

Caratterizzazione dinamica del sottosuolo ai fini dell'Ingegneria Sismica

Silvia Castellaro

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Università di Bologna
V.le Carlo B. Pichat 8 – 40127 Bologna
silvia.castellaro@unibo.it

INTRODUZIONE

Progettare in zona sismica richiede la conoscenza delle accelerazioni (o velocità o spostamenti) alle quali la struttura in progetto potrà essere assoggettata in caso di terremoto. Mentre questi valori al bedrock, ossia sul livello stratigrafico che per definizione non amplifica il moto del terremoto, sono disponibili¹ secondo diversi livelli di probabilità di accadimento in mappe preposte dette di PGA_0 (Peak Ground Acceleration), stabilire come essi vengano amplificati o deamplificati in superficie è tipicamente compito del geologo.

E' nell'interesse di tutti la ricerca di un parametro semplice da misurare che possa essere usato come stimatore dell'amplificazione sismica di sito. Pur essendo l'amplificazione sismica un fenomeno complesso, che dipende da moltissime variabili (Anderson, 2007), ci sono almeno due buone ragioni perché questo stimatore debba contemplare la velocità delle onde sismiche di taglio (V_s).

La prima ragione sta nel fatto che V_s è un indicatore della rigidità μ dei terreni secondo la formula $\mu = \rho V_s^2$, dove ρ è la densità.

La seconda ragione sta nel fatto che le onde di volume generate dai terremoti hanno incidenza all'incirca verticale in superficie. Tra queste, le onde di taglio S , che producono moti ortogonali alla direzione di propagazione, inducono spinte orizzontali sulle strutture che, a meno di quelle indotte dal vento, non erano un tempo considerate nella normale progettazione edilizia, a differenza dei carichi verticali. Esistono comunque altri tipi di onde sismiche che inducono moti orizzontali sui terreni, quali le onde di superficie (Rayleigh e Love), che sono peraltro le onde dominanti sia per ampiezza che per durata in qualsiasi sismogramma vicino alla sorgente nel caso di terremoti poco profondi, come quelli Italiani. Nonostante questo, il ruolo delle onde di superficie è ancora completamente trascurato nelle normative ingegneristiche internazionali.

Negli ultimi anni il parametro più universalmente adottato come stimatore dell'amplificazione sismica di sito è stato il così detto V_{s30} , ossia la velocità dello strato omogeneo equivalente ai primi 30 m di spessore, che è un concetto diverso da quello di media delle V_s nei primi 30 m. Nella sua accezione originaria questo parametro fu introdotto negli USA da Borcherdt (1989) e voleva rendere conto della rigidità media di un terreno entro una profondità (100 piedi) esplorabile in una giornata di lavoro, con un sondaggio. Al tempo tale parametro non fu proposto per le normative tecniche ma per più generiche mappe di scuotimento ad uso dei servizi di protezione civile. Fu solo in seguito che la necessità di un parametro semplice che

¹ Per una disamina sui problemi legati alle stime probabilistiche di pericolosità si legga ad esempio S. Stein et al. (2011, *Seism. Res. Lett.*, 82(5), 623-626) e P. Gulkan (2013, *Seism. Res. Lett.*, 84(3), 413-416).

fungesse da stimatore dell'amplificazione sismica di sito (Fa) lo ha posto alla base di molte normative tecniche.

La polemica sull'efficacia di questo parametro è una vecchia storia (Castellaro *et al.*, 2008; Lee e Trifunac, 2010) e ad oggi la necessità del superamento dell'approccio basato su Vs30 è ben compresa, soprattutto nella comunità geologica. Qui ci limiteremo a fare un esempio eclatante dell'insostenibilità di una relazione tra Vs30 e amplificazione sismica di sito, traendolo dal lavoro in cui Borchardt (1989) stesso per la prima volta definì Vs30. La relazione tra Fa e Vs30 risulta infatti inesistente dal punto di vista statistico persino nell'insieme dei dati californiani sui quali era stata inizialmente proposta. Limitandoci al caso relativo ai dati di breve periodo, che sono quelli che interessano la maggior parte degli edifici (per gli altri si veda Castellaro *et al.*, 2008). Le coppie di dati (Vs30, Fa) originarie sono ridisegnate in Figura 1A. L'osservazione visiva tenderebbe a far concludere che a) per Vs30 < 500 m/s lo scatter è tale che nessuna relazione è definibile tra Fa e Vs30, b) per Vs30 > 500 m/s i dati sembrano appiattirsi attorno a un generico 0.5 < Fa < 2, che è un intervallo enorme rispetto ai desideri delle normative, le quali tendono a proporre suddivisioni raffinate di Fa a passi addirittura di decimali.

Tuttavia se, come è stato fatto in Borchardt (1989), le ordinate (Fa) che coprono meno di un ordine di grandezza (0.5 < Fa < 4) vengono rappresentate a) in scala logaritmica (Figura 1B), b) appiattite in una scala che copre 3 ordini di grandezza (Figura 1C) e infine c) si sovrappone una retta di regressione (Figura 1D) l'occhio è ingannato a sufficienza da percepire una relazione in realtà inesistente. L'occhio è ingannato ma la matematica non lo è ed infatti il coefficiente di correlazione di una tale relazione è prossimo a zero ($R^2 = 0.08$, che significa che solo l'8% dei dati sarebbe spiegato dal modello). Il problema sussiste anche in altri casi proposti nella letteratura internazionale quali Harmsen (1997), Hartzell *et al.* (2001), Boore (2004).

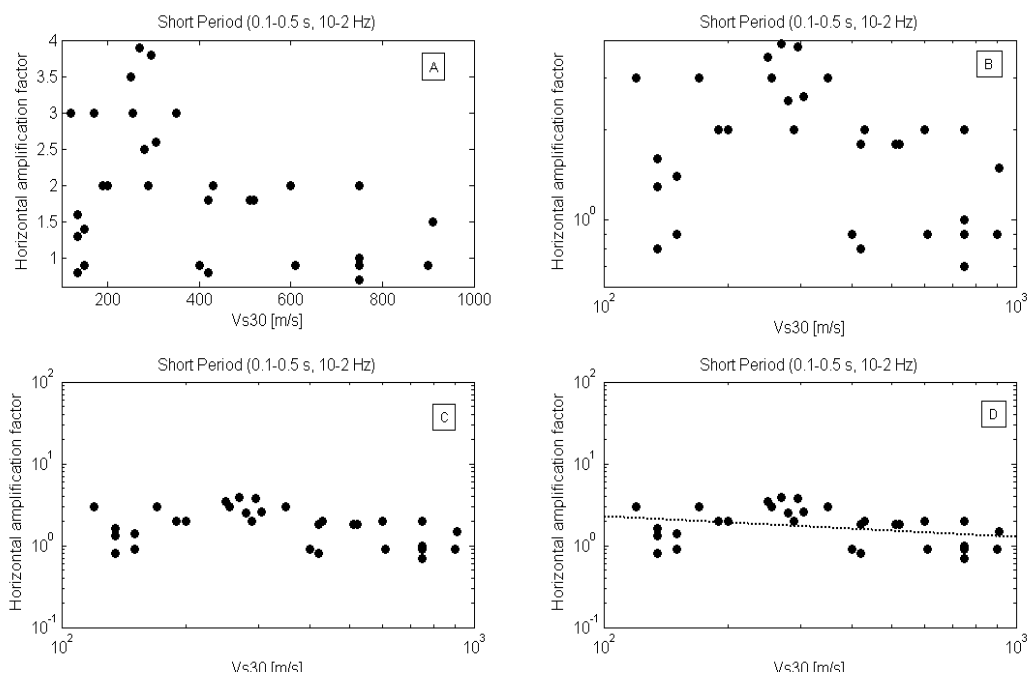


Figura 1. Inesistenza della relazione Fa-Vs30. Set di dati (Vs30, Fa) ridisegnato da Borchardt (1989) per la classe a breve periodo. I dati sono disegnati rispettivamente in scala A) bi-lineare, B) bi-logaritmica, C) bi-logaritmica con asse Y espanso su 3 ordini di grandezza, D) come in C) con aggiunta una retta di regressione.

SUPERARE I LIMITI DELLE CLASSIFICAZIONI BASATE SU Vs30: PERCHE'?

Al di là dell'analisi statistica sulla sostenibilità di una relazione Fa-Vs30, esistono ragioni fisiche in grado di spiegare la mancanza di una relazione tra i due parametri.

PRIMA RAGIONE: l'amplificazione è legata alle variazioni di rigidità prima che la rigidità assoluta

Scrivevano Aki e Richards (1980; Anderson, 2007), semplificando al massimo, che il guadagno di amplificazione in superficie (strato 1) rispetto al bedrock (strato 0) è dato dalla radice del rapporto di impedenza² tra bedrock e coperture:

$$\left(\frac{\rho_1 V_{s1}}{\rho_0 V_{s0}}\right)^{0.5}$$

Equazione 1

Non è dunque la rigidità assoluta di un terreno a determinare l'amplificazione sismica ma dal contrasto di impedenza tra unità sismiche. In altre parole, in via teorica coperture fini caratterizzate da Vs di 100 m/s (es. argille) sopra substrati a 400 m/s (es. qualsiasi roccia sedimentaria tenera o alterata) possono amplificare come coperture molto rigide a 400 m/s (es. ghiaia) sopra bedrock caratterizzati da Vs di 1600 m/s (ammassi rocciosi sani), nonostante il primo caso, secondo le Norme Tecniche sulle Costruzioni (NTC, 2008), ricada in categoria S1 mentre il secondo caso possa rientrare in categoria B.

Esiste dunque un motivo fisico per cui il parametro Vs30 rischia di essere spesso uno stimatore inefficace dell'amplificazione stratigrafica ed è il fatto che esso non contiene informazione sui contrasti di impedenza (Equazione 1). La sola eccezione parziale a questa incapacità è rappresentata dalla categoria di suolo E (NTC, 2008) in cui entrano in gioco i contrasti di impedenza tra coperture (massimo 20 m di spessore, $180 < V_s < 360$ m/s) sovrastanti il substrato roccioso ($V_s > 800$ m/s).

SECONDA RAGIONE: i limiti della profondità di indagine a 30 m

Come accennato, il numero 30 nel parametro Vs30 fu introdotto per lo più per ragioni di comodità e disponibilità di dati. Qui cercheremo di ridefinire la profondità di indagine minima necessaria ai fini di una caratterizzazione adeguata della risposta di sito. Questa definizione implica che si sposti il ragionamento dal dominio delle profondità al dominio delle frequenze.

Per comprendere questo punto dobbiamo definire: 1) per quanto riguarda i suoli, la relazione tra frequenze di risonanza dei suoli (che sono le frequenze a cui l'amplificazione è massima) e profondità dei riflettori che le generano e 2) per quanto riguarda le strutture, la relazione tra modi di vibrare di queste e la loro geometria.

Lo studio della risposta di sito interessa infatti le strutture nella misura in cui si evidenziano amplificazioni nell'intervallo di frequenze di proprie della specifica struttura in esame. Una coincidenza di risonanze suolo-struttura (anche detta doppia risonanza) è una condizione particolarmente sfavorevole per le sollecitazioni che la struttura dovrà sopportare.

² Per impedenza sismica si intende il prodotto tra densità e velocità dell'onda sismica nel mezzo.

I MODI DI VIBRARE (RISONANZE) DEI SUOLI

Si immagina una interfaccia tra bedrock sismico (V_{s0} , ρ_0) e coltre sedimentaria meno rigida (V_{s1} , ρ_1) di spessore H (Figura 2). Un'onda SH (onda di taglio polarizzata sul piano orizzontale) che incide verticalmente dal basso su tale interfaccia con ampiezza A_0 , come accade per esempio a seguito di un terremoto, si trasmette in superficie con una ampiezza A_1 secondo il coefficiente di trasmissione

$$\frac{A_1}{A_0} = \frac{2\rho_0 V_{s0}}{\rho_0 V_{s0} + \rho_1 V_{s1}}$$

Equazione 2

Da questo si comprende come, pur diminuendo l'energia totale, l'ampiezza del moto nello strato 1 aumenta fino a raddoppiare quando $V_{s1} \ll V_{s0}$.

Giunta all'interfaccia coperture-aria libera, la stessa onda sarà riflessa nello strato 1 con ampiezza A_R determinata dal coefficiente di riflessione

$$\frac{A_R}{A_1} = \frac{\rho_0 V_{s0} - \rho_1 V_{s1}}{\rho_0 V_{s0} + \rho_1 V_{s1}}$$

Equazione 3

Un'onda così rifratta e amplificata in superficie tenderà a rimanere intrappolata per riflessioni multiple (alla superficie libera, nuovamente al bedrock e così via) e darà luogo a fenomeni di risonanza per lunghezze d'onda incidenti $\lambda = n \cdot 4 H$ ^[3] (Figura 2). Le frequenze a cui si manifesta la risonanza sono descritte dalla legge:

$$f = n \frac{V_s}{4 H} \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

Equazione 4

dove n indica l'ordine del modo di vibrare (fondamentale, primo superiore ecc.). Nella maggior parte dei casi nei sistemi coperture tenere vs. bedrock-like, a causa dell'attenuazione delle coperture, il solo modo visibile è il fondamentale.

Un suolo vibra con maggiore ampiezza a specifiche frequenze (per l'appunto di risonanza) non solo quando è eccitato da un terremoto ma anche quando è eccitato da un qualsiasi tremore di qualsiasi origine. Questo fa sì che la misura delle frequenze di risonanza dei terreni sia possibile ovunque ed in modo semplice, come sarà spiegato in seguito, anche senza terremoti.

³ Il 4 in questa equazione deriva dal fatto che un'onda che entra dal bedrock, si riflette alla superficie e torna al bedrock, subisce all'interfaccia col bedrock una ulteriore riflessione con sfasamento di 180° rispetto all'onda incidente. Affinché l'onda torni in fase occorre pertanto una ulteriore riflessione alla superficie libera, e quindi un percorso $2 H$ aggiuntivo.

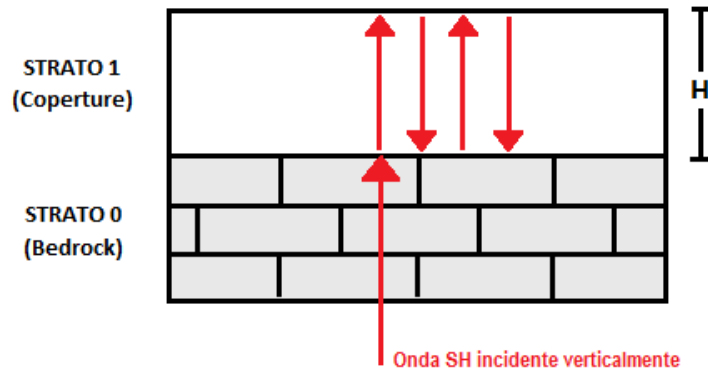


Figura 2. Intrappolamento per trasmissione e successive riflessioni di un'onda sismica in uno strato di coperture di spessore H sovrastanti un bedrock rigido.

I MODI DI VIBRARE DELLE STRUTTURE

Il lettore è già esperto con la misura dei modi di vibrare delle strutture, pertanto in questo capitolo non ce ne occuperemo in dettaglio. Diremo solo che state proposte numerose formule semiempiriche per il calcolo del periodo proprio di una struttura in funzione della sua altezza e della sua tipologia. Tra le varie formule proposte ne consideriamo due entro le quali si colloca la maggior parte delle altre, ovvero quelle proposte rispettivamente da Chopra e Goel (2000) e Hong e Hwang (2000) per strutture in cemento armato:

$$T = 0.0294 A^{0.804} \quad T = 0.067 A^{0.9}$$

Equazione 5

dove A è l'altezza della struttura in metri.

LA COINCIDENZA DI RISONANZE SUOLO-STRUTTURA

Definito in quali condizioni un suolo risona (Equazione 4) e in quali condizioni una struttura risona (Equazione 5), è possibile stimare in quali condizioni si potrà sviluppare 'doppia-risonanza' suolo-struttura e la profondità di indagine significativa dal punto di vista della risposta sismica di sito.

E' evidente infatti che se una struttura ha frequenza propria f , andrà indagato se nel sottosuolo esistono amplificazioni per risonanza stratigrafica attorno a quella frequenza⁴. Ci interessa ora definire a quale profondità corrisponde questa frequenza critica f . Uguagliando i termini in f di Equazione 4 e Equazione 5, ed esplicitando la profondità H del riflettore che genera la risonanza sulle coperture (Figura 2), troviamo che per una fissata V_s delle coperture le soluzioni sono date dalle linee di Figura 3. Queste rappresentano la profondità dell'indagine minima entro la quale vanno escluse risonanze del sottosuolo potenzialmente critiche per le strutture.

Emerge una caratteristica apparentemente paradossale, ossia che a parità di altezza della struttura (e quindi di frequenza propria della stessa), quanto maggiore è la V_s delle coperture, tanto maggiore è la profondità di indagine entro la quale va rilevata l'eventuale presenza di contrasti di impedenza. Questo è in un certo senso contrario all'approccio e alle aspettative dell'ingegneria geotecnica nella quale, quando si ha a che fare con terreni di buone proprietà meccaniche già in superficie, si limita la profondità di indagine

⁴ Il discorso vale anche per le frequenze dei modi superiori rilevanti della struttura.

mentre al contrario, quando si ha a che fare con terreni scadenti in superficie, si approfondisce l'indagine nella ricerca di terreni di migliori qualità.

Dalla Figura 3 si osserva ad esempio che ottenere un profilo di Vs nei soli primi 30 m è sufficiente solo su terreni teneri e solo per edifici entro i 3-4 piani. Se ci si sposta su terreni di media-rigidità ($V_s = 400$ m/s), l'indagine entro 30 m può non essere sufficiente già per strutture di 2 piani fuori terra.

Come aggravante va considerato che se un edificio subisce un danno strutturale nelle prime fasi di un terremoto, le sue frequenze proprie diminuiscono e la struttura può entrare in doppia risonanza col terreno durante le fasi finali del terremoto. Sembra quindi cautelativo considerare configurazioni geologiche sfavorevoli quelle che presentano risonanza del sottosuolo fino a frequenze anche del 40% inferiori rispetto alla frequenza del primo modo di una struttura (Clinton *et al.*, 2006).

L'esempio di Figura 3 fa emergere altre due considerazioni. Poiché la frequenza minima (profondità) di indagine va commisurata all'opera da realizzare, di questa è necessario conoscere le frequenze dei modi di vibrare principali. Se l'opera esiste già, la misura dei suoi modi di vibrare si può effettuare rapidamente in passiva. Se l'opera non esiste, una prima stima dei suoi modi di vibrare può essere effettuata tramite equazioni semplificate.

Se il fine è la microzonazione sismica o la pianificazione territoriale, ossia studi in cui ancora non è nota a priori la destinazione finale specifica dei singoli suoli, andrà indagato tutto il campo di frequenze di interesse ingegneristico standard (tipicamente 0.5-20 Hz o anche 0.1-20 Hz se sono previsti edifici particolarmente alti).

La seconda considerazione nasce dall'osservazione delle ordinate di Figura 3. E' evidente che anche per strutture modeste di 4-5 piani può rendersi necessaria l'indagine del sottosuolo fino a 100 e oltre metri di profondità e mentre, come si vedrà più avanti, di metodi per misurare Vs30 ne esistono molti, di metodi per misurare profili di Vs nei primi 100 m o più ne esistono molti meno.

In Figura 4A sono illustrati le frequenze dei modi di vibrare di una struttura a pianta quadrata realmente esistente di 25 piani: il primo modo flessionale in entrambi gli assi si colloca a 0.5 Hz. Nel pannello B sono illustrate le risonanze di un sito (misurate con tecnica H/V, si veda oltre) di pianura caratterizzato da 300 m di alluvioni fini sovrastanti il bedrock. La risonanza principale del sito è 0.5 Hz. Nel pannello C è illustrata invece la risonanza di un sito pedemontano caratterizzato da 7 m di sedimenti fini sovrastanti il bedrock. La risonanza principale si colloca a 8 Hz. E' evidente che la struttura in esame (pannello A) apparirebbe particolarmente vulnerabile se fosse eretta sul suolo rappresentato dal pannello B, mentre non subirebbe amplificazioni di sorta rispetto a PGA_0 se fosse eretta sul suolo del pannello C. La fascia rossa nel pannello A indica l'intervallo di frequenze in cui l'eventuale presenza di risonanze del sottosuolo richiede studi aggiuntivi di risposta locale e/o progettazione potenzialmente cautelativa rispetto alla classificazione semplificata di sito. La fascia verde nel pannello A indica invece l'intervallo di frequenze in cui l'eventuale presenza di risonanze del sottosuolo non desterebbe motivi aggiuntivi di preoccupazione. In generale è una condizione simicamente favorevole quando la risonanza del sottosuolo – quando esiste – si verifica a frequenze superiori a quelle dei modi principali di vibrare della struttura.

E' intuitivo e risulterà evidente negli esempi alle pagine successive che in molti siti sono presenti più risonanze e non necessariamente il picco di risonanza con maggior ampiezza è quello di interesse ingegneristico rispetto alle strutture edificate sul terreno in esame. Un esempio degli effetti della doppia

risonanza suolo-struttura a seguito di un terremoto recente (Modena, eventi del maggio 2012) può essere trovato in Castellaro *et al.* (2013).

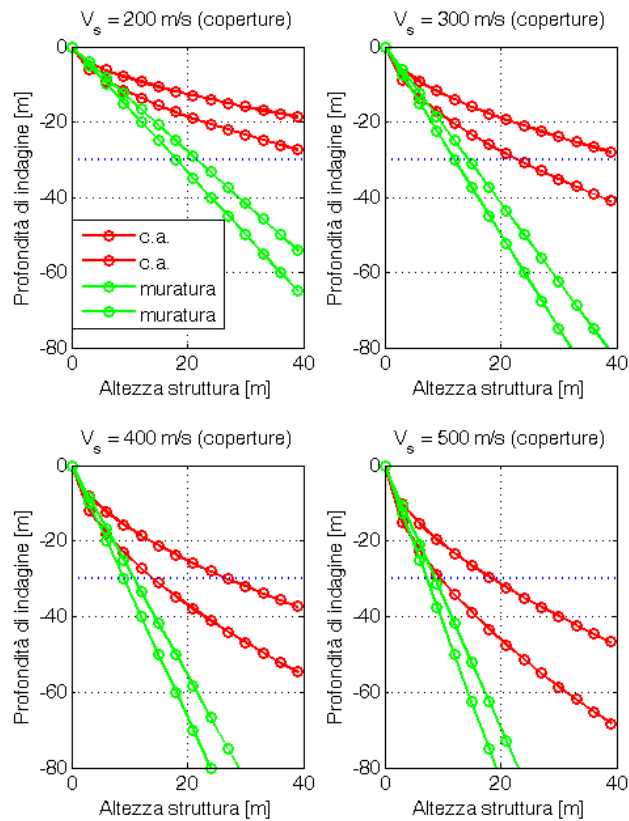


Figura 3. Relazione tipica tra l'altezza di una struttura e la profondità di sottosuolo minima da indagare per escludere la possibilità di configurazioni geologiche capaci di dare doppia-risonanza suolo-struttura, in funzione della V_s dello strato risonante.

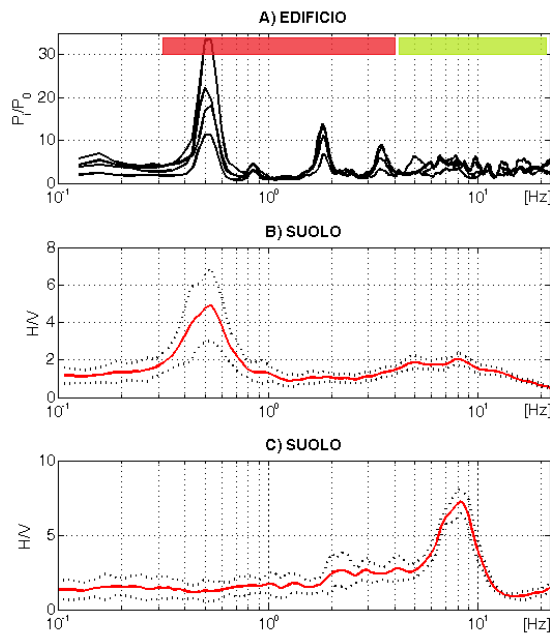


Figura 4. A) Frequenze dei modi di vibrare di una struttura di 25 piani secondo l'asse trasversale; B) Frequenza di risonanza di un suolo (caratterizzato da un riflettore sismico rigido a centinaia di metri di profondità) sismicamente sfavorevole per doppia

risonanza rispetto alla struttura del caso A); C) Frequenza di risonanza di un suolo (caratterizzato da un riflettore sismico rigido a pochi metri di profondità) sismicamente non sfavorevole per doppia risonanza rispetto alla struttura del caso A).

SUPERARE I LIMITI DELLE CLASSIFICAZIONI BASATE SU Vs30: COME?

Nella letteratura scientifica internazionale è riconosciuto da alcuni anni che le frequenze di risonanza dei suoli si possono misurare sperimentalmente e la tecnica candidata a questo scopo è denominata tecnica dei rapporti spettrali H/V o tecnica sismica passiva a stazione singola (Nogoshi e Igarashi, 1979; Nakamura, 1989).

LA MISURA DELLE RISONANZE: teoria

La superficie terrestre è costantemente percorsa da onde di varia natura, generate da sorgenti naturali (prevalentemente perturbazioni atmosferiche e oceaniche che eccitano le basse frequenze, < 1 Hz, Gutenberg 1931; 1936) e antropiche (che eccitano per lo più le medio-alte frequenze, > 1 Hz). Questo insieme di onde, che prende il nome di microtremore sismico ambientale, può essere immaginato come un rumore bianco, sebbene non sia propriamente così, che viene filtrato dal sottosuolo che attraversa e che un sismometro sufficientemente sensibile posato sul terreno potrà registrare ovunque. Un'opportuna analisi sarà in grado di inferire - a partire dal segnale filtrato - alcune informazioni sul filtro, ossia sul sottosuolo attraversato dalle onde. Nel microtremore sono presenti onde di tutti i tipi (di volume, P e S, e di superficie, Rayleigh e Love), tuttavia poiché le onde di superficie si attenuano meno velocemente con la distanza rispetto alle onde di volume, il campo del microtremore sismico è costituito principalmente da onde di superficie. Queste ultime hanno velocità molto prossime a quelle delle onde di taglio S (circa 10% inferiori) e sono usate come stimatori di queste ultime da molte tecniche geofisiche di ultima generazione.

In un sistema come quello di Figura 2, alla frequenza di risonanza dello strato 1 si assiste ad un annullamento dello spettro della componente verticale dell'onda di Rayleigh (V), pertanto sarebbe sufficiente analizzare i rapporti $1/V$ per far emergere i 'picchi di risonanza' del sottosuolo. Nella pratica, poiché i valori spettrali assoluti variano in funzione del livello di rumore che cambia naturalmente con le condizioni atmosferiche ed antropiche, è prassi usare il rapporto H/V (dove H è la media delle componenti spettrali orizzontali) che agisce da efficace normalizzatore. Tale rapporto si mantiene infatti sufficientemente stabile nel tempo.

Dalla già citata formula della risonanza (Equazione 4) si comprende come la tecnica H/V abbia una prima applicazione stratigrafica pratica perché a partire da una misura di microtremore ambientale, nota la V_s delle coperture, si può stimare la profondità dei riflettori sismici principali. La prima applicazione in questo senso risale al 1999 ad opera di Ibs-von Seht e Wholenberg, che ricostruirono la profondità del bedrock lungo il bacino del Reno in Germania.

LA MISURA DELLE RISONANZE: pratica

LE APPLICAZIONI SISMO-STRATIGRAFICHE

Nella pratica una misura di microtremore deve avere una durata commisurata alla frequenza di indagine di interesse. Nella già citata ipotesi che una misura di interesse ingegneristico ricada nell'intervallo 0.1-20 Hz (frequenze dei modi di vibrare della maggior parte delle strutture), segue che un campionamento adeguato deve durare 10-15 min, in modo da poter analizzare il segnale su finestre di almeno 30 s di lunghezza e da

avere almeno 20-30 finestre su cui effettuare una media, considerando anche che qualcuna potrà dover essere rimossa per la presenza di disturbi che alterano lo spettro medio.

Le serie temporali registrate nelle tre componenti del moto vengono analizzate secondo procedure spettrali più o meno classiche (FFT o wavelet) fino alla produzione delle curve H/V, dove H è la media di due componenti spettrali orizzontali ortogonali (SESAME, 2005). Un esempio di come appaiono i picchi di risonanza in una curva H/V è dato in Figura 5A. In Figura 5B e C sono illustrati i rapporti f-H-Vs (coperture) secondo l'Equazione 4, da cui si comprende che il picco di risonanza a 0.6 Hz (curva 1) si riferisce alla presenza di un riflettore sismico a circa 200 m di profondità, il picco di risonanza a 4 Hz si riferisce alla presenza di un riflettore sismico a circa 15 m ed il picco di risonanza a 12 Hz (curva 3) si riferisce alla presenza di un riflettore sismico entro 5 m di profondità.

La tecnica H/V permette di rilevare variabilità spaziali laterali. In Figura 6 è illustrato il caso di due misure effettuate a 40 m di distanza reciproca, una delle quali effettuata su terreno limoso (caso 2), l'altra effettuata sullo stesso terreno ma che presenta – a circa 12 m di profondità – un paleo alveo di ghiaie (caso 1). E' evidente come nel primo caso si generi a 6 Hz una risonanza dei limi sopra le ghiaie, del tutto assente nel secondo sito. Nonostante la vicinanza dei luoghi, il sito 1 è più sfavorevole dal punto di vista degli effetti sismici di sito rispetto al sito 2 per strutture con modi propri attorno a 6-8 Hz. Questo è in controtendenza esatta con quanto prevederebbe la stima di F_a su base di V_{s30} , la quale assegnerebbe la classe B al sito 1 e la classe C al sito 2.

Questi esempi mostrano come la tecnica H/V sia molto sensibile alle variazioni stratigrafiche laterali, permettendo pertanto di discriminare geometrie 1D da geometrie 2D, ovviamente entro i limiti di visibilità imposti dalla nota legge $\lambda f = V$ (lunghezza d'onda x frequenza = velocità).

Le curve H/V non vanno mai osservate da sole ma sempre congiuntamente agli spettri delle singole componenti da cui derivano. Questo permette di discernere agevolmente i picchi di natura stratigrafica da quelli di natura antropica. In condizioni normali le componenti spettrali NS, EW e Z (verticale) hanno ampiezze simili. Alla frequenza di risonanza, come si è detto, si genera un picco H/V legato ad un minimo locale della componente spettrale verticale che determina una forma "a ogiva" come quella indicata dalle frecce in Figura 6. Questa forma è indicativa di risonanze stratigrafiche (cfr. anche Castellaro e Mulargia, 2009b).

In una misura di tremore possono però entrare anche vibrazioni monofrequenziali (artefatti) indotti da macchinari o simili. Queste si traducono però in picchi stretti (delta) ben definiti su tutte e tre le componenti spettrali e quando l'ampiezza sulle tre componenti non è simile, danno luogo a picchi o gole artefattuali nelle curve H/V, facilmente distinguibili però dai tratti H/V di origine stratigrafica (Castellaro e Mulargia, 2010).

Un ultimo esempio di come le indagini a stazione singola possano essere combinate è dato in Figura 7. Per produrre questa immagine sono state interpolate 14 curve H/V (A, B, ..., O) dopo la trasposizione dal dominio H/V-frequenza al dominio H/V-profondità attraverso un modello di V_s costruito come sarà spiegato nel prossimo capitolo. In questo tipo di grafici i toni di rosso indicano i contrasti di impedenza positivi, ossia il tetto dei riflettori caratterizzati da aumento di rigidità e i toni di blu indicano i terreni meno rigidi, ossia le coperture. Nell'immagine si riconosce un bedrock affiorante nei siti A, ... F e che si va invece approfondendo a partire dalla rottura di pendenza (sito G) verso Est. La lingua gialla tra i siti G2 e L indica un piazzale lastricato rigido in corrispondenza di una abitazione.

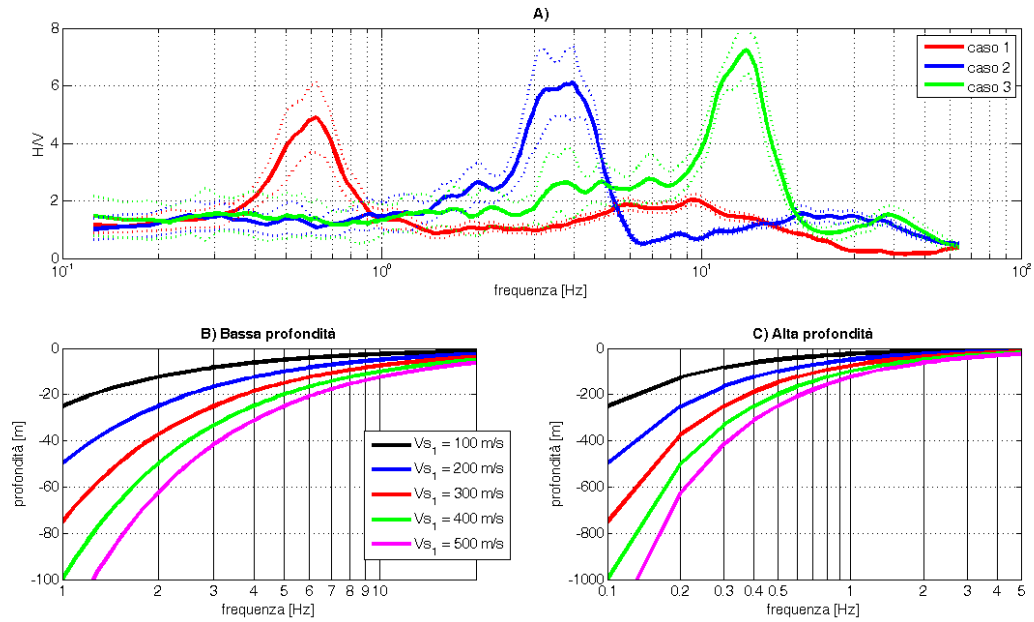


Figura 5. A) Esempio di bedrock sismico a diverse profondità che genera risonanze a diverse frequenze. Caso 1: bedrock a 4 m di profondità, caso 2: bedrock a 20 m di profondità, caso 3: bedrock a 300 m di profondità; B) relazione V-f-H alle medio-alte frequenze; C) relazione V-f-H alle medio-basse frequenze.

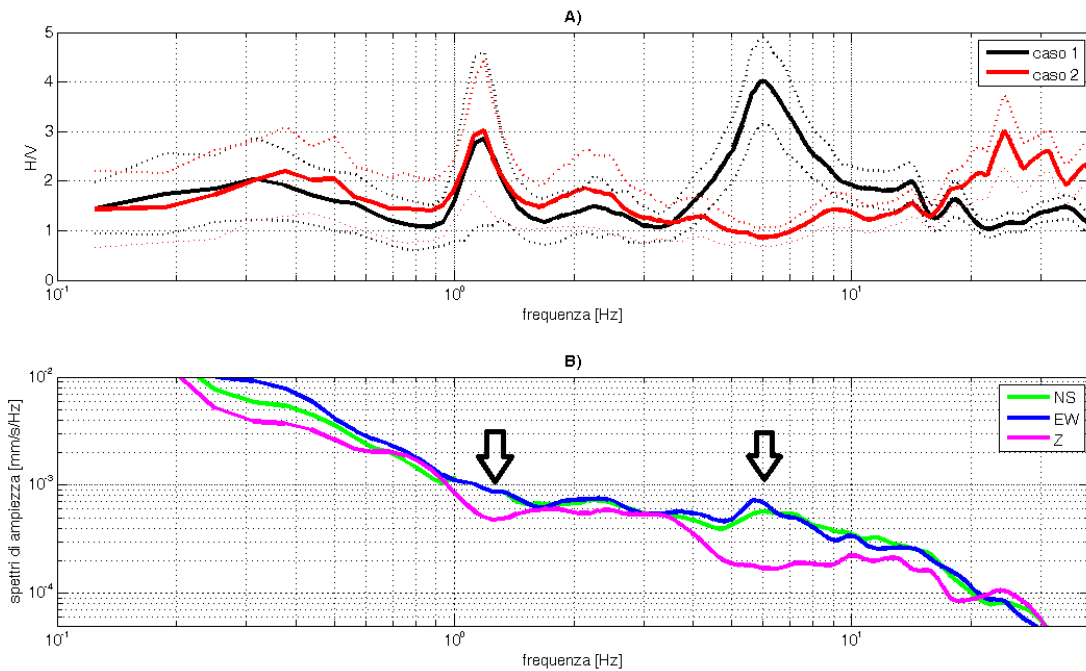


Figura 6. A) Esempi di curve H/V registrate a 40 m di distanza. Nella curva 1 emerge una risonanza a 6 Hz legata alla presenza di un livello di ghiaie a 12 m di profondità che è assente nel sito 2. Nel dominio delle medio-basse frequenze le curve sono statisticamente uguali. B) Spettri delle singole componenti del moto (NS, EW e Z) registrati nel sito 1. Le frecce evidenziano le forme "a ogiva" caratterizzate da un minimo locale della componente verticale che caratterizzano le risonanze di natura stratigrafica.

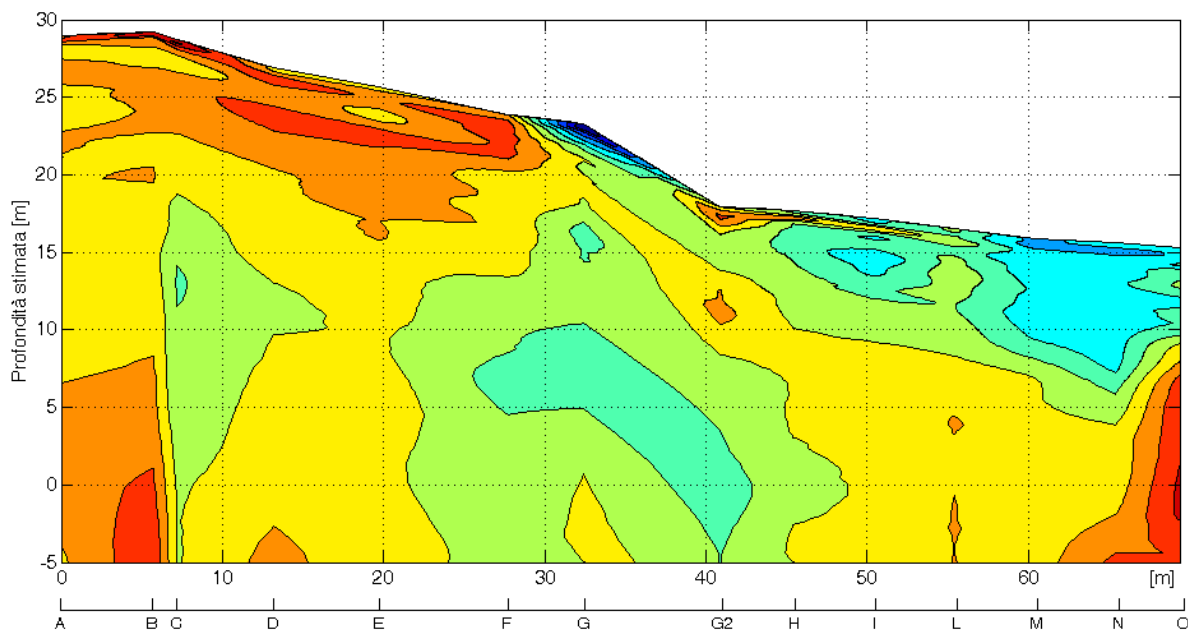


Figura 7. A) Esempio di interpolazione spaziale dell'H/V lungo una sezione. I toni di rosso indicano il tetto delle formazioni rigide (contrasti di impedenza positivi), i toni di blu indicano le formazioni poco rigide (coperture).

PROFILI DI V_{s30} DA MISURE H/V VINCOLATE

A partire da una misura di frequenza di risonanza, tramite l'Equazione 4 si può ottenere una stima delle V_s delle coperture, a patto che sia nota la profondità del bedrock, o viceversa. L'Equazione 4 vale però solo nei sistemi costituiti da monostrato+bedrock mentre nei casi multistrato è necessario ricorrere a modelli più complessi, basati sulla propagazione delle onde di superficie. Il problema è stato affrontato in Castellaro e Mulargia (2009a) e in questa sede si presenterà un esempio di come si possa derivare un profilo di V_s partire da una misura H/V vincolata.

Il primo requisito per trasformare una curva H/V in un profilo di V_s è il possesso di un vincolo, che normalmente è la profondità di un contatto tra litologie diverse, noto da prove penetrometriche, sondaggi o trincee esplorative (non necessariamente spinte a 30 m). Non si sottolinea mai a sufficienza, anche se dovrebbe essere evidente dall'Equazione 4, che in assenza di qualsiasi vincolo esistono infiniti modelli (cioè combinazioni, V_s -H) che soddisfano la stessa curva H/V. La prova penetrometrica è quella che meglio si presta a vincolare l'H/V in quanto rende conto delle diverse proprietà meccaniche del terreno, a differenza di un sondaggio.

Individuato il vincolo e ottenuta una curva H/V statisticamente significativa, la procedura per il fit della curva H/V segue il percorso seguente:

- 1) riconoscimento nella curva H/V del pattern (solitamente un picco di risonanza) cui associare il vincolo stratigrafico (solitamente lo spessore del primo strato che risuona). Normalmente il vincolo che si possiede è riferito ai primi metri di profondità, pertanto il fit della curva H/V inizia dalle alte frequenze e si sposta verso le basse frequenze,
- 2) stima di prima prova delle V_s del primo strato sulla base dell'Equazione 4,
- 3) la V_s del secondo strato è ora determinata dall'ampiezza del picco H/V da fittare. Contrasti di impedenza forti danno picchi H/V più ampi e viceversa,

4) il fit del modello riprende dal punto 1 per ogni picco H/V con valenza stratigrafica individuato.

In sostanza, per fittare un modello con 1 picco H/V sono necessari 2 strati e per fittare un modello con N picchi H/V sono sufficienti N+1 strati. L'unica deroga a questo è la presenza di inversioni di velocità (Castellaro e Mulargia, 2009b). E' contro il principio del rasoio di Occam e contro la credibilità scientifica cercare di introdurre decine di strati nel modello. Indipendentemente dalla tecnica sismica di superficie adottata, i riflettori sismici che si riescono a riconoscere sono solitamente 3 o 4 nelle prime decine di metri. Non vanno confusi quindi i modelli ottenuti dalla inversione automatica che sono modelli matematici con i modelli fisici (cfr. anche Park *et al.*, 1999).

Un modello di Vs ottenuto dal fit vincolato della curva H/V è dato in Figura 8. Il vincolo in questo caso è costituito dalla conoscenza di un riflettore sismico (paleo alveo sabbioso) a 2 m di profondità, ben evidenziato dal picco di amplificazione a 30 Hz. E' altresì noto dal contesto geologico che il bedrock calcareo deve trovarsi a qualche decina di metri di profondità (cui corrisponde il picco a 4 Hz).

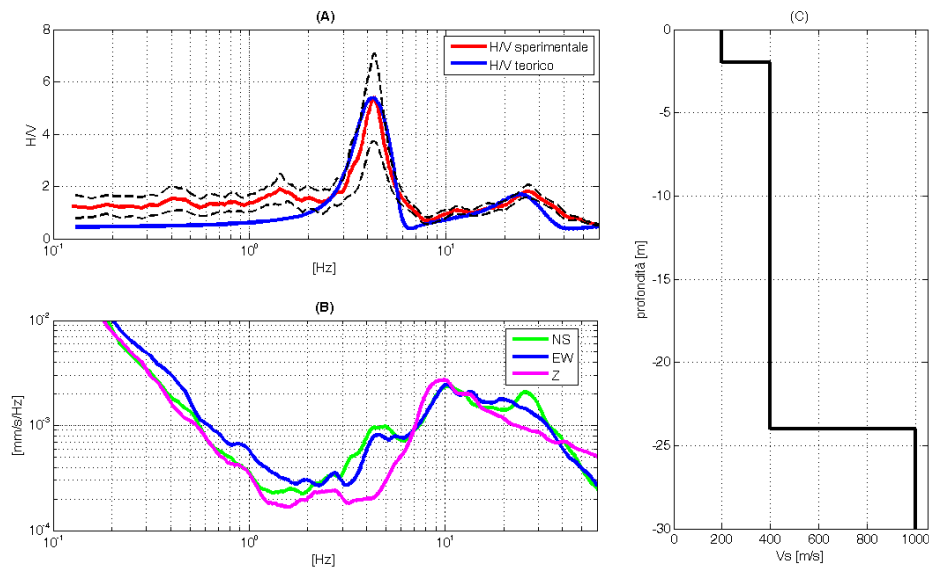


Figura 8. A) Curva H/V sperimentale (media in rosso e deviazione standard a tratteggio nero) e curva H/V teorica ottenuta per il modello di sottosuolo del pannello C); B) spettri delle singole componenti del moto da cui è stata ricavata la curva H/V.

Una curva H/V piatta – che indica l'assenza di contrasti di impedenza rilevanti nel sottosuolo – non può dare informazioni sulle Vs del sottosuolo perché mancherebbero gli elementi a cui vincolare il fit: un modello di sottosuolo che preveda un singolo strato con Vs costante (e di qualsiasi valore) fitterebbe ugualmente bene la curva. In presenza di terreni senza contrasti di impedenza, in altre parole, non si possono ricavare informazioni sulla Vs assoluta con il solo metodo H/V.

Il modello di Vs che si ricava da questa tecnica va inteso come modello utile a definire la rigidità media degli strati ai fini della definizione o della successiva modellazione degli effetti di sito. Da questo punto di vista la curva H/V ha il duplice vantaggio di misurare se esista amplificazione stratigrafica e, se sì, a quale frequenza. Ha poi il vantaggio di poter essere usata come stimatore della rigidità media degli strati in presenza di vincoli stratigrafici.

EFFETTO DELLE INVERSIONI DI VELOCITA'

Per inversione di velocità si intende la presenza di uno strato meno rigido sottostante uno strato più rigido. Questa caratteristica non è il normale trend in natura (dove ci si aspetta un aumento di rigidità scendendo verso il basso, per compattazione dei sedimenti) ma è una condizione relativamente frequente in presenza di alternanze litologiche quali ghiaie sopra argille, in presenza di cavità (la cavità è l'esempio estremo di inversione di velocità) e anche in presenza di suoli artificiali rigidi (pavimentazioni, lastricati ecc.) sovrastanti suoli naturali teneri.

Con la maggior parte delle tecniche di esplorazione sismica di superficie è impossibile (per ragioni fisiche, legate alle leggi dell'ottica) o complesso riconoscere strati lenti sottostanti riflettori rigidi. L'effetto delle inversioni di velocità nelle curve H/V risulta invece ben visibile anche se la modellazione del fenomeno rimane molto complessa. L'argomento è stato trattato in dettaglio in Castellaro e Mulargia (2009b), cui si rimanda. Qui si ricorda semplicemente che una inversione di velocità interessa pesantemente le componenti spettrali orizzontali del microtremore mentre lascia la componente verticale quasi inalterata. Ne consegue che in presenza di una inversione di velocità il rapporto H/V si colloca su ampiezze inferiori ad 1 per larghi intervalli di frequenze (da non confondere con lo stesso effetto che si verifica a $2f_0$, dove f_0 è la frequenza del picco H/V, *ibid.*). In presenza di una inversione di velocità la curva H/V tende ad apparire piatta verso le alte frequenze ma l'osservazione congiunta degli spettri delle singole componenti del moto, che mostrerà le componenti orizzontali con ampiezza nettamente inferiore alle verticali, chiarirà la ragione di questa apparente piattezza e permetterà di identificare anche picchi di risonanza relitti, ossia picchi che vengono mascherati dall'inversione ma che in realtà sono risonanze del sito.

PROFILI DI V_s DA MISURE H/V E IN ARRAY

Nel capitolo precedente si è discusso del fit vincolato della curva H/V per produrre un profilo di V_s nel caso in cui sia disponibile un vincolo relativo alla profondità di un riflettore. E' naturalmente possibile anche che il vincolo sia fornito, anziché da H, dal valore di V_s di uno strato superficiale, ottenuto da prove indipendenti, quali quelle "in array". Intendiamo come tecniche in array tutte quelle basate correlazione dei segnali (attivi o passivi) tra più sensori disposti in configurazione 1D o 2D. Tra le tecniche più note di questo tipo, che si basano tutte sulla ricostruzione della velocità di fase o di gruppo delle onde di superficie di Rayleigh o Love ricordiamo le tecniche f-k, SASW, MASW, ReMiTM, SPAC, ESAC, FTAN.

I modelli sui quali si basa il fit o l'inversione di tutte queste tecniche si fondano sull'assunto di sottosuolo a strati piani e paralleli. Questo assunto non viene di fatto mai verificato in campagna prima dell'esecuzione della prova mentre un paio di misure H/V lungo lo stendimento permetterebbero di identificare rapidamente geometrie non 1D (Figura 6).

Il secondo limite di molte di queste tecniche (soprattutto di quelle attive) è che in presenza di un riflettore importante caratterizzato da aumento di rigidità (come ad esempio un livello di ghiaia sotto dei limi), l'energia prodotta da una sorgente convenzionale superficiale viene quasi tutta confinata nel mezzo tenero (Equazione 2 e Equazione 3) e rimane poca energia disponibile per caratterizzare le velocità di propagazione delle onde sismiche nel mezzo rigido (ghiaia) e sotto di esso. In questi casi l'approccio misto di tecniche in array e tecniche a stazione singola si rivela ideale in quanto la prova in array fornisce il vincolo per il fit della prova H/V anche in assenza di sondaggi o penetrometrie e la prova H/V permette di ottenere profili di V_s fino a profondità maggiori di quelle raggiungibili alla prova in array.

Un esempio di fit congiunto di questo tipo è dato in Figura 11 e Figura 12. In questi esempi si riportano gli spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh derivanti da una prova MASW (pannello A), la curva H/V sperimentale e teorica (pannello B) ottenuta per il modello di sottosuolo derivato dal fit congiunto delle due prove (pannello C). L'assioma normalmente accettato è che la profondità di penetrazione delle onde di superficie è approssimativamente uguale alla loro lunghezza d'onda (Richart *et al.*, 1970) mentre la profondità massima a cui V_s può essere ragionevolmente calcolata è circa la metà della lunghezza d'onda massima misurata (Rix e Leipski, 1991). Spesso per questioni legate alla sorgente e alla stratigrafia, le prove in array a onde di superficie permettono l'esplorazione solo fino a profondità molto modeste. Il fit congiunto di queste prove con le prove H/V permette invece solitamente di spingersi fino alla profondità del bedrock sismico.

EDIFICI

Non se ne daranno esempi in questa sede ma si osserva che è possibile, oltre che prassi sempre più comune, utilizzare la sismica passiva anche per la caratterizzazione dinamica della strutture (frequenze modali, deformate e smorzamenti, es. Castellaro e Mulargia, 2010; Castellaro *et al.*, 2013 e referenze ivi contenute). Questo permette di verificare agevolmente le stime effettuate da modello per edifici esistenti, di monitorare l'invecchiamento o l'integrità delle strutture ecc. Un esempio parziale è riportato in Figura 10.

BREVE DISAMINA SULLE CLASSIFICAZIONI SEMPLIFICATE DI SITO

Vediamo ora come le tecniche sopra illustrate possano guidare in una scelta ragionata della categoria di suolo di fondazione secondo le NTC (2008).

CLASSE A

Per bedrock sismico si intende il livello geologico sotto il quale non è attesa amplificazione. La presenza di un bedrock caratterizzato da $V_s > 800$ m/s entro 3 m dal piano campagna colloca il sito, secondo NTC (2008), nella categoria di suolo di fondazione di tipo A. Normative diverse impongono valori diversi per le V_s del bedrock e sebbene sia vero che la rigidità elevata sia una garanzia di scarsa amplificazione, è altrettanto vero che un eventuale contrasto di impedenza darebbe amplificazione anche a partire da V_s elevate, come già discusso.

Questo fu osservato già in Steidl *et al.* (1996) e ripreso in Cadet *et al.* (2010): non ci si può accontentare di una la classificazione dei suoli di tipo A su sola base di $V_{s30} \geq 800$ m/s in quanto questo non garantisce che il sito non amplifichi determinate frequenze. Sito A può essere solo un sito che abbia una curva H/V piatta e con ampiezza pari a 1 in tutto l'intervallo di frequenze di interesse ingegneristico (Figura 9), unitamente ad una rigidità che lo renda assimilabile ad un bedrock sismico. La prova H/V sta diventando discriminante anche per la scelta dei siti di riferimento per l'installazione delle stazioni sismiche (*ibid.*).

Questa considerazione è particolarmente importante anche negli studi di microzonazione sismica del territorio, e specialmente nei così detti studi di primo e secondo livello. In questi contesti si richiede al professionista di classificare i suoli in base al potenziale di amplificazione e normalmente questo viene fatto sulla base di dati pre-esistenti, tipicamente di tipo geologico (sondaggi, penetrometrie) e più raramente (per la maggior scarsità) di tipo geofisico. Ne segue che il professionista classificherà come terreni non soggetti ad amplificazione tutti quelli identificati come roccia o in corrispondenza dei quali la prova penetrometrica si è arrestata per rifiuto. Il problema nella maggior parte dei litotipi (particolarmente quelli

appenninici caratterizzati da rocce sedimentarie scarsamente rigide) è che al di sotto del bedrock-litologico (che dà in effetti amplificazione per risonanza sulle coperture sovrastanti) si misurano spesso altre risonanze legate a orizzonti più profondi e che non sarebbero invece compatibili con una classificazione in categoria A del sito.

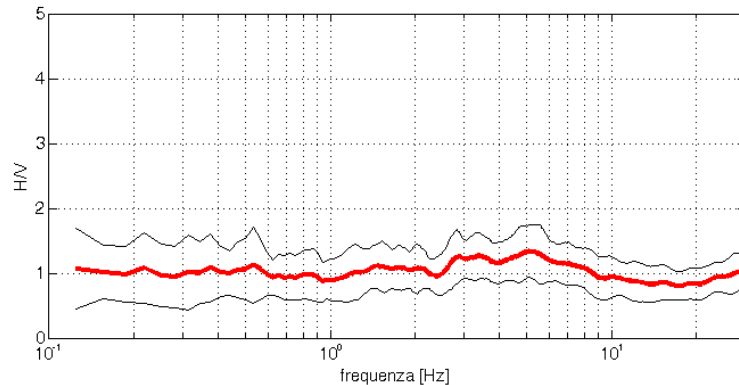


Figura 9. Sito A in quanto caratterizzato da $V_s > 800$ m/s e curva H/V piatta con ampiezza pari a 1.

CLASSE E

Nella classe E (NTC, 2008) rientrano i siti caratterizzati da V_s dello strato superficiale (con spessore non superiore a 20 m) comprese tra 180 e 360 m/s, sovrastanti un bedrock con $V_s \geq 800$ m/s. Dall'Equazione 4 risulta immediatamente che questa classe può rendere conto di amplificazioni per risonanza a $f > 2.25$ Hz su terreni particolarmente teneri ($V_s = 180$ m/s) e a $f > 4.5$ Hz su terreni di media rigidità ($V_s = 360$ m/s).

Dovrebbe essere ormai chiaro che ci sono innumerevoli altre combinazioni di spessori e V_s capaci di dare gli stessi effetti di ciò che è attualmente compreso nella classe E. Ad esempio, un bedrock a 40 m associato a coperture con V_s dell'ordine dei 350 m/s darebbe risonanza a $f = 2.2$ Hz, che è una frequenza di interesse per molte strutture di più di 5 piani (Figura 3). Per questa ragione è fortemente auspicabile che l'attenzione venga spostata dal dominio V_s -profondità al dominio V_s -frequenze.

CLASSE C o CLASSE B?

Si immagini ora un suolo che debba ospitare una struttura avente i modi di vibrare illustrati in Figura 10 (trattasi di misure realmente condotte presso una scuola di 4 piani fuori terra in muratura). Supponiamo per assurdo che i suoli candidati quelli illustrati in Figura 11 e Figura 12, per i quali la classificazione di sito su base di V_{s30} è stata condotta tramite prove MASW e H/V. L'area gialla sovrapposta ai grafici H/V indica le frequenze in cui ricadono i modi di vibrare principali della struttura in oggetto. Sebbene entrambe le condizioni siano fortemente sfavorevoli da un punto di vista sismico, a causa delle forti amplificazioni per risonanza stratigrafica misurate sui suoli, il sito che rientra in categoria B (Figura 12) è persino più sfavorevole rispetto a quello classificato come C (Figura 11) per la struttura. Esso infatti risona esattamente alle stesse frequenze del modo fondamentale flessionale della struttura. Ci si trova pertanto di fronte ad un caso in cui una categorizzazione su base di solo V_{s30} risulta essere fortemente ipocautelativa.

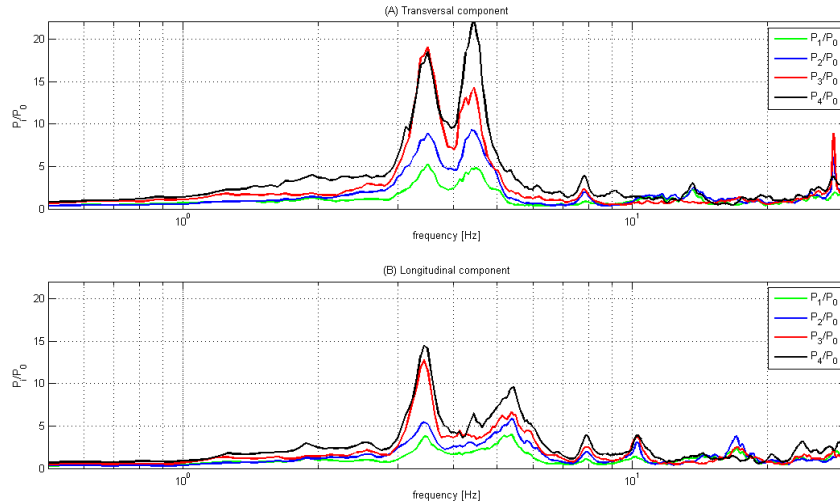


Figura 10. Frequenze dei modi di vibrare di una struttura di 4 piani.

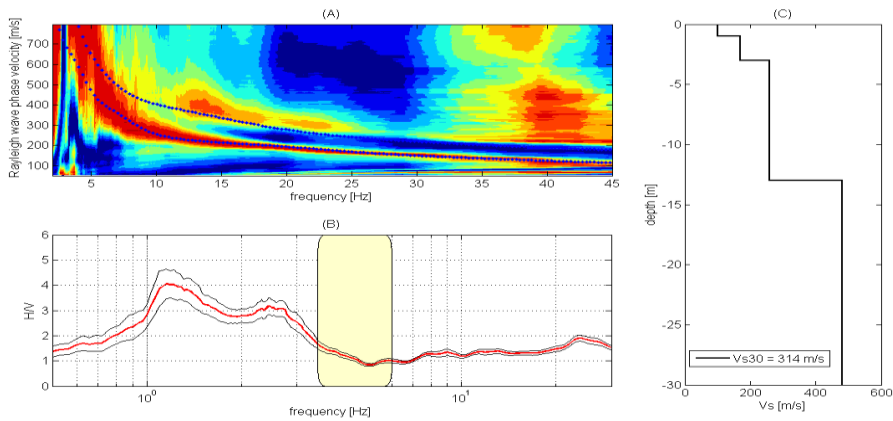


Figura 11. A) Spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh e modellazione teorica (linee blu) ottenuta per il profilo di Vs del pannello C); B) curva H/V sperimentale. L'area gialla indica le frequenze in cui ricadono i modi principali della struttura di Figura 10. Secondo le NTC (2008), il sito ricade nella categoria di suolo C.

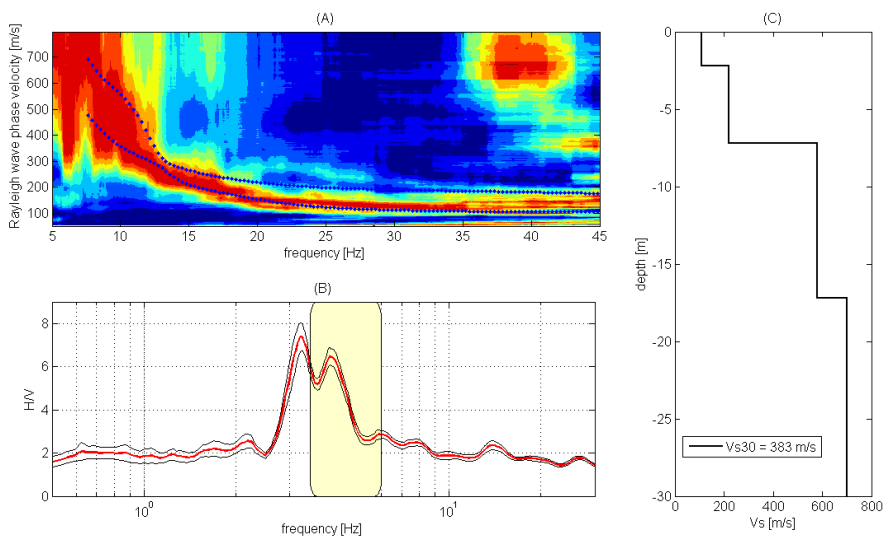


Figura 12. A) Spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh e modellazione teorica (linee blu) ottenuta per il profilo di Vs del pannello C); B) curva H/V sperimentale. L'area gialla indica le frequenze in cui ricadono i modi principali della struttura di Figura 10.

10. Secondo una interpretazione letterale delle NTC (2008), il sito ricade nella categoria di suolo B (in particolare quando Vs30 venga calcolata a partire dal piano di posa delle fondazioni).

STABILIRE LA PROFONDITA' DEL BEDROCK SISMICO

L'approccio semplificato per la stima della categoria di sito è solo uno degli approcci possibili. L'approccio non semplificato prevede invece uno studio di risposta sismica locale (detto, nel contesto della Microzonazione Sismica, approccio di "terzo livello") che mira a stabilire:

- 1) le funzioni di amplificazione del modo dal bedrock alla superficie e
- 2) lo spettro di risposta di un oscillatore armonico tipo

a partire da:

- 1) un modello di sottosuolo in termini di Vs e spessori degli strati e
- 2) gli accelerogrammi dei terremoti tipici attesi nella zona secondo un tempo di ritorno (e quindi una PGA_0) che dipende dal tipo di opera in progetto.

Tralasciando la significatività e la robustezza dei vari parametri che entrano in queste modellazioni, il problema normalmente si pone quando il modello di sottosuolo di cui si è a conoscenza non arriva al bedrock sismico. In questi casi alcune normative e linee guida suggeriscono di considerare il gradiente dell'ultimo strato e di estrapolarlo fino a raggiungere gli 800 m/s. Estrapolare un profilo di Vs, nel contesto geologico, equivale ad inventare un modello di sottosuolo. Questa operazione è molto pericolosa perché potrebbe introdurre o escludere frequenze di amplificazione che nulla hanno a che fare col sottosuolo in esame, vanificando potenzialmente anche tutto il lavoro di modellazione susseguente.

Un esempio è dato in Figura 14, dove si assume di aver ottenuto il profilo di Vs fino a 30 m in via sperimentale e di aver estrapolato il gradiente di Vs dell'ultimo strato fino a raggiungere gli 800 m/s (curve nere). Il modello di Vs reale è invece illustrato in rosso. Si osserva che il bedrock sismico, più veloce di quello di normativa, è collocato a profondità molto maggiori di quelle ottenute dall'estrapolazione. La differenza nelle funzioni di trasferimento calcolate per i due modelli è importante: estrapolando il profilo oltre i 30 m si ottiene infatti una amplificazione apparente a 2.1 Hz che non esiste nel caso reale mentre di ignora totalmente la risonanza a 1.1 Hz che esiste.

Un secondo esempio è dato in Figura 14. In questo caso il profilo di Vs fino al bedrock è stato ottenuto dal fit vincolato della curva H/V sperimentale (pannello C). E' evidente che la funzione di trasferimento ottenuta per il profilo reale (pannello B, linea blu) deve riprodurre le risonanze misurate sperimentale, cosa che non succede per la funzione di trasferimento ottenuta da modello estrapolato (pannello B, linea nera).

In altre parole, quando si ricorre a codici di analisi di risposta sismica locale è necessario che il modello riproduca, in termini di frequenze di amplificazione, quelle misurate in campagna per es. con la tecnica H/V. Se non esiste coincidenza di risonanza tra il modello e la misura sperimentale, evidentemente i problemi stanno nel modello.

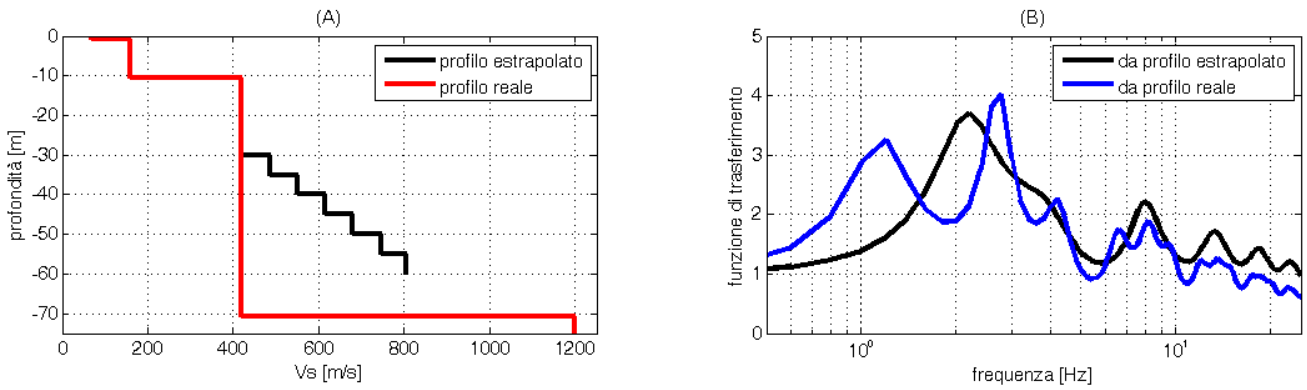


Figura 13. A) Profilo di Vs reale (rosso) e profilo di Vs misurato fino a 30 m, estrapolato poi fino al bedrock secondo un gradiente lineare (nero). B) Funzione di trasferimento ottenuta per il profilo di sottosuolo reale (blu) e estrapolato (nero).

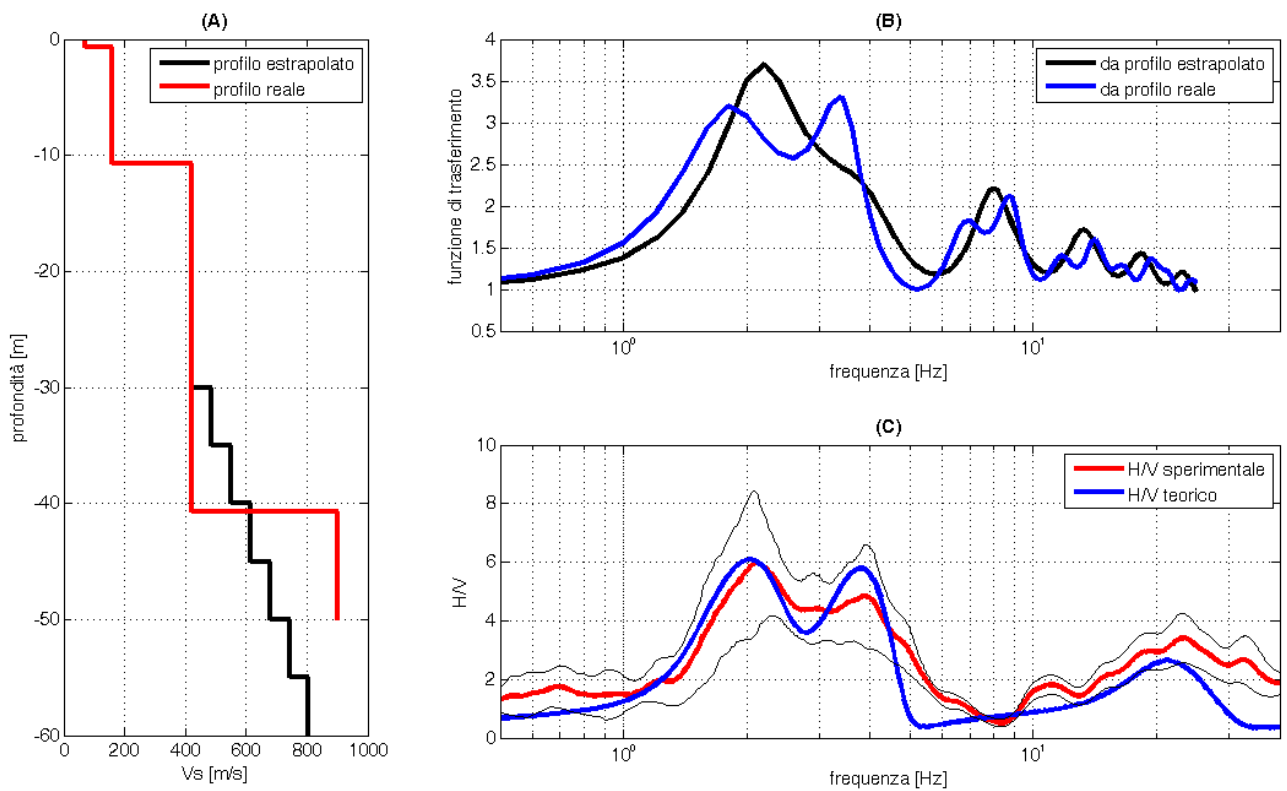


Figura 14. A) Profilo di Vs reale (rosso) e profilo di Vs misurato fino a 30 m, estrapolato poi fino al bedrock secondo un gradiente lineare (nero). B) Funzione di trasferimento ottenuta per il profilo di sottosuolo reale (blu) e estrapolato (nero). Il modello di sottosuolo reale è stato ottenuto a partire da un fit della curva H/V (pannello C) fino al bedrock sismico.

CONCLUSIONI

L'amplificazione del moto del terreno in superficie non è dovuta solo alla risonanza stratigrafica, tuttavia questa ne costituisce una delle cause maggiori. Abbiamo presentato i motivi principali per cui Vs30 non può essere, per ragioni intrinseche, uno stimatore efficace dell'amplificazione sismica di sito ed abbiamo illustrato come negli ultimi anni si è preso consapevolezza di questo, al punto che iniziano a farsi strada proposte alternative che includono anche la misura delle risonanze di sito.

Nell'opinione di chi scrive una indagine a fini sismici implica una traslazione di ragionamento dal dominio delle profondità al dominio delle frequenze. Richiede cioè che si studi e quantifichi l'esistenza di amplificazioni nell'intervallo di frequenze di interesse per la struttura in progetto. Nel caso degli studi di microzonazione a scala comunale/regionale l'intervallo di frequenze di interesse è ovviamente tutto quello ingegneristico standard (0.1-20 Hz) mentre a scala della singola struttura l'intervallo di frequenze coincide con quello dei modi principali della struttura e si estende in basso fino a circa la metà della sua frequenza propria.

Il metodo più semplice per verificare se nel sito esista la possibilità di amplificazione per motivi stratigrafici e, se sì, a quali frequenze, è la prova sismica passiva a stazione singola (H/V). Questa prova permette di evidenziare in modo semplice risonanze e/o inversioni di velocità, tutti elementi di cui tener conto nella successiva modellazione del sito. Questa prova appare la prima da applicare sia nell'ambito della progettazione che della pianificazione territoriale in quanto dà informazioni immediate sulle criticità del sito e sulle profondità (frequenze) minime a cui bisognerà spingere eventuali successive indagini.

Il passo successivo è la determinazione di un profilo di V_s capace di rendere conto di tutte le risonanze misurate e rilevanti per l'opera in progetto. Poiché per strutture medio-grandi le profondità minime da caratterizzare sismicamente possono diventare inaffrontabili con la maggior parte delle tecniche geofisiche o in termini di costi (Figura 3), un ragionevole compromesso in questi casi è la determinazione di un profilo di V_s superficiale tramite una qualsiasi delle tecniche note e l'estensione del profilo di V_s in profondità tramite il fit vincolato di questa con la curva H/V. Pur avendo questo approccio dei limiti (alcuni dei quali descritti nel testo), esso appare sufficiente alla successiva eventuale modellazione tramite codici numerici quando il modello di sottosuolo debba essere fornito a grandi profondità. Il modello infatti dovrà comunque riprodurre almeno le stesse frequenze di amplificazione misurate sperimentalmente. Si ricorda che quel che si misura con la tecnica H/V sono prevalentemente onde di superficie mentre quel che si modella con i codici classici sono onde di volume S. Tuttavia esiste coincidenza nella stima delle frequenze di amplificazione dei due metodi, mentre può non esistere coincidenza in tema di ampiezza.

Ad oggi, esistono molti modi per misurare V_{s30} , ma molti meno modi per andare oltre V_{s30} . L'autore ritiene che l'H/V sia uno di questi e se ne sono dati esempi a vari livelli nel testo.

Risorse

Tutte le misure riportate in questo lavoro sono state effettuate con tromografi Tromino® e sistemi multicanale SoilSpy (Micromed spa) e analizzate con il software Grilla prodotto dall'autrice ad eccezione di Figura 13B e Figura 14B, ridisegnate a partire dai risultati di un modello condotto con Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits di Bardet, Ichii e Lin (2000).

Bibliografia

- Aki K. and Richards P.G., 2002. *Quantitative Seismology*, University Science Books, 700 p.
- Anderson J.G., 2007. Physical Processes that control strong ground motion in *Treatise on Geophysics, Earthquake Seismology*, G. Schubert ed., Elsevier, Amsterdam.
- Boore D. M., 2004. Ground motion in Anchorage, Alaska, from the 2002 Denali fault earthquake: Site response and displacement pulses, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, S72–S84.
- Borcherdt R. D., 1994. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification) *Earthquake Spectra* 10, 617–653.
- Cadet, H., Bard P-Y., Rodriguez-Marek A., 2010. Defining a standard rock site: propositions based on the KiK-net data base, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100(1), 172-195. DOI: 10.1785/0120090078.
- Castellaro S., Mulargia F., Rossi P.L., 2008. *Vs30: Proxy for Seismic Amplification?* *Seism. Res. Lett.*, 79, 540-543.
- Castellaro S. e Mulargia F., 2009a. VS30 estimates using constrained H/V measurements, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99, 761–773.
- Castellaro S. e Mulargia F., 2009b. The effect of velocity inversions on H/V, *Pure Appl. Geophys.*, 166, 567–592.
- Castellaro S. e Mulargia F., 2010. How far from a building does the ground motion free field start? The cases of three famous towers and of a modern building, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 2080–2094.
- Castellaro S., Padrón A.L., Mulargia F., 2013. The different response of apparently identical structures: a far-field lesson from the Mirandola 20th May 2012 earthquake, *Bull. Earthq. Eng.*, DOI 10.1007/s10518-013-9505-9
- Chopra A.K. e Goel R.K., 2000. Building period formulas for estimating seismic displacements, *Earth. Spectra*, 16, 533-536.
- Clinton J.F., Case Bradford S., Heaton T.H. e Favela J., 2006. The Observed Wander of the Natural Frequencies in a Structure, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96(1), 237–257.
- Gutenberg B., 1931. Microseisms in North America, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 21, 1-24.
- Gutenberg B., 1936. On microseisms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 111-117.
- Hong L. e Hwang W., 2000. Empirical formula for fundamental vibration periods of reinforced concrete buildings in Taiwan, *Earth. Eng. And Struct. Dyn.*, 29, 327-337.
- Harmsen C., 1997. Determination of site amplification in the Los Angeles urban area from inversion of strong-motion records, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87, 866–887.
- Hartzell S., Carver D., Williams R.A., Harmsen R. e Zerva A., 2001. Site response, shallow shear-wave velocity, and damage in Los Gatos, California, from the 1989 Loma Prieta earthquake *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 443–464.
- Ibs-von Seht M. e Wholenberg J., 1999. Microtremor Measurements Used to Map Thickness of Soft Sediments, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89(1), 250-259.
- Lee V.W. e Trifunac M.D., 2010. Should average shear wave velocity in the top 30 m of soil be the only local site parameter used to describe seismic amplification?, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 30, 1250-1258.
- Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristic estimates of subsurface using microtremor on the ground surface, *Q. Rep. Railway Tech. Res. Inst.*, 30, 25–33.
- Nogoshi M. e Igarashi T., 1970. On the propagation characteristics of microtremors. *J. Seism. Soc. Japan*, 23, 264-280.
- Park C.B., Miller R.D. e Xia J., 1999. Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, 64(3), 800–808.
- Richart F.E., Hall J.R. e Woods R.D., 1970. *Vibrations of soils and foundations*: Prentice-Hall, Inc.
- Rix G.J. e Leipski E.A., 1991. Accuracy and resolution of surface wave inversion, in Bhatia, S. K., and Blaney, G. W., Eds., *Recent advances in instrumentation, data acquisition and testing in soil dynamics*, *Am. Soc. Civil Eng.*, 17–32.
- SESAME Project, 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: Measurements, processing and interpretation, SESAME European Research Project WP12, deliverable no. D23.12, http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Papers/HV_User_Guidelines.pdf (last accessed 11 May 2012).
- Steidl J.H., Tumarkin A.G. e Archuleta R.J., 1996. What Is a Reference Site? *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86(6), 1733-1748.