

GEOLOGI MARCHE

Risorse per il territorio e la sostenibilità ambientale

- ▶ Bilanci di fine anno
- ▶ Buoni propositi per il 2011

La sismica passiva a stazione singola negli studi di microzonazione sismica (MS) e nell'applicazione delle NTC 2008

Donato Mengarelli* - Claudia Tomassoli**

* Geologo libero professionista - Studio Associato Consulenza & Progetto (Pesaro)

** Geologa libera professionista (Pesaro) - e-mail: c.tomassoli@tes07.it

TERMINI CHIAVE: Tromino, frequenza di risonanza, Vs30

INTRODUZIONE

La tecnica sismica passiva a stazione singola (tecnica dei rapporti spettrali H/V o HVSR - Horizontal to Vertical Spectral Ratio) ha avuto una rapida diffusione negli ultimi anni in quanto è totalmente non invasiva, molto rapida, applicabile ovunque, presenta costi bassi poiché non necessita né di perforazioni, né di stendimenti di cavi, né di energizzazioni esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque.

La sismica passiva a stazione singola è una tecnica di esplorazione del sottosuolo introdotta da Kanai negli anni '50 (Kanai et al., 1945), ma si è diffusa in campo applicativo solo negli anni '90 grazie al lavoro di Nakamura (1989).

I principali campi di applicazione riguardano:

- studi di microzonazione sismica a corredo di strumenti urbanistici generali in fase di pianificazione territoriale ed urbanistica;
- analisi per la definizione dell'azione sismica di progetto in fase esecutiva di interventi edificatori diretti.

L'utilizzo finalizzato a quest'ultimo punto ha avuto un notevole sviluppo a seguito dell'entrata in vigore del D.M. 14.01.2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni – NTC 2008), per la praticità d'uso, ma soprattutto per le informazioni che il metodo è in grado di fornire.

Ai fini della riduzione del rischio sismico in fase di programmazione territoriale ed urbanistica, la tecnica HVSR viene segnalata negli "Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica" del Dipartimento di Protezione Civile Nazionale (2008) come mezzo d'indagine idoneo alla corretta caratterizzazione dei terreni.

E' stata inoltre impiegata anche dal Servizio di Protezione Civile della Regione Marche per la predisposizione di appositi studi di "Microzonazione Sismica" condotti a cura di M. Mucciarelli e P. Tiberi lungo la fascia costiera marchigiana (Senigallia - 2007) e nei territori interni della regione (Cagli, Offida, Serra de' Conti e Treia - 2004).

La tecnica consiste nel registrare il microtremore sismico ambientale in un sito per alcuni minuti tramite stru-

menti (velocimetri) opportunamente sensibili e nel ricavare il rapporto tra componenti orizzontali e verticali del moto (H/V).

La tecnica HVSR viene impiegata per:

1. **determinare la frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo**, un parametro decisamente più significativo di Vs30 (NTC 2008) ai fini degli studi di Risposta Sismica Locale (RSL), anche a livello di pianificazione territoriale (microzonazione sismica);
2. **realizzare indagini stratigrafiche del sottosuolo**; la tecnica H/V ai fini stratigrafici può essere utilizzata a livello preliminare per localizzare i punti più rappresentativi nei quali affinare l'indagine con tecniche puntuali classiche oppure per verificare, laddove esistano già altre indagini puntuali, eterogeneità significative attorno ai punti indagati o ancora come elemento di supporto ad altre indagini qualora queste presentino dubbi interpretativi;
3. **stimare il valore di Vs30** in presenza di un *vincolo*, ossia della profondità di un riflettore di cui si riconosca il marker nella curva H/V oppure della stima di Vs dello strato superficiale (Castellaro e Mulargia, 2009).

Relativamente al primo punto la frequenza di risonanza di un sito rappresenta un parametro molto importante se analizzato congiuntamente a quelle proprie delle opere che vi ricadono sopra, in quanto in caso di coincidenza delle due frequenze si può verificare il fenomeno della "doppia risonanza", estremamente pericoloso per le strutture stesse, che verrebbero sottoposte ad eccitazioni massime.

In prima approssimazione la frequenza di risonanza di un edificio è legata all'altezza dello stesso e può essere calcolata, secondo la formula:

$$f_r \text{ naturale edificio} = 10 \text{ Hz} / \text{numero di piani}$$

Tuttavia nei casi reali le relazioni sono più complesse ed in Fig. 1 ne è esemplificata una, dove la fascia azzurra indica le frequenze attese per il primo modo flessionale di vibrare di strutture in c.a. in funzione della loro altezza.

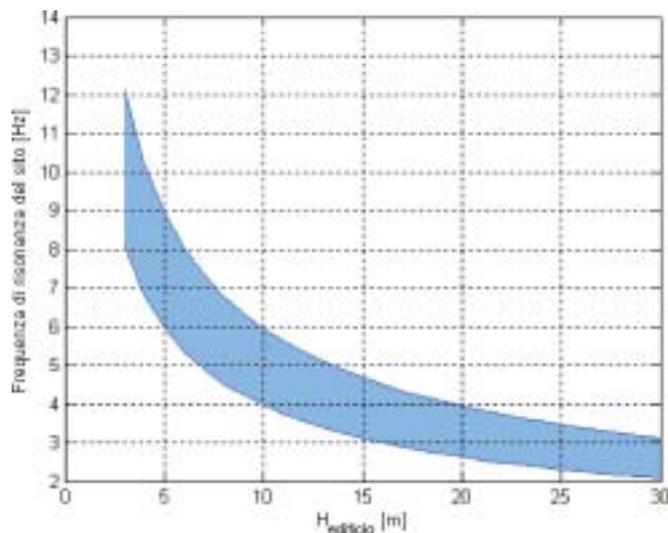


Fig. 1: Relazione tipica tra la frequenza del primo modo flessionale di vibrare ed altezza di una struttura (da Castellaro S., 2008).

In questo studio verranno presentate 3 situazioni significative sia dal punto di vista geologico, che come esempi di applicazione del metodo H/V:

- Caso 1: sito caratterizzato da morfologia sepolta irregolare confermata dalle prove H/V;
- Caso 2: due siti su bedrock litologicamente differenti;
- Caso 3: sito con bedrock profondo e coperture caratterizzate dal passaggio da depositi limoso - argillosi a ghiaie. In questo caso saranno presentati i risultati e limiti di due tecniche di sismica passiva: a stazione singola H/V e ReMi.

Tutte le registrazioni dei microtremori presentate in questo studio sono state eseguite con il tromografo digitale TROMINO, uno strumento progettato specificamente per l'acquisizione del rumore sismico, ed elaborate con il software GRILLA.

CASO 1: Area di fondovalle caratterizzata da morfologia sepolta irregolare - Loc. Bottega (PU)

Il caso in questione riguarda un'area di lottizzazione dalla morfologia pressoché pianeggiante posta alla quota di 50 m ca. s.l.m. sul fondovalle del fiume Foglia. La successione litostratigrafica è rappresentata da depositi alluvionali terrazzati pleistocenici sovrastanti il substrato argilloso pliocenico, di origine sedimentologica marina; la coltre alluvionale è costituita da litotipi prevalentemente limoso - argillosi, negli spessori più superficiali e da depositi ghiaioso - sabbiosi in quelli sottostanti.

Nell'ambito dell'area sono state eseguite le seguenti indagini:

- n° 2 stendimenti con tecnica ReMi perpendicolari tra loro,
- n° 4 sondaggi a carotaggio,<
- n° 11 prove penetrometriche statiche "CPT" (un paio

di prove sono state interrotte alla base dei depositi alluvionali fini e poi proseguite con il metodo dinamico pesante "SCPT" negli strati sottostanti),

- n° 5 prove a stazione singola con tecnica H/V.

Il sito è caratterizzato dalla presenza di una morfologia sepolta, rappresentata da una scarpata di un paleo-alveo.

I sondaggi, le prove penetrometriche e le indagini H/V evidenziano chiaramente questa situazione riportando profondità differenti del substrato nei vari punti dell'area (Fig. 2 e Fig. 3). Viene così a mancare la condizione di planarità e parallelismo degli strati, necessaria per l'applicabilità della tecnica ReMi, la quale non è in grado di rilevare variazioni di profondità dei riflettori lungo la sezione di indagine.

La presenza di una morfologia sepolta è invece facilmente individuabile nelle prove H/V, in quanto lo "shift" della frequenza di picco (da 4 Hz a 15 Hz) evidenzia una netta differenza tra la prova eseguita con bedrock a 4,5 m di profondità (Fig. 2) e quelle con bedrock a 11,5 m (Fig. 3).

Per tale motivo l'area di lottizzazione è stata suddivisa in due zone:

"Zona A" con bedrock a 4,5 m (Fig. 2): in questa area è stato eseguito il processo della curva H/V al fine di ricavare il profilo di Vs e le relative Vs30; tale profilo è stato vincolato sulla base delle informazioni pervenute dalle indagini dirette (sondaggi e penetrometriche).

Il parametro Vs30 che ne deriva è pari a 440 m/s circa, per cui la categoria di sottosuolo secondo la normativa vigente è la "B", perché il bedrock non raggiunge valori di Vs superiori a 800 m/s.

Incrocando i valori della frequenza di risonanza pari a 15 Hz, corrispondente al picco principale dovuto al contrasto tra i depositi continentali e il substrato, con il grafico di Fig. 1, si evince che in questo specifico sito strutture più alte di un piano non sono vulnerabili alla doppia risonanza

"Zona B" con bedrock a 11,5 m (Fig. 3): anche in questa area è stato eseguito il processo di modellazione diretta della curva H/V, al fine di ricavare il profilo di Vs e il relativo Vs30 utilizzando le informazioni pervenute dalle indagini dirette (sondaggi e penetrometriche). Il Vs30 che ne deriva è pari a 370 m/s circa, per cui anche in questo caso la categoria di suolo di fondazione, secondo la normativa vigente, sarebbe la "B", perché il bedrock non ha valori di Vs superiori a 800 m/s.

Va però rilevato che frequenze di risonanza dell'ordine dei 5 Hz rendono maggiormente vulnerabili per doppia risonanza edifici con altezza compresa tra 7 e 15 m (Fig. 1). Per questa tipologia di strutture è raccomandabile eseguire analisi numeriche di risposta di sito oppure declassificare il terreno alla categoria E, in quanto le categorie che prevedono un aumento graduale di Vs con la profondità (quali B e C) non sarebbero sufficientemente cautelative. Gli spettri di risposta costruiti a partire da queste categorie, infatti, non rendono conto di amplificazioni per risonanza.

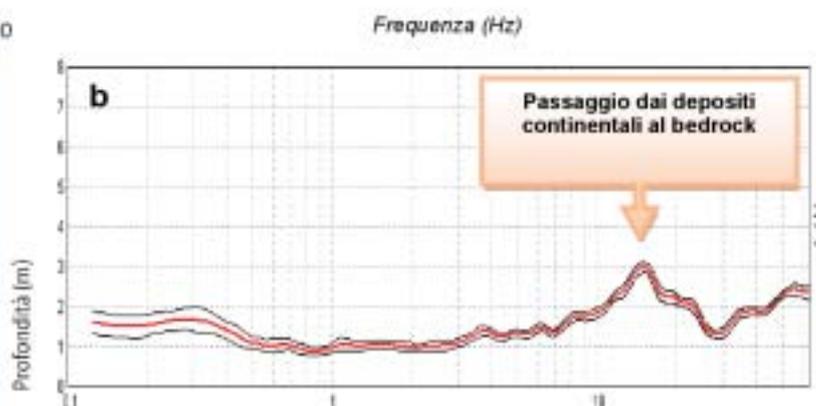
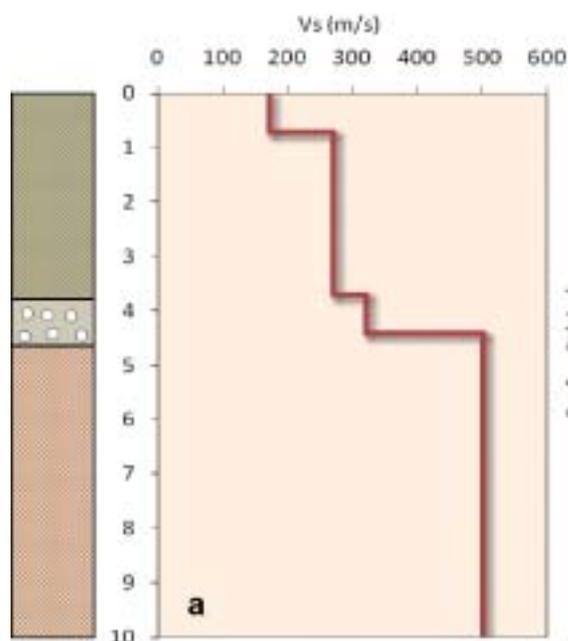


Fig. 2: Zona A
 a) Confronto tra profilo di Vs ottenuto dal fit vincolato curva H/V e log stratigrafico.
 b) Curva H/V acquisita in sito.

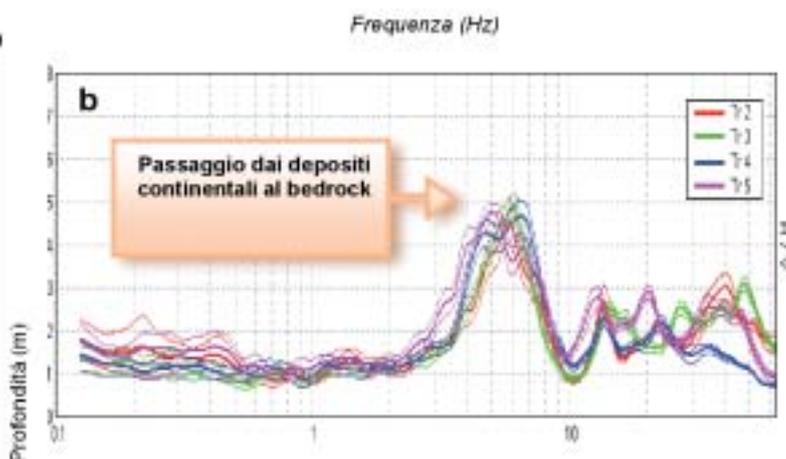
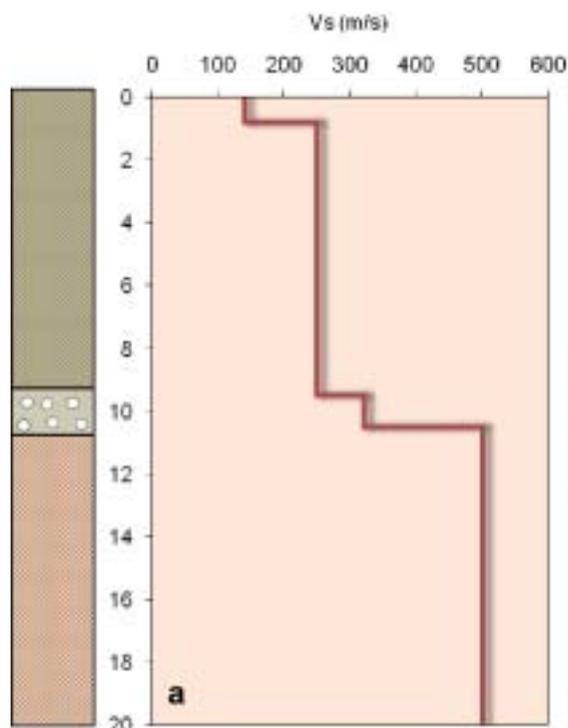


Fig. 3: Zona B
 a) Confronto tra profilo di Vs ottenuto dall'inversione della curva H/V e log stratigrafico.
 b) Sovrapposizione delle quattro curve H/V acquisite nel settore nord dell'area: si noti la situazione di omogeneità litostratigrafica (il substrato si rinviene alla stessa profondità).



CASO 2: Confronto di siti su bedrock affiorante

Requisito di una categoria A è che il sito non amplifichi il moto del suolo a nessuna frequenza di interesse ingegneristico. Il criterio di $V_{s30} > 800$ m/s non è sufficiente ad attribuire un sito in categoria A poiché esso non esclude la presenza di contrasti di impedenza e quindi di potenziali amplificazioni. La curva H/V relati-

va ad un sito su roccia sana (bedrock sismico) deve risultare piatta e di ampiezza pari a 1. Solo i siti che presentano queste caratteristiche ($H/V = 1$ e $V_s > 800$ m/s) possono essere attribuiti alla categoria di sottosuolo A. Deviazioni dalla planarità della curva H/V, legate a fratturazioni/alterazioni dell'ammasso roccioso o a stratificazioni con basso contrasto d'impedenza dello stesso, producono invece amplificazione e non sono direttamente attribuibili alla categoria A. Di seguito vengono presentati i risultati ottenuti su due siti, entrambi giacenti su substrato affiorante, ma con caratteristiche diverse.

ESEMPIO A - Sant'Angelo in Lizzola (PU)

Il sito è ubicato sui terreni messiniani della Formazione a Colombacci, costituiti da arenarie molto compatte e cementate, entro i quali la prova penetrometrica dinamica pesante è andata a rifiuto ad appena 1.5 m di profondità dal p.c..

Nel caso specifico è stata riscontrata una Vs30 pari a 850 m/s; l'assenza di risonanze nel dominio di frequenze di interesse ingegneristico (vedi Fig. 4), consente quindi di attribuire il sito in esame alla categoria di sottosuolo "A".

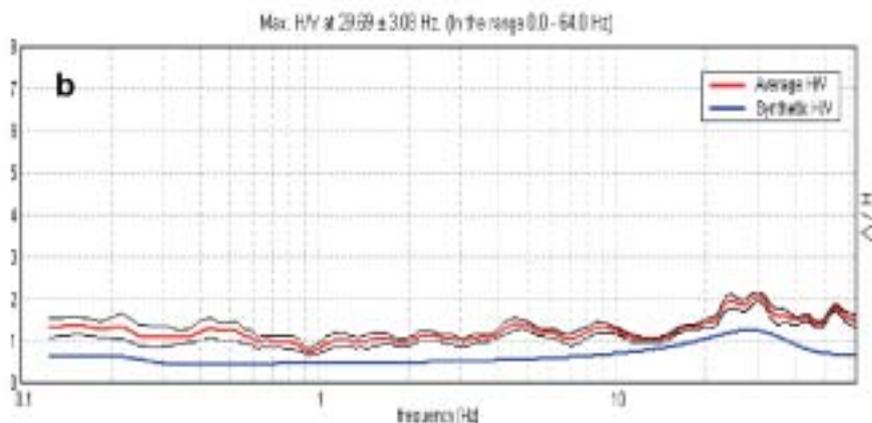
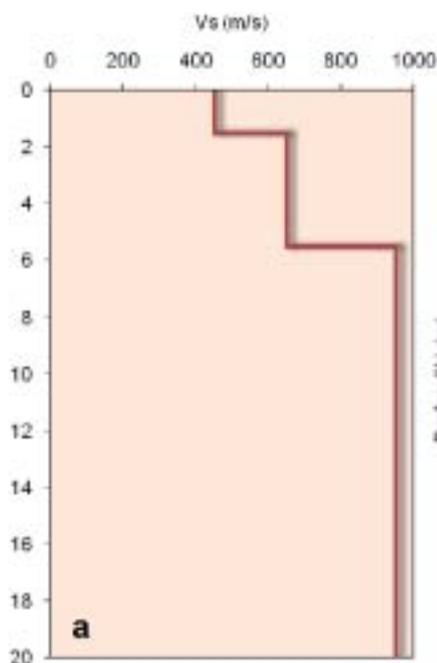


Fig. 4: ESEMPIO A (Sant'Angelo in Lizzola)

a) Profilo di Vs ottenuto dal fit vincolato della curva H/V.
 b) Confronto tra H/V sperimentale (rosso) e teorico (blu).
 L'andamento della curva H/V rimane pressochè costante su valori pari a 1 tranne a frequenze di marginale interesse ingegneristico (>20 Hz).

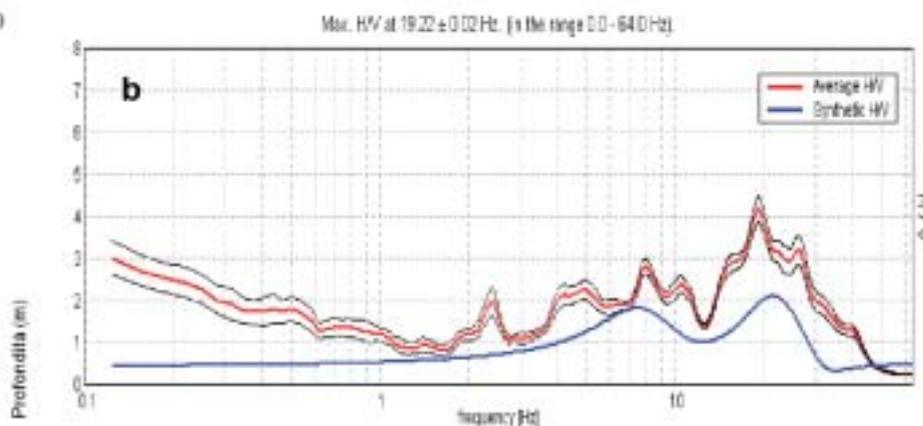
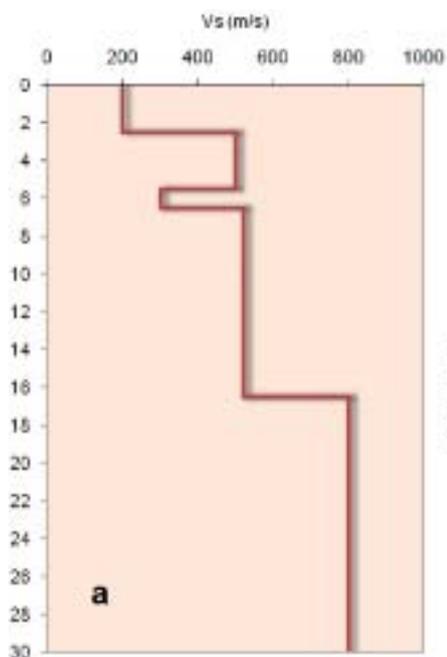


Fig. 5: ESEMPIO B (Osteria Nuova)

a) Profilo di Vs ottenuto dal fit vincolato della curva H/V.
 b) Confronto tra H/V sperimentale (rosso) e teorico (blu).
 L'andamento della curva H/V è caratterizzato da picchi numerosi e statisticamente significativi.

tanti picchi di risonanza dovuti verosimilmente al passaggio dai litotipi formazionali in facies argillosa a quelli in facies sabbiosa o direttamente a quelli arenacei della Formazione a Colombacci.

In questo caso il processo di fit vincolato della curva sperimentale ha portato ad un valore di V_{s30} pari a 500 m/s; la categoria di suolo di fondazione è quindi la "B".

La frequenza di risonanza principale di questo sito è 19 Hz, ma occorre comunque prestare attenzione ad altri picchi presenti all'interno della fascia di interesse ingegneristico (4-10 Hz).

Quest'ultimo caso è un chiaro esempio di come la presenza del substrato geologico affiorante non sia condizione sufficiente per attribuire un determinato sito alla categoria di sottosuolo "A".

CASO 3: Sito di pianura caratterizzato da depositi continentali (Bedrock-like) - Imola

Il sito è caratterizzato da depositi continentali con un substrato confinato a circa 70 m dal p.c.

Prove eseguite:

- n°2 prove penetrometriche CPT
- n°5 prove H/V
- n°1 stendimento lineare di 12 geofoni con interdistanza di 3 m per l'analisi ReMi.

Le prove penetrometriche evidenziano il passaggio dalle alluvioni argillose a quelle ghiaiose ad una profondità di circa 17 m.

La risonanza relativa al contatto argille-ghiaia è evidenziata in Fig. 6c dal netto picco H/V a 4 Hz. Questo rappresenta il tipico caso in cui i picchi non sono legati al bedrock in senso stretto, ma a uno strato assimilabi-

le al bedrock (bedrock-like), corrispondente in questo sito al livello di ghiaie a 17 m.

Al di sotto di questa profondità la curva H/V non si mantiene piatta e con ampiezza pari a 1, ma mostra altri massimi locali legati a strutture più profonde.

Il grafico a contouring di Fig. 6d rappresenta gli spettri medi di velocità di fase dell'onda di Rayleigh ottenuta dalla tecnica ReMi selezionando solo le finestre contenenti prevalentemente il modo fondamentale della curva di dispersione. Per eseguire questa operazione occorre analizzare molte finestre di segnale. Il rischio che si corre è infatti quello di interpretare modi superiori o velocità apparenti come se fossero fondamentali o velocità reali, attribuendo così al terreno in questione velocità molto più elevate di quelle reali, sovrastimando la categoria di suolo di fondazione.

La curva tratteggiata blu di Fig. 6d è il picking proposto che segue il solo modo fondamentale.

Ricordando che:

$$\lambda f = V$$

dove:

λ = lunghezza d'onda (m);

f = frequenza d'onda (Hz);

V = velocità (m/s),

dal momento che è possibile seguire la curva di dispersione fino a circa 7 Hz, con V_s di circa 160 m/s, è possibile concludere che la massima lunghezza d'onda esplorante è di circa 23 m, a cui corrisponde una profondità di indagine che è meno della metà (11.5 m):

$$\lambda = \frac{V}{f} = \frac{160 \left(\frac{m}{s} \right)}{7 \left(\frac{1}{s} \right)} = 23m$$

Fittando congiuntamente la prova H/V e la prova in array si possono raggiungere invece profondità maggiori. Il valore della V_{s30} del terreno è pari a 240 m/s che consente di attribuire il sito in questione alla categoria di sottosuolo "C". In virtù di una frequenza di risonanza dell'ordine dei 4 Hz, la categoria "C" potrebbe non essere sufficientemente cautelativa per strutture con frequenze proprie ricadenti in prossimità di tale valore. In tal caso si potrà quindi optare per una modellazione di cosiddetto III livello, che implica analisi numeriche di risposta di sito, oppure per un declassamento alla categoria "E". (Tomassoli, 2008).

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Dagli esempi sopra descritti è emerso come la tecnica H/V rappresenti un valido supporto alle indagini dirette standard e alle altre tipologie di indagini geofisiche.

In particolare, essa si dimostra efficace nell'individuare la presenza di strati (bedrock o assimilabili al bedrock) che possono indurre amplificazioni particolari, anche quando questi risultino molto profondi e non raggiungi-

GEOENERGIA
Ditta di servizi



Prove Penetrometriche Statiche da 20 Tonnellate

Prove Penetrometriche Dinamiche DPSH

Rendering fotorealistico, filmati virtuali e modellazione tridimensionale del terreno



Geoenergia
 Via M.L. King 6/B Porto Recanati
 P.I. 0161780439
 Cell: 3394958493
 Tel.Fax: 0733709724 - 0719797571

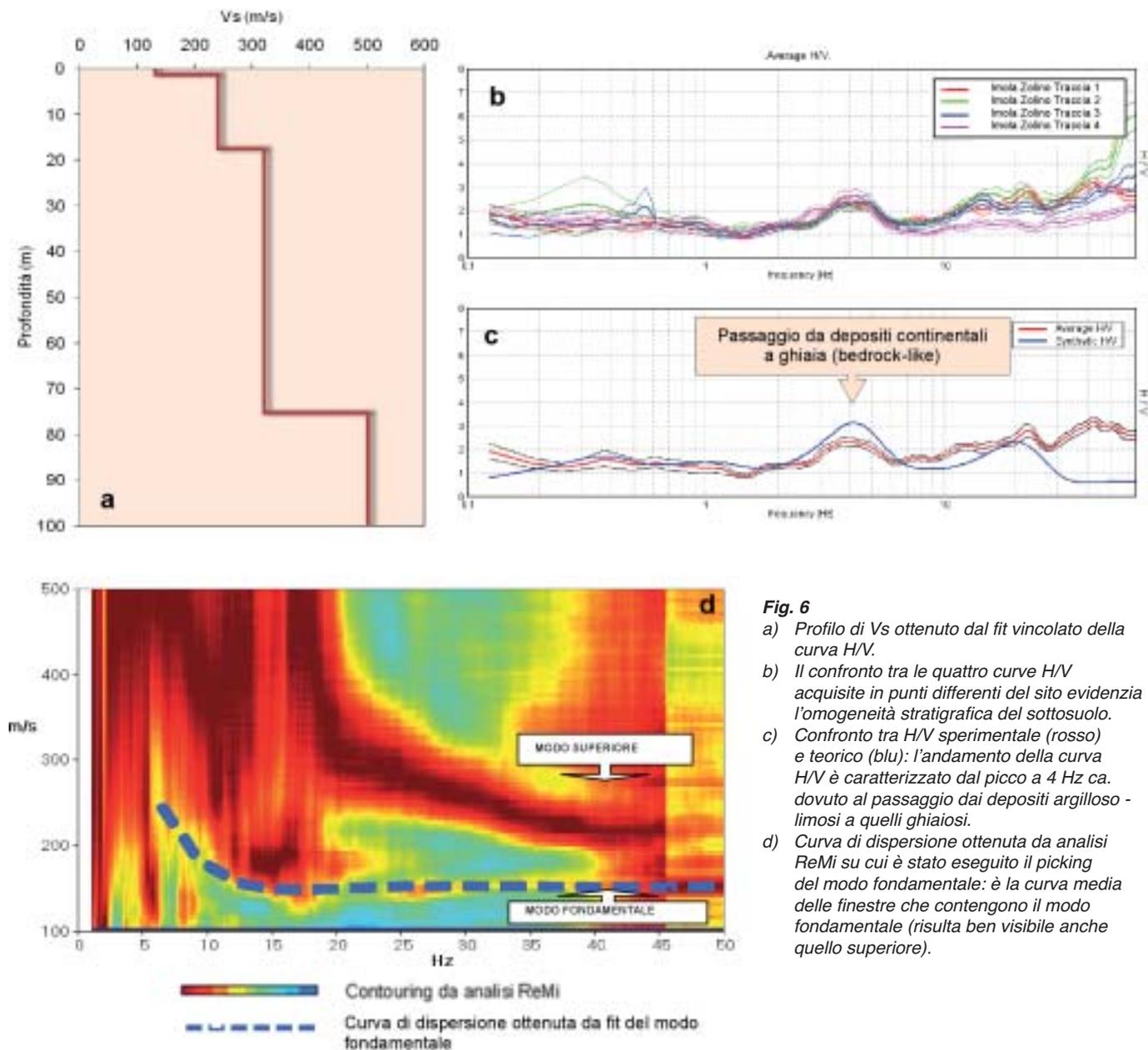


Fig. 6

- a) Profilo di V_s ottenuto dal fit vincolato della curva H/V.
- b) Il confronto tra le quattro curve H/V acquisite in punti differenti del sito evidenzia l'omogeneità stratigrafica del sottosuolo.
- c) Confronto tra H/V sperimentale (rosso) e teorico (blu): l'andamento della curva H/V è caratterizzato dal picco a 4 Hz ca. dovuto al passaggio dai depositi argilloso-limosi a quelli ghiaiosi.
- d) Curva di dispersione ottenuta da analisi ReMi su cui è stato eseguito il picking del modo fondamentale: è la curva media delle finestre che contengono il modo fondamentale (risulta ben visibile anche quello superiore).

bili dalle indagini convenzionali.

A differenza delle tecniche in array basate su onde di superficie, la tecnica H/V non si fonda sull'assunto di sottosuolo a strati piani e paralleli (mentre la sua inversione naturalmente sì) e può pertanto indicare anche situazioni non 1D.

La prova H/V fornisce poi risultati immediati nel dominio delle frequenze, che rappresenta il dominio di interesse dell'ingegneria sismica, in cui le strutture vengono viste come oscillatori armonici sottoposti ad una ampiezza massima in funzione della frequenza (spettri di risposta).

Un esempio semplice ma indicativo di effetto indotto dalla doppia risonanza suolo/struttura è dato dall'esperimento che è possibile visionare su internet al seguente indirizzo:

<http://www.youtube.com/user/helstonscience> (cliccare su "Earthquake!").

Gli esempi proposti hanno mostrato anche come l'H/V possa essere d'aiuto nel distinguere i casi in cui è possibile progettare secondo le categorie semplificate di normativa basandosi semplicemente sul valore di V_{s30} , da quelli in cui questo non è possibile e sono invece necessari declassamenti oppure specifiche modellazioni numeriche.

E' qui che entrano in gioco capacità, nozioni e cognizioni proprie del geologo, il quale deve essere in grado di definire qual è la categoria che meglio rappresenta il terreno in questione, sostenendo le proprie considerazioni anche nei confronti del costruttore e del progettista.

Le "Linea Guida NTC 2008" del Gruppo Interregionale

Ordine dei Geologi (Luglio 2010) per la prima volta sottolineano ampiamente l'importanza della determinazione della frequenza di risonanza di un terreno nel comune utilizzo dell'approccio semplificato della normativa.

Tale orientamento è stato già recepito dalla Regione Lazio che, con la D.G.R. n. 545 del 26/11/2010 (Linee Guida per l'utilizzo degli indirizzi e criteri generali per gli studi di Microzonazione Sismica), ha provveduto ad inserire tra le indagini minime da svolgere per gli studi di MS di I livello anche le misure della frequenza naturale del sito con tecniche passive o attive a stazione singola, nonché a consigliare di fornire tra i prodotti finali dello studio stesso anche una "Carta delle frequenze fondamentali dei depositi".

In definitiva la tecnica HVSR trova ampia applicazione sia nell'ambito degli studi di microzonazione sismica (MS) a livello di pianificazione urbanistica e territoriale, sia in fase di progettazione esecutiva in ottemperanza alle NTC2008.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la Dott.ssa Silvia Castellaro del Dipartimento di Fisica – Settore di Geofisica dell'Università di Bologna per la revisione dell'articolo.

BIBLIOGRAFIA

Castellaro S., Mulargia F., Bianconi L. (2005). *Passive seismic stratigraphy: a new efficient, fast and economic technique*. Geologia Tecnica e Ambientale, 3, 76-102.

Castellaro S., Mulargia F. (2009). *Vs30 estimates using constrained H/V measurements*. Bull. Seism. Soc. Am., 99, 761-773.

Castellaro S., Mulargia F. e Rossi P.L. (2007). *Effetti di sito e Vs30: una risposta alla normativa antisismica*. Rivista "Il geologo dell'Emilia Romagna".

Castellaro S., Quagliere S., Tomassoli C. (2009).

Esempi di microzonazione sismica in ambiente montano, litoraneo e di pianura nella Provincia di Forlì e Cesena. GNGTS Trieste.

Kanai K., Tanaka T. e Osada K. (1954). *Measurement of the micro-tremor I.*, Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ., 12, 192-210.

Nakamura Y. (1989). *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor of the ground surface*. QR Railway Technical Research Institute, 30, 25-33.

Presidenza del Consiglio dei Ministri - Dipartimento della Protezione Civile (2008). *Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica*.

Regione Marche – Servizio Protezione Civile e Sicurezza Locale, GNDT, INGV (2004). *Microzonazione sismica di Cagli – Offida – Serra de' Conti – Treia*. A cura di M. Mucciarelli e P. Tiberi.

Regione Marche – Servizio Protezione Civile, INGV (2007). *Scenari di pericolosità sismica della fascia costiera marchigiana: la microzonazione sismica di Senigallia*. A cura di M. Mucciarelli, P. Tiberi.

Tomassoli C. (2008). *Problemi e strategie di soluzione nella misura passiva del profilo di Vs*. Tesi di laurea.

Tomassoli C. (2010). *Uso integrato di tecniche geofisiche nella stima delle Vs30*. Atti del Corso APC organizzato dall'ORG Marche "Indagini geofisiche nelle NTC 2008: dalla sismologia moderna alla moderna sismica applicata".

Tomassoli C. (2010). *Esempi di microzonazione sismica in ambiente montano, litoraneo e di pianura dell'Appennino Romagnolo*. Atti del Corso APC organizzato dall'ORG Marche "Indagini geofisiche nelle NTC 2008: dalla sismologia moderna alla moderna sismica applicata".



Soluzioni avanzate per la geologia ambientale

CAMPIONAMENTI E MONITORAGGI AMBIENTALI

ARIA — ACQUA — SUOLO

Geofisica: Metodi elettrici ed elettromagnetici
Misure idrometriche e test idraulici su pozzi / piezometri
Soil Gas Survey e misure di flusso di Biogas
Log chimico-fisici su pozzi / piezometri
Termografia edile ed ambientale
Rilievi GPS e mobile mapping

Civ. 328 7767921
 Tel 0721 1790158
 Fax 0721 406949
[asrini@asrini.it](mailto:as@asrini.it)

GEONFO SERVICE di ANDREA SEVERINI Via Manenti, 42 61100 Piacenza (PU) Partita Iva 02336270410

