



PROVINCIA DI FORLÌ'-CESENA

**PIANO
TERRITORIALE DI
COORDINAMENTO
PROVINCIALE**



ALLEGATO 2

**ELEMENTI DI SISMICITA'
DELL'AREA FORLÌ'-CESENA
AI FINI DEL PIANO
TERRITORIALE DI
COORDINAMENTO
PROVINCIALE**

Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali
Consiglio Nazionale delle Ricerche

Convenzione tra la Regione Emilia-Romagna, la
Provincia di Forlì-Cesena e l'Istituto di Ricerca sul
Rischio Sismico del C.N.R. di Milano per la realiz-
zazione di linee guida per la redazione del P.T.C.P.

30 Settembre 2002

Presentazione

La crescente attenzione alle tematiche del rischio sismico da parte della Regione Emilia-Romagna (RER) e il riconoscimento del ruolo essenziale della pianificazione territoriale nell'ambito delle strategie di prevenzione del rischio sismico sono dimostrate dalle iniziative legislative regionali tendenti all'adeguamento delle procedure di pianificazione territoriale alle caratteristiche di sismicità del territorio. In questo contesto il PTCP ha un ruolo decisivo per la pianificazione degli ambiti interessati dai rischi naturali.

Alle Regioni è demandato il compito di definire indirizzi vincolanti per la formazione dei piani territoriali e urbanistici dei comuni sismici al fine di farli corrispondere alle esigenze di riduzione del rischio sismico e, a seguito del Decreto Legislativo n°112 del 1998, di individuare le zone sismiche e aggiornarne l'elenco. A scala regionale sono quindi necessari studi capaci di individuare aree con diversi valori di pericolosità sismica finalizzati alla zonazione del territorio e studi pilota per la messa a punto di una efficace normativa. A scala provinciale i classici studi di Pericolosità Sismica che vengono effettuati a scala regionale devono essere completati da indagini che quantifichino l'effetto prodotto dai depositi superficiali sui valori di scuotimento atteso. Pur non introducendo coefficienti direttamente legati alla normativa sismica, e quindi alla progettazione, tali studi forniscono sia indicazioni utili per la pianificazione territoriale sia indirizzi per eventuali indagini di maggior dettaglio.

Il presente lavoro, insieme ai risultati della precedente convenzione con la RER per la valutazione della Pericolosità Sismica (PS) della Provincia di Forlì-Cesena, si inquadra all'interno di un lavoro di ricognizione analitica delle specifiche condizioni di vulnerabilità sismica del territorio provinciale da cui ricavare ipotesi di orientamento metodologico e operativo da incorporare nel PTCP per le successive fasi della pianificazione urbanistica comunale, della pianificazione settoriale e per la progettualità delle reti e infrastrutture di rango provinciale. Da un punto di vista metodologico l'attività è in continuità con gli studi di microzonazione sismica in aree di pianura finalizzati alla pianificazione territoriale precedentemente sviluppati nell'ambito delle convenzioni con l'Ufficio Geologico della Regione Emilia-Romagna.

Le ricerche illustrate nel presente rapporto, condotte in collaborazione con l'Uf-

ficio Geologico della Regione Emilia-Romagna e la Provincia di Forlì-Cesena, riguardano sia la pianificazione provinciale sia studi a scala locale. L'attività si è concentrata sull'asse Forlì-Cesena, in quanto zona di principale interesse economico della provincia, ritenuta di interesse primario per la concentrazione sia abitativa sia di insediamenti produttivi, e nel territorio comunale di Predappio, in quanto rappresentativo di una situazione collinare, in zone a sismicità moderata. Il lavoro svolto sul centro abitato di Predappio, oltre a fornire informazioni utili per la pianificazione comunale, è un *test-site* volto a determinare gli elementi geologici e morfologici maggiormente influenti sulla risposta sismica locale per una situazione tipica di molti centri abitati di fondovalle dell'Appennino Emiliano-Romagnolo.

Nota

Il presente rapporto ha lo scopo di presentare le metodologie e i risultati ottenuti nell'ambito della Convenzione tra la Regione Emilia-Romagna, la Provincia di Forlì-Cesena e l'Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico di Milano per la realizzazione di linee guida per la redazione del Piano Territoriale di Coordinamento provinciale (PTCP).

Il rapporto esce a nome dell'Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali (IDPA) del Consiglio Nazionale delle Ricerche, in quanto il responsabile scientifico della ricerca, Dr. Alberto Marcellini e le persone che vi hanno partecipato afferiscono attualmente all'IDPA.

Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali
Consiglio Nazionale delle Ricerche

Elementi di sismicità dell'area Forlì-Cesena ai fini del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale

A.Marcellini^{1,2}, R.Daminelli¹, D.Milani^{1,2}, M.Pagani^{1,2}

¹ Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali - CNR

² Dipartimento di Scienze della Terra, Sezione Geofisica - UNIMI

Indice

1	Sintesi dei risultati	2
2	Pericolosità Sismica	8
2.1	Approccio Metodologico	8
2.1.1	Dati di Ingresso	8
2.1.2	Legge di Attenuazione	10
2.2	Risultati	10
3	Analisi degli effetti di sito con l'impiego di dati geofisici	12
3.1	Posizionamento del <i>bedrock</i> sismico	12
3.2	Metodologia	14
3.3	Risultati	14
4	Mappe di pericolosità sismica	44
4.1	Dati	44
4.2	Relazione CPT- V_S	45
4.3	Risultati	47
4.3.1	Mappe di amplificazione	48
4.3.2	Mappe di pericolosità sismica	48

Sintesi dei risultati

Il presente lavoro ha quale oggetto la redazione di linee guida da utilizzare nella stesura del PTCP della Provincia di Forlì-Cesena. L'area interessata dallo studio è compresa tra le città di Forlì e Cesena ed ha un'estensione di circa 300km². Lo studio effettuato si è basato su un'analisi delle amplificazioni a scala locale prodotte dalla presenza di depositi superficiali con scadenti caratteristiche meccaniche e su uno studio in termini probabilistici della pericolosità sismica della zona indagata. La valutazione delle amplificazioni locali non è stata condotta con un approccio di tipo strumentale come invece è stato effettuato per la microzonazione di Predappio. Una tale metodologia richiederebbe l'installazione di una rete densa di sismometri mentre la dimensione dell'area indagata, le finalità del lavoro e l'impiego dei risultati non ne avrebbero giustificati i costi elevati. L'approccio seguito è stato basato su una modellazione numerica del fenomeno della propagazione di onde sismiche nei depositi superficiali. Va subito evidenziato che tale tipo di approccio necessita una base dati in grado di fornire una caratterizzazione meccanica dei terreni, in particolare per quanto riguarda le velocità delle onde di taglio (V_s); la sua adozione è stata possibile data la preventiva disponibilità di tali informazioni.

L'analisi numerica delle amplificazioni locali è stata quindi suddivisa in due successive fasi. Una prima analisi ha impiegato dati di natura geofisica, ed in particolare otto prove *down-hole* e due prove *cross-hole* fornite dall'Ufficio Geologico della Regione Emilia-Romagna. Una serie di simulazioni numeriche ha permesso di caratterizzare la risposta sismica del suolo in maniera completa ma limitata ai siti investigati (per una esposizione più dettagliata delle metodologie utilizzate e dei risultati ottenuti si rimanda alle pagine 12 e successive).

Una seconda fase di analisi è consistita nell'estensione dei risultati sopra citati a tutta l'area in esame. A tal fine sono state utilizzate le informazioni geotecniche disponibili ed in particolare le numerose prove CPT (*Cone Penetration Test*) raccolte nella banca dati del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (vedi pagina 44). È stata messa a punto una relazione empirica

per correlare i parametri forniti dalle CPT con le velocità delle onde di taglio fornite dai *down-holes*. Questa relazione ha permesso di ricavare un profilo verticale di velocità per ogni CPT, un dato che può essere impiegato nella stima analitica degli effetti di sito.

Delle 234 CPT disponibili nei fogli (CTR scala 1:50000) 240 e 255 ne sono state selezionate 121 sulla base della profondità massima raggiunta. Per ognuna delle prove selezionate è stata calcolata la funzione di amplificazione che insieme ad un moto di riferimento (l'accelerogramma Tolmezzo N-S del 6 Maggio 1976, scalato a 250 cm/s^2) ha permesso di valutare il moto in superficie. Si sono quindi calcolati lo spettro di risposta in spostamento e gli pseudo-spettri di risposta in velocità e accelerazione (SD , PSV e PSA per uno smorzamento del 5%) ed infine l'intensità di Housner (SI), intesa come integrale del PSV calcolato per periodi compresi tra 0.1 e 2.5 s.

In relazione alle caratteristiche specifiche del presente lavoro si è ritenuto che la SI fosse il parametro che, rispetto ad altri, meglio rappresentasse lo scuotimento in superficie. L'impiego di un parametro integrale infatti ha ridotto la dipendenza della variabilità dei risultati dal moto di riferimento scelto. Altre grandezze, quali ad esempio la PGA o singoli valori di accelerazione spettrale impiegate in precedenti studi effettuati in Emilia-Romagna (si veda ad esempio [Marcellini et al., 1998]), non sono state considerate significative per le finalità del lavoro in oggetto, in quanto rappresentative di intervalli di frequenza più ristretti rispetto alla SI . La SI risulta inoltre particolarmente utile in un'analisi di area vasta in quanto fornisce un'idea globale delle possibili amplificazioni, non mirata a particolari tipologie di strutture.

I risultati ottenuti impiegando CPT e *down-holes* sono riassunti nella mappa in figura 1.2, in cui il parametro rappresentato è l'intensità di Housner normalizzata rispetto al valore minimo ottenuto per l'area in esame. I valori sono compresi nell'intervallo da 1 a 1.15, un range di variazione che si presta ad un'eventuale correlazione con il coefficiente di fondazione ϵ della norma. Dalla mappa 1.2 si nota un generale incremento delle amplificazioni andando da sud-ovest verso nord-est, in particolare si evidenzia che i valori più alti sono stati calcolati per la zona di Forlì.

Per realizzare la mappa in figura 1.2 è stato considerato un moto di riferimento di ampiezza costante su tutta l'area, l'obiettivo era infatti quello di evidenziare gli effetti locali dovuti alla presenza di depositi superficiali.

Nell'ipotesi di un moto di riferimento costante, la mappa 1.2 può avere una utilità da un punto di vista applicativo. Infatti, qualora le zone indagate fossero tutte classificate nella stessa categoria sismica la possibilità di differenziazione di una zona dall'altra dovrebbe basarsi solo sulle differenze date dai fattori geologici locali. Da un punto di vista scientifico tale ipotesi tuttavia non è giustificabile a priori stante la dimensione dell'area indagata: è ragionevole attendersi differenze sul moto di riferimento. È stato quindi condotto uno studio sulla pericolosità sismica per valutare il moto di input specifico per ogni punto e a tal scopo è stata

svolta un'analisi di pericolosità sismica a scala regionale (PS). Questa ha fornito valori di accelerazione orizzontale di picco (*PGA*) per un periodo di ritorno di 474 anni (ovvero con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni) che si attestano attorno a 250 cm/s^2 per Forlì e 200 cm/s^2 per Cesena (vedi pagina 8 e seguenti). La scelta di un periodo di ritorno di 474 anni, ovvero l'implicita assunzione di un determinato livello di rischio, è stata fatta in accordo con le metodologie di calcolo della PS adottate in numerosi paesi per fini di classificazione e zonazione sismica. I valori di scuotimento legati a tale periodo di ritorno escludono la possibilità di comportamenti dei suoli in campo dinamico di tipo non-lineare, comportamenti non considerati nell'attuale modellazione numerica impiegata. Nella figura 1.1 sono rappresentati gli spettri di risposta a probabilità uniforme calcolati per Forlì e Cesena (con smorzamento del 5%). La forma spettrale non presenta sostanziali differenze tra le due località e si caratterizza per la presenza di un picco marcato ai bassi periodi, più precisamente nell'intorno di 0.2 s.

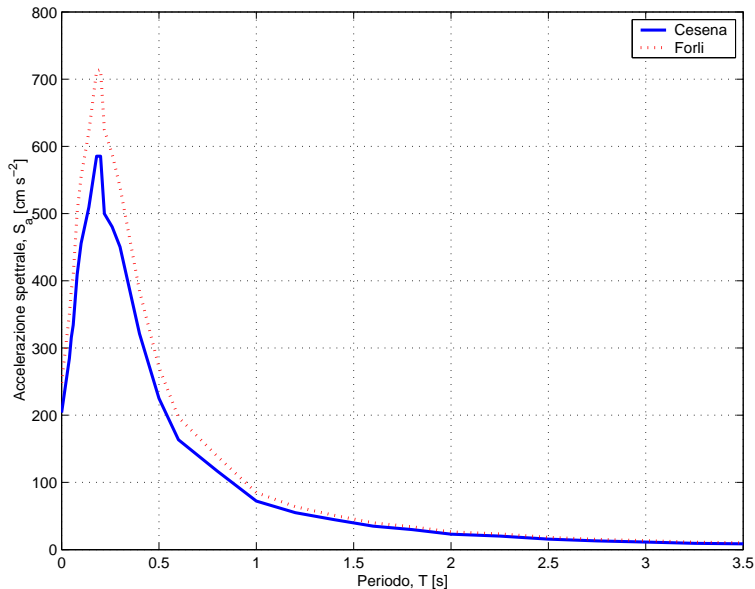


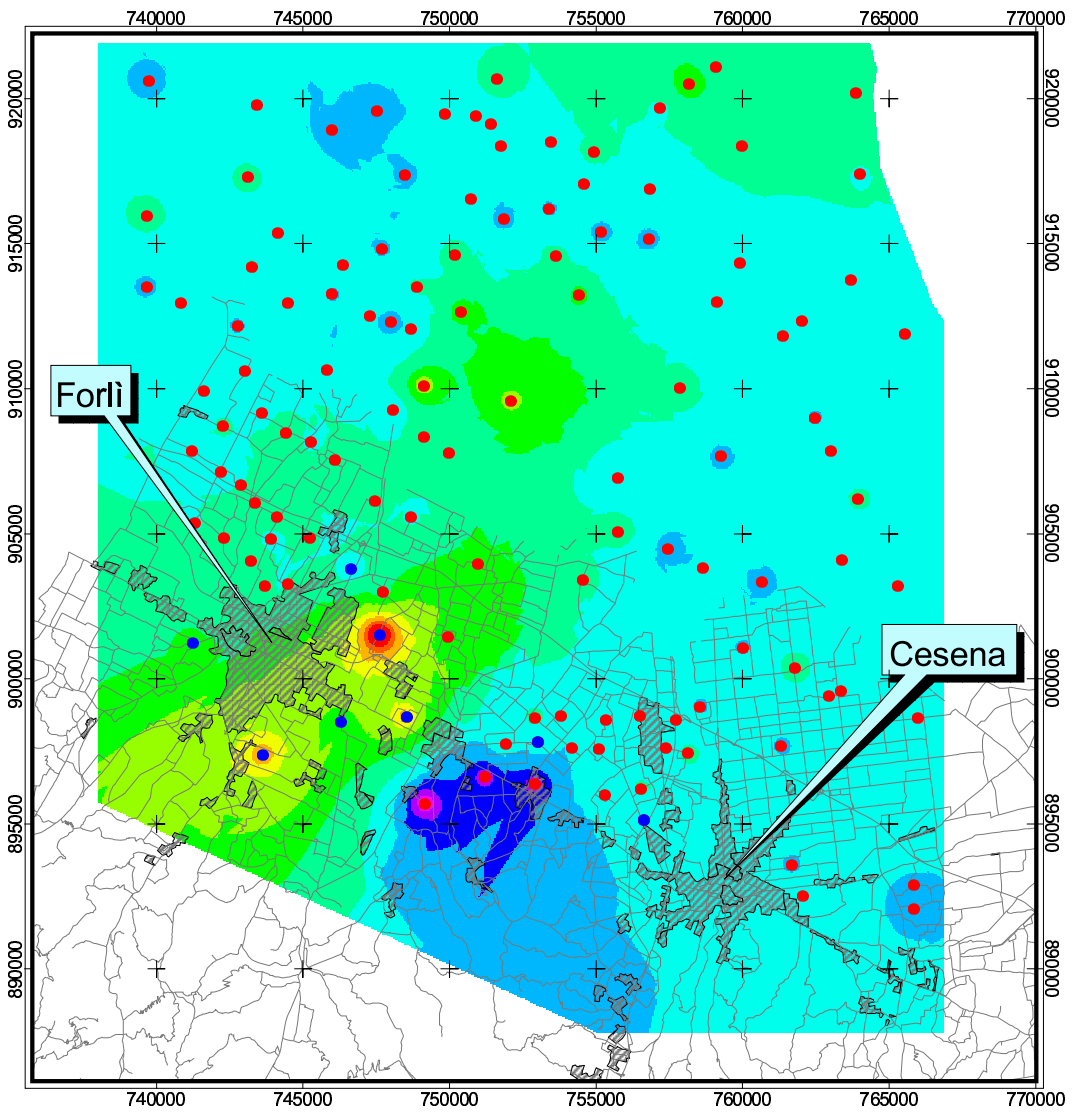
Figura 1.1: Spettri di risposta a probabilità uniforme calcolati per un periodo di ritorno di 474 anni e uno smorzamento del 5%.

I risultati ottenuti dall'analisi degli effetti di sito sono stati quindi integrati con l'analisi di PS (vedi pagina 48). Lo scuotimento in superficie è stato calcolato impiegando in ogni punto un moto di riferimento scalato sul valore della PGA ottenuta dalla PS. Il risultato di questa procedura è rappresentato nella figura 1.3 dove i valori calcolati di *SI* mostrano un aumento ancora più marcato andando da Cesena a Forlì, passando da 42 a 54 cm circa, per un rapporto di 1-1.29.

Nonostante la variazione degli spettri di risposta sembri piuttosto limitata (figura 1.1), la figura 1.3 evidenzia come in un'area così vasta l'analisi di pericolosità a

scala regionale assuma comunque un ruolo determinante nel definire spazialmente l'andamento della pericolosità.

Sebbene esuli dai nostri incarichi ci sembra opportuno suggerire di usare i risultati contenuti nella figura 1.3 ai fini della redazione del PTCP.



- CPT
- Down-Holes
- Aree Urbane
- Strade

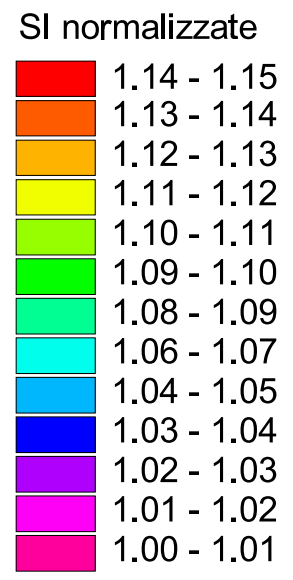
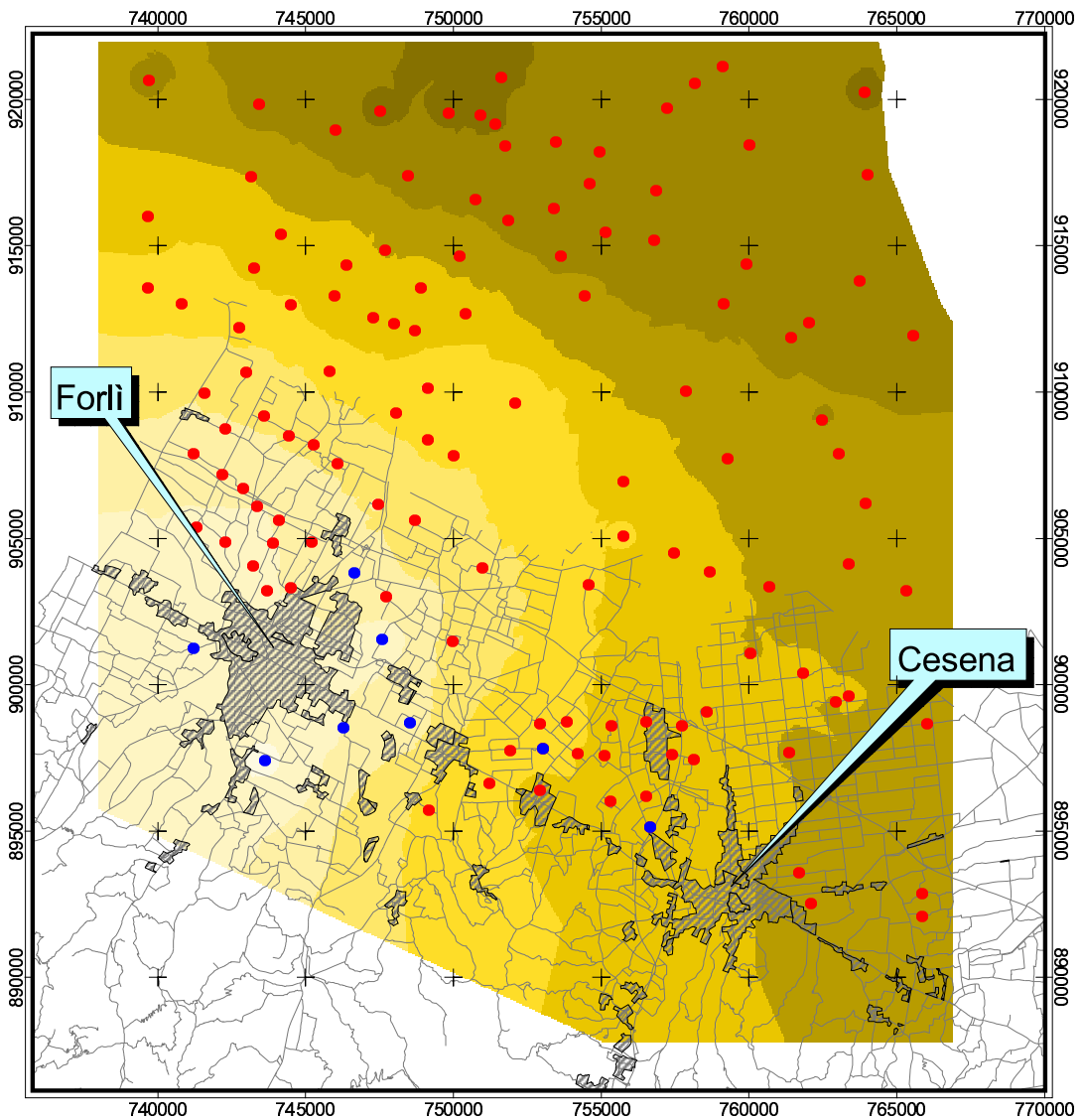


Figura 1.2: Mappa degli effetti di sito in termini di intensità di Housner (integrale dello spettro di risposta in velocità tra 0.1 e 2.5 secondi con *damping* del 5%) normalizzata rispetto al valore minimo



- CPT
- Down-Holes
- Aree Urbane
- Strade

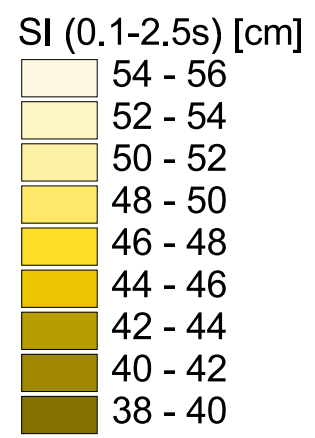


Figura 1.3: Mappa delle intensità di Housner (integrale dello spettro di risposta in velocità tra 0.1 e 2.5 secondi con *damping* del 5%) ottenuta combinando i risultati dell'analisi di PS (periodo di ritorno di 474 anni) con quelli ottenuti dallo studio degli effetti di sito.

Pericolosità Sismica

2.1 Approccio Metodologico

L'approccio metodologico seguito per il calcolo della pericolosità riprende quanto precedentemente utilizzato per la valutazione della pericolosità sismica dell'intera provincia di Forlì-Cesena [Marcellini et al., 1999]. Anche in questo caso la scelta è stata determinata dalle finalità del lavoro, direttamente legate a problemi di pianificazione territoriale. Rispetto al precedente lavoro i dati di base sono stati processati con una differente procedura e questo giustifica le differenze presenti; tali differenze tuttavia non vengono considerate influenti.

Il *ground-motion* atteso è stato calcolato seguendo una metodologia di tipo probabilistico. Il periodo di ritorno (RP) considerato di 474 anni corrisponde a quello suggerito da numerose normative soprattutto a livello internazionale come ad esempio l'Eurocodice-8 (dato che per la successione temporale degli eventi si assume un processo di tipo poissoniano, un periodo di ritorno di 474 anni equivale a una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. Un esempio: la PGA calcolata a Forlì per un RP di 474 anni è di 250 cm/s^2 , ciò significa che esiste una probabilità del 10% che si generi un terremoto capace di produrre una PGA superiore a 250 cm/s^2 nei prossimi 50 anni).

I risultati dell'analisi di PS vengono forniti in termini di accelerazione orizzontale di picco ed in ordinate spettrali.

2.1.1 Dati di Ingresso

Zonazione Sismogenetica

Nel presente lavoro è stata utilizzata la zonazione sismogenetica (ZS) del territorio nazionale proposta da Scandone et al. [1992] comprensiva di 87 aree considerate omogenee da un punto di vista sismotettonico. Tale zonazione è stata adottata dal Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti per la costruzione di carte di pericolosità sismica per l'intero territorio Nazionale.

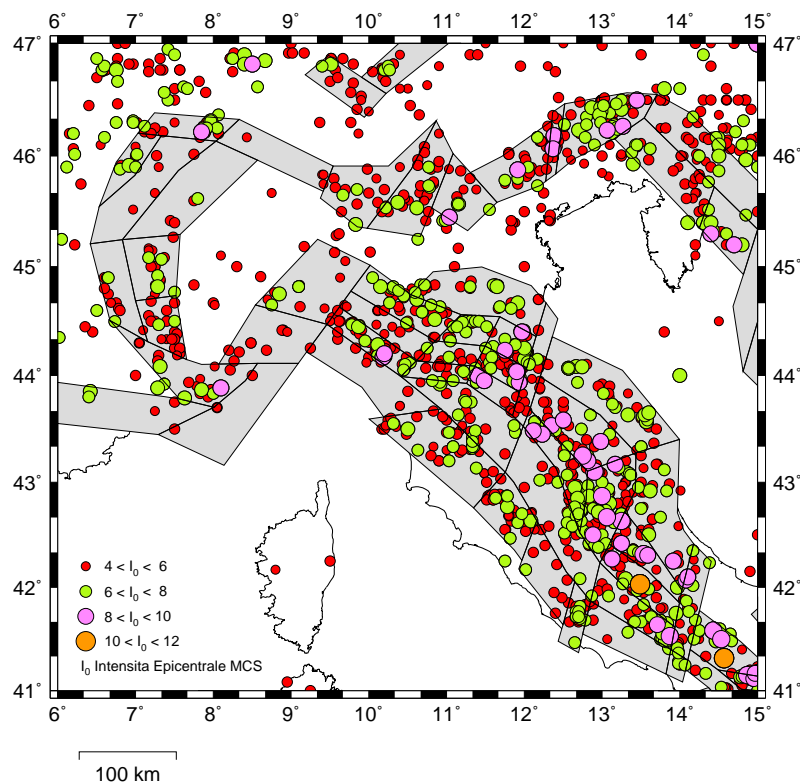


Figura 2.1: Carta degli epicentri (1000-1980) dal Catalogo NT4.1 [Camassi e Stucchi, 1997] e zonazione sismogenetica del territorio Italiano.

Le aree impiegate per l'analisi di pericolosità sono 13 e corrispondono alle aree con un potenziale sismico tale da generale valori di accelerazione non trascurabili entro l'area investigata; il contributo delle restanti aree viene considerato poco influente sui valori di accelerazione calcolati.

Sismicità delle zone sorgenti

La caratterizzazione sismica delle zone sorgenti è stata fatta utilizzando il catalogo parametrico NT4.1 nella versione aggiornata al marzo 1998 [Camassi e Stucchi, 1997]. NT4.1 è un catalogo privo di repliche (*foreshocks* e *aftershocks*) finalizzato al calcolo della PS; la versione impiegata comprende eventi sismici avvenuti nel periodo 1000-1992. Il catalogo, inoltre, viene fornito di sub-cataloghi contenenti gli eventi sismici per ogni singola sorgente sismica della zonazione sismogenetica del territorio Italiano sopra citata.

A partire da tali subcataloghi, sono stati calcolati i parametri α e β della relazione di Gutenberg-Richter (vedi figura 2.2) e quindi ricavati i valori delle occorrenze per fasce di magnitudo di ampiezza pari a 0.4 unità in un intervallo compreso

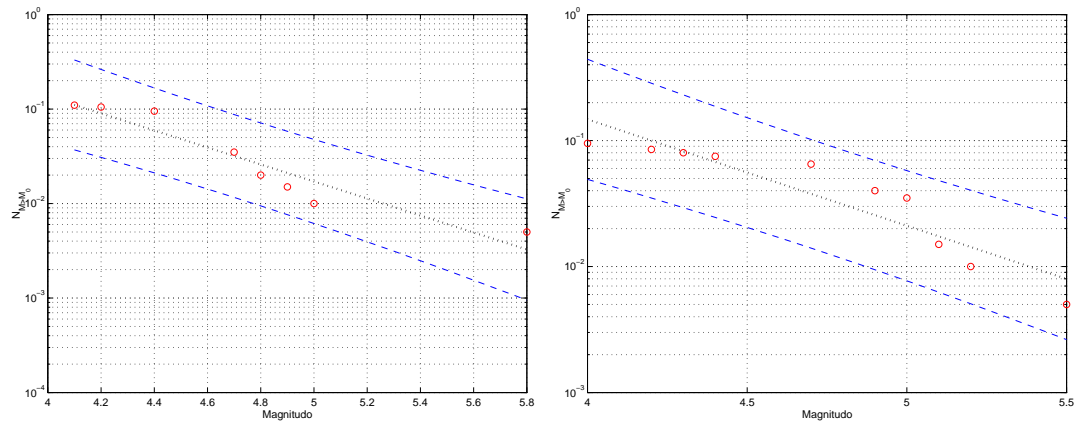


Figura 2.2: (Punti rossi) Occorrenze cumulative per le zone sorgenti 38 e 39. Retta di regressione calcolata (Linea continua) e intervallo di confidenza del 95% (linee tratteggiate)

tra una magnitudo minima di 3.8 ed una magnitudo massima variabile tra 5.8 e 6.6 in funzione dell'area considerata. Tali elaborazioni costituiscono, insieme alla geometria delle aree sorgenti, la base dati di ingresso per il programma di calcolo della pericolosità.

2.1.2 Legge di Attenuazione

La relazione di attenuazione usata è quella calcolata da Tento et al. [1992] sulla base di 137 registrazioni accelerometriche di terremoti italiani a partire dal 1972 e relative ad eventi di magnitudo compresa tra 4.0 e 6.6; i parametri calcolati tramite questa relazione sono: PGA e ordinate spettrali $PSV(T)$.

2.2 Risultati

I risultati dell'analisi di pericolosità sono rappresentati nelle figure 1.1 e 2.3; entrambe mettono in evidenza valori di PGA in un *range* variabile tra i 200 e i 250 cm/s^2 ed una forma spettrale molto "piccata" sui bassi periodi, come già osservato nella "sintesi dei risultati" (vedi pagina 2).

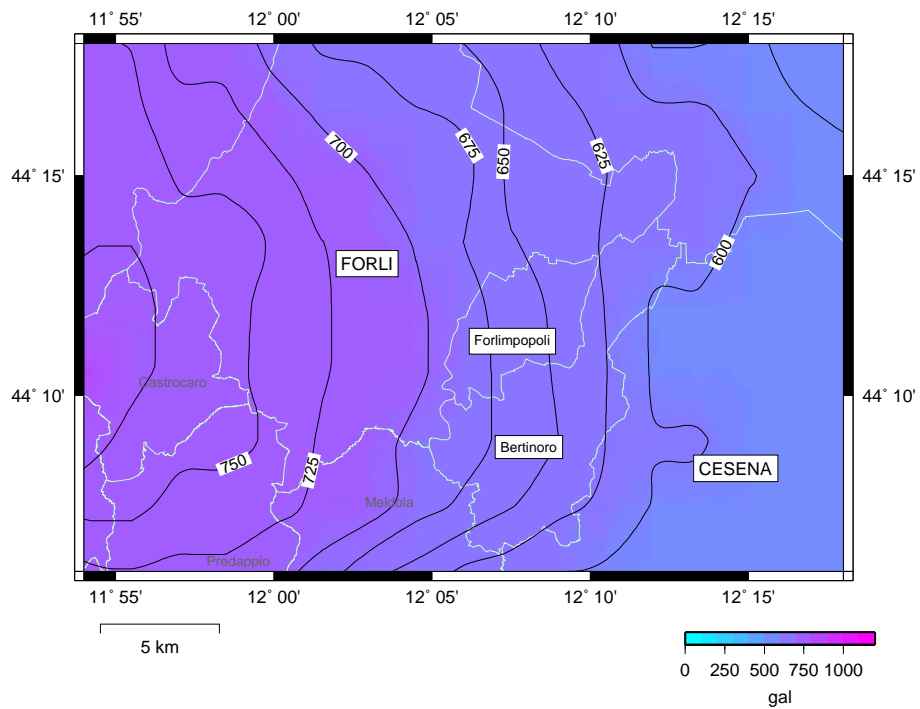
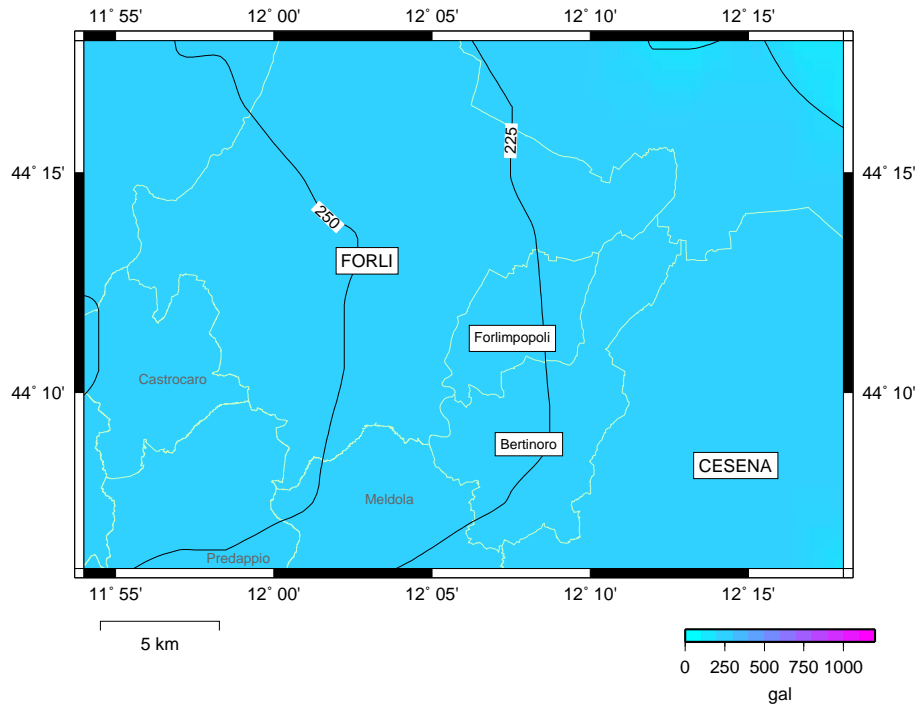


Figura 2.3: (in alto) PGA in $[cm/s^2]$ per un periodo di ritorno di 474 anni
 (in basso) $S_a(T = 0.2[s])$ in $[cm/s^2]$ per un periodo di ritorno di
 474 anni (smorzamento 5%)

Analisi degli effetti di sito con l'impiego di dati geofisici

Viene qui illustrata una prima stima degli effetti di sito, svolta utilizzando i dati geofisici raccolti dall'Ufficio Geologico della Regione Emilia-Romagna. In particolare ci si è avvalsi dei dati raccolti con otto prove *down-* e due prove *cross-hole* (la loro posizione geografica viene riportata in figura 3.1). La risposta sismica locale è stata calcolata utilizzando un codice che simula la propagazione verticale di onde di taglio S_H attraverso strati piano-paralleli a comportamento visco-elastico non-lineare.

3.1 Posizionamento del bedrock sismico

La valutazione degli effetti di sito con metodologie numeriche richiede la definizione della posizione del *bedrock* sismico, ovvero del livello oltre il quale si considera esista un semispazio infinito a comportamento elastico, ed in cui si assume abbia sede il moto di input.

Spesso il *bedrock* sismico non può essere definito univocamente o per carenza di informazioni (es. i sondaggi non scendono a una profondità sufficiente) o per la limitata conoscenza dei parametri meccanici del sottosuolo. Nell'area Romagnola normalmente viene collocato in corrispondenza delle formazioni di origine marina [Marcellini et al., 1998]; tale scelta appare corretta per quanto riguarda la zona pedemontana mentre nelle zone in cui la copertura alluvionale è più spessa, tale assunzione diventa discutibile. Non si può infatti escludere che, per strati oltre una certa profondità, il carico litostatico abbia prodotto un grado di compattezza tale da conferire caratteristiche di rigidità paragonabili a quelle di un *bedrock* sismico.

Per queste ragioni raramente viene definita in modo univoco e certo la posizione del *bedrock*, questa è pertanto una variabile aleatoria le cui incertezze si possono ripercuotere sui valori della risposta sismica locale calcolati.

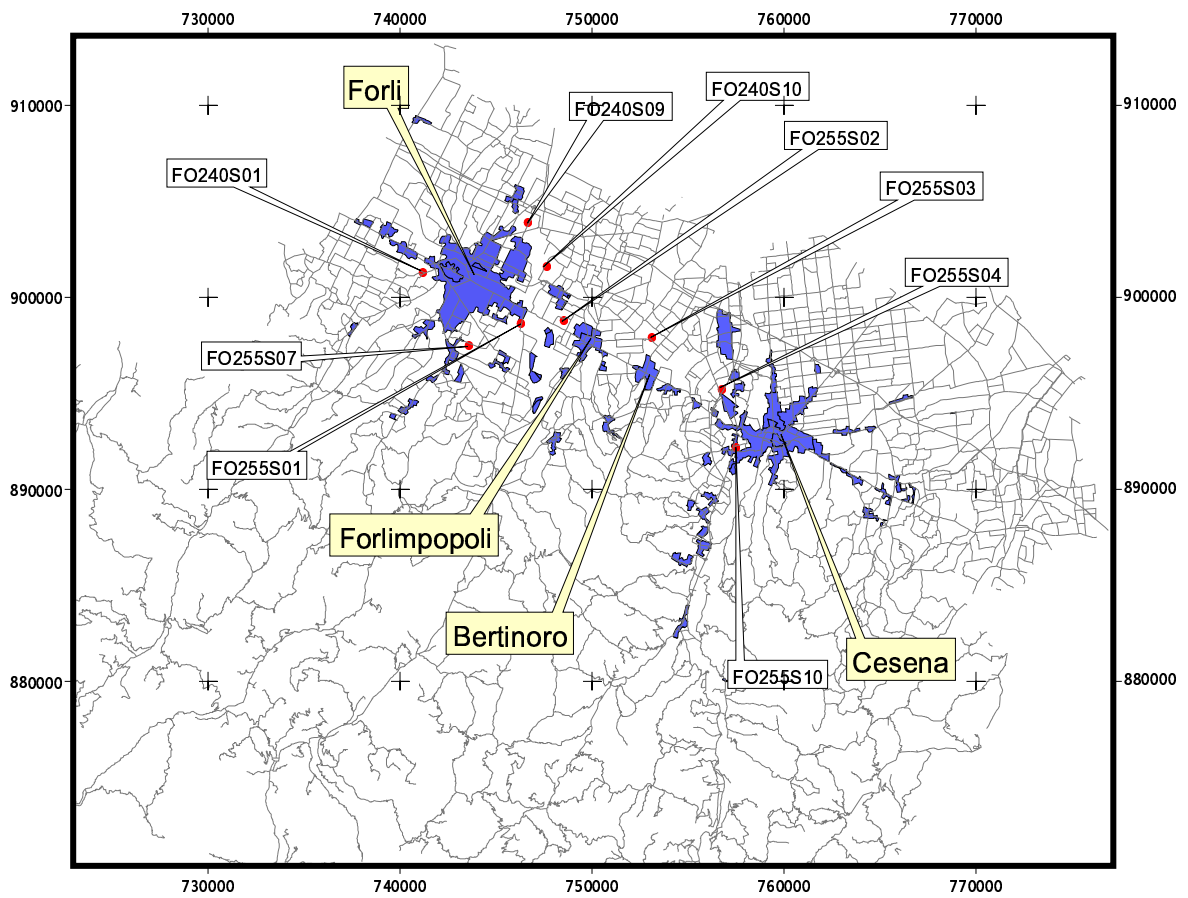


Figura 3.1: Ubicazione dei sondaggi, aree urbane dei comuni di Forlì, Cesena, Forlimpopoli, Bertinoro e rete stradale.

3.2 Metodologia

Per ogni sondaggio sono stati costruiti dei profili rappresentativi con velocità delle onde S (V_s), litologia e densità (ρ) in funzione della profondità. La definizione del comportamento in campo dinamico di ogni litologia, sei più il *bedrock*, si è basata su curve G- γ e D- γ selezionate da informazioni di letteratura [Seed e Idriss, 1970; Sun et al., 1988].

Come moto di input è stato utilizzato l'accelerogramma Tolmezzo N-S (evento del 6 Maggio 1976, $M_S = 6.5$, $\Delta=27$ km) scalato a 250 cm/s^2 e posizionato all'affioramento del *bedrock*.

Per quanto possibile nei vari modelli sono state assunte diverse profondità del *bedrock* sulla base dei profili di velocità e del modello 3D fornito dalla Regione Emilia-Romagna. Nella maggior parte dei casi i *down-* e i *cross-hole* forniscono dati fino ad un massimo di 50-60 m; ove presenti le prove sono state integrate con dati provenienti da *sonic-logs*, così da disporre di misure fino a profondità di circa 100m. Per i profili dove i *sonic-logs* non erano disponibili, sono state ipotizzate profondità variabili del *bedrock* e l'intervallo compreso tra quest'ultimo e la profondità massima raggiunta dal *down-hole* è stato supposto essere composto da materiale di tipo argilloso. Le caratteristiche meccaniche di tale materiale sono state dedotte utilizzando i dati *sonic-logs* disponibili per gli altri pozzi.

Per ogni sondaggio viene fornita una tabella in cui sono riportati, al variare della profondità del *bedrock* (prof), i valori delle intensità di Housner (SI) calcolati nell'intervallo $0.1 \div 2.5$ s, dell'accelerazione spettrale media (in g) (\overline{S}_a), sempre in quell'intervallo, e i rapporti con gli stessi parametri calcolati sul *bedrock* in affioramento (SI/SI_0 e $\overline{S}_a/\overline{S}_{a0}$). Nei grafici sono poi rappresentati il profilo di velocità e, sempre al variare della profondità del *bedrock*, le funzioni di amplificazione e gli spettri di risposta, calcolati questi ultimi per un *damping* del 5%.

3.3 Risultati

La figura 3.2 è una sintesi di quanto esposto nelle pagine da 17 a 44 e riporta per ogni profilo analizzato il valor medio dei rapporti tra l'Intensità di Housner (SI in cm) calcolata in superficie supponendo profondità del *bedrock* sismico variabili ed il valore di SI per il substrato affiorante. La figura 3.2 contiene inoltre i rapporti tra il valore di accelerazione spettrale media (\overline{S}_a in g) calcolata nell'intervallo $0.1 - 2.5$ s per diverse ipotesi di profondità del *bedrock* e l'accelerazione spettrale media al substrato affiorante \overline{S}_{a0} . Entrambi i parametri danno una misura dell'incremento medio del moto che gli edifici subiscono in relazione al comportamento meccanico e allo spessore dei depositi sottostanti.

SI e \overline{S}_a essendo parametri integrali possono essere confrontati con il coefficiente di fondazione ϵ della norma, dove $1.0 < \epsilon < 1.3$.

Le analisi svolte ci permettono di trarre alcune osservazioni interessanti.

La prima e forse la più importante riguarda l'influenza che la posizione del *bedrock* sismico esercita sulla risposta sismica in superficie. L'analisi svolta, anche se talvolta limitata a situazioni specifiche (il profilo di velocità talvolta è stato completato artificialmente utilizzando una singola litologia, le argille), evidenzia l'importanza che i primi 50m (a partire dal piano campagna) hanno nel modificare il moto osservato in superficie. La conoscenza dei parametri meccanici per la parte più superficiale del deposito, quindi, ricopre un'importanza maggiore che la dettagliata conoscenza della posizione del *bedrock*.

La seconda, non meno rilevante ai fini della zonazione, riguarda l'estensione areale dei dati ottenuti. La geologia superficiale come si può osservare nella figura 3.2 offre solo un parziale aiuto nell'individuazione di aree a comportamento omogeneo. Per estendere arealmente le stime puntuali eseguite sui dati geofisici è necessario disporre di un numero maggiore di dati, in modo da affinare, ove possibile, la conoscenza tridimensionale delle caratteristiche meccaniche dei depositi per meglio dettagliare i limiti della zonazione proposta. In tal senso sono stati utilizzati i dati provenienti da prove CPT (*cone penetration test*); i risultati di tali analisi sono esposti a partire da pagina 44.

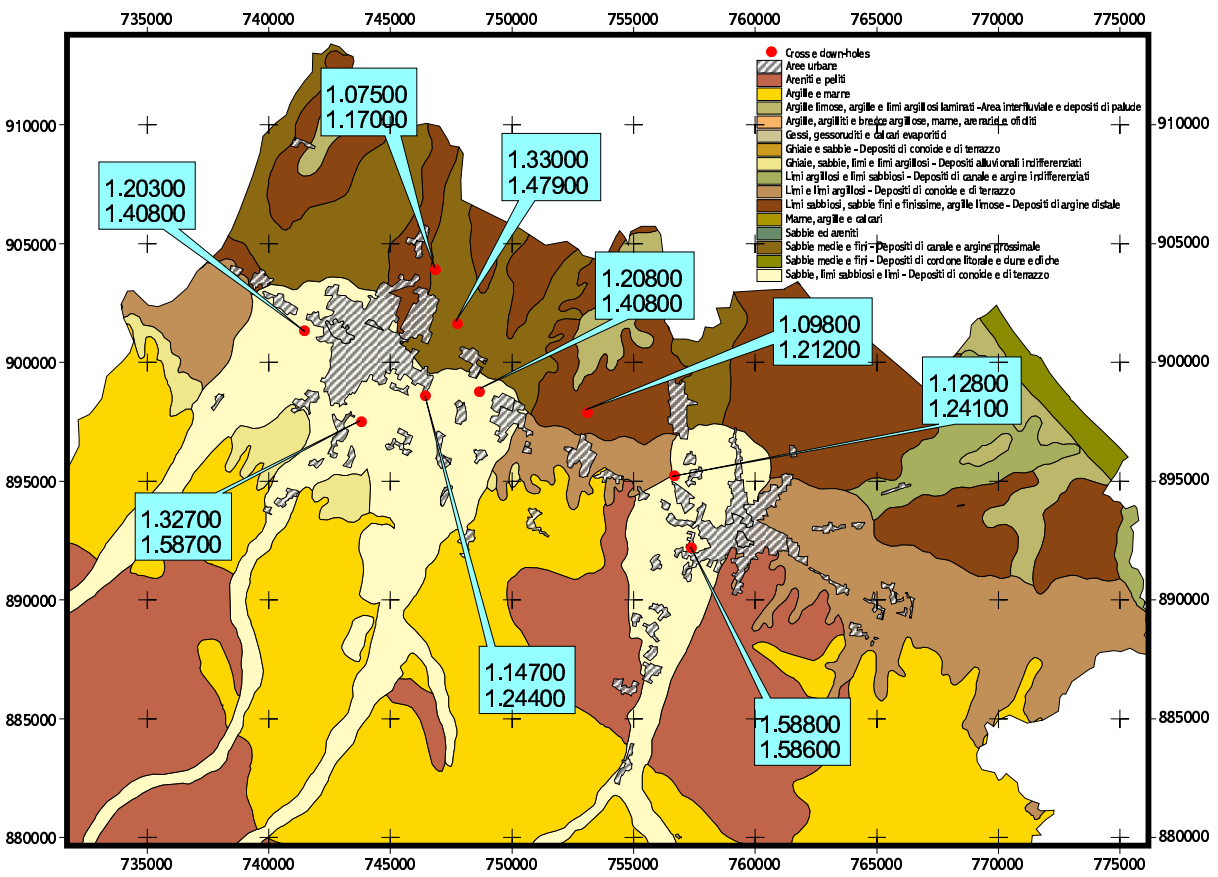


Figura 3.2: Rapporti dell'Intensità di Housner (valori in alto per ogni riquadro) e rapporti tra S_a medie (valori in basso per ogni riquadro) per i siti investigati (per una spiegazione più dettagliata si veda il testo).

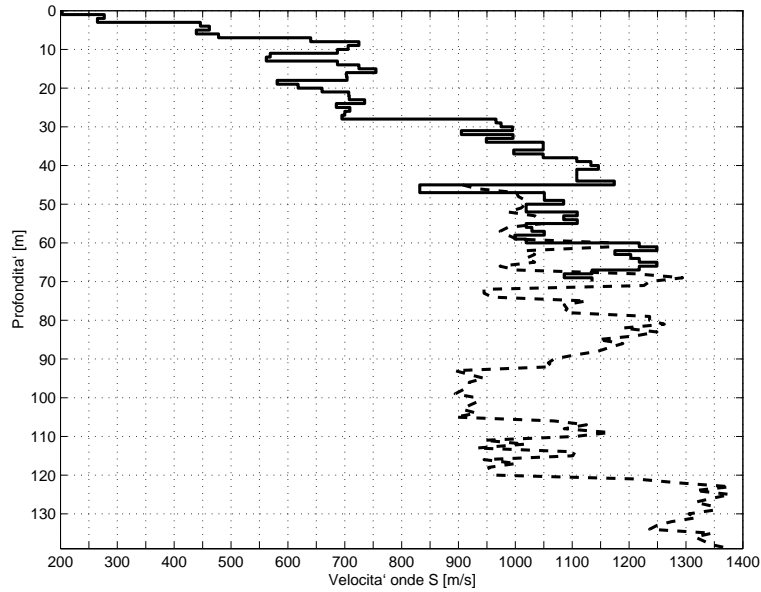


Figura 3.3: (Fo240S01) Profilo di velocità (*down-hole* e *sonic-log*)

prof [m]	SI [cm]	\overline{S}_a [g]	SI/SI ₀	$\overline{S}_a/\overline{S}_{a0}$
28	54.618	0.434	1.140	1.348
38	55.652	0.449	1.162	1.395
59	57.498	0.469	1.201	1.456
78	58.916	0.476	1.230	1.478
105	58.943	0.446	1.231	1.386
120	60.005	0.445	1.253	1.383

Tabella 3.1: (Fo240S01) Valori di SI ed \overline{S}_a al variare della profondità del *bedrock*

FO240S01

In corrispondenza della prova Fo240s01 sono stati effettuati un *down-hole* e un *sonic-log*; nell'insieme permettono di definire un profilo di velocità completo fino a 120m. L'analisi è stata condotta posizionando il *bedrock* a diverse profondità sulla base del profilo di velocità (vedi tabella 3.1).

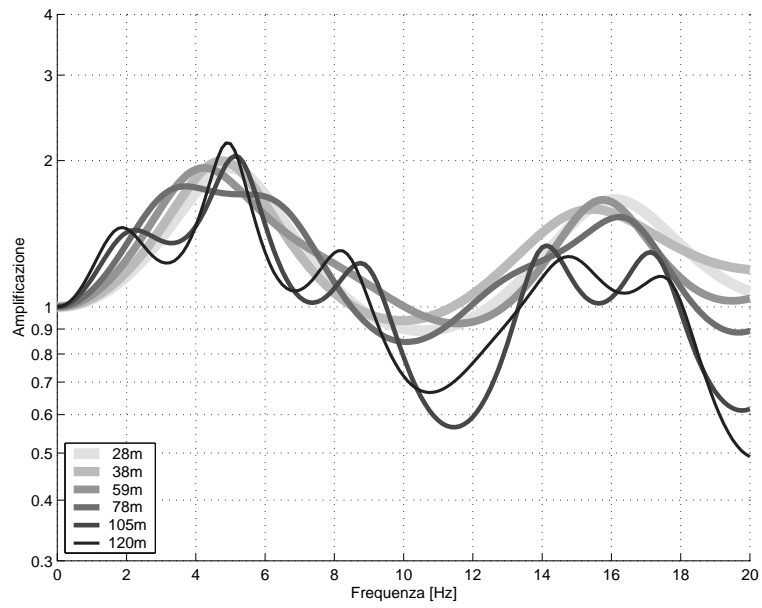


Figura 3.4: (Fo240S01) Funzioni di amplificazione

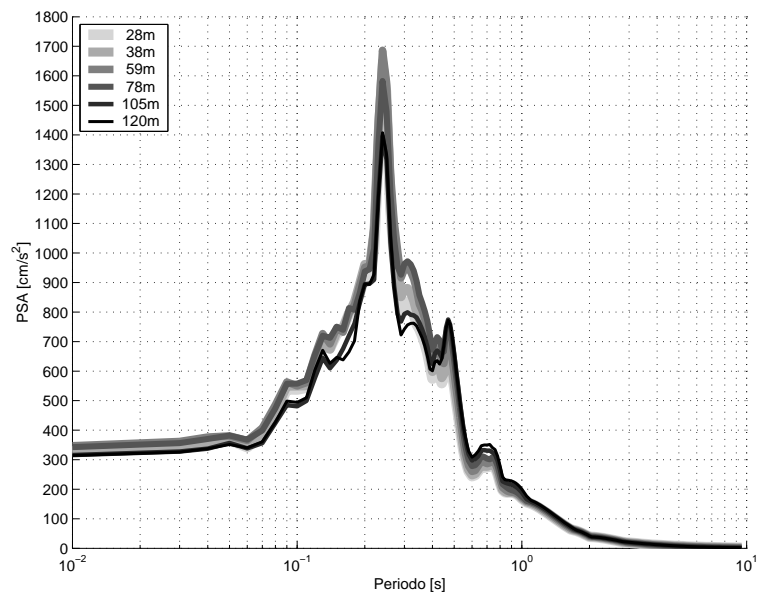


Figura 3.5: (Fo240S01) Spettri di risposta in accelerazione

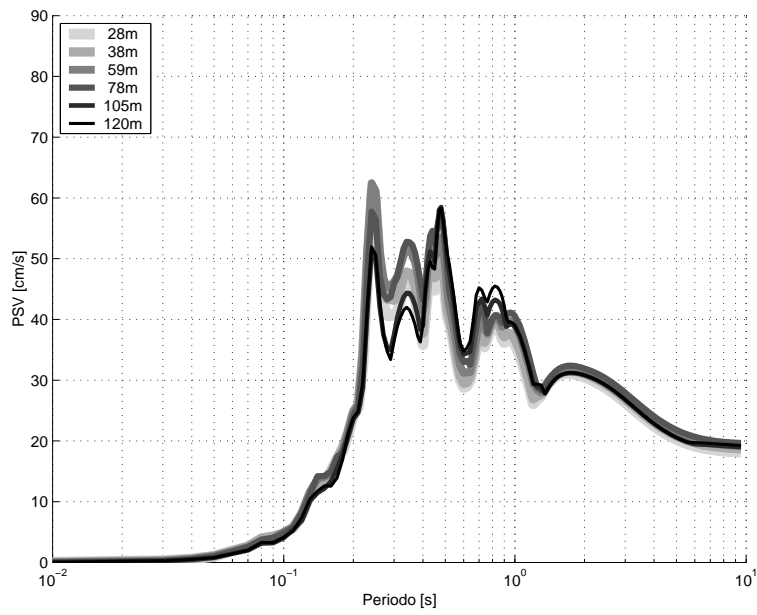


Figura 3.6: (Fo240S01) Spettri di risposta in velocità

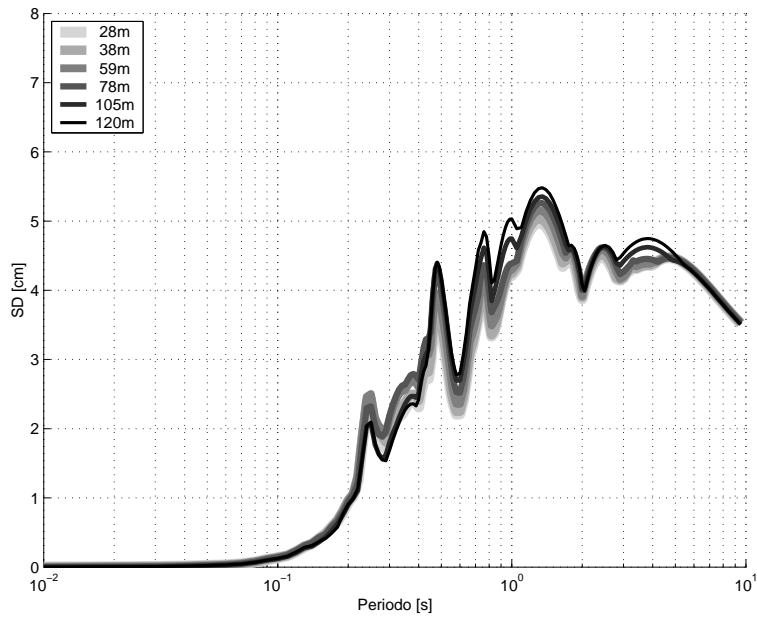


Figura 3.7: (Fo240S01) Spettri di risposta in spostamento

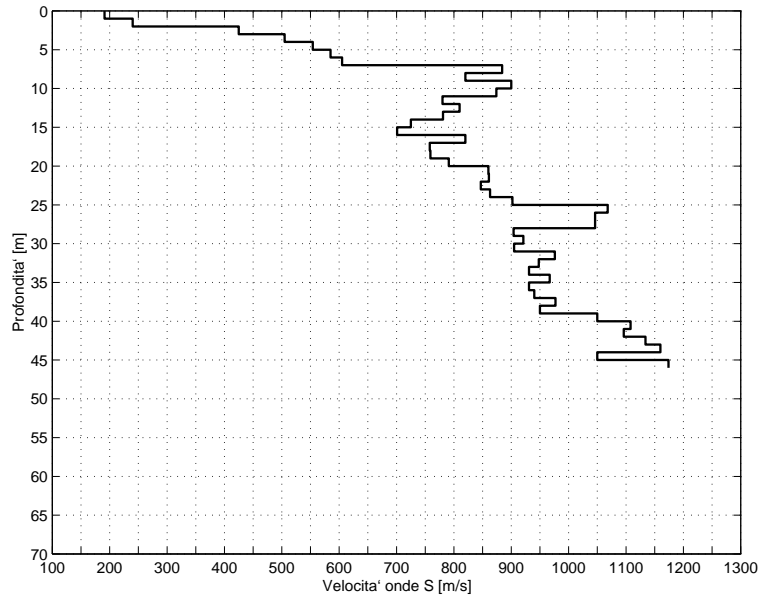


Figura 3.8: (Fo240S09) Profilo di velocità

FO240S09

In corrispondenza di questo sondaggio è stato effettuato un *down-hole* fino ad una profondità di 46 m. Non essendo univocamente definita la posizione del *bedrock*, sono state supposte diverse profondità; il profilo di velocità di volta in volta è stato completato con ipotetici strati di argilla (spessore 10m) caratterizzati da velocità delle onde S variabile tra 1050 e 1100m/s.

prof [m]	SI [cm]	\bar{S}_a [g]	SI/SI ₀	\bar{S}_a/\bar{S}_{a0}
20	48.821	0.341	1.019	1.059
37	50.602	0.371	1.057	1.153
50	50.989	0.375	1.065	1.166
60	51.438	0.379	1.074	1.177
70	52.527	0.390	1.097	1.212
80	52.803	0.390	1.103	1.212
90	53.013	0.390	1.107	1.210

Tabella 3.2: (Fo240S09) Valori di SI ed \bar{S}_a al variare della profondità del *bedrock*

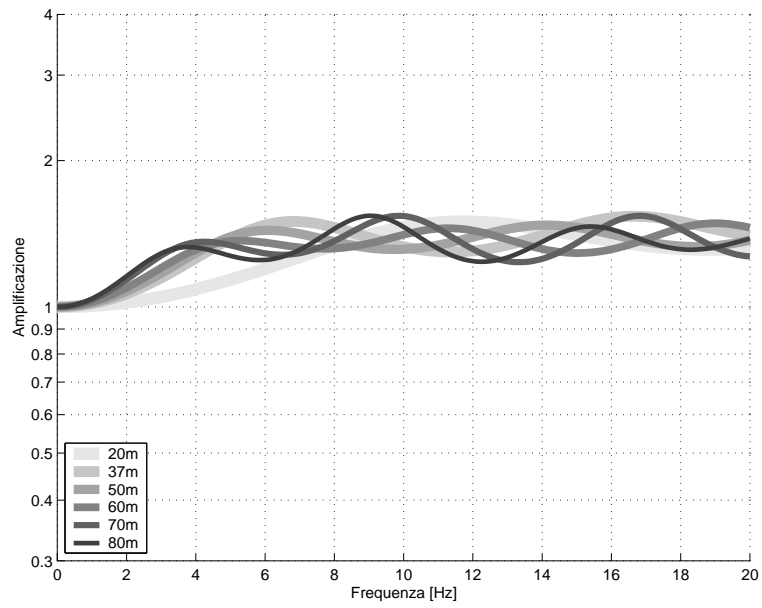


Figura 3.9: (Fo240S09) Funzioni di amplificazione

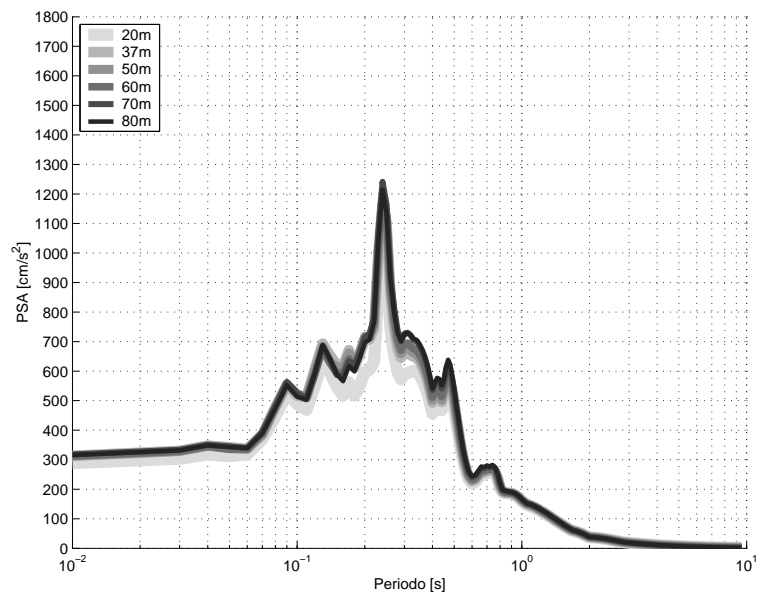


Figura 3.10: (Fo240S09) Spettri di risposta in accelerazione

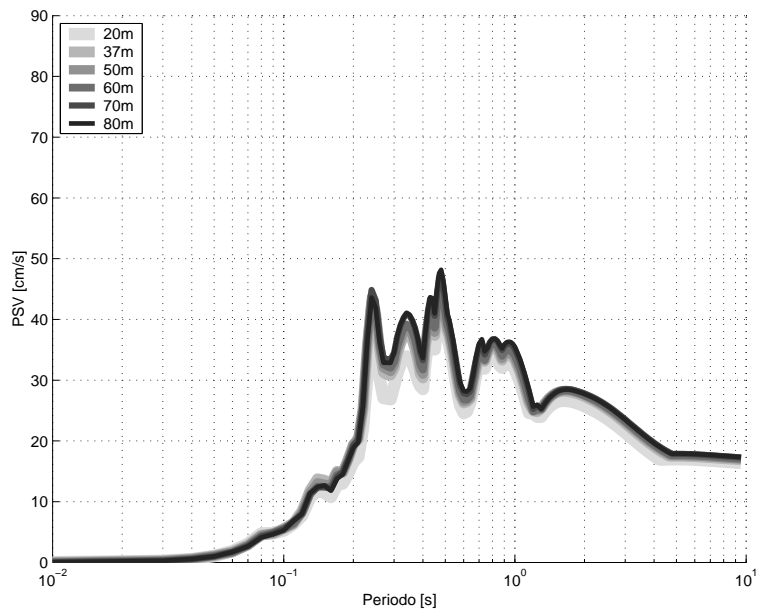


Figura 3.11: (Fo240S09) Spettri di risposta in velocità

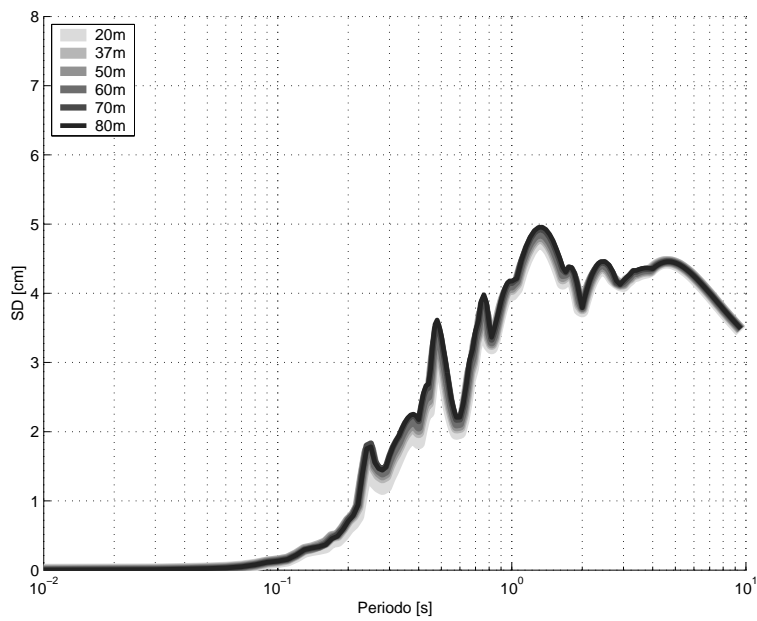


Figura 3.12: (Fo240S09) Spettri di risposta in spostamento

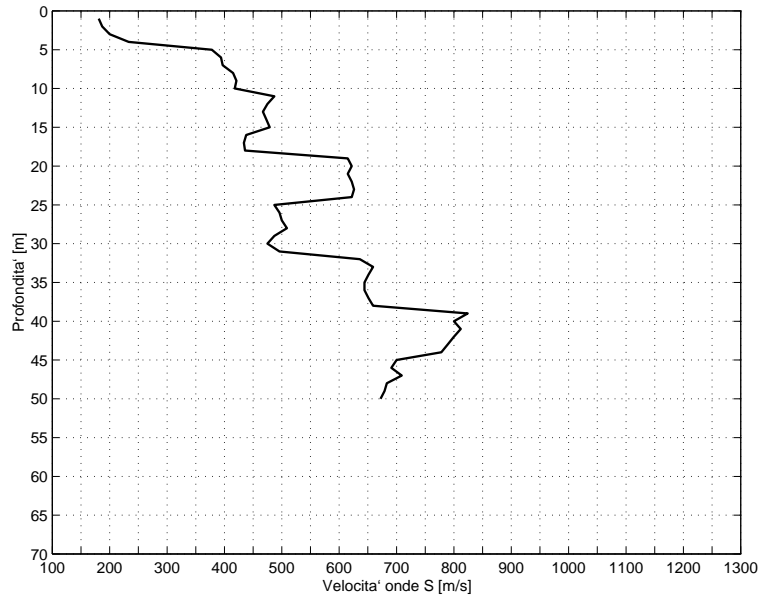


Figura 3.13: (Fo240S10) Profilo di velocità

prof [m]	SI [cm]	\bar{S}_a [g]	SI/SI ₀	\bar{S}_a/\bar{S}_{a0}
37	60.555	0.459	1.264	1.426
50	61.614	0.464	1.287	1.442
60	62.806	0.472	1.311	1.465
75	65.213	0.489	1.362	1.518
90	65.894	0.488	1.376	1.515
105	66.167	0.485	1.382	1.506

Tabella 3.3: (Fo240S10) Valori di SI ed \bar{S}_a al variare della profondità del *bedrock*

FO240S10

In corrispondenza di questo sondaggio sono state svolte una prova *down-hole* ed una prova *cross-hole* sino a una profondità di 50m. I profili di velocità ottenuti mostrano andamenti simili ma con valori che differiscono generalmente di circa 100m/s.

Non essendo definita la posizione del *bedrock*, sono state supposte diverse profondità; il profilo di velocità, di volta in volta, è stato completato con ipotetici strati di argilla (spessore 10m) caratterizzati da velocità delle onde S variabile tra 1050 e 1100m/s.

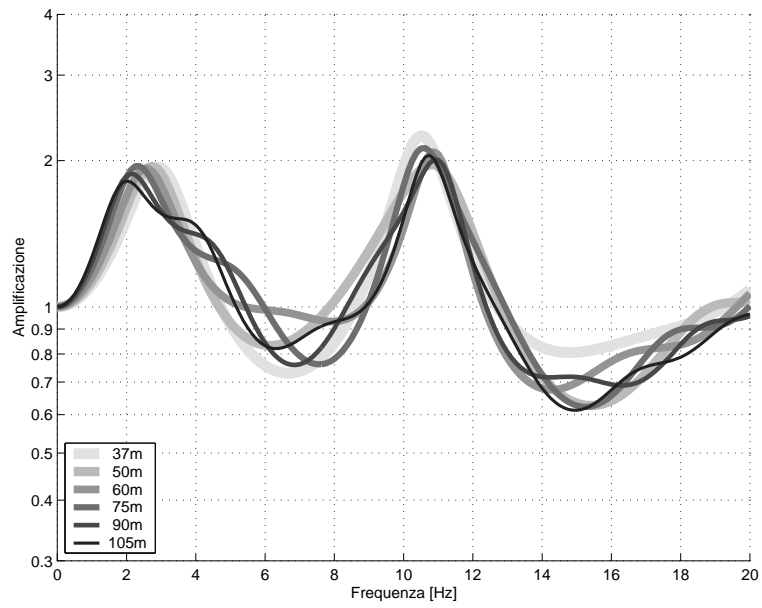


Figura 3.14: (Fo240S10) Funzioni di amplificazione

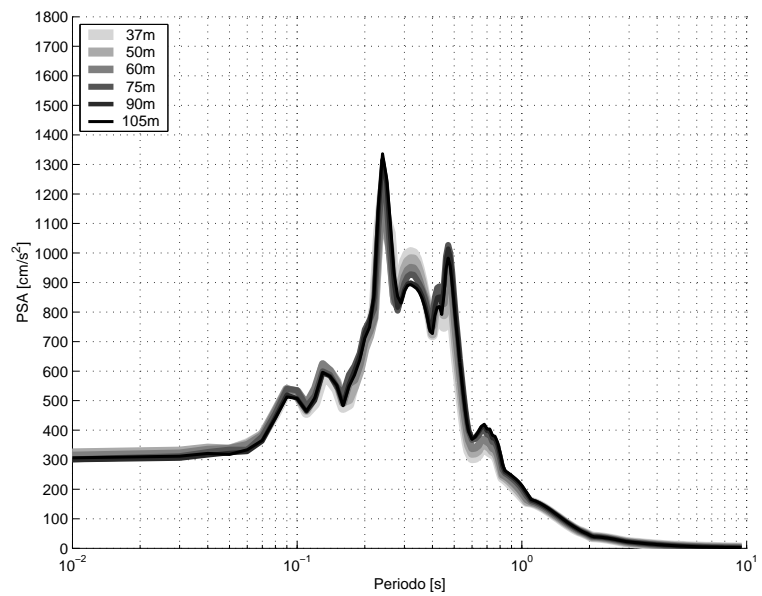


Figura 3.15: (Fo240S10) Spettri di risposta in accelerazione

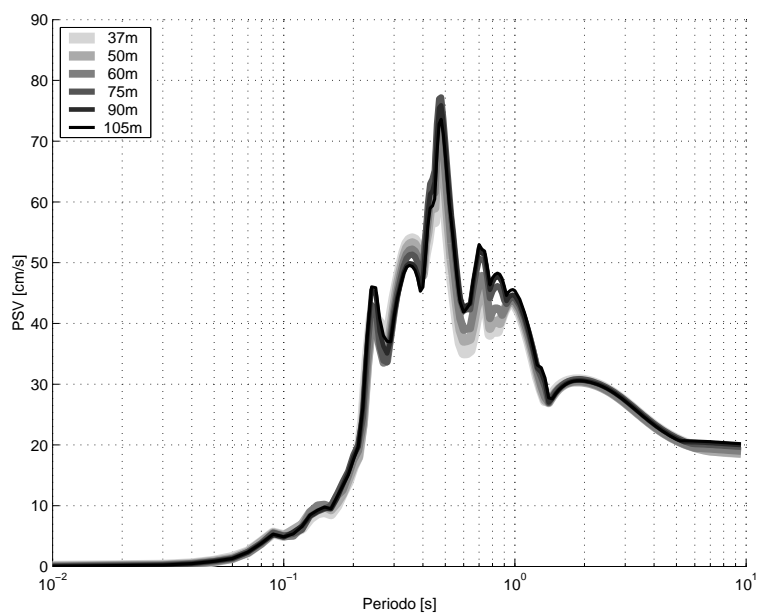


Figura 3.16: (Fo240S10) Spettri di risposta in velocità

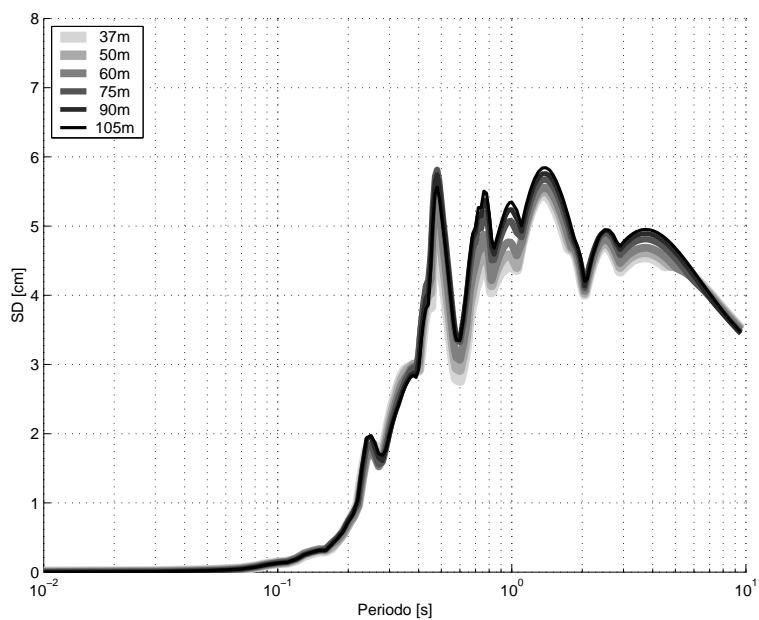


Figura 3.17: (Fo240S10) Spettri di risposta in spostamento

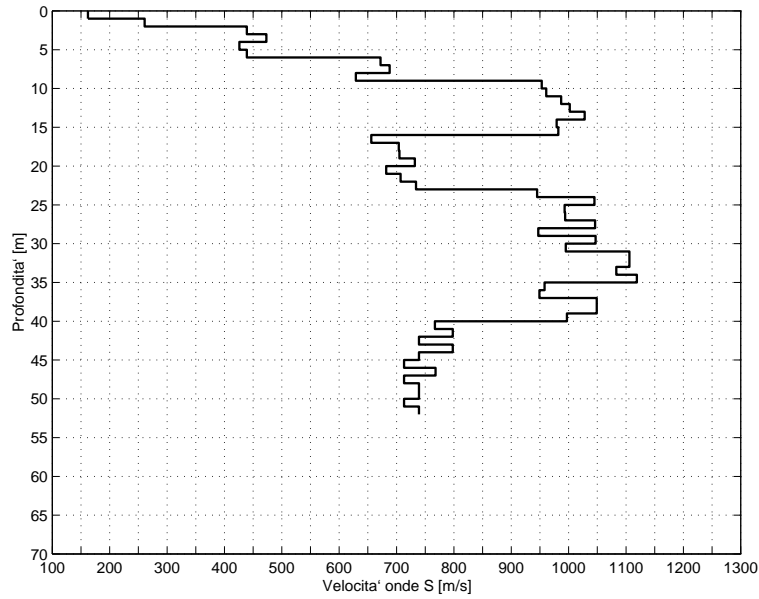


Figura 3.18: (Fo255S01) Profilo di velocità

prof [m]	SI [cm]	\bar{S}_a [g]	SI/SI ₀	\bar{S}_a/\bar{S}_{a0}
24	50.876	0.378	1.062	1.175
31	51.310	0.385	1.071	1.195
48	55.110	0.409	1.151	1.271
60	56.456	0.404	1.179	1.254
75	57.695	0.413	1.205	1.284
90	57.979	0.413	1.211	1.284

Tabella 3.4: (Fo255S01) Valori di SI ed \bar{S}_a al variare della profondità del *bedrock*

FO255S01

La prova *down-hole* aggiunge i 52m di profondità; il profilo di velocità è stato integrato con strati di argilla potenti 15m con velocità V_s da 1000 a 1100m/s andando da 52 a 90m di profondità.

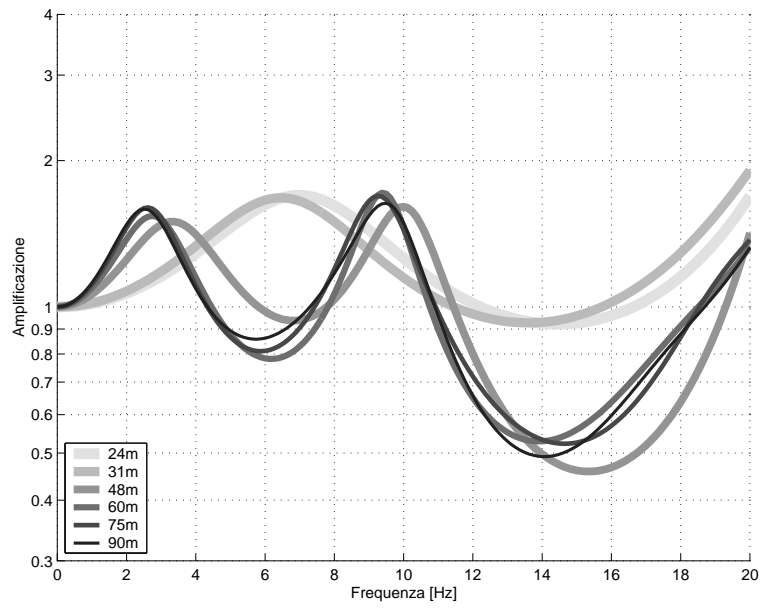


Figura 3.19: (Fo255S01) Funzioni di amplificazione

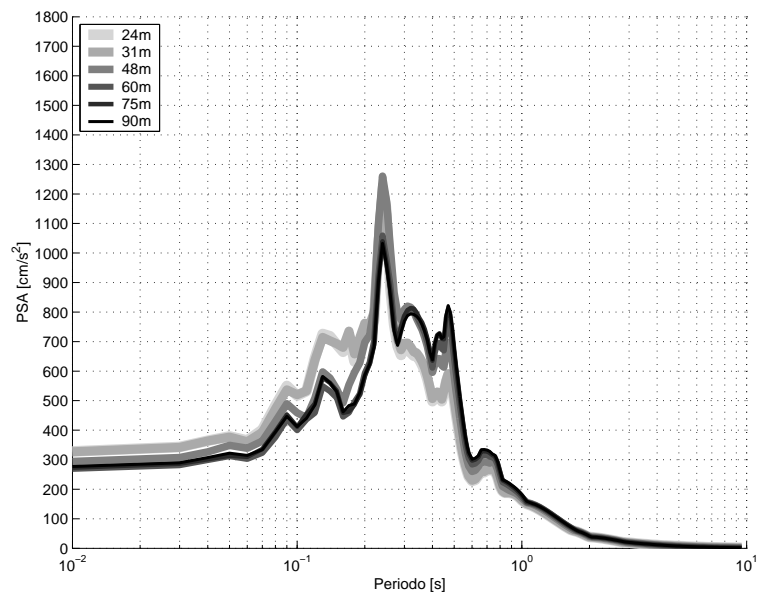


Figura 3.20: (Fo255S01) Spettri di risposta in accelerazione

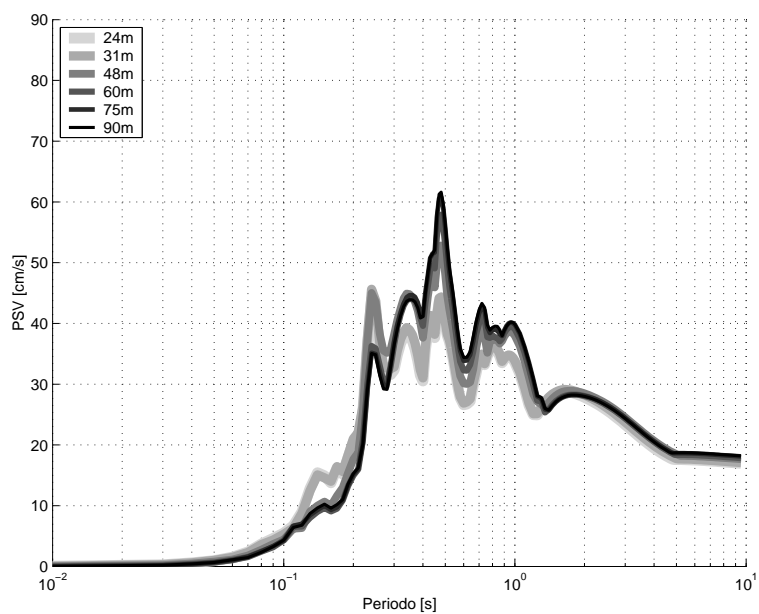


Figura 3.21: (Fo255S01) Spettri di risposta in velocità

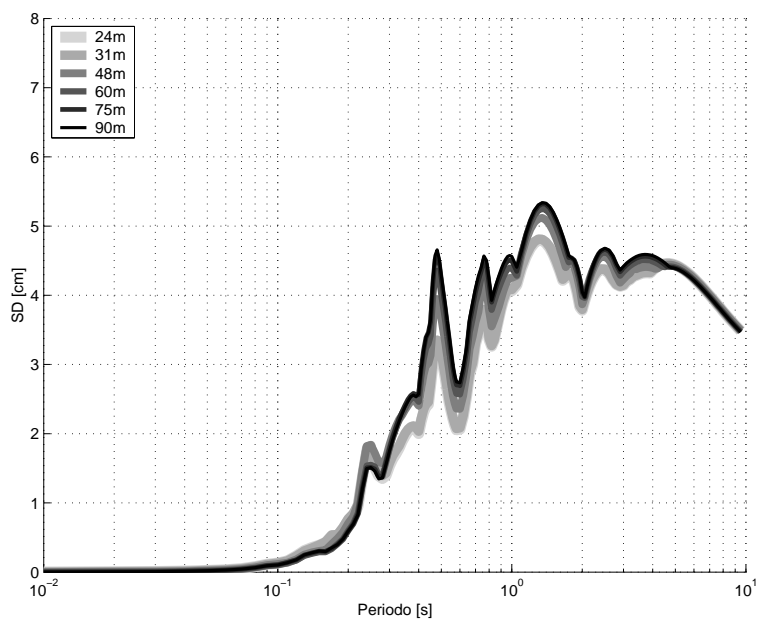


Figura 3.22: (Fo255S01) Spettri di risposta in spostamento

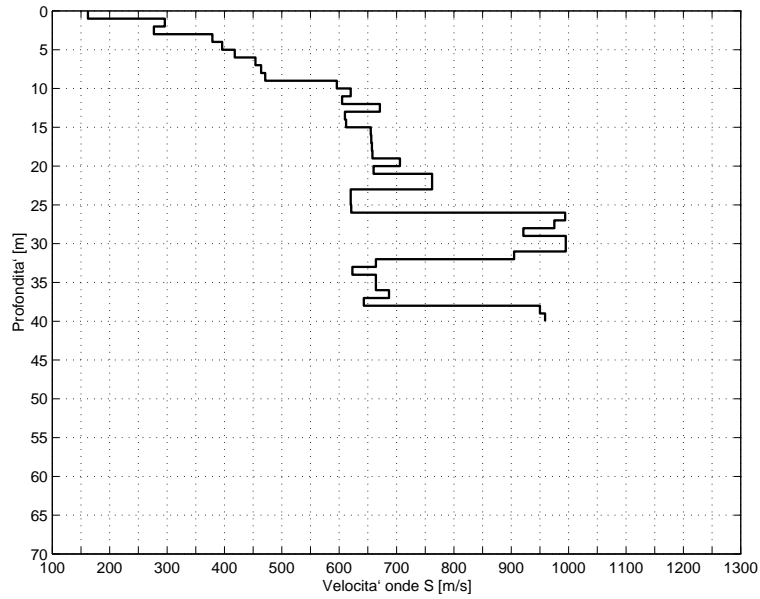


Figura 3.23: (Fo255S02) Profilo di velocità

prof	SI	\bar{S}_a	SI/SI ₀	\bar{S}_a/\bar{S}_{a0}
[m]	[cm]	[g]		
26	52.922	0.414	1.105	1.287
38	57.064	0.451	1.192	1.401
50	57.846	0.455	1.208	1.413
65	59.299	0.466	1.238	1.447
80	59.788	0.467	1.248	1.450
95	60.050	0.466	1.254	1.448

Tabella 3.5: (Fo255S02) Valori di SI ed \bar{S}_a al variare della profondità del *bedrock*

FO255S02

Down-hole che arriva fino a 40m; per posizionare il *bedrock* fino a 95m si sono, anche per questo caso, aggiunti strati di argilla con velocità crescenti.

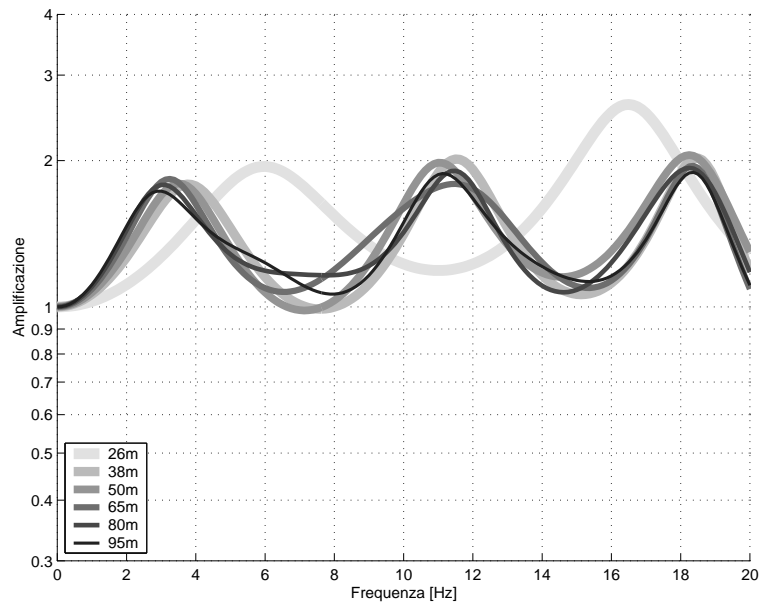


Figura 3.24: (Fo255S02) Funzioni di amplificazione

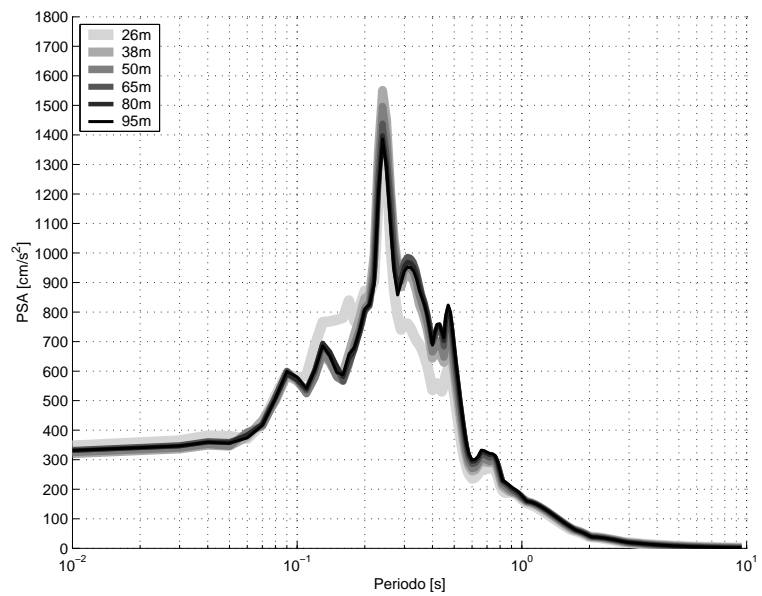


Figura 3.25: (Fo255S02) Spettri di risposta in accelerazione

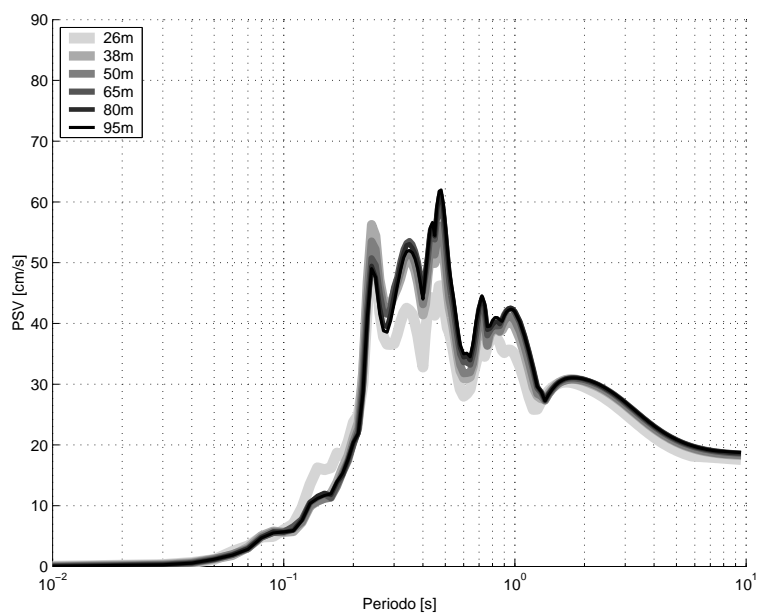


Figura 3.26: (Fo255S02) Spettri di risposta in velocità

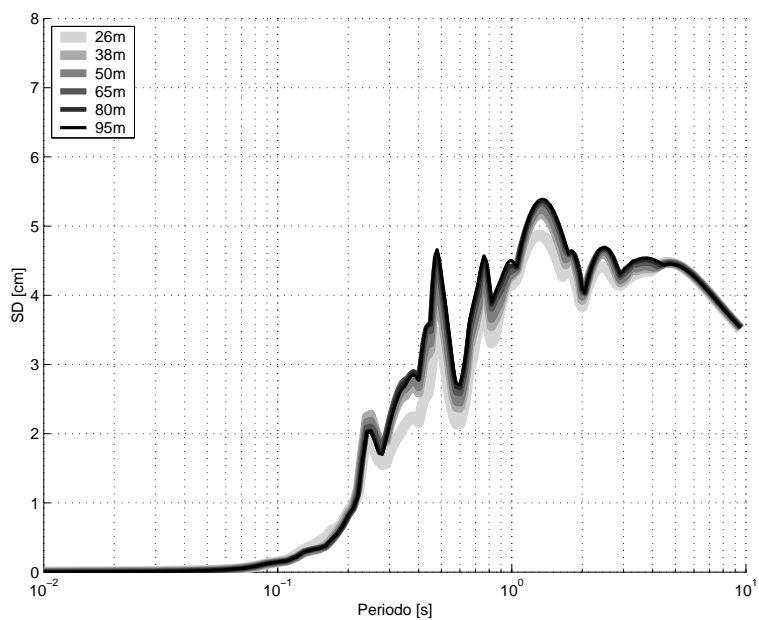


Figura 3.27: (Fo255S02) Spettri di risposta in spostamento

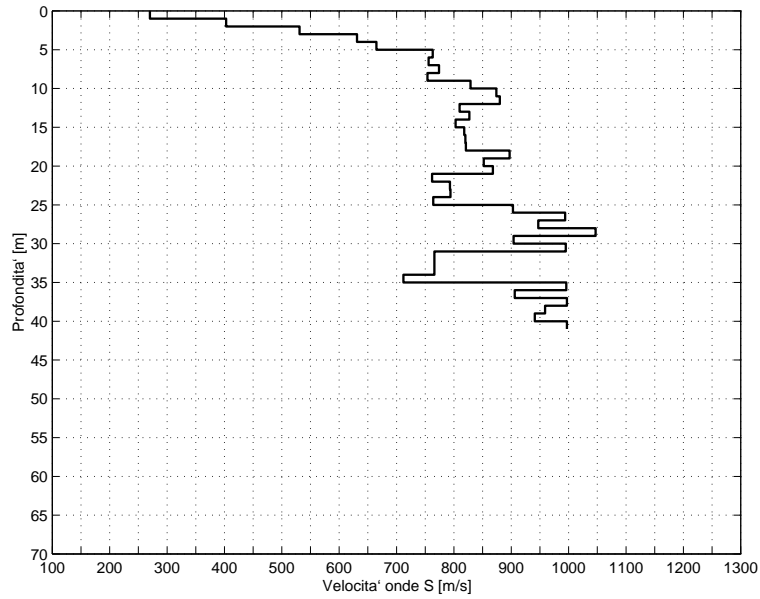


Figura 3.28: (Fo255S03) Profilo di velocità

prof [m]	SI [cm]	\bar{S}_a [g]	SI/SI ₀	\bar{S}_a/\bar{S}_{a0}
25	49.437	0.352	1.032	1.093
35	51.513	0.381	1.076	1.182
45	52.660	0.396	1.100	1.230
55	53.408	0.403	1.115	1.251
70	54.106	0.405	1.130	1.259
85	54.423	0.405	1.136	1.257

Tabella 3.6: (Fo255S03) Valori di SI ed \bar{S}_a al variare della profondità del *bedrock*

FO255S03

Down-hole che arriva fino a 41m, il *bedrock* viene posizionato a profondità crescenti sempre raggiungendo strati argillosi con velocità crescenti.

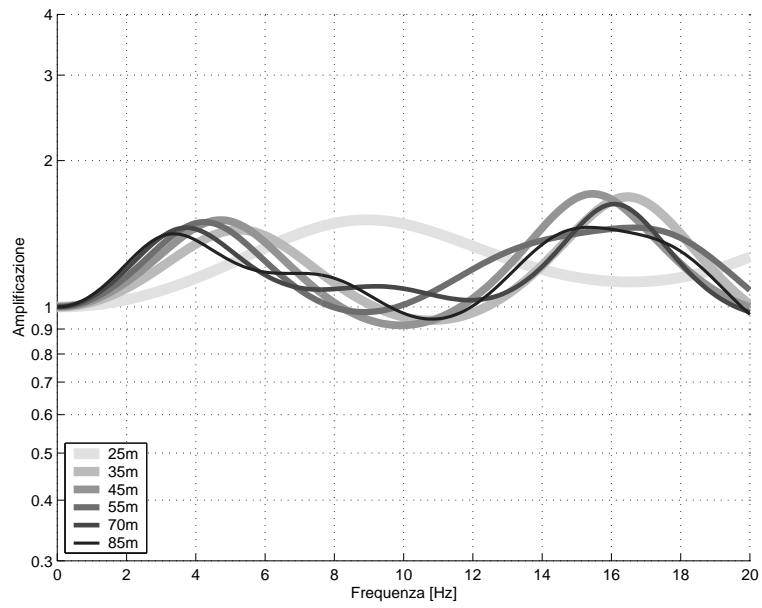


Figura 3.29: (Fo255S03) Funzioni di amplificazione

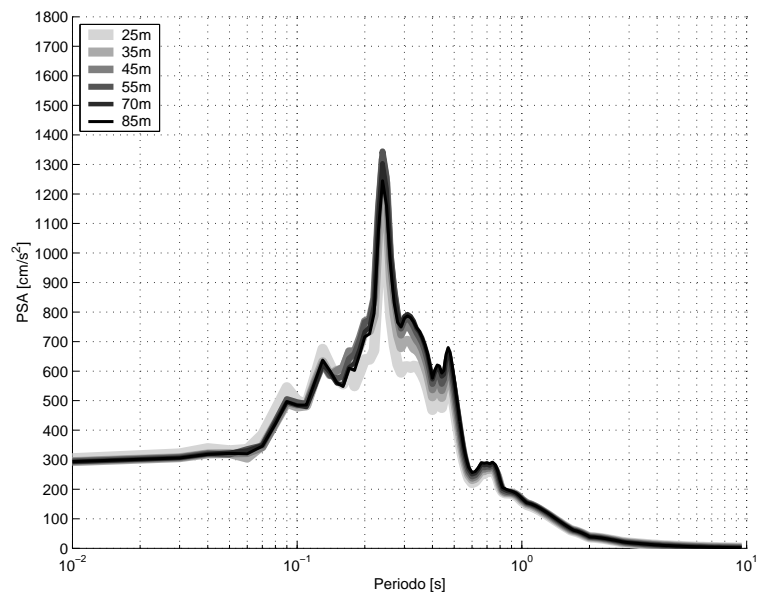


Figura 3.30: (Fo255S03) Spettri di risposta in accelerazione

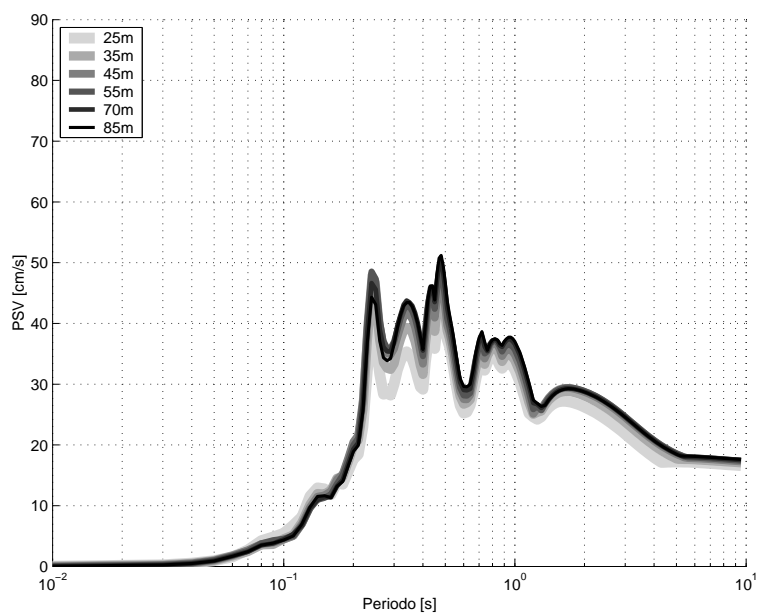


Figura 3.31: (Fo255S03) Spettri di risposta in velocità

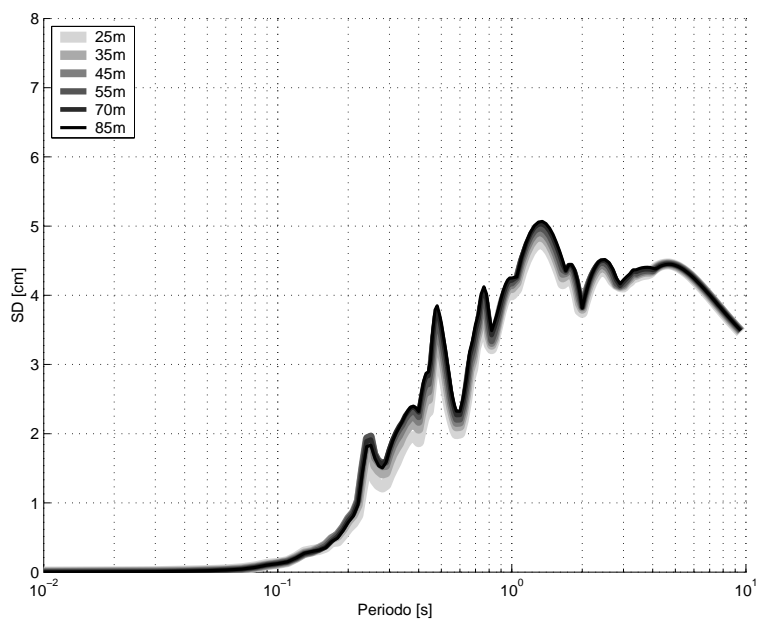


Figura 3.32: (Fo255S03) Spettri di risposta in spostamento

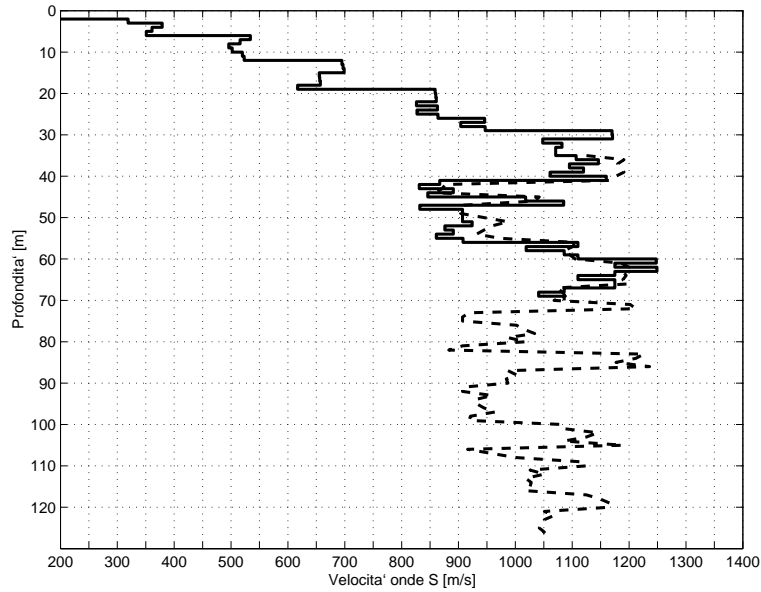


Figura 3.33: (Fo255S04) Profilo di velocità

prof [m]	SI [cm]	$\overline{S_a}$ [g]	SI/SI ₀	$\overline{S_a}/\overline{S_{a0}}$
19	50.594	0.380	1.056	1.180
29	51.605	0.398	1.078	1.237
56	54.636	0.419	1.141	1.302
82	55.300	0.410	1.155	1.274
99	55.409	0.392	1.157	1.219
116	56.449	0.397	1.179	1.232

Tabella 3.7: (Fo255S04) Valori di SI ed $\overline{S_a}$ al variare della profondità del *bedrock*

FO255S04

Per questo caso sono disponibili un *down-hole* che raggiunge i 70m di profondità e un *sonic-log* che va da 35 a 127m permettendo così una buona copertura dei dati e una estensione degli stessi fino ad elevate profondità. Non si riconosce però nessun livello che possa identificarsi con il *bedrock* sismico quindi questo viene collocato in posizioni diverse sulla base del profilo di velocità. Come per il sondaggio FO240S01 anche questo deve essere preso in particolare considerazione in quanto è basato su dati reali.

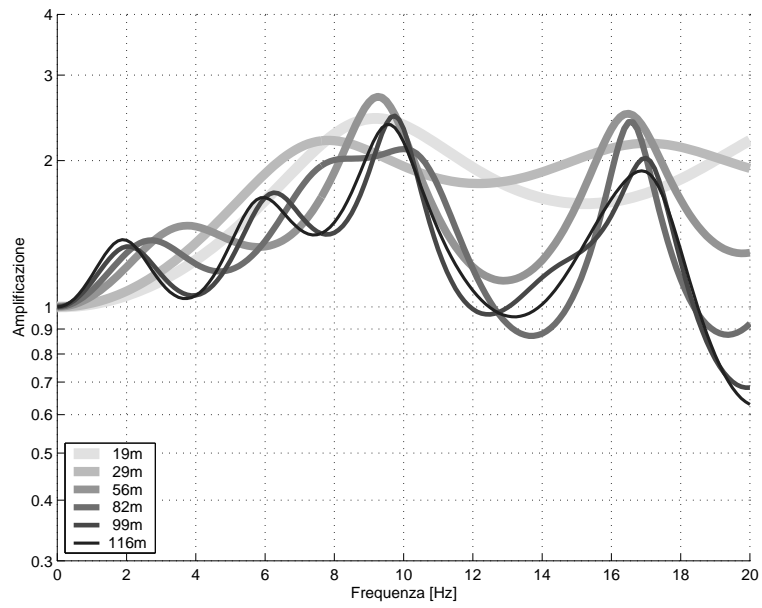


Figura 3.34: (Fo255S04) Funzioni di amplificazione

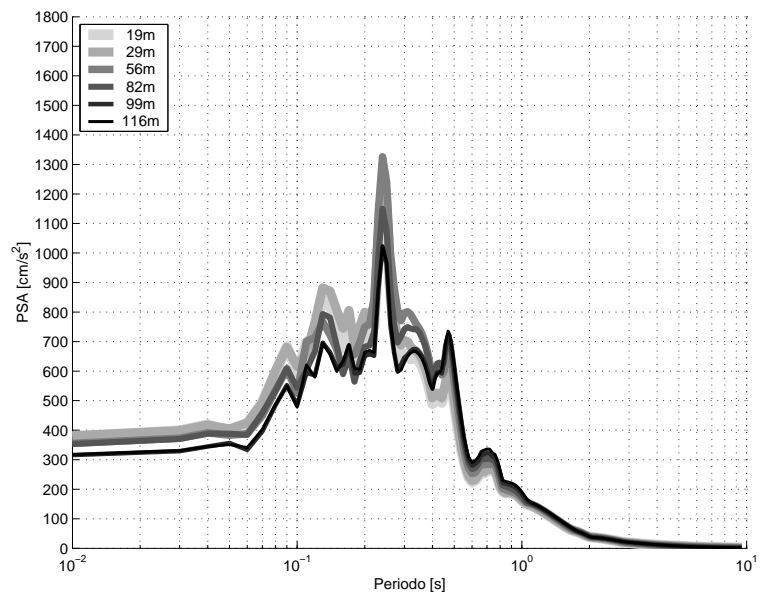


Figura 3.35: (Fo255S04) Spettri di risposta in accelerazione

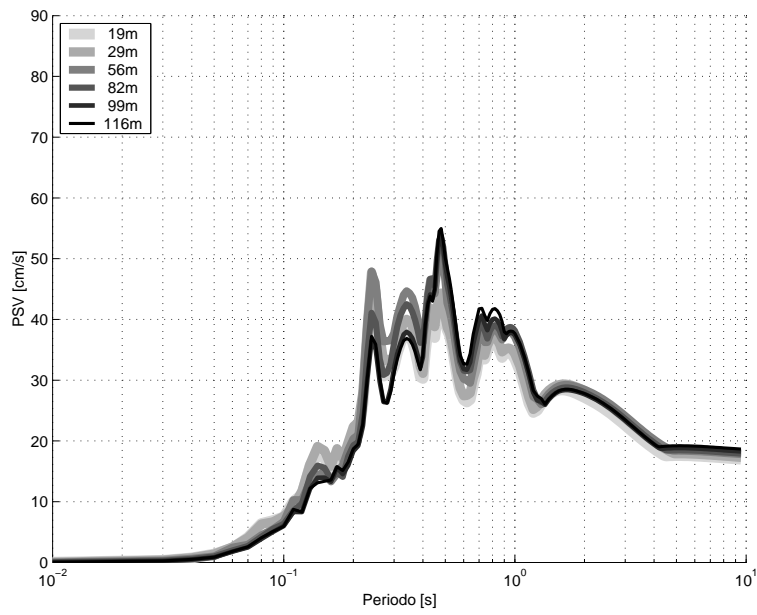


Figura 3.36: (Fo255S04) Spettri di risposta in velocità

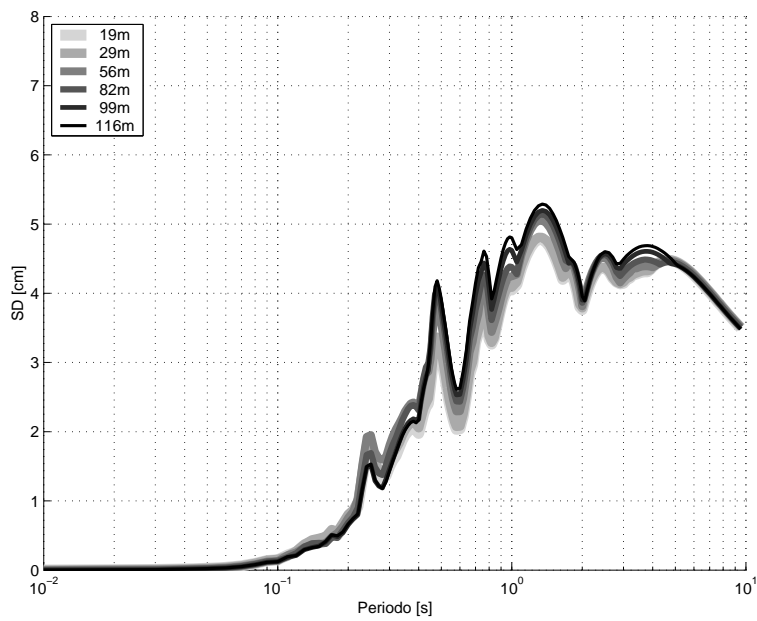


Figura 3.37: (Fo255S04) Spettri di risposta in spostamento

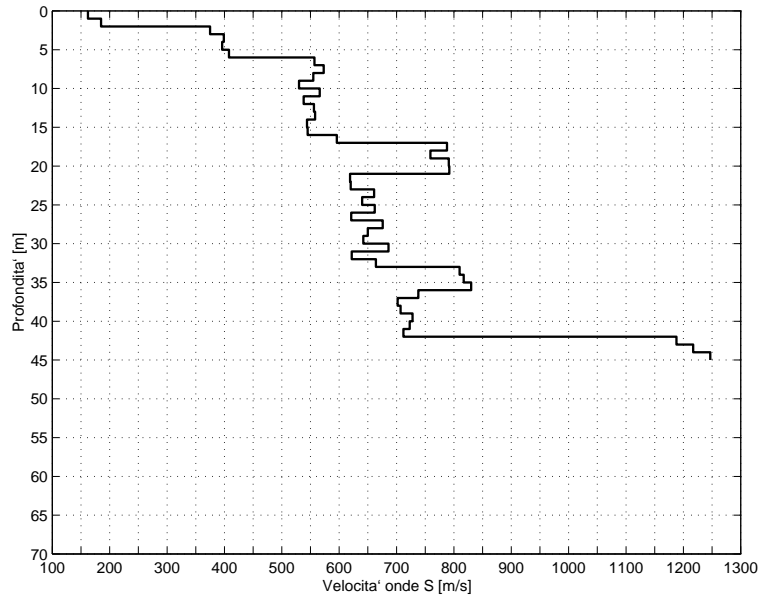


Figura 3.38: (Fo255S07) Profilo di velocità

prof	SI	\bar{S}_a	SI/SI ₀	\bar{S}_a/\bar{S}_{a0}
[m]	[cm]	[g]		
42	63.549	0.511	1.327	1.587

Tabella 3.8: (Fo255S07) Valori di SI ed \bar{S}_a al variare della profondità del *bedrock*

FO255S07

Questo *down-hole* ha la particolarità di raggiungere il substrato a 42m sotto il livello del piano campagna. La presenza di spessi banchi di ghiaie non rende plausibile l'ipotesi di avere un *bedrock* a profondità inferiori, per questo è stata condotta un'unica prova con il *bedrock* sismico a 42m con una V_s di 1250m/s.

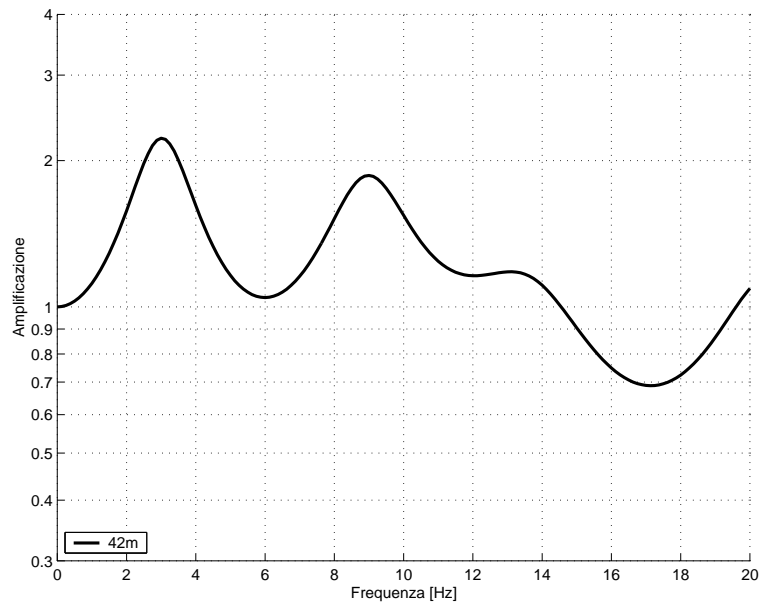


Figura 3.39: (Fo255S07) Funzioni di amplificazione

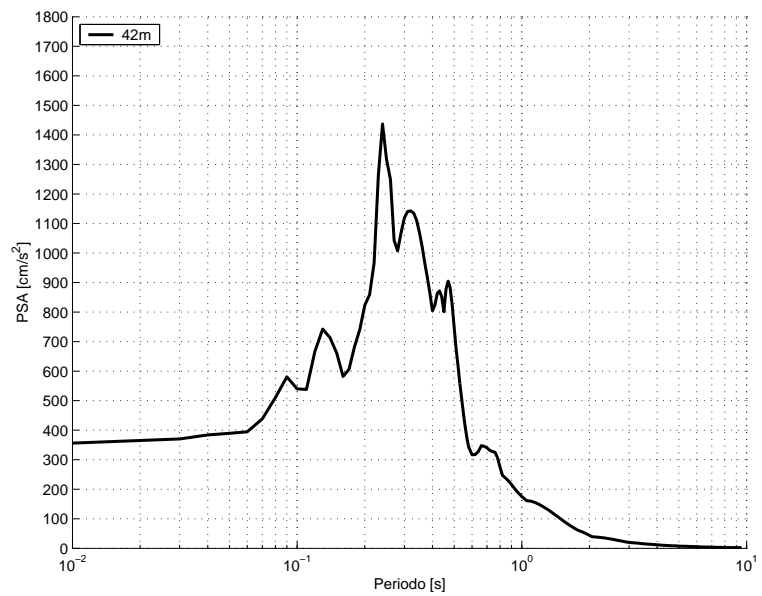


Figura 3.40: (Fo255S07) Spettri di risposta in accelerazione

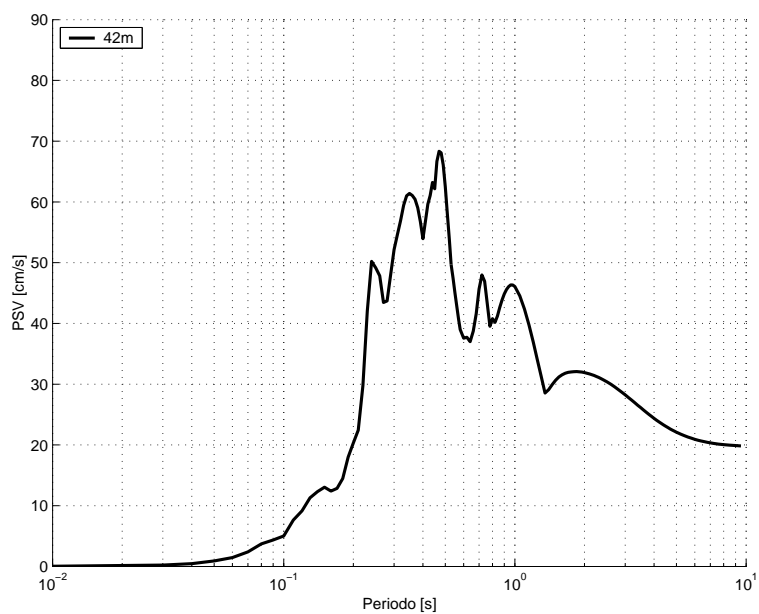


Figura 3.41: (Fo255S07) Spettri di risposta in velocità

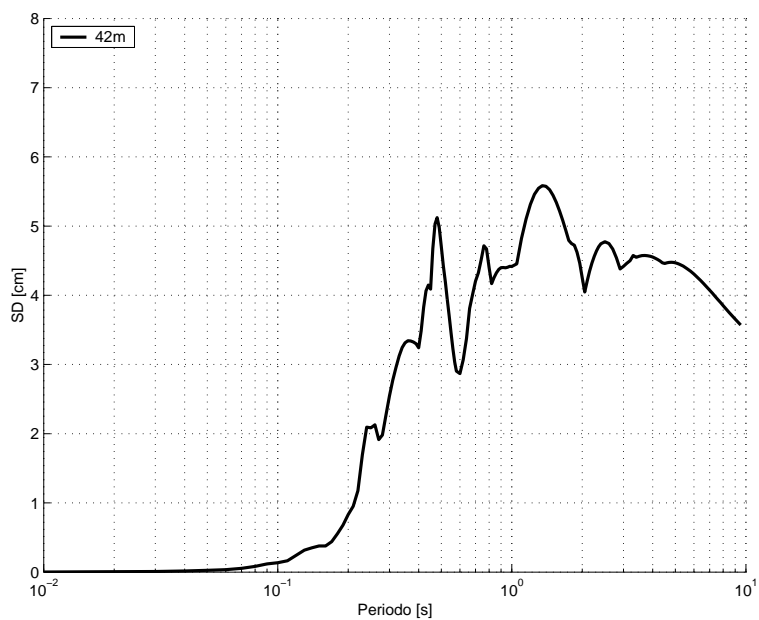


Figura 3.42: (Fo255S07) Spettri di risposta in spostamento

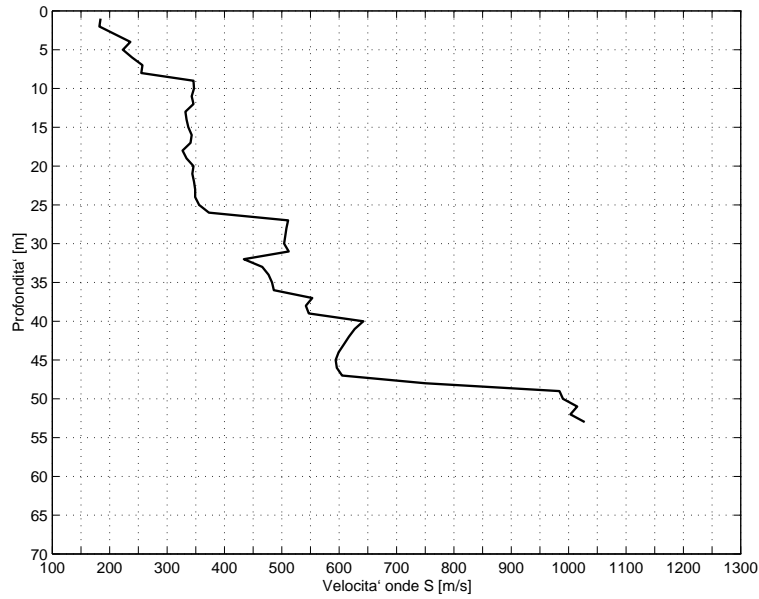


Figura 3.43: (Fo255S10) Profilo di velocità

prof	SI	\bar{S}_a	SI/SI ₀	\bar{S}_a/\bar{S}_{a0}
[m]	[cm]	[g]		
47	76.067	0.511	1.588	1.586

Tabella 3.9: (Fo255S10) Valori di SI ed \bar{S}_a al variare della profondità del *bedrock*

FO255S10

Il *cross-hole* effettuato identifica in modo univoco il substrato a 47m di profondità con un grosso salto della velocità delle onde di taglio che va da 600 a 1000m/s, per questo motivo è stata fatta una sola prova.

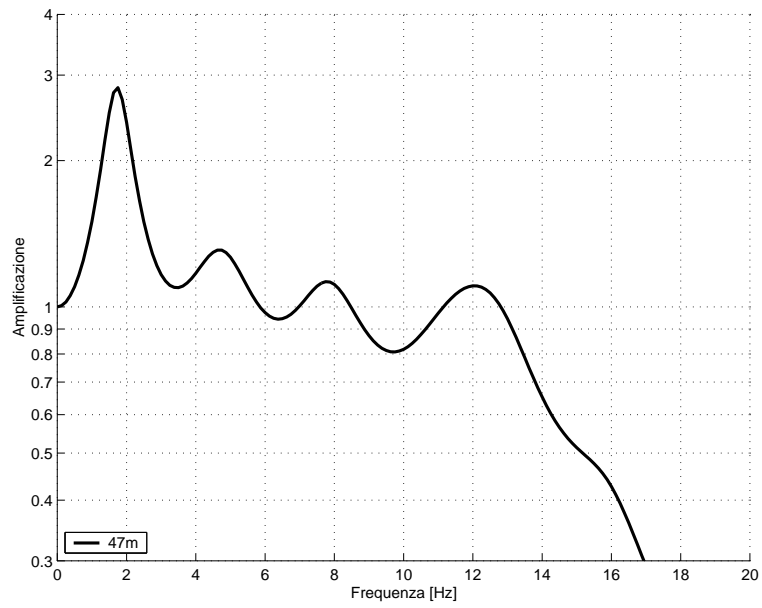


Figura 3.44: (Fo255S10) Funzioni di amplificazione

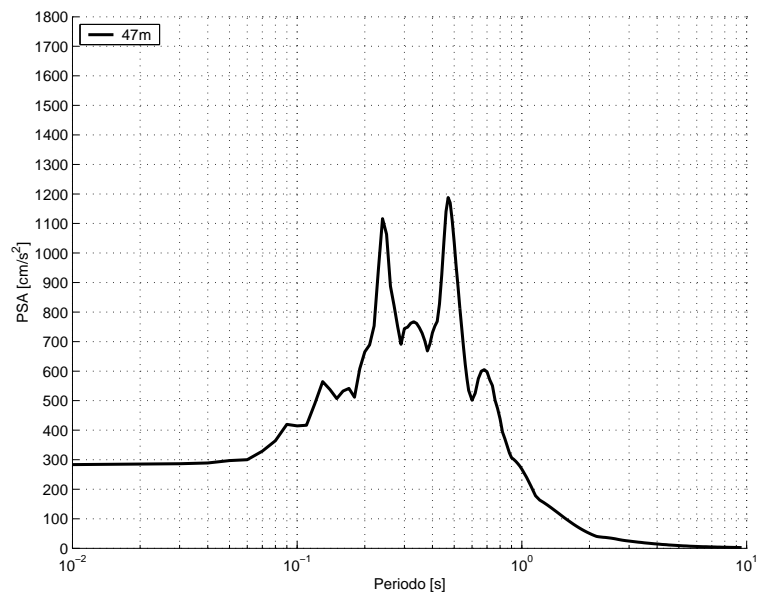


Figura 3.45: (Fo255S10) Spettri di risposta in accelerazione

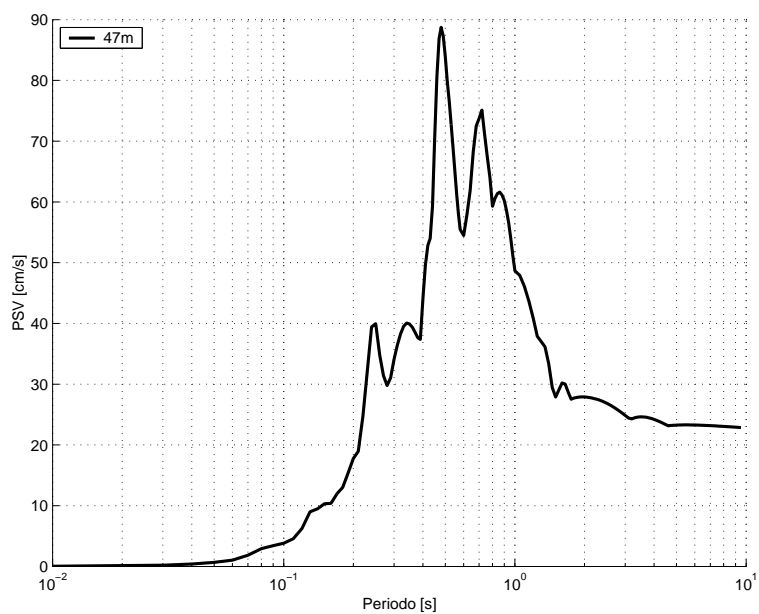


Figura 3.46: (Fo255S10) Spettri di risposta in velocità

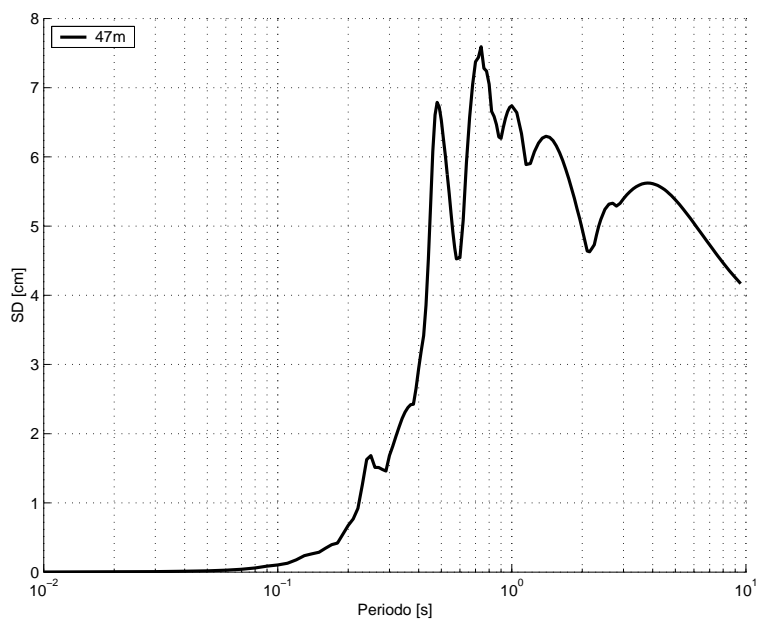


Figura 3.47: (Fo255S10) Spettri di risposta in spostamento

Mappe di pericolosità sismica

Come già specificato nella “Presentazione” l’obiettivo dello studio in oggetto è quello di offrire le informazioni necessarie alla definizione di politiche territoriali finalizzate alla riduzione del rischio. È evidente quindi che il prodotto finale debba essere una mappa che sulla base di uno più parametri rappresentativi dello scuotimento sia in grado di evidenziare le aree più o meno esposte.

La figura 3.1 (vedi pagina 13) rappresenta i punti nei quali la Regione Emilia-Romagna ha effettuato prove geofisiche per la caratterizzazione dinamica dei terreni. Questi sono punti nei quali è possibile calcolare con buona affidabilità, come dimostrato nelle precedenti pagine, le possibili modificazioni del moto date dalla presenza di depositi superficiali con scarse caratteristiche meccaniche. La densità spaziale di tali informazioni può essere considerata buona, soprattutto se confrontata con altre situazioni a livello nazionale, ma non permette di costruire con sufficiente affidabilità una mappa che descriva arealmente il fenomeno.

Per raggiungere tale finalità si è pensato quindi di utilizzare altre informazioni di natura geotecnica raccolte nella banca dati del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. In particolare le indagini si sono concentrate sull’impiego di prove Cone Penetration Test (CPT). È stata conseguentemente calcolata una relazione empirica tra la velocità delle onde di taglio ed i parametri misurati con prove CPT: resistenza alla penetrazione della punta (q_c) e resistenza laterale (f_s).

La relazione empirica ottenuta ha permesso di calcolare le amplificazioni del moto sismico date dalla presenza di depositi superficiali anche in punti dove prove geofisiche DHT non erano disponibili.

4.1 Dati

La tabella 4.1 riporta le prove down-hole (DHT) e le corrispondenti prove CPT impiegate nella costruzione della relazione empirica tra velocità delle onde di taglio e parametri delle prove penetrometriche statiche CPT. Come è possibile

Codice DHT	Codice CPT
FO240S09	240140U501
FO240S10	240140u510
FO255S01	255010E504X
FO255S02	255020E501
FO255S03	255020E510
FO255S04	255030U519X
FO256S05	256050U503X
FO256S06	256010U516X
FO256S08	256020U503X
RA241S01	241130U504X

Tabella 4.1: Codici prove DHT e CPT utilizzate per il calcolo della relazione empirica $CPT-V_S$

osservare solo una parte delle prove impiegate è contenuta nell'area indagata (sei su dieci). Non riteniamo che l'utilizzo di informazioni esterne all'area indagata possa influenzare sensibilmente i risultati ottenuti ed anzi una relazione di questo tipo valida su tutta l'area della pianura Romagnola può rappresentare uno strumento per l'estensione di indagini analoghe su aree limitrofe. A tal fine tuttavia è necessaria un'ulteriore validazione della relazione calcolata ed una analisi su forme funzionali alternative a quella adottata.

Tutte le prove DHT sono state svolte dalla stessa ditta committente, lo “Studio di Geologia e Geofisica” di Siena, assicurando una omogeneità nell'acquisizione e nel processamento delle informazioni di natura geofisica.

4.2 Relazione $CPT-V_S$

In letteratura esistono diverse relazioni $CPT-V_S$, alcune valide solo per alcune litologie altre il cui campo di applicabilità si estende a tutte le tipologie di terreno. Ne vengono riportate alcune a titolo d'esempio, valide sia per terreni coesivi che per terreni sciolti:

- Mayne e Burns [1995];
- Hegazy e Mayne [1995];

La figura 4.1 mette a confronto per il DHT 255S02 i valori di velocità delle onde di taglio misurati con quelli ricavati applicando al profilo CPT 255020E501 le relazioni di Mayne e Burns [1995] e di Hegazy e Mayne [1995].

La differenza tra il dato misurato e quello ricavato empiricamente è evidente. In particolare si nota una notevole dipendenza delle V_S calcolate con la tecnica DHT e la profondità.

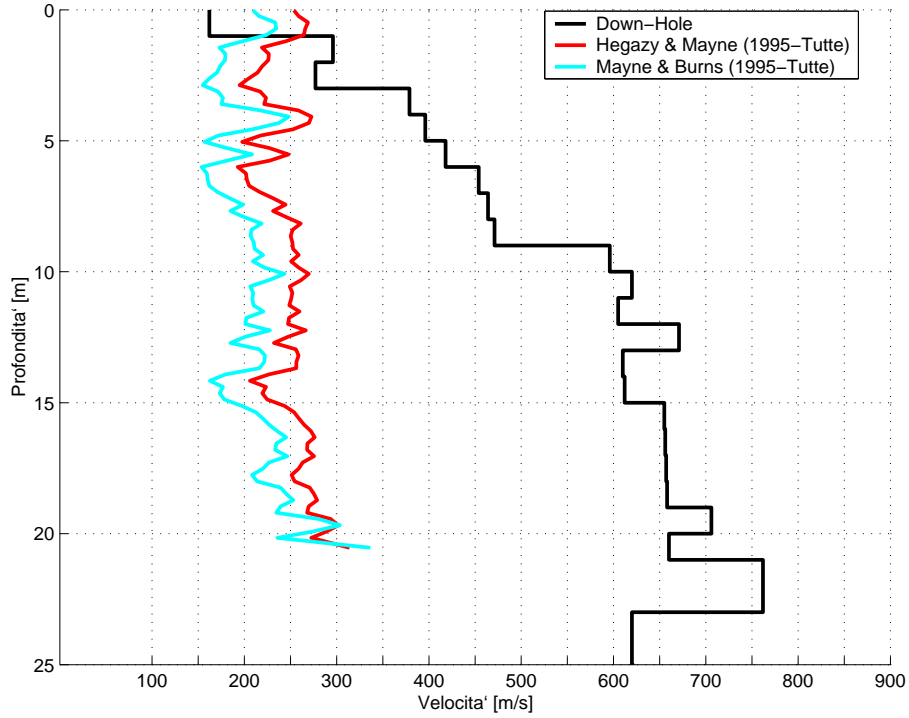


Figura 4.1: Profilo di velocità down-hole e profili di velocità ricavati dalle corrispondenti CPT con delle relazioni presenti in letteratura valide per tutte le litologie

La forma funzionale della relazione $V_S(q_c, f_s, z)$ regredita nel presente lavoro corrisponde a:

$$V_s = \alpha \cdot q_c^\beta \cdot f_s^\gamma \cdot z^\delta \quad (4.1)$$

dove z indica la distanza dalla superficie, q_c la resistenza all'avanzamento della punta (in MPa) e f_s la resistenza laterale (in MPa). Utilizzando una regressione lineare multipla si sono ricavati i valori medi dei parametri α, β, γ e δ coi relativi intervalli di confidenza al 95% (vedi tabella 4.2). La relazione ricavata fornisce

Variabile	Valore Medio	Intervallo di confidenza
α	5.852	± 0.097
β	-0.122	± 0.027
γ	0.080	± 0.029
δ	0.375	± 0.017

Tabella 4.2: Valori dei parametri regrediti per la relazione 4.1

un buon “fitting” con i dati sperimentali, in cui le velocità stimate presentano una distribuzione log-normale, con una deviazione standard sul logaritmo della

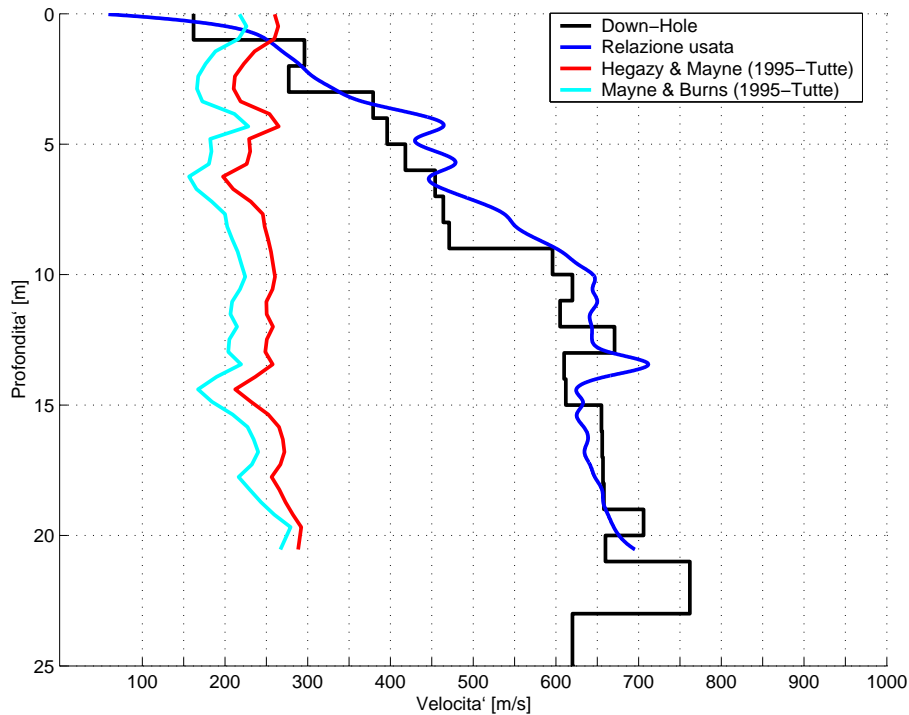


Figura 4.2: Confronto tra un profilo di velocità down-hole e i profili di velocità ricavati dalle corrispondenti CPT, con delle relazioni presenti in letteratura e con la relazione utilizzata nel presente lavoro

velocità pari a $\sigma_{\ln V} = 0.1952$. A titolo di esempio in figura 4.2 sono rappresentati i profili di velocità già riportati in figura 4.1 insieme al profilo ottenuto utilizzando la relazione 4.1.

4.3 Risultati

La metodologia adottata per il calcolo delle amplificazioni a scala locale ha richiesto una preventiva selezione delle prove CPT. Sono state così scartate tutte quelle prove la cui profondità massima raggiunta non superava i due terzi della distanza tra il *bedrock* sismico e la superficie. Tale *bedrock* è stato preso in corrispondenza del tetto delle formazioni di origine marina. Sulla base di quanto esposto nel capitolo 3 si è scelto però di limitarne la profondità ad un massimo di 50 m, considerato questo come un limite oltre al quale il contributo all'amplificazione diventa trascurabile.

Per ognuna delle CPT selezionate è stato ricavato un modello di velocità delle onde di taglio utilizzando l'equazione 4.1. Da questo sono stati calcolati analiticamente la funzione di amplificazione che, applicata al moto di input, permette di ricavare il moto in superficie. Il modello di calcolo utilizzato considera la pro-

pagazione verticale di onde S_H in un mezzo costituito da strati piano-paralleli con comportamento visco-elastico lineare.

Per ogni CPT sono quindi stati calcolati lo spettro di risposta in spostamento (SD) e gli pseudo-spettri di risposta in velocità e accelerazione (PSV e PSA). Per questi ultimi si è considerato uno smorzamento (*damping*) del 5%, ovvero lo smorzamento tipico delle più comuni strutture. Integrando il PSV nell'intervallo compreso tra 0.1 e 2.5 s si sono ottenute le intensità di Housner relative ad ogni CPT selezionata.

I valori di intensità di Housner sono stati interpolati arealmente considerando un algoritmo di smoothing che per ogni punto calcola la somma dei contributi dati dai dodici punti più vicini, pesandoli proporzionalmente all'inverso della distanza elevata ad 1.10.

4.3.1 Mappe di amplificazione

La figura 4.3 rappresenta la mappa degli effetti di sito relativi ai profili di velocità più probabili ricavati per le CPT selezionate. Viene rappresentata l'intensità di Housner, calcolata utilizzando un segnale di riferimento costante su tutta l'area indagata, ovvero l'accelerogramma Tolmezzo N-S (evento del 6 Maggio 1976, $M_S = 6.5$, $\Delta=27$ km) scalato a 250 cm/s^2 , posizionato all'affioramento del *bedrock* e con una SI pari a 47.86 cm. Le figure 4.4 e 4.5 rappresentano i valori di intensità di Housner minimi e massimi calcolati per l'area in esame, ottenuti considerando per ogni CPT selezionata dei profili di velocità variabili all'interno degli intervalli di confidenza al 95% sul valor medio.

La mappa ricavata con le CPT è stata quindi integrata estendendo le analisi numeriche in corrispondenza dei DHT, il risultato ottenuto è rappresentato nella figura 4.6.

Confrontando le due mappe nelle figure 4.3 e 4.6 si nota che i due tipi di dati forniscono risultati in generale accordo nella zona di Cesena, mentre nella zona di Forlì, si verificano delle discrepanze. Questo è dovuto al fatto che in corrispondenza di due DHT sono presenti depositi di conoide alluvionale, quali sabbie e ghiaie con caratteristiche meccaniche scadenti, sui quali non si ritrovano prove CPT, ma che provocano notevoli effetti di amplificazione. Questo fatto mette in evidenza un aspetto fondamentale della metodologia adottata: i dati CPT si dimostrano validi in un lavoro di caratterizzazione areale degli effetti di sito, mentre i DHT possono fornire un dato utile ed affidabile per studi di tipo puntuale, in special modo in zone con prevalenza di ghiaie o sabbie grossolane, in cui le prove CPT non vengono eseguite o comunque forniscono dati poco attendibili.

4.3.2 Mappe di pericolosità sismica

Nel realizzare la mappa 4.6 si è considerato un moto di riferimento di ampiezza costante in tutta l'area. Questa assunzione permette di apprezzare al meglio il

contributo locale degli effetti di sito, ma la dimensione dell'area indagata induce ad attendersi variazioni sul moto di riferimento. Per valutare il moto di input specifico per ogni punto sono stati utilizzati i risultati dell'analisi di pericolosità sismica a scala regionale (esposti a pagina 10).

Le figure 4.7 e 4.8 rappresentano una sintesi dell'analisi degli effetti di sito a scala locale e delle analisi di pericolosità in termini probabilistici. In queste mappe è stato utilizzato il valore dell'accelerazione orizzontale di picco (PGA) con un periodo di ritorno di 474 anni come un fattore di scala per il moto di riferimento. L'ampiezza massima del moto di riferimento in ogni punto corrisponde alla PGA calcolata con l'analisi di pericolosità a scala regionale.

Le figure 4.7 e 4.8 mettono in luce come la pericolosità a scala regionale su un'area abbastanza vasta come quella indagata (circa 300 km²) influisca in modo determinante sui valori di scuotimento attesi tanto da attenuare sensibilmente l'influenza delle amplificazioni a scala locale.

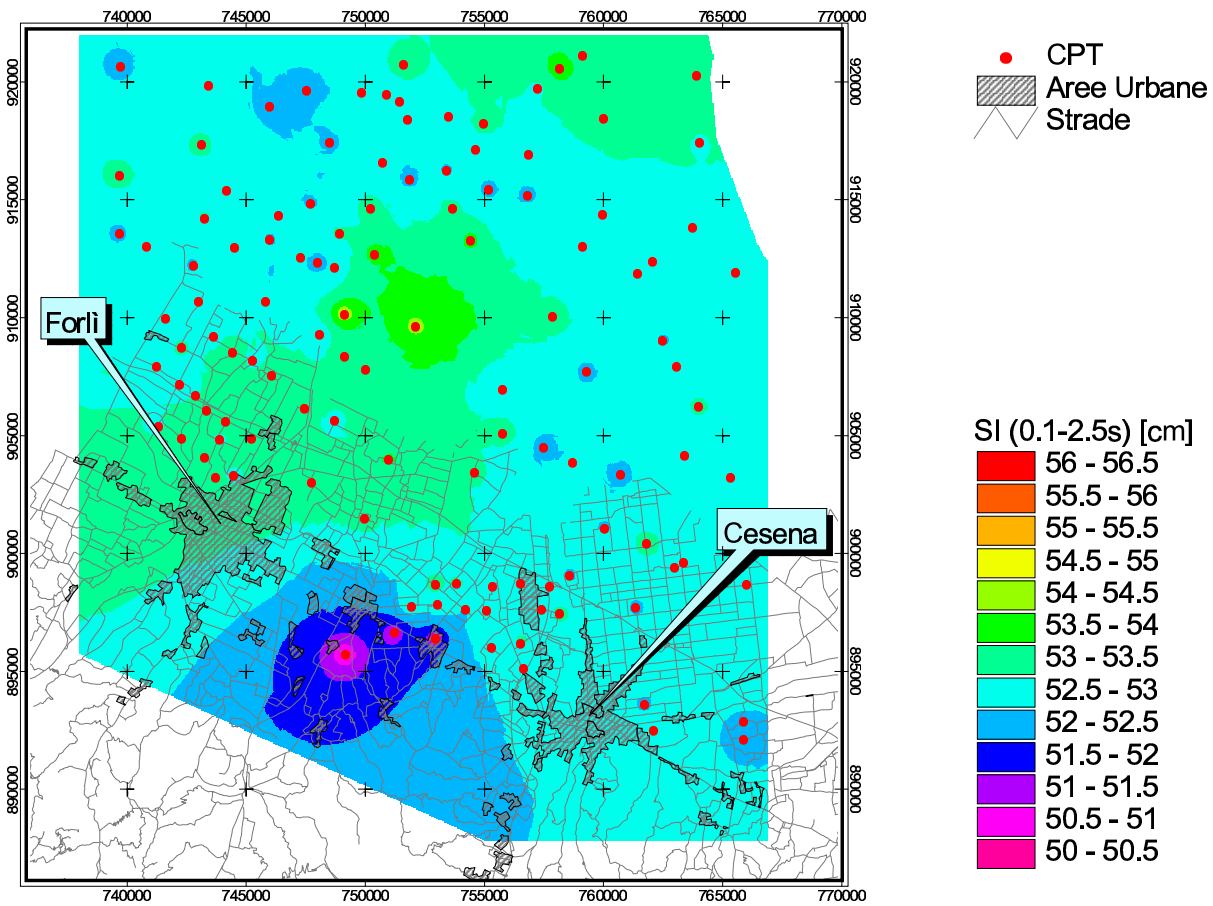
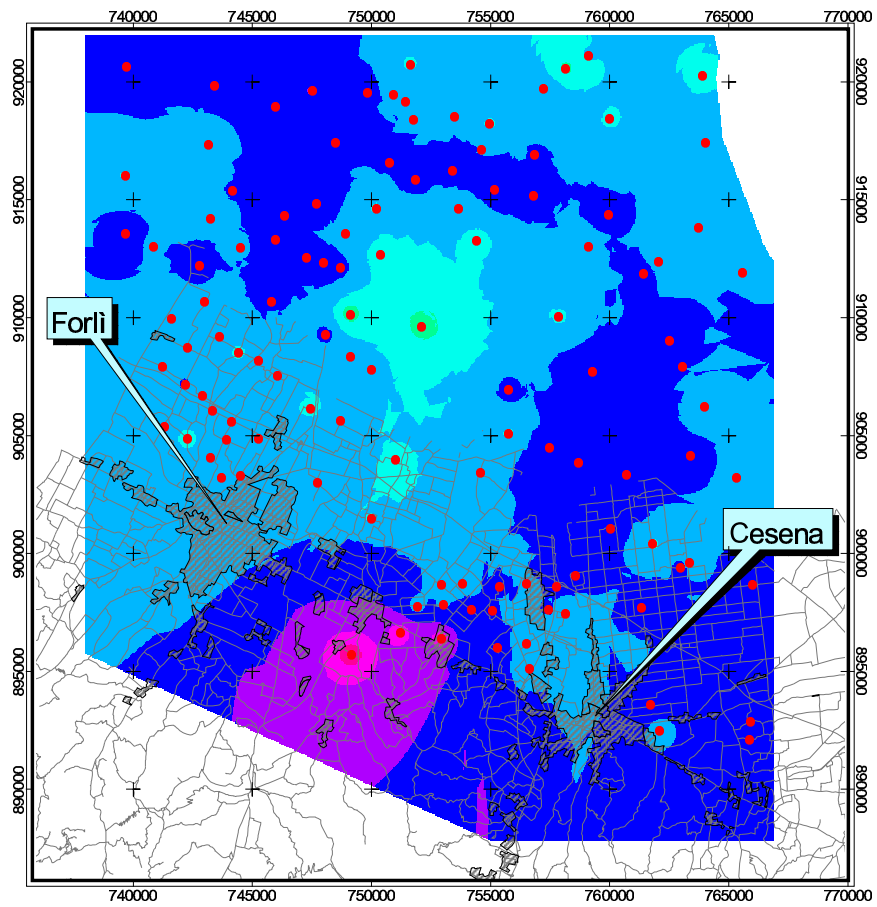


Figura 4.3: Mappa dell'intensità di Housner (integrale dello spettro di risposta in velocità tra 0.1 e 2.5 secondi con *damping* del 5%)

Figura 4.4: Mappa dell'intensità di Housner minima



● CPT
▨ Aree Urbane
— Strade

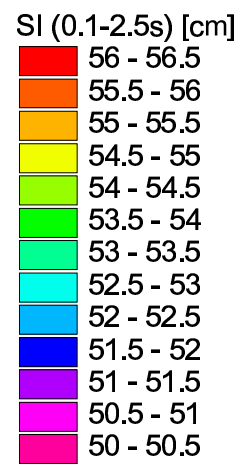
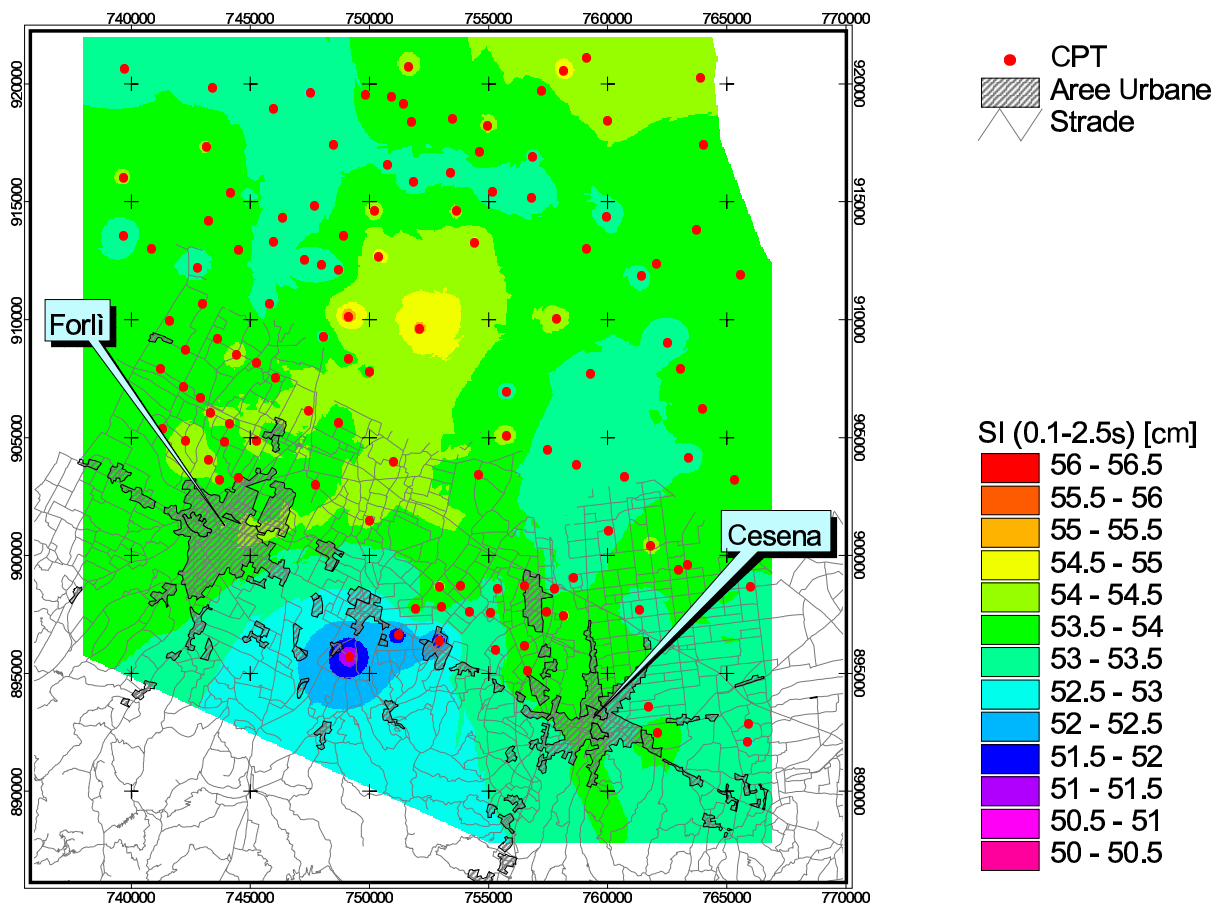


Figura 4.5: Mappa dell'intensità di Housner massima



- CPT
- Down-Holes
- ▨ Aree Urbane
- ∟ Strade

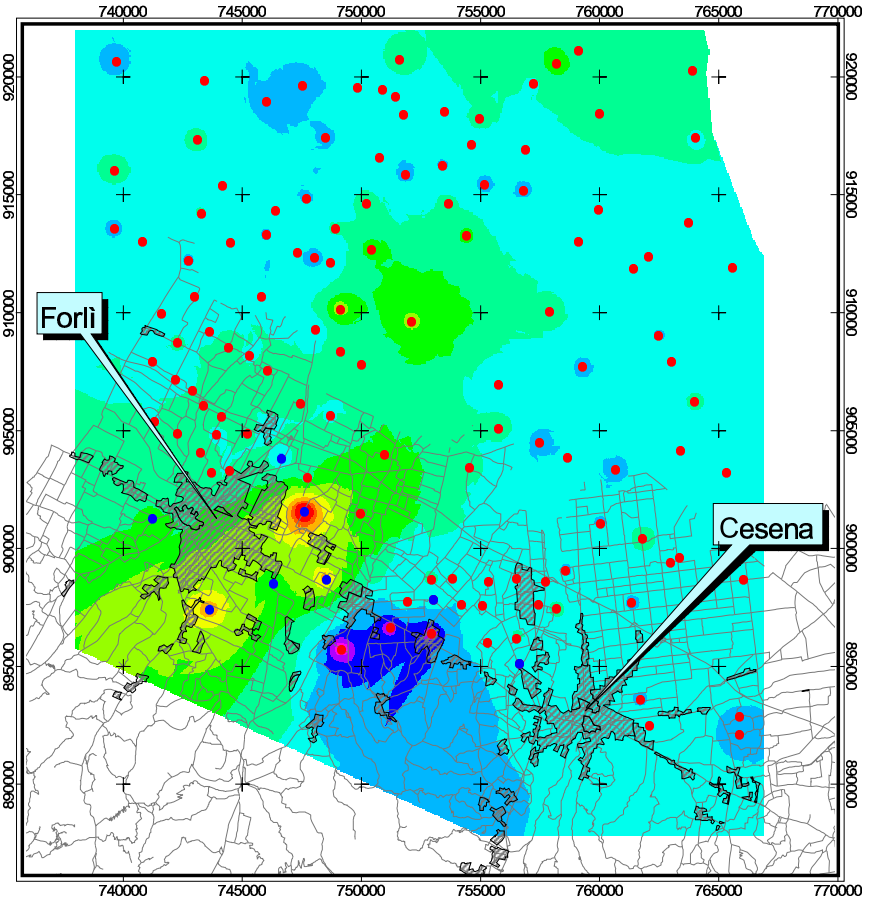
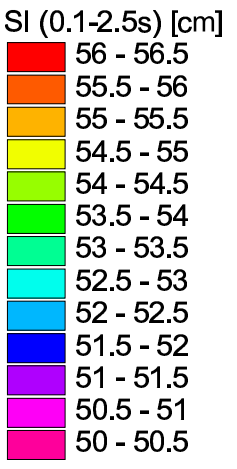


Figura 4.6: Mappa dell'intensità di Housner ricavata da CPT e DHT (integrale dello spettro di risposta in velocità tra 0.1 e 2.5 secondi con *damping* del 5%)

- CPT
- Down-Holes
- Aree Urbane
- Strade

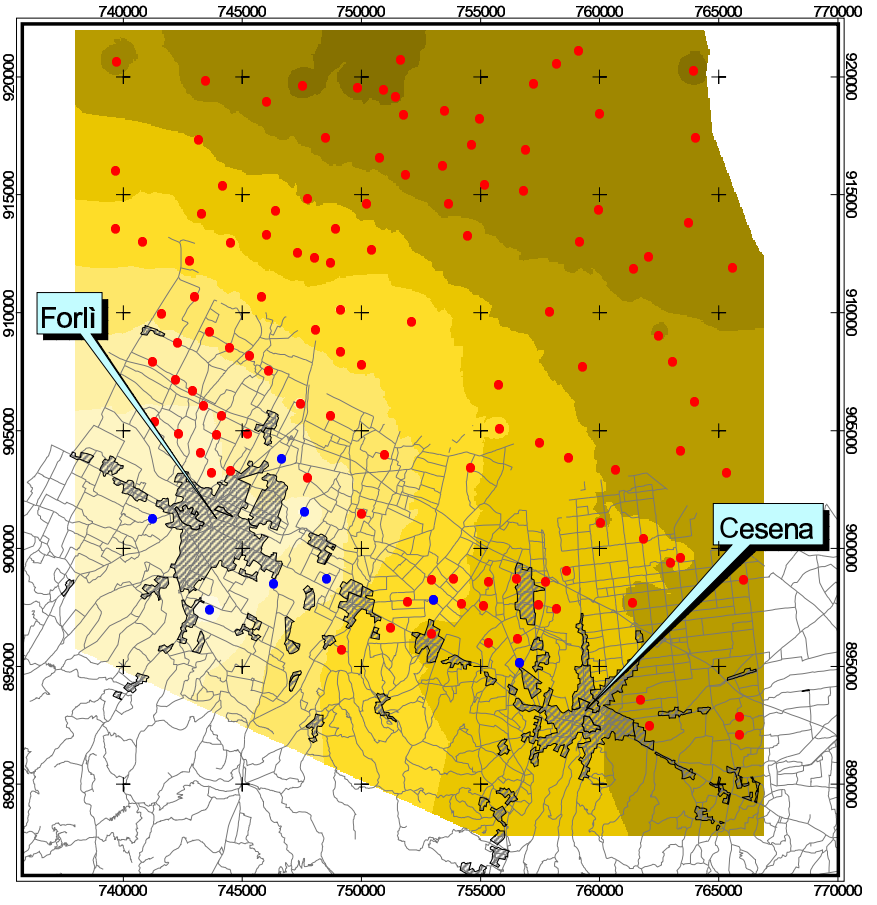
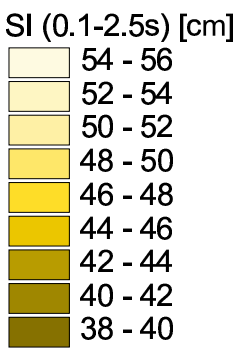


Figura 4.7: Mappa dell'intensità di Housner scalata sulla pericolosità (integrale dello spettro di risposta in velocità tra 0.1 e 2.5 secondi con *damping* del 5%)

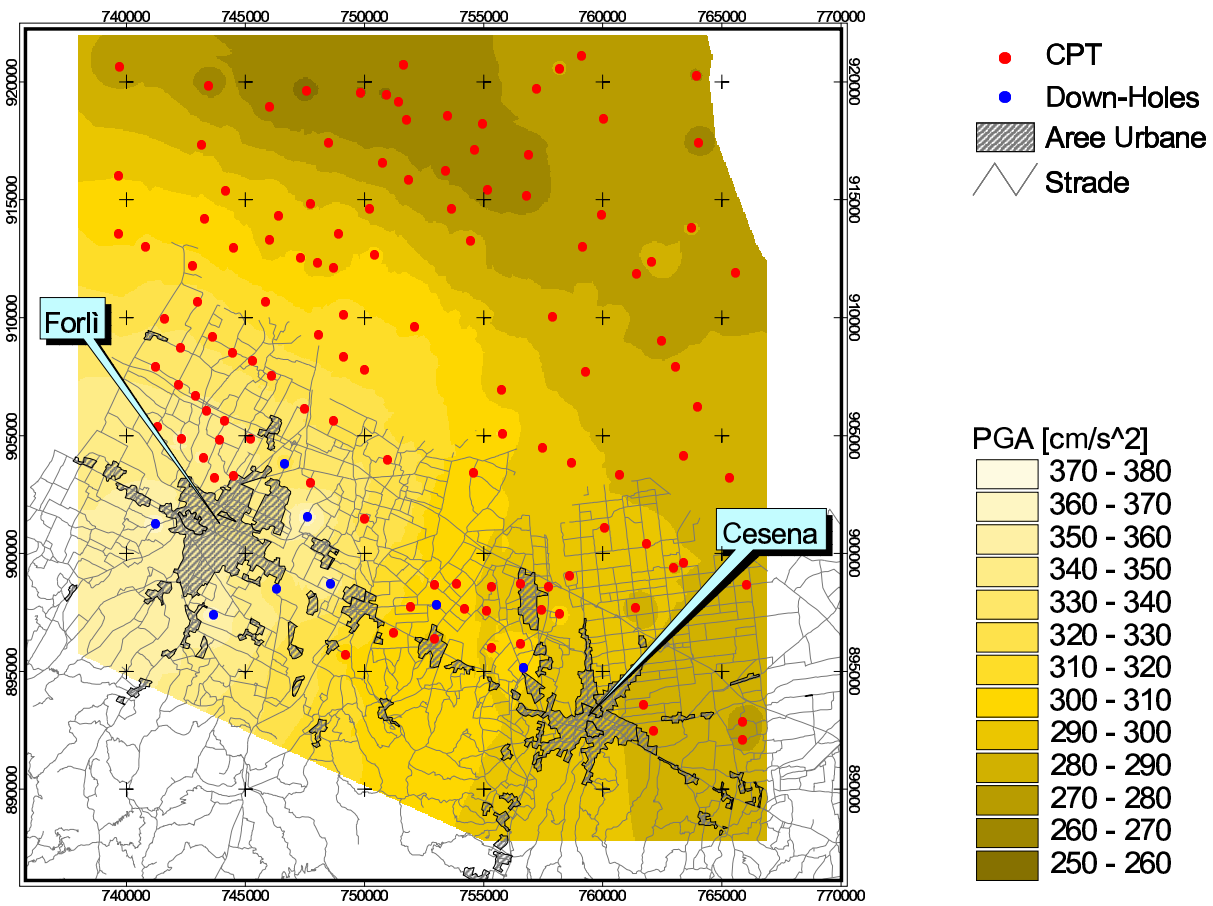


Figura 4.8: Mappa degli effetti di sito in termini di PGA scalata sulla pericolosità

Bibliografia

- Camassi, R. e Stucchi, M. (1997). *NT4.1 un catalogo parametrico di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno*. GNDT Milano.
- Hegazy, Y. A. e Mayne, P. W. (1995). Statistical correlations between V_S and cone penetration test data for different soil types. In *International Symposium on Cone Penetration Testing*, Linköping, Sweden. Swedish Geotechnical Survey. paper No. A87.
- Marcellini, A., Daminelli, R., Franceschina, G. L., e Pagani, M. (1999). Valutazione della pericolosità sismica della Provincia Forlì-Cesena. Technical report, Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico, Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- Marcellini, A., Daminelli, R., Pagani, M., Riva, F., Tento, A., Crespellani, T., Madiari, C., Vannucchi, G., Frassinetti, G., Martelli, L., Palumbo, A., e Viel, G. (1998). Seismic Microzonation of some Municipalities of the Rubicone area (Emilia-Romagna Region). In *Proceedings of the Eleventh European Conference on Earthquake Engineering, Invited Lectures Volume*, pages 339–350. Balkema.
- Mayne, P. W. e Burns, S. E. (1995). Geotechnical Report of Piezocone and Seismic Piezocone Tests at San Manuel, AZ, to Agra Earth & Environmental Inc. Technical report, Georgia Tech.
- Scandone, P., Patacca, E., Meletti, C., Bellatalla, M., Perilli, N., e Santini, U. (1992). Struttura geologica, evoluzione cinematica e schema sismotettonico della penisola italiana. In *Atti del Convegno Annuale del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*, volume 1, pages 119–135.
- Seed, H. B. e Idriss, I. M. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis. Technical Report UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Sun, J. I., Golesorkhi, R., e Seed, H. B. (1988). Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils. Technical Report UCB/EERC-88/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Tento, A., Franceschina, L., e Marcellini, A. (1992). Expected ground motion evaluation for italian sites. In *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, pages 489–494. Balkema.