

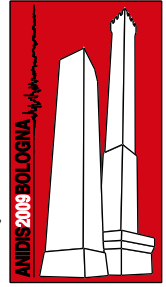
# Vs30 è un valido stimatore dell'amplificazione di sito?

Maria Rosaria Gallipoli

IMAA-CNR, Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale, 85050 Tito Scalo (PZ)

Marco Mucciarelli

DiSGG – Dipartimento Strutture, Geotecnica, Geologia Applicata, Università della Basilicata, Viale dell'Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza



*Keywords: Amplificazione sismica, Norme tecniche per le Costruzioni, HVSR, Vs30*

## ABSTRACT

L'obiettivo di questo lavoro è quello di verificare se: (1) la media delle velocità delle onde di taglio nei primi 30 metri ( $V_{s30}$ ) sia un buon indicatore di amplificazione di sito in un paese con geologia complessa come l'Italia; (2) il raggruppamento di  $V_{s30}$  in diverse classi come previsto dalla norma sismica italiana e i relativi spettri siano adeguati, e (3) profili più superficiali delle onde di taglio ( $V_{s10}$ ) possano essere uno strumento più economico per la classificazione dei siti. Per rispondere alle prime due domande, abbiamo esaminato 40 stime di  $V_{s30}$  (27 ottenute con misurazioni *down-hole*, più 13 profili ottenuti con tecniche di superficie). In tutti i siti abbiamo registrato terremoti e stimato la risposta di sito utilizzando la tecnica Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio. Il confronto tra  $V_{s30}$  e HVSR ha mostrato in circa un terzo dei siti che  $V_{s30}$  non è un buon stimatore degli effetti di amplificazione osservati se il sito non ha profilo di velocità monotono. Infine, analizzando 45 profili  $V_s$  da *down-hole* abbiamo notato che  $V_{s10}$  può prevedere la risposta di sito con le stesse prestazioni del  $V_{s30}$ . Proponiamo quindi di considerare altri schemi di classificazione del suolo, combinare la velocità delle  $V_s$  la frequenza fondamentale del suolo. Inoltre, in questo approccio a due parametri,  $V_{s10}$  potrebbe sostituire  $V_{s30}$ .

## 1 INTRODUZIONE

La media della velocità delle onde di taglio dalla superficie a 30 metri di profondità ( $V_{s30}$ ) è stata adottata come standard internazionale per la classificazione del suolo, da quando è stata proposta negli Stati Uniti nell'ambito del National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP). Il lavoro di Borchardt (1992; 1994) era basato su dati provenienti dagli Stati Uniti occidentali. Anderson et al. (1996) e Hartzell et al. (2001) sono stati i primi che hanno discusso i pro di questo metodo mentre Wald e Mori (2000) ne hanno valutato i contro. Al di fuori della regione in cui il metodo è stato sviluppato, sono sorti dubbi in merito alla capacità di  $V_{s30}$  di prevedere l'amplificazione sismica. Steidl (2000) ha trovato poca correlazione tra la classe e l'amplificazione del sito e ha suggerito che lo spessore dello strato risonante potrebbe essere più utile per predire il moto del suolo. Park e Hashash (2004) hanno studiato tale problema in siti caratterizzati da bacini profondi, con l'esempio del Mississippi, trovando che la proposta NEHRP non è adeguata quando i sedimenti sono molto

spessi, essa risultava troppo conservativa a brevi periodi e sotto-conservativa a lunghi periodi. Stewart et al. (2003) hanno ampliato la base di dati ad altre aree tettonicamente attive (Turchia e Giappone) concludendo che né la velocità delle onde di taglio né la classificazione della geologia di superficie sono in grado di fornire un buon sistema predittivo quando sono in esame siti caratterizzati da lunghi periodi ( $T > 1s$ ). Di Giacomo et al. (2005) hanno esaminato il caso di una inversione di velocità superficiale, giungendo alla conclusione che anche in questo caso  $V_{s30}$  potrebbe essere fuorviante.

Diversi autori hanno utilizzato dati HVSR da terremoto per lo studio della classificazione di sito. Zhao et al. (2006) hanno sottolineato i vantaggi dell'HVSR rispetto ai profili di velocità delle onde di taglio per la classificazione delle stazioni accelerometriche in Giappone. Fukushima et al. (2007), sulla base di un simile approccio basato sull'HVSR, hanno esaminato l'impatto di questo sistema empirico di classificazione del terreno, concludendo che la variabilità aleatoria nelle relazioni di attenuazione è inferiore all'approccio derivato utilizzando solo

classi di suolo. Inoltre, Fukushima et al. (2007) sostengono che gli spettri di risposta sono radicalmente diversi da quelli previsti con la classificazione in classi di suolo/roccia, fornendo valori più elevati di amplificazione nella gamma compresa tra 0 - 0.2s per i siti in roccia e per periodi più lunghi di circa 0.5s per siti su suolo. Sokolov et al. (2007) hanno studiato il comportamento di siti raggruppati sotto la categoria B NEHRP (corrispondente alla classe A delle Norme Tecniche delle Costruzioni 2008) stimando la funzione HVSR nei siti accelerometrici di Taiwan, osservando diversi casi di amplificazione.

I recenti sviluppi della classificazione sismica dei suoli hanno visto proposte alternative volte a comprendere nella valutazione delle classi anche il periodo fondamentale del sito (Rodriguez-Marek et al. 2001; Pitilakis et al. 2006). Questi schemi di classificazione comprendono la profondità del primo strato di risonanza, che regola non solo la frequenza, ma anche l'ampiezza della risposta sismica locale. Più di recente, Lang e Schwartz (2007) hanno proposto un progetto di implementazione del codice NEHRP che richiede solo misure HVSR.

Infine, un aspetto negativo dell'approccio  $V_{S30}$  da non sottovalutare è il costo dell'indagine. In Europa tale indagine è troppo costosa rispetto al totale dei costi di progettazione soprattutto nei casi di piccole opere. A tal proposito in passato, sono già state proposte inferiori profondità di indagine. Utilizzando le proprietà statistiche del rapporto tra  $V_{S30}$  e velocità a profondità inferiori, Boore (2004a) suggerisce che per i profili che non giungano a 30m, i valori estrapolati di  $V_{S30}$  portano significativamente meno sottostime che estendere le velocità dei primi strati sino a 30m. Kawase et al. (2006) raccomandano l'uso di  $V_{S10}$  sulla base della correlazione tra  $V_{S10}$  e  $V_{S30}$  per dati provenienti da siti delle reti K-net, Kik-net e JMA in Giappone.

Malgrado tutte queste critiche, il codice antisismico italiano segue in larga misura le disposizioni dell'EC8 e NEHRP, proponendo  $V_{S30}$  come il principale parametro per la classificazione del suolo. Date le peculiarità geologiche del territorio italiano e le criticità del metodo, il nostro lavoro mira a verificare se sono vere le seguenti affermazioni:

- $V_{S30}$  è un buon stimatore dell'amplificazione di sito in condizioni geologiche complesse come l'Italia;
- Il raggruppamento nelle classi di suolo e i relativi spettri sono adeguati;

- Profili più superficiali delle onde di taglio ( $V_{S10}$ ) possono essere uno strumento più economico per la classificazione del sito.

Per valutare le prime due affermazioni, abbiamo utilizzato un database composto da 27 siti con  $V_{S30}$  ottenuti da prove *down-hole*, oltre a 13 profili di velocità ottenuti con tecniche da superficie. In tutti i siti, abbiamo installato sismometri o accelerometri per registrare eventi sismici e stimare quindi l'amplificazione sismica al sito mediante la curva Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR). I siti non sono stati pre-selezionati per motivi geomorfologici, ma sono stati scelti in base alle richieste di due governi regionali (Marche e Basilicata), siti interessati da precedenti terremoti, studi pilota, la progettazione di nuove infrastrutture. Per valutare il terzo punto, abbiamo composto un database di 45 *down-hole* ottenuti con la stessa risoluzione metro per metro.

## 2 ANALISI DEI DATI

Il database utilizzato per valutare i primi due punti è costituito principalmente di siti B e C. La Tabella 1 riporta i parametri utilizzati nell'analisi.

Site Name	Vs30	Soil	Peak		Sensor	Ref	Geology
			Freq (Hz)	HVSR±SD			
Tricarico centro	R	A	0.83	2.3 ± 1.0	E	3	Calcarene
Anzi	R	A	1.20	2.4 ± 0.4	E	3	Sandstone
Guardia Perticara	R	A	2.01	2.6 ± 1.1	E	3	Conglomerate
Gorgoglione	R	A	4.87	3.1 ± 1.1	E	3	Conglomerate
Cagli S. Geronzio	H	A	3.38	2.8 ± 0.4	L	1	Limestone
Venosa	R	B	0.43	2.8 ± 1.1	L	6	Conglomerate
Bernalda Scuola Elem.	H	B	0.60	1.9 ± 1.2	E	4	Conglomerate
Pisticci Cantisano	H	B	0.60	2.0 ± 0.5	E	4	Conglomerate
Treia Casa Riposo	H	B	0.98	2.1 ± 0.6	L	1	Sandstone
Polico Muncipio	H	B	1.00	2.8 ± 0.4	E	4	Conglomerate
Scanzano Ionico Municipio	H	B	1.00	2.8 ± 0.5	E	4	Conglomerate
Castelluccio Inferiore	H	B	1.19	5.3 ± 1.1	L	3	Alluvium
Offida Stadio	H	B	1.20	2.4 ± 0.6	L	1	Clay
Offida Rocca	H	B	1.48	2.1 ± 0.6	L	1	Fisch
Serra de Conti Deposito	H	B	1.48	2.3 ± 0.9	L	1	Clay
Sera de Conti Scuola	H	B	1.48	2.3 ± 0.5	L	1	Clay
Bavano	R	B	2.00	3.0 ± 0.8	K	3	Fisch
Offida Cappuccini	H	B	2.24	3.5 ± 0.8	L	1	Clay
Treia Carabini	H	B	2.75	2.3 ± 0.3	L	1	Clay
Passo di Treia	H	B	3.38	3.5 ± 1.0	L	1	Alluvium
Cagli Municipio	H	B	3.38	2.8 ± 0.8	L	1	Alluvium
Potenza Viale UNICEF	H	B	4.19	4.2 ± 0.3	M	7	Alluvium
Potenza Campus	H	B	4.31	2.4 ± 0.3	S	7	Clay
Alliano	R	B	-	-	E	3	Conglomerate
Serra de Conti Municipio	H	B	-	-	L	1	Clay
Villa d'Agri Scuola	R	C	1.18	2.9 ± 1.0	E	3	Alluvium
Avigliano	R	C	1.19	3.1 ± 0.2	K	3	Fisch
Metaponto Borgo	H	C	1.20	3.0 ± 0.8	E	4	Alluvium
Polico Anifela	H	C	1.20	4.0 ± 0.6	E	4	Alluvium
S. Basilio-Scanzano Porto Greco	H	C	1.40	3.5 ± 1.1	E	4	Alluvium
Offida Municipio	H	C	1.82	2.1 ± 0.7	L	1	Clay
Senigallia Saline	H	C	2.40	4.2 ± 0.7	T	2	Clay
Villa d'Agri Barricelle	R	C	3.50	3.0 ± 1.0	L	3	Alluvium
Ruvo Monte	R	C	4.08	2.8 ± 0.3	E	3	Clay
Cagli Vigili del Fuoco	H	C	4.16	3.6 ± 1.0	L	1	Clay
Senigallia Stadio	H	C	5.61	2.7 ± 0.9	T	2	Alluvium
Senigallia Marchetti	H	C	-	-	T	2	Alluvium
Rapallo	R	D	0.70	2.5 ± 0.3	E	3	Volcanic ash
Tito Scalo	H	D	1.17	4.5 ± 2.0	M	5	Clay
Pescopagano	R	D	1.41	2.7 ± 0.8	E	3	Clay

Tabella 1. Database composto da 40 siti. I colonna=nome sito; II= tecnica usata per la stima del profilo  $V_S$  (H=down-hole, R=ReMi); III=classe di suolo; IV=frequenza fondamentale stimata con HVSR da terremoti; V= ampiezza del picco fondamentale; VI=sensore utilizzato (L=Lennartz 1-Hz 3D; M=Mark L4C 3D; E=Kinematics Etna; K=Kinematics K2; S=Streckeisen STS-2; T=Nanometrics Trillium); VII=riferimento bibliografico per il reperimento dei dati (1=Mucciarelli e Tiberi, 2004; 2=Mucciarelli e Tiberi 2007; 3=Mucciarelli et al., 2005; 4=Mucciarelli et al., 2007; 5=Parolai et al., 2007; 6=Di Giacomo et al., 2005; 7=Gallipoli et al., 2007); VIII=geologia superficiale.

Il  $V_{S30}$  è stato stimato sia mediante prove *down-hole* che mediante tecniche di superficie. In

due siti, Tito Scalo (Parolai et al., 2007) e Senigallia (Mucciarelli e Tiberi, 2007) sono state effettuate entrambe le prove per confrontarne i risultati. Le prove *down-hole* sono state effettuate registrando onde S, generate da una sorgente superficiale, ad ogni metro di profondità fino alla profondità di 30m. La strumentazione è consistita di 4 geofoni tri-direzionali con la frequenza propria a 10Hz. La frequenza di campionamento è stata fissata a 4000 s.p.s., mentre come sistema di acquisizione è stato utilizzato un digitalizzatore a 16-bit.

Le prove ReMi (Louie, 2001) sono state condotte registrando 10 minuti di rumore ambientale campionato a 125 cps e con un array di 12 geofoni verticali spazati a 10 metri di distanza. Il sistema di acquisizione utilizzato è un 24-bit della Geometrix. Il profilo delle  $V_s$  è stato ottenuto mediante il codice di calcolo di Herrmann (2002).

I terremoti sono stati registrati in 16 siti con sismometri ad 1Hz della Lennartz collegati ad acquisitori a 24-bit, in due siti con Mark L4C collegati ad acquisitori a 24-bit, in tre siti con sensori *broadband* Nanometrics Trillium, in un sito con un sensore STS2 accoppiato con un acquisitore Q330, in due siti con accelerometri Kinematic K2 e in tutti gli altri con accelerometri Kinematics Etna. Sono stati registrati dei *weak motions* con un buon rapporto segnale/rumore. In media sono stati registrati 25 eventi per ciascuna stazione. La magnitudo degli eventi è compresa tra 3.0-6.5, la distanza tra 10-1000Km, mentre la massima accelerazione registrata è dell'ordine di 1/1000g. La maggior parte degli eventi sono locali, è stato utilizzato l'intero segnale compreso di onde P, S e superficiali. Le funzioni HVSR sono state ottenute secondo la metodologia proposta da Castro et al. (1990).

E' stata utilizzata la tecnica HVSR per tre motivi: 1) Nella maggior parte dei casi non c'è un sito di riferimento, quindi non è stato possibile valutare la funzione di amplificazione mediante la tecnica Standard Spectral Ratio (SSR); 2) le condizioni di validità del  $V_{s30}$  e della funzione HVSR sono le stesse, ossia assetto stratigrafico 1D con profilo monofonico delle  $V_s$ . Rodriguez e Midorikawa (2002) evidenziano le basse performance della tecnica HVSR nei bacini sedimentari profondi, allo stesso tempo Castro et al. (1997) evidenziano il buon accordo tra HVSR e SSR quando le onde superficiali non sono dominanti; 3) Precedenti lavori, Zhao et al. (2006), Sokolov et al. (2007) e Fukushima et al. (2007), hanno mostrato come l'HVSR può essere un buon stimatore per la classificazione di sito.

Mucciarelli e Tiberi (2004), Di Giacomo et al. (2005) e Parolai et al. (2007) riportano il confronto tra HVSR e SSR per alcuni siti compresi in questo database.

## 2.1 Confronto tra HVSR e $V_{s30}$

La Figura 2 riporta il grafico box-whisker tra la distribuzione dei valori di ampiezza del picco fondamentale della funzione HVSR in funzione delle categorie dei suoli. La mediana aumenta passando dai siti in classe A a quelli in classe C anche se il valore della mediana dei siti A è abbastanza simile a quella dei siti B e quella dei siti D è più bassa di quella dei siti C. Si può osservare inoltre che ci sono siti appartenenti alla classe B e C che non mostrano amplificazione ( $HVSR < 2$ ).

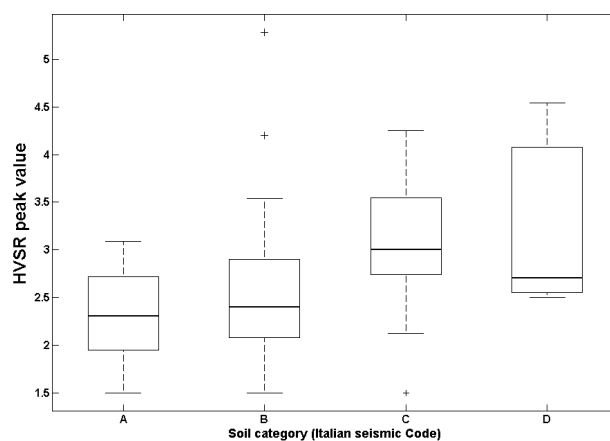


Figura 1. Diagramma box-and-whisker dei valori di amplificazione dei picchi fondamentali e le classi di suolo della normativa italiana. Il box riporta il quartile inferiore, la mediana e il quartile superiore.

La Figura 3 riporta il confronto tra i valori di ampiezza HVSR dei picchi fondamentali in funzione del  $V_{s30}$  ricavato solo da prove *down-hole*. Abbiamo voluto considerare solo questo sottocampione in modo da confrontare questi dati con le ampiezze SSR dei dati del lavoro di Borchardt (1994) ricadenti nel *range* 0.5-1.5 sec. Sebbene i dati di questo lavoro non comprendano  $V_{s30}$  maggiori di 700 m/sec, le due distribuzioni sono uguali al 98% del livello di confidenza del test di Kolmogorov-Smirnov. Per una analisi statistica più dettagliata sugli errori nella stima del  $V_{s30}$  si rimanda a Castellaro e Mulargia (2008).

Volendo considerare l'intera curva HVSR, la Figura 3 riporta la mediana con il quartile inferiore e superiore per ciascuna classe di suolo. La curva relativa alla classe A è la mediana di 5 siti, quella della classe B di 20, quella in classe C di 12 e quella in D di 3. Le ampiezze generalmente aumentano in funzione della classe sebbene la funzione mediana HVSR della classe

A non risulta piatta evidenziando quindi il complesso comportamento dei siti ricadenti su suoli rigidi (siti in classe B secondo il NEHRP; Sokolov et al., 2007). La frequenza del picco fondamentale inoltre si sposta in frequenza: dalla banda 1-2 Hz per i siti in classe A a 4 Hz per quelli in C. I siti in classe D sono troppo pochi per poter evidenziare andamenti particolari.

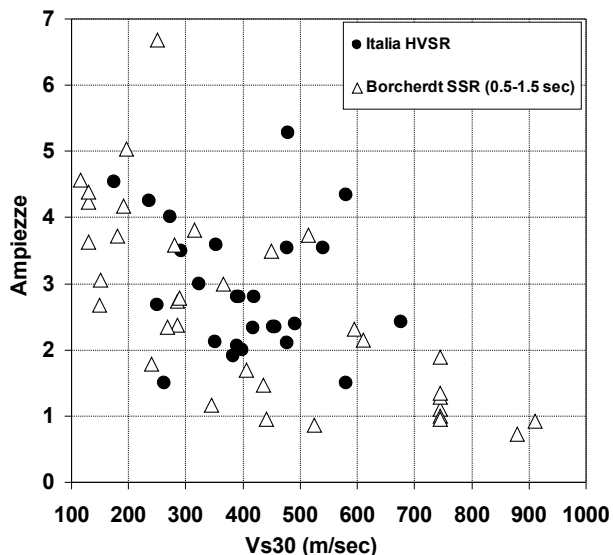


Figura 2. Confronto tra le massime ampiezze HVSR ricavate in questo lavoro (pallini in nero) con quelle del lavoro di Borcherdt (1994) (triangoli in bianco) in funzione dei valori  $V_{s30}$  ricavati solo da prove *down-hole*.

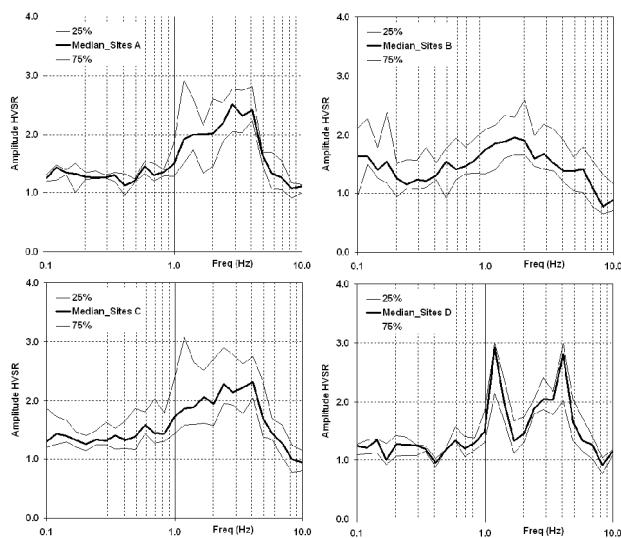


Figura 3. Andamenti della mediana HVSR (tratto spesso) con il quartile inferiore e superiore (tratto sottile) in funzione della frequenza per ciascuna classe di suolo.

A questo punto si è voluto valutare l'accordo in percentuale tra le funzioni HVSR dei siti e le appartenenze alle classi. La Figura 4 riporta il diagramma a torta ricavato da questa analisi: sebbene c'è il 65% del totale dei siti ricadenti in classe B, C e D che mostrano un'amplificazione maggiore di 1 Hz, come stabilito dalla norma, e il 2,5% dei siti ricadenti in classe A che non presentano alcuna amplificazione, c'è un 35% dei

siti che mostra amplificazione lì dove non ci dovrebbe essere o viceversa oppure presentano amplificazione in bassa frequenza.

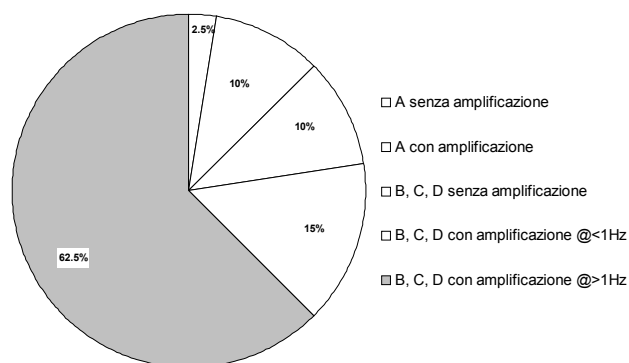


Figura 4. Percentuali dei siti che mostrano un'attesa o meno amplificazione secondo le classi di appartenenza.

## 2.2 Confronto tra l'HVSR e gli spettri delle classi

In questa parte si riportano i risultati relativi all'analisi del secondo punto oggetto dello studio: il raggruppamento in classi e i relativi spettri sono adeguati?

E' stato effettuato un confronto tra gli spettri HVSR stimati e quelli forniti dalle norme tecniche delle costruzioni. Il confronto è stato valutato normalizzando i valori osservati con quelli previsti dalla norma mediante il parametro adimensionale  $\epsilon$  secondo la seguente formula riportata solo per i siti B:

$$\epsilon = \frac{[(CodeB/CodeA) - MeanObservedB]}{StdDeviationB}$$

Valori negativi del parametro  $\epsilon$  indicano che i valori degli spettri di normativa sottostimano quelli osservati. Inoltre, poiché i valori di ampiezza dell'HVSR rappresentano il limite inferiore rispetto a quelli stimati con l'SSR, ciò significa che la sottostima potrebbe essere ancora più evidente. D'altro canto, valori positivi sarebbero sicuramente una garanzia che le ampiezze spettrali dettate dalla norma sovrastimano i valori misurati. La Figura 5 riporta l'andamento del parametro  $\epsilon$  per i siti di classe B e C. Per i siti di classe B gli spettri della normativa sottostimano le ampiezze medie osservate nel *range* 0.5-6.5Hz, con un superamento di 0.5 della deviazione standard tra 1 e 4 Hz. Per i siti C tale sottostima si evidenzia tra 0.5-7.2 Hz, eccedendo di 1,5 la deviazione standard tra 2-4 Hz. E' evidente che la sottostima dipende dalla frequenza, per alte e basse frequenze la sottostima è inferiore rispetto a quella presente alle frequenze centrali dello spettro. Quindi, gli spettri di normativa sono sottostimati rispetto a quelli osservati nel banda di frequenza di interesse non solo per la maggior

parte degli edifici italiani ma anche ove ricadono principalmente le frequenze fondamentali dei suoli. Tale evidenza è stata osservata solo in assenza di fenomeni di non linearità del comportamento dei terreni a seguito di forti terremoti. D'altronde le norme tecniche non prevedono spettri diversi in base alla severità del terremoto.

Si è verificato inoltre se tale sottostima dipendesse dal fatto che la normativa italiana prevede uno spettro unico per le tre classi più severe, B, C e D. E' stato quindi calcolato e confrontato il parametro  $\varepsilon$  utilizzando lo spettro EC8 previsto per la classe C con l'unico spettro italiano, ma l'andamento non migliora (Figura 6).

I dati sperimentali sembrano supportare le conclusioni tratte da Bouckovalas e Anastasiadis (2006), ossia che gli spettri dell'EC8 possono essere considerati il limite inferiore per i siti B, C ed E, mentre il limite superiore per i terreni di tipo D.

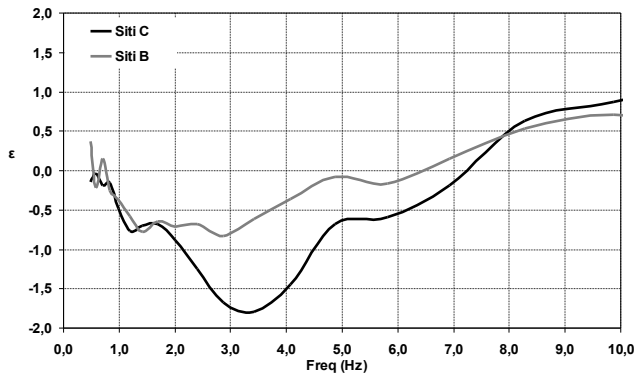


Figura 5. Confronto tra gli spettri HVSR osservati e quelli previsti dalle norme italiane mediante il parametro  $\varepsilon$ . Valori negativi del parametro indicano che la normativa sismica sottostima le ampiezze osservate.

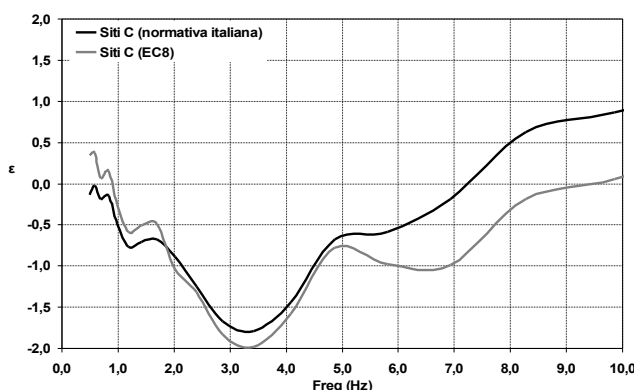


Figura 6. Confronto del parametro  $\varepsilon$  ottenuto utilizzando gli spettri della normative italiana e quelli dell'EC8 per i siti C.

### 2.3 Confronto tra $V_{s30}$ e $V_{s10}$

L'ultima analisi condotta è stata indirizzata a verificare l'attendibilità di usare valori di  $V_s$  più superficiali rispetto a quelli a 30 metri. Il database utilizzato è composto da 45 profili di  $V_s$

ottenuti solo da prove *down-hole* ad ogni metro fino alla profondità di 30m (Tabella 2). Per ogni sito sono state calcolate le velocità di taglio medie su 5, 10, 15, 20 e 25 metri di profondità e le relative correlazioni tra queste ultime e il  $V_{s30}$  (prima riga della tabella). La correlazione migliore ( $R=0.91$ ) è tra il  $V_{s10}$  e  $V_{s30}$  (Figura 7). Nelle ultime due colonne della Tabella 2 è riportato rispettivamente il  $V_{s30}$  stimato a partire dal  $V_{s10}$  mediante la legge di regressione e l'equivalente classe di suolo. Come si può notare solo 3 casi su 45 il  $V_{s30}$  predetto dal  $V_{s10}$  è diverso da quello stimato direttamente.

Site Name	Soil Class	Correlation with $V_{s30}$					Est. $V_{s30}$	$V_{s10}$ Class
		$V_{s5}$	$V_{s10}$	$V_{s15}$	$V_{s20}$	$V_{s25}$		
Sanigallia P. zaVittona	C	224	181	193	221	226	230	C
Sanigallia Marzocca	C	234	166	221	262	236	250	C
Sanigallia P. talambertina	C	241	178	219	271	258	260	C
Sanigallia Pza. Lanamora	C	262	191	233	292	287	281	C
Sanigallia Parco Pace	C	198	112	217	368	303	303	C
Sanigallia Via Sanzio	C	251	196	244	319	325	325	C
Sanigallia Cesanelia	C	265	193	217	302	318	330	C
Offida S2	B	414	320	337	366	434	474	C
Offida S7	C	304	198	249	300	303	349	C
Offida S9	C	320	258	267	339	376	376	C
Offida S10	B	411	312	378	406	424	424	C
Cagli S4 V. Fucio	C	290	170	208	293	350	410	C
Cagli S6 Municipio	B	452	272	415	663	632	632	B
Cagli S7 Paraggio ASL	C	321	202	207	368	424	482	C
Cagli S8 S. Genesio	B	367	170	399	668	562	562	B
Serra S2 Scuola Malena	B	381	178	330	501	491	518	B
Serra S3 Municipio	B	557	430	465	643	606	621	B
Serra S7 Via 11 Maggio	B	464	346	379	447	499	530	B
Serra S8 Via Grandi	B	370	192	359	513	449	486	B
Treia S3 Passo	B	471	276	454	617	554	554	B
Treia S4 Staz. CC	B	396	288	330	478	466	466	B
Treia S5 v. Oberdan	B	407	288	359	493	468	468	B
Treia S5 v. Diaz	B	369	210	305	446	447	447	B
Treia S8 Municipio	B	427	268	374	513	472	472	B
Castelluccio Inferiore	B	471	322	354	460	467	499	B
Rotonda Mercure	B	393	298	318	372	376	412	B
Lagonegro Ospedale	C	360	189	278	395	370	406	C
Rotonda Cugno	C	326	234	286	354	347	355	C
Viagnanello Corte	C	326	246	287	310	312	336	C
Viagnanello Torbolo	C	340	254	289	308	332	345	C
Trecchina PIP	B	573	400	457	573	599	601	B
Trecchina Lupi	C	328	290	276	291	330	348	C
Castelcaraceno	B	509	344	421	474	467	588	B
Senise	C	352	288	303	313	330	353	C
Maratea	C	337	248	274	330	324	363	C
Potenza Campus	B	553	312	483	705	722	722	B
Bernalda Scuola Elementare	B	383	410	429	408	394	390	B
Praticci Sbasilio	C	292	262	266	270	278	285	C
Destra Bradano	C	295	236	238	266	281	298	C
Metaponto Borgo	C	323	362	339	312	334	328	C
Nova Sin Agnifola	C	278	242	249	260	262	273	C
Policoro Municipio	B	380	312	376	425	399	401	B
Praticci S. Teodoro	C	265	186	215	251	258	268	C
Scanzano Municipio	B	420	366	431	456	417	428	B
Praticci Via Carisiane	B	399	270	311	355	376	410	B

Tabella 2. Database dei 45 profili *down-hole*. La prima colonna riporta il nome del sito, la seconda indica la classe di suolo secondo la normativa italiana, la terza il valore di  $V_{s30}$ , dalla quarta alla ottava i valori medi di  $V_s$  per 5, 10, 15, 20 e 25m di profondità e nella riga in alto i rispettivi coefficienti di correlazione tra questi ultimi e il  $V_{s30}$ . Le ultime due colonne riportano rispettivamente il  $V_{s30}$  stimato a partire dal  $V_{s10}$  e l'equivalente classe di suolo.

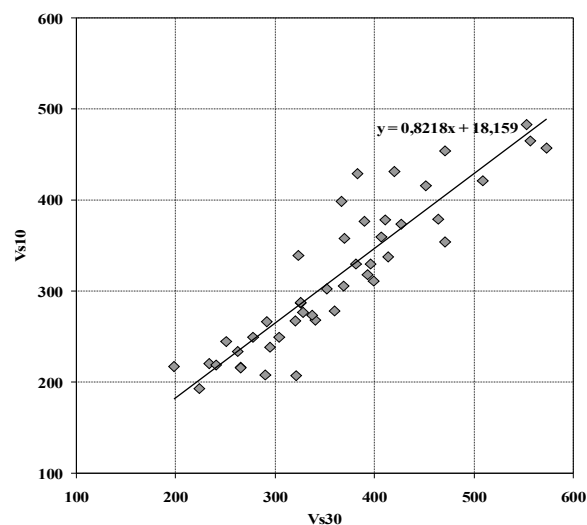


Figura 7. Correlazione tra  $V_{s30}$  e  $V_{s10}$ . Coefficiente di correlazioni pari a 0.91.

### 3 DISCUSSIONI E CONCLUSIONI

Wald e Mori già nel 2000 avevano evidenziato che il  $V_{s30}$  è un parametro troppo grezzo per stimare un fenomeno così complesso, non tiene assolutamente in conto altre proprietà che caratterizzano i terreni superficiali e la complessità della propagazione delle onde.

In questo lavoro si è cercato di valutare più in dettaglio alcune criticità.

L'inaspettata amplificazione presente in alcuni siti di classe A non è dovuta ad effetti topografici ma probabilmente al diverso grado di fatturazione che provoca un contrasto di impedenza tra la roccia dura e quella fratturata. Tale fenomeno è ben evidente in alcuni siti del database (Tricarico, Guardia Perticara, Gorgoglione). Già lavori precedenti hanno evidenziato effetti di amplificazione in siti considerati rocciosi. Rovelli et al. (2002) dopo il terremoto dell'Umbria-Marche hanno evidenziato un'alta amplificazione al sito di Norcia causata dallo stato di fatturazione della roccia ricadente in una zona di faglia. Cerreto di Spoleto è un altro sito caratterizzato da roccia fratturata e elevata amplificazione (Martino et al., 2006). Ferretti et al. (2007) studiano alcuni siti delle Alpi italiane caratterizzati da  $V_{s30}$  maggiori di 800 m/sec e amplificazione stimata sia con la tecnica SSR che HVSR. Oltre a questo fenomeno ci sono 2 siti che presentano un'inaspettata amplificazione a seguito di un altro fenomeno quale l'inversione di velocità. Tale situazione litostratigrafia è abbastanza comune in Italia, ossia strati di materiali più rigidi sovrastanti materiali più soffici. Molti centri abitati della Toscana, dell'Umbria e della parte nord del Lazio sono caratterizzati da uno strato di materiale vulcanico del quaternario sovrastante i sedimenti, oppure in alcune parti della Puglia i conglomerati di piattaforma ben cementati giacciono sopra a spessi strati di argilla e/o sabbia. Sebbene la presenza di materiali rigidi superficiali indurrebbe a classificarli come siti A, essi mostrano amplificazioni in bande di interesse per gli edifici (Di Giacomo et al., 2005 per il sito di Venosa).

Altra criticità rilevata in questo lavoro è che ci sono alcuni siti B e C che non hanno amplificazione oppure è presente a basse frequenze in quanto sono posizionati su bacini profondi ( $h > 300$  m) con un basso contrasto di impedenza tra i sedimenti e il substrato. La conseguenza di questo è la sottostima delle ampiezze spettrali di normativa a frequenze al di sotto di 7 Hz. Inoltre ci sono molti siti, ricadenti nella pianura padana oppure nel bacino di Sant'Arcangelo o lungo le piane costiere, la cui

stratigrafia è caratterizzata da sottili strati più cementati. Questi, seppure non abbiano alcuna ripercussione sulla stima del valore di  $V_{s30}$ , inducono dei chiari picchi di amplificazione. Un chiaro esempio di questo fenomeno è la città di Senigallia (Mucciarelli e Tiberi, 2007): i 5 siti ricadenti nel centro urbano oggetto di studio sono tutti classificati C però in alcuni la curva HVSR non evidenzia picchi di amplificazione proprio perché il profilo di velocità non presenta contrasti di impedenza, al contrario in altri l'amplificazione è dovuta a 5m di ghiaie ben cementate aventi velocità doppie rispetto ai materiali sovrastanti (Figura 8). Tali amplificazioni sono state riscontrate anche con la tecnica SSR.

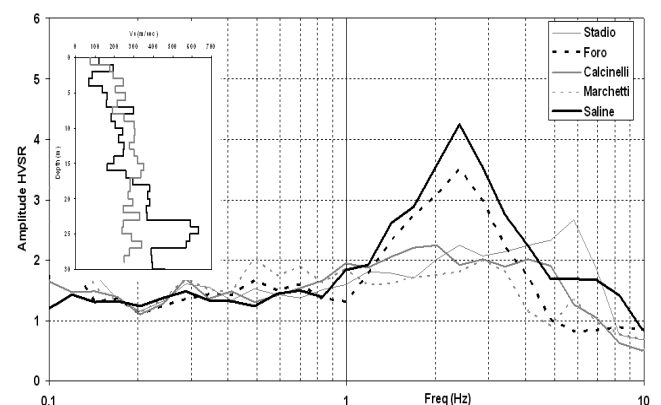


Figura 8. HVSR di 5 siti del centro urbano di Senigallia non aventi amplificazione e con profilo di velocità abbastanza uniforme con la profondità (linee grigie) e altri caratterizzati da frequenza fondamentale e da un profilo avente contrasto di impedenza a circa 25m (linee nere).

Dall'analisi di questi dati quello che si evidenzia è che la complessità del fenomeno relativo alla risposta sismica locale (Boore, 2004) mal si concilia con l'esigenza dei professionisti di avere un parametro "semplice quanto possibile e complicato quanto necessario" per stimare le caratteristiche del sito. È quindi necessario prestare molta attenzione nell'utilizzo del  $V_{s30}$  soprattutto quando non sono disponibili altri dati. Inoltre, soprattutto per la progettazione di edifici pubblici si consiglia di stimare la curva HVSR registrando eventi sismici considerata l'elevata sismicità dell'Italia e la competitività del costo di un accelerometro e/o sismometro, più economico rispetto al costo di un sondaggio a 30m con relativa prova *down-hole*. Ad ulteriore vantaggio di questo nuovo approccio è che per siti rocciosi è possibile verificare l'assenza di amplificazione stimando la curva HVSR da semplici misure di rumore ambientale e che, per quei siti ove la struttura geologica non ha una spiccata variazione laterale, l'uso di tecniche da superficie (ReMi, ESAC, SPAC) possono fornire il profilo delle  $V_s$  fino al *bedrock*.

A nostro parere, come suggerito anche da Rodriguez-Marek et al. (2001) and Pitilakis et al. (2006), un approccio più valido per la caratterizzazione di sito è la determinazione del profilo delle  $V_s$  e della sua frequenza fondamentale. Inoltre, nei casi in cui non si sospetta inversione di velocità, la stima del  $V_s10$  può essere sostituita a quella del  $V_s30$ . In tal modo, i costi ed i tempi recuperati possono essere investiti per la stima della frequenza fondamentale mediante la tecnica HVSR. Stimate quindi le  $V_s$  nella prima decina di metri e la frequenza fondamentale è facile ricavare la profondità dell'interfaccia suolo-bedrock o mediante la semplice formula  $H = V_s/4 \cdot f$ , oppure considerando la variazione della velocità con la profondità mediante le relazioni di Ibs-von Seht e Wohlenberg (1999) e Parolai et al. (2002). Combinando l'informazione del  $V_s10$  e dell'HVSR la caratterizzazione del suolo è sicuramente più attendibile rispetto all'utilizzo del solo parametro  $V_s30$ . Naturalmente la stima del profilo delle  $V_s$  a maggiori profondità e la registrazione di terremoti possono fornire una stima più realistica dell'input sismico.

#### 4 RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è stata finanziata dai progetti DPC-INGV (S3-2005 e S4-2008), dall'ufficio di Protezione Civile della regione Marche e Basilicata e dal progetto PRIN-2007 (Validazione di tecniche semplificate per la stima dell'amplificazione sismica di sito).

#### REFERENCES

- Anderson, J.G., Lee, Y., Zeng, Y., Day, S., 1996. Control of strong motion by the upper 30 meters, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, 1749-1759.
- Boore, D.M., 2004a. Estimating  $V_s(30)$  (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (Depths < 30 m), *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 591-597.
- Boore, D.M., 2004b. Can site response be predicted?, *Journ. Earthq. Engin.*, **8 S1**, 1-41.
- Borcherdt, R.D., 1994. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification), *Earthquake Spectra*, **10**, 617-653.
- Bouckovalas, G., Anastasiadis, A., 2006. Ground conditions and seismic actions, *Proc. of the Athens workshop, geotechnical evaluation and application of the seismic Eurocode EC8*, 5-10, last download at <http://users.civil.ntua.gr/gbouck>.
- Castellaro, S., Mulargia, F., Rossi, P.L. 2008.  $V_s30$ : Proxy for Seismic Amplification?, *Seism. Res. Lett.*, **79**, 4.
- Castro, R.R., Anderson, J.G., Singh, S.K., 1990. Site response, attenuation and source spectra of S waves along the Guerrero, Mexico, subduction zone, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **80**, 1481 - 1503.
- Castro, R.R., Mucciarelli, M., Pacor, F. Petrangaro C., 1997. S-wave site-response estimates using horizontal-to-vertical spectral ratios, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **87**, 256 - 260
- Di Giacomo, D., Gallipoli, M.R., Mucciarelli, M., Parolai, S., Richwalski, S.M., 2005. Analysis and modeling of HVSR in the presence of a velocity inversion: the case of Venosa, Italy, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**, 2364-2372.
- Ferretti, G., Massa, M., Isella, L., Eva, C., 2007. Site-amplification effects based on teleseismic wave analysis: the case of the Pellice valley, piedmont, Italy; *Bull. Seism. Soc. Am.* **97**, 605-613
- Fukushima, Y., Bonilla, L.F., Scotti, O., Douglas, J., 2007. Site classification using horizontal-to-vertical response spectral ratios and its impact when deriving empirical ground-motion prediction equations, *Journ. of Earthq. Engin.*, **11**, 712 - 724.
- Hartzell, S., Carver, D., Williams, R.A., 2001. Site response, shallow shear-wave velocity, and damage in los gatos, california, from the 1989 Loma Prieta earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **91**, 468-478.
- Ibs-von Seht, M., Wohlenberg, J., 1999. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 250-259.
- Kawase, H., Hidenori, M., Yusuke, N., 2006. Site amplification factor and their characterization: proposal of  $V_s$  10 m, *Proc. 1st ECEES Conference, Geneva September 2006*, CD-Edition, Paper n. 772.
- Lang, D.H., Schwarz, J., 2006. Instrumental subsoil classification of Californian strong motion sites based on single-station measurements, *Proc. of the 8th U.S. National Conference of Earthquake Engineering*, San Francisco, Paper No. 120.
- Louie, J.N., 2001. Faster, better: shear wave velocity to 100m depth from refraction microtremors arrays, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **91**, 347-364.
- Martino, S., Minatolo, A., Paciello, A., Rovelli, A., Scarascia Mugnozza, G., Verrubbi V., 2006. Evidence of amplification effects in fault zone related to rock mass jointing, *Natural Hazard*, **39**, 419-449.
- Park, D., Hashash, Y.M.A., 2004. Probabilistic seismic hazard analysis with non linear site effects in the Mississippi embayment, *Proc. 13th World Conf. Earthq. Eng.*, Vancouver, CD-Rom Edition, paper n. 1549.
- Parolai, S., Bormann, P., Mikereit, C., 2002. New relationships between  $V_s$ , thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany), *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 2521-2527.
- Parolai, S., Mucciarelli, M., Gallipoli, M.R., Richwalski, S.M., Strollo, A., 2007. Comparison of empirical and numerical site responses at the Tito test site, Southern Italy, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **97**, 1413-1431.
- Pitilakis, K., Gazepis, C., Anastasiadis, A., 2006. Design response spectra and soil classification for seismic code provisions, *Proc. of the Athens workshop, geotechnical evaluation and application of the seismic eurocode EC8*, 31-46.
- Rodriguez-Marek, A., Bray, J.D., Abrahamson, N.A., 2001. An Empirical geotechnical seismic site response procedure, *Earthquake spectra*, **17**, 65- 87.
- Rodriguez, V.H.S., Midorikawa, S., 2002. Applicability of the H/V spectral ratio of microtremors in assessing site effects on seismic motion, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **31**, 261 - 279.
- Rovelli, A., Caserta, A., Marra, F., Ruggiero, V., 2002. Can seismic waves be trapped inside an inactive fault zone?

- The case study of Nocera Umbra, central Italy, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 2217 - 2232.
- Sokolov, V.Y., Lohb, C-H., Jean, W.-Y., 2007. Application of horizontal-to-vertical (H/V) Fourier spectral ratio for analysis of site effect on rock (NEHRP-class B) sites in Taiwan, *Soil Dyn. Earthq. Engin.*, **27**, 314-323.
- Steidl, J.H., 2000. Site response in southern California for probabilistic seismic hazard analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 6B, S149–S169.
- Stewart, J.P., Liu, A.H., Choi, Y., 2003. Amplification factors for spectral acceleration in tectonically active regions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 332–352.
- Wald, L.A., Mori, J., 2000. Evaluation of methods for estimating linear site-response amplifications in the Los Angeles region, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, S32–S42.
- Zhao, J.X., Irikura, K., Zhang, J., Fukushima, Y., Somerville, P.G., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., 2006. An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using H/V response spectral ratio, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 914–925.