

La matrice VFZ: un approccio alternativo alla classificazione sismica semplificata dei suoli

Silvia Castellaro

Geologo, Ricercatore, Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Bologna

1. PREMESSA

All'ultimo simposio IASPEI/IAEE (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior / International Association for Earthquake Engineering) che si è tenuto nell'agosto 2011 a Santa Barbara (California) sul tema "Effetti della Geologia di Superficie sul Moto del Terreno" (ESG4, 2011), una giornata di dibattito è stata dedicata alla stima dell'amplificazione sismica stratigrafica attraverso procedure semplificate. Poiché la sola procedura semplificata di fatto universalmente adottata è quella basata su Vs30, il dibattito si è articolato in 3 fasi: vantaggi del metodo, difetti del metodo e alternative al metodo.

Quel giorno fu proposta un'unica alternativa che illustriamo nel seguito.

1.1 Perché è necessario un approccio semplificato alla classificazione sismica di sito

Gli studi di risposta sismica locale alla scala della pianificazione urbanistica e territoriale (microzonazione sismica, mappe di scuotimento) o alla scala della singola costruzione (norme tecniche) richiedono la conoscenza delle proprietà fisiche del terreno fino al bedrock e del tipo di moto 'caratteristico' atteso al sito.

Come output, essi normalmente forniscono la funzione di trasferimento del moto dal bedrock alla superficie, tipicamente per l'onda SH, e lo spettro di risposta, ossia la massima accelerazione/velocità/spostamento attesa su un oscillatore armonico ad un grado di libertà (edificio ideale) in funzione del suo periodo proprio e per un dato smorzamento.

Determinare gli input per questi tipi di analisi richiede la misura di molti parametri (profili di velocità delle onde P e S fino al bedrock, profilo di densità, profondità della tavola d'acqua, dipendenza del modulo di taglio con la de-

formazione e così via) e l'analisi stessa si basa su molti assunti – come l'esistenza di un terremoto caratteristico, la dominanza della propagazione verticale di onde SH nel moto sismico ecc. – che si verificano di rado.

I risultati apparentemente dettagliati delle modellazioni numeriche vanno pertanto sempre interpretati alla luce delle enormi incertezze associate.

A proposito di incertezze, faremo alcuni esempi.

PGA₀ (Peak Ground Acceleration al bedrock): noto parametro di base per la definizione dell'input sismico caratteristico di un sito. Esso viene ricavato a partire da formule che descrivono l'attenuazione di $\log(PGA_0)$ in funzione della magnitudo e della distanza dalla sorgente. Mentre tutti conosciamo i valori di PGA_0 delle zone in cui operiamo, sapremmo quantificare l'incertezza associata a tali valori? Uno sguardo alle leggi di attenuazione in cui essa è riportata, mostra che l'incertezza 1σ sul $\log(PGA_0)$ è sempre maggiore di 0.2¹ (Campbell, 1981; Boore et al., 1993, Kramer, 2000) e questo implica che usare valori di PGA_0 con 3 cifre significative (come ad es. nelle NTC, 2008), non è ammesso.

Profili di Vs: nei casi migliori l'incertezza associata alla loro stima è dell'ordine del 20% (Asten et Boore, 2005; Mulargia et Castellaro, 2009) e spesso è maggiore. L'effetto di questa incertezza sugli output delle modellazioni di risposta sismica locale non viene praticamente mai analizzato (propagazione degli errori).

Uso di accelerogrammi completi nei codici numerici standard di risposta di sito (analisi lineari equivalenti 1D e simili): questi codici assumono che l'input sismico sia una onda SH che si propaga verticalmente dal bedrock alla superficie, dove viene riflessa e torna al bedrock e così via secondo un moto che ha la massima ampiezza alle frequenze di risonanza del sistema. In sismologia è noto che ad eccezione dei terremoti molto profondi, che generano poche onde di superficie, le dominatrici incontrastate dei sismogrammi sia per ampiezza che per du-

¹ Si noti che 0.2 è l'incertezza sul logaritmo. L'incertezza su PGA_0 è dunque – a seconda della base del logaritmo – $10^{0.2}$ o $e^{0.2}$, ossia 1.6 o 1.2 g(!).

rata sono le onde di superficie (NMSOP, 2002), le quali si propagano in modo del tutto diverso dall'onda SH. Non è dunque chiaro perché si debba dare in input ad un programma che modella onde SH, un accelerogramma che per la maggior parte non è onda SH². Non è nemmeno chiaro perché si continui a prestare tanta attenzione alle sole onde SH ma procediamo con calma e cerchiamo di superare un problema alla volta.

Quelli appena discussi sono solo 3 esempi di incertezza ma la loro quantificazione porta alla conclusione che i risultati delle modellazioni numeriche di risposta di sito vadano usati nella sola ottica di capire quale sia l'influenza dei diversi parametri di input e di fornire andamenti generali delle funzioni di trasferimento e degli spettri di risposta e non valori con molte (ma solo apparenti) cifre significative.

Va notato che il problema degli ampi margini di incertezza si aggrava ulteriormente applicando procedure di modellazione molto più complesse (3D, agli elementi finiti, alle differenze finite ecc. ecc.). Al simposio (ESG4, 2011) sono stati illustrati i risultati del progetto E2VP che ha riunito 17 centri di ricerca ubicati in tutto il mondo allo scopo di modellare la risposta sismica locale con metodi numerici. I gruppi hanno applicato 6 metodi diversi e hanno lavorato sugli stessi input per fornire la risposta attesa in 15 siti. Dopo numerosi incontri per far convergere i risultati, i risultati forniti differivano di oltre il 100% nel 13% dei casi, differivano tra il 50 e il 100% nel 40% dei casi e differivano meno del 50% nel restante 60% dei casi. Va notato che – non potendo ottenere convergenze migliori – si considera eccellente un accordo di risultati entro il 50%.

Questo naturalmente non significa che non si debba continuare a lavorare sulle modellazioni numeriche: la ricerca deve concentrarsi su queste. Tuttavia i risultati che essa al momento fornisce non sono utilizzabili nella pratica applicativa quotidiana per l'ancora enorme incertezza dei risultati e per i costi economici e pratici richiesti dalla sua applicazione³.

Per questo motivo sono necessari metodi semplificati per la classificazione sismica di sito. Ad oggi l'unica procedura semplificata di fatto applicata a scala mondiale come stimatore del potenziale di amplificazione sismica di sito Fa è basata sulla velocità delle onde di taglio nello

strato omogeneo equivalente ai primi 30 m di profondità (Vs30; Borcherdt, 1994).

Nonostante i limiti di questa procedura siano ampiamente riconosciuti, approcci che tentino di superarli sono ancora visti con scetticismo, il che è sorprendente se si pensa che una relazione tra Fa e Vs30 non è nemmeno mai esistita a livello statistico (Castellaro et al., 2008; Lee e Trifunac, 2010).

Così, mentre in altri paesi (USA in primo luogo) si fatica ad accettare che sia possibile superare molti limiti dell'approccio Vs30 impiegando esattamente le stesse energie profuse per stimare Vs30, in Italia qualche buon tentativo di superamento è stato effettuato. Ad esempio, gli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica nazionali (ICMS, 2008) propongono di stimare i fattori di amplificazione di sito sulla base dei parametri Vs delle coperture e profondità del bedrock H, slegandosi così dal limite dei 30 m.

In modo simile si era mosso in precedenza anche l'Atto di Indirizzo per la Microzonazione Sismica in Emilia-Romagna (Atto di Indirizzo MZS, 2007), che introduceva anche il concetto di substrato rigido (Vs > 800 m/s) o non rigido, ossia il concetto fondamentale di 'contrasto di impedenza'.

2. LA MATRICE VFZ

L'amplificazione sismica è un fenomeno con molte cause (si veda Anderson, 2007, per una revisione). L'amplificazione legata alla stratigrafia è dovuta all'esistenza di contrasti di impedenza ($Z = \rho V$, densità x velocità) nel sottosuolo (Aki e Richards, 1980). Essi infatti governano la riflessione e la trasmissione delle onde alle interfacce, determinando le interferenze tra onde e i fenomeni di 'guida d'onda'.

L'amplificazione non risonante prodotta come risultato della conservazione dell'energia delle onde che si propagano attraverso materiali con velocità che variano gradualmente è data da:

$$A(f) = (Z_0 / \langle Z_i \rangle)^{1/2} \quad \text{Eq. 1}$$

dove il pedice 0 indica le proprietà alla sorgente e i le proprietà al sito. Per una data frequenza, l'amplificazione sarebbe data dalla radice del rapporto tra l'impedenza sismica alla profondità della sorgente Z_0 e l'impeden-

² A conferma di quanto detto e a titolo di curiosità è anche interessante osservare come, tra le decine di definizioni di magnitudo ($M_S, m_b, m_B, M_L, M_d, M_w$, ecc.), non esistano magnitudo definite sull'ampiezza dell'onda S. Il motivo è perché l'onda S in un sismogramma è generalmente poco riconoscibile per la sua ampiezza modesta rispetto alle onde di superficie e per la posizione (sempre racchiusa tra le onde P e le onde di superficie). Si noti che M_S sta per magnitudo delle onde di superficie e non delle onde di volume.

³ Si noti che l'incertezza descritta riguarda solo il comportamento del suolo ma analoga incertezza affligge anche lo studio della risposta dinamica delle strutture e delle interazioni suolo-struttura.

za sismica mediata su una profondità corrispondente al quarto di lunghezza d'onda $\langle Z_r \rangle$ (Joyner et al., 1981; Day, 1986).

E' dunque chiaro dall'Eq. 1 che non è il valore assoluto di Vs a controllare l'amplificazione sismica. Piuttosto Vs, legata alla rigidità μ secondo la nota legge $\mu = \rho Vs^2$, controlla lo smorzamento, che è un altro parametro importante.

Allo scopo di capire in che modo l'amplificazione sismica sia funzione del contrasto di impedenza, studiamo la risposta lineare equivalente 1D di una serie di modelli costituiti da 30 strati ciascuno con le seguenti proprietà:

- 1) *Strato 1*: livello superficiale caratterizzato da:
 - a. Vs₀ compresa tra 100 e 600 m/s (a passi di 100 m/s) e
 - b. spessore di 3, 5, 7, 10, 15, 20, 40, 50, 60, 80, 100, 200, 300 m,
- 2) *Strato 2*: sottostante *Strato 1*, caratterizzato da Vs crescenti (200, 300, 400, 500, 600, 700, 1000, 1200, 1600, 2000 m/s). Quando *Strato 1* ha Vs₀ = 200 m/s, *Strato 2* ha Vs crescenti da 300 a 2000 m/s; quando *Strato 1* ha Vs₀ = 300 m/s, *Strato 2* ha Vs crescenti da 400 a 2000 m/s e così via,
- 3) *Strati 3-30*: il profilo di velocità aumenta in modo esponenzialmente decrescente fino al bedrock, ubicato alla profondità di 2 km.

In questi modelli il contrasto di impedenza massimo si verifica tra *Strato 1* e *Strato 2*. Per ciascuno *Strato 1*, si hanno 45 diversi profili di Vs e il numero totale di sottosuoli modellati è 13 (spessori di *Strato 1*) per 45 (contrasti di impedenza tra *Strato 1* e *Strato 2*), per un totale di 585 modelli, un esempio dei quali è dato in Figura 1 a. Per tutti gli strati si è posta densità 2×10^3 kg/m³ e assenza di tavola d'acqua. Per tutti i modelli si sono usate le curve modulo di taglio - e smorzamento - deformazione illustrate in Figura 1 b e Figura 1 c rispettivamente per le coperture e il bedrock.

Per ridurre al minimo il numero di variabili e per comprenderne meglio l'influenza, come simulatore del moto di input (terremoto) usiamo la funzione più semplice possibile, ossia una ondina di Ricker con frequenza 1 Hz e 0.5 Hz, che rappresenta l'onset dell'onda SH di terremoti di dimensioni medio-piccole o medio-grandi (Figura 2). E' ora possibile ottenere le risposte sismiche attese per i 585 modelli descritti. A titolo di esempio, le funzioni di amplificazione ottenute per i modelli con profondità del contrasto di impedenza principale (*Strato 2*) a 80 m sono date in Figura 3.

Se per ciascuna Vs₀ (Vs di *Strato 1*) rappresentiamo solo la massima amplificazione (picco principale in Figura 3) in funzione della frequenza a cui si verifica, che dipende dalla profondità del bedrock, otteniamo i grafici di Figura 4. Ciascuna linea di questi grafici collega i punti caratterizzati dallo stesso contrasto di impedenza tra *Strato 1* e *Strato 2*. Questi grafici sono di fatto sezioni di una funzione 4D del tipo:

$$Fa = f(Vs_0, f_0, Z) \quad \text{Eq. 2}$$

Questa funzione permette di avere una stima di massima del fattore di amplificazione Fa dell'onda SH a partire da Vs₀, dalla frequenza di risonanza di sito f₀ e dal contrasto di impedenza Z tra *Strato 1* e *Strato 2*.

Vs₀, f₀ e Z (o semplicemente VFZ) costituiscono la base fisica minima per una classificazione semplificata dell'amplificazione sismica stratigrafica di sito.

Va notato che i valori assoluti di Fa dipendono anche da altre variabili, non esplicitamente considerate nella modellazione. Si raccomanda dunque di leggere la Figura 4 solo in senso relativo (amplificazione alta o bassa), senza dare ai numeri significati assoluti che non possono avere.

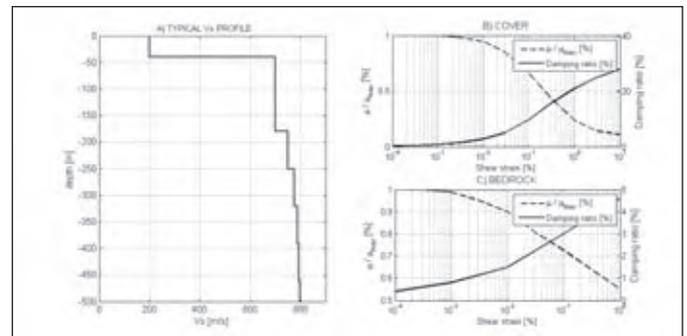


Figura 1 – A) esempio di modello di sottosuolo usato nell'analisi (zoom dei primi 500 m di profondità. Il modello reale arriva fino a 2 km). Questo modello rappresenta 40 m di coperture (Vs₀ = 200 m/s) sovrastanti uno strato semi-rigido (Vs crescente da 700 m/s verso il basso). B) e C) curve del modulo di taglio e dello smorzamento in funzione della deformazione di taglio usate per le coperture e gli strati assimilabili a bedrock.

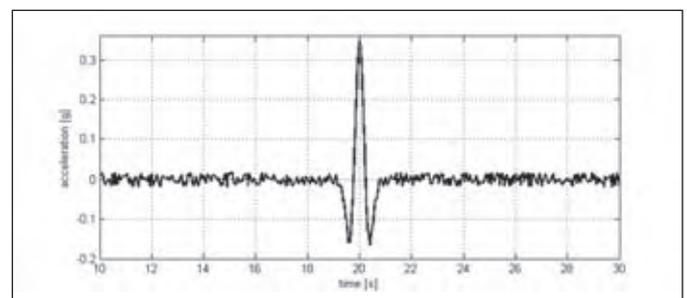


Figura 2 – L'onda SH del terremoto è modellata come una ondina di Ricker (qui con periodo 1 s e ampiezza massima $PGA_0 = 0.35$ g). E' aggiunto del rumore.

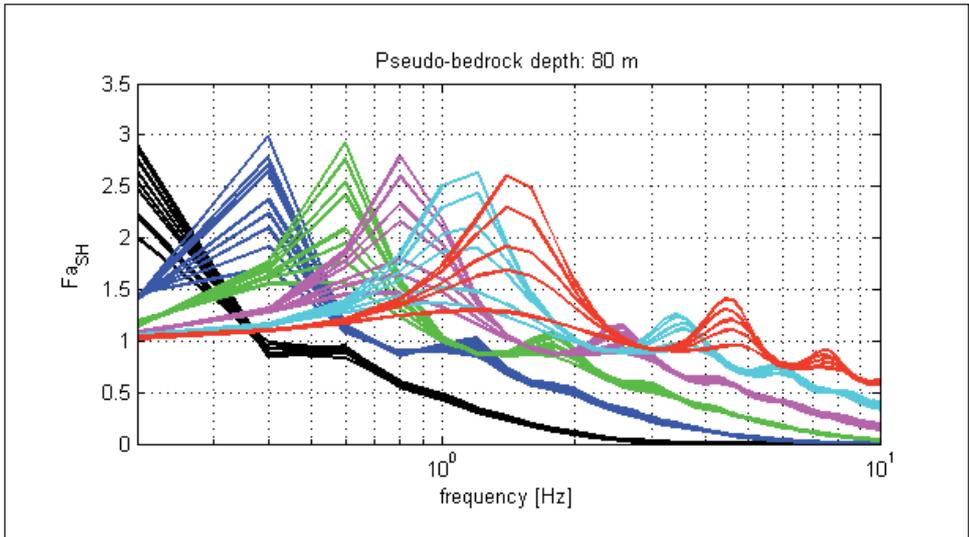


Figura 3 – Curve di amplificazione dell'onda SH per i modelli caratterizzati da 80 m di coperture con diverse V_{s0} (nero: 100 m/s, blu: 200 m/s, verde: 300 m/s, viola: 400 m/s, azzurro: 500 m/s, rosso: 600 m/s) sovrastanti strati con contrasto di impedenza crescente (si veda la legenda di Figura 4 per ciascun valore di V_{s0}). I massimi di queste funzioni di amplificazione, per ciascun modello e per ciascuna profondità dello strato rigido, sono ridisegnati in Figura 4, raggruppati secondo V_{s0} delle coperture.

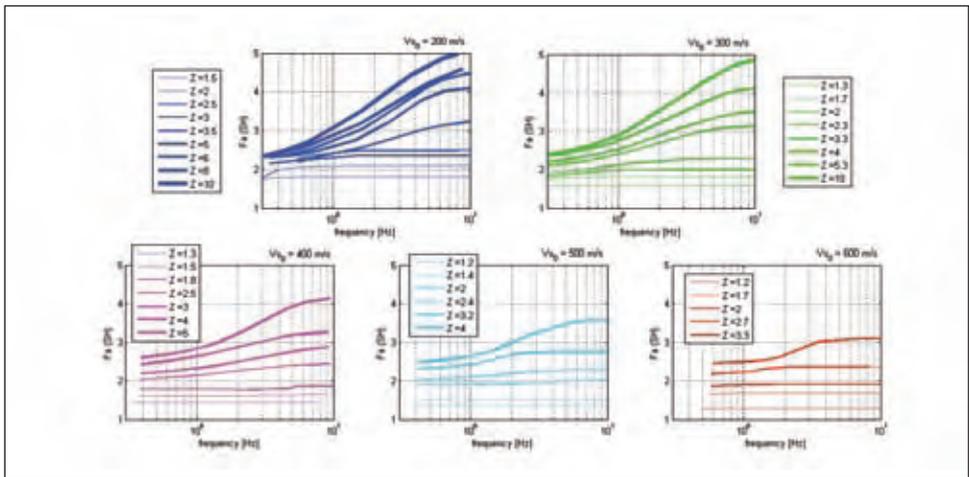


Figura 4 – Valori di amplificazione di SH attesi alla frequenza di risonanza in funzione di V_{s0} e del contrasto di impedenza Z tra i due strati che determinano la risonanza (Z è semplicemente il rapporto tra V_s , essendo le densità uguali per tutti gli strati modellati). I valori di F_a qui illustrati vanno interpretati solo in senso relativo, poiché dipendono da numerose altre variabili.

2.1 VFZ vs Vs30

2.1.1 VFZ

Dopo averne visto le basi fisiche, discutiamo quali sarebbero i benefici di una classificazione dei suoli basata su V_{s0} , f_0 e Z . A solo titolo di esempio raggruppiamo i 585 modelli costruiti in funzione dell'amplificazione attesa a bassa (< 1 Hz) o alta frequenza (≥ 1 Hz) e dell'ampiezza dell'amplificazione (bassa < 1.5 , intermedia $1.5-2$ o alta > 2). Per semplicità chiameremo queste categorie C1, C2, ... C6 come mostrato in Figura 5.

In Figura 6 sono rappresentati alcuni modelli di sottosuolo suddivisi in base alle amplificazioni che generano, come descritto dalle classi C1, C2,... C6. Come atteso, le classi caratterizzate da $f_0 < 1$ Hz (C1, C3, C5) sono collegate a sottosuoli con contrasti di impedenza a profondità maggiori rispetto alle classi (C2, C4, C6). Non è

però sufficiente una descrizione nei termini di V_s 'mediata' entro una certa profondità (come V_{s30} o V_{sH}) per ottenere questa suddivisione.

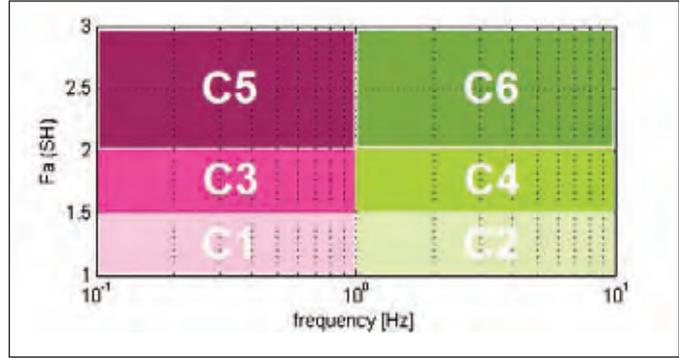


Figura 5 – Definizione di C1, C2, ..., C6 sulla base dell'amplificazione F_a attesa e della frequenza f_0 cui essa si verifica.

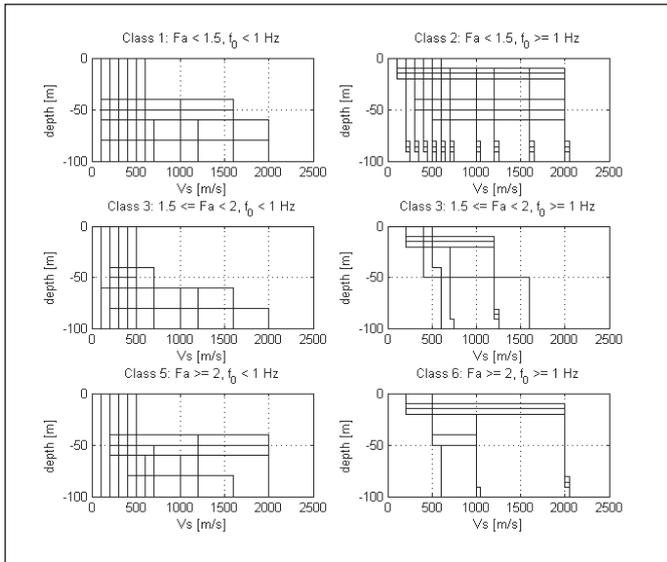


Figura 6 – Modelli di sottosuolo classificati secondo le categorie di Figura 5 (zoom dei primi 100 m di profondità).

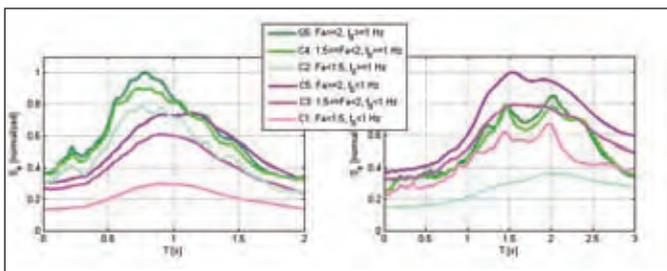


Figura 7 – Spettri di risposta medi per le classi C1, C2, ..., C6 nel caso di moto di input (sinistra) Ricker wavelet a 1 Hz e (destra) Ricker wavelet a 0.5 Hz. La deviazione standard non è mostrata per questioni di leggibilità.

Gli esiti della classificazione proposta in Figura 5 sugli spettri di risposta per un moto di input di tipo Ricker wavelet con frequenza 1 Hz sono dati in Figura 7. In questo caso si osserva che l'accelerazione massima dello spettro di risposta è attesa, in media, su suoli con $Fa \geq 1.5$ e $f_0 \geq 1$ Hz, il che è intuitivo. L'accelerazione minima è attesa in media sui suoli caratterizzati da $Fa < 1.5$ e $f_0 < 1$ Hz. Nel caso di input a 0.5 Hz, l'accelerazione massima è attesa per le classi di sottosuolo con $Fa \geq 1.5$ e $f_0 < 1$ Hz, che è di nuovo intuitivo. L'accelerazione minima è attesa per i sottosuoli con $Fa < 1.5$ e $f_0 \geq 1$ Hz.

2.1.2 Vs30

La matrice VFZ e le relative classi (Figura 5) sono concepite allo scopo di distinguere fattori e frequenze di amplificazione e, come appena mostrato, questo implica un 'potere predittivo' sugli spettri di risposta, in funzione del contenuto in frequenza del terremoto, ossia della sua dimensione.

Le tecniche basate sul concetto di 'rigidità media', come

ad esempio Vs30, non hanno le stesse capacità. Le ragioni sono fisiche, in base a quanto esposto in precedenza. In ogni caso, come ulteriore verifica, raggruppiamo i massimi di amplificazione (e le relative frequenze di occorrenza) dei 585 modelli in funzione delle loro categorie Vs30 (NTC, 2008).

I risultati sono mostrati in Figura 8, da cui emerge che il parametro Vs30 non è in grado di discriminare in modo efficace né le amplificazioni né le frequenze a cui queste avvengono. Suoli B, C e D risultano infatti in amplificazioni e frequenze di amplificazione completamente sovrapposte. Va notato poi come suoli B e C possano dare amplificazione praticamente di qualsiasi grandezza e a qualsiasi frequenza di interesse ingegneristico. La funzione di trasferimento bedrock-superficie è poco sensibile al moto di input, per cui i risultati non variano in modo significativo col tipo di terremoto.

La categoria di suolo A, essendo costituita da al massimo 5 m di coperture sopra il bedrock rigido, risulta in amplificazione solo in alta frequenza. Appare comunque sovrapposta ad alcuni suoli E e B.

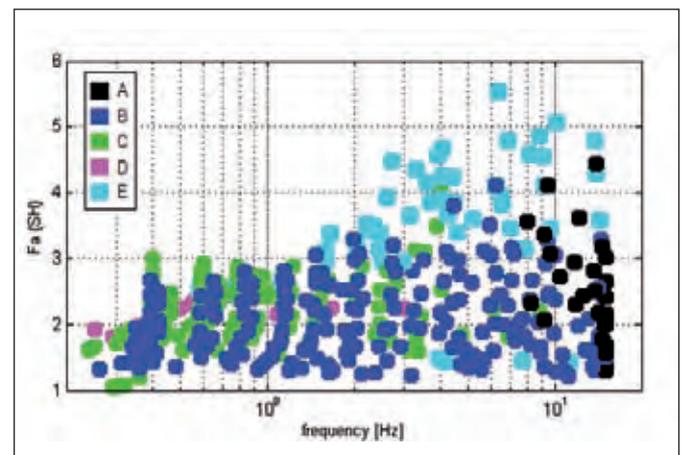


Figura 8 – Fattori di amplificazione SH attesi alla frequenza di risonanza per i 585 modelli di sottosuolo analizzati, raggruppati in base alla loro categoria Vs30. Si osserva la totale sovrapposizione delle classi B, C, D e, in larga parte, E.

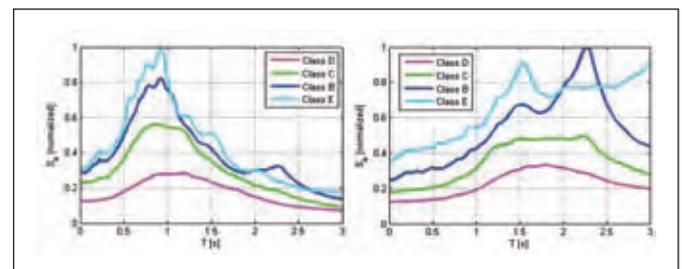


Figura 9 – Spettri di risposta medi dei sottosuoli modellati suddivisi in base alle loro categorie Vs30 nel caso (sinistra) di moto di input Ricker wavelet a 1 Hz e (destra) Ricker wavelet a 0.5 Hz. La deviazione standard non è mostrata per questioni di leggibilità. Si osserva come lo spettro di risposta sia sensibile al contenuto in frequenza del moto di input.

Analizziamo ora gli spettri di risposta derivati dai modelli, suddivisi in base alle classi V_{s30} . Come già ricordato, a differenza delle funzioni di amplificazione bedrock-superficie, gli spettri di risposta sono molto sensibili al moto di input. In Figura 9A mostriamo i risultati quando il contenuto in frequenza del moto di input ha una portante a 1 Hz. In questo caso le accelerazioni massime sono attese per le strutture su suoli E e B e si osserva uno spostamento generale della frequenza di massima amplificazione, che diminuisce da E a B a C a D. Un comportamento diverso si osserva quando il moto di input ha una portante a frequenza inferiore (es. 0.5 Hz in Figura 9B). In questo caso la massima ampiezza spettrale è attesa su suolo B e la frequenza cui è associato il massimo aumenta da E a B a C a D.

Dall'approccio modellistico-numerico segue che il parametro V_{s30} non può essere uno stimatore della risposta di sito nemmeno quando si considerano gli spettri di risposta, data la loro sensibilità al contenuto in frequenza del moto di input e alla sua vicinanza o meno alle frequenze proprie del sottosuolo, informazioni che non sono incluse in V_{s30} .

2.2 VFZ vs. ICMS (2008)

Abbiamo già accennato al fatto che un approccio parzialmente simile allo schema classificativo VFZ è già applicabile in Italia negli studi di microzonazione sismica. Secondo le linee guida nazionali (ICMS, 2008), infatti, un fattore di amplificazione approssimato delle onde SH può essere derivato da appositi abachi in funzione della profondità del bedrock ($V_s > 800$ m/s), della velocità delle coperture (V_{s0}), del tipo di materiali, del gradiente di V_s del sottosuolo e del valore assoluto di PGA_0 . Rispetto a questo metodo, l'approccio VFZ si basa su meno parametri di input e, ad esempio, non richiede la definizione di un valore di soglia oltre il quale uno strato vada considerato bedrock.

L'andamento dei fattori di amplificazione presentati negli ICMS (2008) appare talvolta poco spiegabile. In un approccio semplificato, a parità di profondità del bedrock e all'aumentare di V_{s0} , l'andamento atteso di F_a è grossomodo monotonicamente decrescente.

L'andamento di F_a secondo gli abachi di ICMS (2008) è invece "zig-zagante" (Figura 10) e questo non origina da errori di calcolo ma probabilmente dalla eccessiva⁴ sensibilità dei modelli a specifici parametri di input (es. frequenze specifiche contenute negli accelerogrammi

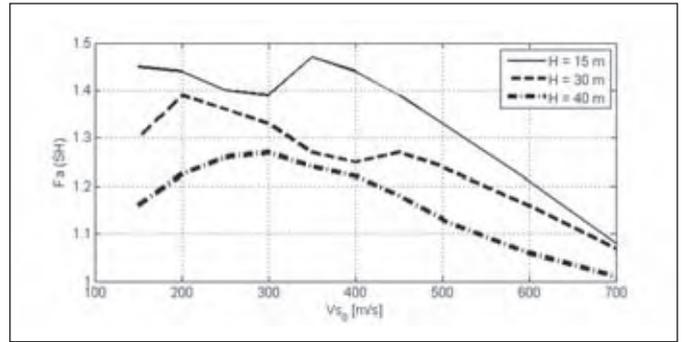


Figura 10 – Andamento di F_a (SH) in funzione di V_{s0} , media delle coperture (H è lo spessore delle coperture) proposto secondo ICMS (2008). L'andamento anomalo ('zig-zagante') delle curve deriva probabilmente da una eccessiva sensibilità dei modelli a specifici parametri di input (vd. testo). Per il significato che hanno (indicare un F_a mediamente atteso in un determinato contesto), sarebbe opportuna una rivisitazione di queste curve al fine di lisciarle e rimuovere le cifre significative in eccesso che non possono trovare riscontro nella pratica quotidiana.

di input rispetto alle frequenze del terreno) nonché da problemi di arrotondamento dei valori. L'uso di 3 cifre significative per F_a , ricordiamo, non è giustificato in alcun contesto sperimentale.

2.3 VFZ in pratica

Vediamo ora attraverso alcuni esempi come giungere ad una classificazione di sottosuolo semplificata nei termini di VFZ.

Prima di tutto definiamo l'intervallo di ricerca dei parametri: è evidente che f_0 deve essere commisurata alle frequenze di interesse ingegneristico che saranno mediamente > 1 Hz per strutture inferiori ai 5 piani ma potranno arrivare a 0.1 Hz per opere più elevate. Ricordiamo che caratterizzare un terreno a frequenze inferiori a 1 Hz significa caratterizzare spessori superiori a 100 m (fino anche a 1-2 km per le frequenze attorno a 0.1 Hz). Il metodo più immediato per stimare f_0 è la prova sismica passiva a stazione singola (H/V, Nakamura, 1989; SESA-ME, 2004). In linea teorica è possibile ricavare f_0 anche da opportune modellazioni a partire da un profilo di V_s noto ma è evidente che i metodi geofisici standard non permettono di ricostruire il profilo di V_s alle profondità citate sopra e, quando anche lo facessero, la propagazione delle incertezze sperimentali sul modello produrrebbe una stima di f_0 mediamente meno affidabile delle prove passive a stazione singola.

La stima di V_{s0} sarà effettuata tramite una delle tante prove sismiche multicanale, attive o passive. Di queste prove, che siano basate su onde di volume o superficie,

⁴ Eccessiva rispetto agli scopi per cui sono realizzati questi abachi.

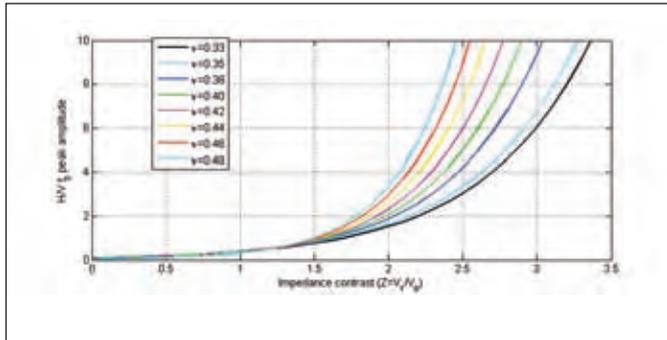


Figura 11 – Esempio di relazione tra ampiezza del picco H/V e contrasto di impedenza che lo genera, in funzione del rapporto di Poisson ν . Grafico semplificato per il caso monostrato su substrato infinito.

per motivi diversi è nota la difficoltà di penetrazione. Negli ultimi anni si sono consolidati gli approcci congiunti di prove multicanale a onde di superficie (ReMi, ESAC, MASW e simili) e prove H/V che permettono di superare l'una i limiti principali dell'altra e di ottenere stime ragionevoli di V_{s0} fino a f_0 . In casi favorevoli è possibile stimare un profilo di V_s sufficiente ad una modellazione semplificata a partire dalla sola curva H/V e da prove geotecniche di vincolo (Castellaro e Mulargia, 2009 a). Per quanto riguarda la stima della terza variabile, Z , questa può essere ottenuta dal profilo di V_s oppure dall'ampiezza A_0 del picco da cui si determina f_0 nella curva H/V. Il campo di microtremore è composto essenzialmente da onde di superficie e a partire da alcuni assunti sulla sua composizione (*ibid.*) è possibile descrivere una relazione tra A_0 e Z , la quale necessariamente dipende dal modulo di Poisson (ossia dal rapporto V_p - V_s , che determina l'ellitticità dell'onda di Rayleigh) secondo un andamento del tipo indicato in Figura 11. Questa procedura fornisce anche una stima dell'incertezza nel caso in cui il modulo di Poisson sia del tutto ignoto. Si ricorda che esso approssima 0.5 nei terreni molto teneri sotto falda (per i quali V_s è minima e V_p tende a 1500 m/s) e cala fino a circa 0.3 negli ammassi rocciosi sani.

2.3.1 CASO DI UN CONTRASTO DI IMPEDENZA NETTO

Consideriamo il sito di Figura 12 in cui la curva H/V mostra un picco con ampiezza 6 ± 0.5 legato alla risonanza di 15 m di coperture ($V_{s0} = 240$ m/s) su uno strato rigido ($V_s \approx 700$ m/s). Si verifica quindi un contrasto di impedenza $Z \approx 3$ tra le coperture e lo strato assimilabile a bedrock. Noti V_{s0} , f_0 e Z possiamo entrare nella matrice VFZ (attraverso uno specifico codice di calcolo oppure ad es. nella sezione $V_{s0} = 200$ - 300 m/s di Figura 4) e stimare per questo sito un $F_a \approx 2.5$ a $f_0 = 4$ Hz.

La modellazione numerica del caso in esame attraverso codici lineari equivalenti classici avrebbe portato alla stima di un fattore di amplificazione analogo (Figura 13).

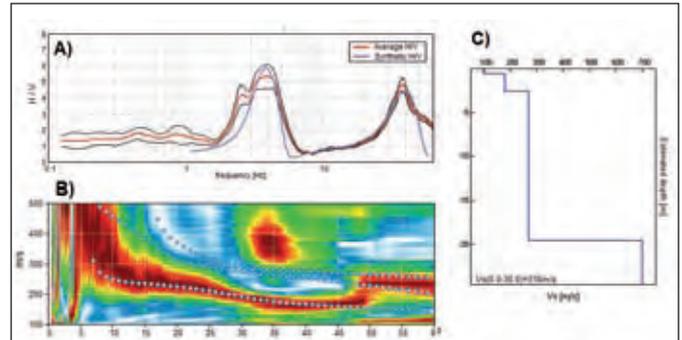


Figura 12 – A) Curva H/V e B) spettro di velocità di fase dell'onda di Rayleigh registrati in un sito con circa 15 m di coperture sovrastanti uno strato rigido. La configurazione dà luogo ad un picco netto a $f_0 = 4$ Hz e fissa la V_s media delle coperture a 240 m/s. Il modello suggerisce $V_s \approx 700$ m/s per il bedrock, con un contrasto di impedenza $Z \approx 3$. I modelli teorici di curva H/V e curva di dispersione sono sovrapposti in azzurro nei grafici A e B.

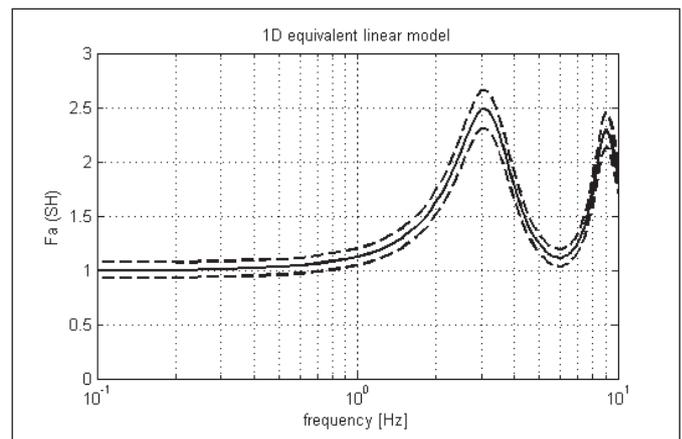


Figura 13 – Fattore di amplificazione SH da modello lineare-equivalente 1D di risposta di sito. Questo dà $F_a(SH) \approx 2.5$, analogo a quanto ottenuto secondo l'approccio semplificato VFZ a partire da $V_{s0} = 240$ m/s, $f_0 = 4$ Hz e $Z = 3$.

2.3.2 CASO DI CONTRASTO DI IMPEDENZA DEBOLE

Una delle critiche che veniva mossa in passato al metodo H/V era il fatto che le curve non mostrassero picchi significativi in presenza di contrasti di impedenza deboli. Come si deduce da Figura 11, è necessario $Z > 1.5$ circa per osservare un picco H/V significativo.

Allo stesso modo, però, per avere una amplificazione significativa delle onde SH, sono ugualmente necessari contrasti di impedenza $Z > 1.5$ (Figura 4).

Ne segue che una curva H/V senza chiari picchi indica un terreno con bassi Z e risulterà in altrettanto bassi F_a che si possono stimare seguendo la linea di bassa impedenza per ciascuna V_{s0} in Figura 4. Ciò che era considerato un limite del metodo H/V, in realtà non lo è ai fini della stima di F_a .

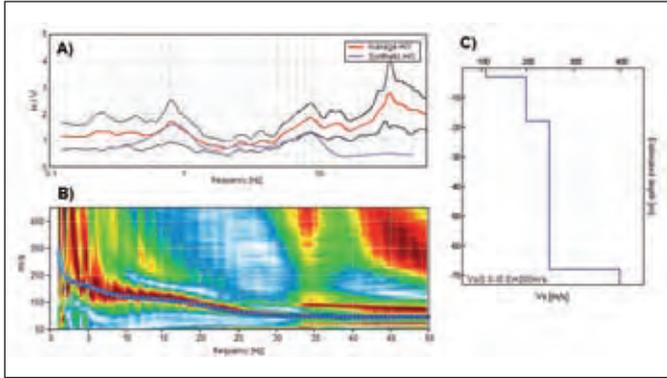


Figura 14 – Caso di sottosuolo caratterizzato da profilo di Vs gradualmente crescente con la profondità. A) curva H/V sperimentale (rosso con deviazione standard in nero) e teorica (blu). B) spettro di velocità di fase dell'onda di Rayleigh con curva di dispersione teorica (blu), C) modello di Vs per il sito ottenuto dal fit congiunto delle due prove. La prova B) fornisce informazioni solo fino a 5 Hz. Il modello teorico sotto questa frequenza è ottenuto dalla prova H/V.

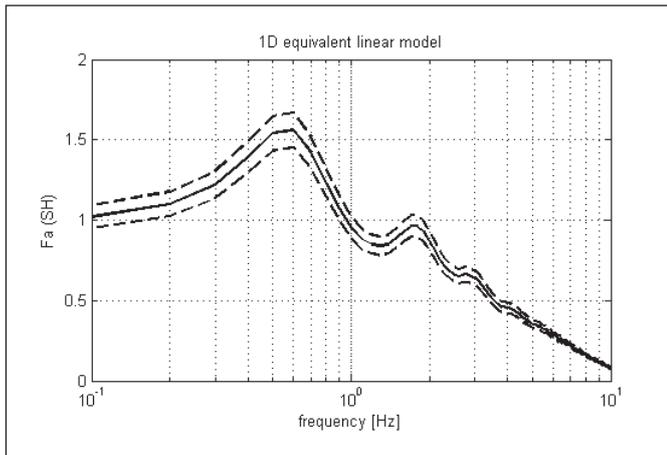


Figura 15 – Fattore di amplificazione SH da modello lineare-equivalente 1D di risposta di sito. Questo dà $Fa(SH) \approx 1.6$ a f_0 .

In Figura 14 mostriamo il caso di un H/V acquisito su argille che mostra un picco decisamente modesto ma la cui esistenza è ben confermata nella zona da numerose prove nella zona. Il fit congiunto di H/V e curve di dispersione fornisce il profilo di Vs illustrato nel pannello C). Si osserva che la curva di dispersione fornisce informazioni solo fino a circa 20 m di profondità e il resto del modello è ottenuto dal fit della sola curva H/V.

La frequenza fondamentale di sito è $f_0 = 0.8$ Hz ed è riconducibile ad uno strato assimilabile al bedrock a circa 70 m di profondità. Il modello suggerisce $Vs_0 = 230$ m/s e $Z = 1.7$ (pannello C in Figura 14). Secondo la procedura semplificata, l'amplificazione attesa al sito è $Fa = 1.8$ (Figura 4). Per validare i risultati dell'approccio semplificato eseguiamo una modellazione lineare-equivalente 1D ed otteniamo la funzione di amplificazione illustrata in Figura 15, che suggerisce $Fa = 1.6$ alla frequenza di risonanza.

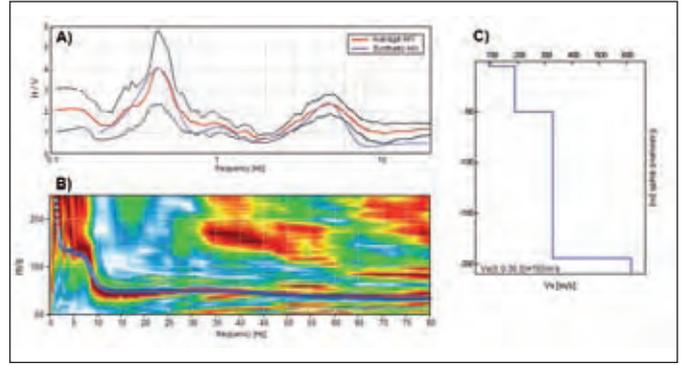


Figura 16 – Caso di sottosuolo caratterizzato da due netti contrasti di impedenza. A) curva H/V sperimentale (rosso con deviazione standard in nero) e teorica (blu). B) spettro di velocità di fase dell'onda di Rayleigh con curva di dispersione teorica (blu), C) modello di Vs per il sito ottenuto dal fit congiunto delle due prove. La prova B) fornisce informazioni solo fino a 5 Hz. Il modello teorico sotto questa frequenza è ottenuto dalla prova H/V.

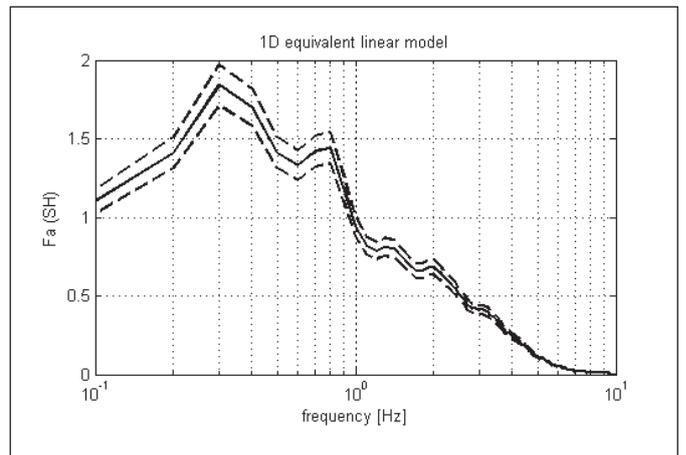


Figura 17 – Fattore di amplificazione SH da modello lineare-equivalente 1D di risposta di sito. Questo dà $Fa(SH) \approx 1.7-1.8$ a f_0 , analogo a quanto stimato secondo l'approccio semplificato VFZ a partire da $Vs_0 = 300$ m/s, $Z = 2$ e $f_0 = 0.4$ Hz.

2.3.3 CASO DI PIU' DI UN CONTRASTO DI IMPEDENZA

Vediamo ora come si possa caratterizzare un sottosuolo che presenta più di un contrasto di impedenza rilevante attraverso un metodo semplificato. Consideriamo l'esempio di Figura 16 in cui appaiono 2 picchi H/V distinti, uno a 0.5 Hz ed il secondo a 5 Hz. Questo non può – matematicamente parlando – essere un modo superiore del picco a 0.5 Hz. Esso è associato ad un livello di argille sovraconsolidate a circa 10 m di profondità, mentre il picco a bassa frequenza è associato al bedrock locale a circa 200 m di profondità. Il fit congiunto delle prove in array e H/V (Figura 16A e B) fornisce il modello di Vs di Figura 16C. La modellazione lineare-equivalente suggerisce $Fa = 1.7$ a $f_0 = 0.5$ Hz (Figura 17) e, in modo analogo, la procedura semplificata VFZ per $Vs_0 = 300$ m/s e $Z = 2$, dà $Fa = 1.8$. (Figura 4). Considerando come rilevante $f_0 = 5$ Hz, si avrebbe invece $Vs_0 = 100$ m/s, $Z < 2$ e un Fa trascurabile (Figura 4).

3. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Poiché l'obiettivo finale degli studi di risposta sismica locale è prevedere il comportamento di un oscillatore (la struttura) fondato su un altro oscillatore (il sottosuolo), sembra ragionevole trasferire il ragionamento da un approccio funzione della profondità (Vs_{30}) ad un approccio funzione della frequenza (f_0).

A partire dall'osservazione che la principale causa di amplificazione sismica stratigrafica è l'esistenza di contrasti di impedenza nel sottosuolo, si propone uno schema classificativo semplificato di sito basato su 3 parametri: Vs_0 , f_0 e Z (in breve VFZ), ossia la velocità media delle coperture, la frequenza di risonanza del sottosuolo e il contrasto di impedenza tra coperture e strato che genera la risonanza.

L'analisi della risposta sismica 1D di diversi sottosuoli (tutti caratterizzati da Vs che aumentano con la profondità) ha permesso di creare una funzione 4D che correla il fattore di amplificazione F_a atteso per l'onda SH a (Vs_0 , f_0 , Z).

VFZ costituisce la base fisica minima per una stima dell'amplificazione stratigrafica e può essere misurata con lo stesso impegno strumentale richiesto per una misura di Vs_{30} . L'interpretazione congiunta di una prova multicanale a onde di superficie e una prova H/V o – in casi favorevoli – la sola prova H/V accompagnata da una adeguata conoscenza della stratigrafia del sito sono sufficienti per la stima di VFZ nel dominio di frequenze di interesse ingegneristico. In particolare, la prova H/V fornisce una stima ragionevole di f_0 ⁵. La prova multicanale o il fit vincolato della prova H/V forniscono una stima di Vs_0 . Infine Z può essere inferita dall'ampiezza A_0 dei picchi H/V⁶.

E' stato mostrato che lo schema classificativo basato su (Vs_0 , f_0 , Z) può essere usato anche in assenza di risonanze marcate (dovute all'assenza di contrasti di impedenza netti) e su suoli che presentano più di una risonanza.

Una obiezione che potrebbe nascere è che una volta che per un sito siano disponibili i parametri VFZ, si potrebbe – con uno sforzo minimo maggiore – effettuare una modellazione numerica 1D completa in luogo della procedura semplificata.

In realtà l'applicazione di una modellazione numerica richiede lo studio della risposta con diverse funzioni di input (terremoti), al fine di fornire un valore medio e

relativa incertezza, nonché diverse altre scelte di input (posizione della tavola d'acqua, curve di smorzamento, posizione della sorgente ecc.) e il tutto risulta molto più laborioso e dà un output che per i motivi presentati nell'introduzione non è scientificamente meno impreciso di una procedura semplificata.

La matrice VFZ si può rivelare utile anche nella semplice interpretazione delle curve H/V. Essa infatti dà una stima della grandezza dell'amplificazione dell'onda SH attesa a partire dall'ampiezza dei picchi H/V, indipendentemente dalla loro origine (da bedrock rigido o altri strati) permettendo così di capire a quali picchi H/V dare importanza maggiore.

Sottolineiamo ancora che i valori di F_a forniti dalla matrice VFZ (e in generale dagli approcci semplificati) non vanno intesi come valori assoluti ma come relativi (sito a bassa o alta amplificazione) poiché dipendono da numerose altre variabili e assunti.

Ultimo, ma non meno importante, il già citato fatto che stiamo purtroppo continuando a dare tanta attenzione al problema dell'amplificazione delle onde SH quando buona parte del terremoto non è onda SH, né per ampiezza né per durata.

Nota finale: Lo scopo di questo scritto non è di proporre l'ennesima serie di abachi per derivare F_a ma di indicare quali sono i parametri fisici minimi necessari per una classificazione semplificata di sito e di mostrare perché è scientificamente preferibile una classificazione semplificata ai minimi termini (ma razionale) a classificazioni più articolate ma con pari livello di incertezza.

7. BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

AKI K. E 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.

ASTEN, M. W., AND D. M. BOORE (2005). Comparison of shear-velocity profiles of unconsolidated sediments near the Coyote Borehole (CCOC) measured with fourteen invasive and non-invasive methods. In *Blind Comparisons of Shear-wave Velocities at Closely Spaced Sites in San Jose, California*, ed. M. W. Asten and D. M. Boore., USGS Open File Report 2005-1169; <http://pubs.usgs.gov/of/2005/1169/>.

⁵ La prova H/V suggerisce inoltre la presenza di inversioni di velocità rilevanti (Castellaro and Mulargia, 2009b), ossia di casi non considerati nella modellazione presentata.

⁶ Le prove in array, specialmente attivo con energizzazione in superficie permettono di caratterizzare bene Vs_0 delle coperture mentre faticano a dare informazioni sotto riflettori rigidi per questioni energetiche (percentuale di onde riflesse vs. percentuale di onde rifratte alle interfacce). Per questo motivo talvolta forniscono stime poco precise o insufficienti (per limiti di profondità) di Z .

- ATTO DI INDIRIZZO PER LA MZS IN EMILIA ROMAGNA (2007). Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della L.R. 20/2000 "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio", in merito a "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica".
- BOORE, D.M., JOYNER, W.B., FUMAL, T.E., 1993. Estimation of response spectra and peak acceleration from western North America earthquakes: an interim report, Near source attenuation of peak horizontal acceleration, *Open-File-Report 93-509*, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 72 pp.
- BORCHERDT, R.D., 1994. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification) *Earthquake Spectra*, 10, 617-653.
- CAMPBELL K.W., 1981. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, 2039-2070.
- CASTELLARO S., MULARGIA F. e ROSSI P.L., 2008. V_{s30} : proxy for seismic amplification? *Seism. Res. Lett.*, 79, 540-543.
- CASTELLARO, S., MULARGIA, F., 2009A. VS30 estimates using constrained H/V measurements, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99, 761-773.
- CASTELLARO, S., MULARGIA, F., 2009B. The effect of velocity inversions on H/V, *Pure Appl. Geophys.*, 166, 567-592
- DAY M.S. (1996). RMS response of a one-dimensional half-space to SH, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 363-370.
- ESG4, 2011. 4TH IASPEI / IAEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM: *Effects of Surface Geology on Strong Ground Motion*, 23-26 Agosto, Santa Barbara, California (USA), <http://esg.eri.ucsb.edu/>
- ICMS, 2008. GRUPPO DI LAVORO MS. *Conferenza delle Regioni e delle Province autonome* – Dipartimento della protezione civile, Roma, 3 vol. e CD.
- JOYNER W.B., WARRICK R.E. AND FUMAL T.E. (1981). The effect of Quaternary alluvium on strong ground motion in the Coyote Lake, California, earthquake, 1979, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, 1333-1349.
- LEE, W., TRIFUNAC, M.D., 2010. Should average shear-wave velocity in the top 30 m of soil be used to describe seismic amplification? *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, 1250-1258.
- MULARGIA E CASTELLARO, 2009. Experimental uncertainty on the $V_s(z)$ profile and seismic soil classification, *Seism. Res. Lett.*, 80, 985-988.
- 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.
- NMSOP, 2002. *IASPEI New Manual of the Seismological Observatory Practice*, P. BORMANN ED., POTSDAM, 2 vol.
- NTC (2008). *Norme Tecniche per le Costruzioni*, D.M. 14.01.2008.
- 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 May 2009).