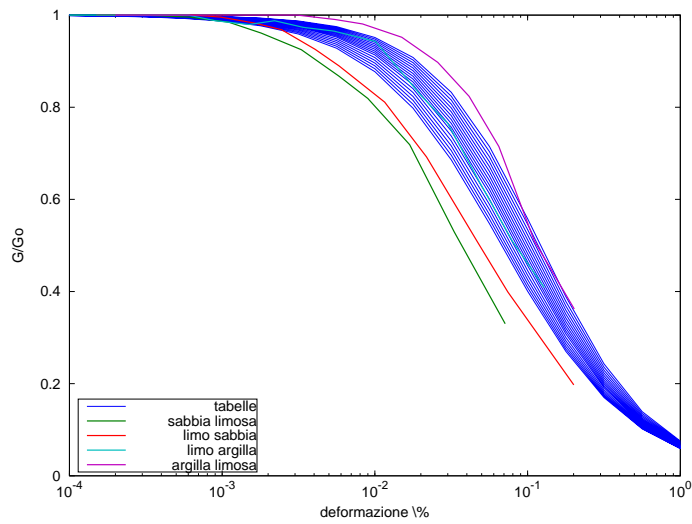


Figura 6: Come fig. 5 ma con le curve in blu relative agli strati dei depositi con profondità superiore a 15 m.

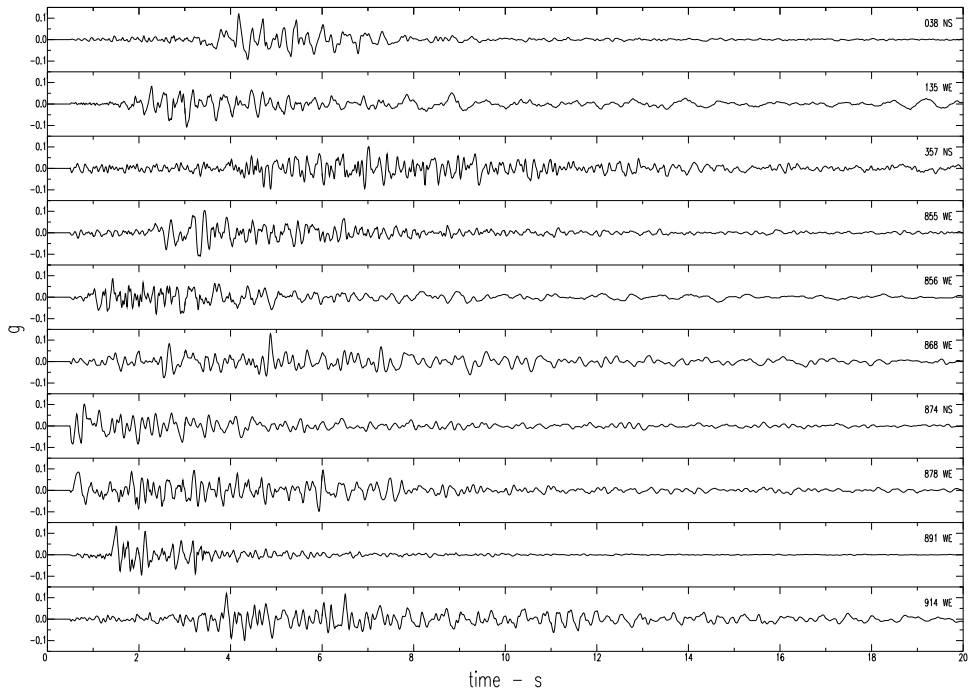


Figura 7: Accelerogrammi selezionati per la valutazione della risposta sismica

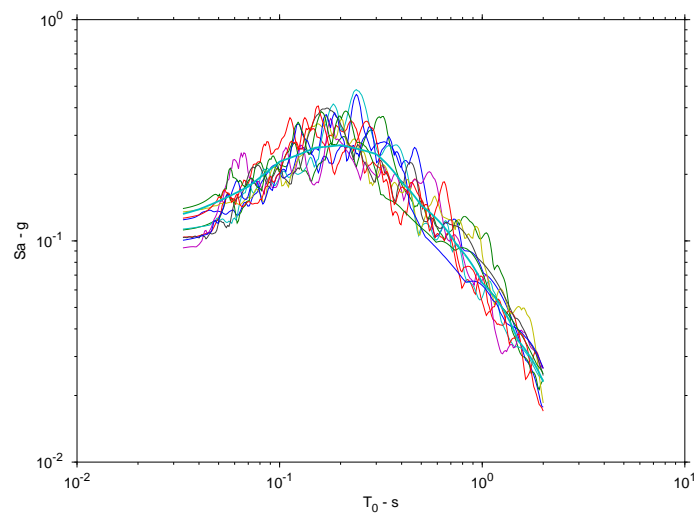


Figura 8: Spettri di risposta degli accelerogrammi di fig. 7 (linee sottili) e spettro di risposta della pericolosità sismica

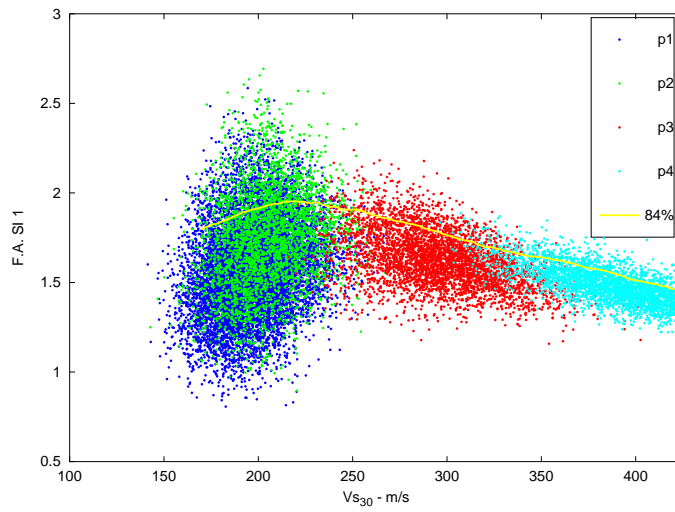


Figura 9: Esempio relativo alla pianura. punti corrispondono ai fattori di amplificazione differenziati rispetto ai profili medi che hanno generato i profili casuali. La linea gialla è relativa al 84 percentile

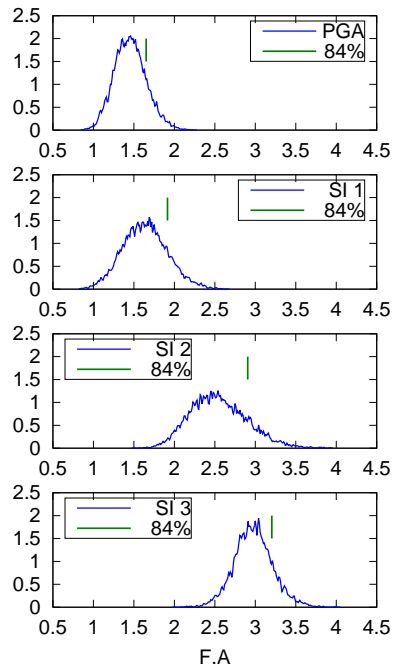


Figura 10: Esempio relativo alla pianura di distribuzione dei fattori di amplificazione per V_{s30} di 200 m/s

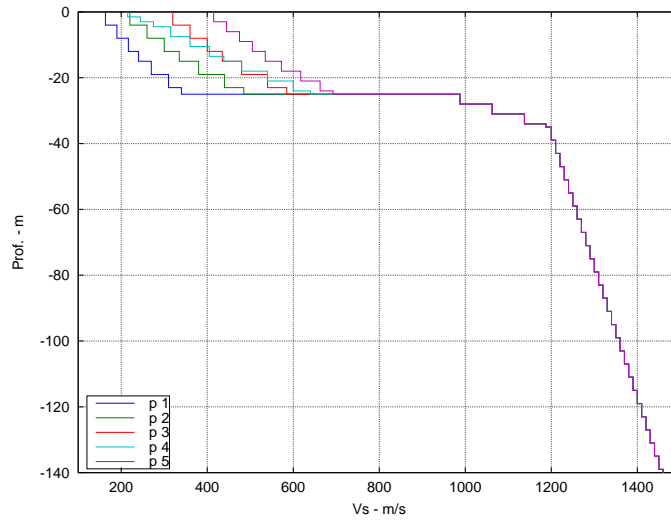


Figura 11: Substrato marino $V_s \geq 800m/s$, profili medi con $H = 25m$ utilizzati per il calcolo dei fattori di amplificazione.

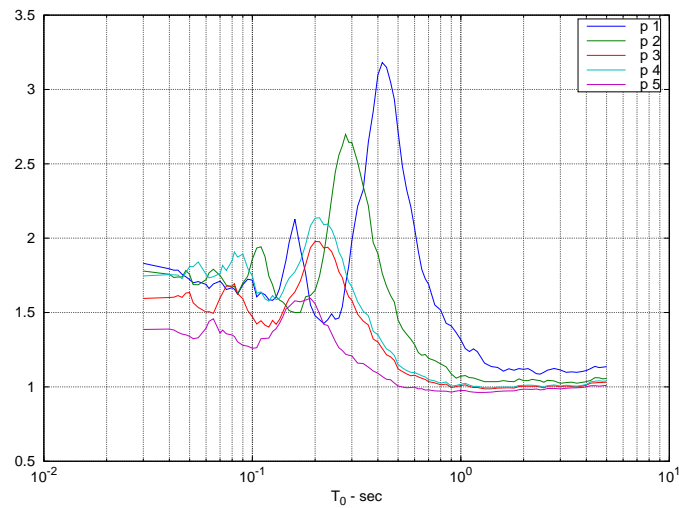


Figura 12: Rapporti fra gli spettri di risposta in accelerazione (smorz. 5%) relativi ai profili di fig. 11 e quello relativo al *suolo A*. La tabella seguente riporta i fattori di amplificazione dei profili medi.

Prof.	H m	V_{sH} m/s	FA PGA	FA SI1	FA SI2
p1	25	227	1.8	2.3	1.7
p2	25	314	1.8	2.0	1.2
p3	25	419	1.6	1.5	1.0
p4	25	381	1.7	1.6	1.1
p5	25	522	1.4	1.2	1.0

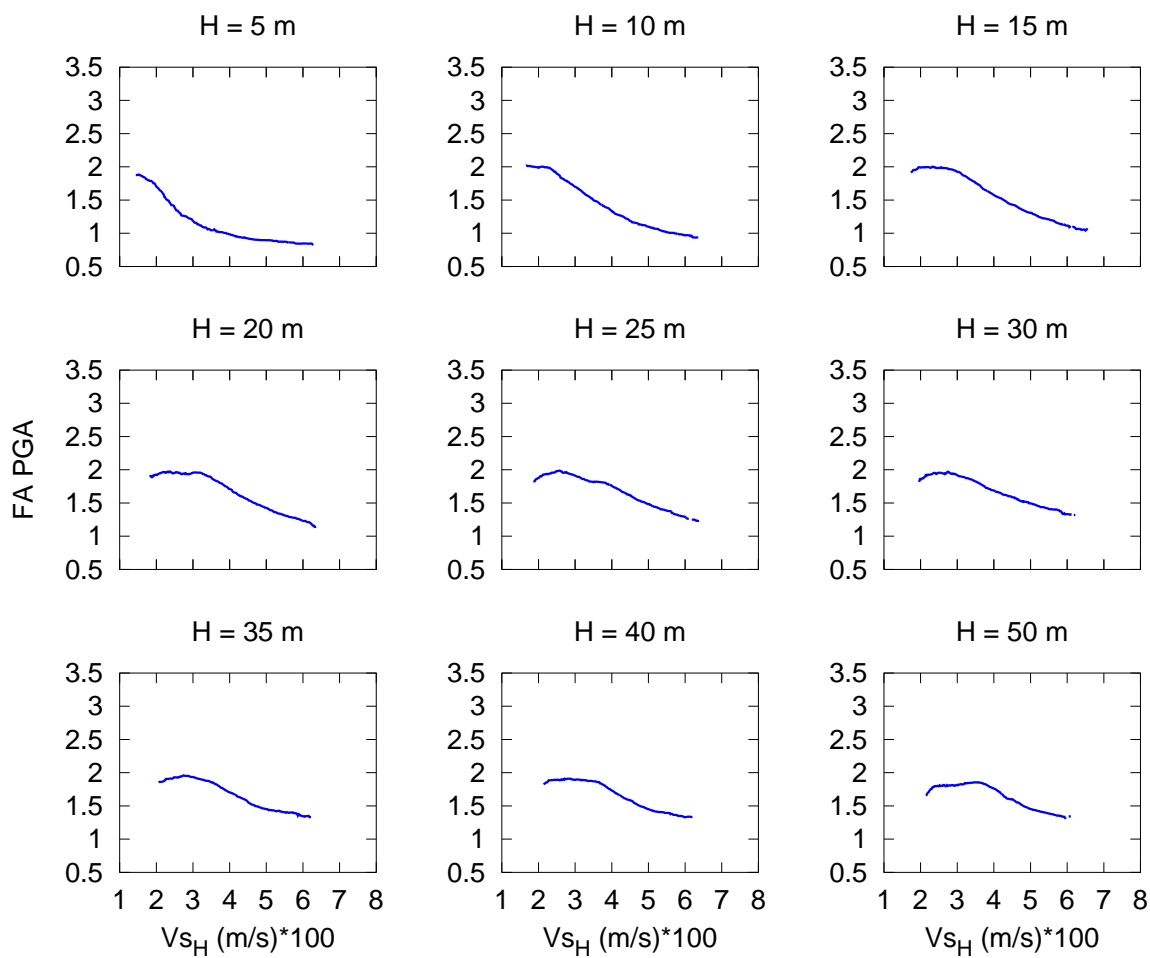


Figura 13: Substrato marino caratterizzato da $V_s \geq 800m/s$. Fattori di Amplificazione dell'accelerazione di picco PGA. Profondità del substrato $5m \leq H \leq 50m$.

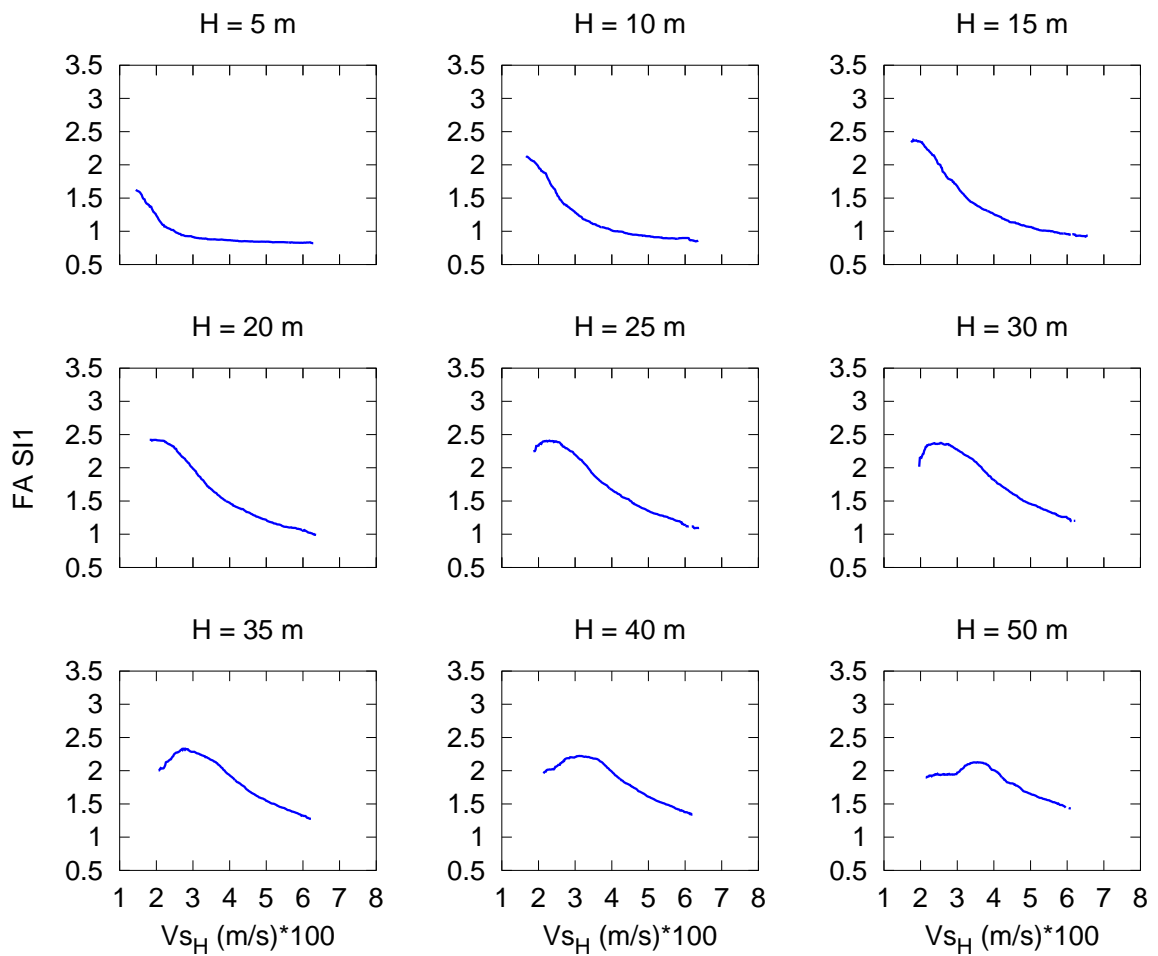


Figura 14: Substrato marino caratterizzato da $V_s \geq 800m/s$. Fattori di Amplificazione dell'intensità spettrale ($SI1$) per $0.1s \leq T_0 \leq 0.5s$. Profondità del substrato $5m \leq H \leq 50m$.

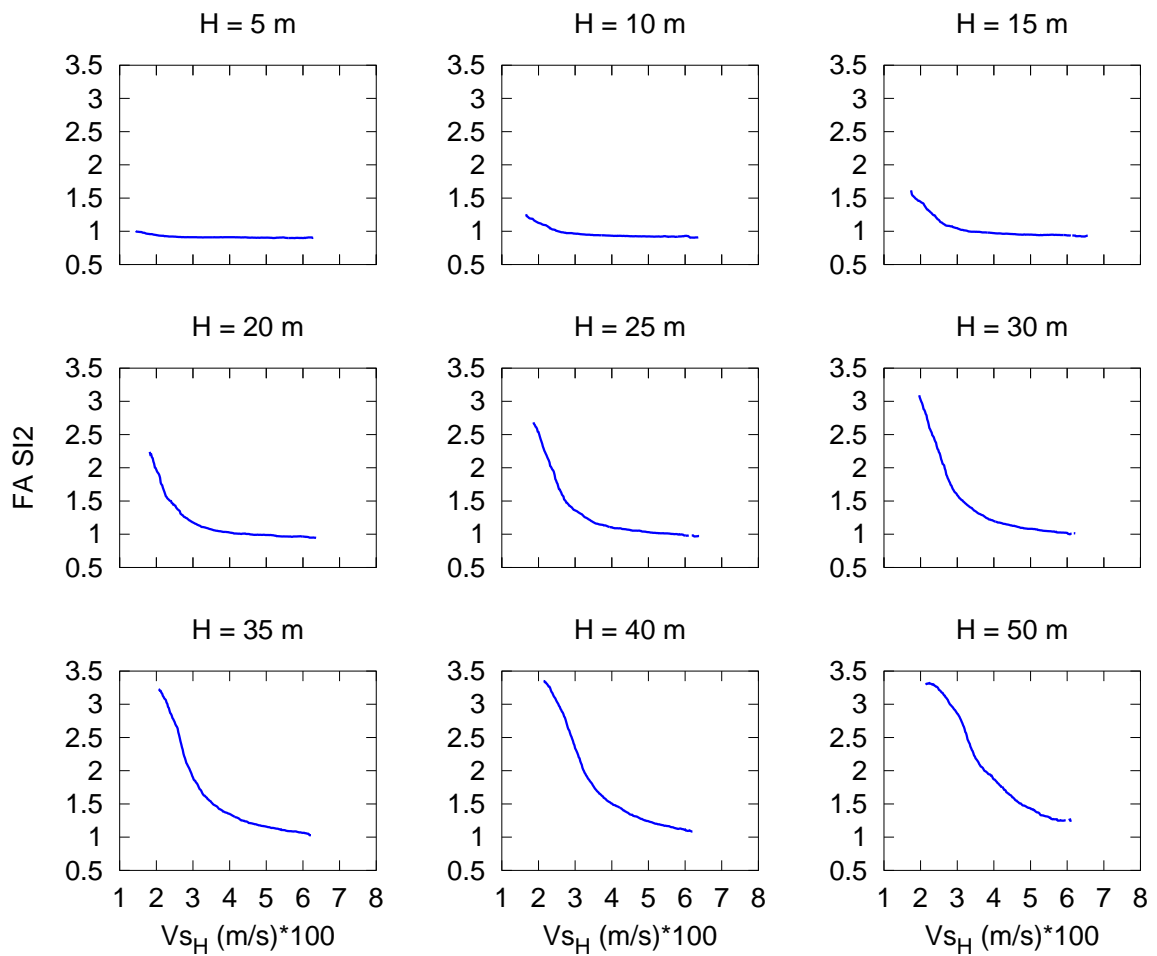


Figura 15: Substrato marino caratterizzato da $V_s \geq 800m/s$. Fattori di Amplificazione dell'intensità spettrale ($SI2$) per $0.5s \leq T_0 \leq 1.0s$. Profondità del substrato $5m \leq H \leq 50m$.

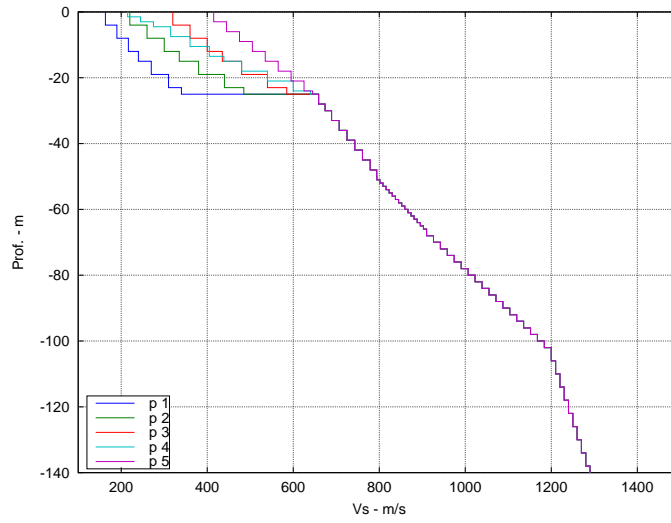


Figura 16: Substrato marino $V_s \leq 800\text{m/s}$, profili medi con $H = 25\text{m}$ utilizzati per il calcolo dei fattori di amplificazione.

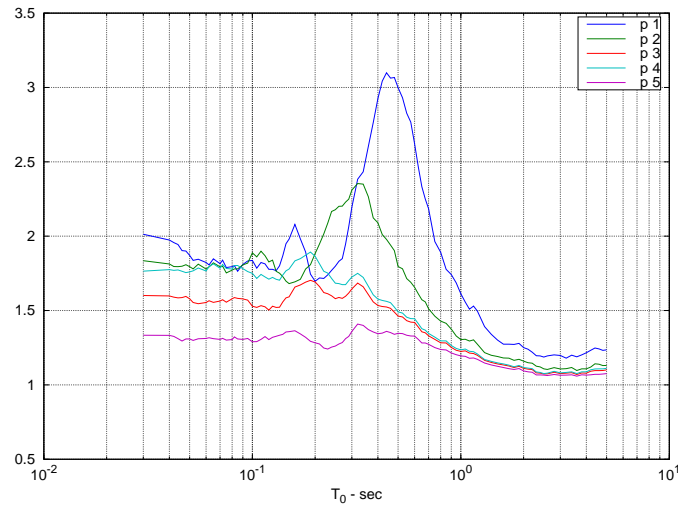


Figura 17: Rapporti fra gli spettri di risposta in accelerazione (smorz. 5%) relativi ai profili di fig. 16 e quello relativo al *suolo A*. La tabella seguente riporta i fattori di amplificazione dei profili medi.

Prof.	H m	V_{sH} m/s	FA PGA	FA SI1	FA SI2
p1	25	227	2.0	2.4	2.1
p2	25	314	1.8	2.1	1.5
p3	25	419	1.6	1.6	1.3
p4	25	381	1.8	1.7	1.3
p5	25	515	1.3	1.3	1.3

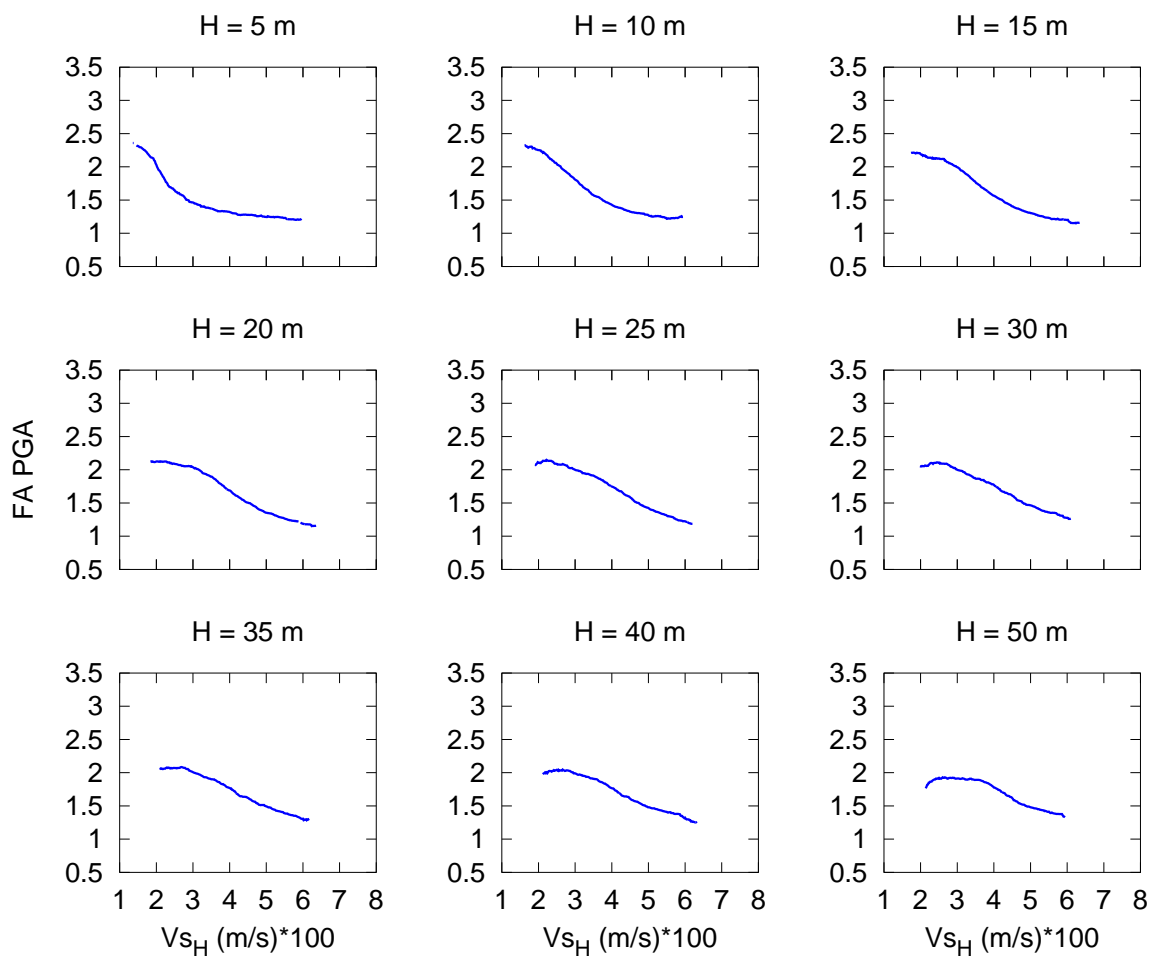


Figura 18: Substrato marino caratterizzato da $V_s < 800m/s$. Fattori di Amplificazione dell'accelerazione di picco PGA. Profondità del substrato $5m \leq H \leq 50m$.

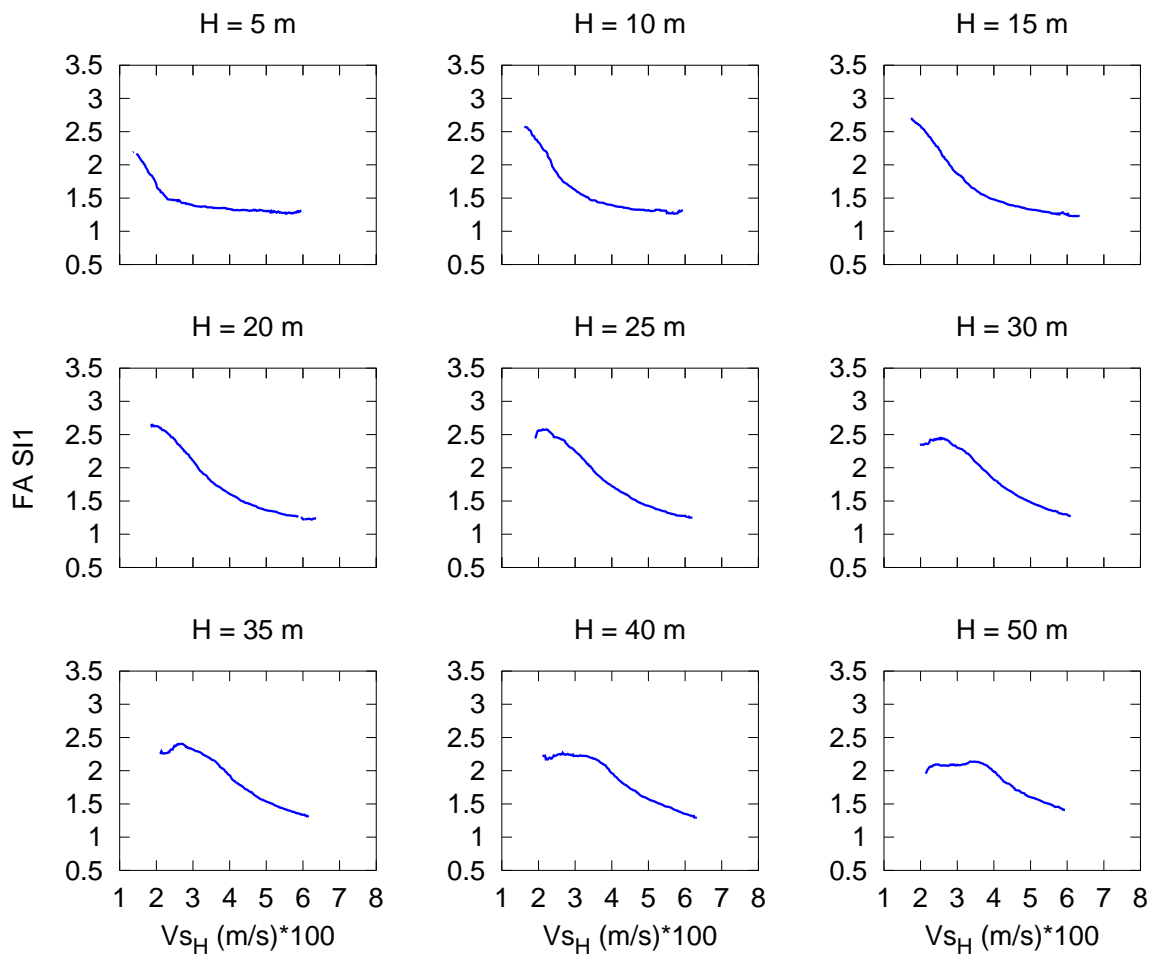


Figura 19: Substrato marino caratterizzato da $Vs < 800m/s$. Fattori di Amplificazione dell'intensità spettrale (SI1) per $0.1s \leq T_0 \leq 0.5s$. Profondità del substrato $5m \leq H \leq 50m$.

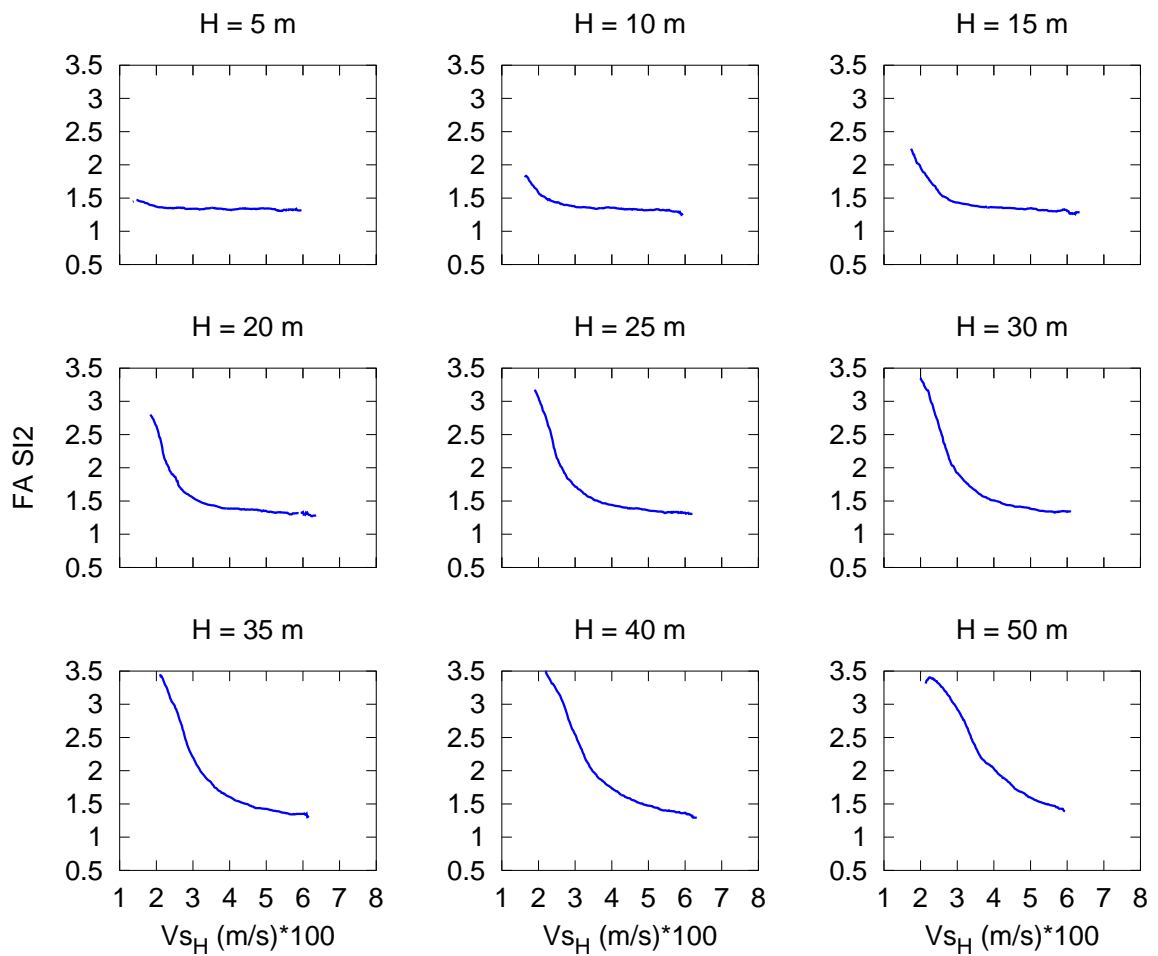


Figura 20: Substrato marino caratterizzato da $V_s < 800m/s$. Fattori di Amplificazione dell'intensità spettrale ($SI2$) per $0.5s \leq T_0 \leq 1.0s$. Profondità del substrato $5m \leq H \leq 50m$.

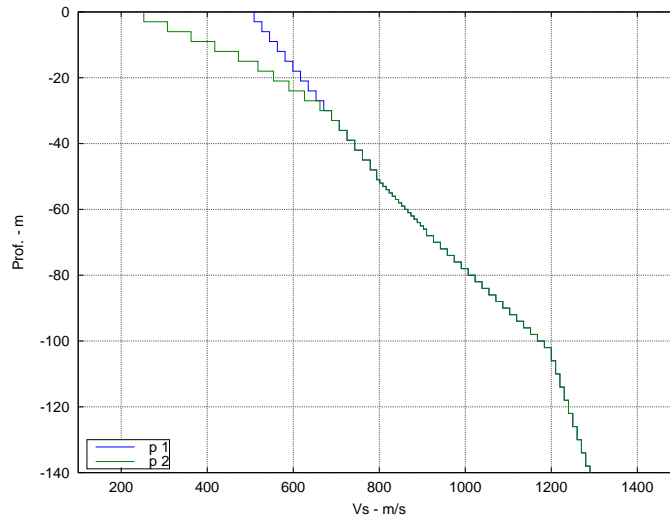


Figura 21: Substrato marino affiorante $Vs \leq 800m/s$, profili medi utilizzati per il calcolo dei fattori di amplificazione.

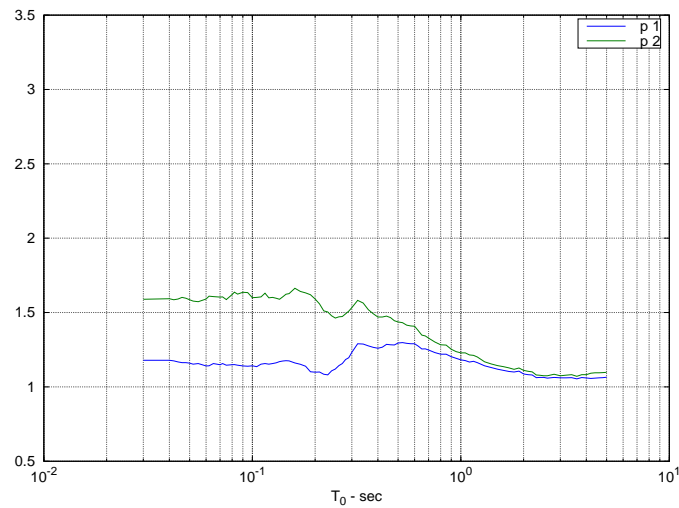


Figura 22: Rapporti fra gli spettri di risposta in accelerazione (smorz. 5%) relativi ai profili di fig. 21 e quello relativo al *suolo A*. La tabella seguente riporta i fattori di amplificazione dei profili medi.

Prof.	Vs_{30} m/s	FA PGA	FA SI1	FA SI2
p1	585	1.2	1.2	1.2
p2	434	1.6	1.5	1.3

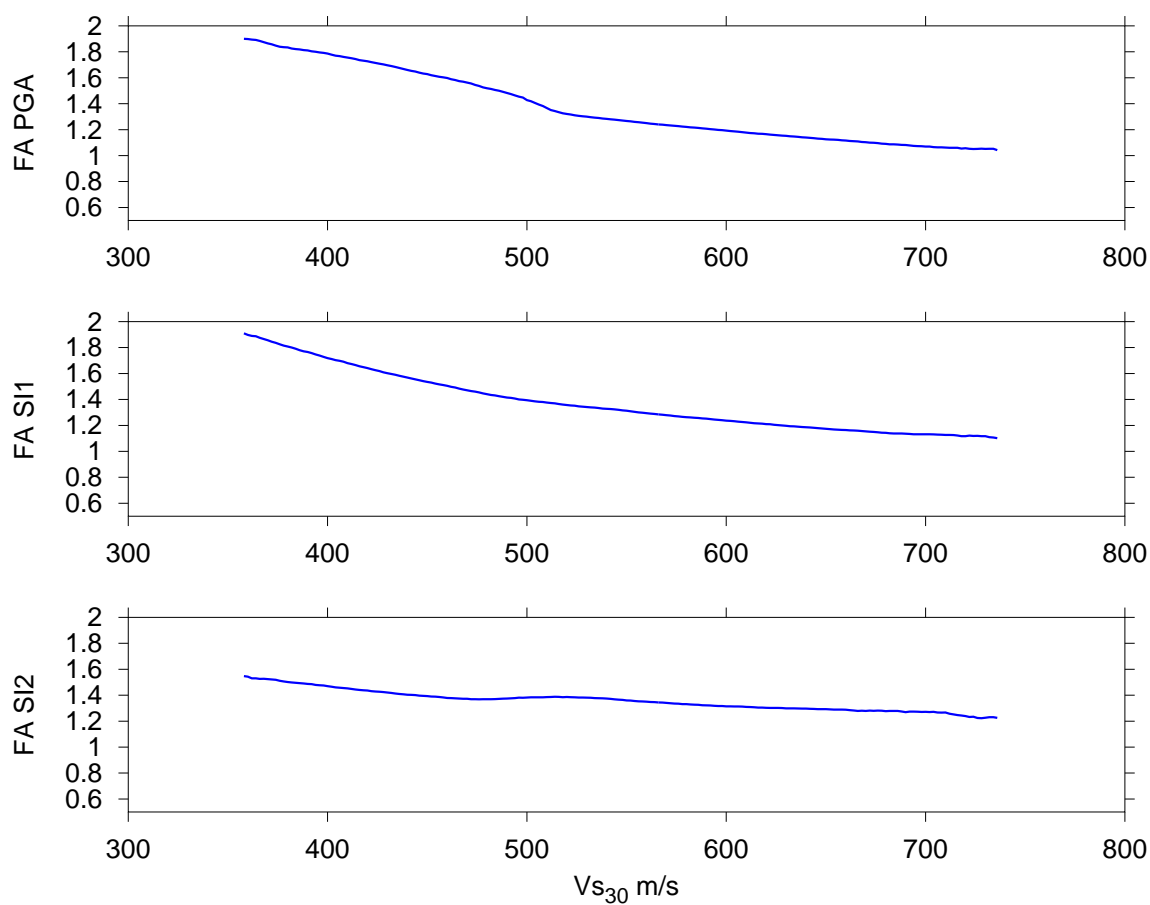


Figura 23: Substrato marino caratterizzato da $Vs < 800m/s$ **affiorante**. Fattori di Amplificazione di PGA, dell'intensità spettrale (*SI1*) per $0.1s \leq T_0 \leq 0.5s$ e dell'intensità spettrale (*SI2*) per $0.5s \leq T_0 \leq 1.0s$.

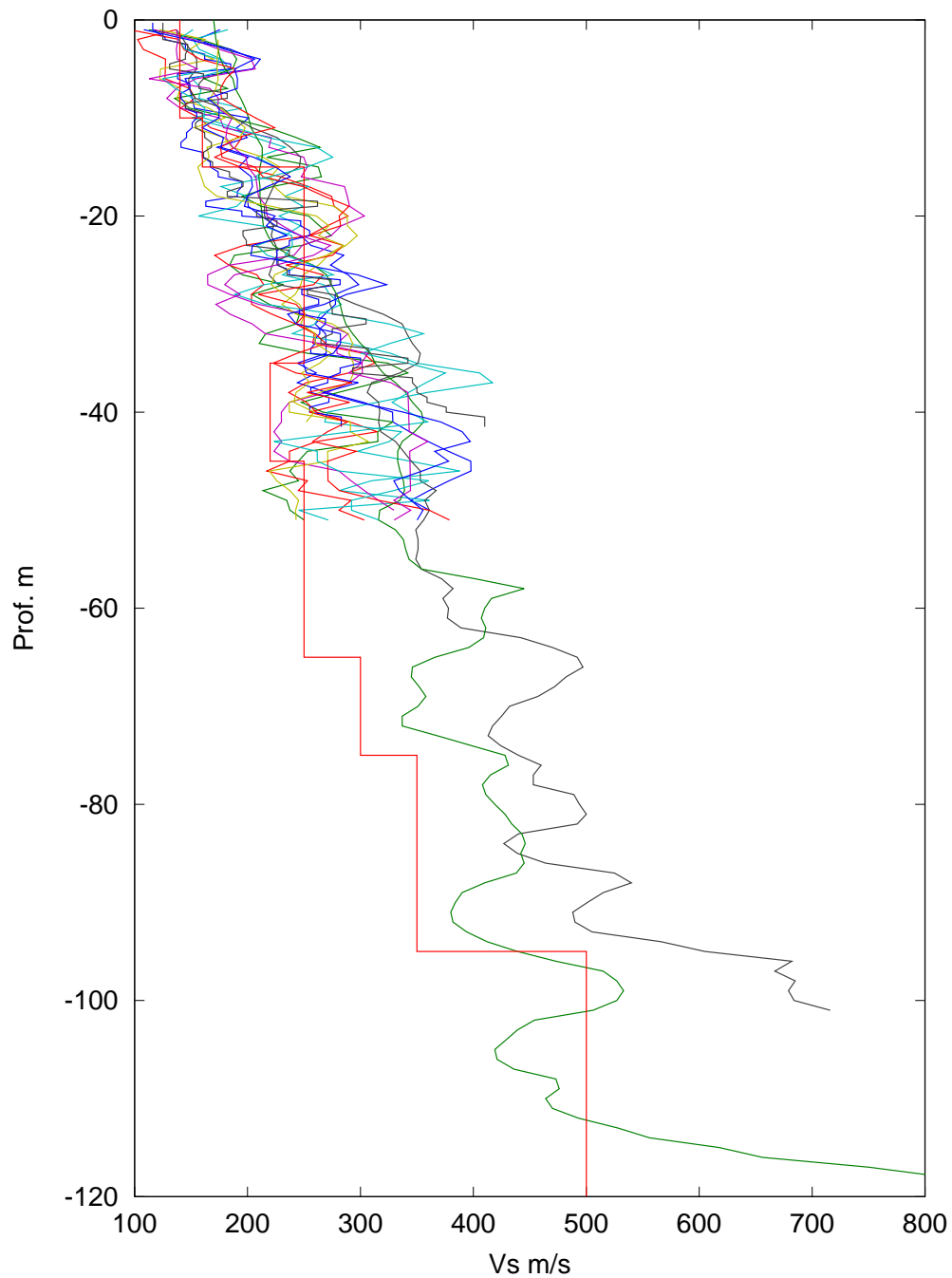


Figura 24: Profili Cross-Hole e Down-Hole (Regione Emilia-Romagna (2012)) di: Bondeno, Camposanto, Cento, Concordia, Crevalcore, Finale Emilia, Mirabello, Poggio Renatico, Reggiolo, Rovereto, San Carlo, San Felice sul Panaro. I profili più profondi sono relativi ai Cross-Hole di Mirandola (verde) e Medolla (nero). In rosso il profilo utilizzato per il sito di Casaglia, Laurenzano e Priolo (2013).

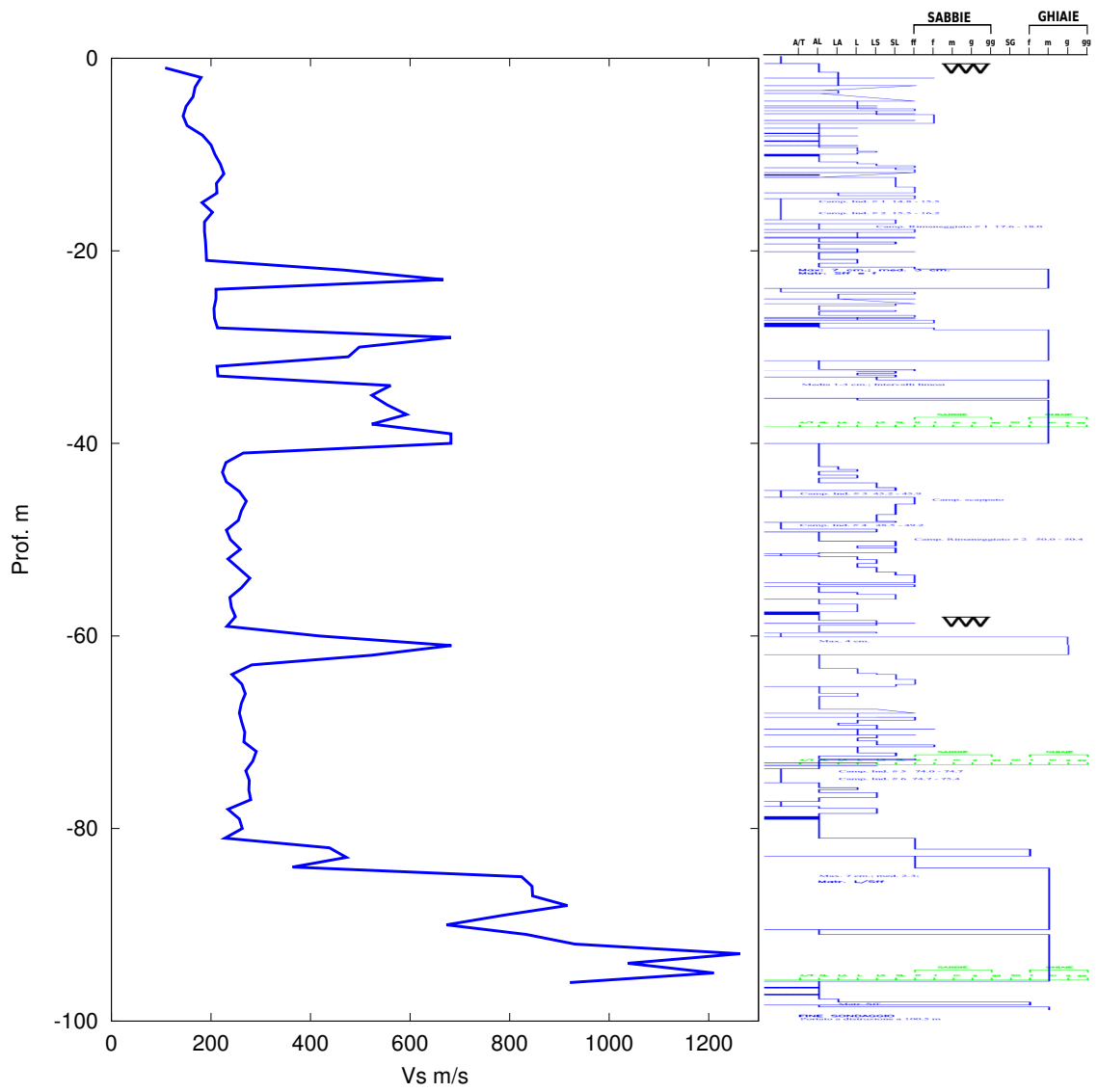


Figura 25: Profilo Cross-Hole e stratigrafia di Viserba

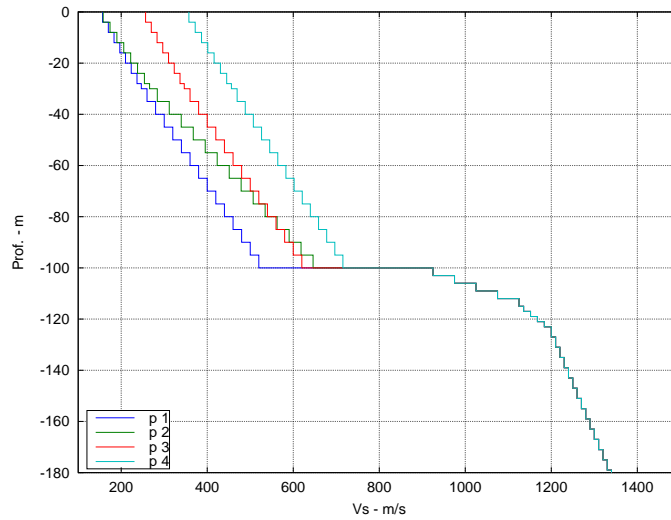


Figura 26: Pianura 1, profili medi utilizzati per il calcolo dei fattori di amplificazione.

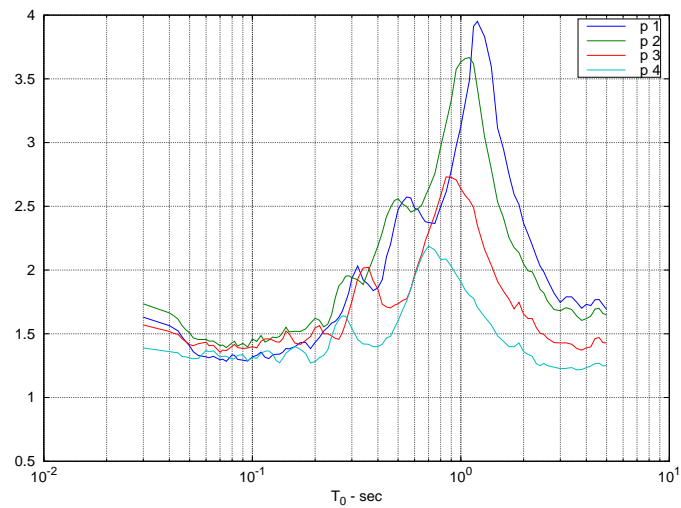


Figura 27: Rapporti fra gli spettri di risposta in accelerazione (smorz. 5%) relativi ai profili di fig. 26 e quello relativo al *suolo A*. La tabella seguente riporta i fattori di amplificazione dei profili medi.

Prof.	V_{s30} m/s	FA PGA	FA SI1	FA SI2	FA SI3
p1	196	1.6	1.8	2.6	3.1
p2	204	1.7	2.0	2.9	3.1
p3	297	1.6	1.7	2.4	2.3
p4	402	1.4	1.4	2.0	1.9

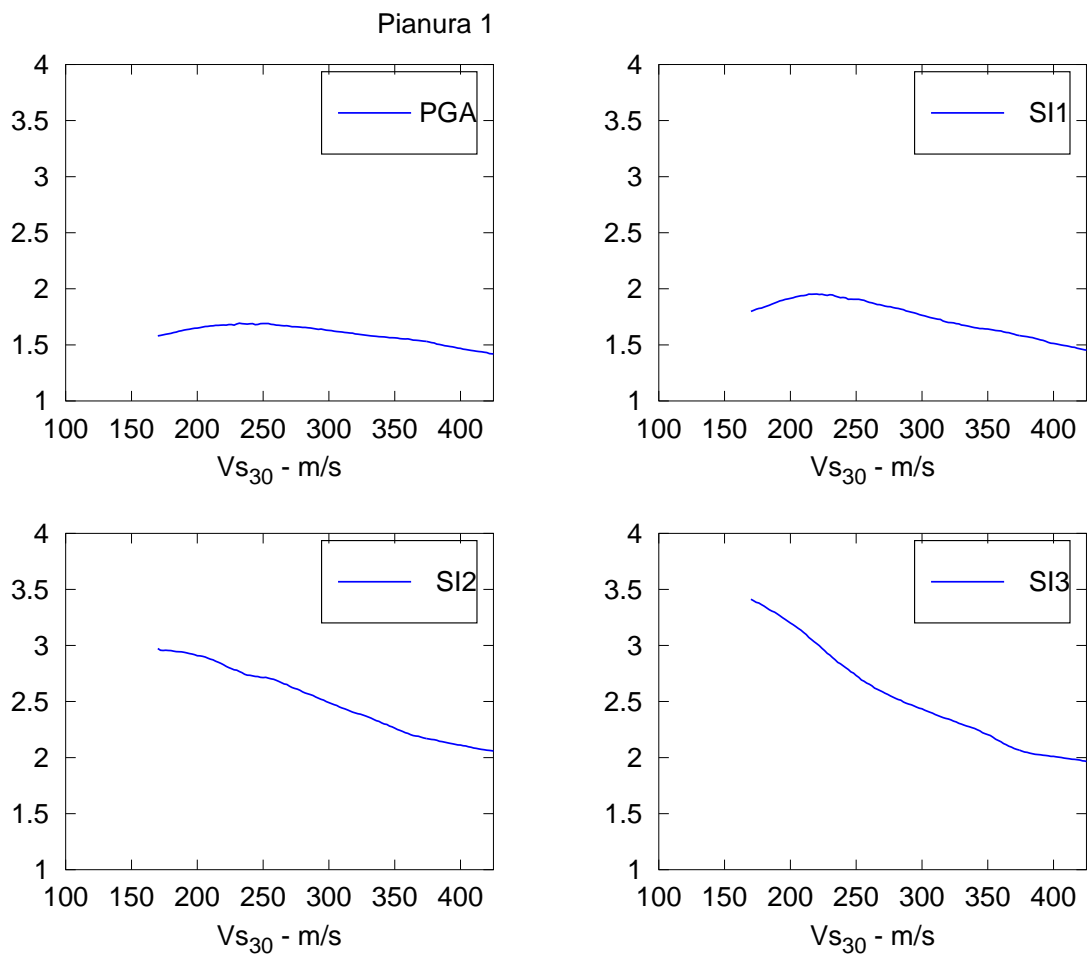


Figura 28: Pianura 1. Fattori di Amplificazione **PGA**, **SI1**, **SI2** e **SI3**.

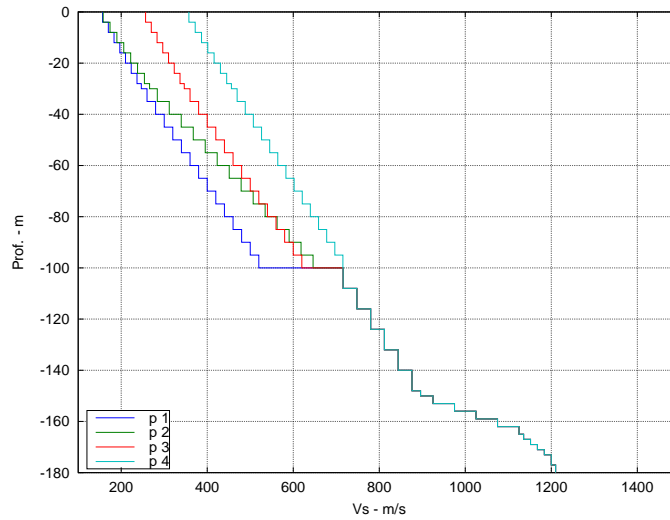


Figura 29: Pianura 2, profili medi utilizzati per il calcolo dei fattori di amplificazione.

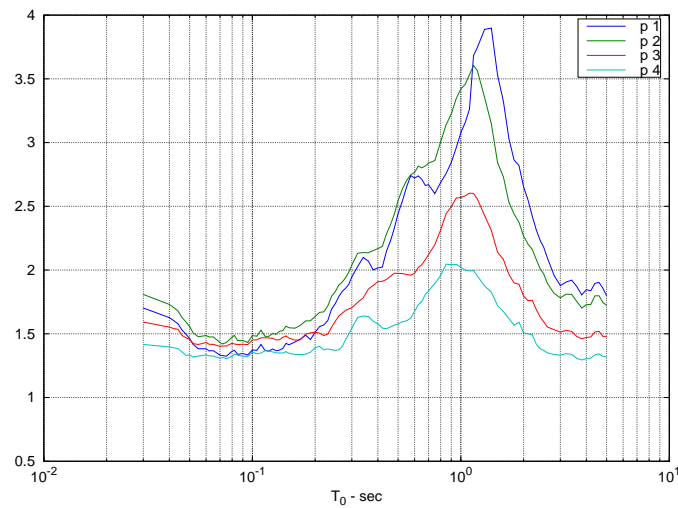


Figura 30: Rapporti fra gli spettri di risposta in accelerazione (smorz. 5%) relativi ai profili di fig. 29 e quello relativo al *suolo A*. La tabella seguente riporta i fattori di amplificazione dei profili medi.

Prof.	V_{s30} m/s	FA PGA	FA SI1	FA SI2	FA SI3
p1	196	1.7	1.9	2.8	3.2
p2	204	1.8	2.0	3.0	3.2
p3	297	1.6	1.7	2.2	2.3
p4	402	1.4	1.5	1.9	1.9

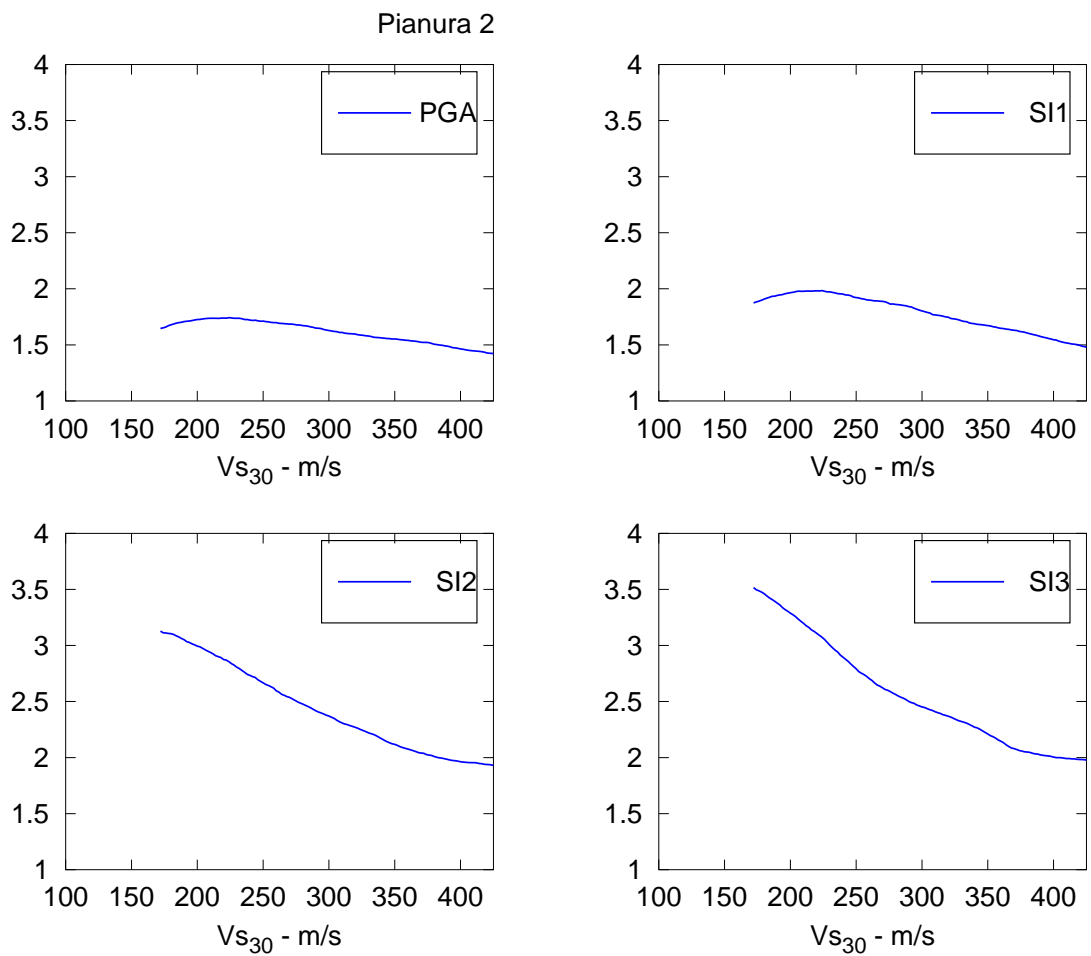


Figura 31: Pianura 2. Fattori di Amplificazione **PGA**, **SI1**, **SI2** e **SI3**.

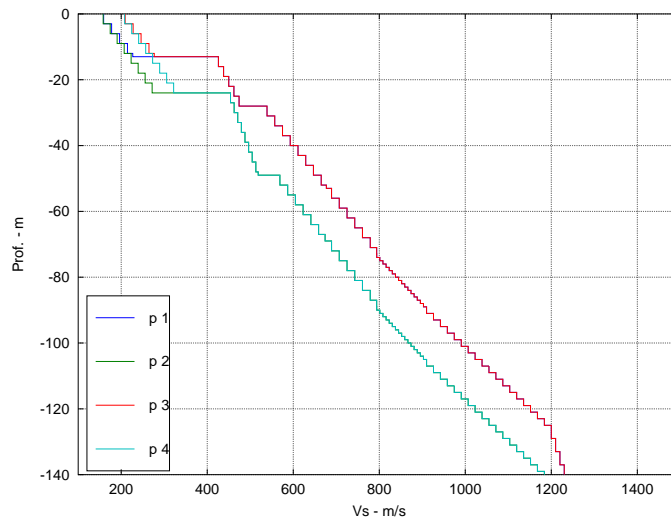


Figura 32: Margine settore A, profili medi utilizzati per il calcolo dei fattori di amplificazione.

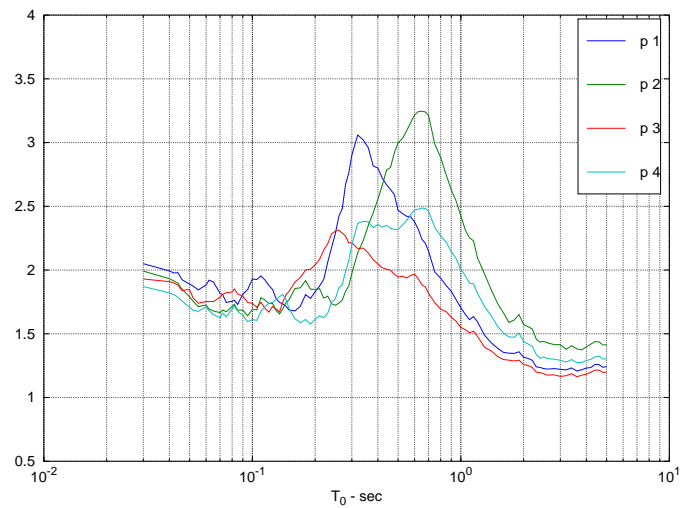


Figura 33: Rapporti fra gli spettri di risposta in accelerazione (smorz. 5%) relativi ai profili di fig. 32 e quello relativo al *suolo A*. La tabella seguente riporta i fattori di amplificazione dei profili medi.

Prof.	H m	Vs_H m/s	FA PGA	FA SI1	FA SI2
p1	13	187	2.0	2.5	2.1
p2	24	208	2.0	2.2	2.9
p3	13	238	1.9	2.1	1.8
p4	24	260	1.9	2.1	2.3

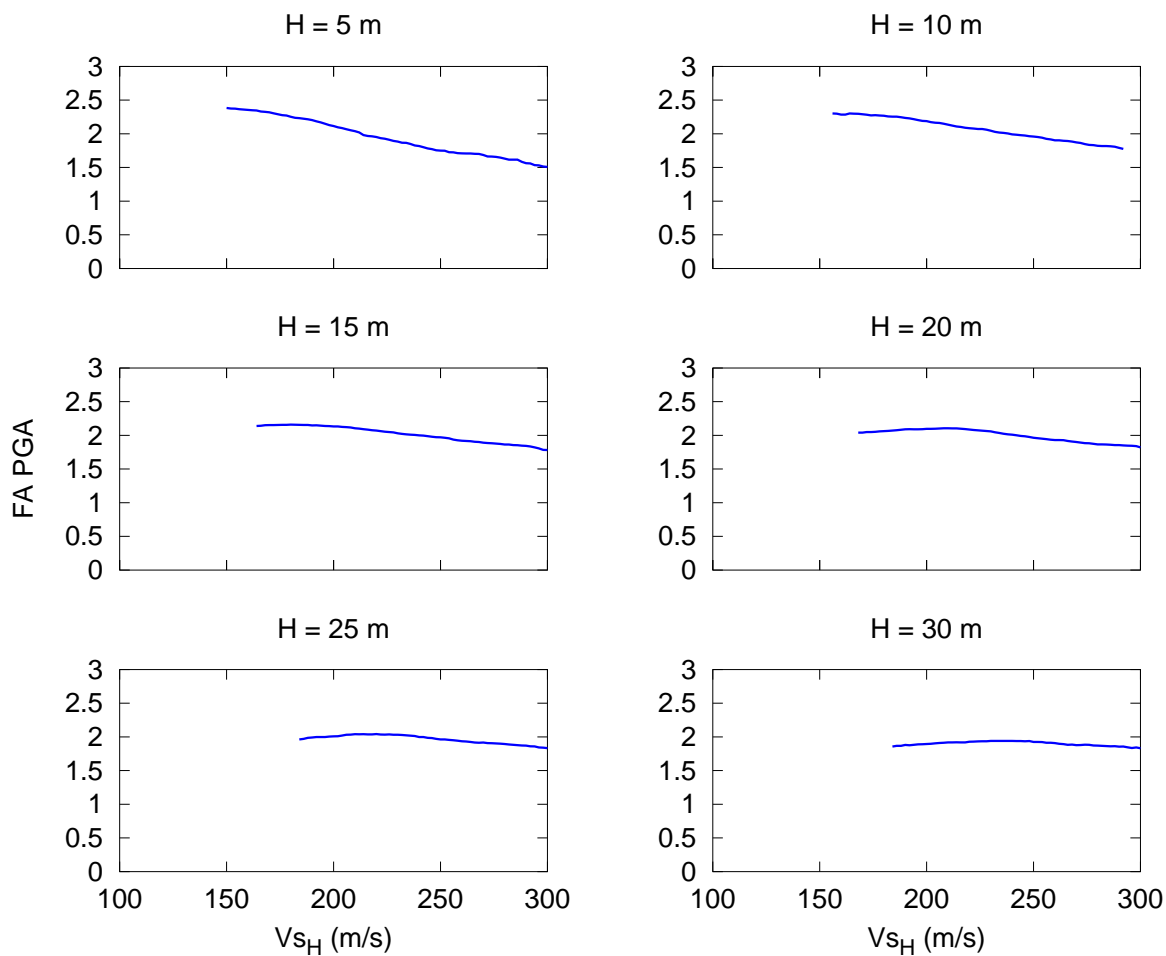


Figura 34: Margine settore A. Fattori di Amplificazione **PGA**. Profondità del tetto delle ghiaie $5m \leq H \leq 30m$.

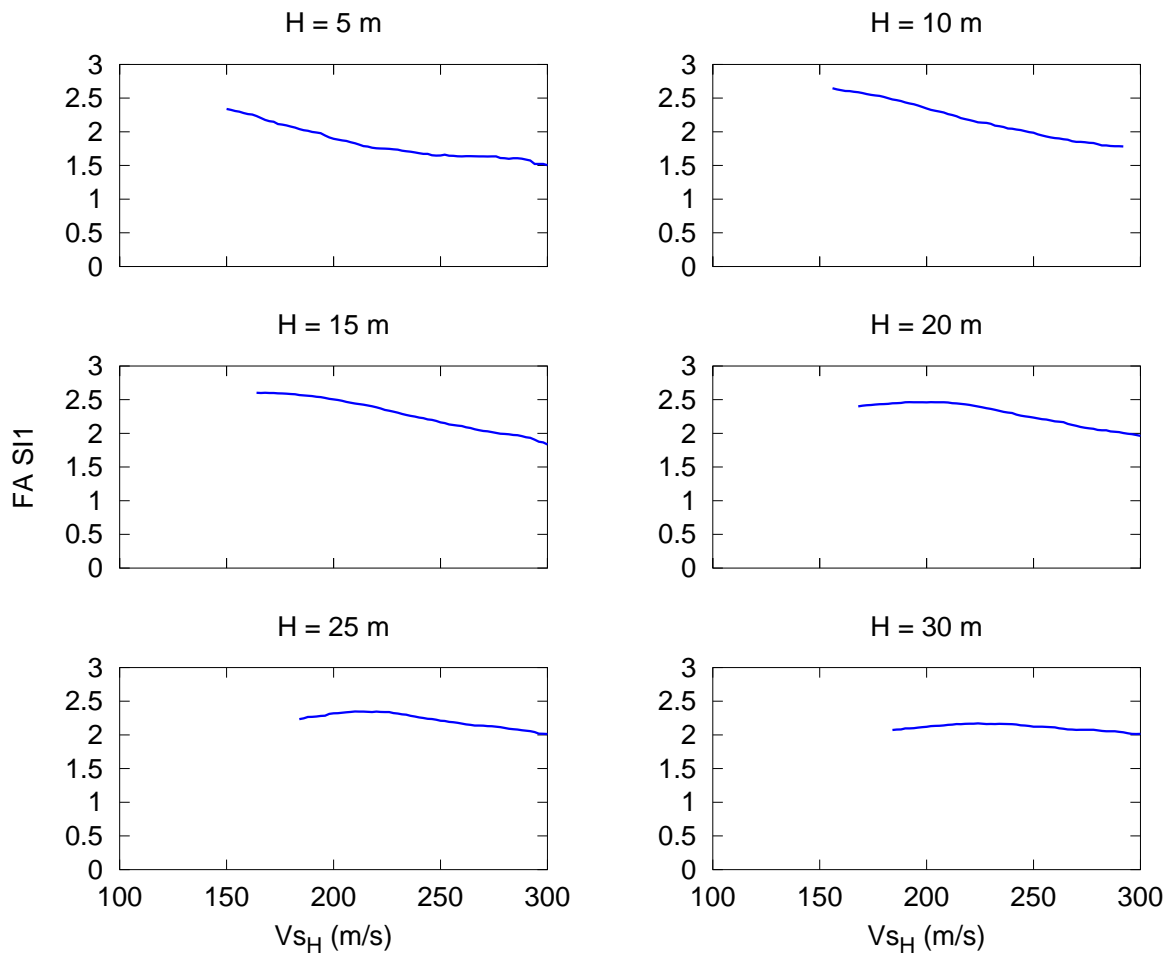


Figura 35: Margine settore A. Fattori di Amplificazione **SI1**. Profondità del tetto delle ghiaie $5m \leq H \leq 30m$.

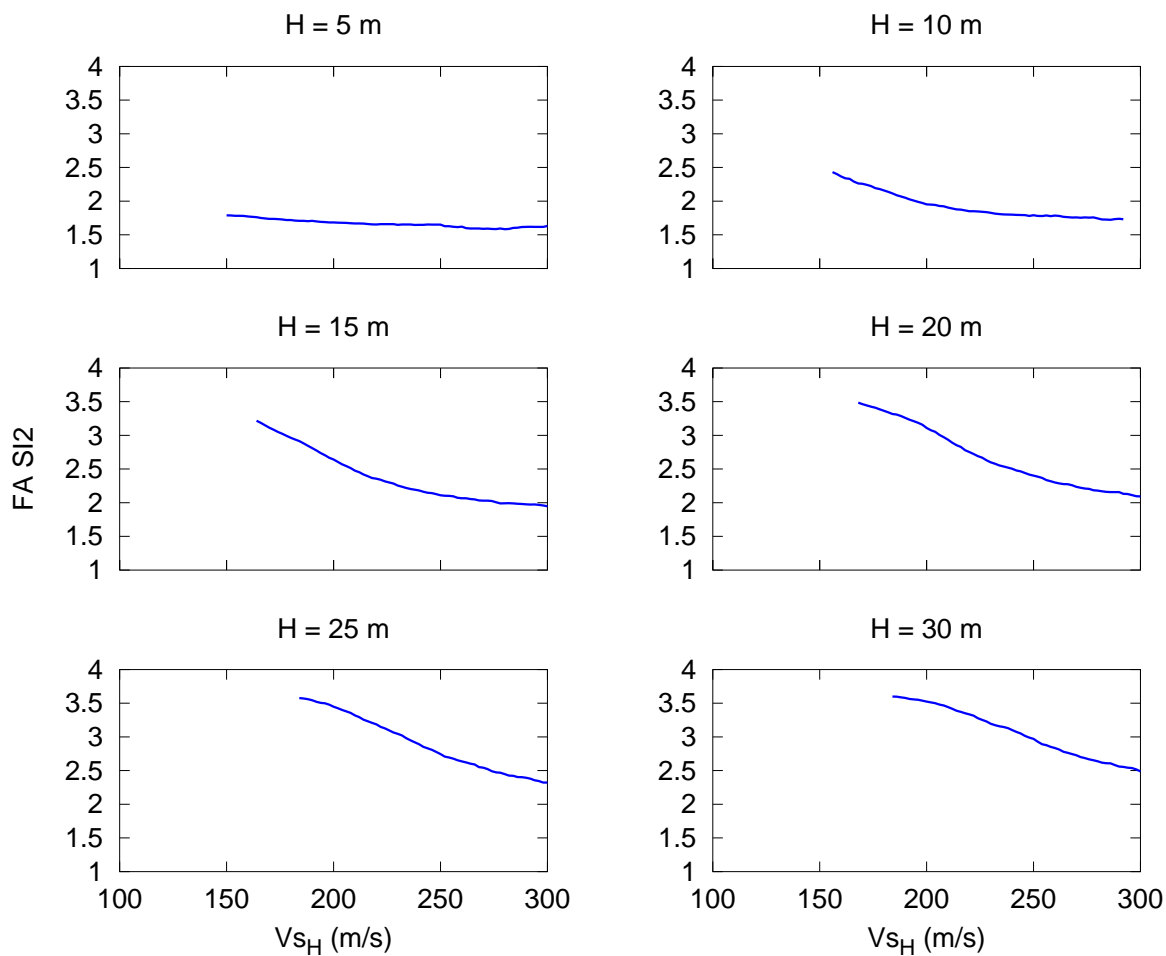


Figura 36: Margine settore A. Fattori di Amplificazione **SI2**. Profondità del tetto delle ghiaie $5m \leq H \leq 30m$.

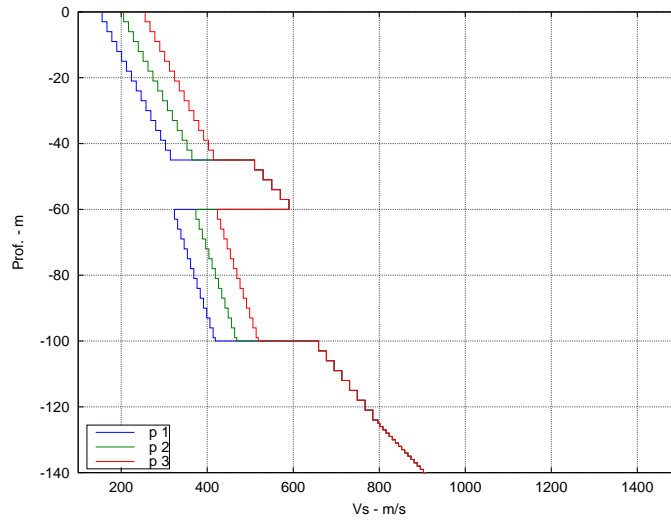


Figura 37: Margine settore B, profili medi utilizzati per il calcolo dei fattori di amplificazione.

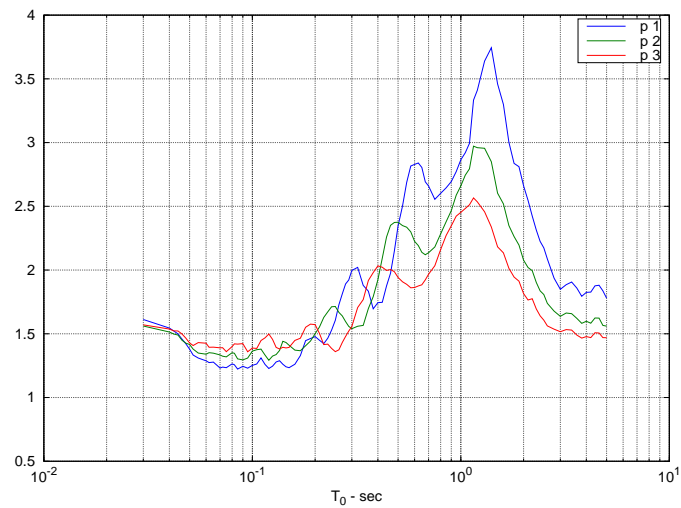


Figura 38: Rapporti fra gli spettri di risposta in accelerazione (smorz. 5%) relativi ai profili di fig. 37 e quello relativo al *suolo A*. La tabella seguente riporta i fattori di amplificazione dei profili medi.

Prof.	V_{s30} m/s	FA PGA	FA SI1	FA SI2	FA SI3
p1	201	1.6	1.7	2.7	3.0
p2	252	1.6	1.8	2.3	2.6
p3	303	1.6	1.7	2.1	2.3

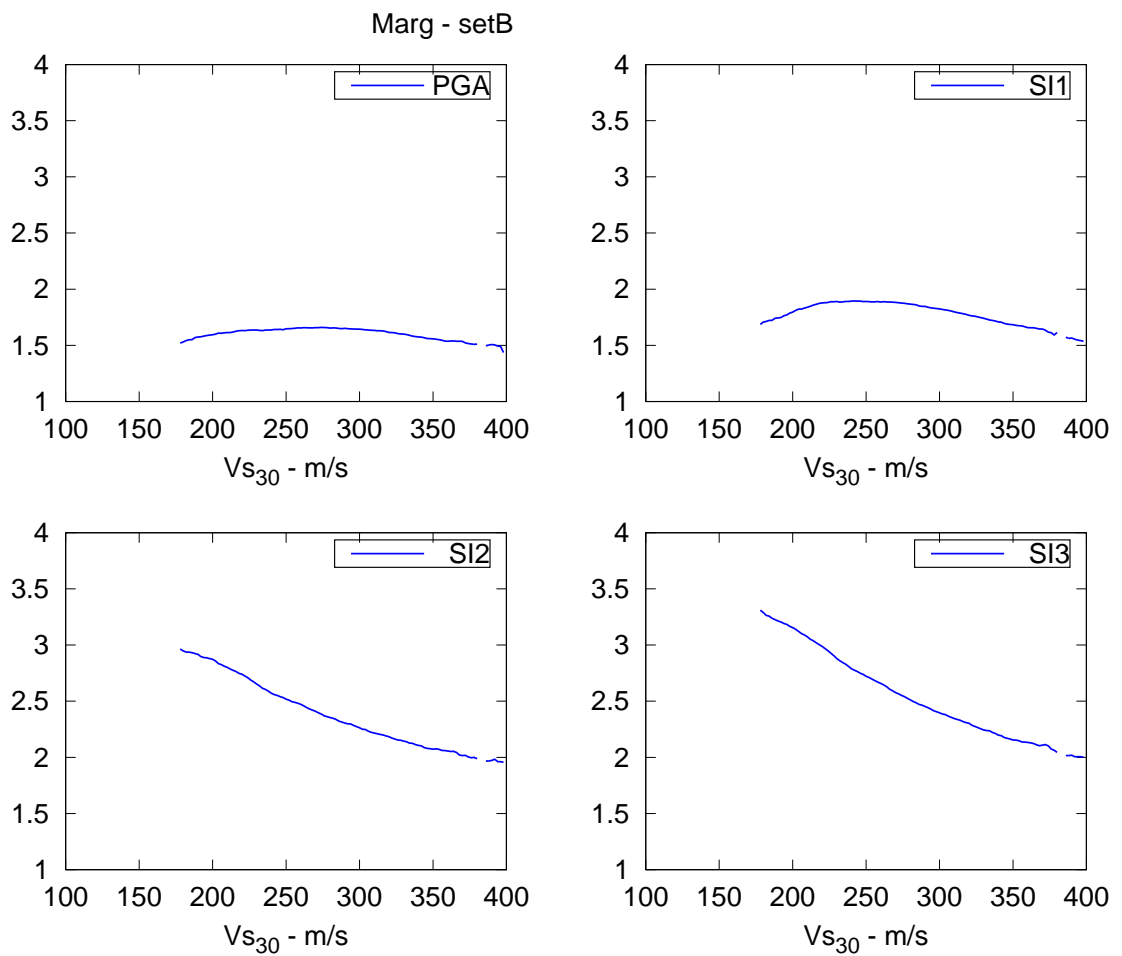


Figura 39: Margine settore B. Fattori di Amplificazione **PGA**, **SI1**, **SI2** e **SI3**.

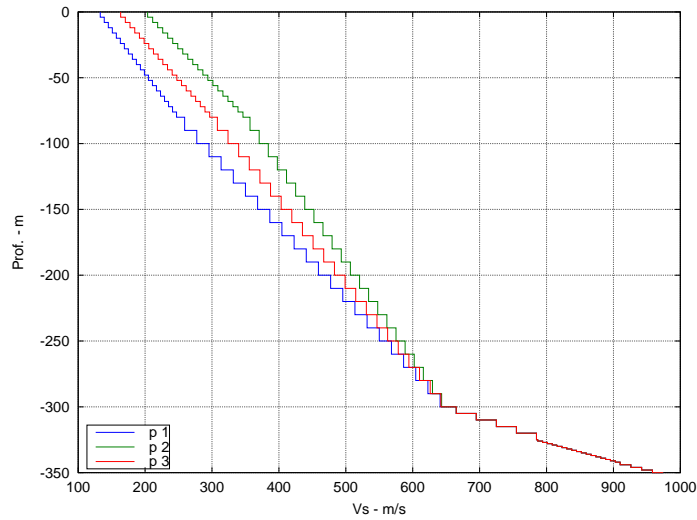


Figura 40: Pianura 3, profili medi utilizzati per il calcolo dei fattori di amplificazione.

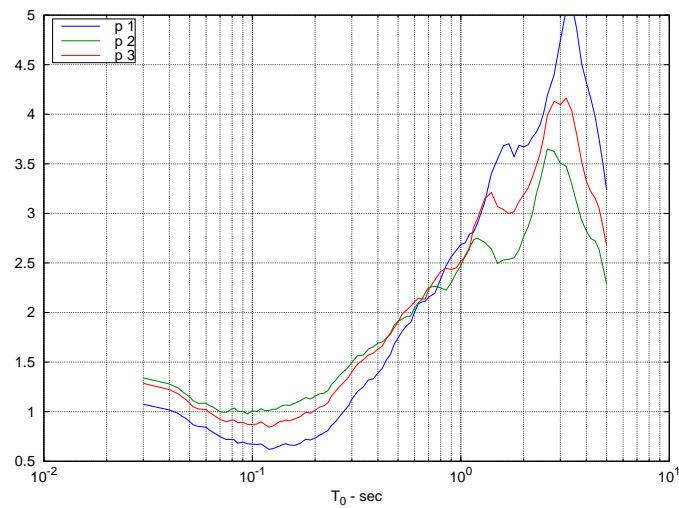


Figura 41: Rapporti fra gli spettri di risposta in accelerazione (smorz. 5%) relativi ai profili di fig. 40 e quello relativo al *suolo A*. La tabella seguente riporta i fattori di amplificazione dei profili medi.

Prof.	V_{s30} m/s	FA PGA	FA SI1	FA SI2	FA SI3
p1	152	1.1	1.2	2.3	2.6
p2	227	1.3	1.5	2.2	2.4
p3	185	1.3	1.4	2.3	2.6

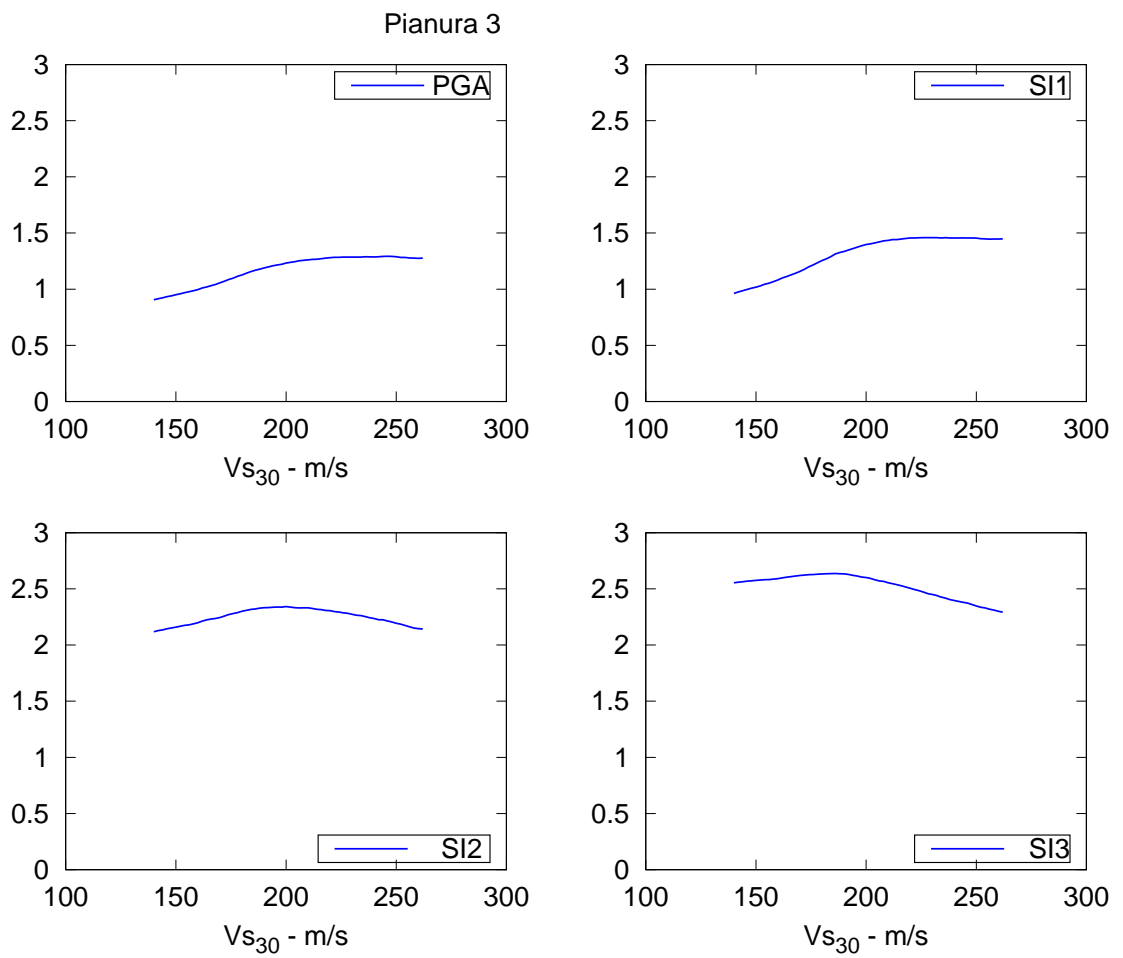


Figura 42: Pianura 3. Fattori di Amplificazione **PGA**, **SI1**, **SI2** e **SI3**.