



PIANO DI RIQUALIFICAZIONE URBANA QUARTIERE ECONOVELLO - CESENA



Comune di Cesena

NOVELLO S.p.a.

Amministratore Unico
Arch. Edoardo Preger

PROGETTO

CAPOGRUPPO

arch. Simona Gabrielli

PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA E URBANISTICA

studio gap associati
Piazza Scuole Pie 10/10
16123 Genova
tel +39 010 2480049
fax +39 010 2481217
p.iva 01323950996

studio GAP associati:
arch. Simona Gabrielli
arch. Maurizio Cazzulo
arch. Marina Bassi
arch. Federica Alcozer
arch. Laura Cosimo

studio CAMERANA&PARTNERS
arch. Benedetto Camerana
arch. Hermann Kohlloffel

arch. Bruno Gabrielli
arch. Pietro Cozzani

SPAZI APERTI E OPERE A VERDE



LAND s.r.l.
arch. Andreas Kipar

LAND s.r.l.
via Hoepli, 3
20121 Milano
tel +39 02 8069111
fax +39 02 80691130

arch. Leonardo Oprandi
arch. Giuseppe Anastasi

CONSULENZE

viabilità:
T.T.A. Studio associato

impianti:
Ing. Marco Taccini

TAV. 32.3

RELAZIONE GEOLOGICA - TECNICA MICROZONIZZAZIONE SISMICA III LIVELLO INTEGRAZIONE RELAZIONE DICEMBRE 2009

CODICE ELABORATO :

· · · · · · · ·

SCALA

ESEGUITO:

DATA

23/12/2011

CONTROLLATO:

REV.

00

APPROVATO:



COMMITTENTE:
SOCIETÀ DI TRASFORMAZIONE URBANA (STU)
NOVELLO
P.ZZA DEL POPOLO, 1
CESENA

INDAGINE GEOLOGICO-TECNICA MICROZONAZIONE SISMICA III LIVELLO - DAL 112/2007 (Integrazione relazione dicembre 2009)



OGGETTO:
Programma di riqualificazione urbana "Novello"

LOCALITÀ:
Area Ex Mercato Ortofrutticolo
Via Madonna dello Schioppo – Piazzale Carl Marx
CESENA (FC)

Cesena, maggio 2011

Geologo
Dott. Alessandro Biondi



INDICE

| | |
|---|----|
| 1. PREMESSA..... | 3 |
| 2. INDAGINI SISMICHE HVSR | 3 |
| 2.1. SORGENTE DEL RUMORE..... | 3 |
| 2.2. DEFINIZIONI - TECNICA IMPIEGATA | 4 |
| 2.3. PROCEDURA DI ANALISI DATI..... | 6 |
| 2.4. INDAGINE DI SISMICA PASSIVA (HVSR) | 7 |
| 3. ANALISI DI III LIVELLO | 12 |
| 3.1. AREA EX MERCATO - COMPARTO 1 NOVELLO | 16 |
| 3.2. AREA P.LE ALDO MORO - COMPARTO 5 NOVELLO | 36 |
| 4. CONCLUSIONI..... | 55 |



1. PREMESSA

Il presente documento costituisce elaborato tecnico di integrazione alla precedente relazione geologico-tecnica, predisposta dallo scrivente in data dicembre 2019 pari oggetto, ai fini della caratterizzazione geologica, idrogeologica, sismica e geotecnica delle aree ricomprese nel Piano di Riqualficazione Urbana "Novello".

In particolare sono qui sviluppate le analisi di microzonazione sismica di III livello, secondo quanto disposto dalla Delibera dell'Assemblea Legislativa della RER 112/2007 "Approvazione dell'Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1, della L.R. 20/2000 in merito a Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica". L'opportunità/necessità di procedere ai suddetti approfondimenti di microzonazione sismica deriva dalle indicazioni avanzate dal Settore Pianificazione Territoriale dell'Amministrazione provinciale di Forlì-Cesena, in qualità di soggetto competente ai fini dell'espressione del parere ai sensi dell'art. 5 della Legge Regionale 30 ottobre 2008, n. 19 "Norme per la riduzione del rischio sismico" sul PRU "Novello", nel corso della procedura di Accordo di Programma ai sensi dell'art. 40 della L.R. 20/2000, al quale è assoggettata l'approvazione del richiamato piano di riqualficazione urbana.

2. Indagini sismiche HVSR

2.1. Sorgente del rumore

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche microtremore in quanto riguarda oscillazioni molto piccole (10–15 [m/s² in termini di accelerazione), molto più piccole di quelle indotte dai terremoti nel campo vicino (*near field*).

I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva. Nelle zone in cui non è presente alcuna sorgente di rumore locale, in assenza di vento, lo spettro in frequenza del rumore di fondo, presenta l'andamento illustrato nella figura sottostante dove la curva bassa rappresenta il rumore di fondo 'minimo' di riferimento secondo il servizio geologico statunitense (USGS) mentre la curva superiore rappresenta il 'massimo' di tale rumore, e dove i picchi a 0.14 e 0.07 Hz sono comunemente interpretati come originati dalle onde oceaniche. Tali componenti spettrali vengono attenuate molto poco anche dopo tragitti di migliaia di chilometri per effetto di guida d'onda.



A tale andamento generale, che è sempre presente, si sovrappongono le sorgenti locali, antropiche (traffico, industrie o anche il semplice passeggiare di una persona) e naturali che però si attenuano fortemente a frequenze superiori a 20 Hz, a causa dell'assorbimento anelastico originato dall'attrito interno delle rocce.

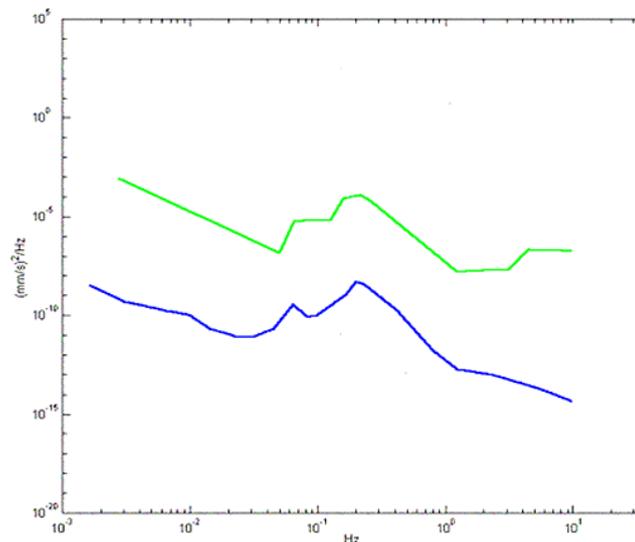


Figura 1 - Spettro del rumore sismico (in termini di velocità componente verticale del moto) minimo e massimo secondo i modelli standard del Servizio geologico USA (USGS)

Nel tragitto dalla sorgente s al sito x le onde elastiche (sia di terremoto che di microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che, se da un lato l'informazione relativa alla sorgente viene persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica di "ray tracing", è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni relative al percorso del segnale ed in particolare relative alla struttura locale vicino al sensore. Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartata dalla sismologia classica, contiene informazione. Questa informazione è però "sepolta" all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune. Una di queste è la tecnica dei rapporti spettrali o, semplicemente, HVSR.

2.2. Definizioni - Tecnica impiegata

Il tipo di stratigrafia che le tecniche di sismica passiva possono restituire si basa sul concetto di contrasto di impedenza. Per strato si intende un'unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto di impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso. Dai primi studi di Kanai (1957), in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo a partire



dagli spettri del rumore sismico registrati in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso, è la tecnica dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (HVSr) applicata da Nogoshi e Igarashi (1970). Il metodo fu in seguito reso popolare principalmente da Nakamura (1989) come strumento per la determinazione dell'amplificazione sismica locale. Mentre su questo punto non è ancora stato raggiunto consenso, è invece ampiamente riconosciuto che l'HVSr è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali di risonanza dei sottosuoli. Riconosciuta questa capacità e dato che, se è disponibile una stima delle velocità delle onde elastiche, le frequenze di risonanza possono essere convertite in stratigrafia consentendo attraverso il metodo HVSr la ricostruzione monodimensionale del profilo stratigrafico (1-D).

La tecnica dei rapporti spettrali H/V consiste nel calcolo del rapporto degli spettri di Fourier del rumore nel piano orizzontale H (generalmente lo spettro H viene calcolato come media degli spettri di Fourier delle componenti orizzontali NS ed EW) e della componente verticale V. Il metodo è applicabile alle misure di rumore registrate in una singola stazione posta su sedimenti. Il metodo è stato introdotto da scienziati giapponesi agli inizi degli anni '70, tra i quali Nogoshi e Igarashi (1971) e Shiono et al. (1979), che indagarono sul significato fisico del rapporto H/V e mostrarono la sua relazione diretta con la curva di ellitticità delle onde di Rayleigh. Essi conclusero che il picco massimo di ampiezza si verifica alla frequenza di risonanza fondamentale della copertura di terreni. Nel 1989, Nakamura propose il rapporto H/V come stima affidabile della funzione di trasferimento delle onde S per un dato sito. Le argomentazioni usate da Nakamura sono estremamente qualitative e si basano sull'ipotesi che i microtremiti siano originati da sorgenti molto locali, come il traffico vicino al sismometro, e siano onde di Rayleigh che si propagano in un solo strato su un semispazio. Tale tecnica, ampiamente utilizzata da anni nel settore sismologico, di recente viene sempre più impiegata in campo geotecnico/ingegneristico.

Considerando un sistema in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità (ρ_1 e ρ_2) e le diverse velocità delle onde sismiche (V_1 e V_2), un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene (parzialmente) riflessa dall'orizzonte che separa i due strati. L'onda così riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente (λ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore h del primo strato. In altre parole la frequenza fondamentale di risonanza (f_r) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a:

$$f_r = V_{P1}/(4 h) \quad [1]$$

analogamente quella relativa alle onde S è

$$f_r = V_{S1}/(4 h) \quad [2]$$

Teoricamente questo effetto è sommabile cosicché la curva HVSr mostra come massimi relativi le frequenze di risonanza dei vari strati. Questo, insieme ad una stima delle velocità,



è in grado di fornire previsioni sullo spessore h degli strati. Questa informazione è per lo più contenuta nella componente verticale del moto ma la prassi di usare il rapporto tra gli spettri orizzontali e quello verticale, piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce un'importante normalizzazione del segnale per il contenuto in frequenza, la risposta strumentale e l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto. La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della popolarità del metodo. Si rileva inoltre come i microtremori siano solo in parte costituiti da onde di volume, P o S, e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolare da onde di Rayleigh (Lachet e Bard, 1994).

Tuttavia ci si può ricondurre alla risonanza delle onde di volume poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poiché la velocità dell'onda di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde S. L'applicabilità pratica della semplice formula [2] è stata già dimostrata in molti studi sia nell'ambito della prospezione geofisica che nell'ambito ingegneristico (Gallipoli et al., 2000; Mucciarelli e Gallipoli, 2001; Castellaro et al., 2005). Poiché la situazione illustrata è tipica delle coltri sedimentarie sovrastanti substrati litoidi, il metodo HVSR è parso immediatamente applicabile alla determinazione dello spessore delle coltri sedimentarie (si veda Ibs-Von Seht e Wohlenberg, 1999).

2.3. Procedura di analisi dati

Dalle registrazioni del rumore sismico sono state ricavate e analizzate due serie di dati:

1. le curve HVSR, ottenute col software Grilla in dotazione a TROMINO, secondo la procedura descritta in Castellaro et al. (2005), con parametri:
 - larghezza delle finestre d'analisi 20 secondi;
 - lisciamento secondo finestra triangolare con ampiezza pari al 10% della frequenza centrale;
 - rimozione delle finestre con rapporto STA/LTA (media a breve termine/media a lungo termine) superiore a 2;
 - rimozione manuale di eventuali transienti ancora presenti.
2. le curve dello spettro di velocità delle tre componenti del moto (ottenute dopo analisi con gli stessi parametri del punto 1).

Non essendo disponibile la misura di V_s come profilo sismico fino al bedrock geofisico le profondità h delle discontinuità sismiche sono state ricavate tramite la formula [3] in cui V_0 è la velocità al tetto dello strato, a un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione ecc.) e v la frequenza fondamentale di risonanza (Ibs-Von Seht e Wohlenberg, 1999).



$$h = \left[\frac{V_0(1-a)}{4V_1} + 1 \right]^{1/(1-a)} - 1 \quad [3]$$

Infatti, poiché l'andamento del log in Vs in terreni sedimentari è principalmente regolato dall'incremento del modulo di rigidezza al crescere della pressione di confinamento e quindi della profondità, a partire dai valori di Vs della porzione più superficiale del terreno, è stato possibile estrapolare l'andamento delle Vs a profondità più elevate tramite l'impiego delle relazioni empiriche.

3. si è proceduto all'inversione delle curve HVSR creando una serie di modelli teorici da confrontare con quello sperimentale fino a considerare ottimale il modello teorico più prossimo alle curve sperimentali. Per l'inversione delle curve si è fatto riferimento alle procedure descritte in Arai e Takimatsu (2004) usando il modo fondamentale delle onde di Rayleigh e Love.

2.4. Indagine di sismica passiva (HVSR)

Si ritenuto funzionale allo sviluppo dell'analisi di microzonazione sismica di III livello integrare il corredo delle indagini precedentemente effettuate sull'area (vedi relazione dicembre 2009) attraverso l'esecuzione di due analisi sismiche HVSR (TRO1 e TRO3) in corrispondenza dei siti di prevista realizzazione di due edifici di significativa rilevanza strutturale (torri), oltreché per destinazione (terziario/direzionale), una delle quali prevista al bordo nord-occidentale del Comparto 1 e la seconda sul Comparto 5 in corrispondenza dell'attuale parcheggio di P.le Aldo Moro (zona Stazione FF.SS.). Una terza analisi sismica HVSR (TRO2) è stata invece effettuata al bordo nord-orientale del piano Novello, in area sulla quale il progetto prevede la realizzazione di un complesso residenziale (area ex Coop. Agrintesa - Comparto 3), allo scopo di fornire una caratterizzazione per quanto possibile completa ed uniforme dell'intera superficie interessata dallo sviluppo del piano Novello.

Nella planimetria allegata al presente elaborato sono puntualmente individuati le stazioni delle misure sismiche.

Nei punti di rilievo definiti TRO1, TRO2, TRO3 sono state effettuate misure del microtremore ambientale della durata di 20 minuti con un tromografo digitale progettato specificamente per l'acquisizione del rumore sismico. Lo strumento TROMINO[®] è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente. I dati di rumore, amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti, sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 12 Hz. Dopo le operazioni di elaborazione mediante software dedicato *Grilla*, che limita la modellazione delle curve H/V al solo modo fondamentale, si sono ottenuti i diagrammi H/V e le curve di spettro riportate per esteso sempre in allegato al presente elaborato.



La ricerca dei picchi da interpretare è stata effettuata, congiuntamente, nel grafico H/V e in quello degli spettri singoli. In particolare i picchi H/V di origine stratigrafica sono quelli generati da un minimo nelle componenti verticali del moto – curve magenta negli spettri – che significa minimo delle onde di Rayleigh alla frequenza di risonanza. Oltre a questo può esistere un massimo nelle componenti orizzontali del modo.

Allo scopo di creare un modello sismico dei siti per i quali è stata svolta l'analisi di III livello è stata eseguita l'inversione delle curve H/V mirando a far corrispondere le frequenze dei picchi principali e la forma generale della curva (tecnica del "best fit"). Nell'inversione sono state seguite le procedure descritte in Arai e Tokimatsu (2004), usando il solo modo fondamentale delle onde di Rayleigh e Love.

Negli elaborati di calcolo sviluppati dal software *Grilla*, in appendice, sono riportati i parametri utilizzati nel modello, e nelle figure il confronto tra la curva H/V teorica e sperimentale e gli spettri delle singole componenti ed il modello sismico del sottosuolo. Le Frequenze > di 30 Hz in genere non vengono considerate perché interessano la porzione più superficiale del terreno (profondità < di 0,50 m. dal p.c.).

La figura sottostante riporta in forma comparata le tre distinte curve H/V (TRO1 – TRO2- TRO3) ottenute sulle tre verticali d'indagine mentre i tre successivi grafici, oltre alle curve medie H/V relative ad ogni singolo sito (linea rossa), riportano la deviazione dei dati rispetto alla media, qui rappresentate per l'intervallo di confidenza del 95%.

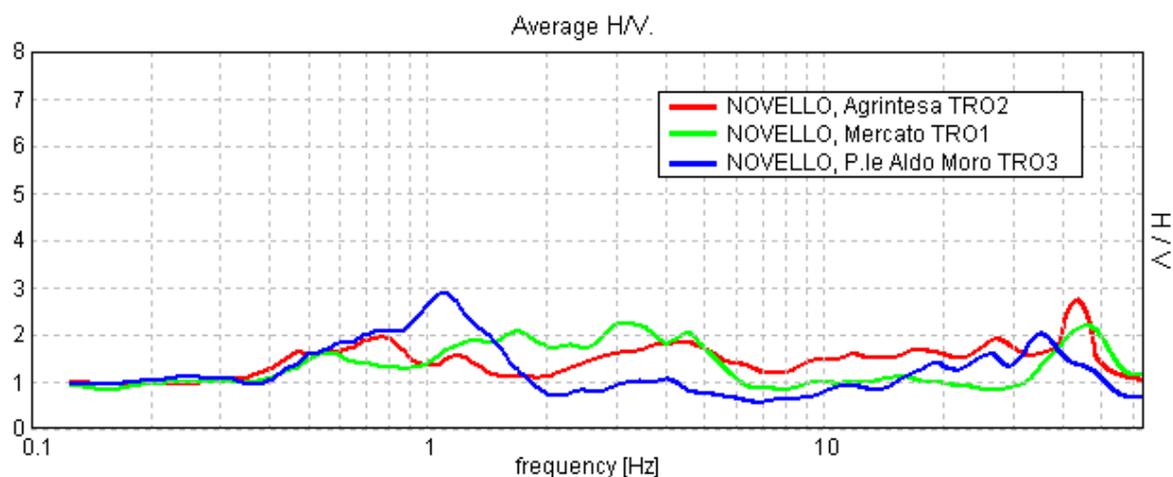


Figura 2 - Curva H/V comparata TRO1 – TRO2 – TRO3

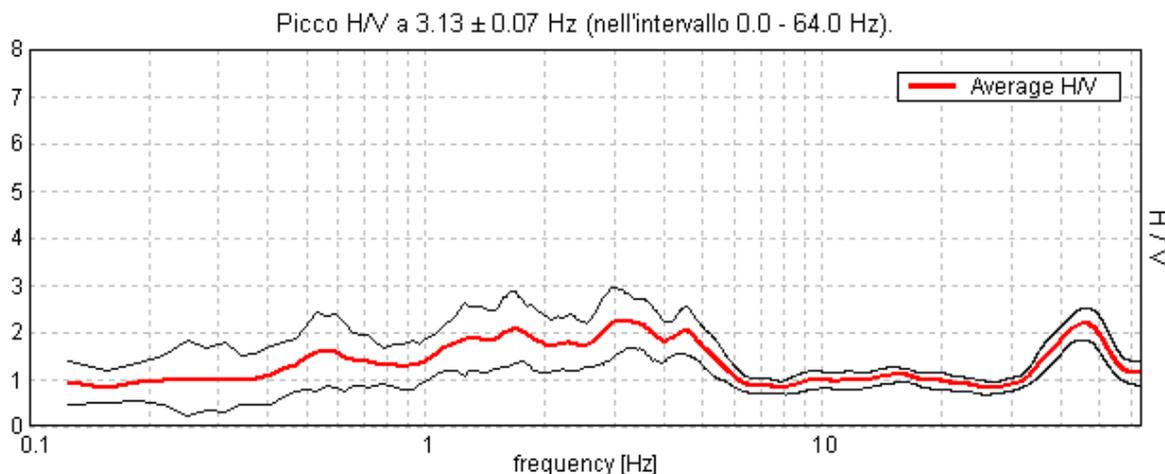


Figura 3 - Curva H/V prova microtremori TRO1

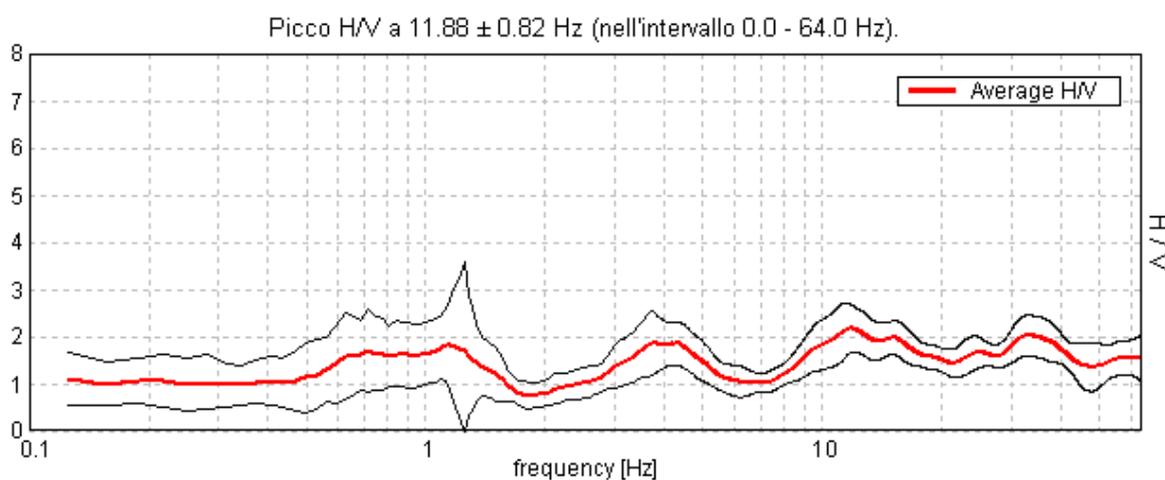


Figura 4 - Curva H/V prova microtremori TRO2

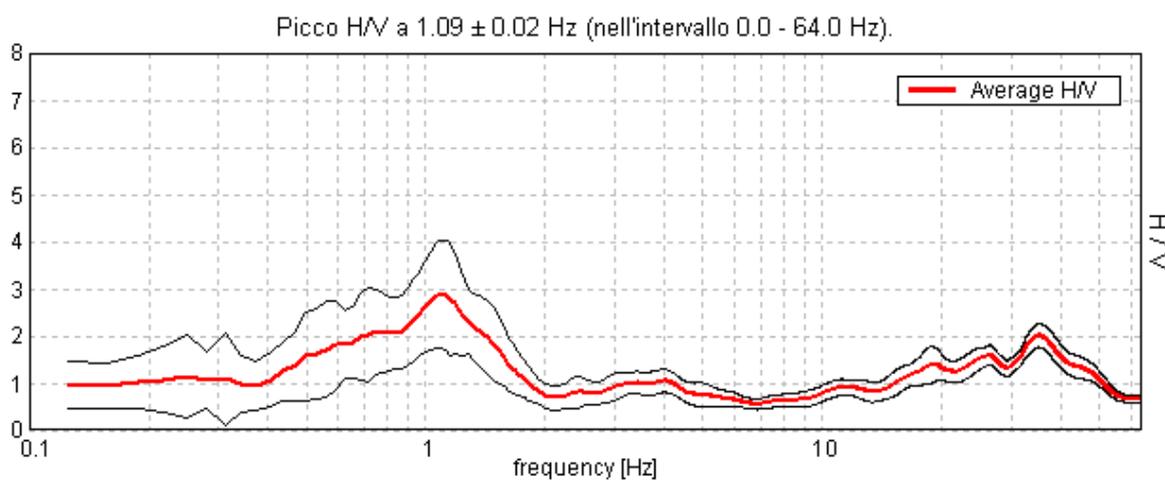


Figura 5 - Curva H/V prova microtremori TRO3

L'esame degli elaborati porta ad evidenziare quanto segue:



TRO1 – Area ex Mercato Ortofrutticolo – Comparto 1: il picco H/V massimo, rilevato nell'intervallo di frequenze considerato, è pari a 3.14 ± 0.07 Hz e corrisponde, anche secondo le stratigrafie disponibili, alla comparsa del primo livello ghiaioso di significativa potenza. Seguono a questo primo picco una serie di picchi di minore intensità in direzione delle frequenze più basse, primo tra tutti quello a 1.69 ± 0.03 Hz, associabili alla presenza nella serie stratigrafica verso profondità maggiori di ulteriori ed importanti strati ad elevata impedenza sismica (ghiaie). Il secondo picco per intensità si riscontra ad una frequenza superiore ai 30 Hz (45.94 ± 0.27 Hz), irrilevante ai fini ingegneristici, attribuibile alla presenza di strati rigidi superficiali (pavimentazioni, livelli antropici sub-superficiali?). Ai primi massimi in ampiezza del rapporto H/V rilevati a 1.69 e 3.14 Hz corrisponde una intensità spettrale di poco superiore a 2 che può ritenersi in prima approssimazione coincidente al modulo del Fattore di amplificazione (F_a). Tali frequenze potrebbero generare particolari effetti di co-risonanza per usuali edifici residenziali in c.a. indicativamente di tipologia a 3 – 6 piani.

TRO2 – Area ex Coop. Agrintesa – Comparto 3: il profilo è caratterizzato da una serie di picchi H/V di intensità circa costante ($H/V \approx 2$) distribuiti con una certa ripetitività lungo l'asse delle frequenze nell'intervallo compreso tra 1 fino ad oltre 30 Hz senza una netta prevalenza in ampiezza di uno di questi ad una determinata frequenza. Il picco massimo è registrato a 11.88 ± 0.82 Hz a cui seguono nell'ordine per intensità un secondo picco a 29.97 ± 0.58 Hz un terzo a 3.75 ± 0.14 Hz ed infine un quarto a 1.13 ± 0.02 Hz. Il terzo e quarto picco sono identificabili all'incirca nei medesimi range di frequenze anche nelle prove TRO1 e TRO3 ad evidenziare una costante nella stratigrafia dell'area. I terreni in oggetto, nel punto di prova, saranno soggetti ad amplificazioni dovute alle sopra riportate frequenze di risonanza del terreno in caso di sisma. Le frequenze che potrebbero provocare particolari problemi "accoppiamenti di risonanza" fra opere e/o strutture e terreno sono individuabili a 11.82 e 3.75 Hz, in caso di edifici contenuti in altezza (1 ÷ 3 piani), e 1.13 Hz in caso di edifici di maggiore elevazione (ca. 10 piani).

TRO3 – Area P.le Aldo Moro – Comparto 5: un netto picco massimo si differenzia nell'intervallo di frequenze considerato a 1.09 ± 0.02 Hz al quale corrisponde una intensità H/V pari a 3. Una seconda serie di picchi, seppure di minore intensità ($H/V 1.5 \div 2$) si rilevano alle basse frequenze oltre i 15 Hz il cui massimo viene espresso dal picco a 35 ± 0.45 Hz a seguire da 24.97 ± 0.22 . Questi ultimi due picchi risultano non significativi ai fini di un possibile effetto di co-risonanza tra opere e/o strutture e terreno mentre assume una certa rilevanza, anche per l'intensità che lo caratterizza, il picco a 1.09 Hz da cui potrebbero derivare possibili interferenze ("accoppiamenti di risonanza") in caso di strutture in



elevazione attestate intorno ai dieci piani di altezza. Si evidenzia infine la presenza nella curva di un picco secondario a 4 ± 0.05 Hz. Tale picco seppure di limitata ampiezza del rapporto H/V trova una possibile correlazione stratigrafica con il picco principale della prova TRO1 posizionato a 3.14 Hz. Entrambi i due picchi rilevano la presenza nella serie stratigrafica del tetto dei termini grossolani (ghiaie) che, nel caso della prova posta più ad ovest (TRO1), prossima all'alveo del Savio, assumono una maggiore competenza e contrasto sismico diversamente da quelli posti sulla verticale di prova TRO3 i quali determinano un ridotto contrasto come evidente dalla limitata ampiezza del rapporto H/V.

| Verticali HVSR | Picchi H/V (Hz) ordinati per intensità | | | |
|-------------------|---|------------------|------------------|-----------------|
| | I | II | III | IV |
| TRO1 | 3.14 ± 0.07 | 1.69 ± 0.03 | 4.5 ± 0.03 | 0.59 ± 0.01 |
| TRO2 | 11.88 ± 0.82 | 29.97 ± 0.58 | 3.75 ± 0.14 | 1.13 ± 0.02 |
| TRO3 | 1.09 ± 0.02 | 24.97 ± 0.22 | 19.28 ± 0.07 | 4.0 ± 0.05 |

Tab. 6 - Schema riassuntivo dei rapporti massimi H/V dei siti di prova NOVELLO rilevanti per possibili effetti di doppia risonanza terreno/strutture



3. ANALISI DI III LIVELLO

Come già riferito in premessa, ovvero alla necessità di approfondire il fenomeno dell'amplificazione sismica locale agli effetti di un possibile sisma rispetto le opere di maggiore rilevanza strutturale/funzionale previste dal PRU "Novello", ad integrazione a quanto già sviluppato nella precedente Indagine geologico-tecnica del dicembre 2009, si è proceduto all'effettuazione di una analisi di III livello secondo i criteri metodologici fissati dalla DAL 112/2007. In particolare le due aree esaminate corrispondono alle superfici che il progetto PRU "Novello" destina alla realizzazione di due strutture a funzione direzionale/terziario ad elevato sviluppo verticale (torri), la prima delle quali individuata al bordo nord-occidentale del "Comparto 1" mentre la seconda posizionata all'interno del "Comparto 5" su sedime corrispondente oggi al parcheggio a raso sito in P.zza Aldo Moro, a sud della linea ferroviaria. Su queste due aree sono state eseguite rispettivamente le indagini dei microtremori (HVSr) denominate TRO1 e TRO3.

Le suddette indagini sismiche, sviluppate secondo la tecnica Nakamura, hanno innanzitutto consentito l'acquisizione delle frequenze caratteristiche di risonanza dei suoli interessati dalle citate opere (*vedi paragrafo precedente*). Considerato inoltre lo specifico assetto litostratigrafico dell'area ove si interviene, tipica della facies sedimentaria di conoide e formata da un'alternanza di depositi fini e medio-fini alternati a livelli grossolani, spessi anche alcune decine di metri, di ghiaie miste a sabbie, è stata applicata in corrispondenza delle prove TRO1 e TRO3 la tecnica dell'inversione delle curve HVSr ricostruendo un plausibile modello teorico del sottosuolo aderente alle curve sperimentali. Ovviamente la ricostruzione dei sismostrati, e quindi del profilo del sottosuolo, è vincolato alle conoscenze stratigrafiche dell'area che, per gli strati più superficiali, è basato sulla caratterizzazione litotecnica del primo sottosuolo così come derivato dalle prove in sito (CPT) realizzate sul PRU Novello e dall'ampia mole di dati di archivio che comprendono, tra l'altro, anche i rapporti di laboratorio dei campioni di terreno prelevati dai sondaggi effettuati sull'area (*vedi Allegati B e C - Relazione 2009*). Per la ricostruzione del profilo litostratigrafico profondo ci si è invece avvalsi dei dati del sottosuolo derivati dalle sezioni profonde n. 83 e 84, edite dal Servizio Geologico e Sismico della RER (*vedi Tavola 4 e Tavola 5 Allegato A - Relazione 2009*). Infine, seppure considerate in questa fase analitica, minore significatività è stata attribuita alle pregresse indagini sismiche tipo MASW svolte sull'area (MASW 1 - MASW3). Ciò in ragione della limitata profondità di risoluzione cui è affetta tale metodologia specie in rapporto alla locale stratigrafia che, come anzidetto, si caratterizza da potenti livelli di ghiaie ad elevata impedenza sismica intercalate nella serie a partire da circa 20 metri di profondità e costituenti di fatto un significativo orizzonte riflettente.

Per procedere alla determinazione della risposta sismica locale secondo la metodologia definita dal cosiddetto III livello di cui alla DAL 112/2007 è stato assunto un modello di



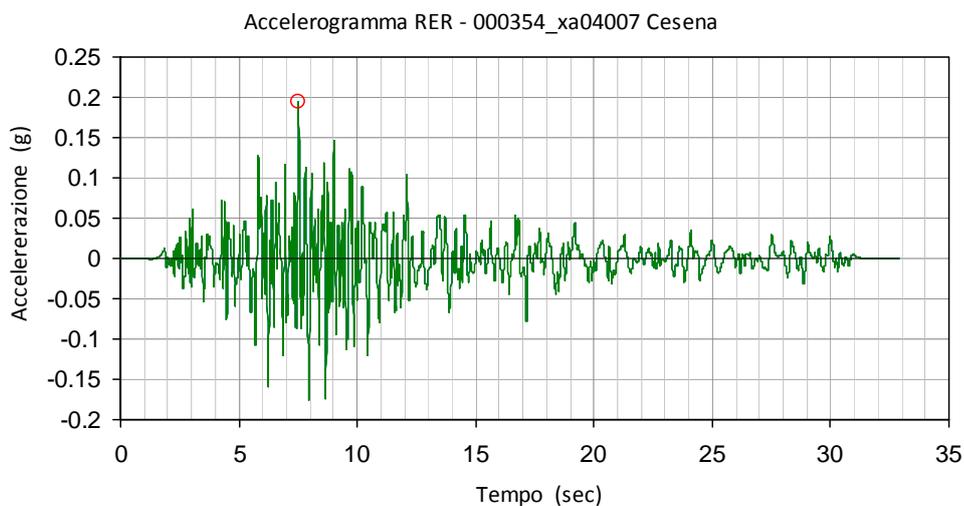
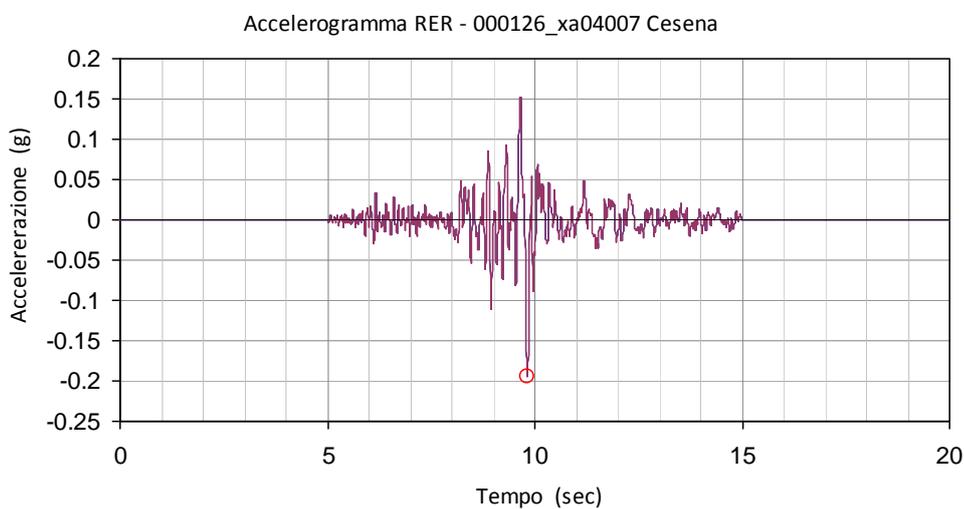
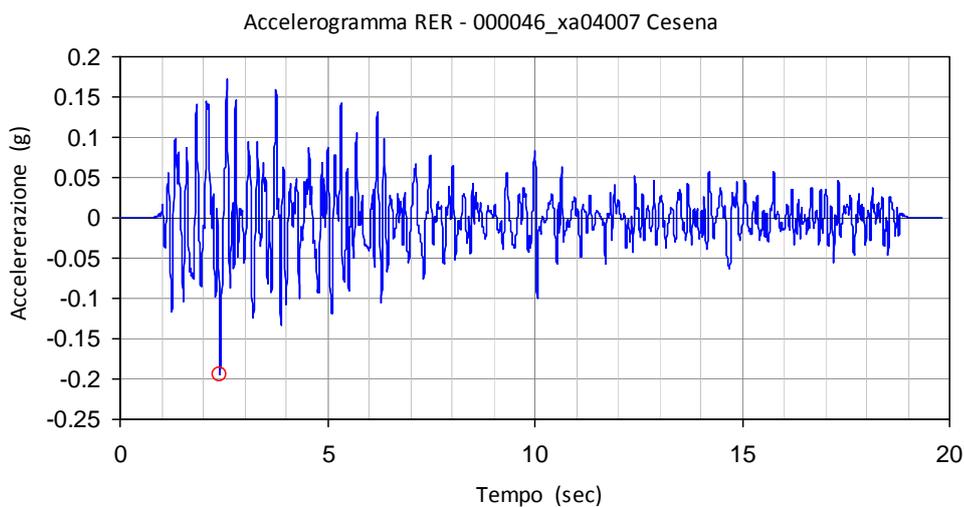
rappresentazione del sottosuolo a strati continui: in questo caso il terreno è schematizzabile come un mezzo continuo multistrato in cui ogni strato è assunto omogeneo ed a comportamento visco-elastico lineare.

Il software utilizzato per la verifica dell'amplificazione sismica locale è PROSHAKE, sviluppato dalla Edupro Civil System Inc. di Washington (USA), con le seguenti assunzioni geometriche dell'analisi – modello monodimensionale 1D –:

- stratificazione delle unità litologiche e superficie del substrato sismico orizzontale;
- volume di terreno considerato sufficientemente distale dai fianchi di unità la cui pendenza deve risultare modesta in modo da rendere ininfluenti gli effetti di bordo;
- dimensioni orizzontali delle unità elevate rispetto lo spessore.

Quale riferimento di input del segnale sismico sono stati utilizzati i tre segnali assegnati ad ogni comune della RER e disponibili nel database della stessa regione all'indirizzo www.regione.emilia-romagna.it/geologia/sismica. Questi segnali, rappresentativi dello scuotimento atteso su un suolo di riferimento, inteso quest'ultimo come la superficie al di sotto della quale si può assumere una velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) superiore o uguale a 800 m/s, sono selezionati dalla banca dati accelerometrica "European Strong Motion database- ISESD" e sono riprodotti attraverso una procedura che valuta la similarità tra una forma spettrale di riferimento (*nel nostro caso questa forma spettrale corrisponde alla forma dello spettro di risposta isoprobabile con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni*) e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nella banca dati ISESD. Si tratta di sismi che possono verificarsi nel territorio del Comune di Cesena. Questi tre segnali sono "scalati" rispetto al comune a cui si riferiscono, e sono rappresentati da tre differenti accelerogrammi di progetto:

- 1) impulsivo-000046xa_040007Cesena.xy-durata 19.81 sec picco accelerazione -0.195 g;
- 2) con ampio contenuto in frequenze - 000126xa_040007Cesena.xy - durata 19.81 sec picco accelerazione - 0.195 g;
- 3) con componente predominante alle alte frequenze - 000354xa_040007Cesena.xy - durata 32.82 sec picco accelerazione 0.195 g.





Assegnati gli input sismici si è proceduto alla ricostruzione della colonna di sottosuolo di riferimento, rappresentata da strati (*layer*) a differente tessitura e da diversi valori delle onde di taglio S (V_s). Come anzidetto la stratigrafia utilizzata deriva per i primi 30 ÷ 50 metri da prove, sia dirette che indirette, quali sondaggi, prove penetrometriche disponibili sull'area mentre, per ciò che concerne l'intervallo più profondo, la conoscenza della stratigrafia è stata desunta dai sondaggi profondi dell'archivio della banca dati regionale le cui sintesi in forma cartografica è rappresentata nelle Tavv. 4, 5, 7. I parametri geomeccanici occorrenti per la definizione delle curve caratteristiche di decadimento dei Moduli di taglio normalizzati (G/G_0) e del rapporto di smorzamento ($D\%$) sono definiti per i livelli più superficiali attraverso correlazioni empiriche derivate dalle prove penetrometriche in sito, ovvero direttamente dai dati disponibili di laboratorio ai quali sono stati sottoposti i campioni di terreno prelevati dai svariati sondaggi disponibili sull'area con riguardo specifico alle prove ed ai campioni prossimali alla verticale di analisi.

Nei due successivi paragrafi vengono sviluppate le analisi di III livello per i due siti sopra precisati.



3.1. Area ex Mercato - Comparto 1 NOVELLO

Partendo dallo spettro H/V del rilievo dei microtremori della prova TRO1 è stata ricostruita la curva sintetica alla quale corrisponde la sequenza dei sismostrati riportata nella successiva tabella.

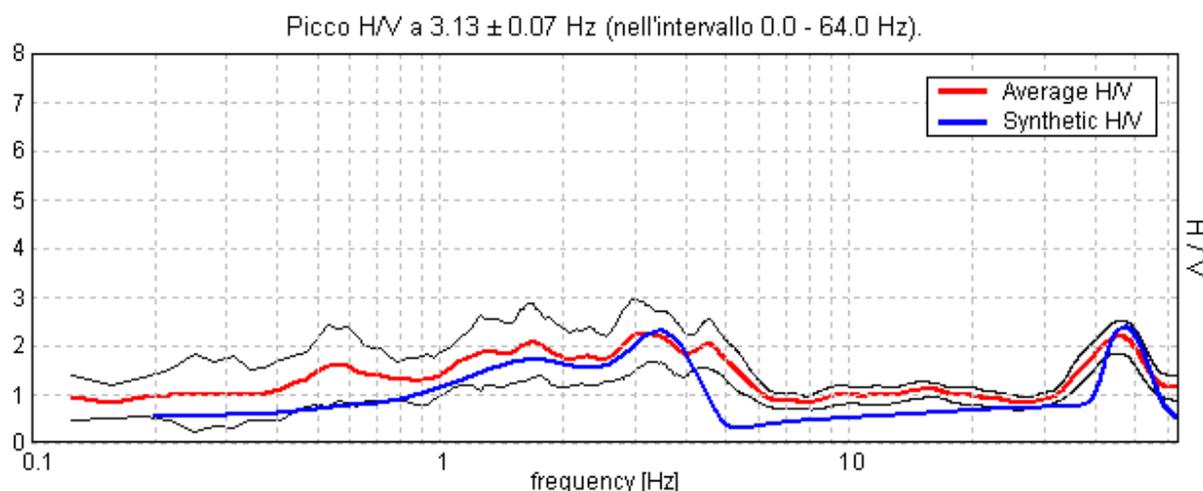


Figura 7 -H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO prova HVSR TRO1

| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] | Rapporto di Poisson |
|---------------------------------------|--------------|----------|---------------------|
| 0.90 | 0.90 | 150 | 0.35 |
| 2.80 | 1.90 | 290 | 0.35 |
| 6.80 | 4.00 | 210 | 0.35 |
| 10.80 | 4.00 | 220 | 0.35 |
| 14.80 | 4.00 | 230 | 0.35 |
| 19.80 | 5.00 | 270 | 0.35 |
| 39.80 | 20.00 | 600 | 0.35 |
| 44.80 | 5.00 | 400 | 0.35 |
| 59.80 | 15.00 | 550 | 0.35 |
| 65.80 | 6.00 | 400 | 0.35 |
| 75.80 | 10.00 | 600 | 0.35 |
| 85.80 | 10.00 | 625 | 0.35 |
| 95.80 | 10.00 | 750 | 0.35 |
| inf. | inf. | 800 | 0.35 |

La successione dei sismostrati sopra definita risulta congruente all'effettiva alternanza sedimentaria che qualifica l'area in esame nella quale il minore grado di verosimiglianza corrisponde, evidentemente, ai livelli stratigrafici non direttamente verificati attraverso le stratigrafie delle prove disponibili in sito bensì attraverso le sole indagini sismiche.

I dati in ingresso di PROSHAKE relativi al profilo del terreno di studio sono riassunti nella tabella seguente nella quale sono altresì riportati i caratteri litologici dei suoli utili a definire i



significativi parametri dei Moduli di taglio normalizzati (G/G_0) e del rapporto di smorzamento ($D\%$).

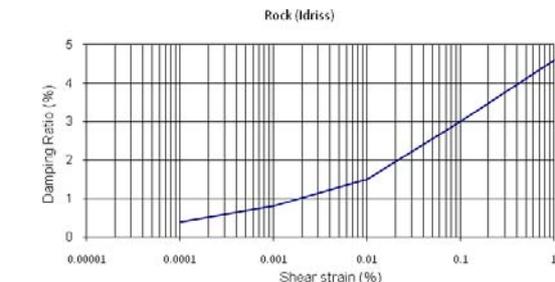
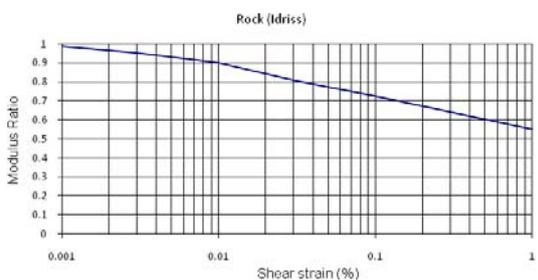
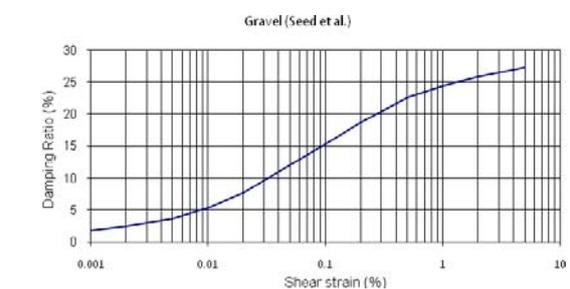
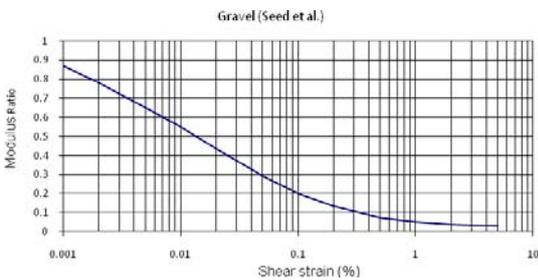
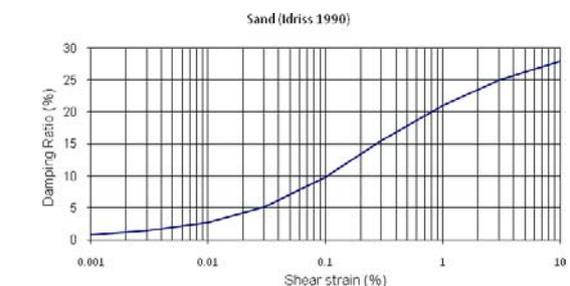
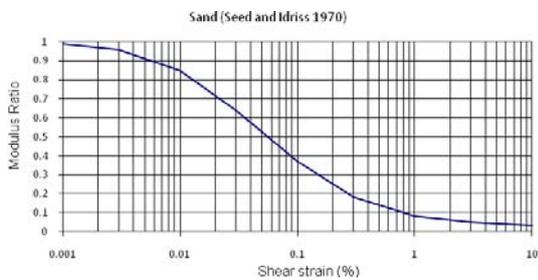
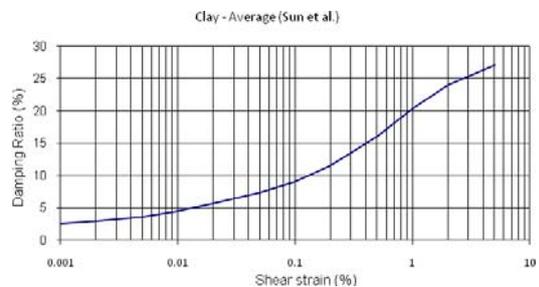
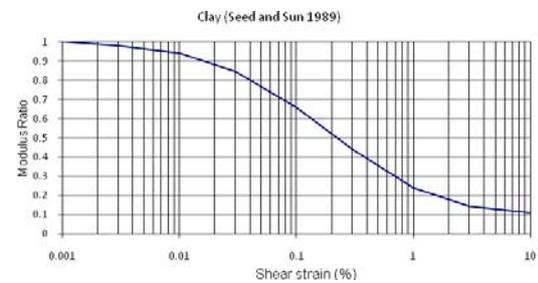
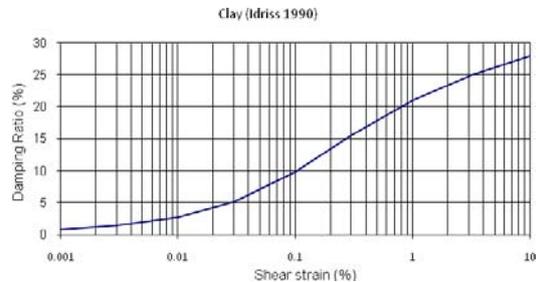
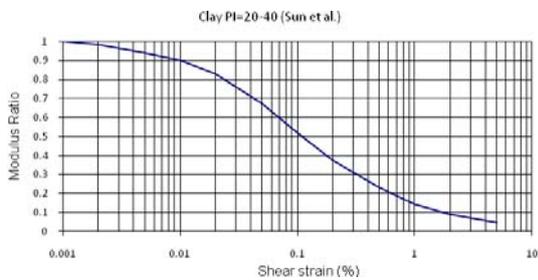
Le prove, dirette ed indirette, disponibili sull'area non individuano la presenza del bedrock, al quale associare una velocità delle onde $V_s > 800$ m/sec, pertanto è stato assunto un andamento del log in V_s dei terreni regolato dall'incremento del modulo di rigidità al crescere della pressione di confinamento e quindi della profondità, a partire dai valori di V_s della porzione più superficiale del terreno. Si è tenuto inoltre conto nella ricostruzione del profilo dei picchi rilevati del rapporto H/V ai quali sono stati associati variazioni incrementali della V_s in concomitanza di livelli sub-superficiali (livelli antropici), anche se di scarsa o nulla significatività ai fini ingegneristici (> 30 Hz), ovvero degli strati grossolani (ghaie) di cui si ha evidenza diretta della loro presenza/assenza fino alla profondità di 50 metri in quanto raggiunta dai sondaggi disponibili sull'area. Queste evidenze costituiscono eccezione al modello di linearità assunto tra V_s e profondità.

La profondità (≈ 100 metri) alla quale corrisponde il tetto del substrato sismico ($V_s > 800$ m/sec) risulta compatibile all'ambito sedimentario di conoide del Savio in cui ricade l'area indagata.

| Layer No | Material Name | Thickness (m) | Unit Weight (kN/m ³) | Gmax (MPa) | V _s (m/s) | Mod. Reduction Curve | Mod. Parameter | Damping Curve |
|----------|-----------------|---------------|----------------------------------|------------|----------------------|--------------------------------|----------------|-----------------------------|
| 1 | clay | 0.9 | 18.0 | 41.3 | 150.0 | Clay - PI=20-40 (Sun et al.) | | Clay - Average (Sun et al.) |
| 2 | clay | 2.8 | 18.0 | 154.4 | 290.0 | Clay - PI=20-40 (Sun et al.) | | Clay - Average (Sun et al.) |
| 3 | clay | 2.3 | 18.5 | 83.2 | 210.0 | Clay - PI=20-40 (Sun et al.) | | Clay - Average (Sun et al.) |
| 4 | clay | 2.3 | 19.0 | 85.4 | 210.0 | Clay - PI=20-40 (Sun et al.) | | Clay - Average (Sun et al.) |
| 5 | clay | 4.0 | 19.0 | 93.8 | 220.0 | Clay - PI=20-40 (Sun et al.) | | Clay - Average (Sun et al.) |
| 6 | clay | 4.0 | 19.0 | 102.5 | 230.0 | Clay - PI=20-40 (Sun et al.) | | Clay (Idriss 1990) |
| 7 | clay | 5.0 | 20.0 | 148.7 | 270.0 | Clay - PI=20-40 (Sun et al.) | | Clay (Idriss 1990) |
| 8 | gravel and sand | 20.0 | 19.0 | 697.5 | 600.0 | Gravel (Seed et al.) | | Gravel (Seed et al.) |
| 9 | sand | 5.0 | 20.0 | 326.3 | 400.0 | Sand (Seed and Idriss 1970) | | Sand (Idriss 1990) |
| 10 | gravel and sand | 15.0 | 19.0 | 586.1 | 550.0 | Gravel (Seed et al.) | | Gravel (Seed et al.) |
| 11 | sand | 6.0 | 20.0 | 326.3 | 400.0 | Sand (Seed & Idriss) - Average | | Sand (Idriss 1990) |
| 12 | gravel and sand | 10.0 | 22.0 | 807.6 | 600.0 | Gravel (Seed et al.) | | Gravel (Seed et al.) |
| 13 | gravel | 10.0 | 20.0 | 796.6 | 625.0 | Gravel (Seed et al.) | | Gravel (Seed et al.) |
| 14 | altered bedrock | 10.0 | 21.0 | 1204.5 | 750.0 | Linear | | Linear |
| 15 | bedrock | Infinite | 21.0 | 1370.5 | 800.0 | Rock (Idriss) | | Rock (Idriss) |



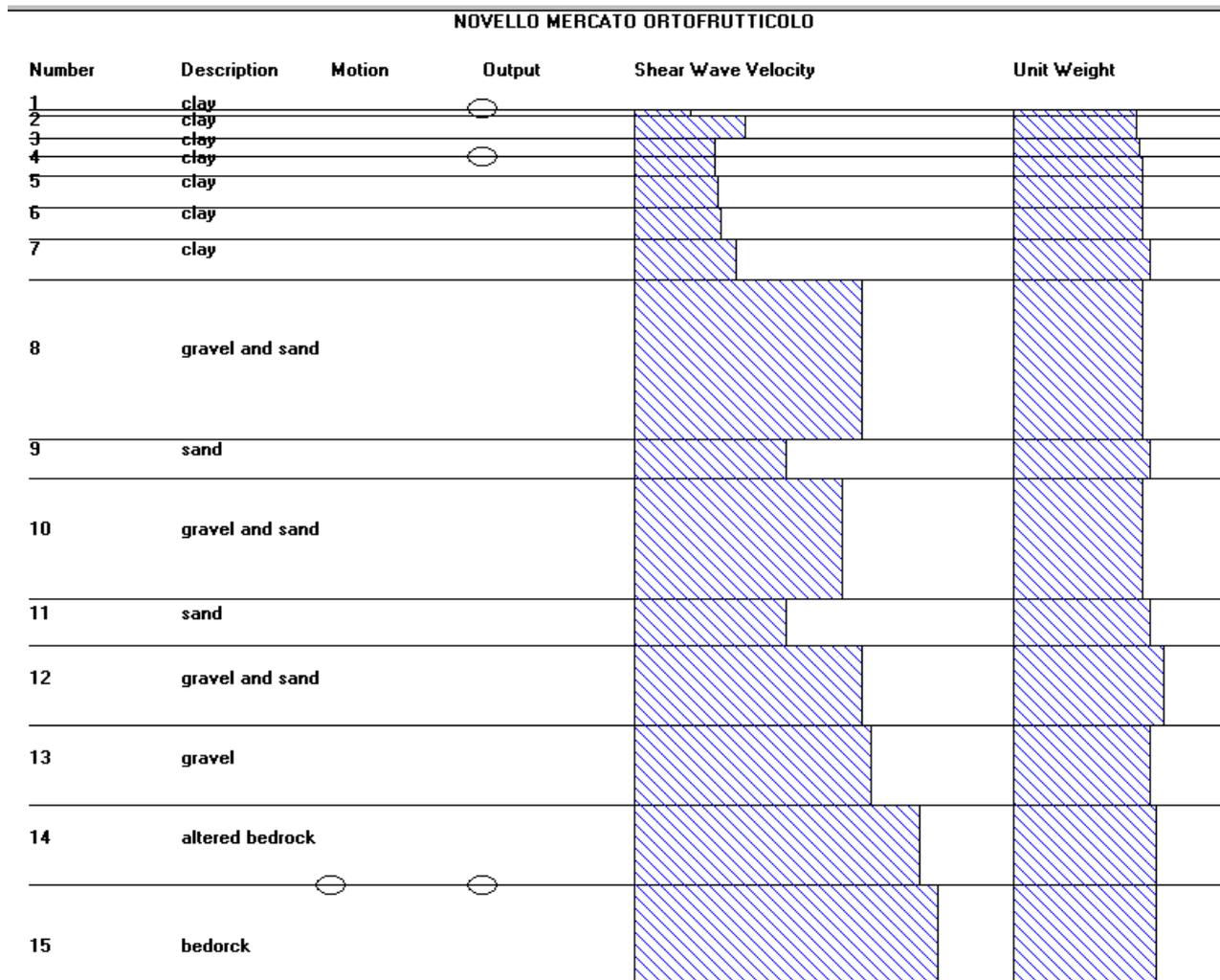
Di seguito sono riportati i comportamenti del modulo di taglio e del fattore di smorzamento al variare delle deformazioni adottati per le diverse tipologie di terreno nelle elaborazioni di III livello sia della presente analisi sia quella successiva (P.le Aldo Moro – Comparto 5):



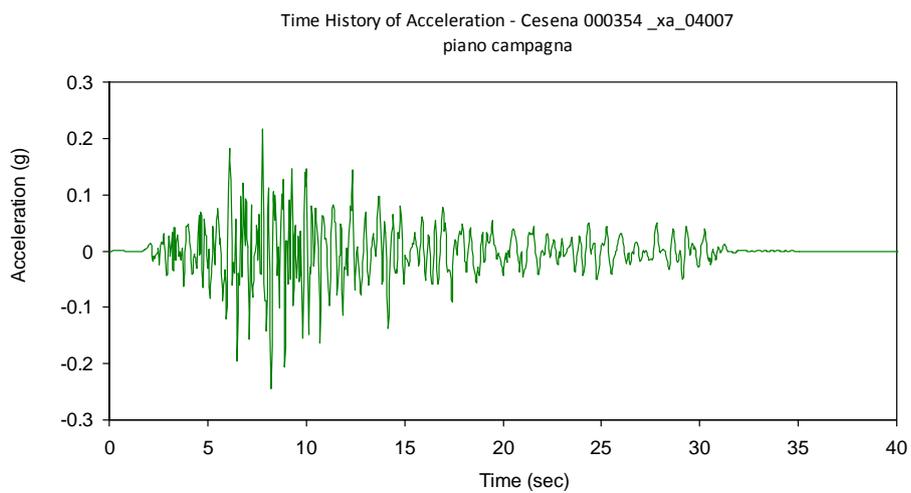
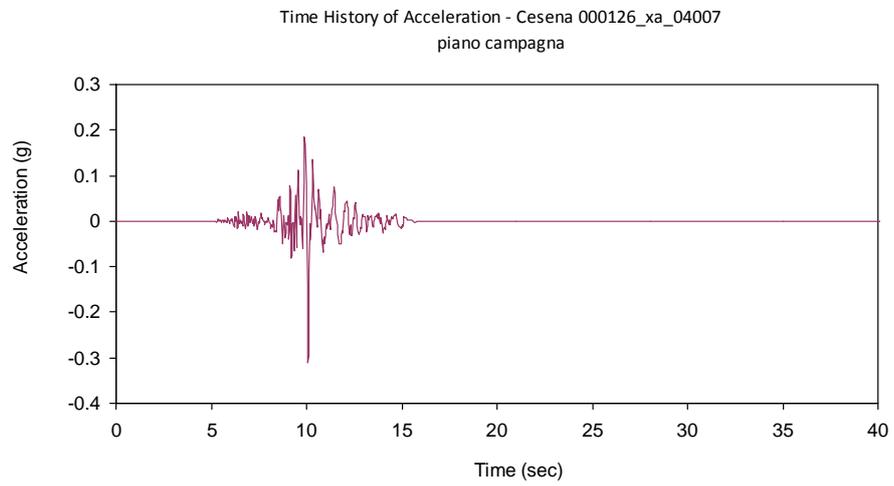
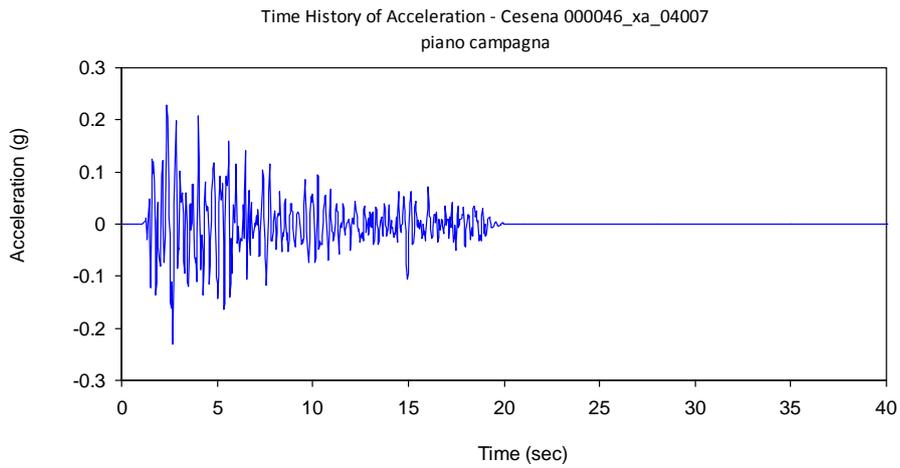


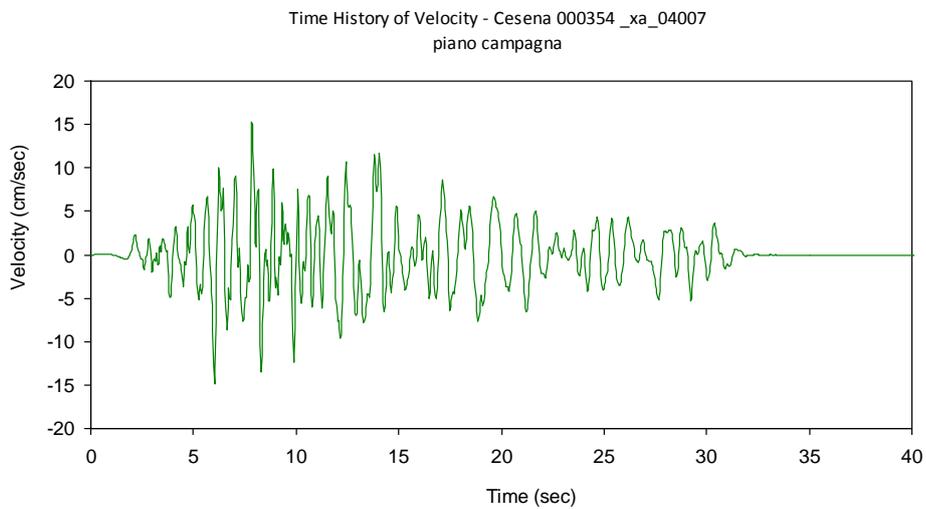
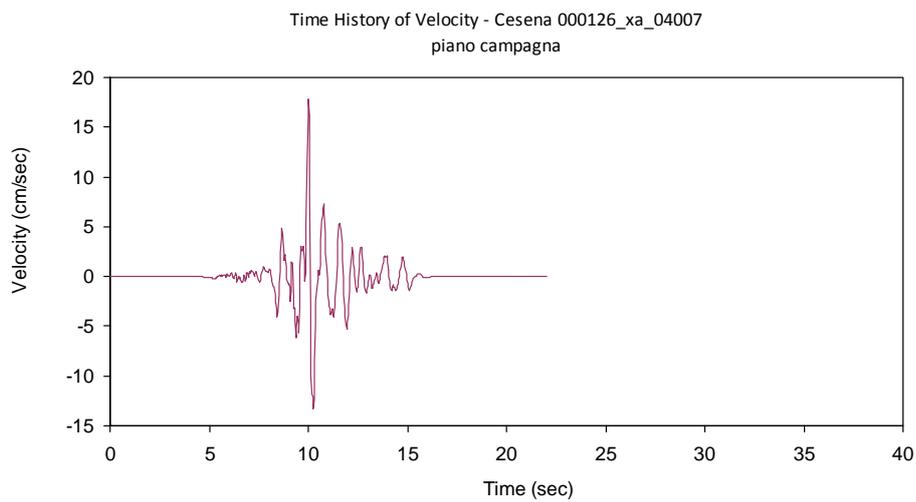
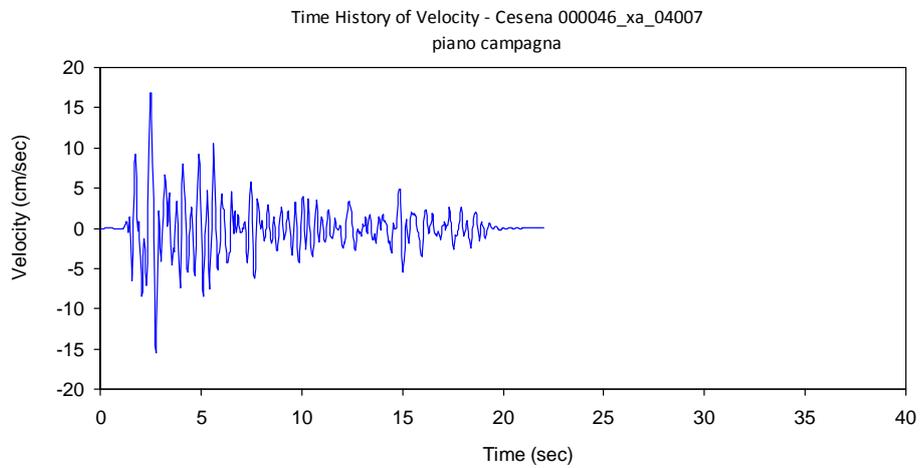
Relazione sismica integ. "NOVELLO"

L'elaborazione è stata sviluppata per due distinti orizzonti, ovvero al piano campagna ed a -6.00 metri di profondità, coerentemente al presumibile intervallo minimo e massimo del piano di posa delle fondazioni degli edifici previsti dal progetto del PRU "Novello" su tale comparto. La schematizzazione grafica di input e di output generato da PROSHAKE è il seguente:



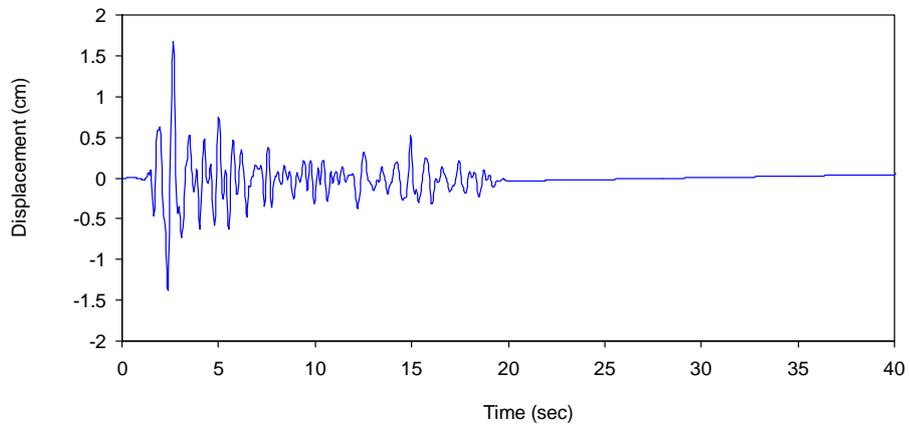
Nei diagrammi che seguono sono graficate le storie temporali convolute, rispettivamente in termini accelerazione, velocità e spostamento, riferite al piano campagna per i tre sismi di riferimento.



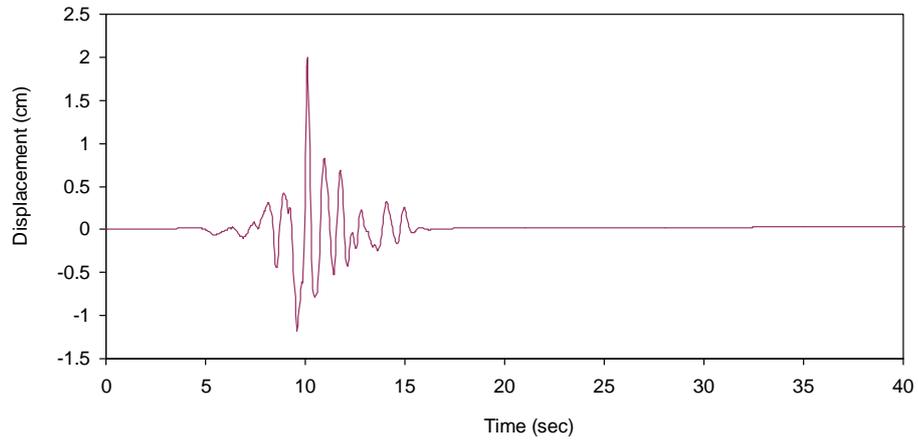




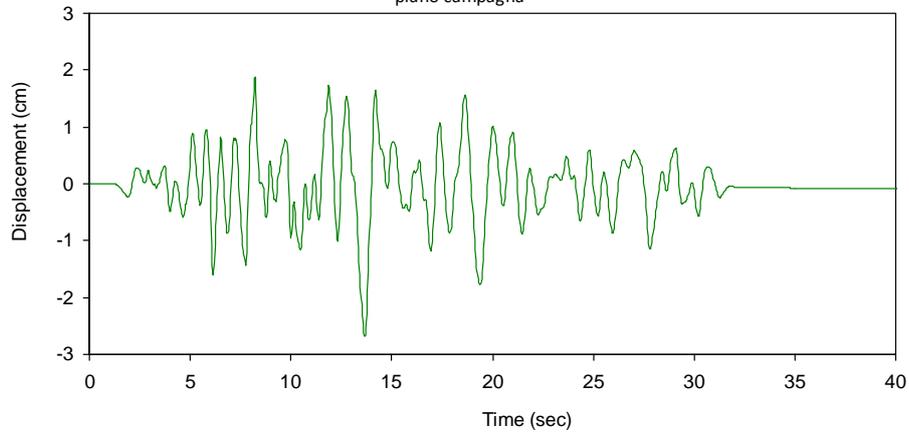
Time History of Displacement - Cesena 000046_xa_04007
piano campagna



Time History of Displacement - Cesena 000126_xa_04007
piano campagna



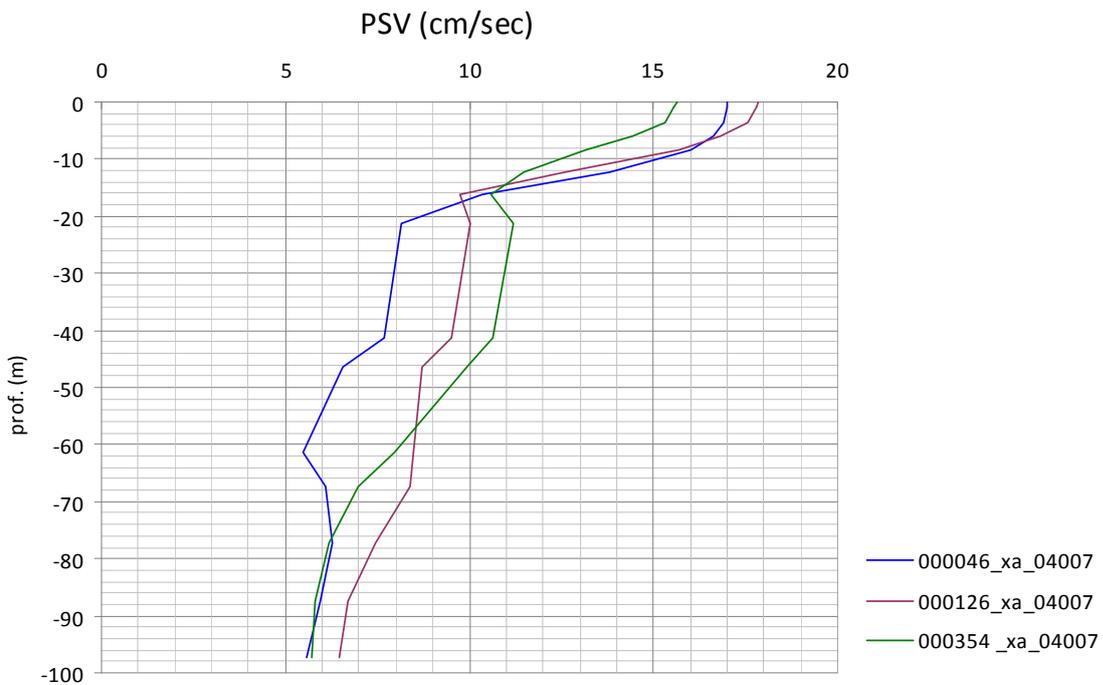
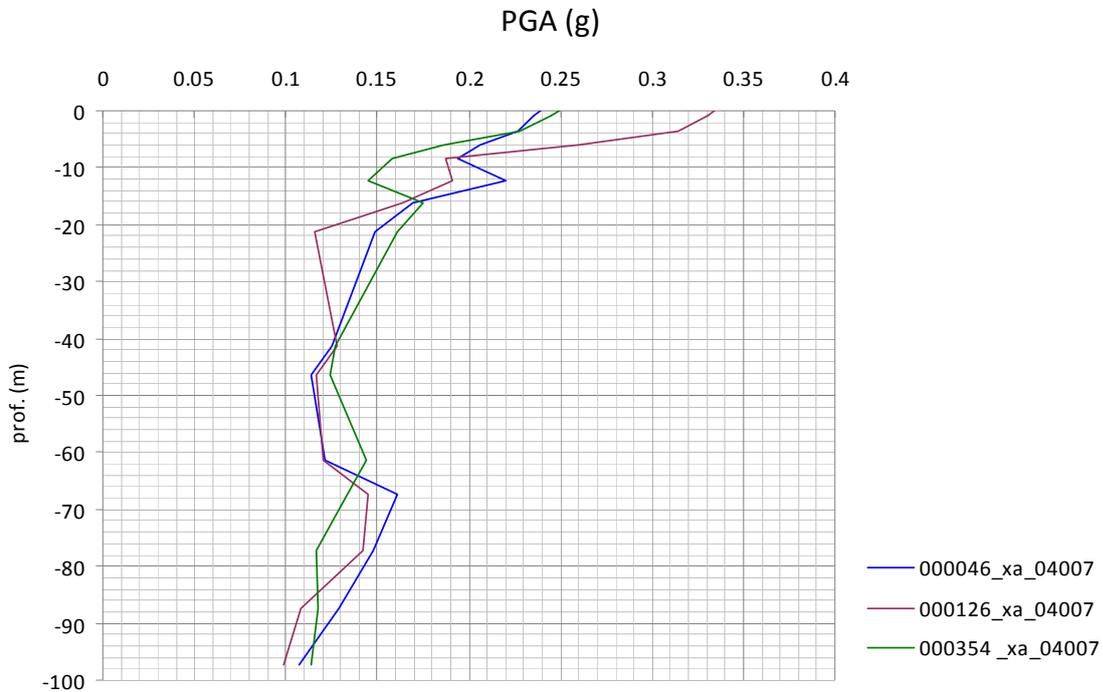
Time History of Displacement - Cesena 000354_xa_04007
piano campagna

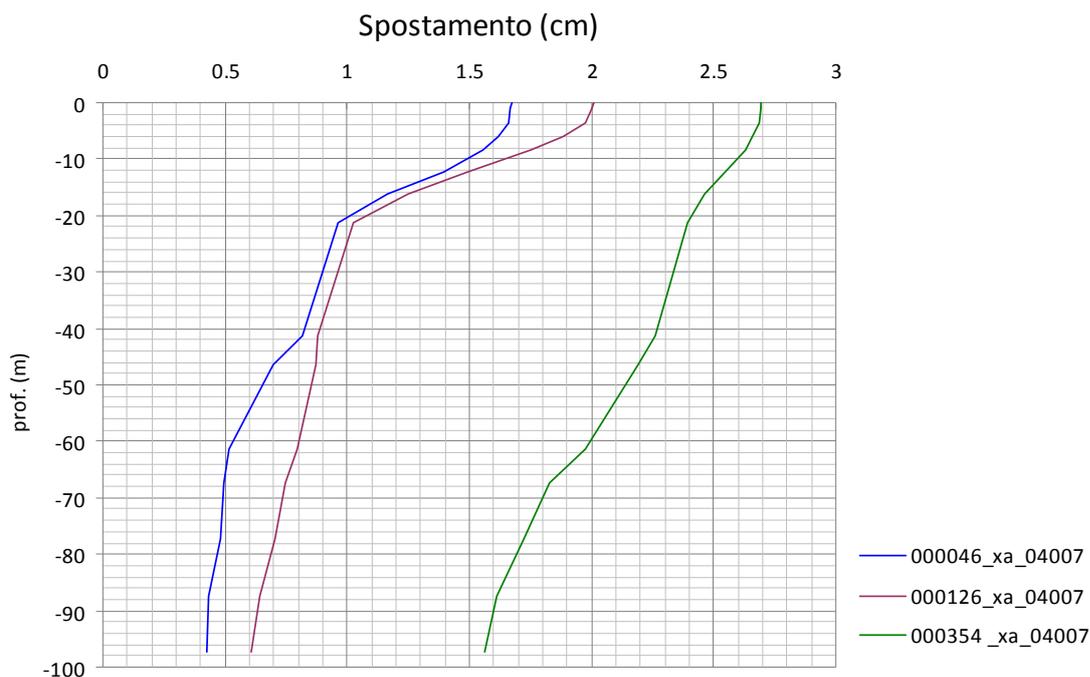




Relazione sismica integ. "NOVELLO"

I log della PGA/profondità, PSV/profondità e Spostamento/profondità per i tre sismi sono rappresentati nei grafici seguenti dove in ordinata è riportata la profondità (metri) ed in ascissa rispettivamente l'accelerazione (g), la velocità (cm/sec) e lo spostamento (cm).





I valori di accelerazione massima (PGA), di velocità massima (PGV), di massimo spostamento e di Intensità di Arias relativi alle quote di riferimento (p.c. e - 6.00 metri da p.c.), coerentemente alle esigenze progettuali delle prevedibili quote fondazionali, sono riportati nella sottostante tabella:

| Riferimento: Piano campagna | | | | |
|--|--------------|--------------|-------------------|---------------|
| sisma | PGA (g) | PGV (m/sec) | Displacement (cm) | ARIAS (m/sec) |
| 000046 RER | 0.239 | 0.170 | 1.7 | 0.838 |
| 000126 RER | 0.334 | 0.179 | 2.0 | 0.269 |
| 000354 RER | 0.249 | 0.156 | 2.7 | 1.011 |
| <i>media</i> | 0.274 | 0.168 | 2.13 | 0.706 |
| Riferimento: - 6 metri piano campagna | | | | |
| sisma | PGA (g) | PGV (m/sec) | Displacement (cm) | ARIAS (m/sec) |
| 000046 RER | 0.258 | 0.173 | 1.7 | 0.970 |
| 000126 RER | 0.362 | 0.185 | 2.1 | 0.314 |
| 000354 RER | 0.270 | 0.162 | 2.7 | 1.150 |
| <i>media</i> | 0.297 | 0.173 | 2.17 | 0.811 |



Oltre ai parametri sismici riportati nelle prime tre colonne la quarta colonna riporta l'intensità di Arias. L'intensità di Arias è un parametro integrale ottenuto come misura cumulativa del moto sismico durante la sua durata. Introducendo la funzione intensità del moto:

$$I(t) = \frac{\pi}{2g} \int_0^t a^2(\tau) d\tau$$

dove $a(t)$ è l'accelerazione al tempo t e g l'accelerazione di gravità, l'intensità di Arias è il valore massimo di tale funzione, ossia: $I_A = I(T_d)$ dove T_d è la durata totale dell'accelerogramma. Dimensionalmente l'intensità di Arias è una velocità.

Per i tre differenti sismi i valori del fattore di amplificazione (F_a) in termini di accelerazione (PGA/PGAo), posta PGAo pari a 0.195 g, sono i seguenti:

| | Fa (PGA/PGAo) | | |
|----------------|----------------------|-------------|-------------|
| | 000046 RER | 000126 RER | 000354 RER |
| Piano campagna | 1.23 | 1.71 | 1.28 |
| - 6 metri p.c. | 1.32 | 1.86 | 1.38 |

Lo spettro di risposta fornisce l'ampiezza massima della risposta (*in spostamento relativo, velocità relativa o accelerazione assoluta*) di un oscillatore armonico ad un grado di libertà (*gdl*) soggetto a un accelerogramma arbitrario in funzione del periodo strutturale T_n e del fattore di smorzamento ξ (*solitamente si adotta il valore standard pari a 5% dello smorzamento critico, normalmente applicabile alle strutture*).

Lo spettro di risposta di sito è rappresentato nei successivi grafici per i tre sismi di riferimento dove sono rappresentati l'accelerazione spettrale (PSA), la velocità spettrale (PSV) ed infine lo spettro degli spostamenti (PSD) per uno smorzamento (*damping*) $\xi = 5\%$. Nei diagrammi è riportato anche il valore medio dei suddetti parametri (PSA - PSV - PSD) per i tre sismi considerati mentre, per il solo diagramma PSA, è graficato anche lo spettro normalizzato della RER e lo spettro RER moltiplicato per un fattore $F_a = 1.5$. Quest'ultimo coefficiente ($F_a = 1.5$) corrisponde al fattore di amplificazione riferibile alla tipologia "ambito di pianura caratterizzato da profilo stratigrafico costituito da alternanze di sabbie e peliti, con spessori anche decametrici, talora con intercalazioni di orizzonti di ghiaie (di spessore anche decine di metri), con substrato profondo (≥ 100 m da p.c.) (PIANURA



2)" dell'allegato 2 della delibera RER 112/2007 per una V_{s30} pari a 300 m/sec caratteristica dei terreni in sito.

Ai fini dell'agevole lettura delle legende dei diagrammi che di seguito sono illustrati si precisa la corrispondenza tra le diverse diciture utilizzate per le sorgenti sismiche impiegate quale input del sistema nonché dei livelli stratigrafici di output:

EQ: 1 → MOTION 1 → sisma RER 000046xa_040007Cesena.xy;

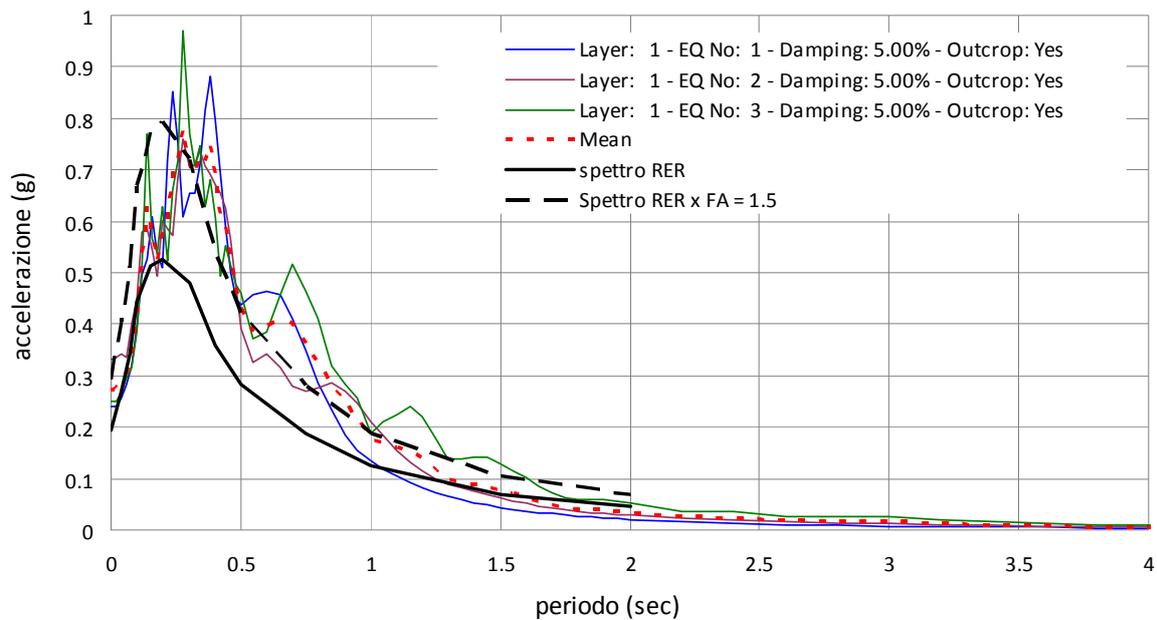
EQ: 2 → MOTION 2 → sisma RER 000046xa_040007Cesena.xy;

EQ: 3 → MOTION 3 → sisma RER 000046xa_040007Cesena.xy;

LAYER 1 → piano campagna;

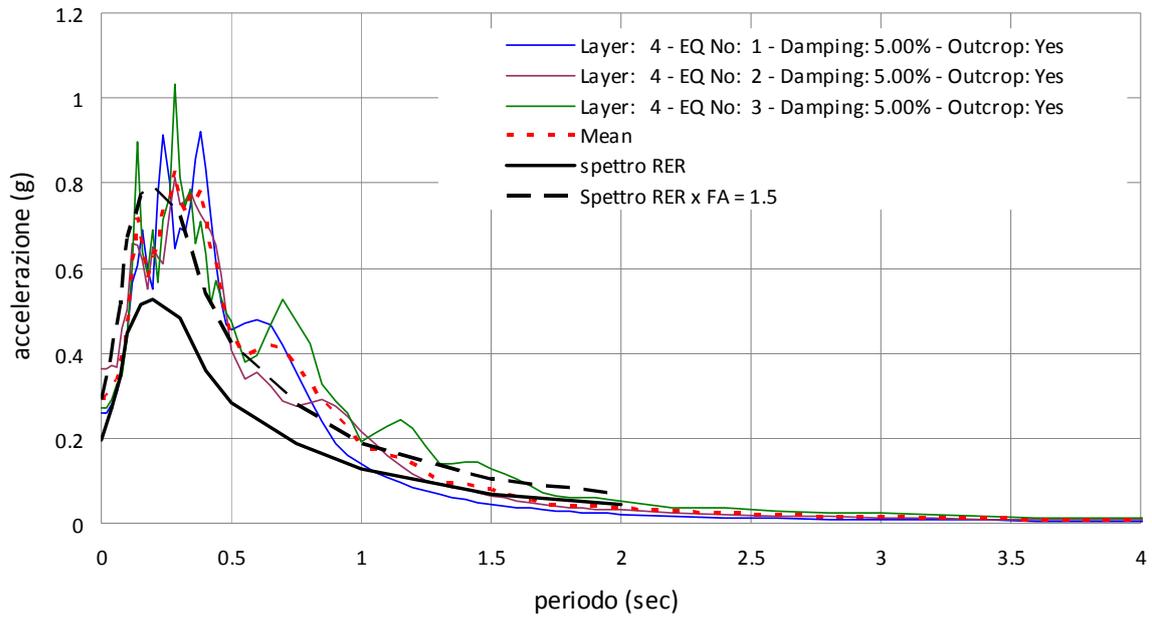
LAYER 4 → - 6 metri da piano campagna.

Spettro di risposta in accelerazione p.c.

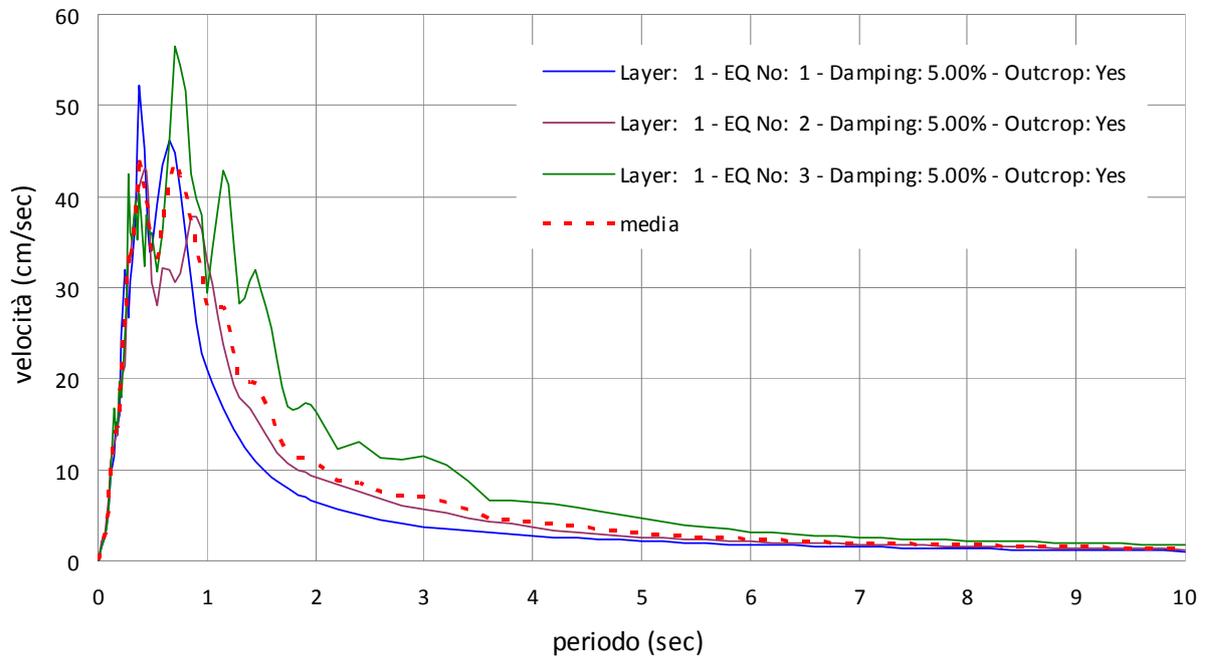




Spettro di risposta in accelerazione - 6 metri p.c.

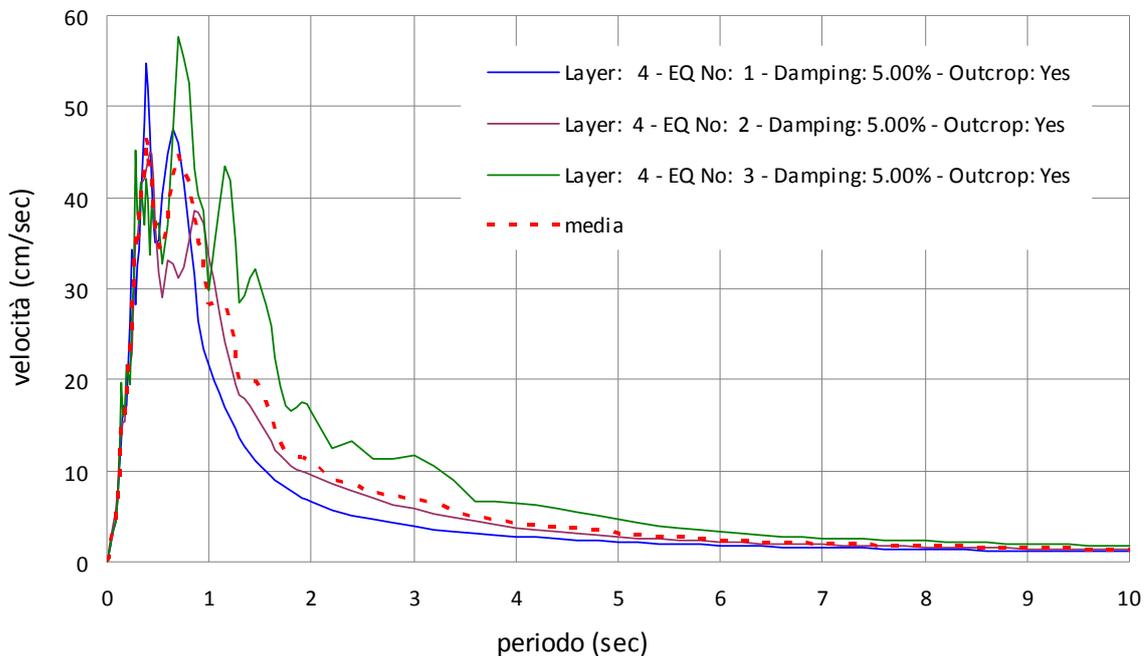


Spettro di risposta in velocità p.c.

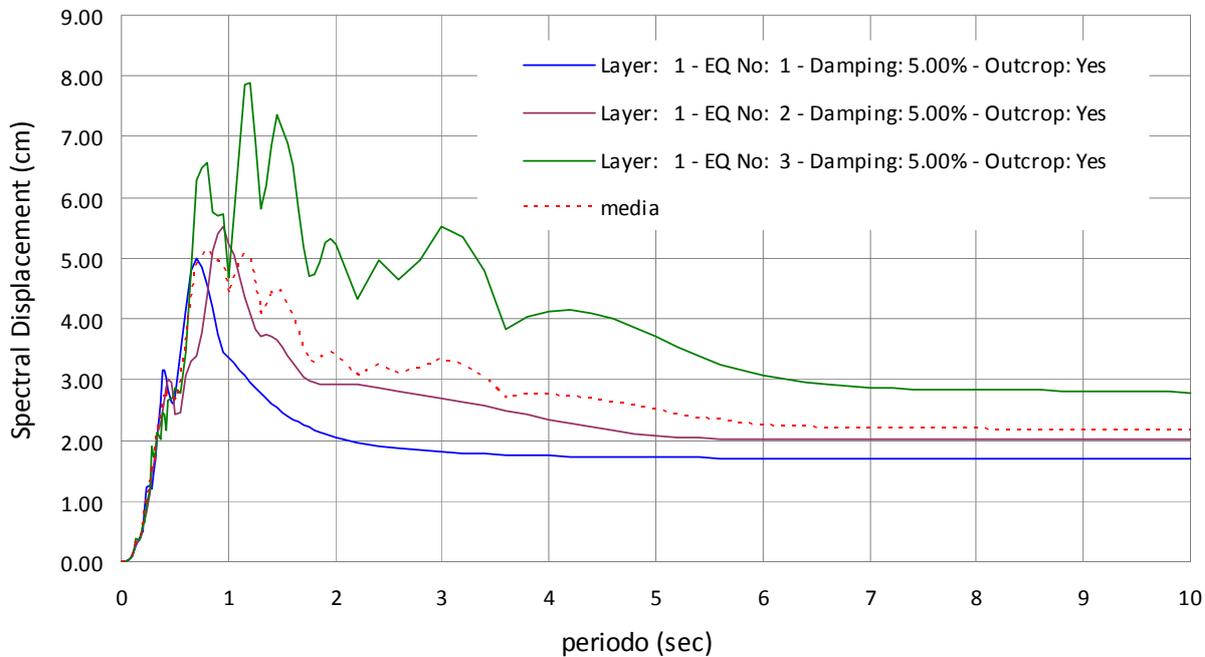


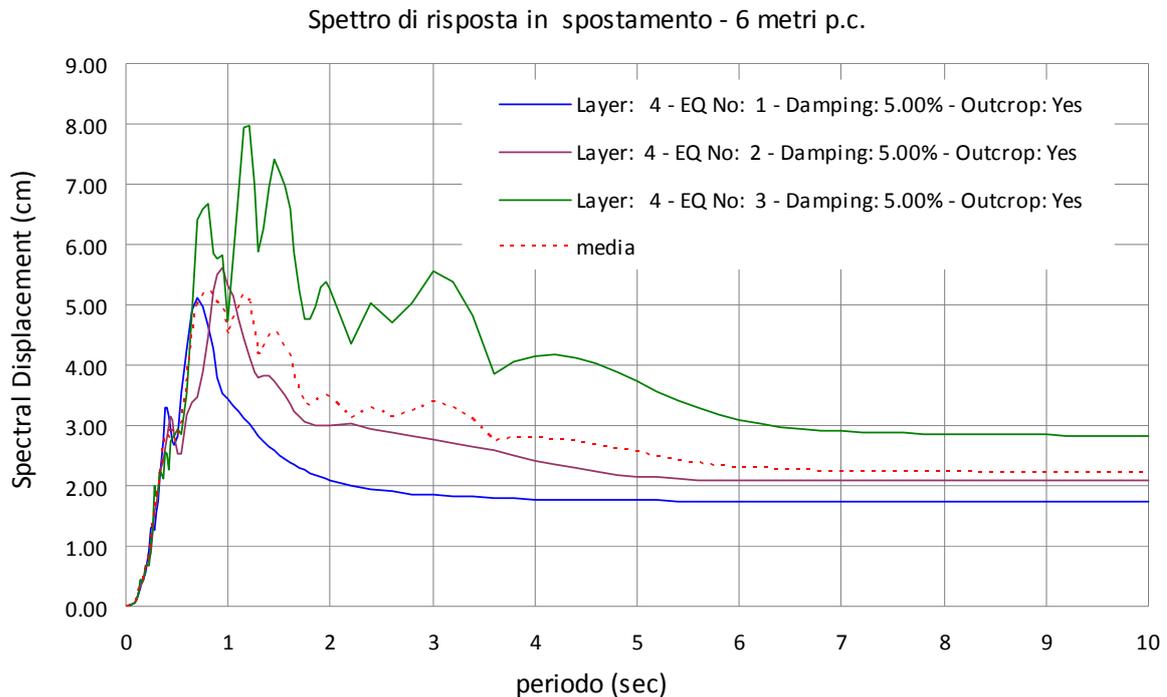


Spettro di risposta in velocità - 6 metri p.c.



Spettro di risposta in spostamento p.c.





Gli spettri di risposta in accelerazione, velocità e spostamento non mostrano significative differenze tra i due livelli considerati (p.c. e -6 metri). I picchi massimi in accelerazione, velocità e spostamento corrispondono al sisma 000354xa_040007Cesena.xy, avente componente predominante alle alte frequenze, e secondariamente al sisma impulsivo - 000046xa_040007Cesena.xy. Il valore massimo di accelerazione al suolo è pari a 0.97 g per un periodo $T = 0.28$ sec seguono due picchi minori (0.88 g - $T = 0.38$ sec e 0.85 g - $T = 0.24$ sec) posti all'incirca intorno allo stesso intervallo mentre si rileva un picco di 0.51 g al periodo $T = 0.7$ sec. Lo spettro di accelerazione alla profondità di 6 metri mostra il suo massimo di 1.03 g al periodo $T = 0.28$ sec.

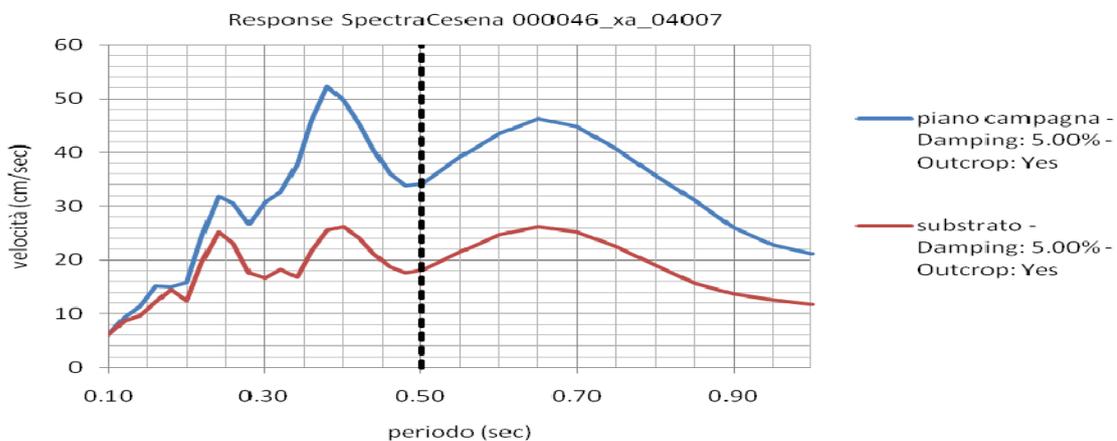
I valori mediati sui tre spettri in accelerazione alle due quote considerate mostrano un andamento circa corrispondente allo spettro regionale moltiplicato per un $F_a = 1.5$ anche se si nota una traslazione dei valori massimi verso valori in periodo leggermente più elevati rispetto a questo.

L'intensità di Housner (SI) costituisce un importante indicatore della pericolosità sismica ed è definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudo-velocità in un prefissato intervallo temporale ed è direttamente correlabile all'energia dissipata dalle strutture durante un terremoto costituendo espressione del possibile grado di danneggiamento subito

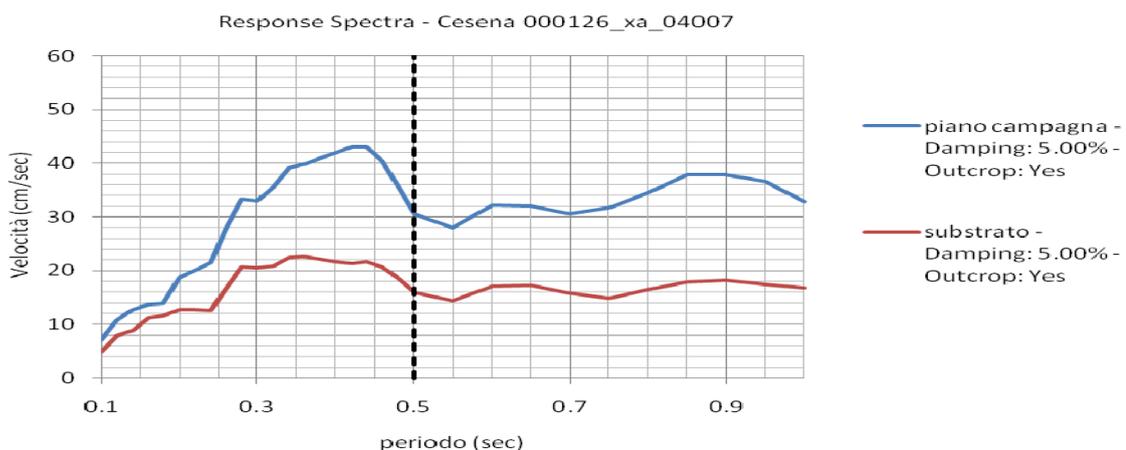


Relazione sismica integ. "NOVELLO"

degli edifici. Il rapporto SI/SIo è inteso come rapporto tra l'intensità spettrale calcolata in un determinato intervallo del periodo sullo spettro di pseudovelocità del moto di riferimento e l'intensità spettrale del moto di input per lo stesso intervallo di periodo per un valore dello smorzamento critico del 5%, rappresentando una stima quantitativa della risposta locale nel dominio del tempo. Sono stati pertanto calcolati i valori dell'intensità di Housner per il moto di riferimento e quello di input ed i relativi rapporti per gli intervalli indicati dalla DAL 112/2007, ovvero per il periodo compreso tra $0.1 \div 0.5$ sec e $0.5 \div 1$ sec. Per chiarezza espositiva vengono affiancati in questa sezione oltre ai rapporti dell'intensità di Housner anche i fattori di amplificazione Fa espressi in termini di accelerazione (PGA/PGAo), precedentemente illustrati per le diverse combinazioni verificate (3 moti di input x 2 livelli).



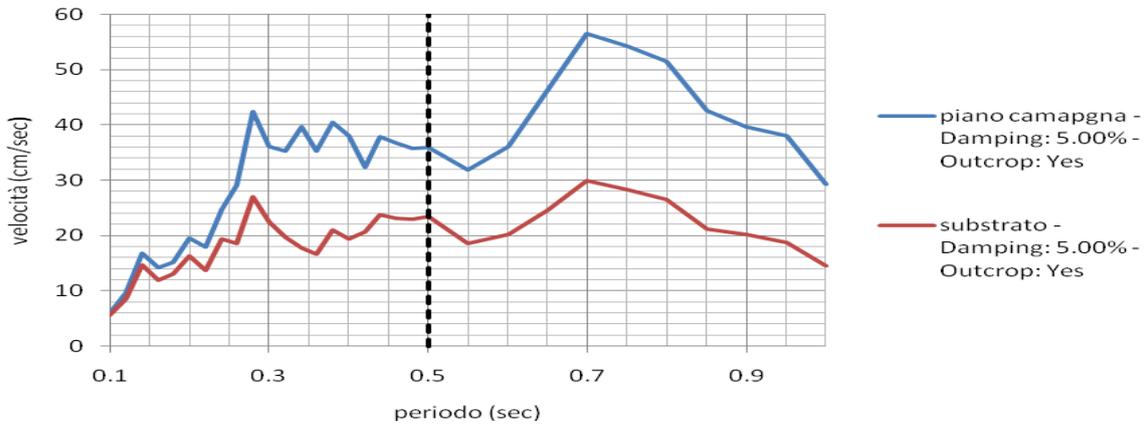
| | | |
|----------|---------------------------------------|-------------------------|
| | Fattori di Amplificazione (Fa) | |
| PGA/PGAo | 1.23 | |
| SI/SIo | 0.1 <T < 0.5 | 0.5 <T < 1 |
| | 1.67 | 1.82 |



| | | |
|----------|---------------------------------------|-------------------------|
| | Fattori di Amplificazione (Fa) | |
| PGA/PGAo | 1.71 | |
| SI/SIo | 0.1 <T < 0.5 | 0.5 <T < 1 |
| | 1.73 | 2.01 |

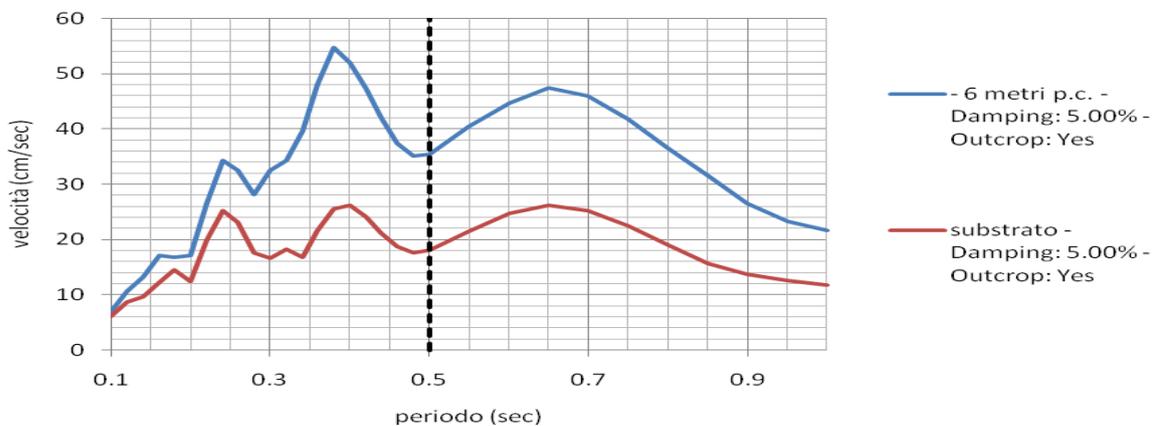


Response Spectra - Cesena 000354_xa_04007

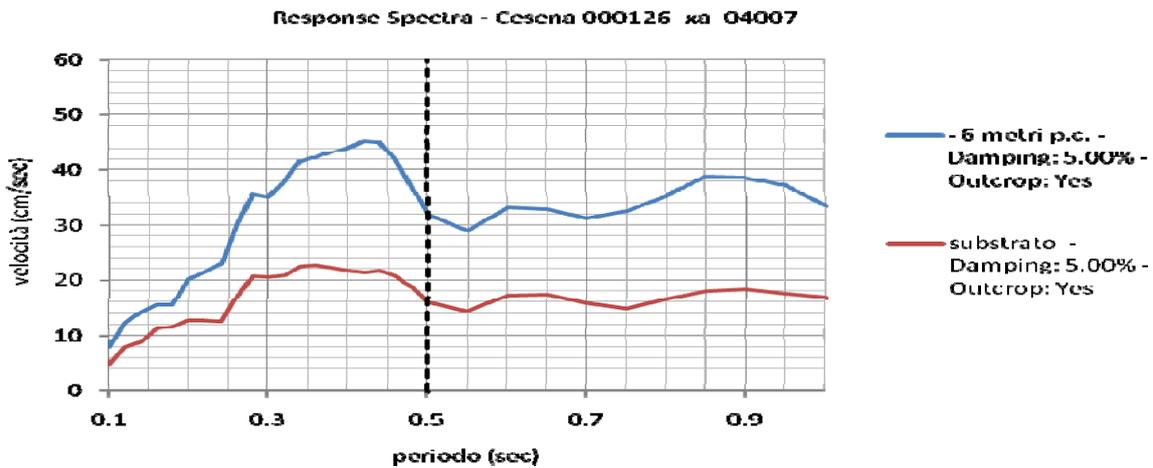


| Fattori di Amplificazione (Fa) | |
|--------------------------------|---------------|
| PGA/PGAo | 1.28 |
| SI/SIo | 0.1 < T < 0.5 |
| | 1.58 |
| | 0.5 < T < 1 |
| | 1.89 |

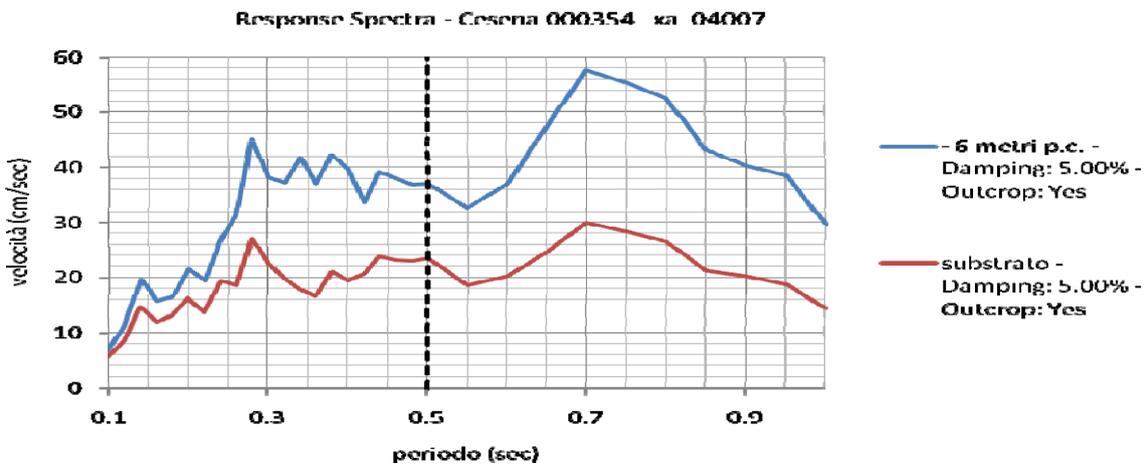
Response Spectra - Cesena 000046_xa_04007



| Fattori di Amplificazione (Fa) | |
|--------------------------------|---------------|
| PGA/PGAo | 1.32 |
| SI/SIo | 0.1 < T < 0.5 |
| | 1.77 |
| | 0.5 < T < 1 |
| | 1.87 |



| Fattori di Amplificazione (Fa) | |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| PGA/PGAo | 1.86 |
| SI/SIo | 0.1 < T < 0.5 0.5 < T < 1 |
| | 1.84 2.05 |

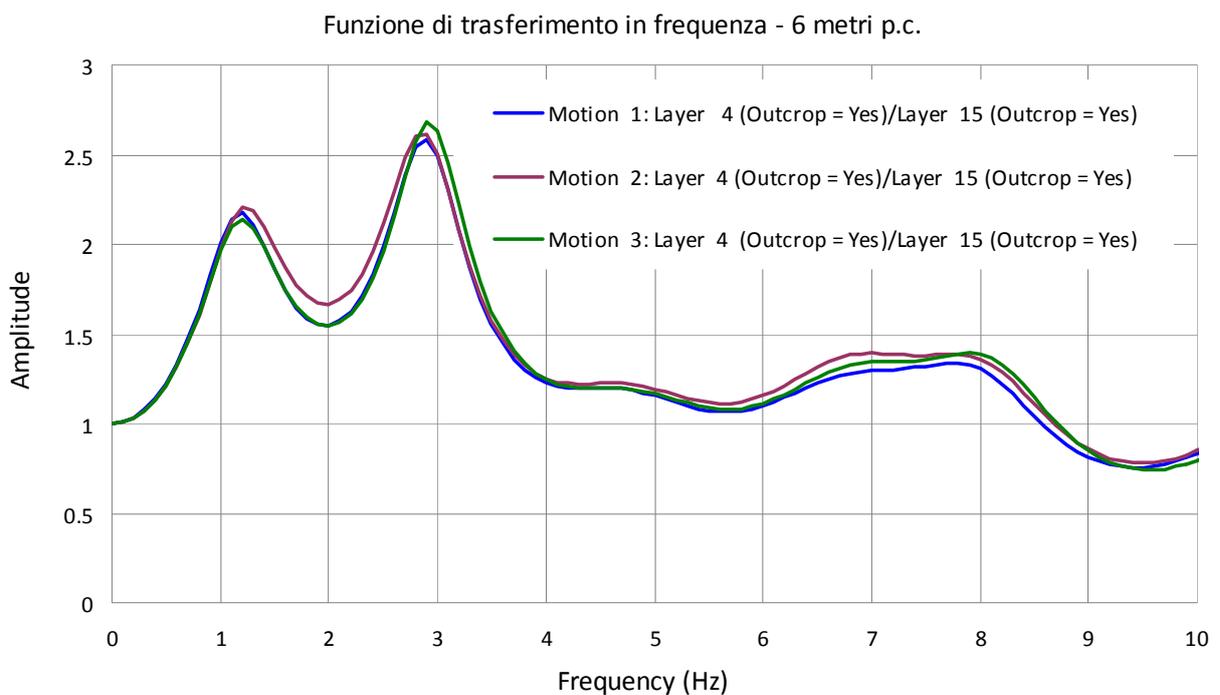
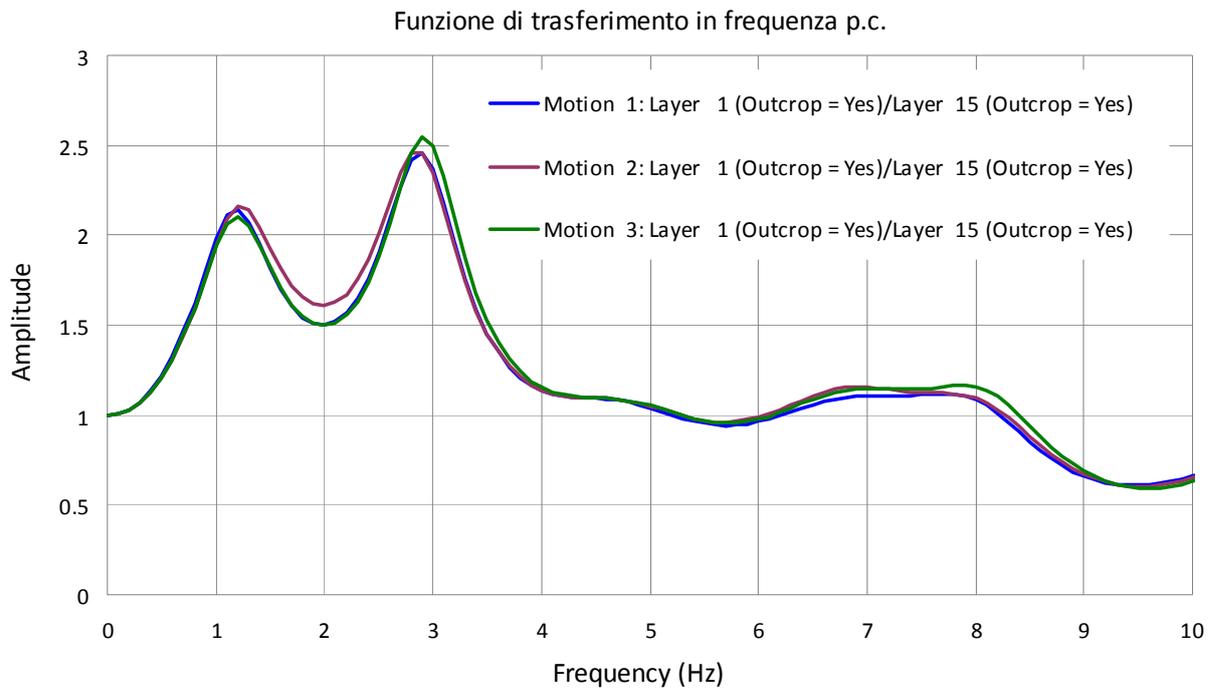


| Fattori di Amplificazione (Fa) | |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| PGA/PGAo | 1.38 |
| SI/SIo | 0.1 < T < 0.5 0.5 < T < 1 |
| | 1.68 1.93 |

Da ultimo vengono nelle pagine seguenti graficate le funzioni di trasferimento relative ad ognuno dei tre input sismici di riferimento forniti dalla regione ER (impulsivo - 000046xa motion 1 - con ampio contenuto in frequenze 000126xa motion 2 - con componente

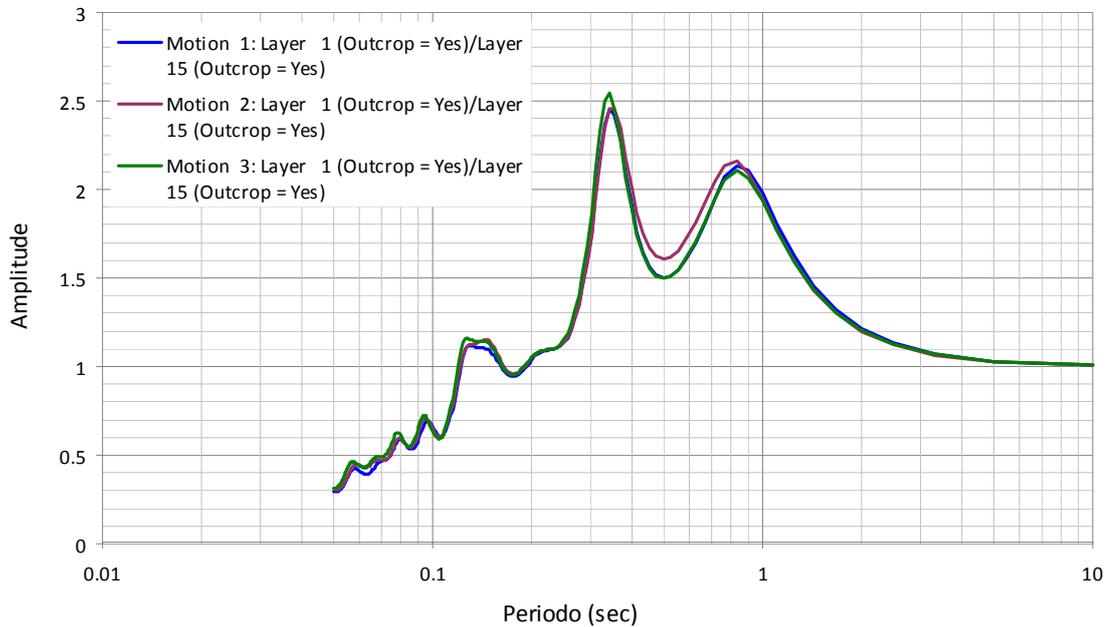


predominante alle alte frequenze - 000354xa motion 3) per le due condizioni stratigrafiche considerate. La funzione di trasferimento altro non è che una funzione matematica complessa calcolata come rapporto tra le ampiezze degli spettri di Fourier del moto sismico in superficie e alla base del deposito. Questa da conto dell'azione amplificante o smorzante che il deposito di sedimenti esercita su alcune (o tutte) componenti dell'evento di input applicato alla base del deposito.

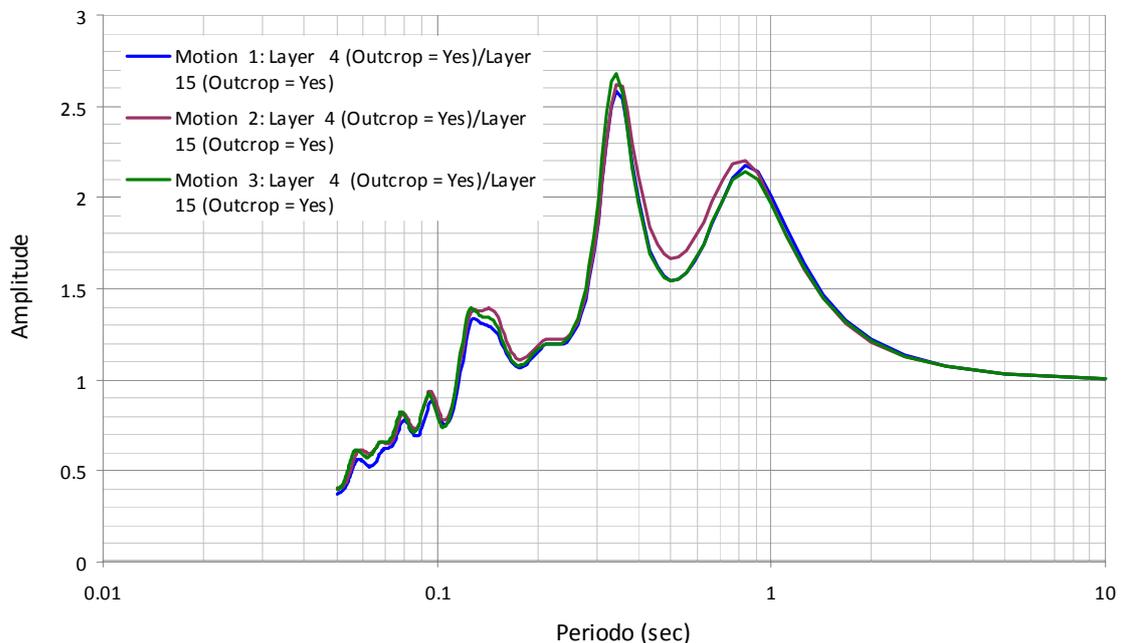




Funzione di trasferimento in periodo piano campagna



Funzione di trasferimento in periodo - 6 metri p.c.



I grafici relativi alle funzioni di trasferimento, espressi sia in frequenza che in periodo, mostrano un andamento simile per i tre sismi considerati e per entrambe le quote di analisi assunte (p.c. e - 6.00 metri). Il rapporto di amplificazione massima tra la base dell'input sismico ed il piano di campagna è pari a 2.54 alla frequenza di 2.9 Hz ($T = 0.34$ sec) e



corrisponde al sisma con componente predominante alle alte frequenze (000354xa_040007Cesena.xy). Il secondo massimo del rapporto di amplificazione tra substrato sismico e superficie è pari a 2.16 alla frequenza di 1.2 Hz ($T = 0.83$ sec) e corrisponde al sisma RER con ampio contenuto in frequenze (000126xa_040007Cesena.xy).

Come anzidetto al livello d'analisi posto alla profondità di 6 metri dal piano campagna non si evidenziano sostanziali differenze rispetto al p.c. dove il massimo rapporto di amplificazione corrisponde a 2.68 alla medesima frequenza del sovrastante livello ($f = 2.9$ Hz - $T = 0.34$ sec) mentre il secondo massimo pari a 2.20 sempre alla frequenza di 1.2 Hz ($T = 0.83$ sec) mostrando valori di amplificazione lievemente superiori a quelli attesi in superficie.

I massimi del fattore di amplificazione della funzione di trasferimento corrispondono a frequenze poste nell'intorno dei massimi del rapporto H/V rilevati nella prova del rilievo dei microtremori TRO1 (3.14 e 1.69 Hz), intendendo di poter considerare il rapporto H/V come stima affidabile della funzione di trasferimento delle onde S per un dato sito (Nakamura 1989).



3.2. Area P.le Aldo Moro - Comparto 5 NOVELLO

Partendo dallo spettro H/V del rilievo dei microtremori della prova TRO3 è stata ricostruita la curva sintetica alla quale corrisponde la successione dei sismostrati riportata nella successiva tabella.

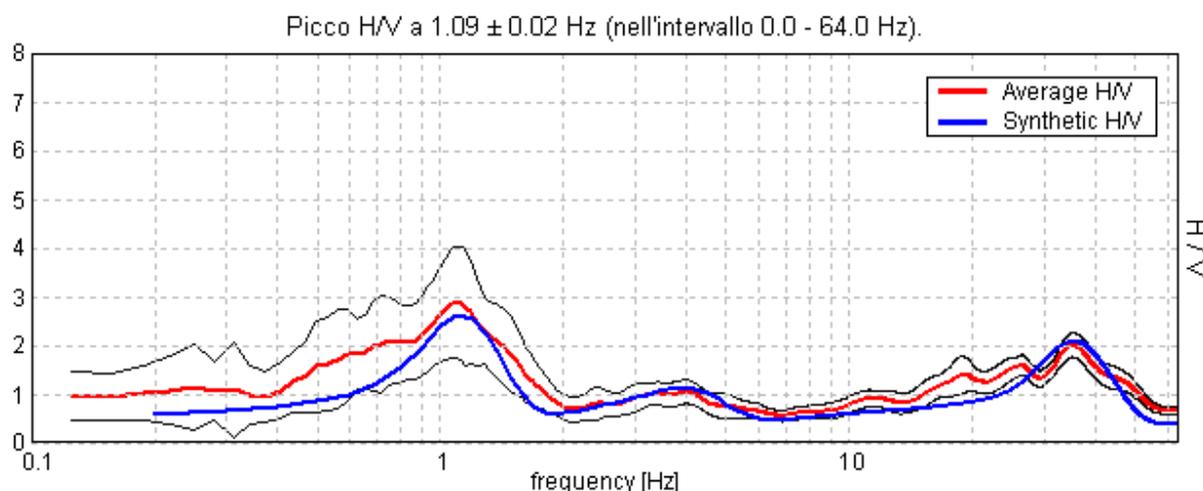


Figura 8 -H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO prova HVSR TRO3

| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] | Rapporto di Poisson |
|---------------------------------------|--------------|----------|---------------------|
| 1.00 | 1.00 | 140 | 0.35 |
| 3.00 | 2.00 | 300 | 0.35 |
| 11.00 | 8.00 | 250 | 0.35 |
| 19.00 | 8.00 | 270 | 0.35 |
| 34.00 | 15.00 | 550 | 0.35 |
| 44.00 | 10.00 | 350 | 0.35 |
| 54.00 | 10.00 | 350 | 0.35 |
| 69.00 | 15.00 | 550 | 0.35 |
| 84.00 | 15.00 | 350 | 0.35 |
| 104.00 | 20.00 | 550 | 0.35 |
| inf. | inf. | 800 | 0.35 |

La sequenza dei sismostrati sopra definita risulta congruente all'effettiva alternanza sedimentaria che qualifica l'area in esame nella quale il minore grado di verosimiglianza corrisponde, evidentemente, ai livelli stratigrafici non direttamente verificati attraverso le stratigrafie delle prove disponibili in sito bensì attraverso le sole indagini sismiche.

I dati in ingresso di PROSHAKE relativi al profilo del terreno di studio sono riassunti nella tabella seguente nella quale sono altresì riportati i caratteri litologici dei suoli utili a definire i significativi parametri dei Moduli di taglio normalizzati (G/Go) e del rapporto di smorzamento ($D\%$).



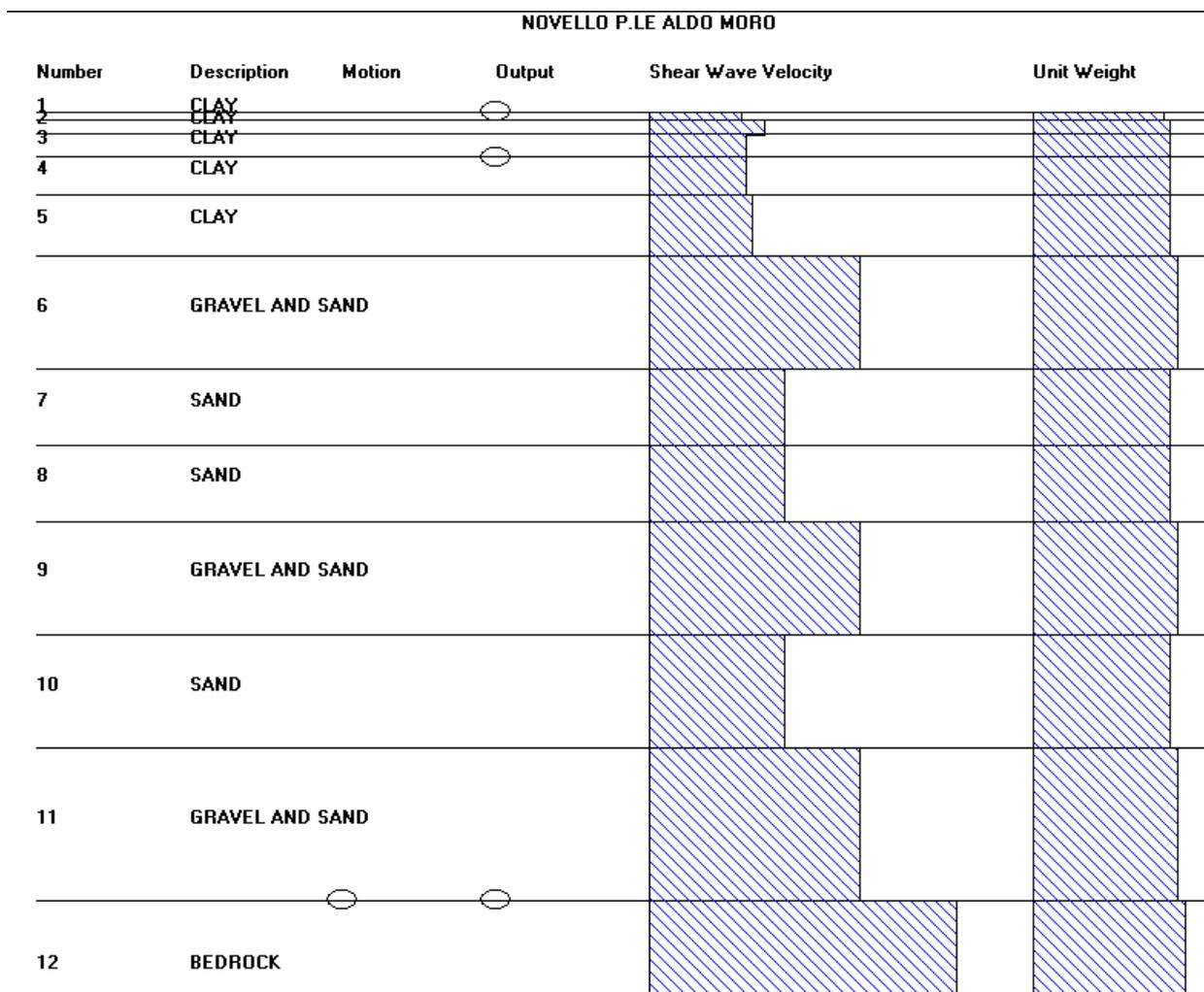
Relazione sismica integ. "NOVELLO"

Le prove, dirette ed indirette, disponibili sull'area non individuano la presenza del bedrock, al quale associare una velocità delle onde $V_s > 800$ m/sec, pertanto è stato assunto un andamento del log in V_s dei terreni regolato dall'incremento del modulo di rigidità al crescere della pressione di confinamento e quindi della profondità, a partire dai valori di V_s della porzione più superficiale del terreno. Si è tenuto inoltre conto nella ricostruzione del profilo dei picchi rilevati del rapporto H/V ai quali sono stati associati variazioni incrementali della V_s in concomitanza di livelli sub-superficiali (livelli antropici), anche se di scarsa o nulla significatività ai fini ingegneristici (> 30 Hz), ovvero degli strati grossolani (ghaie) di cui si ha evidenza diretta della loro presenza/assenza fino alla profondità di 50 metri in quanto raggiunta dai sondaggi disponibili sull'area. Queste evidenze costituiscono eccezione al modello di linearità assunto tra V_s e profondità.

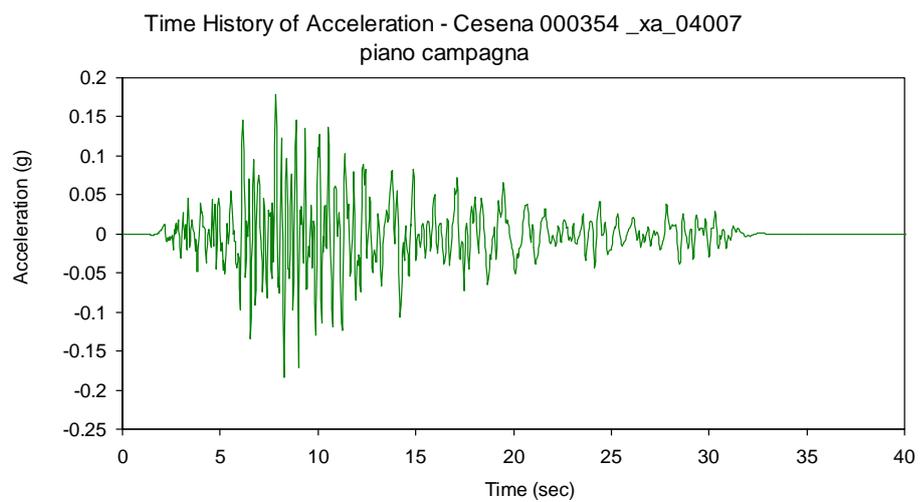
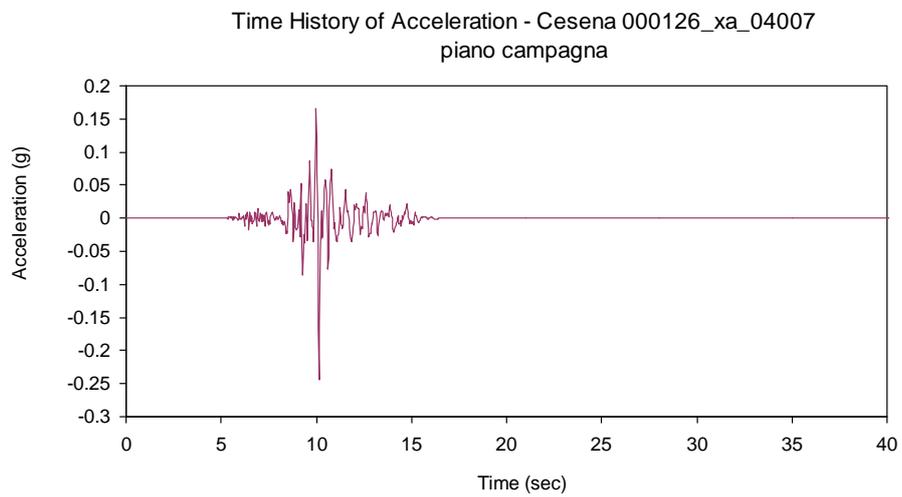
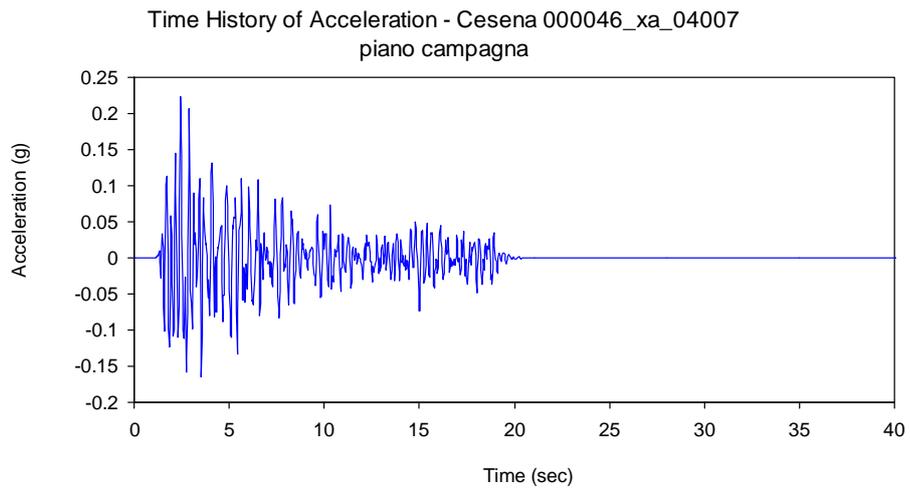
La profondità (≈ 100 metri) alla quale corrisponde il tetto del substrato sismico ($V_s > 800$ m/sec) risulta compatibile all'ambito sedimentario di conoide del Savio in cui ricade l'area indagata.

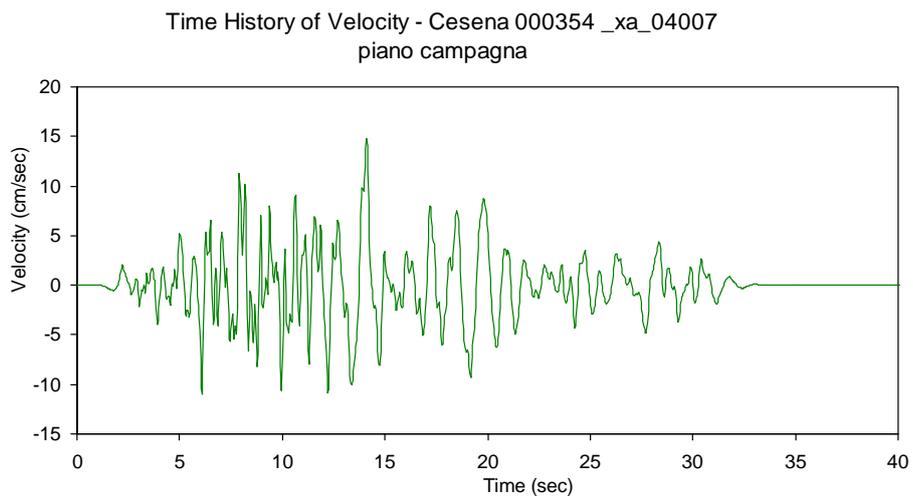
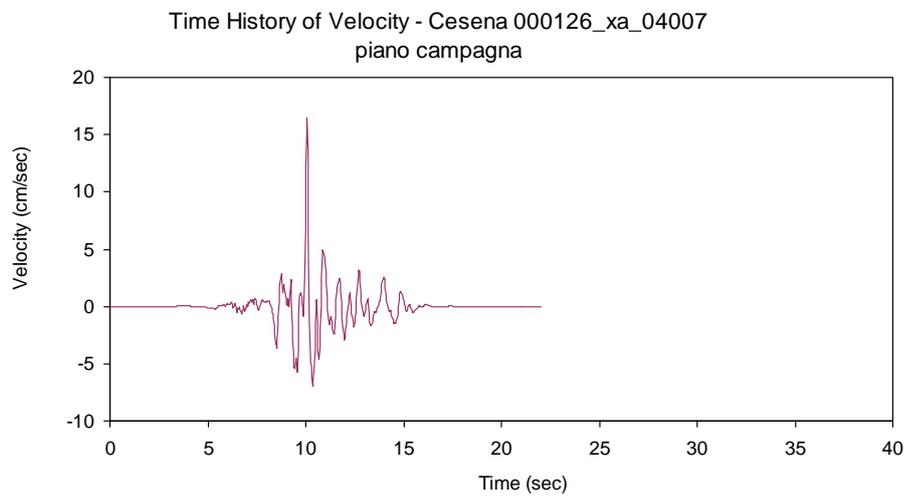
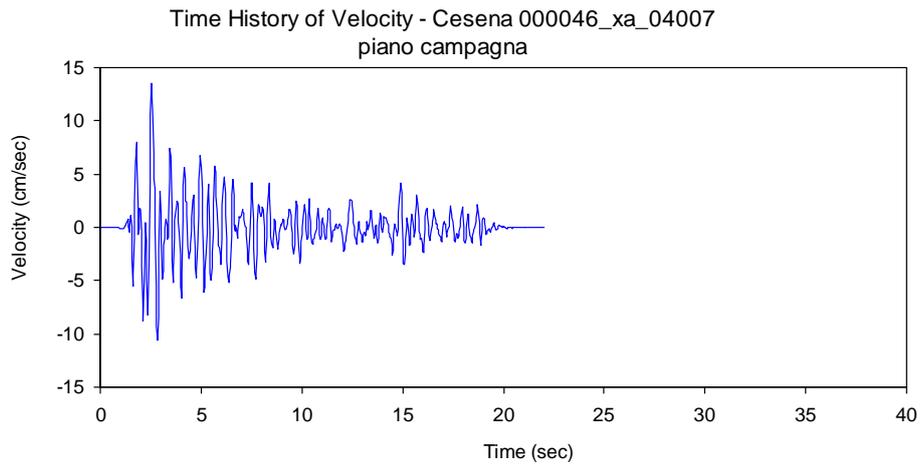
| Layer No | Material Name | Thickness (m) | Unit Weight (kN/m ³) | Gmax (MPa) | Vs (m/s) | Mod. Reduction Curve | Mod. Parameter | Damping Curve |
|----------|-----------------|---------------|----------------------------------|------------|----------|------------------------------|----------------|----------------------|
| 1 | CLAY | 1.0 | 18.0 | 105.7 | 240.0 | Clay (Seed and Sun 1989) | | Clay (Idriss 1990) |
| 2 | CLAY | 2.0 | 19.0 | 174.4 | 300.0 | Clay (Seed and Sun 1989) | | Clay (Idriss 1990) |
| 3 | CLAY | 3.0 | 19.0 | 121.1 | 250.0 | Clay - PI=20-40 (Sun et al.) | | Clay (Idriss 1990) |
| 4 | CLAY | 5.0 | 19.0 | 121.1 | 250.0 | Clay - PI=20-40 (Sun et al.) | | Clay (Idriss 1990) |
| 5 | CLAY | 8.0 | 19.0 | 141.2 | 270.0 | Clay - PI=20-40 (Sun et al.) | | Clay (Idriss 1990) |
| 6 | GRAVEL AND SAND | 15.0 | 20.0 | 616.9 | 550.0 | Gravel (Seed et al.) | | Gravel (Seed et al.) |
| 7 | SAND | 10.0 | 19.0 | 237.3 | 350.0 | Sand (Seed and Idriss 1970) | | Sand (Idriss 1990) |
| 8 | SAND | 10.0 | 19.0 | 237.3 | 350.0 | Sand (Seed and Idriss 1970) | | Sand (Idriss 1990) |
| 9 | GRAVEL AND SAND | 15.0 | 20.0 | 616.9 | 550.0 | Gravel (Seed et al.) | | Gravel (Seed et al.) |
| 10 | SAND | 15.0 | 19.0 | 237.3 | 350.0 | Sand (Seed and Idriss 1970) | | Sand (Idriss 1990) |
| 11 | GRAVEL AND SAND | 20.0 | 20.0 | 616.9 | 550.0 | Gravel (Seed et al.) | | Gravel (Seed et al.) |
| 12 | BEDROCK | Infinite | 21.0 | 1370.5 | 800.0 | Rock (Idriss) | | Rock (Idriss) |

L'elaborazione è stata sviluppata per due distinti orizzonti, ovvero al piano campagna ed a -6.00 metri di profondità, coerentemente al presumibile intervallo minimo e massimo del piano di posa delle fondazioni degli edifici previsti dal progetto del PRU "Novello" su tale comparto. La schematizzazione grafica di input e di output generato da PROSHAKE è il seguente:



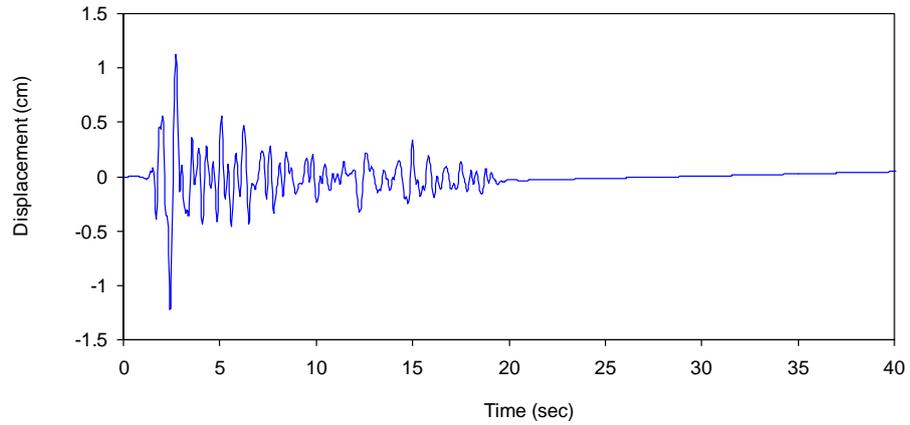
Nei diagrammi che seguono sono graficate le storie temporali convolute, rispettivamente in termini accelerazione, velocità e spostamento, riferite al piano campagna per i tre sismi di riferimento.



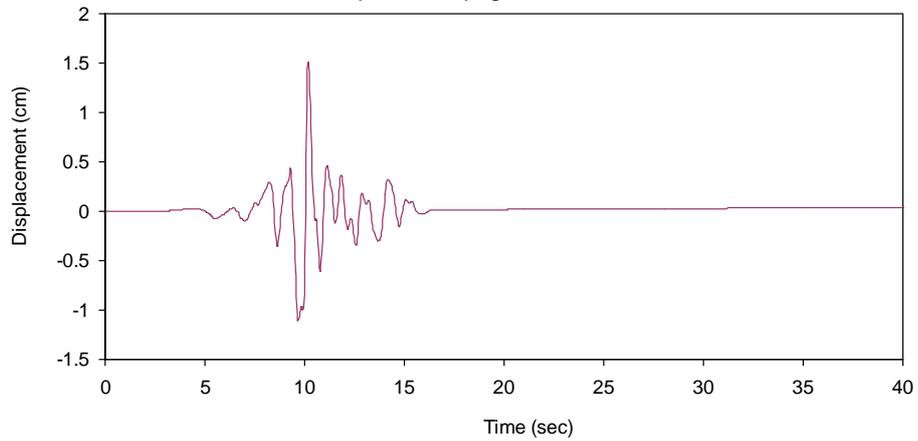




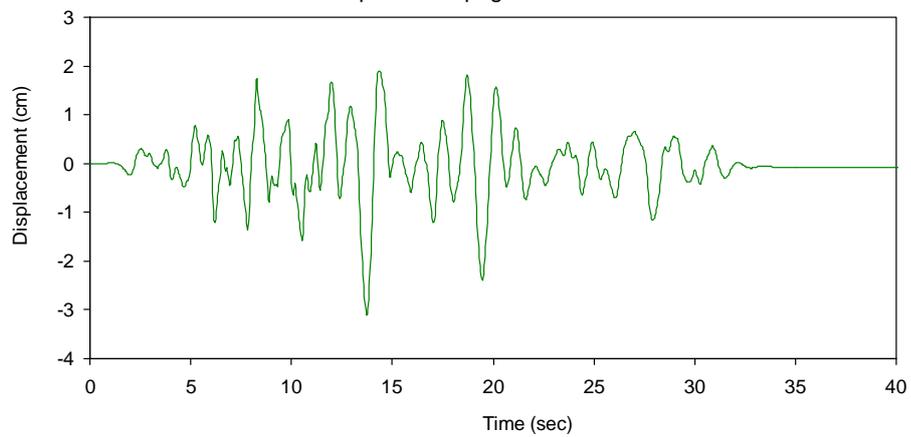
Time History of Displacement - Cesena 000046_xa_04007
piano campagna



Time History of Displacement - Cesena 000126_xa_04007
piano campagna



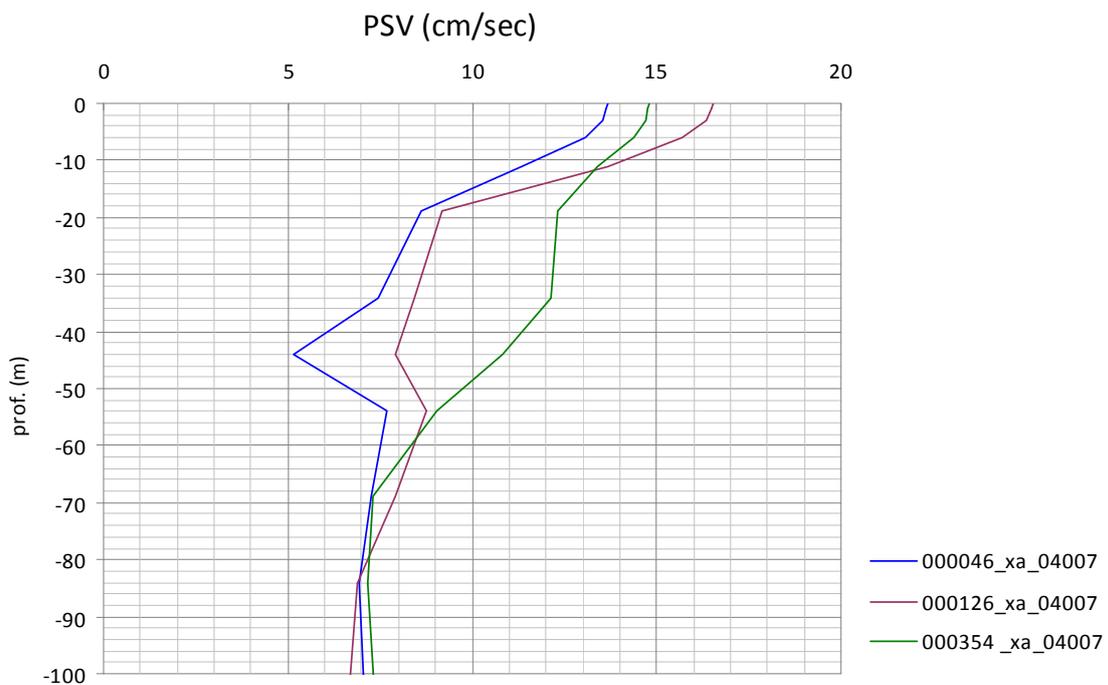
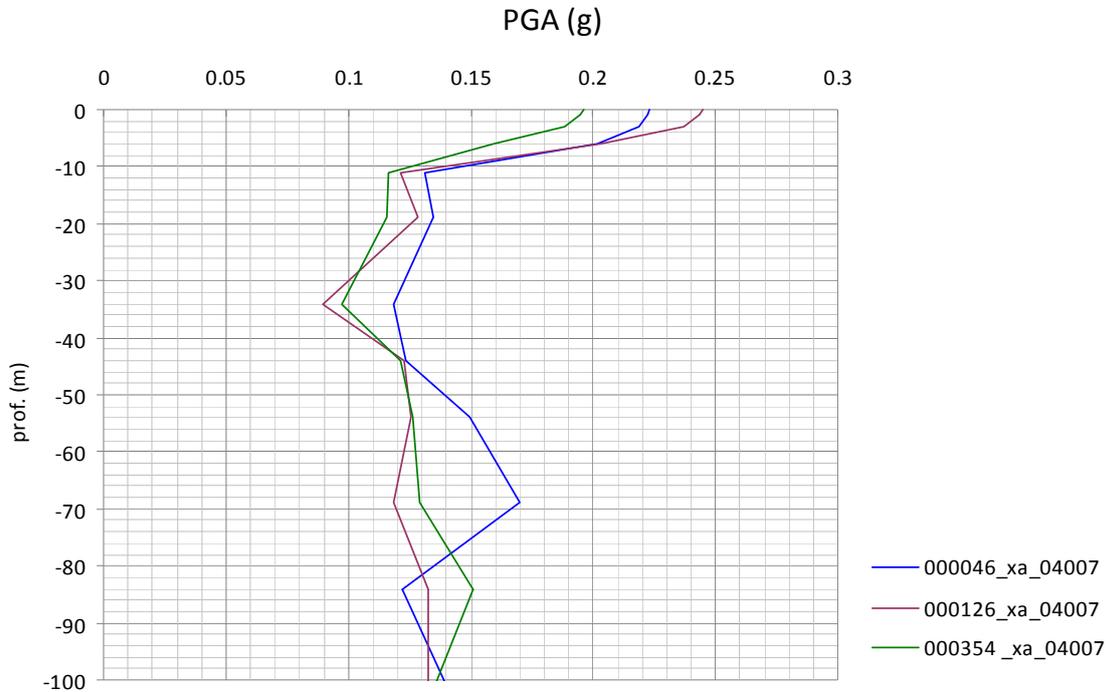
Time History of Displacement - Cesena 000354_xa_04007
piano campagna

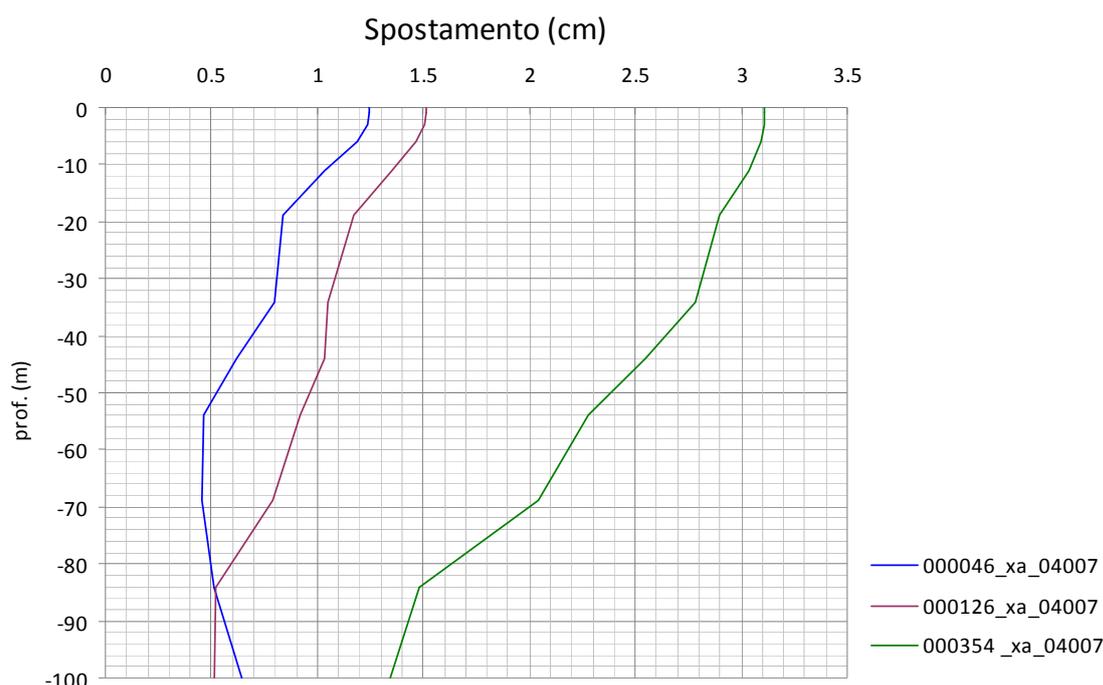




Relazione sismica integ. "NOVELLO"

I log della PGA/profondità, PSV/profondità e Spostamento/profondità per i tre sismi sono rappresentati nei grafici seguenti dove in ordinata è riportata la profondità (metri) ed in ascissa rispettivamente l'accelerazione (g), la velocità (cm/sec) e lo spostamento (cm).





I valori di accelerazione massima (PGA), di velocità massima (PGV), di massimo spostamento e di Intensità di Arias relativi alle quote di riferimento (p.c. e - 6.00 metri da p.c.), coerentemente alle esigenze progettuali delle prevedibili quote fondazionali, sono riportati nella sottostante tabella:

| Riferimento: Piano campagna | | | | |
|--|--------------|--------------|-------------------|---------------|
| sisma | PGA (g) | PGV (m/sec) | Displacement (cm) | ARIAS (m/sec) |
| 000046 RER | 0.223 | 0.137 | 1.2 | 0.583 |
| 000126 RER | 0.245 | 0.165 | 1.5 | 0.160 |
| 000354 RER | 0.196 | 0.148 | 3.1 | 0.699 |
| <i>media</i> | 0.221 | 0.150 | 1.93 | 0.481 |
| Riferimento: - 6 metri piano campagna | | | | |
| sisma | PGA (g) | PGV (m/sec) | Displacement (cm) | ARIAS (m/sec) |
| 000046 RER | 0.231 | 0.140 | 1.3 | 0.647 |
| 000126 RER | 0.258 | 0.169 | 1.5 | 0.174 |
| 000354 RER | 0.205 | 0.149 | 3.1 | 0.754 |
| <i>media</i> | 0.231 | 0.153 | 1.96 | 0.525 |



Oltre ai parametri sismici riportati nelle prime tre colonne la quarta colonna riporta l'intensità di Arias. L'intensità di Arias è un parametro integrale ottenuto come misura cumulativa del moto sismico durante la sua durata. Introducendo la funzione intensità del moto:

$$I(t) = \frac{\pi}{2g} \int_0^t a^2(\tau) d\tau$$

dove $a(t)$ è l'accelerazione al tempo t e g l'accelerazione di gravità, l'intensità di Arias è il valore massimo di tale funzione, ossia: $I_A = I(T_d)$ dove T_d è la durata totale dell'accelerogramma. Dimensionalmente l'intensità di Arias è una velocità.

Per i tre differenti sismi i valori del fattore di amplificazione (F_a) in termini di accelerazione (PGA/PGAo), posta PGAo pari a 0.195 g, sono i seguenti:

| | F_a (PGA/PGAo) | | |
|----------------|---------------------------------|-------------|-------------|
| | 000046 RER | 000126 RER | 000354 RER |
| Piano campagna | 1.14 | 1.26 | 1.01 |
| - 6 metri p.c. | 1.18 | 1.32 | 1.05 |

Lo spettro di risposta fornisce l'ampiezza massima della risposta (*in spostamento relativo, velocità relativa o accelerazione assoluta*) di un oscillatore armonico ad un grado di libertà (*gdl*) soggetto a un accelerogramma arbitrario in funzione del periodo strutturale T_n e del fattore di smorzamento ξ (*solitamente si adotta il valore standard pari a 5% dello smorzamento critico, normalmente applicabile alle strutture*).

Lo spettro di risposta di sito è rappresentato nei successivi grafici per i tre sismi di riferimento dove sono rappresentati l'accelerazione spettrale (PSA), la velocità spettrale (PSV) ed infine lo spettro degli spostamenti (PSD) per uno smorzamento (*damping*) $\xi = 5\%$. Nei diagrammi è riportato anche il valore medio dei suddetti parametri (PSA - PSV - PSD) per i tre sismi considerati mentre, per il solo diagramma PSA, è graficato anche lo spettro normalizzato della RER e lo spettro RER moltiplicato per un fattore $F_a = 1.5$. Quest'ultimo coefficiente ($F_a = 1.5$) corrisponde al fattore di amplificazione riferibile alla tipologia "ambito di pianura caratterizzato da profilo stratigrafico costituito da alternanze di sabbie e peliti, con spessori anche decametrici, talora con intercalazioni di orizzonti di ghiaie (di spessore anche decine di metri), con substrato profondo (≥ 100 m da p.c.) (PIANURA



2)" dell'allegato 2 della delibera RER 112/2007 per una V_{s30} pari a 300 m/sec caratteristica dei terreni in sito.

Ai fini dell'agevole lettura delle legende dei diagrammi che di seguito sono illustrati si precisa la corrispondenza tra le diverse diciture utilizzate per le sorgenti sismiche impiegate quale input del sistema nonché dei livelli stratigrafici di output:

EQ: 1 → MOTION 1 → sisma RER 000046xa_040007Cesena.xy;

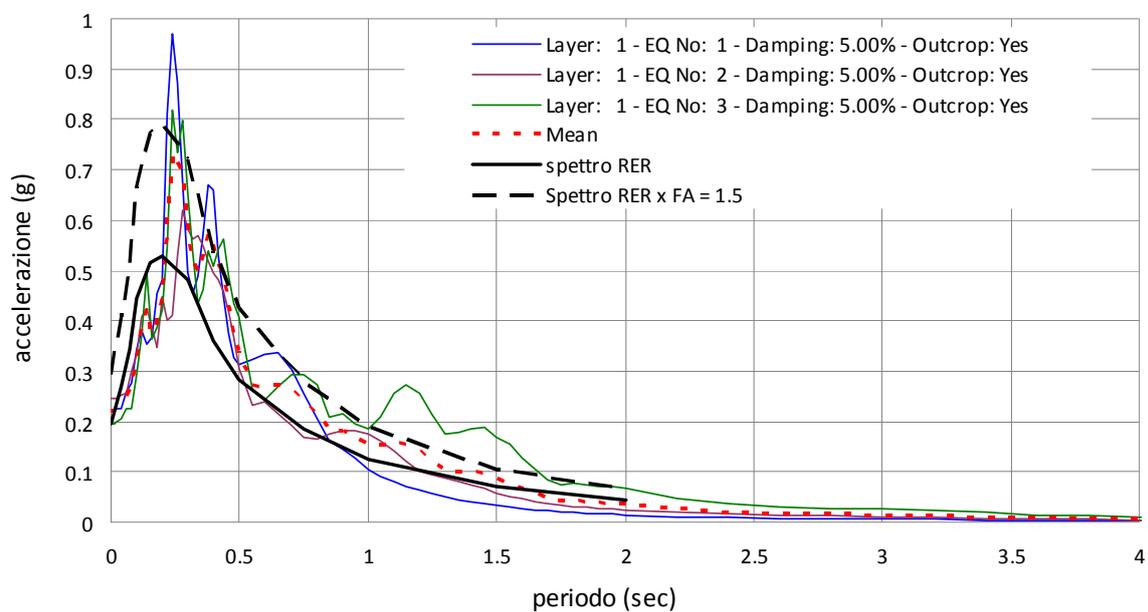
EQ: 2 → MOTION 2 → sisma RER 000046xa_040007Cesena.xy;

EQ: 3 → MOTION 3 → sisma RER 000046xa_040007Cesena.xy;

LAYER 1 → piano campagna;

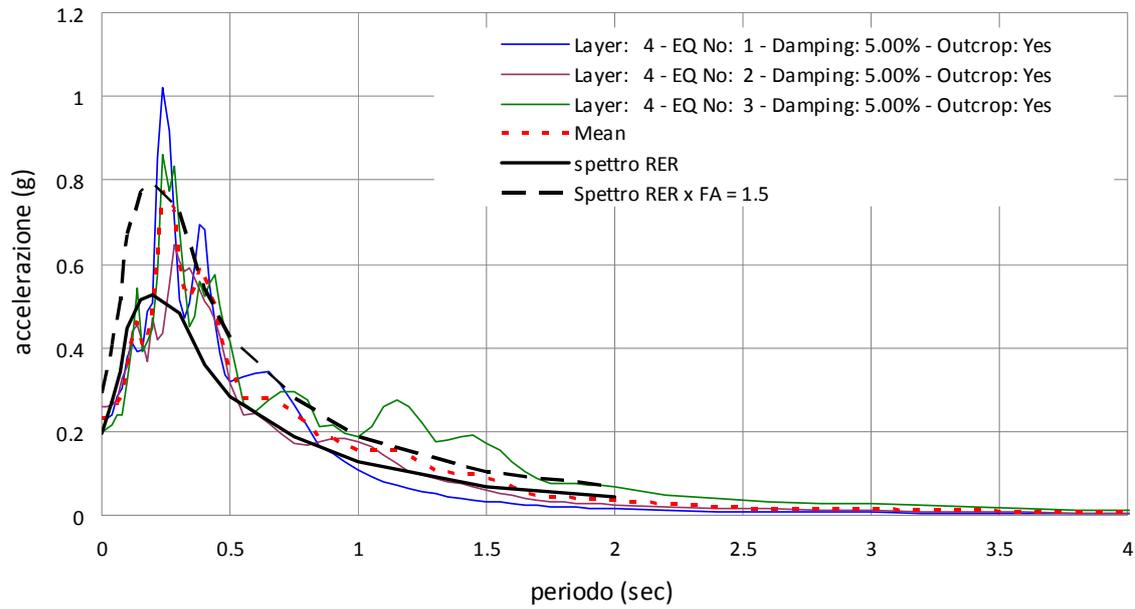
LAYER 4 → - 6 metri da piano campagna.

Spettro di risposta in accelerazione p.c.

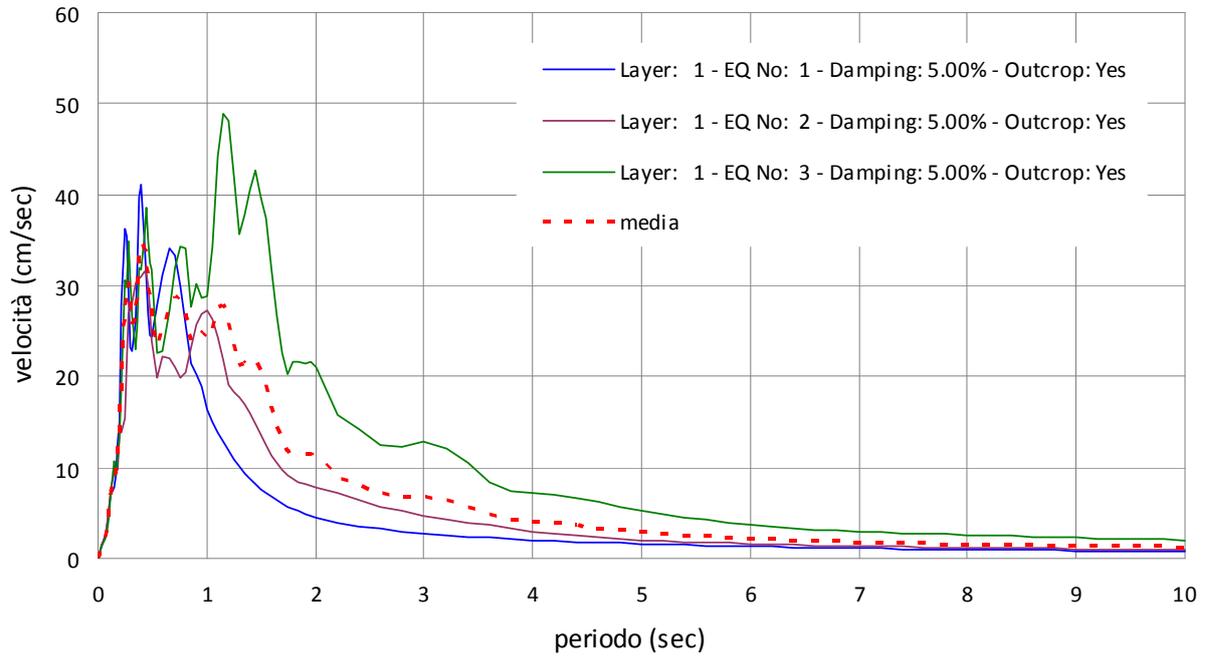




Spettro di risposta in accelerazione - 6 metri p.c.

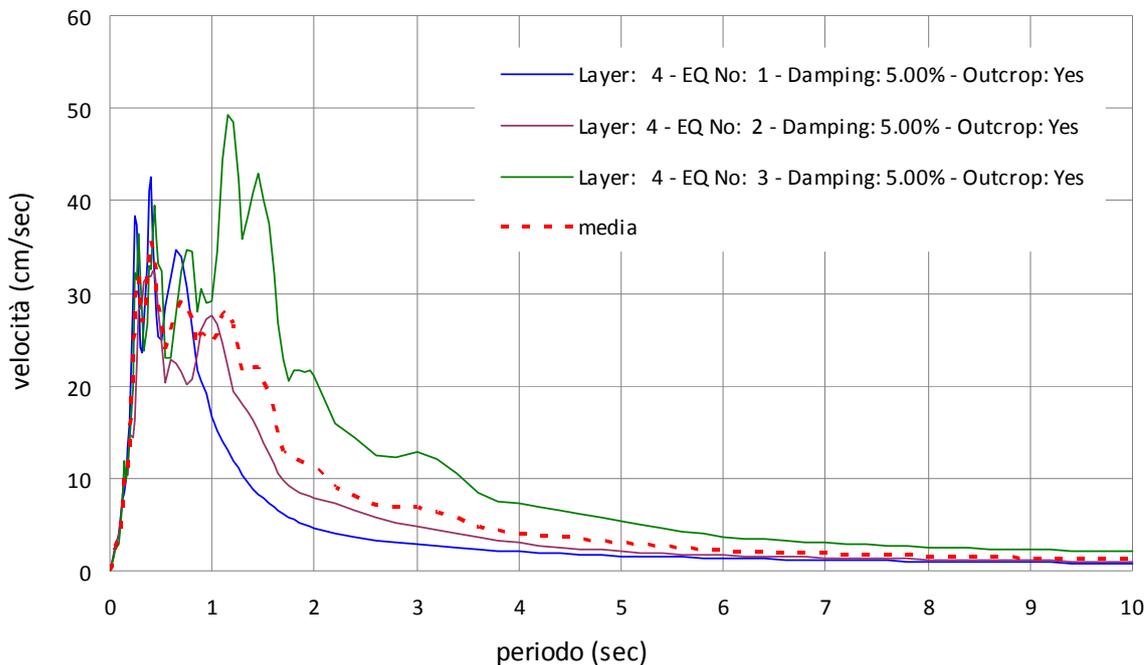


Spettro di risposta in velocità p.c.

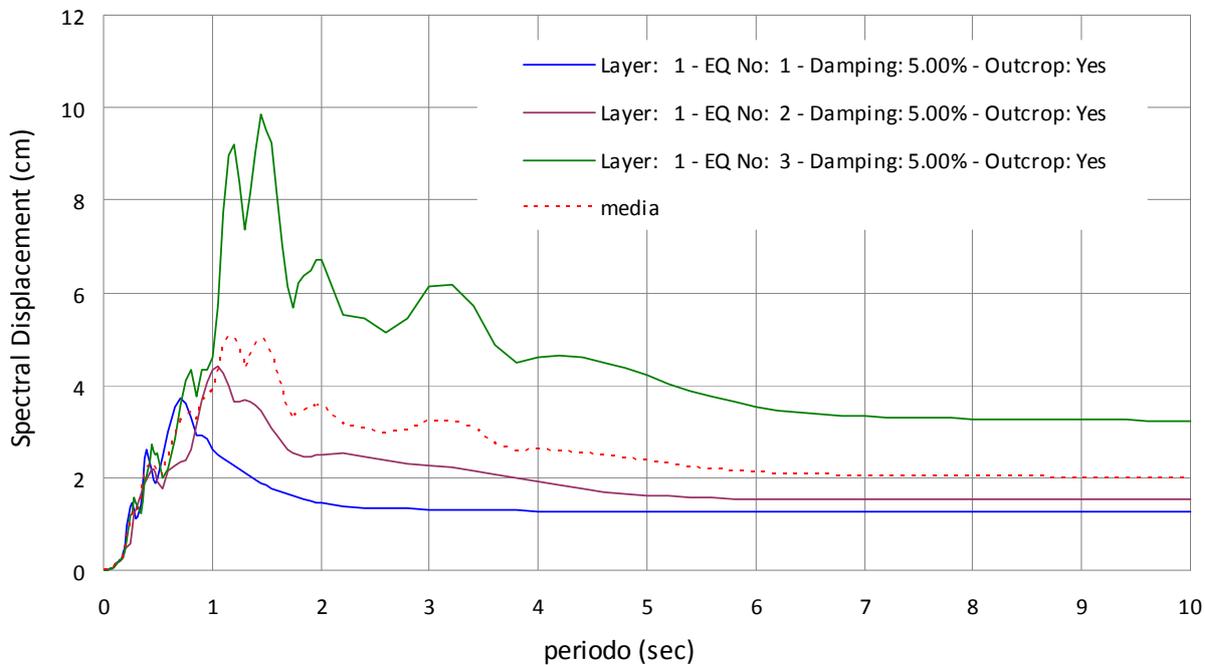




Spettro di risposta in velocità - 6 metri p.c.

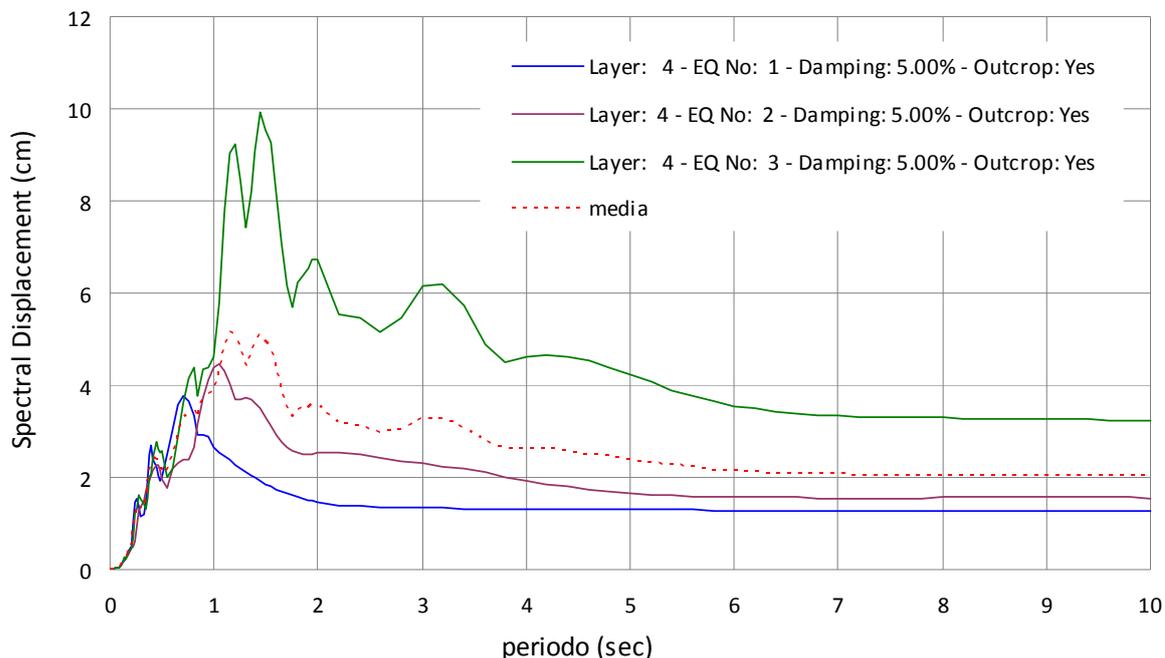


Spettro di risposta in spostamento p.c.





Spettro di risposta in spostamento - 6 metri p.c.



Gli spettri di risposta in accelerazione, velocità e spostamento non mostrano significative differenze tra i due livelli considerati (p.c. e -6 metri). I picchi massimi in accelerazione corrispondono al sisma impulsivo - 000046xa_040007Cesena.xy, e secondariamente al sisma con componente predominante alle alte frequenze - 000354xa_040007Cesena.xy.

Il valore massimo di accelerazione al suolo è pari a 0.97 g per un periodo $T = 0.24$ sec. Un secondo e terzo massimo al periodo $T = 0.24$ sec (0.81 g) e $T = 0.28$ sec (0.80 g) si collocano rispettivamente in coincidenza ed in prossimità del picco principale. Un quarto significativo picco, in quanto eccedente per intensità lo spettro regionale moltiplicato per il fattore di amplificazione ($F_a=1.5$), viene registrato a tempo $T = 0.38$ sec di intensità uguale a 0.67 g. Alla quota di - 6.00 metri dal p.c. il picco massimo si accerta per il medesimo periodo del livello superficiale ($T = 0.24$ sec) ma di intensità lievemente maggiore (1.02 g). Proporzionalmente maggiori rispetto al p.c. risultano anche il secondo e terzo picco rilevati alla quota -6.00 metri ($T = 0.24$ sec, $a = 0.86$ g; $T = 0.28$ sec, $a = 0.83$ g).

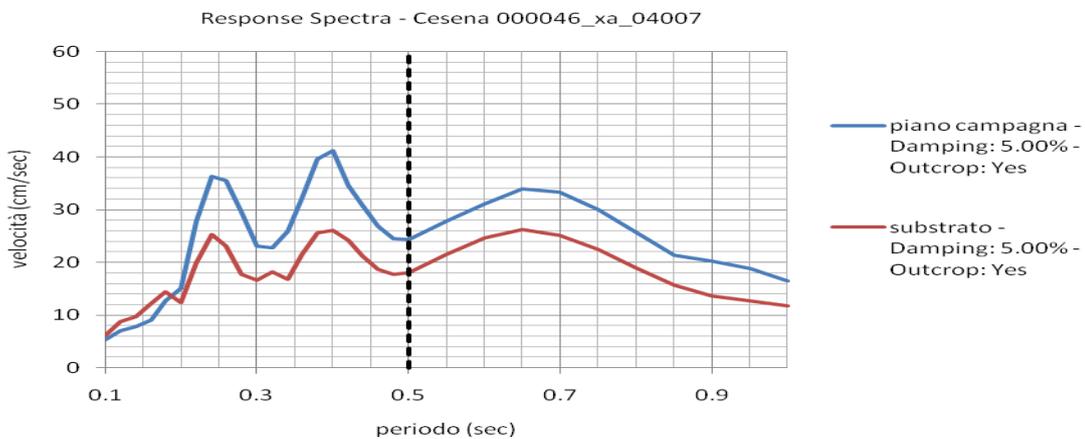
I valori mediati sui tre spettri in accelerazione alle due quote considerate mostrano un andamento circa corrispondente allo spettro regionale moltiplicato per un $F_a = 1.5$ anche se si nota una traslazione dei valori massimi verso valori in periodo leggermente più elevati rispetto a questo.

L'intensità di Housner (SI) costituisce un importante indicatore della pericolosità sismica ed è definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudo-velocità in un prefissato intervallo temporale ed è direttamente correlabile all'energia dissipata dalle strutture durante un terremoto costituendo espressione del possibile grado di danneggiamento subito

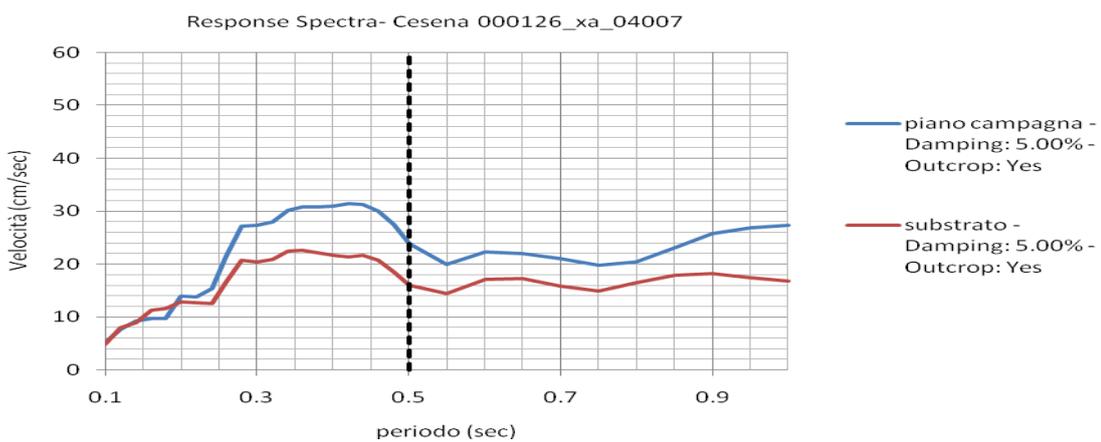


Relazione sismica integ. "NOVELLO"

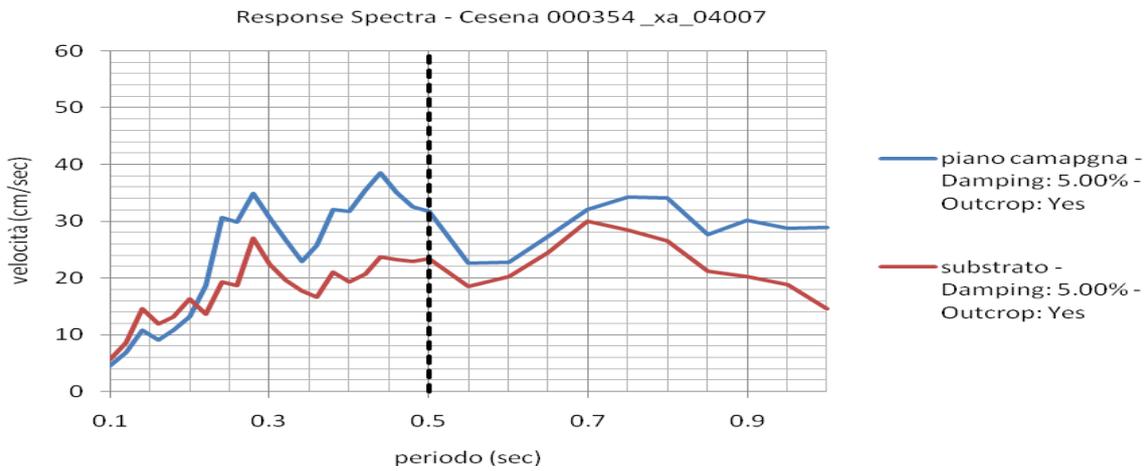
degli edifici. Il rapporto SI/SIo è inteso come rapporto tra l'intensità spettrale calcolata in un determinato intervallo del periodo sullo spettro di pseudovelocità del moto di riferimento e l'intensità spettrale del moto di input per lo stesso intervallo di periodo per un valore dello smorzamento critico del 5%, rappresentando una stima quantitativa della risposta locale nel dominio del tempo. Sono stati pertanto calcolati i valori dell'intensità di Housner per il moto di riferimento e quello di input ed i relativi rapporti per gli intervalli indicati dalla DAL 112/2007, ovvero per il periodo compreso tra 0.1 ÷ 0.5 sec e 0.5 ÷ 1 sec. Per chiarezza espositiva vengono affiancati in questa sezione oltre ai rapporti dell'intensità di Housner anche i fattori di amplificazione Fa espressi in termini di accelerazione (PGA/PGAo), precedentemente illustrati per le diverse combinazioni verificate (3 moti di input x 2 livelli).



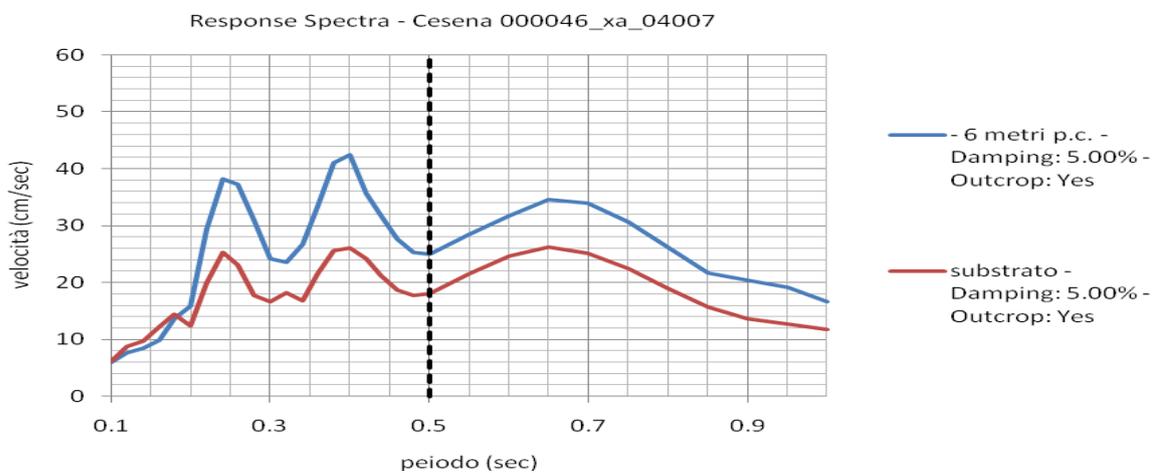
| | | Fattori di Amplificazione (Fa) | |
|----------|--|--------------------------------|-------------|
| PGA/PGAo | | 1.14 | |
| SI/SIo | | 0.1 < T < 0.5 | 0.5 < T < 1 |
| | | 1.37 | 1.34 |



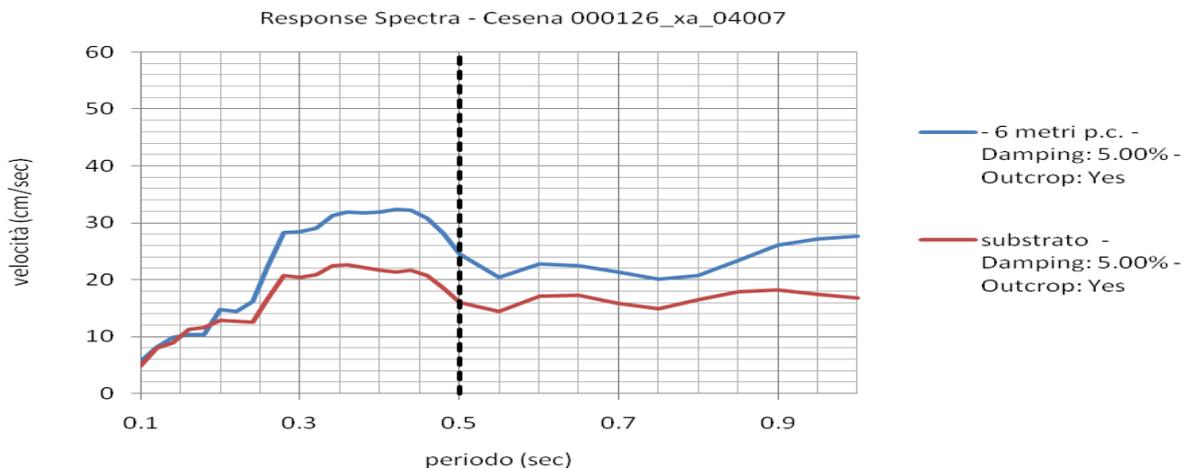
| | | Fattori di Amplificazione (Fa) | |
|----------|--|--------------------------------|-------------|
| PGA/PGAo | | 1.26 | |
| SI/SIo | | 0.1 < T < 0.5 | 0.5 < T < 1 |
| | | 1.31 | 1.37 |



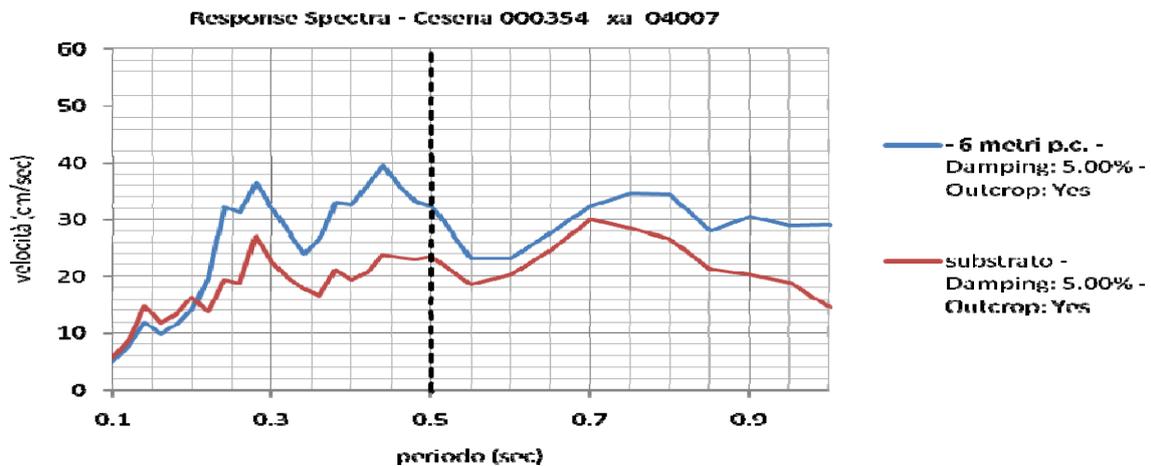
| Fattori di Amplificazione (Fa) | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| PGA/PGAo | 1.01 |
| SI/SIo | 0.1 < T < 0.5 0.5 < T < 1 |
| | 1.36 1.27 |



| Fattori di Amplificazione (Fa) | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| PGA/PGAo | 1.18 |
| SI/SIo | 0.1 < T < 0.5 0.5 < T < 1 |
| | 1.43 1.36 |



| Fattori di Amplificazione (Fa) | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| PGA/PGAo | 1.32 |
| SI/SIo | 0.1 < T < 0.5 0.5 < T < 1 |
| | 1.36 1.39 |



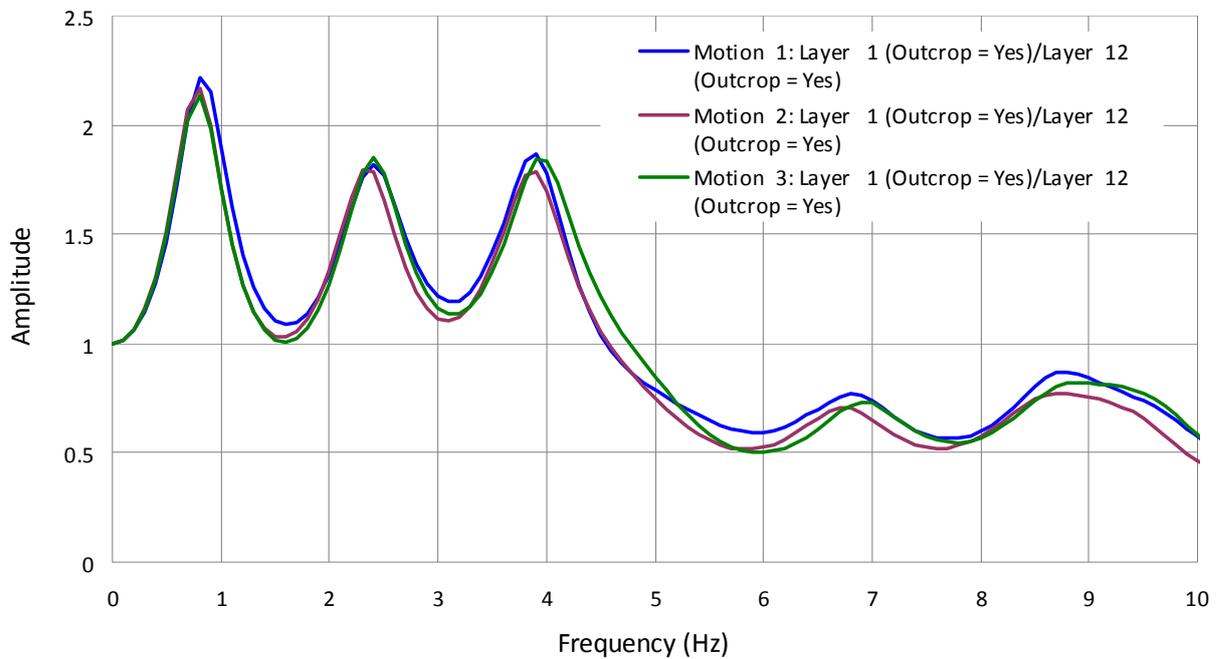
| Fattori di Amplificazione (Fa) | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| PGA/PGAo | 1.05 |
| SI/SIo | 0.1 < T < 0.5 0.5 < T < 1 |
| | 1.41 1.29 |

Da ultimo vengono nelle pagine seguenti graficate le funzioni di trasferimento relative ad ognuno dei tre input sismici di riferimento forniti dalla regione ER (impulsivo - 000046xa motion 1 - con ampio contenuto in frequenze 000126xa motion 2 - con componente predominante alle alte frequenze - 000354xa motion 3) per le due condizioni stratigrafiche considerate. La funzione di trasferimento altro non è che una funzione matematica

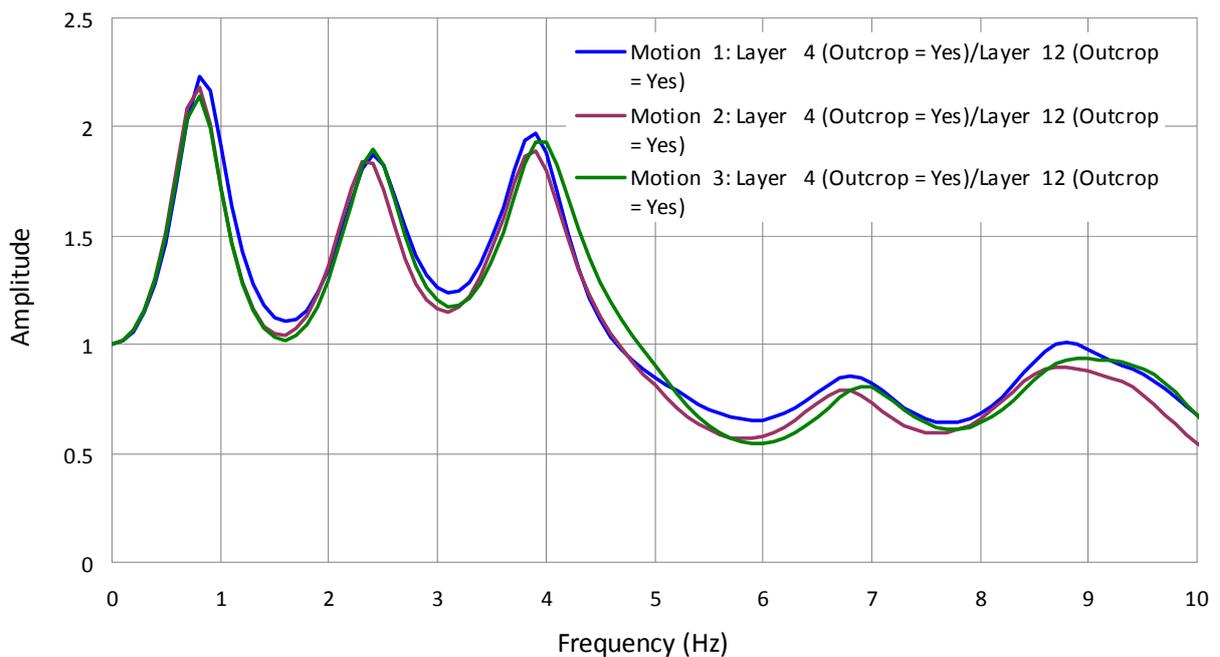


complessa calcolata come rapporto tra le ampiezze degli spettri di Fourier del moto sismico in superficie e alla base del deposito. Questa da conto dell'azione amplificante o smorzante che il deposito di sedimenti esercita su alcune (o tutte) componenti dell'evento di input applicato alla base del deposito.

Funzione di trasferimento in frequenza p.c.

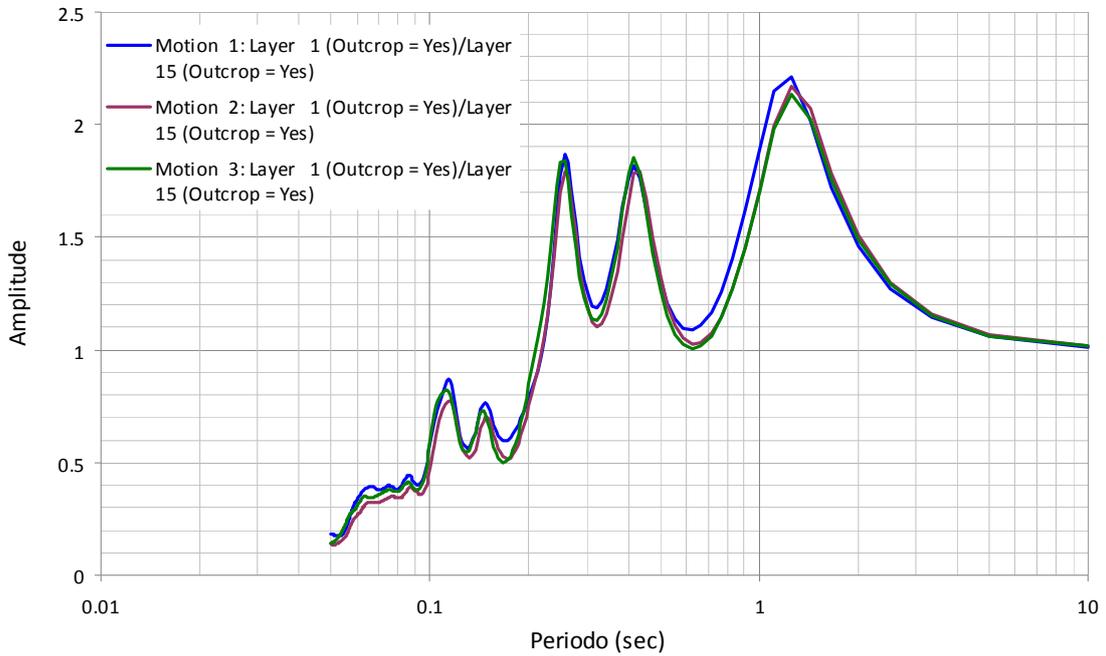


Funzione di trasferimento in frequenza - 6 metri p.c.

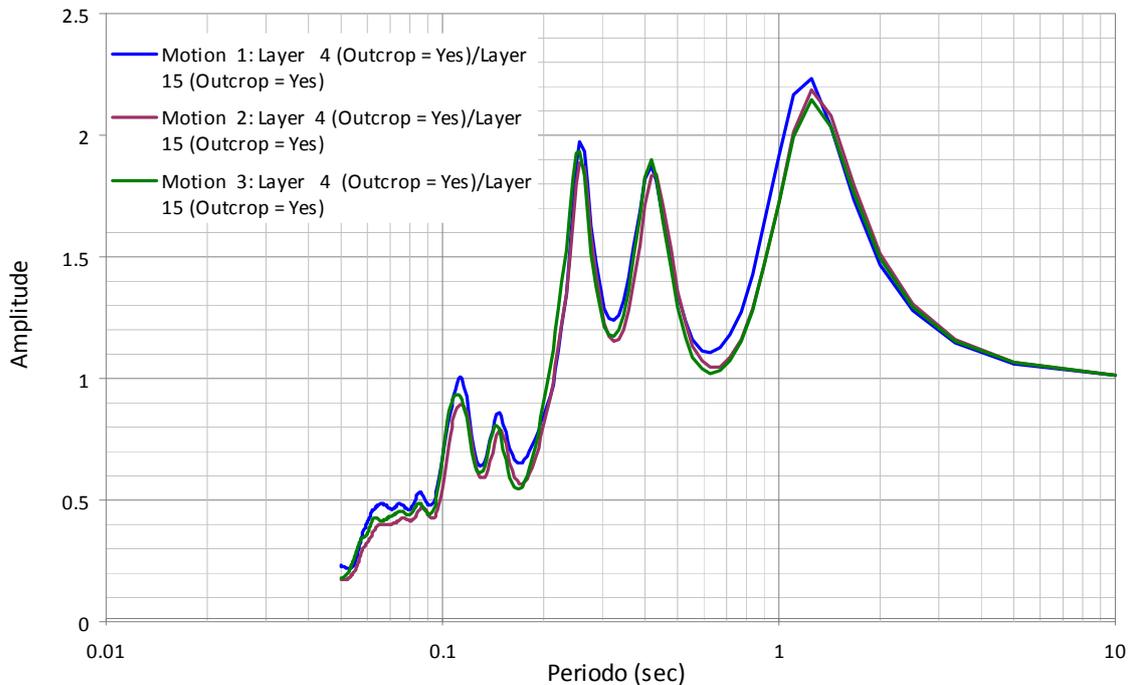




Funzione di trasferimento in periodo piano campagna



Funzione di trasferimento in periodo - 6 metri p.c.





I grafici relativi alle funzioni di trasferimento, espressi sia in frequenza che in periodo, mostrano un andamento simile per i tre sismi considerati e per entrambe le quote di analisi assunte (p.c. e - 6.00 metri). Il rapporto di amplificazione massima tra la base dell'input sismico ed il piano di campagna è pari a 2.21 alla frequenza di 0.8 Hz ($T = 1.25$ sec) e corrisponde al sisma impulsivo (000046xa_040007Cesena.xy). Un secondo e terzo massimo del rapporto di amplificazione tra substrato sismico e superficie sono pari a 1.87 alla frequenza di 3.9 Hz ($T = 0.26$ sec) e 1.85 alla frequenza di 2.4 Hz ($T = 0.42$ sec) derivati rispettivamente dai sismi RER impulsivo (000046xa_040007Cesena.xy) e con componente predominante alle alte frequenze (000354xa_040007Cesena.xy).

La funzione di trasferimento al livello sub-superficiale (-6.00 metri da p.c.) non mostra sostanziali differenze rispetto al p.c. dove il massimo rapporto di amplificazione in questo caso corrisponde a 2.23 alla medesima frequenza rilevata per il soprastante livello ($f = 0.8$ Hz - $T = 1.25$ sec). Il secondo e terzo massimo del rapporto di amplificazione a -6.00 metri dal p.c. corrispondono a 1.93 $f = 3.9$ Hz ($T=0.26$ sec) e 1.90 $f = 2.4$ Hz ($T = 0.42$ sec) mostrando amplificazioni di poco superiore a quanto atteso in superficie.

Il primo e terzo massimo del fattore di amplificazione si collocano in corrispondenza di frequenze molto prossime a quelle del primo e quarto massimo assoluto del rapporto H/V rilevati nella prova del rilievo dei microtremori TRO3 (1.09 e 4.0 Hz) accertando quindi una buona similarità tra rapporto H/V e funzione di trasferimento delle onde S per un dato sito (Nakamura 1989).



4. CONCLUSIONI

Le indagini suppletive che sono state condotte ad integrazione della precedente indagine del Dicembre 2009 hanno consentito una migliore definizione del comportamento sismico dei terreni interessati dall'intervento di riqualificazione urbana denominato NOVELLO, sito nel comune di Cesena, caratterizzando gli elementi utili alla definizione dei livelli di pericolosità sismica associata all'area, nell'ottica di una sua futura edificazione.

Le nuove ed integrative indagini sismiche condotte sull'area, costituite da tre misure dei microtremori, secondo la tecnica cosiddetta di Nakamura (HVSr), hanno innanzitutto chiarito le frequenze caratteristiche di risonanza dei terreni. Le stesse misure dei microtremori, dopo aver proceduto all'inversione delle curve H/V, hanno inoltre potuto confermare le grandezze di riferimento del parametro V_{s30} , utile ai fini della caratterizzazione della categoria del terreno di fondazione, già determinate nella precedente indagine redatta dallo scrivente nel Dicembre 2009. Sostanzialmente i valori delle V_{s30} dei terreni di fondazione che caratterizzano il PRU NOVELLO appartengono alla fascia superiore della categoria di suolo C con velocità che si attestano, in funzione dei livelli fondali considerati, attorno ai 300 m/sec. Le nuove indagini sismiche condotte sull'area portano infatti a ritenere una leggera sovrastima del valore della V_{s30} , precedentemente determinata attraverso le prove MASW (vedi indagine Dicembre 2009) perlomeno per le aree dove è stata effettuata l'inversione della curva H/V (prove TRO1 e TRO3), l'una coincidente all'ex Mercato Ortofrutticolo (Comparto 1) e l'altra presso il P.le Aldo Moro (Comparto 5). Pertanto i termini di raffronto dei parametri sismici calcolati per ciascuna delle aree verificate (PGA/PGAo - SI/SIo) faranno riferimento ai corrispondenti valori tabulati nell'allegato 2 della Delibera dell'Assemblea Legislativa della RER 112/2007 per la situazione geologica "PIANURA 2" e velocità delle V_{s30} pari a 300 metri al secondo.

Con riferimento alle nuove indagini promosse sull'ambito oggetto di riqualificazione si rappresenta come le misure dei microtremori, di cui la sottostante tabella riepiloga le frequenze corrispondenti ai massimi dei rapporti H/V, mostrano per ciascuno dei siti analizzati alcuni picchi caratteristici la cui ampiezza non appare comunque di marcata rilevanza.

| Verticali HVSr | Picchi H/V (Hz) | | | |
|---|-----------------|-------|-------|------|
| | I | II | III | IV |
| TRO1- Ex Mercato Ortofrutticolo Comparto 1 | 3.14 | 1.69 | 4.5 | 0.59 |
| TRO2 - Area ex Coop. Agrintesa Comparto 3 | 11.88 | 29.97 | 3.75 | 1.13 |
| TRO3 - P.le Aldo Moro Comparto 5 | 1.09 | 24.97 | 19.28 | 4.0 |



La valutazione dei massimi della curva H/V è un indicatore significativo delle possibili interferenze tra terreno ed opere e/o strutture di progetto in caso di sisma. E' necessario infatti porre attenzione ai fenomeni di risonanza come coincidenza tra il segnale di ingresso e di uscita, e le frequenze fondamentali del sito, ed alla possibile interazione tra il segnale sismico in uscita dal suolo e quelle dei manufatti (fenomeno della doppia risonanza). Si evidenzia, a tale proposito, che per un edificio in cemento armato senza particolari irregolarità o asimmetrie la frequenza fondamentale è approssimativamente pari a $f = 10/N$ dove N corrisponde al numero dei piani.

L'analisi della risposta sismica locale, effettuata mediante l'ausilio del software dedicato Proshake, utilizzando quale dato di input di tre sismi forniti dalla Regione Emilia Romagna, ha consentito la determinazione per via analitica dei parametri di scuotimento attesi al suolo ed a -6.00 metri di profondità dal p.c. per due siti specifici. Queste aree coincidono con le superfici di prevista realizzazione di altrettanti edifici di significativa rilevanza strutturale, il primo dei quali posto al bordo nord-occidentale del Comparto 1 nell'area dell'ex Mercato Ortofrutticolo ed un secondo ubicato all'interno del comparto 5 in corrispondenza dell'attuale parcheggio di P.le Aldo Moro (zona Stazione FF.SS.).

Una sintesi delle risultanze di calcolo per i due siti investigati, per le diverse combinazioni di input sismico e quota di riferimento, sono dettagliate nelle sottostanti tabelle dove sono distinti i valori dei fattori di amplificazione (Fa) sia in termini di accelerazione (PGA/PGAo) che di intensità di Housner (SI/SIo), ed i relativi valori mediati, sui tre sismi di riferimento.

| Ex Mercato Ortofrutticolo Comparto 1: piano campagna | | | |
|---|------------------|----------------|--------------|
| sisma | Fa (PGA/PGAo) | Fa (SI/SIo) | |
| | | 0.1 < To < 0.5 | 0.5 < To < 1 |
| 000046 RER | 1.23 | 1.67 | 1.82 |
| 000126 RER | 1.71 | 1.73 | 2.01 |
| 000354 RER | 1.28 | 1.58 | 1.89 |
| <i>media</i> | 1.41 | 1.66 | 1.91 |
| - 6 metri p.c. | | | |
| sisma | Fa (PGA/PGAo) | Fa (SI/SIo) | |
| | | 0.1 < To < 0.5 | 0.5 < To < 1 |
| 000046 RER | 1.32 | 1.77 | 1.87 |
| 000126 RER | 1.86 | 1.84 | 2.05 |
| 000354 RER | 1.38 | 1.68 | 1.93 |
| <i>media</i> | 1.52 | 1.76 | 1.95 |



| P.le Aldo Moro Comparto 5: piano campagna | | | |
|--|------------------|----------------|--------------|
| sisma | Fa (PGA/PGAo) | Fa (SI/SIo) | |
| | | 0.1 < To < 0.5 | 0.5 < To < 1 |
| 000046 RER | 1.14 | 1.37 | 1.34 |
| 000126 RER | 1.26 | 1.31 | 1.37 |
| 000354 RER | 1.01 | 1.36 | 1.27 |
| <i>media</i> | 1.14 | 1.35 | 1.33 |
| - 6 metri p.c. | | | |
| sisma | Fa (PGA/PGAo) | Fa (SI/SIo) | |
| | | 0.1 < To < 0.5 | 0.5 < To < 1 |
| 000046 RER | 1.18 | 1.43 | 1.36 |
| 000126 RER | 1.32 | 1.36 | 1.39 |
| 000354 RER | 1.05 | 1.41 | 1.29 |
| <i>media</i> | 1.18 | 1.40 | 1.35 |

Il confronto tra i fattori di amplificazione calcolati e quelli tabellari forniti dalla Regione Emilia Romagna nell'allegato 2 della Delibera dell'Assemblea Legislativa RER 112/2007 per la situazione geologica "PIANURA 2" e velocità delle V_{s30} pari a 300 metri al secondo (F.A. PGA = 1.5 - F.A. INTENSITA' SPETTRALE 0.1s < To < 0.5s = 1.7 - F.A. INTENSITA' SPETTRALE 0.5s < To < 1.0s = 2.3) mostra una sostanziale sovrastima dei parametri di pericolosità sismica locale forniti dalla RER per l'ambito generico di "PIANURA 2" e quello effettivo di sito.

In particolare per l'area Ex Mercato Ortofrutticolo - Comparto 1 - si riscontrano per le due quote di riferimento (p.c. e - 6.00 metri da p.c.) valori effettivi del FA PGA/PGAo all'incirca in linea con quello fornito dalla regione ER (FA PGA=1.5), rilevando un lieve scostamento per quanto concerne l'amplificazione al suolo dove il fattore PGA/PGAo calcolato assume un valore pari a 1.41. Relativamente al fattore di amplificazione dell'intensità spettrale, mentre per l'intervallo 0.1 sec < To < 0.5 sec si nota una sostanziale concordanza tra i due valori calcolati alle due quote di riferimento e quello tabulato (1.66 e 1.76 Vs. 1.70), più sensibile risulta la differenza per l'intervallo 0.5 sec < To < 1 sec dove al valore calcolato pari a 1.91, al piano campagna, e 1.95, a -6.00 metri dal p.c., si contrappone un corrispondente valore tabulato di 2.3.



Più netta e marcata risulta la differenza tra i valori calcolati ed i valori tabulati dei fattori di amplificazione, sia in termini di accelerazione che d'intensità spettrale, per quanto concerne il secondo sito analizzato, corrispondente al P.le Aldo Moro - Comparto 5. Qui si riscontra un blando effetto amplificante del deposito rispetto al bedrock sismico in quanto i Fattori di Amplificazione (PGA/PGAo) al suolo (1.14) ed alla profondità di 6 metri (1.18) risultano di entità molto inferiore a quello tabulato (1.5). Ancora più evidente è lo scostamento tra valori calcolati e corrispondenti valori definiti dalla DAL 112/2007 in termini di rapporti dell'Intensità di Housner. Nell'intervallo spettrale $0.1 \text{ sec} < T_0 < 0.5 \text{ sec}$ a valori calcolati di 1.35 e 1.40, rispettivamente per il p.c. ed a -6 metri di profondità, si contrappone un valore tabulato di 1.7. Infine per l'intervallo spettrale $0.5 \text{ sec} < T_0 < 1 \text{ sec}$ i valori calcolati risultano compresi tra 1.33 e 1.35, per le due quote di output, contro un valore indicato dall'allegato 2 della DAL 112/2007 pari a 2.3.

Gli spettri calcolati di risposta in accelerazione mostrano una buona sovrapposizione allo spettro proposto dal Servizio Geologico e dei Suoli della RER regionale anche se si nota una traslazione dei valori massimi verso periodi leggermente più elevati rispetto a questo.

Per l'area Ex Mercato Ortofrutticolo - Comparto 1 - il valore massimo di accelerazione al suolo è pari a 0.97 g per un periodo $T = 0.28 \text{ sec}$ seguono due picchi minori (0.88 g - $T=0.38 \text{ sec}$ e 0.85 g - $T=0.24 \text{ sec}$) posti all'incirca intorno allo stesso intervallo mentre si rileva un picco di 0.51 g al periodo $T=0.7$. Lo spettro di accelerazione alla profondità di 6 metri mostra il suo massimo di 1.03 g sempre al periodo $T=0.28 \text{ sec}$.

Relativamente all'area P.le Aldo Moro - Comparto 5 - lo spettro di risposta in accelerazione mostra un massimo al suolo pari a 0.97 g per un periodo $T = 0.24 \text{ sec}$. Un secondo e terzo massimo al periodo $T = 0.24 \text{ sec}$ (0.81 g) e $T = 0.28 \text{ sec}$ (0.80 g) si collocano rispettivamente in coincidenza ed in prossimità del picco principale. Un quarto significativo picco, in quanto eccedente per intensità lo spettro regionale, viene registrato al tempo $T = 0.38 \text{ sec}$ di intensità uguale a 0.67 g. Alla quota di - 6.00 metri dal p.c. il picco massimo si accerta per il medesimo periodo del livello superficiale ($T = 0.24$) ma di intensità lievemente maggiore (1.02 g). Proporzionalmente maggiori rispetto al p.c. risultano anche il secondo e terzo picco rilevati alla quota -6.00 metri ($T=0.24 \text{ sec}$, $a=0.86 \text{ g}$; $T =0.28 \text{ sec}$, $a=0.83 \text{ g}$).

La funzione di trasferimento mostra rapporti massimi di amplificazione mediamente di poco superiore a 2 con valori variabili tra un massimo assoluto di 2.68 ed un minimo di 1.85 compresi nell'intervallo tra 0.8 Hz e 3.9 Hz. Nella sottostante tabella sono riportati tutti i massimi significativi della funzione di trasferimento per le diverse combinazioni considerate. Si noti come talune delle frequenze corrispondenti ai massimi della funzione di trasferimento coincidano all'incirca con le frequenze dei massimi del rapporto H/V misurate attraverso le



prove sismiche HVSR effettuate in loco a parziale conferma della similarità tra valore del rapporto H/V e funzione di trasferimento delle onde S (Nakamura 1989).

| Comparti NOVELLO | Quote (m) | Funzione di trasferimento rapporti di amplificazione | | |
|--|-----------|--|-------------------------|-------------------------|
| | | I | II | III |
| Ex Mercato Ortofrutticolo Comparto 1 | p.c. | 2.54 f=2.9 Hz | 2.16 f=1.2 Hz | / |
| | -6 | 2.68 f=2.9 Hz | 2.20 f=1.2 Hz | / |
| P.le Aldo Moro Comparto 5 | p.c. | 2.21 f=0.8 Hz | 1.87 f=3.9 Hz | 1.85 f=2.4 Hz |
| | -6 | 2.23 f=0.8 Hz | 1.93 f=3.9 Hz | 1.90 f=2.4 Hz |

A conclusione delle analisi di risposta sismica locale effettuate si può affermare che le due aree sottoposte alle verifiche di III livello non riscontano particolari ed acute condizioni di amplificazione sismica. I parametri calcolati di amplificazione, sia in termini di accelerazione che di intensità spettrale, indicano valori da poco inferiori, per l'area Ex Mercato Ortofrutticolo - Comparto 1 -, a nettamente inferiori, per l'area P.le Aldo Moro - Comparto 5 -, rispetto ai valori tabellari di PGA/PGAo e SI/SIo richiamati nell'allegato 2 della delibera RER 112/2007 per una V_{s30} pari a 300 m/sec del cosiddetto "ambito di pianura caratterizzato da profilo stratigrafico costituito da alternanze di sabbie e peliti, con spessori anche decametrici, talora con intercalazioni di orizzonti di ghiaie, con substrato profondo (≥ 100 m da p.c.) (PIANURA 2)" che meglio approssima e ben identifica l'assetto litostratigrafico delle aree investigate.

Cesena, maggio 2011

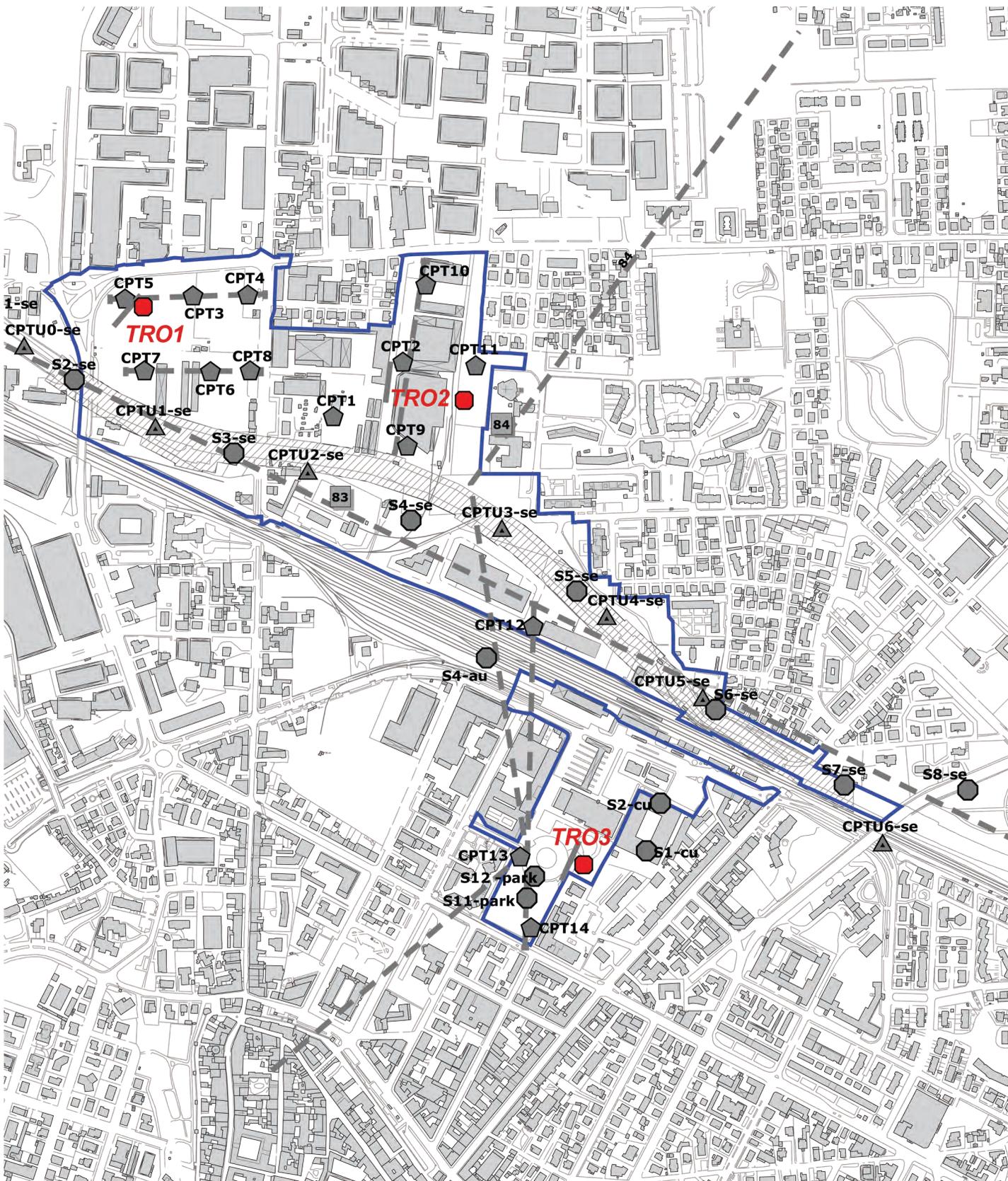
Geologo
Dott. Alessandro Biondi



ALLEGATI:

- TAVOLA 1 – UBICAZIONE PROVE MICROTREMORI HVSR (APRILE 2011);
- OUTPUT MISURA DEI MICROTREMORI AREA EX MERCATO ORTOFRUTTICOLO COMPARTO 1 - TRO1;
- OUTPUT MISURA DEI MICROTREMORI AREA COOP. AGRINTESA COMPARTO 3 - TRO2;
- OUTPUT MISURA DEI MICROTREMORI AREA P.LE ALDO MORO COMPARTO 5 - TRO3.

Tavola 1 - Ubicazione prove HVSR



Legenda

Scala 1:7500

Indagini aprile 2011

● Prove HVSR

Indagini dicembre 2009

▲ Profili MASW

▲ Pentrometrie con piezocono

● Sondaggi

◆ Statiche

▲ Tracce sezioni

□ perimetro Novello

■ edifici

▨ Fascia secante

NOVELLO – Ex MERCATO ORTOFRUTTICOLO COMPARTO 1 – Prova TRO1

Strumento: TRZ-0112/01-10

Inizio registrazione: 16/04/11 07:53:29 Fine registrazione: 16/04/11 08:13:30

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

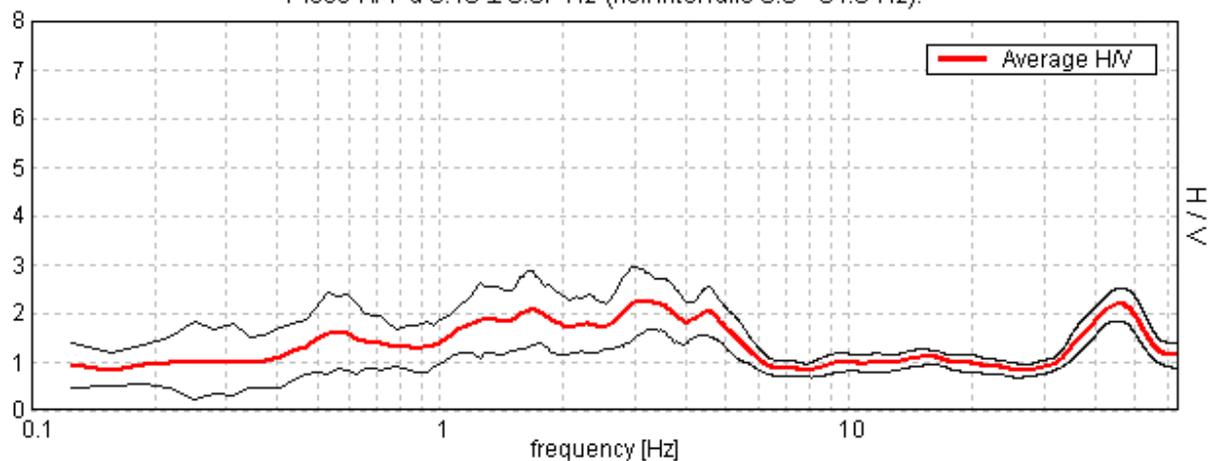
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

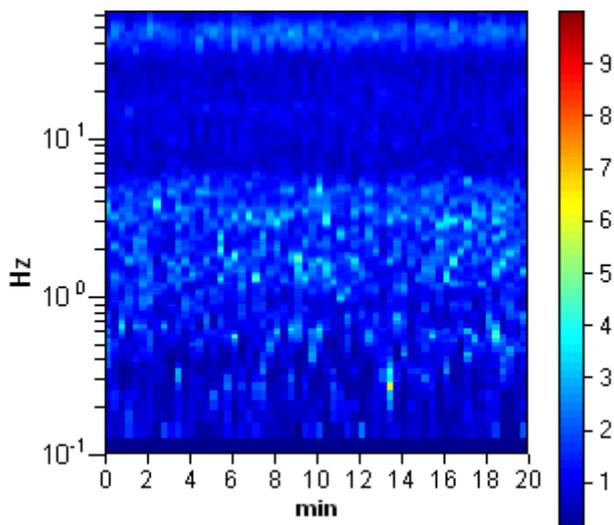
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

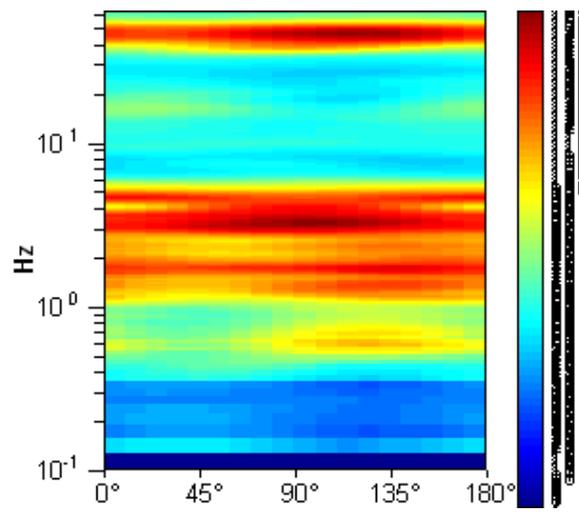
Picco H/V a 3.13 ± 0.07 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



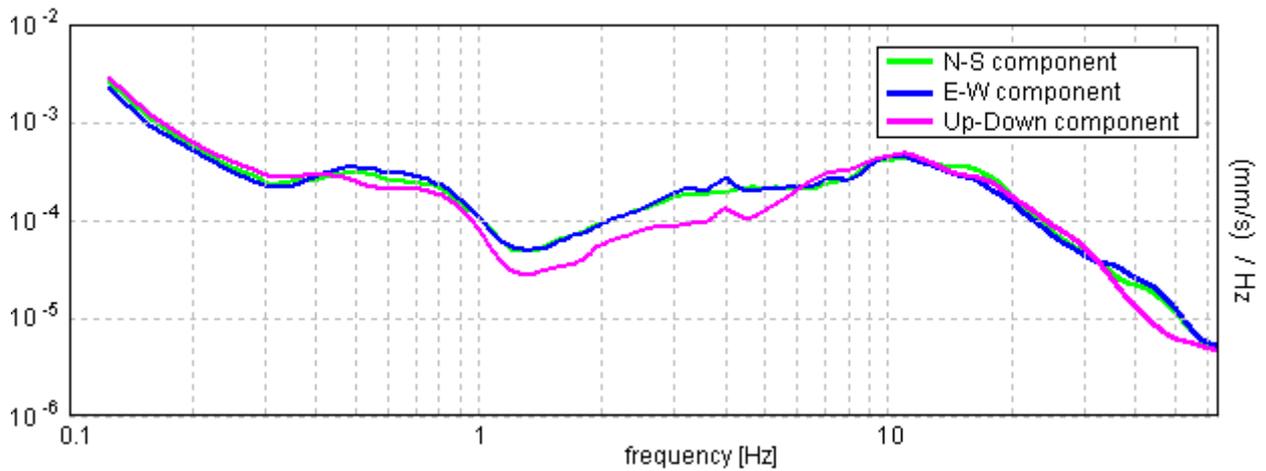
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V

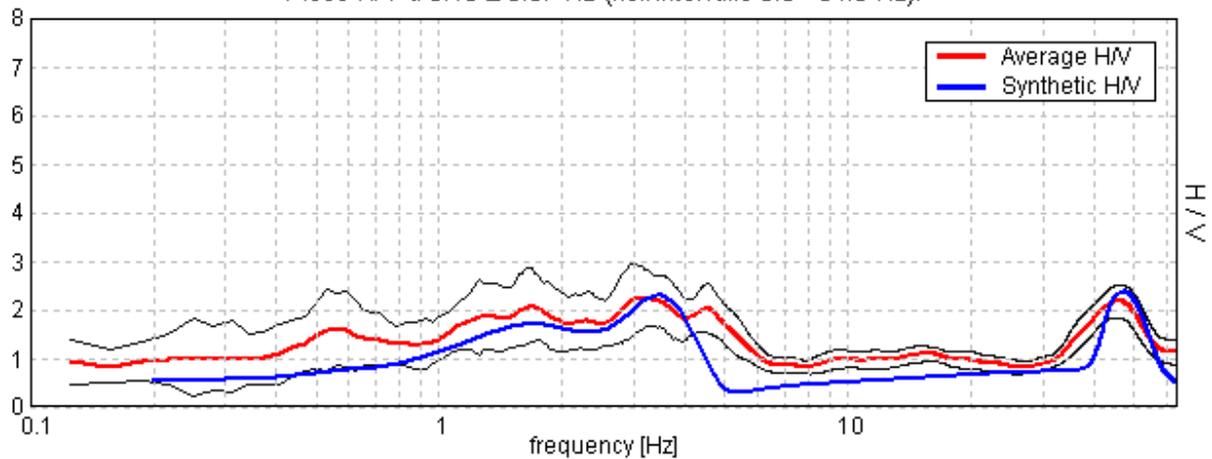


SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

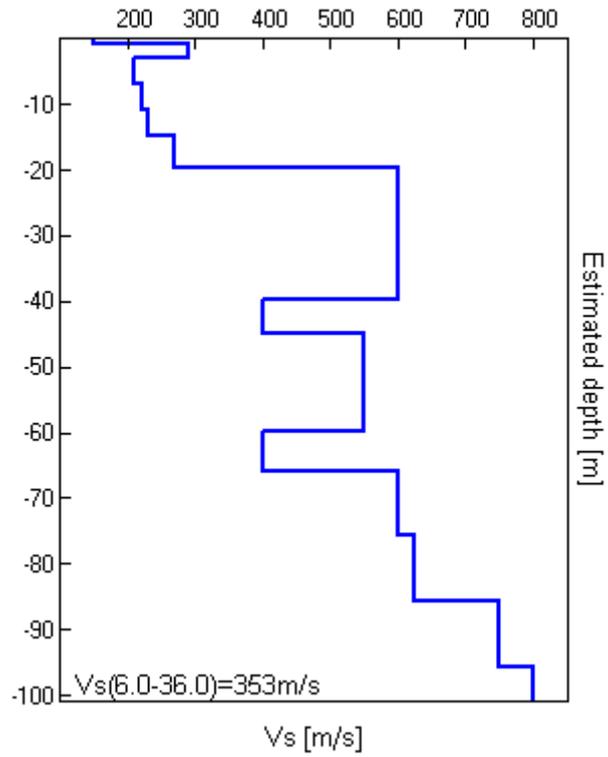


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO

Picco H/V a 3.13 ± 0.07 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] | Rapporto di Poisson |
|---------------------------------------|--------------|----------|---------------------|
| 0.90 | 0.90 | 150 | 0.35 |
| 2.80 | 1.90 | 290 | 0.35 |
| 6.80 | 4.00 | 210 | 0.35 |
| 10.80 | 4.00 | 220 | 0.35 |
| 14.80 | 4.00 | 230 | 0.35 |
| 19.80 | 5.00 | 270 | 0.35 |
| 39.80 | 20.00 | 600 | 0.35 |
| 44.80 | 5.00 | 400 | 0.35 |
| 59.80 | 15.00 | 550 | 0.35 |
| 65.80 | 6.00 | 400 | 0.35 |
| 75.80 | 10.00 | 600 | 0.35 |
| 85.80 | 10.00 | 625 | 0.35 |
| 95.80 | 10.00 | 750 | 0.35 |
| inf. | inf. | 800 | 0.35 |



$V_s(0.0-30.0)=292\text{m/s}$
 $V_s(1.0-31.0)=306\text{m/s}$
 $V_s(3.0-33.0)=319\text{m/s}$
 $V_s(6.0-36.0)=353\text{m/s}$

[Secondo le linee guida SESAME, 2005].

Picco H/V a 3.13 ± 0.07 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

| | | | |
|--|-------------------------|----|--|
| $f_0 > 10 / L_w$ | $3.13 > 0.50$ | OK | |
| $n_c(f_0) > 200$ | $3750.0 > 200$ | OK | |
| $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Superato 0 volte su 151 | OK | |

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

| | | | |
|--|---------------------|----|----|
| Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | | | NO |
| Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | 5.938 Hz | OK | |
| $A_0 > 2$ | $2.24 > 2$ | OK | |
| $f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.01108 < 0.05$ | OK | |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | $0.03463 < 0.15625$ | OK | |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ | $0.3277 < 1.58$ | OK | |

| | |
|------------------------|---|
| L_w | lunghezza della finestra |
| n_w | numero di finestre usate nell'analisi |
| $n_c = L_w n_w f_0$ | numero di cicli significativi |
| f | frequenza attuale |
| f_0 | frequenza del picco H/V |
| σ_f | deviazione standard della frequenza del picco H/V |
| $\varepsilon(f_0)$ | valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ |
| A_0 | ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0 |
| $A_{H/V}(f)$ | ampiezza della curva H/V alla frequenza f |
| f^- | frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$ |
| f^+ | frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$ |
| $\sigma_A(f)$ | deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa |
| $\sigma_{\log H/V}(f)$ | deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$ |
| $\theta(f_0)$ | valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$ |

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$

| Intervallo di freq. [Hz] | < 0.2 | 0.2 - 0.5 | 0.5 - 1.0 | 1.0 - 2.0 | > 2.0 |
|---|------------|-----------|------------|------------|------------|
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz] | $0.25 f_0$ | $0.2 f_0$ | $0.15 f_0$ | $0.10 f_0$ | $0.05 f_0$ |
| $\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$ | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.78 | 1.58 |
| $\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$ | 0.48 | 0.40 | 0.30 | 0.25 | 0.20 |

NOVELLO - COOP. AGRINTESA COMPARTO 3 – Prova TRO2

Strumento: TRZ-0112/01-10

Inizio registrazione: 19/04/11 20:05:45 Fine registrazione: 19/04/11 20:25:46

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

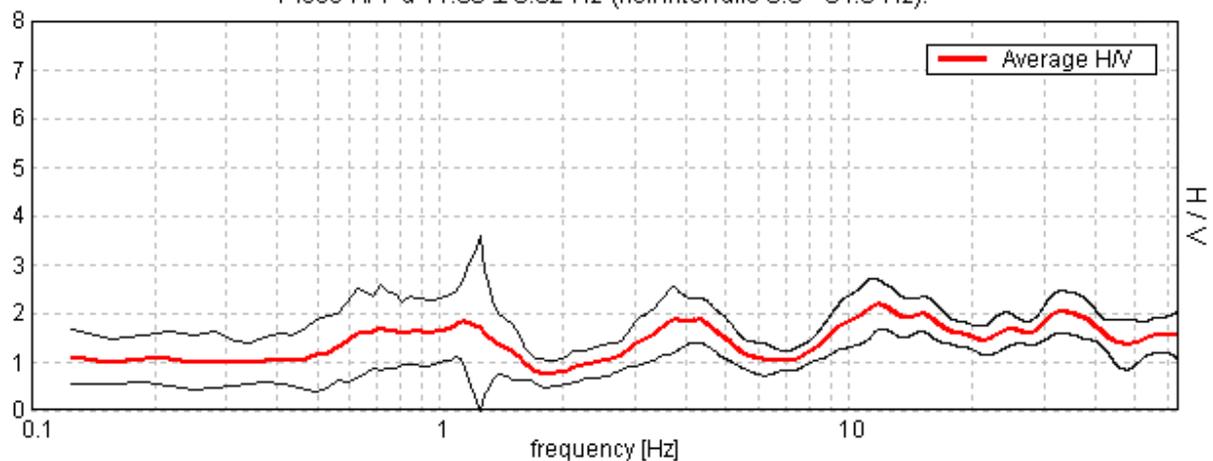
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

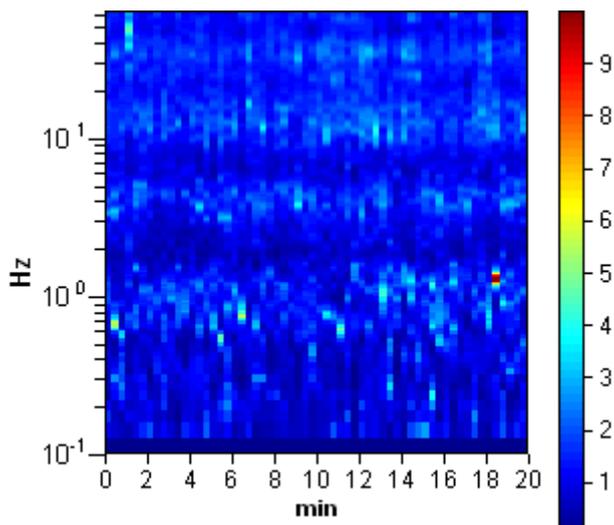
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

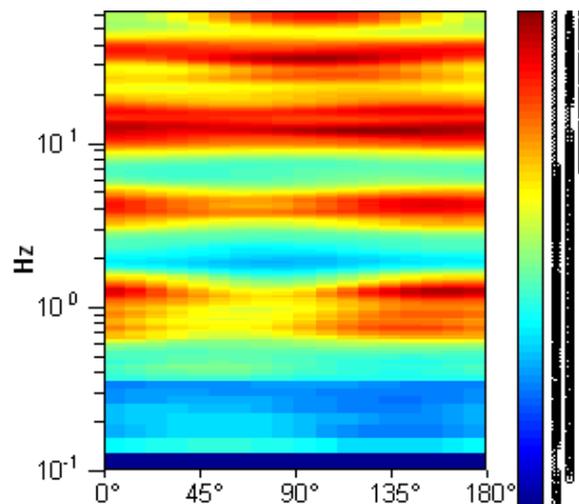
Picco H/V a 11.88 ± 0.82 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



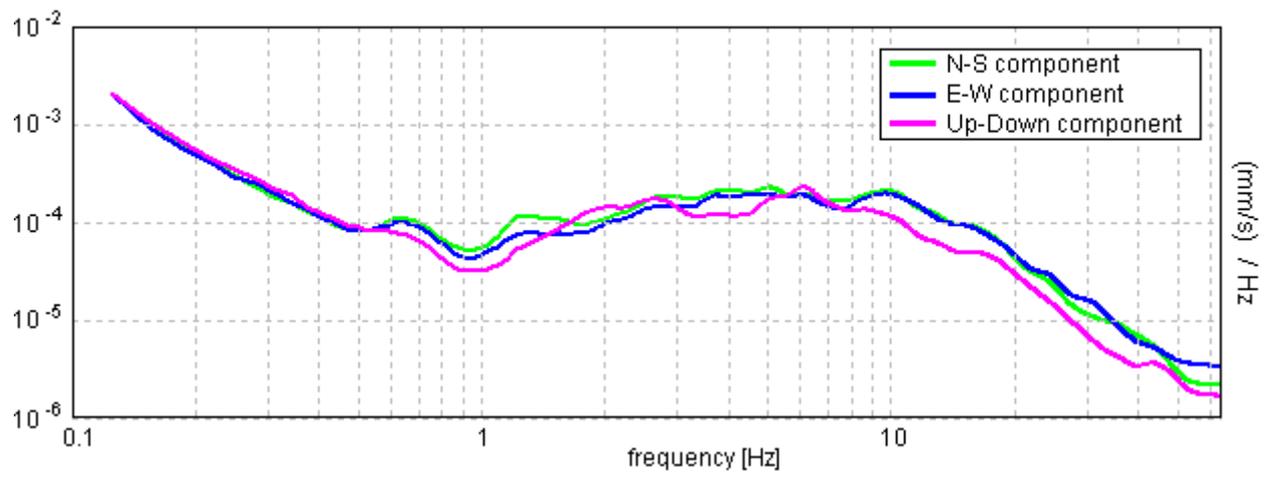
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



[Secondo le linee guida SESAME, 2005].

Picco H/V a 11.88 ± 0.82 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

| | | | |
|--|-------------------------|----|--|
| $f_0 > 10 / L_w$ | 11.88 > 0.50 | OK | |
| $n_c(f_0) > 200$ | 14250.0 > 200 | OK | |
| $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Superato 0 volte su 571 | OK | |

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

| | | | |
|--|--------------------|----|----|
| Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | 7.563 Hz | OK | |
| Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | | | NO |
| $A_0 > 2$ | 2.17 > 2 | OK | |
| $f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.03431 < 0.05$ | OK | |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | 0.40747 < 0.59375 | OK | |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ | 0.2465 < 1.58 | OK | |

| | |
|------------------------|---|
| L_w | lunghezza della finestra |
| n_w | numero di finestre usate nell'analisi |
| $n_c = L_w n_w f_0$ | numero di cicli significativi |
| f | frequenza attuale |
| f_0 | frequenza del picco H/V |
| σ_f | deviazione standard della frequenza del picco H/V |
| $\varepsilon(f_0)$ | valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ |
| A_0 | ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0 |
| $A_{H/V}(f)$ | ampiezza della curva H/V alla frequenza f |
| f^- | frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$ |
| f^+ | frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$ |
| $\sigma_A(f)$ | deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa |
| $\sigma_{\log H/V}(f)$ | deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$ |
| $\theta(f_0)$ | valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$ |

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$

| Intervallo di freq. [Hz] | < 0.2 | 0.2 - 0.5 | 0.5 - 1.0 | 1.0 - 2.0 | > 2.0 |
|---|------------|-----------|------------|------------|------------|
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz] | 0.25 f_0 | 0.2 f_0 | 0.15 f_0 | 0.10 f_0 | 0.05 f_0 |
| $\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$ | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.78 | 1.58 |
| $\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$ | 0.48 | 0.40 | 0.30 | 0.25 | 0.20 |

NOVELLO - P.LE ALDO MORO COMPARTO 5 – Prova TRO3

Strumento: TRZ-0112/01-10

Inizio registrazione: 17/04/11 08:13:53 Fine registrazione: 17/04/11 08:33:54

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

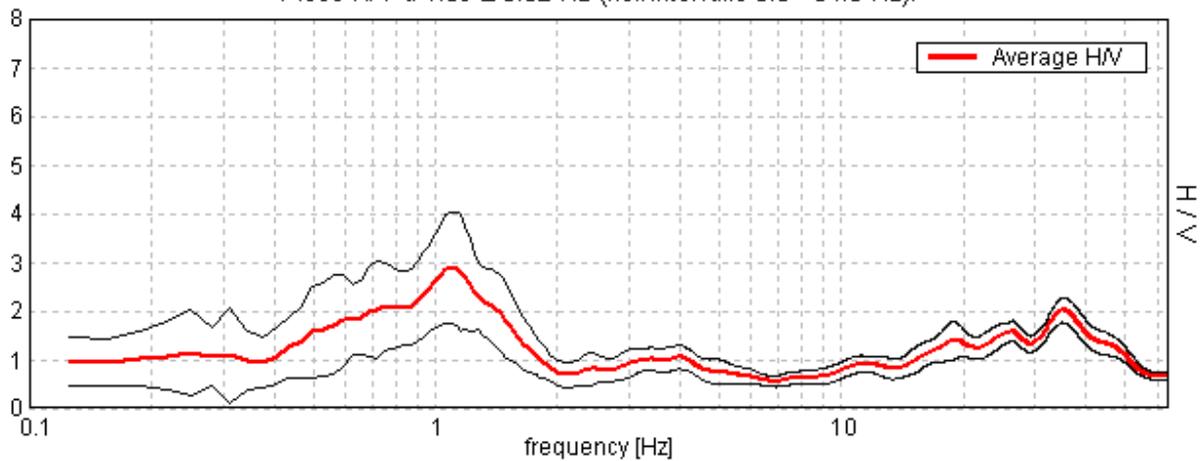
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

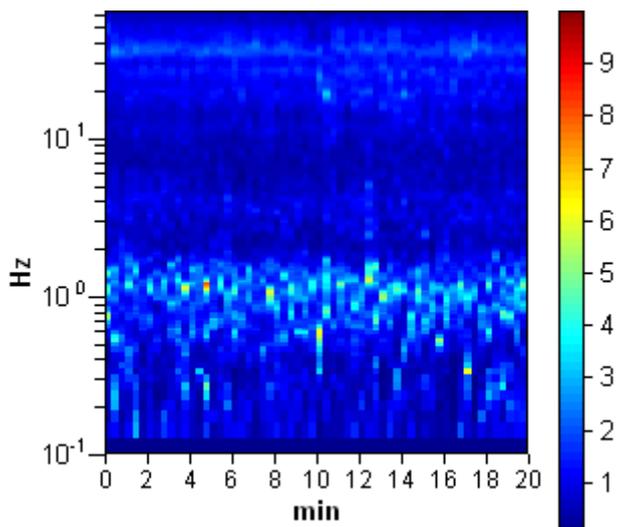
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

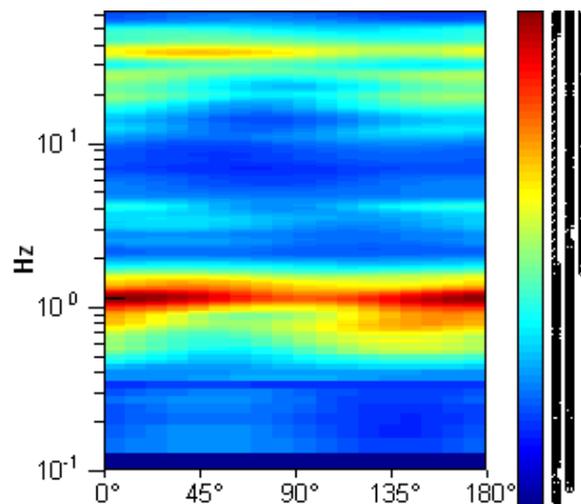
Picco H/V a 1.09 ± 0.02 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



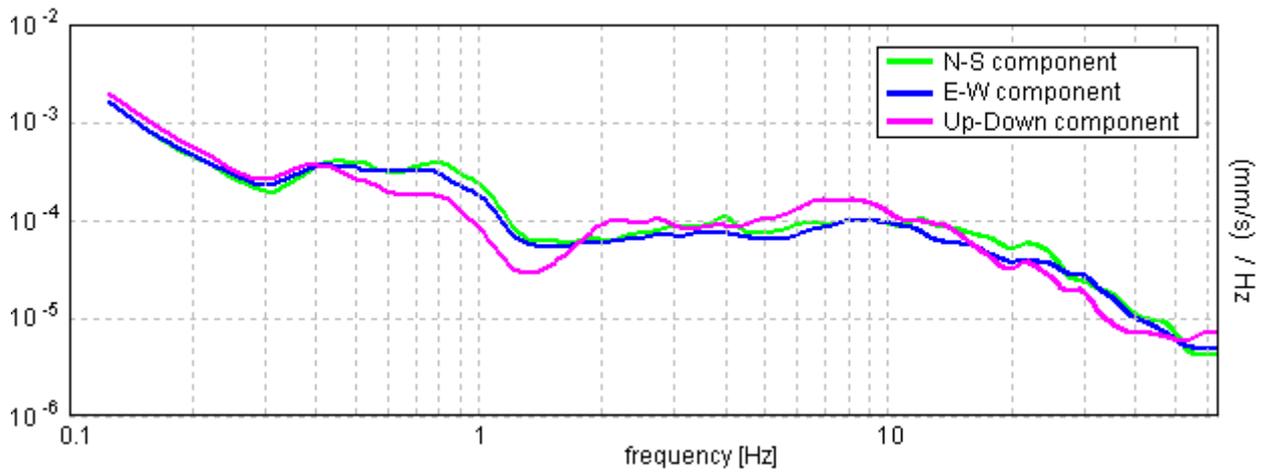
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V

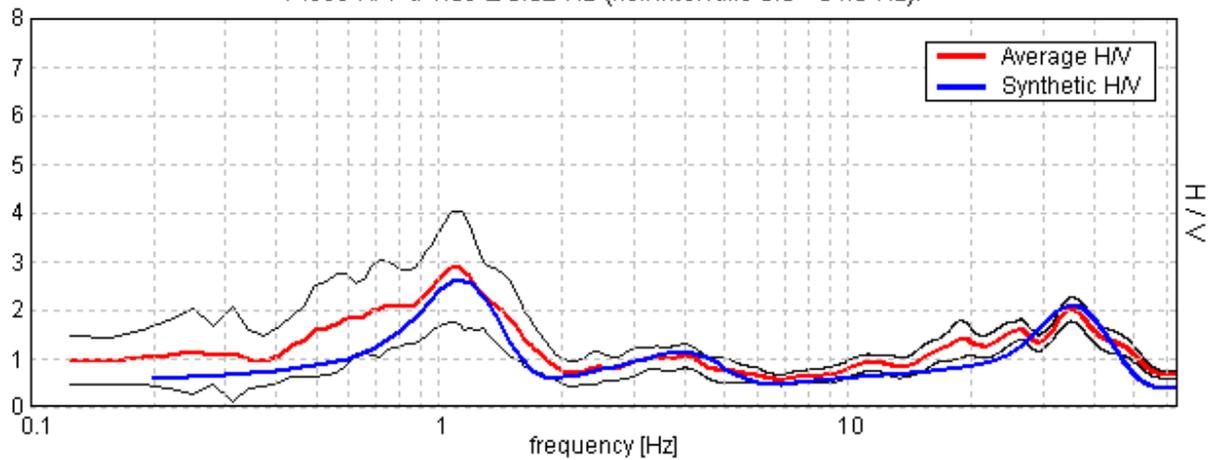


SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

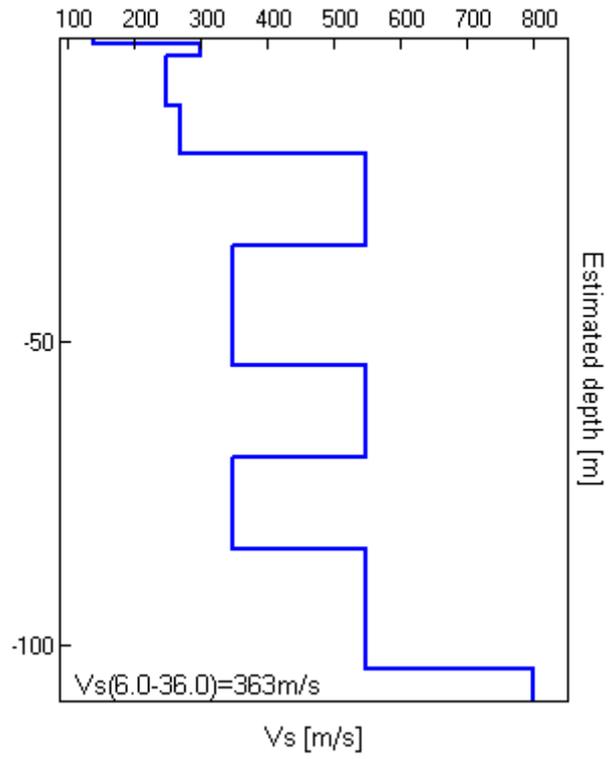


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO

Picco H/V a 1.09 ± 0.02 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] | Rapporto di Poisson |
|---------------------------------------|--------------|----------|---------------------|
| 1.00 | 1.00 | 140 | 0.35 |
| 3.00 | 2.00 | 300 | 0.35 |
| 11.00 | 8.00 | 250 | 0.35 |
| 19.00 | 8.00 | 270 | 0.35 |
| 34.00 | 15.00 | 550 | 0.35 |
| 44.00 | 10.00 | 350 | 0.35 |
| 54.00 | 10.00 | 350 | 0.35 |
| 69.00 | 15.00 | 550 | 0.35 |
| 84.00 | 15.00 | 350 | 0.35 |
| 104.00 | 20.00 | 550 | 0.35 |
| inf. | inf. | 800 | 0.35 |



Vs(0.0-30.0)=314m/s
Vs(1.0-31.0)=333m/s
Vs(3.0-33.0)=344m/s
Vs(6.0-36.0)=363m/s

[Secondo le linee guida SESAME, 2005].

Picco H/V a 1.09 ± 0.02 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

| | | | |
|--|------------------------|-----------|--|
| $f_0 > 10 / L_w$ | $1.09 > 0.50$ | OK | |
| $n_c(f_0) > 200$ | $1312.5 > 200$ | OK | |
| $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Superato 0 volte su 54 | OK | |

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

| | | | |
|--|---------------------|-----------|--|
| Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | 0.469 Hz | OK | |
| Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | 1.625 Hz | OK | |
| $A_0 > 2$ | $2.87 > 2$ | OK | |
| $f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.00848 < 0.05$ | OK | |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | $0.00927 < 0.10938$ | OK | |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ | $0.5657 < 1.78$ | OK | |

| | |
|------------------------|---|
| L_w | lunghezza della finestra |
| n_w | numero di finestre usate nell'analisi |
| $n_c = L_w n_w f_0$ | numero di cicli significativi |
| f | frequenza attuale |
| f_0 | frequenza del picco H/V |
| σ_f | deviazione standard della frequenza del picco H/V |
| $\varepsilon(f_0)$ | valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ |
| A_0 | ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0 |
| $A_{H/V}(f)$ | ampiezza della curva H/V alla frequenza f |
| f^- | frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$ |
| f^+ | frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$ |
| $\sigma_A(f)$ | deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa |
| $\sigma_{\log H/V}(f)$ | deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$ |
| $\theta(f_0)$ | valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$ |

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$

| Intervallo di freq. [Hz] | < 0.2 | 0.2 - 0.5 | 0.5 - 1.0 | 1.0 - 2.0 | > 2.0 |
|---|------------|-----------|------------|------------|------------|
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz] | $0.25 f_0$ | $0.2 f_0$ | $0.15 f_0$ | $0.10 f_0$ | $0.05 f_0$ |
| $\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$ | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.78 | 1.58 |
| $\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$ | 0.48 | 0.40 | 0.30 | 0.25 | 0.20 |