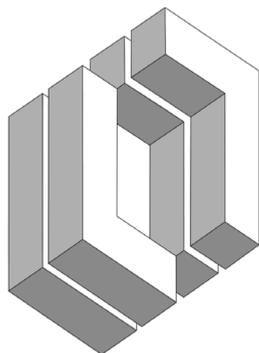


Supplemento alla rivista trimestrale



ingegneria sismica

Anno XXVIII - n. 2 - 2011

www.patroneditore.com

A cura di:

Mauro Dolce
Dario Albarello
Silvia Castellaro
Sergio Castenetto
Antonio Colombi
Massimo Compagnoni
Michele Di Filippo
Maria Di Nezza
Claudio Eva
Sebastiano Foti
Guido Martini
Giuseppe Naso
Floriana Pergalani
Filippo Santucci de Magistris
Gabriele Scarascia Mugnozza
Francesco Silvestri

Progetto grafico e Impaginazione:

Omega Graphics Snc
Bologna

Stampa:

LI.PE. Tipografia Persicetana,
San Giovanni in Persiceto, Bologna, Giugno 2011

Patron Editore
Via Badini 12, 40057 Quarto Inferiore,
Granarolo dell'Emilia, Bologna
Tel. 051.767003 - Fax 051.768252
www.patroneditore.com
info@patroneditore.com

Introduzione <i>M. Dolce</i>	pag	3
“Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica”: un riferimento per la caratterizzazione sismica del territorio <i>S. Castenetto</i>	pag	6
La carta geologica tecnica per gli studi di MS <i>G. Martini, S. Castenetto, G. Naso</i>	pag	14
Rilievi gravimetrici per la microzonazione sismica (livello 1) <i>M. Di Filippo, M. Di Nezza, G. Scarascia Mugnozza</i>	pag	18
Valutazione degli standard di esecuzione e dell'efficacia delle indagini di sismica attiva e passiva <i>S. Foti, F. Santucci de Magistris, F. Silvestri, C. Eva</i>	pag	23
Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola <i>D. Albarello, S. Castellaro</i>	pag	32
Procedura semiquantitativa per stabilire la qualità di una carta di MS di livello 1 <i>D. Albarello, S. Castenetto, G. Naso</i>	pag	63
Risposta sismica locale: la MS come strumento discriminante per l'utilizzo di approcci semplificati o di specifiche analisi <i>A. Colombi, M. Compagnoni, F. Pergalani</i>	pag	65

Introduzione

Mauro Dolce

Direttore Ufficio Rischio sismico e vulcanico – Dipartimento della Protezione Civile

Le problematiche trattate dagli studi di Microzonazione Sismica (MS) hanno avuto un forte sviluppo scientifico negli ultimi 40 anni, anche se la loro importanza era emersa già in epoca passata. È noto da tempo che le condizioni locali dei terreni di fondazione condizionano in modo importante gli effetti del terremoto. Già un secolo fa, i criteri informativi delle Norme Tecniche approvate con regio decreto 18 aprile 1909, n. 193, a seguito del disastroso terremoto di Messina e Reggio Calabria del 1908, riportavano il divieto di nuove costruzioni e ricostruzioni *“su terreni posti sopra e presso fratture, franosi o atti comunque a scendere, od a comunicare ai fabbricati vibrazioni e sollecitazioni tumultuarie per differente costituzione geologica o diversa resistenza delle singole parti di essi”*.

In uno studio condotto nel 1969 da alcuni studiosi americani in occasione del terremoto di S. Francisco del 1957, emersero risultati che indicavano con evidenza come nell'ambito della stessa città, a poche centinaia di metri di distanza, lo stesso terremoto provocasse scuotimenti decisamente differenti in dipendenza degli spessori e delle caratteristiche dei terreni più soffici presenti negli strati più superficiali. Da allora gli studi su molti terremoti (es. Città del Messico, Messico 1986; Kobe, Giappone 1992; Izmit, Turchia 1999, San Giuliano di Puglia, Italia 2002) hanno mostrato con sempre maggiore evidenza come le caratteristiche locali del territorio possano alterare in maniera evidente l'azione sismica.

Gli studi di MS hanno l'obiettivo di razionalizzare la conoscenza di questi fenomeni restituendo informazioni utili per il

governo del territorio, per la progettazione, per la pianificazione per l'emergenza e per la ricostruzione post sisma.

Nella pianificazione territoriale, in funzione delle varie scale e dei vari livelli di intervento, gli studi di MS sono condotti su quelle aree per le quali le previsioni urbanistiche consentono o prevedono l'uso a scopo edificatorio o per infrastrutture, o la loro potenziale trasformazione a tali fini, o prevedono l'uso per finalità di protezione civile.

Gli studi di MS sono di fondamentale importanza nella pianificazione al fine di:

- orientare la scelta di aree per nuovi insediamenti;
- definire gli interventi ammissibili in una data area;
- programmare le indagini e i livelli di approfondimento;
- stabilire orientamenti e modalità di intervento nelle aree urbanizzate;
- definire priorità di intervento.

Nella pianificazione d'emergenza sia di livello comunale che provinciale, gli studi di MS consentono una migliore e consapevole individuazione degli elementi strategici di un piano di emergenza.

La conoscenza dei possibili effetti locali indotti da un evento sismico su un territorio contribuisce a:

- scegliere aree e strutture di emergenza ed edifici strategici in zone stabili;
- individuare i tratti “critici” delle infrastrutture viarie e di servizio e le opere rilevanti, per le quali potrebbero essere necessarie specifiche valutazioni di sicurezza.

Nella fase della ricostruzione la MS:

- contribuisce a scegliere le aree per gli

- insediamenti abitativi ad uso temporaneo e le nuove aree edificabili;
- fornisce elementi a tecnici e amministratori, sull'opportunità di ricostruire gli edifici distrutti o molto danneggiati nello stesso sito o di delocalizzarli;
- contribuisce a scegliere nuove aree edificabili.

Nella progettazione di nuove opere o di interventi su opere esistenti, gli studi di MS evidenziano l'importanza di fenomeni quali le possibili amplificazioni dello scuotimento legate alle caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche dell'area e dei fenomeni di instabilità e deformazione permanente attivati dal sisma. Gli studi di MS, quindi, possono offrire elementi conoscitivi utili per la progettazione di opere, con differente incisività in dipendenza del livello di approfondimento e delle caratteristiche delle opere stesse.

Un mese dopo l'evento sismico del 6 aprile 2009, sulla base degli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (nel volume: ICMS; Gruppo di lavoro MS, 2008), è stata realizzata una MS di livello 1 e 3 per tutti i centri abitati dei Comuni della Provincia dell'Aquila che hanno subito un'intensità macrosismica pari o superiore al VII grado MCS.

L'operazione ha visto il coinvolgimento di circa 150 ricercatori e tecnici di 10 Università italiane, di 8 Istituti di ricerca, di 4 Regioni e 1 Provincia autonoma.

Per ogni area indagata sono stati realizzati elaborati cartografici e numerici. I risultati degli studi di MS sono riassunti per ciascuna area in tre carte:

- una carta di MS di livello 1;
- una carta di MS di livello 3, nella quale ogni zona è caratterizzata da uno spettro elastico di risposta;
- una carta dei periodi fondamentali di vibrazione.

La carta di livello 1 è stata utilizzata, in

una prima fase, per l'identificazione delle aree in cui sono sorti gli insediamenti del Progetto C.A.S.E., i villaggi provvisori dei M.A.P., ed i moduli provvisori per uso scolastico (M.U.S.P.); in una seconda fase, ancora in corso, queste stesse carte sono a disposizione per la pianificazione urbanistica post evento. Dal punto di vista strettamente tecnico, le carte permettono di identificare le aree che, per problematiche geologiche e geotecniche, devono essere assolutamente escluse dalla progettazione di qualsiasi opera antropica.

Le carte di livello 3 e i risultati numerici sono a supporto dei pianificatori e dei progettisti che dovranno occuparsi della ricostruzione degli edifici danneggiati.

L'applicazione così estesa e sistematica degli studi di MS, che ha coinvolto buona parte di coloro che hanno contribuito alla definizione degli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" e che ha potuto fruire di una inconsueta ricchezza di dati, proprio perché a valle di un forte terremoto come quello aquilano, ha costituito un'occasione di verifica dei metodi e dei criteri operativi degli ICMS 2008. L'esperienza sul campo a 360° ha reso evidente allo stesso gruppo di lavoro degli ICMS (2008), e non poteva essere altrimenti, l'opportunità di rivisitare metodi e risultati ottenuti, valutarne i margini di miglioramento e avviare un aggiornamento degli Indirizzi e Criteri.

In sintesi il lavoro di revisione e aggiornamento ha riguardato:

- le procedure per la definizione di una carta geologico-tecnica finalizzata alla microzonazione sismica;
- la ridefinizione del livello 1 di MS e la valutazione del livello di qualità;
- la valutazione degli standard di esecuzione e dell'efficacia in vari contesti geologico-tecnici delle indagini di sismica attiva e passiva (Down Hole, MASW, SASW, ESAC, sismica a rifrazione, ReMi, rumore ambientale);

- l'integrazione delle indagini standard con altri tipi di indagini (es. gravimetria);
- l'utilizzo della MS di livello 3 come strumento discriminante, ai fini della progettazione di singole opere, per l'uso dell'approccio semplificato previsto nella norma o delle analisi specifiche di risposta sismica locale (NTC, 2008).

Nel volume sono sintetizzati i risultati più rilevanti di questo lavoro di revisione e aggiornamento. I contributi sono:

Gli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica": un riferimento per gli studi finalizzati alla caratterizzazione sismica del territorio (Castenetto S.)

Una breve sintesi del documento approvato dalla Conferenza delle Regioni e Province autonome.

La Carta geologico tecnica per gli studi di MS (Martini G., Castenetto S. e Naso G.)

Costituisce un'integrazione di quello che gli ICMS (2008) già riportavano nei capitoli 2.1 e 3.4.

Rilievi gravimetrici per la microzonazione sismica (livello 1) (Di Filippo M., Di Nezza M. e Scarascia Mugnozza G.)

Negli ICMS (2008) i rilievi gravimetrici non erano riportati tra le indagini utili per la definizione delle carte di MS. Si descrive sinteticamente la metodologia utilizzata nell'area aquilana.

Valutazione degli standard di esecuzione e dell'efficacia delle indagini di sismica attiva e passiva (Foti S., Santucci de Magistris F., Silvestri F. e Eva C.)

Si puntualizzano alcuni aspetti tecnici delle prove di sismica attiva e passiva. Completa il capitolo 3.4.3 degli ICMS (2008).

Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola (Albarelo D. e Castellaro S.)

Le vibrazioni ambientali sono costituite da onde che hanno attraversato porzioni significative del sottosuolo, la struttura del segnale registrato in superficie è potenzialmente in grado di fornire informazioni sul mezzo attraversato dalle onde. Completa e integra il cap. 3.1.5 degli ICMS (2008).

Procedura semiquantitativa per stabilire la qualità di una carta di MS di livello 1 (Albarelo D., Castenetto S. e Naso G.)

Si propone una procedura molto semplice che possa fornire alcune indicazioni semiquantitative sulla base del numero e della qualità dei dati raccolti per la redazione della carta di MS di livello 1.

Risposta sismica locale: la MS come strumento discriminante per l'utilizzo di approcci semplificati o di specifiche analisi per la progettazione (Colombi A., Compagnoni M. e Pergalani F.)

I quesiti cui gli autori cercano di fornire una risposta sono: quale livello di approfondimento di MS (livello 2 o 3) permette di discriminare tra l'utilizzo dell'approccio semplificato e delle specifiche analisi? Se si ritiene che il livello 3 della MS possa efficacemente indicare le aree dove è possibile applicare l'approccio semplificato o le specifiche analisi, quali informazioni si possono trasferire a chi deve progettare?

Bibliografia

Gruppo di lavoro MS (2008) - Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica; 3 vol. e 1 DVD.

NTC-08 (2008). Decreto del Ministero delle Infrastrutture del 14 gennaio 2008, Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni.

“Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica”: un riferimento per la caratterizzazione sismica del territorio

Sergio Castenetto

Ufficio Rischio sismico e vulcanico – Dipartimento della Protezione Civile

L'11 novembre 2008, la Conferenza delle Regioni e Province autonome, al termine di un percorso promosso e avviato nel 2006 dal Dipartimento della Protezione Civile, approva gli “Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica” (abbr. ICMS) che, sviluppando le istanze espresse in vario modo dalle Regioni e dagli enti locali, recependo quanto elaborato e sperimentato dalla comunità scientifica, definisce metodi di indagine e criteri di utilizzo dei risultati degli studi di microzonazione sismica (Fig. 1). Dalle prime applicazioni realizzate in Friuli, dopo il terremoto del 6 maggio 1976 e proseguite

in Irpinia, a seguito dell'evento del 23 novembre 1980, la microzonazione sismica è divenuta ormai uno strumento fondamentale di conoscenza del territorio, per una pianificazione corretta e in grado di prevenire le conseguenze dello scuotimento sismico.

Gli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008), frutto di un impegnativo lavoro che ha visto coinvolti oltre 100 tecnici ed esperti coordinati dal Dipartimento della Protezione Civile, descrivono i principi e gli elementi della microzonazione sismica (abbr. MS) e le modalità di utilizzo nella pianificazione territoriale, nella pianificazione di emergenza e nella progettazione delle opere. Vengono inoltre descritte, nelle linee guida allegate, alcune procedure per gli studi di MS, che rappresentano veri e propri strumenti operativi per l'applicazione degli indirizzi e criteri: modalità di predisposizione delle indagini, stesura delle carte, composizione degli abachi per le amplificazioni e le procedure semplificate. Gli ICMS sono dunque un riferimento a livello nazionale per gli studi finalizzati alla caratterizzazione sismica del territorio.

1. Gli studi di microzonazione sismica

Gli studi di MS si propongono di:

– identificare e perimetrare le aree a differente pericolosità sismica locale (mi-



Fig. 1 - Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica; 3 vol. e 1 DVD.

crozone, solitamente grandi alcuni ettari o alcuni isolati);

- stimare le risposte dei terreni delle diverse microzone, in modo da stabilire gerarchie di pericolosità e fornire elementi conoscitivi per una pianificazione del territorio e progettazione delle opere, adeguate alla pericolosità sismica del sito.

I contenuti e la complessità di una indagine di microzonazione sismica dipende dai livelli di approfondimento che si vogliono raggiungere, a cui naturalmente corrispondono risorse diverse, economiche e professionali, da mettere in campo. Da non sottovalutare anche il contesto in cui si opera: in prevenzione o in emergenza, che si riflette sui tempi di realizzazione e sulla scelta delle metodologie. In termini generali, per approfondimenti successivi, gli studi di microzonazione comprendono:

- reperimento e archiviazione dei dati geologici, geofisici, geotecnici pregressi;
- esecuzione di indagini geologiche (rilievamento, sondaggi, prove in situ);
- esecuzione di indagini geofisiche (geoelettrica, sismica, gravimetrica);
- analisi strumentali (dati sismometrici/accelerometrici);
- analisi di laboratorio (prove geotecniche);
- simulazioni numeriche del moto sismico.

2. I livelli di approfondimento

I livelli di possibile approfondimento sono tre.

Livello 1

Il livello 1 di MS è propedeutico ai veri e propri studi di microzonazione e obbligatorio per affrontare i successivi livelli di approfondimento.

Il quadro conoscitivo necessario a realizzare tale livello si basa sulla raccolta dei dati pregressi: rilievi geologici, geomorfo-

logici e geologico-tecnici, sondaggi, indagini geofisiche. La sintesi dei dati e delle cartografie disponibili consente di realizzare i seguenti prodotti:

- carta delle indagini, nella quale sono ubicate e distinte per tipologia tutte le indagini puntuali e lineari disponibili;
- carta geologica tecnica e sezioni, nella quale sono descritte le diverse unità litologiche riconosciute e definiti i rapporti stratigrafici;
- carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (Mops), scala 1:5000-1:10.000;
- relazione illustrativa.

Nella “carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica” o “carta di MS di livello 1” (Fig. 2), troviamo rappresentate:

- Zone stabili, senza effetti di modificazione del moto sismico rispetto ad un terreno rigido ($V_s \geq 800$ m/s) e pianeggiante (pendenza $< 15^\circ$);
- Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali: amplificazioni litostratigrafiche per $V_s < 800$ m/s e spessori > 5 m, amplificazioni topografiche su rilievi in roccia;
- Zone suscettibili di instabilità (instabilità di versante, liquefazioni, faglie attive e capaci, cedimenti differenziali).

I limiti di una MS di livello 1 sono rappresentati dalla possibile presenza di litologie delle quali non è noto lo spessore, elementi tettonici da ricostruire nel loro assetto e geometria, dalla presenza di aree instabili la cui geometria e dinamica risultano incerti. Pertanto, tale livello consente solo di definire qualitativamente le zone omogenee per finalità di pianificazione territoriale e risulta utile ad orientare le indagini di approfondimento previste dai livelli di MS successivi.

Livello 2

Per risolvere le incertezze del livello 1, gli ICMS prevedono un livello 2 di approfondimento che, attraverso l'esecuzione di

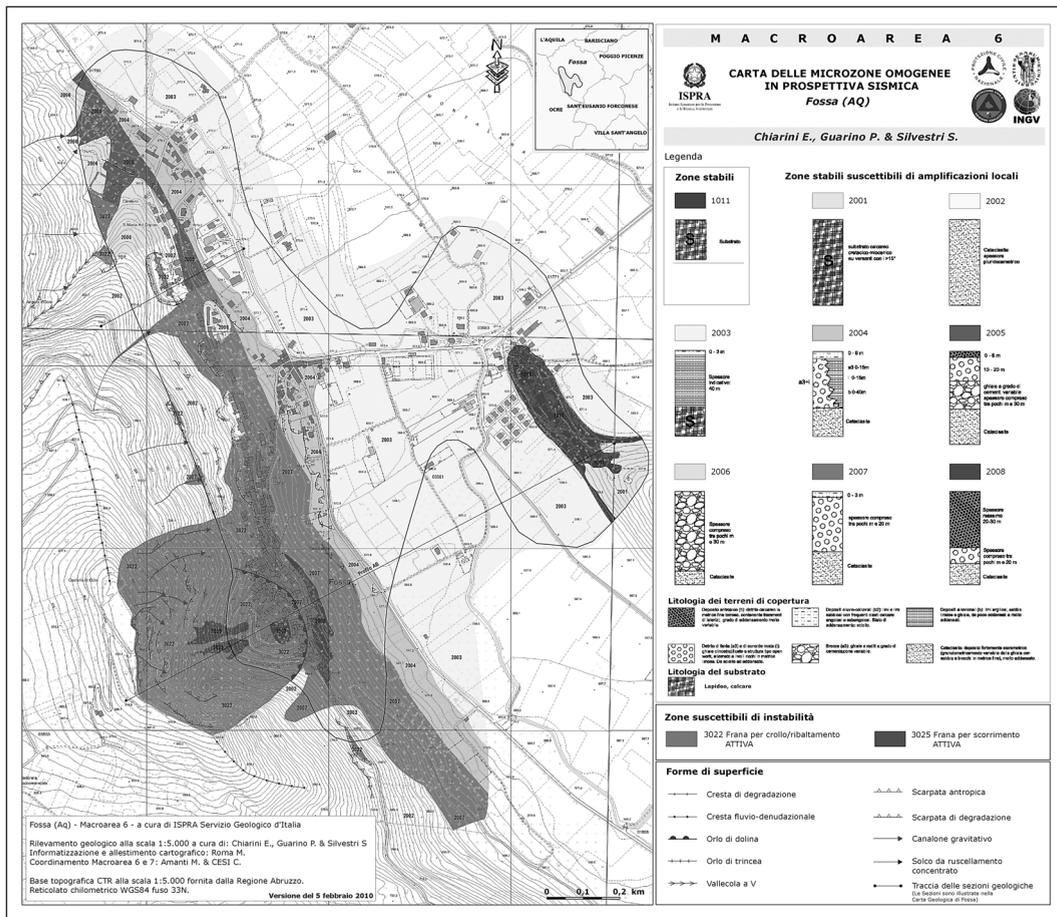


Fig 2 – Fossa (AQ), Carta di livello 1 (Gruppo di lavoro MS-AQ, 2010).

indagini economiche e poco invasive, consente di meglio definire il modello geologico del sottosuolo e di fornire per ciascuna microzona identificata una quantificazione numerica degli effetti, ottenuta con metodi semplificati.

Le indagini sono fondamentalmente indagini di tipo geofisico, quali la sismica a rifrazione, le analisi strumentali con tecniche attive e passive per la stima delle V_s , misurando microtremiti ed eventi sismici. Quando possibile, in funzione delle risorse a disposizione, possono essere eseguite prove geofisiche in foro (Down Hole, Cross Hole).

Attraverso correlazioni e confronti con

i risultati del livello 1, si giunge ad una revisione del modello geologico, e alla realizzazione di una carta di MS nella quale le zone a comportamento omogeneo sono caratterizzate anche da un parametro numerico descrittivo degli effetti attesi (fattore di amplificazione), ottenuto con metodi semplificati. Si distinguono, dunque:

- zone stabili;
- zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, caratterizzate da fattori di amplificazione relativi a due periodi dello scuotimento (FA ed FV);
- zone di deformazione permanente, caratterizzate da parametri quantitativi

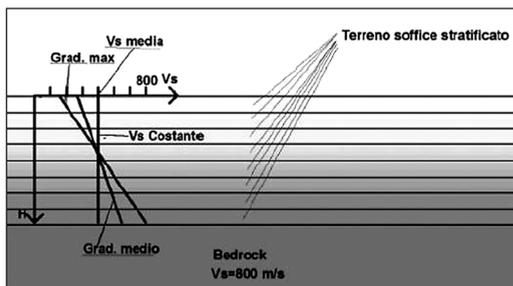


Fig. 3 – Modello ideale di sottosuolo per metodi semplificati.

(spostamenti e aree accumulo per frana, calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione).

I parametri FA ed FV rappresentano il rapporto tra gli spettri di input e di output, rispettivamente in accelerazione e in pseudo velocità, calcolati in un intervallo intorno ai periodi TA e TV dove l'ampiezza è massima. L'intervallo di periodi considerato per FA varia tra 0,1 e 0,3 s (alte frequenze), mentre per gli FV l'intervallo varia tra 0,6 e 1,4 s (basse frequenze).

Gli abachi che consentono di definire il

parametro di amplificazione del moto sismico da attribuire a ciascuna Mops sono costruiti per un modello ideale di sottosuolo (Fig. 3), costituito da terreni omogenei a strati orizzontali, piani e paralleli, di estensione infinita e V_s costante, su un bedrock sismico ($V_s = 800$ m/s).

Le tabelle degli abachi contenute negli ICMS (Fig. 4), costruiti adottando delle semplificazioni che li rendano applicabili all'intero territorio nazionale, sono ordinate per:

- litotipo (ghiaia, sabbia, argilla);
- tipo di profilo di V_s (costante, gradiente max, gradiente intermedio).

Per trovare il valore di FA o FV devo conoscere:

- a_g , accelerazione dell'evento di riferimento. Gli abachi considerano tre livelli di pericolosità, basso, medio ed elevato (0,06-0,18-0,26 g);
- litotipo prevalente della copertura;
- spessore stimato della copertura;
- V_s media della copertura.

Fattore di amplificazione FA	Tipo di terreno Argilla									
	Lineare pendenza intermedia									
H	a _g (g) 0.06g									
	V _s (m/s)									
	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	2.35	1.84	1.70	1.49	1.29	1.16	1.08	1.04	1.02	1.00
10	2.69	2.41	2.05	1.73	1.51	1.35	1.23	1.17	1.06	1.02
15	2.35	2.41	2.23	1.96	1.72	1.54	1.39	1.28	1.12	1.04
20	2.00	2.19	2.15	2.03	1.82	1.63	1.48	1.34	1.17	1.06
25	1.98	1.97	2.04	1.94	1.81	1.67	1.53	1.40	1.21	1.08
30	1.94	1.98	1.91	1.87	1.75	1.64	1.52	1.42	1.23	1.09
35	1.86	1.92	1.91	1.77	1.69	1.58	1.48	1.38	1.23	1.09
40	1.77	1.89	1.90	1.78	1.62	1.54	1.45	1.34	1.21	1.08
50	1.70	1.79	1.82	1.75	1.62	1.50	1.39	1.31	1.19	1.07
60	1.58	1.71	1.74	1.69	1.59	1.49	1.39	1.30	1.15	1.05
70	1.55	1.69	1.73	1.64	1.56	1.46	1.38	1.30	1.15	1.04
80	1.40	1.57	1.70	1.58	1.50	1.43	1.35	1.29	1.15	1.04
90	1.37	1.58	1.63	1.63	1.49	1.39	1.33	1.26	1.15	1.03
100	1.29	1.52	1.55	1.57	1.50	1.38	1.29	1.24	1.14	1.03
110	1.23	1.44	1.56	1.52	1.47	1.38	1.29	1.21	1.11	1.02
120	1.17	1.40	1.52	1.48	1.44	1.36	1.29	1.22	1.10	1.02
130	1.09	1.35	1.47	1.48	1.39	1.34	1.28	1.21	1.09	1.00
140	1.06	1.30	1.41	1.45	1.37	1.32	1.25	1.20	1.09	0.99
150	1.00	1.26	1.40	1.42	1.38	1.28	1.24	1.18	1.09	0.99

Fig. 4 – Esempio di tabella degli abachi in FA.

In assenza di dati di V_s sperimentali, la V_s può essere determinata a partire dalle frequenze proprie F_0 ottenute con analisi strumentali (microtremori), sulla base della relazione $T_0=4H/V_s$.

Il valore di amplificazione che si ottiene con gli abachi non è affidabile nel caso di:

- amplificazioni topografiche;
- forme sepolte (amplificazioni 2D);
- inversioni di velocità (rigido su soffre);
- presenza di instabilità.

Affinché tale strumento risulti più efficace e aderente ai diversi contesti fisici del territorio, è utile che gli abachi per il livello 2 di MS siano predisposti dalle Regioni a partire da:

- input sismici definiti attraverso studi regionali di pericolosità di base;
- modelli litologici coerenti con l'assetto geologico regionale;
- curve di decadimento della rigidezza (G) e di incremento dello smorzamento (D) con la deformazione, per ciascun litotipo, definite da analisi di laboratorio;
- profili di V_s misurati attraverso indagini mirate.

In alternativa e in attesa della loro definizione possono essere utilizzati gli abachi di ICMS validi, come già detto, per l'intero territorio nazionale.

Di recente, la Regione Lazio (DGR 545/2010) ha approvato le linee guida regionali per gli studi di MS.

Livello 3

Il livello 3 è il livello di maggiore approfondimento per la definizione e caratterizzazione delle zone suscettibili di amplificazioni o di instabilità, perché consente di risolvere le situazioni geologiche e geotecniche complesse, ad esempio inversioni di velocità, non risolvibili con abachi o metodi semplificati, modificando sostanzialmente le carte di microzonazione di livello 1 e 2.

Il livello 3, naturalmente richiede un

impegno di risorse economiche e professionali importante, giustificato, ad esempio, nel caso di una fase di ricostruzione post-terremoto ma anche, in fase preventiva, nelle aree a più elevato rischio sismico.

Per raggiungere gli obiettivi del livello 3 occorre:

- un modello del sottosuolo affidabile;
- un evento di riferimento per le simulazioni numeriche;
- simulazioni numeriche per ottenere i parametri di amplificazione.

Il *modello del sottosuolo*, ossia la rappresentazione 3D con elementi quantitativi e qualitativi del sottosuolo, definisce le geometrie delle unità omogenee, l'assetto strutturale, le proprietà fisico meccaniche, la presenza della falda acquifera, il limite tra copertura e bedrock sismico.

Il modello si costruisce attraverso indagini geologiche, geofisiche e geotecniche, che consentono di identificare le unità omogenee, attribuendo loro parametri geotecnici e geofisici.

Le indagini consistono in campagne di acquisizione di dati sismometrici, sondaggi, prove in foro e in superficie per la determinazione di profili di V_s , sismica a rifrazione, prove geotecniche in situ e in laboratorio, analisi di microtremori.

L'*evento di riferimento*, il cui moto dipende dal meccanismo di sorgente, dalla magnitudo e dalle caratteristiche fisico meccaniche del mezzo attraversato (sorgente-sito), può essere quello di normativa (derivante dalla pericolosità di base) o scelto su base deterministica qualora siano disponibili i dati. In questo caso, il moto (accelerogramma o spettro di risposta) andrà riferito, come previsto dalla normativa, a condizioni di suolo rigido affiorante, in assenza di effetti topografici e riportato alla base della copertura.

Il modello del sottosuolo e l'input sismico sono gli ingredienti necessari allo sviluppo della *analisi numeriche* che consentono

di simulare il processo di propagazione delle onde attraverso il substrato e la copertura fino in superficie. Per fare questo si utilizzano codici di calcolo 1D, 2D e 3D (es. ProShake, BeSoil, Quad), lineari o non lineari, che tengono cioè conto delle defor-

mazioni permanenti delle rocce, scelti in funzione del sito da analizzare e delle conoscenze disponibili. Risultato delle analisi sono i valori del parametro scelto per definire la modificazione del moto sismico, in termini di amplificazione e spettro di rispo-

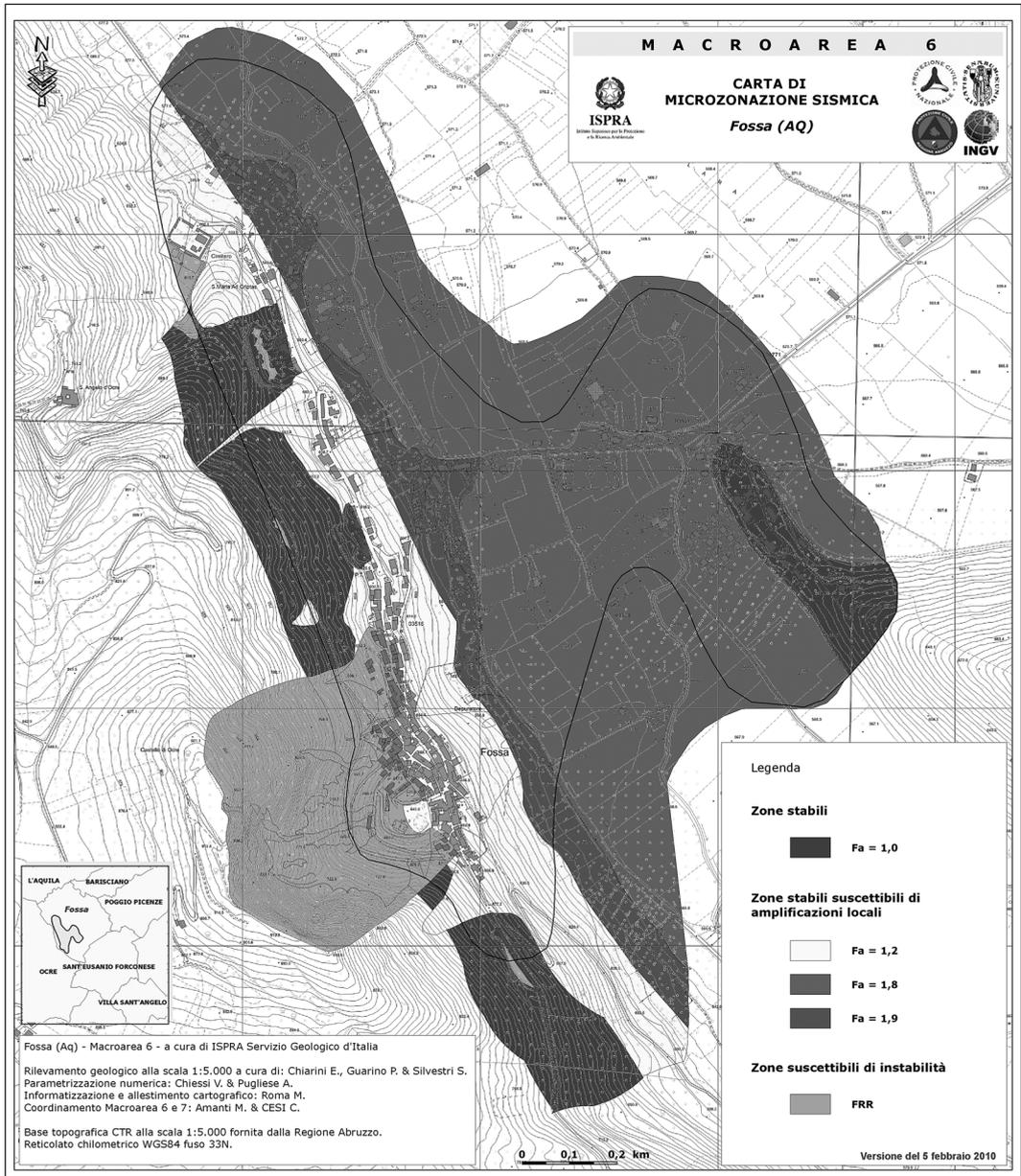


Fig. 5 – Fossa (AQ), carta di MS di livello 3 (Gruppo di Lavoro MS-AQ, 2010).

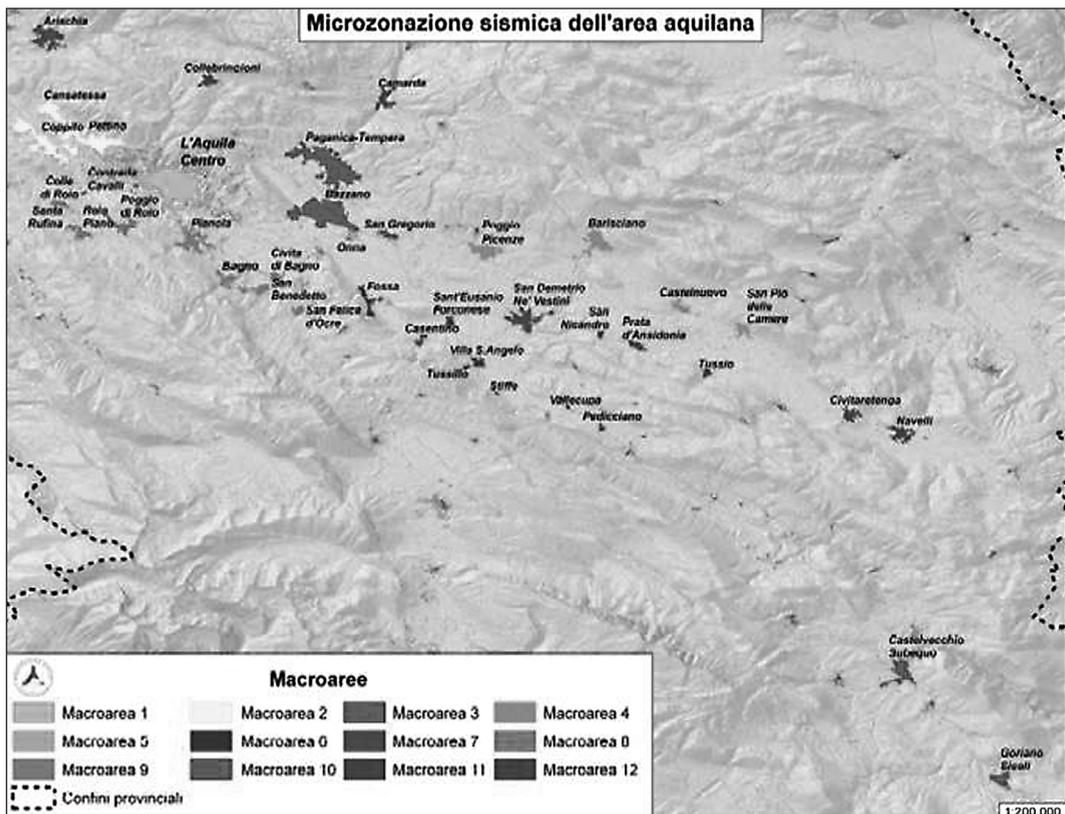


Fig. 6 – Le località oggetto della microzonazione sismica aquilana (Gruppo di Lavoro MS-AQ, 2010).

sta, associati a ciascuna microzona in cui è stato suddiviso il territorio.

Le elaborazioni descritte consentono di giungere alla realizzazione di una carta di microzonazione sismica di livello 3, che comprende (Fig. 5):

- Zone di deformazione permanente;
- Zone stabili suscettibili di amplificazione caratterizzate in funzione di un parametro di amplificazione da analisi numeriche (intervalli o valore medio di FA e FV);
- Zone stabili.

3. L'esperienza aquilana

Il Dipartimento della Protezione Civile e la Conferenza delle Regioni e Province autonome avevano previsto una fase di

sperimentazione e applicazione dei metodi e criteri approvati con gli ICMS. A meno di 6 mesi dall'approvazione, mentre si stava definendo la procedura per un concreto avvio della sperimentazione, il terremoto di L'Aquila del 6 aprile 2009 ha rappresentato il banco di prova dove, con grande impegno, il GdL si è confrontato giungendo a risultati importanti per la ricostruzione dell'area aquilana.

Un mese dopo l'evento sismico del 6 aprile 2009, basandosi sugli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica, si è realizzata una MS di livello 1 e 3, per tutti i centri abitati dei Comuni della Provincia dell'Aquila che hanno subito un'intensità macrosismica di almeno VII MCS (Fig. 6). I risultati dello studio sono stati resi disponibili nel mese di febbraio 2010, pubbli-

cando sul sito web del Dipartimento della Protezione Civile le carte delle indagini, le carte geologico tecniche, le carte di MS di livello 1 e di livello 3 per tutte le località investigate. I 3 volumi “Microzonazione sismica per la ricostruzione dell’area aquilana” (Gruppo di Lavoro MS-AQ 2010), curati dal DPC e stampati dalla Regione Abruzzo, contengono i contributi delle diverse unità operative che hanno operato nelle 12 macroaree in cui è stato suddiviso il territorio aquilano. Nel DVD allegato ai volumi sono consultabili i dati di base, le re-

lazioni di indagine, le stratigrafie dei sondaggi, le analisi numeriche e le diverse cartografie predisposte dal gruppo di lavoro.

Bibliografia

Gruppo di lavoro MS; 2008. Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica, 3 vol. e DVD.

Gruppo di lavoro MS-AQ, 2010. Microzonazione sismica per la ricostruzione dell’area aquilana, 3 vol. e DVD.

La carta geologico tecnica per gli studi di MS

Guido Martini*, Sergio Castenetto**, Giuseppe Naso**

* UTAPRAD-MNF, ENEA C.R. Frascati

** Ufficio Rischio sismico e vulcanico - Dipartimento della Protezione Civile

1. Introduzione

La criticità emersa nell'applicazione degli ICMS (2008), relativa all'assenza tra gli elaborati per la realizzazione delle carte di livello 1 delle carte geologico tecniche, viene superata prevedendo la realizzazione di una *Carta geologico tecnica per gli studi di MS*, nella quale sono riportate tutte le informazioni di base (geologia, geomorfologia, caratteristiche litotecniche, geotecniche ed idrogeologiche) necessarie alla definizione del modello di sottosuolo e funzionale alla realizzazione della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (carta di MS di livello 1).

La carta dovrà riunire tutte le informazioni a disposizione del soggetto realizzatore degli studi di MS, riferibili a indagini pregresse e rilievi di campagna e, nell'eventualità fossero necessarie, indagini di nuova esecuzione.

La scala finale di rappresentazione non dovrà essere inferiore a 1:10.000-1:5.000.

Nell'ottica di una gestione e analisi delle informazioni mediante sistemi informativi geografici, gli elementi da riportare sulla carta sono distinti in:

- AREALI
- LINEARI
- PUNTUALI

In funzione delle informazioni rappresentate, sono previste due legende:

- legenda geologico-litotecnica e idrogeologica;
- legenda geomorfologica.

Le indicazioni di seguito riportate vanno a integrare quanto riportato in ICMS

(2008) che resta il documento fondamentale di riferimento.

2. Legenda geologico-litotecnica e idrogeologica

Il campo descrittore dovrà contenere gli elementi litologici, stratigrafici, tessiturali e fisico-meccanici, utili alla corretta definizione delle unità litologico tecniche affioranti; inoltre è essenziale evidenziare le caratteristiche fisico-meccaniche delle unità, per questo, accanto a ogni unità litologico-tecnica, sarebbe importante riportare lo spessore medio più rappresentativo dell'unità (tenendo naturalmente conto anche degli spessori minimi e massimi dedotti dalle indagini) e laddove possibile, i valori indicativi delle V_s , ricavate dall'interpretazione dei dati raccolti con diversi tipi di indagini o tratte da bibliografia. (Tab. 1)

3. Descrizione delle unità geologico-litotecniche

Le unità andranno distinte tra copertura e substrato e diversamente descritte, giungendo ad una standardizzazione delle informazioni relative agli aspetti geologici e litotecnici.

Per le coperture, lo spessore minimo da considerare resta >3 m. Nel caso della presenza di aree con copertura inferiore a 3 m in contatto con substrato rigido, queste dovranno essere segnalate nella relazione che accompagna la carta.

Tab. 1 – Elementi areali, lineari e puntuali per la redazione della Carta geologico tecnica per gli studi di MS.

Elementi AREALI	Elementi LINEARI	Elementi PUNTUALI
<p>GEOLOGICO-LITOTECNICI Perimetrazione delle aree di affioramento delle unità litotecniche riconosciute con poligoni a differente colorazione. Ad ogni unità andrà assegnata una sigla da riportare in carta. Per sottolineare la necessità di una sintesi da parte del soggetto realizzatore, sarebbe opportuno richiedere il <i>ranking</i> delle unità in ordine di profondità e la successiva numerazione sarà crescente con la profondità. Per gli elementi litoidi, retino sovrapposto, riferito al grado di fatturazione, differenziato in:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $J_v < 10$ • $11 < J_v < 20$ • $21 < J_v < 30$ • $J_v > 30$ o cataclasite <p>IDROGEOLOGICI Perimetrazione con poligono a retino da sovrapporre alla litologia per indicare le aree con falda freatica/artesiana a profondità < 15m</p>	<p>TETTONICO-STRUTTURALI Elementi grafici (a tratteggio se presunte) per:</p> <ul style="list-style-type: none"> • faglie non attive <ol style="list-style-type: none"> a) dirette b) inverse c) trascorrenti/oblique • faglie attive (definite secondo i criteri di IMCS, 2008) <ol style="list-style-type: none"> a) dirette b) inverse c) trascorrenti/oblique • assi di pieghe (a tratteggio se presunte) <ol style="list-style-type: none"> a) sinclinali b) anticlinali <p>GEOMETRIA SUBSTRATO RIGIDO</p> <ul style="list-style-type: none"> • isobate substrato rigido sepolto <p>Tracce della/e sezione/i geologiche rappresentative del modello del sottosuolo.</p>	<p>GEOLOGICI Elementi grafici per:</p> <ul style="list-style-type: none"> • giaciture strati • immersione ed inclinazione piani di faglia <p>GEOMECCANICI Elementi grafici per:</p> <ul style="list-style-type: none"> • punti di misura e valore J_v <p>GEOFISICI: FREQUENZE FONDAMENTALI Elementi grafici per:</p> <ul style="list-style-type: none"> • punti di misura e valore F_0, distinti se da rumore ambientale o <i>weak-motion</i> <p>SONDAGGI E POZZI</p> <ul style="list-style-type: none"> • sondaggi che raggiungono il substrato e profondità raggiunta • pozzi che raggiungono il substrato e profondità raggiunta • pozzi che intercettano la falda e profondità raggiunta • sondaggi che NON raggiungono il substrato e profondità raggiunta • pozzi che NON raggiungono il substrato e profondità raggiunta

In ogni caso, per una corretta lettura delle informazioni geologiche, sarà necessario allegare alla *Carta geologico tecnica per gli studi di MS* gli schemi dei rapporti stratigrafici più significativi per l'area studiata ed almeno due sezioni geologiche che saranno di base alla realizzazione della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica e che potranno eventualmente essere sottoposte a modellazione numerica.

Infine, sia le unità del substrato, sia le coperture saranno caratterizzate da valori

indicativi dei parametri geofisici e geotecnici, qualora disponibili.

a) Terreni di copertura

Suddivisione dei litotipi in classi predefinite (compatibilmente con la possibilità di definire e caratterizzare un numero non troppo esteso di classi, sufficiente per essere rappresentativo dei depositi presenti in ambito nazionale), tali da poter identificare situazioni litostratigrafiche potenzialmente suscettibili di amplificazione locale o di instabilità.

Le classi sono:

1. *riporto antropico*, con l'indicazione della matrice e dello spessore indicativo;
2. *ghiaia*, con l'indicazione dello stato di cementazione/addensamento e degli spessori minimi e massimi supposti;
3. *ghiaia/sabbiosa-sabbia/ghiaiosa*, con l'indicazione dello stato di cementazione/addensamento e degli spessori minimi e massimi supposti;
4. *sabbia*, con l'indicazione dello stato di cementazione/addensamento e degli spessori minimi e massimi supposti;
5. *sabbia/limosa-limo/sabbioso*, con l'indicazione dello stato di cementazione/addensamento/consistenza e degli spessori minimi e massimi supposti;
6. *limo*, con l'indicazione della consistenza e degli spessori minimi e massimi supposti;
7. *limo/argilloso-argilla/limosa*, con l'indicazione della consistenza e degli spessori minimi e massimi supposti;
8. *argilla*, con l'indicazione della consistenza e degli spessori minimi e massimi supposti;
9. *deposito alluvionale* a granulometria mista o indistinta con l'indicazione dello stato di cementazione/addensamento/consistenza e degli spessori minimi e massimi supposti;
10. *detrimento di versante* a granulometria mista o indistinta con l'indicazione dello stato di cementazione/addensamento/consistenza e degli spessori minimi e massimi supposti;
11. *coltre di substrato* alterato o intensamente fratturato con l'indicazione del grado di fratturazione e degli spessori minimi e massimi supposti;
13. *altri tipi di terreni* non compresi in questo elenco, con l'indicazione del tipo e degli spessori minimi e massimi supposti.

Per una valutazione speditiva (di campagna) del grado di addensamento / consistenza delle classi di coperture, si può far riferimento alle "prove manuali" descritte di seguito (Tab. 2-3):

Tab. 2 – Stato di addensamento.

Descrizione	Prove manuali
Addensato	Non è sufficiente la pala per scavarlo
Moderatamente addensato	Può essere scavato con la pala con molta difficoltà
Poco addensato	Può essere scavato con la pala con difficoltà
Sciolto	Può essere scavato con la pala

Tab. 3 – Stato di consistenza.

Descrizione	Prove manuali
Coesivo estremamente consistente	Può essere scalfito con difficoltà con l'unghia del pollice
Coesivo molto consistente	Può essere scalfito con l'unghia del pollice. Non può essere modellato con le dita
Coesivo consistente	Non può essere modellato con le dita
Coesivo moderatamente consistente	Può essere modellato solo con forte pressione delle dita
Coesivo poco consistente	Può essere facilmente modellato con le dita
Coesivo privo di consistenza	Cede acqua se compresso con le dita

Tab. 4 – Elementi areali, lineari e puntuali per la redazione della Carta geologica tecnica per gli studi di MS.

Elementi AREALI	Elementi LINEARI	Elementi PUNTUALI
<p>FORME DI SUPERFICIE</p> <p>INSTABILITA' VERSANTE</p> <p>Perimetrazione dell'area di frana con poligono a differente colorazione (che si sovrappone al poligono della litologia) secondo l'attività:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) attiva b) quiescente c) inattiva d) non definita <p>Retino sovrapposto per:</p> <ul style="list-style-type: none"> • crollo o ribaltamento • scorrimento • colata • frana complessa • non definita <p>ALTRI ELEMENTI</p> <p>Retini sovrapposti al poligono della litologia per:</p> <ul style="list-style-type: none"> • conoide alluvionale • falda detritica <p>FORME SEPOLTE</p> <p>Retino sovrapposto al poligono della litologia per:</p> <ul style="list-style-type: none"> • area con cavità (o area con notizie di sprofondamenti avvenuti nel passato) <p>ALTRE FORME</p> <ul style="list-style-type: none"> • elementi antropici • forme carsiche • forme glaciali • superfici di erosione • ... 	<p>FORME DI SUPERFICIE</p> <p>Elementi grafici lineari per:</p> <ul style="list-style-type: none"> • orlo scarpata morfologica <ul style="list-style-type: none"> a) 10-20 m b) > 20 m • orlo terrazzo fluviale <ul style="list-style-type: none"> a) 10-20 m b) > 20 m • cresta <p>FORME SEPOLTE</p> <ul style="list-style-type: none"> • scarpata sepolta • valle sepolta stretta ($C \geq 0.25$) • valle sepolta larga ($C < 0.25$) <p>$C = H/L/2$ con H profondità della valle e L_s semilarghezza della stessa</p> <p>ALTRE FORME</p> <ul style="list-style-type: none"> • elementi antropici • forme carsiche • forme glaciali • ... 	<p>FORME DI SUPERFICIE</p> <p>Elementi grafici puntuali per:</p> <ul style="list-style-type: none"> • picco isolato <p>FORME SEPOLTE</p> <ul style="list-style-type: none"> • cavità isolata <p>ALTRE FORME</p> <ul style="list-style-type: none"> • elementi antropici • forme carsiche • forme glaciali • ...

b) *Substrato rigido*

- tipologia del substrato: lapideo, granulare cementato, coesivo sovraconsolidato, alternanza di litotipi (es. depositi flyschoidi) (differenza evidenziata con retini);
- indicazione della stratificazione, se esistente (es. stratificato, non stratificato);
- grado di fratturazione; differenza in base a parametro J_v .

4. Legenda geomorfologica

Contiene gli elementi utili per l'identificazione di: zone suscettibili di instabilità del versante; forme di superficie suscettibili di amplificazione morfologica; forme/ elementi sepolti suscettibili di effetti 2D o di cedimenti differenziali. (Tab. 4).

Rilievi gravimetrici per la microzonazione sismica (livello 1)

Michele Di Filippo, Maria Di Nezza, Gabriele Scarascia Mugnozza

Dipartimento di Scienze della Terra, Università "Sapienza" di Roma

1. Introduzione

Nell'ambito del progetto di microzonazione sismica dell'area aquilana è emersa la necessità di utilizzare la gravimetria in situazioni geologiche complesse e laddove il modello geologico del sottosuolo dell'area non è ben determinato e, soprattutto, per definire la profondità e la geometria del substrato geologico sepolto. Si ricorda che questo tipo di indagini non è previsto dagli ICMS (2008).

L'obiettivo dello studio gravimetrico è di restituire una carta delle isobate del substrato geologico. Infatti, la prospezione gravimetrica consente, attraverso misure effettuate sulla superficie terrestre, di osservare e interpretare anomalie di gravità prodotte da contrasti laterali di densità, non noti, tra masse sepolte e di definire le profondità e gli spessori delle rocce presenti nel sottosuolo.

Attualmente esiste una buona distribuzione delle stazioni gravimetriche sul territorio italiano, con una densità media di 1 stazione per km² (il database delle stazioni gravimetriche esistente in Italia è gestito dall'ISPRA, Dipartimento Difesa del Suolo, Servizio Geofisica). Tuttavia la densità media delle stazioni gravimetriche distribuite sul territorio è rivolta all'individuazione di strutture geologiche a carattere regionale e, per questo, risulta inadeguata al fine di dettagliare distribuzioni di masse e strutture geologiche sepolte poste a modesta profondità e di dimensioni più limitate.

Per offrire un panorama più dettagliato dell'assetto geologico-strutturale alla scala

delle aree (microzone) a medesimo comportamento sismico, sono stati eseguiti rilievi gravimetrici con una densità maggiore di stazioni per km², come per la Conca di Sulmona (Di Filippo & Miccadei, 1997), la Media Valle del Fiume Aterno (Cesi et al., 2010) e le aree aquilane (Di Filippo & Di Nezza, 2010a,b,c). La densità media dei punti di stazione è stata, per queste prospezioni, da 5 a 10 misure di gravità per km² con una distanza delle stazioni tra 150 e 500 metri, quanto più omogeneamente distribuite nel territorio, in funzione dell'area da rilevare e soprattutto delle dimensioni delle strutture geologiche.

2. Il rilievo gravimetrico

Il metodo gravimetrico risulta attualmente, tra i metodi geofisici, il più speditivo ed idoneo per ottenere informazioni areali indirette sulla geologia del sottosuolo e individuare l'assetto strutturale caratteristico di zone ad elevato interesse sismico.

Il dettaglio e la profondità d'indagine sono funzione della distribuzione delle stazioni gravimetriche misurate nonché delle dimensioni delle strutture geologiche da indagare.

Un ottimo rilievo consente di fornire adeguate informazioni di base, nell'ambito di uno studio di MS di livello 1, sulla distribuzione in profondità dei diversi corpi geologici, le cui densità possono incidere notevolmente sulle diverse risposte sismiche locali e consente di realizzare una carta batimetrica del substrato geologico

più denso e rigido. Ma soprattutto rende possibile determinare - e quindi mettere in evidenza - le morfologie sepolte mascherate dagli spessori dei terreni recenti sovrastanti. L'individuazione di discontinuità gravimetriche sepolte e non direttamente osservabili in superficie permette, inoltre, di pianificare e ottimizzare eventuali campagne di misura geofisiche mirate alla definizione dei livelli 2 e 3 di microzonazione sismica.

La gravimetria può anche integrare e fornire un ottimo supporto per risolvere i modelli geologici di sottosuolo lungo sezioni tipo prese a riferimento per le simulazioni numeriche, sia monodimensionali (1D) che bidimensionali (2D), ai fini della valutazione dei fattori di amplificazione sismica.

Nel livello 3 di MS, in base ai valori ottenuti dalle misure gravimetriche eseguite per la realizzazione della MS di livello 1 e da quelle sismometriche (livello 2 di MS), possono essere derivati i valori di velocità delle onde S (V_{s_eq}) riferibili all'intera colonna di depositi recenti sovrapposti al substrato geologico rigido (*bedrock*).

I valori delle V_{s_eq} si ottengono mediante una correlazione empirica tra i valori di profondità del tetto del substrato geologico, risultanti dalla indagini gravimetriche e le frequenze di risonanza corrispondenti al primo picco HVSR, ottenuti con le misure di rumore sismico (cfr § 8.5.3 & 8.5.4 MS5-Roio).

Questa correlazione ha il vantaggio di ottenere una carta delle isocinetiche costruita sulla base di due tipologie di indagini geofisica del tutto indipendenti (livello 3 di MS).

Qualora dovessero emergere delle aree di particolare complessità e con carenza di informazioni geologiche dirette nonché la impossibilità di utilizzare altri metodi geofisici previsti dagli ICMS, non sarebbe da escludere per la MS di livello 3 la possibilità di eseguire una prospezione microgravimetrica.

3. Elaborazioni numeriche

Sebbene il metodo gravimetrico sia un metodo geofisico impiegato nella ricerca di base, grande importanza dovrebbe essere data alla elaborazione dei dati acquisiti, che non deve mai esulare dall'integrazione e sostegno dei dati geologici di superficie e dei dati geologici diretti del sottosuolo, quando disponibili.

La carta delle Anomalie di Bouguer è il primo prodotto oggettivo che si ottiene. Tali anomalie però rappresentano una somma degli effetti gravimetrici dovuti a carenze o eccessi di massa poste a profondità comprese tra il piano campagna ed il baricentro della Terra; esse sono fortemente influenzate, sia come andamento che come entità, da motivi geologici strutturali profondi, che fanno da motivo caratterizzante nel quadro delle Anomalie di Bouguer. Pertanto, la carta gravimetrica delle Anomalie di Bouguer risultante è il prodotto della sovrapposizione di anomalie di diversa origine ed entità: una qualsiasi sorgente (potenziale) contribuirà al campo potenziale, per cui, una distribuzione complessa di sorgenti all'interno della Terra, darà luogo ad un campo (potenziale) che, per scopi interpretativi, deve essere scomposto nelle sue componenti: regionale e locale.

Il campo regionale è costituito da isoanomale che evidenziano un trend regolare su un'area molto estesa: questa anomalia, a bassa frequenza spaziale o grande lunghezza d'onda, è causata da eterogeneità profonde, in rapporto alla scala del problema. Sovrapposte o mascherate da questo campo possono sussistere anomalie, ad alta frequenza o piccola lunghezza d'onda, paragonabili a distorsioni del campo regionale, che sono caratterizzate da una irregolarità spaziale e da una maggiore curvatura delle isoanomale: esse sono determinate da masse "locali", sempre in rapporto alla scala del problema, d'interesse per scopi di prospezione. Queste anomalie definiscono il campo locale o residuo, che sono di particolare interesse ai fini della microzonazione sismica.

La separazione delle cause che le Anomalie di Bouguer concorrono a dare esige, quindi, l'uso di adeguate tecniche di filtraggio, e non esistendo un criterio univoco per separare le anomalie, è indicativo l'utilizzo di metodi quali: la residuazione polinomiale di vario ordine (Carte delle Anomalie Residue di ordine $n-1$), il metodo di Griffin (1949) (Carte delle Anomalie Residue di ordine $n-2$) per diverse profondità, il gradiente orizzontale (quest'ultimo permette di evidenziare le discontinuità gravimetriche), che permettono di delineare un quadro geologico-strutturale caratterizzato da estrema eterogeneità, in termini geometrici, spaziali e di densità, delle formazioni presenti nella porzione poco profonda dell'area.

Il processo di separazione delle anomalie fornisce gli elementi più idonei per una prima accurata interpretazione qualitativa, rappresentata dalle mappe delle Anomalie Residue di vario ordine, a partire dalle quali sarà poi possibile giungere all'esatta quantificazione dei parametri fisici e geometrici delle sorgenti gravimetriche sepolte.

Successivamente, sulla base delle anomalie residue, ottenute con il filtraggio più appropriato, si possono realizzare modelli geo-gravimetrici bidimensionali che, invece, permettono di determinare la geometria e la struttura dei corpi geologici con diversa densità presenti nel sottosuolo e ottenere così un'interpretazione quantitativa delle anomalie gravimetriche. I modelli considerati potranno anche essere utilizzati successivamente per la modellazione numerica della risposta sismica locale.

Per ottenere dei modelli geo-gravimetrici bidimensionali del sottosuolo, si può optare per una delle due soluzioni seguenti o per entrambe:

1) Applicazione di un metodo fisico-matematico basato sul modello dei prismi indefiniti, con forma qualunque della base del poligono e secondo una direzione normale (asse y) alla sezione del profilo ($x-z$), attribuendo diversi contrasti di den-

sità a dei poligoni, riconducibili alle diverse tipologie delle rocce nel sottosuolo e considerando, soprattutto, il miglior *fit* tra dati osservati (anomalie residue) e dati sperimentali (anomalie calcolate) lungo la sezione in esame (Talwani et al., 1959). Il procedimento è molto valido per illustrare un campo di anomalie definito da entità geologico-strutturali, poiché i prismi si prestano molto bene alla rappresentazione di strutture geologiche assimilabili a corpi allungati (*Horst, Graben*, sovrascorrimenti, anticlinali, sinclinali, strutture "*flat-ramp-flat*", ecc.), con una dimensione quindi maggiore (asse y) rispetto alle altre due.

2) Estrazione dei modelli geo-gravimetrici dal modello geologico-strutturale tridimensionale, lungo le sezioni in esame.

Ottenuto il modello bidimensionale, successivamente deve essere elaborato un modello gravimetrico tridimensionale corrispondente a un modello geologico-strutturale che permetta di definire, oltre ad una stima delle profondità, i rapporti reciproci tra le unità geo-gravimetriche identificate. Le ipotesi avanzate, dove possibile, devono essere verificate con dati geologici di superficie di dettaglio (livello 1 di MS), con i dati dei sondaggi (livello 1 di MS), qualora presenti, o con altre informazioni, dirette o indirette, disponibili.

Per l'elaborazione del modello gravimetrico tridimensionale può essere utilizzato un programma di calcolo (ad esempio il *3dGRVT* sviluppato dal Dipartimento di Scienze della Terra, Università "Sapienza" di Roma, Di Filippo & Di Nezza), che permette di ottenere l'anomalia gravimetrica prodotta da una serie di corpi tridimensionali limitati da una data geometria e densità media.

Trovandoci nella situazione di dover analizzare corpi e strutture geologiche di forme irregolari e variabili nello spazio, sarebbe opportuno utilizzare l'algoritmo di Coggon (1976) relativo al calcolo dell'anomalia di

gravità dato da poliedri regolari. L'algoritmo di Coggon permette di calcolare, sulla base dei dati delle batimetrie ipotizzate, della superficie topografica e dei contrasti di densità relativi ai vari corpi, l'anomalia sintetica in ognuna delle stazioni di osservazione gravimetrica nell'area in esame. Il volume di ogni corpo geologico di cui è composto il modello viene suddiviso in una serie di prismi uguali, a pianta quadrata, limitato da due superfici al tetto (superficie topografica) ed alla base (substrato geologico, in questo caso), ed il programma calcola, in ogni punto di misura gravimetrica, la componente verticale dell'anomalia prodotta da tutti i prismi.

L'anomalia sintetica prodotta dal programma, viene confrontata con l'anomalia residua osservata e successivamente vengono calcolati i residui, differenza in mGal, tra valori reali e calcolati, che potranno essere accettabili o meno: in quest'ultimo caso sarà necessario apportare delle correzioni; in particolare sarà necessario modificare i dati batimetrici e/o i contrasti di densità, fino ad ottenere un'anomalia sintetica a cui competono residui di entità accettabili.

È chiaro che più il numero delle stazioni gravimetriche acquisite risulta alto e la distribuzione delle stazioni è omogeneo, maggiore sarà il dettaglio del modello ottenuto.

Dall'utilizzo di questo metodo indiretto, si può così ottenere sia una *carta geo-gravimetrica* sia l'andamento del *substrato geologico*. I risultati ottenuti potranno indirizzare i successivi studi geofisici di approfondimento (livelli 2 e 3 di MS), in quanto si potranno distinguere zone a densità media costante, definite appunto dalle diverse unità geo-gravimetriche con rispettiva estensione e profondità, che avranno caratteristiche differenti di risposta sismica.

4. Conclusioni

A seguito dell'esperienza maturata in occasione del terremoto di L'Aquila, si ritiene opportuno che il metodo gravimetrico venga introdotto negli studi di MS di livello 1, per

una corretta valutazione di alcuni parametri fisici e meccanici delle rocce, ma soprattutto per una migliore e più dettagliata conoscenza dell'assetto geologico-strutturale del sottosuolo. Da tale studio dettagliato si possono ottenere diverse informazioni sul sottosuolo, sia qualitative che quantitative, che serviranno a programmare nel modo più corretto possibile le indagini geofisiche di approfondimento previste dagli ICMS. Alcune risultati ottenuti con i metodi gravimetrici dovranno essere obbligatoriamente forniti negli studi di MS di livello 1, altri potranno essere facoltativi, in funzione del grado di approfondimento richiesto:

- 1) Carta delle Anomalie di Bouguer con l'ubicazioni delle stazioni gravimetriche;
MS di livello 1 (su richiesta)
- 2) Carte del campo locale e regionale ottenute con la residuazione polinomiale (polinomi di I° (lineare e bilineare), II° e III°) (Carte delle Anomalie Residue di ordine n-1 e Regionali);
MS di livello 1 (su richiesta)
- 3) Carte del campo locale più superficiale (Metodo di Griffin, 1949) (Carte delle Anomalie Residue di ordine n-2);
MS di livello 1 (su richiesta)
- 4) Carta del gradiente orizzontale;
MS di livello 1 (obbligatorio, questa può anche essere correlata alla successiva carta batimetrica)
- 5) Carta Geo-Gravimetrica;
MS di livello 1 (su richiesta)
- 6) Modelli geo-gravimetrici bidimensionali del sottosuolo;
MS di livello 1 e 3 (obbligatoria per il terzo livello)
- 7) Carta batimetrica dell'andamento del substrato geologico denso ed eventuale/i batimetria/e del/i corpo/i di particolare interesse sismologico ai fini di una corretta valutazione dei fattori di amplificazione sismica;
MS di livello 1 e 3 (obbligatoria)

8) Carta delle isocinetiche costruita sulla base di due tipologie di indagine geofisica del tutto indipendenti: gravimetrica/sismometrica;

MS di livello 3 (obbligatoria qualora possibile)

9) Indagine microgravimetrica in alcune zone di particolare interesse;

MS di livello 3 (su richiesta qualora possibile)

Bibliografia

Cesi C., Di Filippo M., Di Nezza M., Ferri F. (2010) - *Caratteri gravimetrici della media Valle del Fiume Aterno*. In corso di stampa, presentato alla riunione DPC del 17 dicembre 2009.

Coggon J. (1976) - Magnetic and gravity anomalies of polyhedra. *Geoplotation*, **14**, 93–105.

Di Filippo M., Miccadei E. (1997) - *Studio gravimetrico e assetto geologico-strutturale della*

Conca di Sulmona. Il Quaternario, Ital Journal of Quaternary Sciences, vol. 10(2), pp.489-494.

Di Filippo M., Di Nezza M. (2010a) - *Prospezione Gravimetrica de L'Aquila Centro – S. Elia*. In corso di stampa, presentato alla riunione DPC del 17 dicembre 2009.

Di Filippo M., Di Nezza M. (2010b) - *Prospezione Gravimetrica Pettino-Cansatessa*. In corso di stampa, presentato alla riunione DPC del 17 dicembre 2009.

Di Filippo M., Di Nezza M. (2010c) - *Prospezione Gravimetrica della Conca di Roio*. In corso di stampa, presentato alla riunione DPC del 17 dicembre 2009.

Griffin W. R. (1949) Residual gravity in theory and practice, *Geophysics*, **14**, 39–56.

Talwani M., Worzel J. L. and Landisman M. (1959) - Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone, *J. Geophys. Res.*, **64**, 49–59.

Valutazione degli standard di esecuzione e dell'efficacia delle indagini di sismica attiva e passiva

Sebastiano Foti*, Filippo Santucci de Magistris**, Francesco Silvestri***, Claudio Eva****

* Politecnico di Torino

** Università del Molise

*** Università di Napoli Federico II

**** Università di Genova

1. Introduzione

L'uso delle indagini sismiche nella caratterizzazione del sottosuolo dei siti di costruzione è finalizzato il più delle volte alla determinazione dei profili di velocità delle onde S e/o P ed alla ricostruzione della geometria di stratificazione dei depositi. Rispetto a quest'ultima, uno degli aspetti più critici negli studi di risposta sismica locale è costituito dalla definizione della posizione del tetto del substrato sismico. Questo può essere convenientemente localizzato anche con metodi geofisici non basati sulla propagazione di onde, quali le tomografie elettriche resistive (ERT) e le indagini gravimetriche.

In letteratura tecnica esistono standard di riferimento di varia origine ed indicazioni provenienti da linee guida o manuali. Si vedano ad esempio:

- ASTM: Down-Hole (D7400-08), Cross-Hole (D4428/D4428M-07), sismica a riflessione (D7128-05), sismica a rifrazione (D5777-00).
- TC10 ISSMGE: SCPT e SDMT (Butcher et al., 2005).
- SESAME (2004): H/V spectral ratio.

Si noti che gli standard internazionali sopracitati sono relativi a buona parte delle indagini sismiche, tranne che alle prove basate su onde superficiali.

2. Prove in foro

Le prove Cross-Hole (CH) costituiscono in linea di principio la metodologia più attendibile per la valutazione delle velocità di propagazione delle onde sismiche perché si basano su una misura diretta alla profondità di interesse. Per contro, presentano oneri di esecuzione elevati, tenendo anche conto dell'opportunità di utilizzare 3 fori al fine di avere una misura precisa e poco influenzata dal sistema di *trigger*. Le fonti di incertezza più ricorrenti sono: l'uso di sorgenti non polarizzate o comunque poco efficaci nel produrre onde polarizzate¹, la non-verticalità dei fori (incertezza mitigabile con misure inclinometriche) e la loro non corretta cementazione e la presenza di intercalazioni più deformabili, che possono essere aggirate dalle 'onde di testa' rifratte criticamente all'interfaccia con gli strati più rigidi sottostanti o soprastanti.

Le prove Down-Hole (DH), che sono meno onerose e meno sensibili ai problemi di verticalità del foro, presentano limitazioni sulla massima profondità investigabile. Potenziali elementi di criticità negli aspetti esecutivi della tecnica sperimentale sono individuabili nella sorgente di onde SH (ne è

¹ Si ricorda a tale proposito l'esperienza delle prove CH per la MS di San Giuliano di Puglia, in cui l'uso di sorgenti tipo 'sparker' ha condotto alla generazione di onde P spurie che pregiudicarono l'interpretazione in termini di VS.

meno importante la giusta energizzazione e il corretto orientamento), nella corretta esecuzione dei fori di sondaggio (con riferimento alla già citata necessità di controllare esecuzione e maturazione della cementazione) e nell'orientamento dei geofoni orizzontali. Altre criticità coinvolgono aspetti legati all'interpretazione delle tracce: come per le prove CH, è opportuno che l'esecutore della prova renda disponibili tutte le tracce dei segnali acquisiti. Ciò non solo per controllare la qualità dell'interpretazione, ma anche per consentire l'eventuale correzione di errori derivanti da procedure di interpretazione automatizzate, particolarmente sensibili a fattori sperimentali, come ad esempio la determinazione del tempo origine dai sensori

collegati alla sorgente, o la presenza di inversioni di velocità.

Per quanto riguarda l'attendibilità e l'affidabilità dei risultati, diversi esempi di prove DH eseguite nello stesso foro a L'Aquila hanno mostrato risultati molto differenti (Fig. 1), evidenziando la necessità di attribuire un margine di incertezza anche alle prove in foro, generalmente considerate come 'ground truth'. È quindi necessaria una valutazione esplicita delle incertezze che possono derivare sia da errori di misura, sia da aspetti interpretativi.

In entrambi i tipi di prova in foro, è fondamentale l'importanza del controllo di qualità delle tracce temporali acquisite (che devono essere allegate al rapporto di prova);

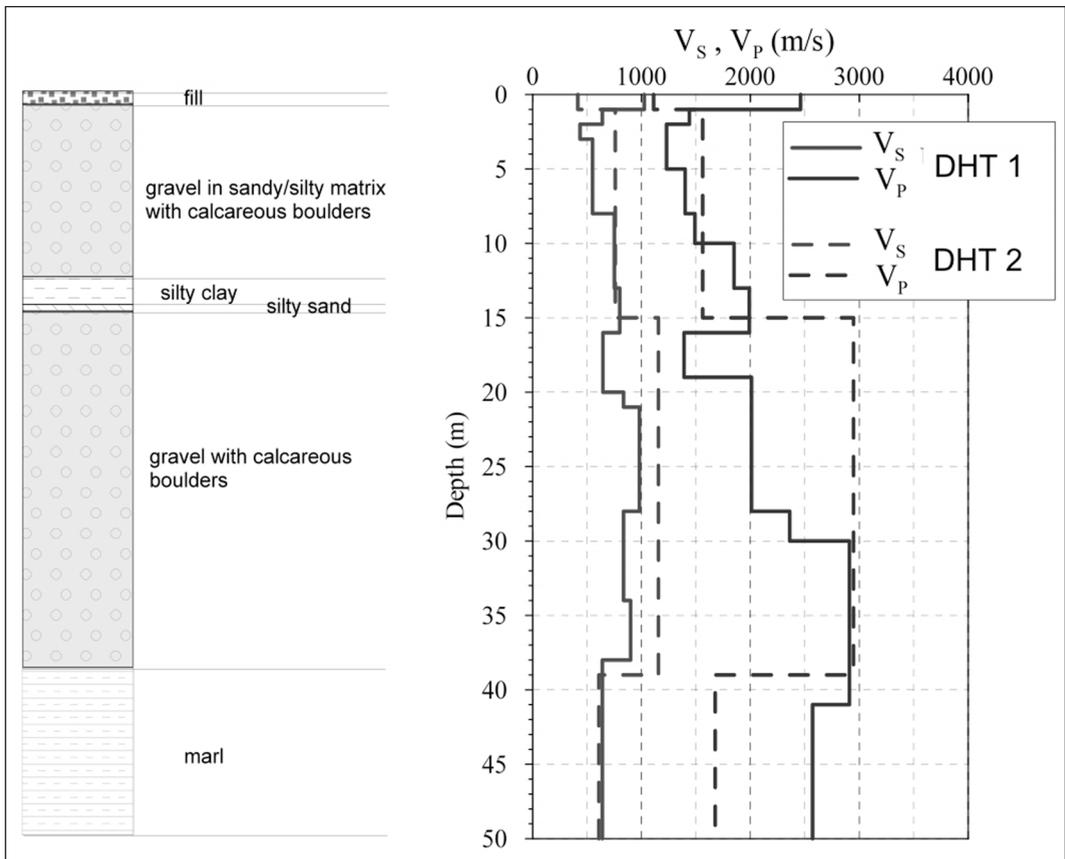


Fig. 1 - Esempio di prove DHT eseguite nello stesso foro: L'Aquila, stazione della Rete Accelerometrica Nazionale AOK - parcheggio (Lanzo, 2010).

per la prova DH, è critica la valutazione dell'influenza del modello stratigrafico usato nell'interpretazione. Ad esempio, la scelta delle interfacce, nell'interpretazione dei tempi di primo arrivo mediante dromocrone o inversione, può giustificare in parte le differenze esemplificate in Fig. 1: mentre i profili tratteggiati risultano dalle dromocrone P e S interpretate secondo la stratigrafia del sondaggio, le linee continue risultano da inversioni delle misure non vincolate ad alcun profilo stratigrafico prefissato. Nei casi di particolare incertezza è pertanto opportuno ricorrere a diverse tecniche di interpretazione dello stesso dato sperimentale (ad es. oltre i tempi di primo arrivo quelli d'intervallo o la cross-correlazione, nel caso si usi più di un ricevitore, Mancuso, 1996; AGI, 2005).

3. Prove a penetrazione

La possibilità di abbinare a tradizionali prove penetrometriche o dilatometriche (non richiedenti la realizzazione di fori di sondaggio) sistemi per la misura della velocità di propagazione delle onde di taglio ha dato luogo ad alcuni sistemi di indagine ibridi (prove a cono sismico SCPT, prove dilatometriche sismiche SDMT), che combinano diverse metodologie di prova in una unica apparecchiatura.

Superato il problema della trasmissione di onde sismiche spurie attraverso le aste, SCPT e SDMT soffrono degli stessi limiti delle prove in foro (tipicamente la configurazione strumentale richiama uno schema di tipo DH) e delle prove a penetrazione (principalmente, la difficoltà di attraversamento di strati resistenti non costituenti il substrato sismico). Rispetto alle sole prove in foro, forniscono, in maniera rapida, altri dati utili sia per la caratterizzazione geotecnica, sia per l'interpretazione delle misure di V_S . Peraltro, alcune limitazioni tipiche delle prove DH possono essere superate nella versione a dop-

pio ricevitore, configurazione sperimentale tipicamente impiegata nelle prove a penetrazione. Recentemente è stata documentata esperienza sull'esecuzione di misure di V_S con SDMT (a doppio ricevitore) all'interno di fori riempiti di sabbia in terreni non penetrabili (Totani et al. 2009).

4. Prove basate sulla propagazione delle onde superficiali (attive e/o passive)

Le prove basate su onde di superficie (SWM) vengono indicate con una varietà di acronimi (SASW, MASW, SSRM, CSW, ReMi, ESAC, SPAC, etc.) associati alle specifiche modalità di prova e di elaborazione dei segnali con cui viene ricavata la curva di dispersione della velocità delle onde R, a partire da dati sperimentali di sismica attiva o passiva. Il principio di base è comunque comune a tutte le tecniche, e soprattutto risulta molto significativo il peso dell'approccio utilizzato per la soluzione del problema inverso, che consente una stima del profilo medio di V_S a partire dalla curva di dispersione sperimentale. Proprio in virtù delle variegate modalità di acquisizione ed elaborazione, risulta difficile stabilire degli standard di esecuzione; tuttavia è possibile fissare alcuni punti chiave per un controllo di qualità (Foti, 2008):

- il dato sperimentale deve essere acquisito con strumentazione adeguata in relazione agli obiettivi della campagna di indagine. In particolare, ove necessario, dovrebbero essere utilizzati sensori a frequenza naturale inferiore a 5 Hz;
- le dimensioni degli stendimenti di misura devono essere adeguate in relazione alle profondità di indagine, obiettivo della campagna di caratterizzazione. In prima approssimazione, nelle prove attive la distanza massima tra i ricevitori deve essere pari circa al doppio della profondità d'indagine desiderata; per le prove passive, la profondità

d'indagine è al massimo circa il doppio della massima apertura della rete di ricevitori;

- nelle prove attive, l'esecuzione in più direzioni o in versi opposti lungo lo stesso allineamento (ossia con sorgente posizionata ai due estremi opposti) può consentire una verifica sommaria dell'ipotesi di conformazione del sottosuolo a strati piani e paralleli sulla base del confronto tra le diverse curve di dispersione ottenute; quando tale verifica non è soddisfatta, i dati hanno una significatività limitata e potrebbero richiedere delle correzioni;

- la valutazione delle curve di dispersione deve essere fatta con una qualche cautela, per evitare errori provocati dall'eventuale presenza di modi di vibrazione superiori al primo;

- la corrispondenza tra curva di dispersione sperimentale e curva di dispersione numerica relativa all'ultima iterazione del processo di inversione, minimizzando gli scarti, deve essere adeguata per tutto il campo di frequenza per il quale sono disponibili informazioni sperimentali;

- le profondità di indagine devono essere congruenti con l'informazione sperimentale effettivamente disponibile. In particolare, la massima profondità di indagine è circa pari alla metà della massima lunghezza d'onda disponibile ($\lambda_{\max} = V_R / f_{\min}$), mentre non è possibile differenziare strati superficiali per profondità minore di circa la metà della minima lunghezza d'onda disponibile ($\lambda_{\min} = V_R / f_{\max}$);

- trattandosi di un problema inverso, la parametrizzazione del modello di riferimento deve essere adeguata rispetto all'informazione effettivamente disponibile. In particolare è necessario tenere presente che la risoluzione è necessariamente maggiore in prossimità della superficie, mentre diminuisce in profondità.

Per tutte le prove geofisiche di superficie, è necessario tenere conto dei problemi di non unicità della soluzione. È quindi opportuna una valutazione esplicita delle conseguenze dei problemi di equivalenza.

Nelle prove basate sulla propagazione delle onde superficiali, i problemi di equivalenza (non-unicità della soluzione) comportano incertezze sui singoli parametri di modello (es. spessore e velocità del singolo strato, posizione di interfacce) mentre l'incertezza è minore su parametri integrali (ad es. $V_{S,30}$, Fig. 2). L'incertezza legata ai problemi di non-unicità della soluzione può essere mitigata con l'integrazione delle informazioni relative alle diverse prove (es. inversioni congiunte con sismica a rifrazione, rapporti spettrali H/V, tomografie elettriche ERT) ed un utilizzo delle informazioni a priori quali ad esempio stratigrafie dai fori di sondaggio.

In relazione agli specifici metodi, vengono riportate alcune considerazioni:

- SASW (metodo a 2 stazioni): poco utilizzato in Italia, necessita di particolare attenzione per problemi di *unwrapping* della fase nell'elaborazione;

- ReMi: problemi di potenziale sovrastima (per problemi di orientamento sorgente) e scarsa oggettività del *picking* che viene effettuato manualmente e può essere condizionato dalla sensibilità dell'operatore, anche a causa delle precedentemente citate incertezze di presenza di modi superiori al primo. È altamente consigliabile l'uso congiunto con prove attive (MASW) anche in considerazione dell'onere molto limitato dell'acquisizione congiunta. Poiché il *setup* di prova è lo stesso, è sufficiente l'energizzazione anche con sorgenti di potenza modesta per ottenere informazioni aggiuntive che possono estendere l'intervallo di frequenze utili e fornire una validazione sul tratto comune.

5. Sismica a rifrazione e riflessione

Con le sorgenti convenzionali, le prove sismiche a rifrazione ed a riflessione sono principalmente utilizzate per la mappatura

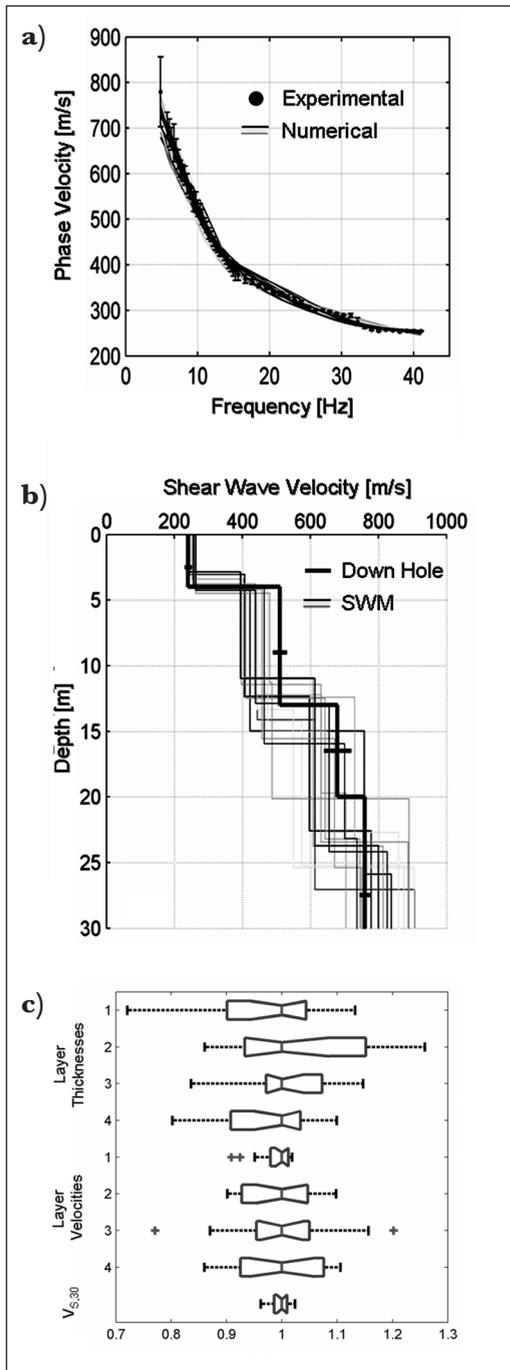


Fig. 2 - Incertezze associate alla non-unicità della soluzione nell'inversione della curva di dispersione delle onde superficiali: a) curve di dispersione sperimentale e numeriche; b) profili di V_S ; c) incertezze normalizzate sul singolo parametro e sulla $V_{S,30}$ (Comina et al., 2011).

del tetto del substrato roccioso; il contrasto di impedenza tra quest'ultimo ed i materiali sovrastanti in termini di onde di compressione risulta infatti marcato, anche in presenza di terreni saturi. L'utilizzo di onde di taglio SH, generabili mediante opportune sorgenti polarizzate, consente anche la valutazione del profilo di V_S .

Dal punto di vista del controllo di qualità, riveste particolare importanza il rapporto segnale/rumore, ed è necessario valutare la chiarezza con cui i primi arrivi possono essere individuati nelle tracce per le prove a rifrazione.

Nell'utilizzo della sismica a rifrazione, è necessario tenere in debito conto le limitazioni legate alle condizioni stratigrafiche (inversioni di velocità, strati nascosti). Pertanto il loro utilizzo è da valutare con particolare attenzione, in relazione alla geologia ed agli obiettivi dell'indagine.

6. Microtremori a stazione singola (H/V spectral ratio)

Gli spettri H/V permettono una valutazione attendibile ed economica della frequenza fondamentale del deposito. Questa grandezza può essere un utile indicatore nella definizione del modello geologico e fornire un ausilio per l'estensione del modello di riferimento in zone immediatamente adiacenti a quelle investigate nel dettaglio. In presenza di un picco di risonanza ben individuato e nota la profondità del riflettore che dà la risonanza, è inoltre possibile ottenere una stima di massima della velocità media delle onde di taglio delle coperture. Infine possono costituire un valido ausilio nell'interpretazione e validazione dei risultati ottenuti con altre prove.

Particolare cura va posta nella configurazione sperimentale verificando: adeguatezza dei sensori e dei sistemi di acquisizione, procedure d'installazione dei sensori, campionamento dei segnali in termini di tempi e frequenze di acquisizione. La tecnica speri-

mentale deve mirare ad ottenere un alto rapporto segnale/rumore curando con attenzione l'accoppiamento terreno-sensore. Il dato sperimentale deve essere opportunamente interpretato da un operatore esperto.

Per la valutazione della qualità delle misure degli H/V e della chiarezza dei picchi spettrali, si può fare riferimento ai criteri proposti da SESAME (2004), così come integrati e rielaborati da Albarello et al. (2011). In particolare, in quest'ultimo documento

vengono proposte diverse classi di qualità della misura da A (affidabile e interpretabile) a C (scadente - non utilizzabile).

7. Confronti ed integrazione reciproca tra le tecniche

Pur non essendo possibile stabilire una gerarchia assoluta di priorità e di prestazioni, si richiamano sinteticamente le potenzialità

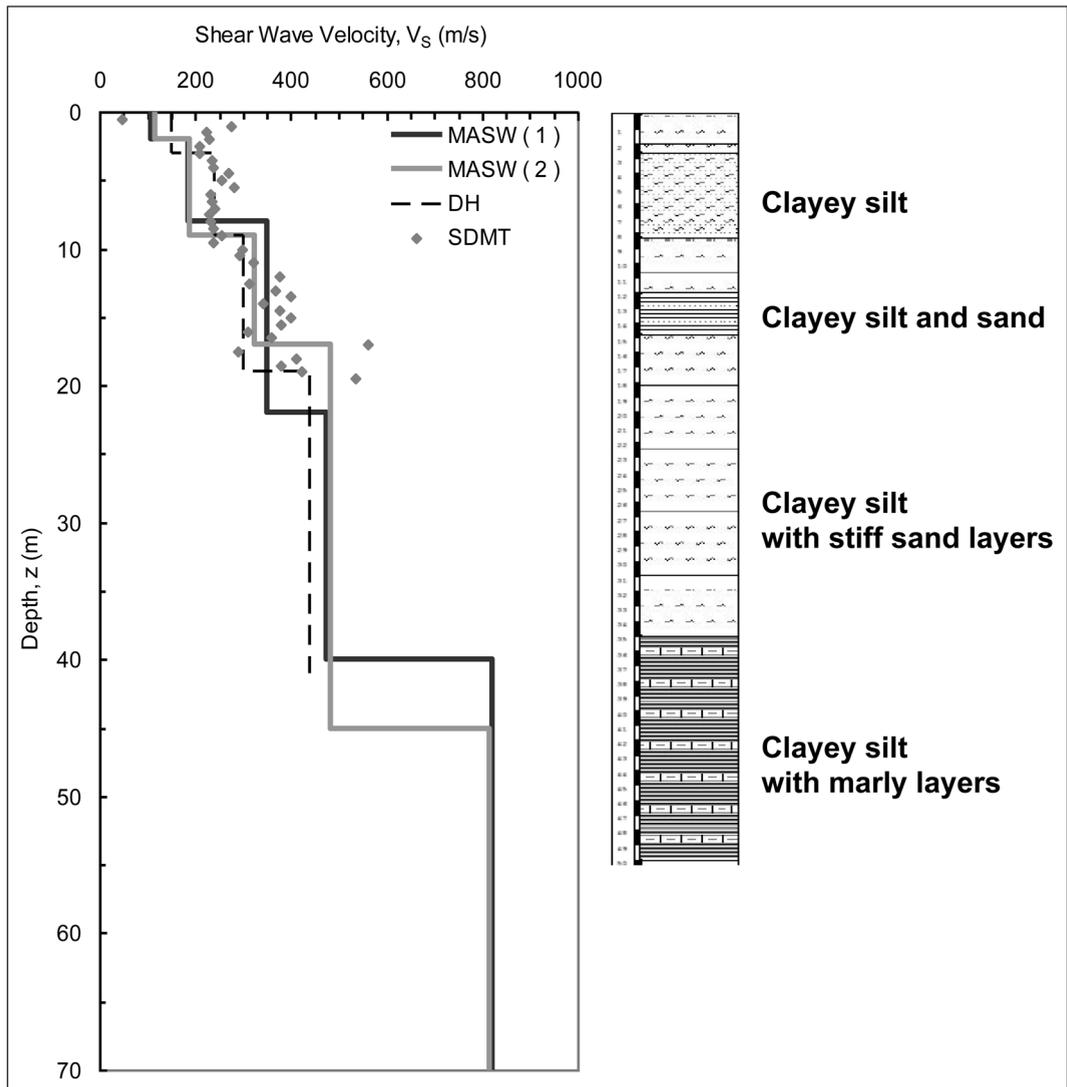


Fig. 3 - Confronti tra profili di VS da prove Down-Hole, SDMT e MASW, sito di Roio Piano (D'Onofrio et al., 2010).

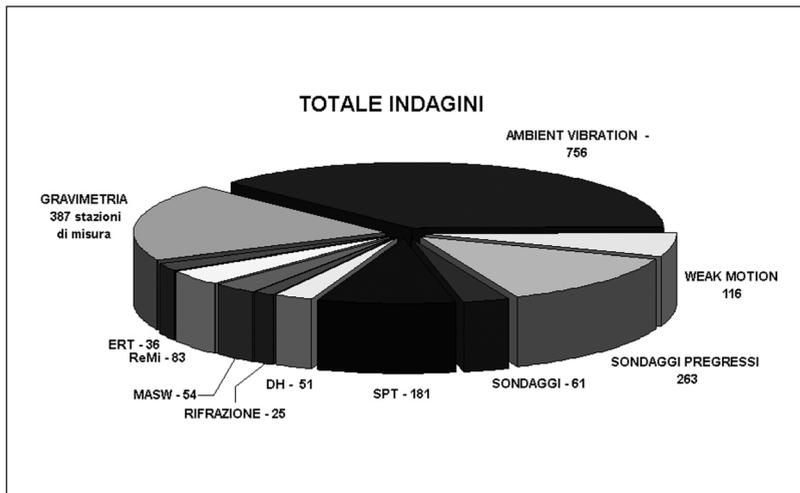


Fig. 4 - Microzonazione sismica dell'aquilano: distribuzione numero di indagini per tipologia (Scarascia Mugnozza, 2010).

relative a ciascuna famiglia di tecniche sperimentali.

Le sole tecniche in foro, se eseguite a regola d'arte e spinte fino a profondità adeguate, sono in grado di fornire le informazioni più dirette e complete (stratigrafia e profili di V_S e V_P) per la definizione del modello di sottosuolo per le analisi di risposta sismica locale. L'esecuzione di fori consente peraltro il prelievo di campioni indisturbati per la determinazione delle necessarie caratteristiche di non-linearità di rigidità e smorzamento. Queste si ottengono mediante esecuzione di prove cicliche in laboratorio (strategia ottimale), o facendo riferimento a banche dati ('librerie') di terreni diffusi a livello locale, o, in ultima analisi, riconducendosi a dati di letteratura (sulla base dei risultati di prove di classificazione dei terreni).

Rispetto alle tecniche in foro, risultano più economiche quelle a penetrazione (p.es. SDMT, SCPT), che però hanno limitazioni di profondità, e le prove a onde di superficie, che possono raggiungere profondità anche superiori. In Fig. 3 è mostrato a tale proposito il confronto tra DH, SDMT e MASW relativo al sito C.A.S.E. di Roio Piano.

Il vantaggio delle prove geofisiche dalla superficie, ed in particolare di quelle basate

sull'analisi delle onde superficiali, risiede invece nella possibilità di investigare, con costi contenuti, volumi significativi.

Le sismiche a riflessione e rifrazione, unitamente alla ERT e, sulle aree più estese, alla gravimetria, sono invece le tecniche più efficaci per la determinazione di profondità ed andamento del bedrock.

I rapporti spettrali H/V, in assoluto le più economiche e speditive, e pertanto con crescente diffusione (Fig. 4), forniscono di norma un'informazione sintetica, la frequenza naturale del sottosuolo, rappresentativa ma non esaustiva del modello di analisi di risposta sismica locale, peraltro in campo lineare.

Tale informazione è molto utile per validare il modello di sottosuolo nel complesso (Fig. 5), oppure quando è noto il profilo di velocità solo per profondità limitate ed è incognita la profondità del bedrock, oppure ancora quando questa profondità è nota e ci si vuol limitare alla valutazione di un valor medio di velocità. Ciò accade sia per terreni deformabili dove la velocità cresce gradualmente con la profondità, sia per casi di sottosuolo (apparentemente di classe A) caratterizzato da inversione di velocità al di sotto di una formazione superiore rigida e di spessore elevato.

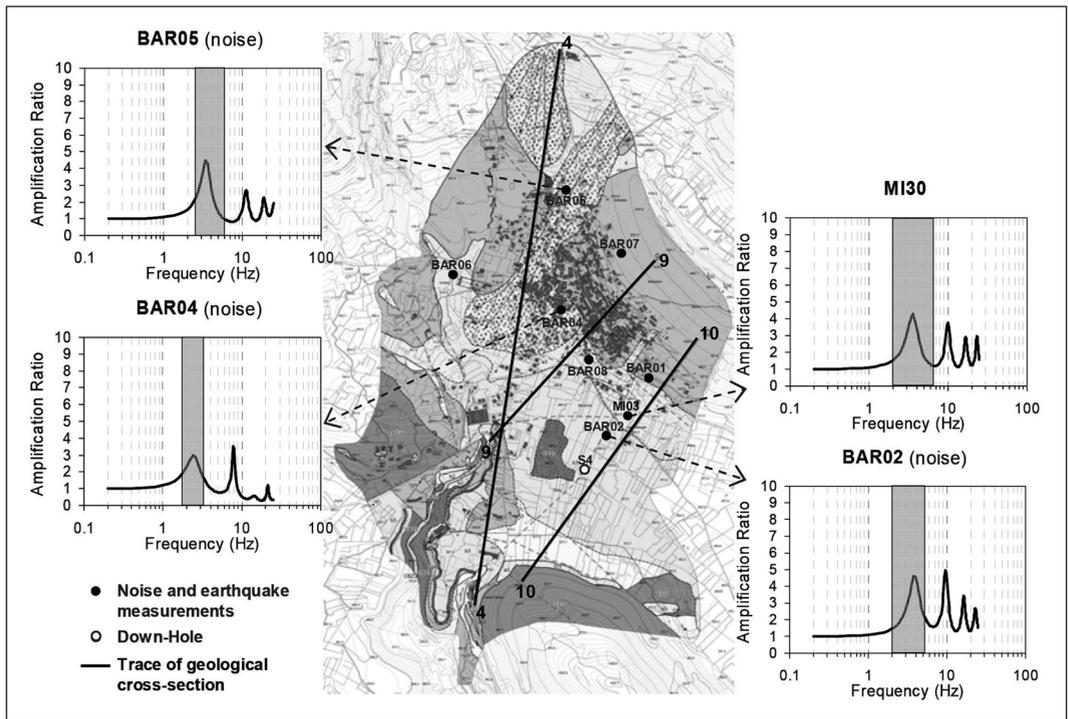


Fig. 5 - Validazione del modello di sottosuolo a Barisciano in base a confronti tra funzioni di amplificazione analitiche e misure HVSR (Bilotta et al., 2011).

Bibliografia

- AGI (2005) - *Aspetti Geotecnici della progettazione in zona sismica – Linee Guida*, Patron Editore, Bologna.
- Albarello D., Cesi C., Eulilli V., Guerrini F., Lunedei E., Paolucci E., Pileggi D., Puzilli L.M. (2011) - The contribution of the ambient vibration prospecting in seismic microzoning: an example from the area damaged by the 26th April 2009 l'Aquila (Italy) earthquake, *Boll.Geo-fis.Teor.Appl.*, in press.
- ASTM Standard D4428/D4428M-07 (2007) - *Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing*, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- ASTM Standard D5777-00 (2006) - *Standard guide for using the Seismic Refraction Method for subsurface investigation*, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- ASTM Standard D7128-05 (2010) - *Standard guide for using the Seismic-Reflection Method for shallow subsurface investigation*, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- ASTM Standard D7400-08 (2008) - *Standard test methods for Downhole Seismic testing*, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- Bilotta E., Evangelista L., Landolfi L., Silvestri F. (2011) - *Site response analysis for microzonation: a comparison of different numerical approaches and amplification factors*. Proc. V ICEGE, Santiago, Chile.
- Butcher A.P., Campanella R.G., Kaynia A.M., Massarsch K.R. (2005) - *Seismic cone downhole procedure to measure shear wave velocity - a guideline*, Proc. XVI ICSMGE, Osaka, Japan.
- Comina C., Foti S., Boiero D. and Socco L.V. (2011) - *Reliability of $V_{s,30}$ evaluation from surface waves tests*, *J. Geotechn. and*

- Geoenv. Eng., ASCE, in press, DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000452
- D'Onofrio A., Evangelista L., Landolfi L., Silvestri F., Boiero D., Foti S., Maraschini M., Comina C., Santucci de Magistris F. (2010) - *Geotechnical characterization of the C.A.S.E. project sites*. Proc. Sustainable Development Strategies for Constructions in Europe and China, University of Rome 3.
- Foti S. (2008) - *La caratterizzazione geotecnica per la progettazione in zona sismica*, Atti delle Conferenze di Meccanica ed Ingegneria delle Rocce, MIR2008, Politecnico di Torino, Pàtron Ed., Bologna, pp. 71-100.
- Lanzo G. (2010) - Catalogue of geological/geotechnical information at accelerometric stations: Appendix B Activities following the April 6, 2009, L'Aquila earthquake, Deliverable # 05: Project S4: Italian Strong Motion data Base, <http://esse4.mi.ingv.it>
- Mancuso C. (1996) - *Misure dinamiche in sito – Applicazioni geotecniche*. Hevelius edizioni, Benevento, 126 pp.
- Scarascia Mugnozza G. (2010) - *Indagini geologiche, geotecniche e geofisiche: convergenze, divergenze e criticità*. Incontro GdL Microzonazione Sismica, 23 aprile 2010, DPC, Roma.
- SESAME Working Group (2004) - *Guidelines for the implementation of the h/v spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation* <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm>.
- Totani G., Monaco P., Marchetti S. e Marchetti D. (2009) - *V_S measurements by seismic dilatometer (SDMT) in non-penetrable soils*. Proc. 17th ICSMGE, Alexandria, Vol. 2, pp. 977-980.

Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola

Dario Albarello*, **Silvia Castellaro****

* Università di Siena

** Università di Bologna

1. Il campo d'onda delle vibrazioni ambientali

Le vibrazioni ambientali (o rumore sismico ambientale o microtremori) sono movimenti del terreno caratterizzati da ampiezze non percepibili dall'uomo (10^{-4} - 10^{-2} mm), osservabili in ogni parte della superficie della Terra. Queste vibrazioni sono l'effetto di una molteplicità di sorgenti agenti a diverse frequenze: onde marine e perturbazioni atmosferiche, ad esempio, contribuiscono al campo d'onda prevalentemente a frequenze inferiori a 0.5 Hz; vento, traffico veicolare e attività industriali contribuiscono prevalentemente a frequenze superiori a 0.5 Hz. L'indipendenza dinamica delle sorgenti e la molteplicità dei percorsi delle onde da esse generate spiega la mancanza di regolarità nell'andamento temporale del campo del microtremore.

Se da un lato il carattere stocastico del fenomeno presenta difficoltà di tipo teorico, dall'altro consente, mediante operazioni di tipo statistico, di ridurre la complessità dell'analisi. Per esempio, in presenza di un campo d'onde diffuso, cioè caratterizzato dalla presenza di sorgenti distribuite in modo statisticamente omogeneo attorno al sito di misura (o di eterogeneità nel sottosuolo responsabili di fenomeni di diffusione) e che si attivano in modo non coordinato, la struttura media del segnale risulterà statisticamente indipendente dalla natura e dalla posizione delle sorgenti e sarà condizionata soprattutto dalla struttura del sottosuolo.

Le tecniche di sismica passiva si basano sull'analisi del campo delle vibrazioni am-

bientali e sono finalizzate alla determinazione delle caratteristiche del sottosuolo al di sotto del punto di osservazione. Infatti, dato che le vibrazioni ambientali sono costituite da onde che hanno attraversato porzioni significative del sottosuolo, la struttura del segnale registrato in superficie è potenzialmente in grado di fornire informazioni sul mezzo attraversato dalle onde. Inoltre, data la sostanziale ubiquità di questo tipo di segnale e l'ampio dominio di frequenze interessate, le misure sismiche passive sono caratterizzate da un'applicabilità virtualmente illimitata e risultano più efficaci laddove le tecniche attive (di superficie o in foro) sono fortemente penalizzate (es. in aree urbane caratterizzate da un intenso traffico veicolare). Le tecniche passive sono inoltre caratterizzate da ingombri relativamente ridotti e da bassi costi di esplorazione.

Infine, dato che il rumore è caratterizzato da lunghezze d'onda anche molto grandi (decine o centinaia di metri), confrontabili con quelle tipiche dei fenomeni sismici, le tecniche di sismica passiva trovano una ideale applicazione negli studi della risposta sismica locale. In particolare, esse permettono di individuare situazioni sismostratigrafiche potenzialmente responsabili di fenomeni di risonanza sismica, valutandone qualitativamente l'entità, la determinazione dei periodi di risonanza delle coperture sedimentarie e la determinazione del profilo di velocità delle onde S fino a profondità dell'ordine di diverse decine di metri.

Esistono sostanzialmente due configurazioni sperimentali per lo studio del rumore

sismico a fini geognostici: la configurazione a stazione singola e quella ad antenna sismica (*array*). La prima è basata sull'analisi dell'ampiezza delle componenti spettrali del campo di vibrazioni ambientali misurato nelle tre direzioni dello spazio, mentre nella seconda vengono analizzati i rapporti di fase tra i treni d'onda che attraversano un'antenna sismica (*array*) ovvero una distribuzione di sensori disposti con geometrie variabili alla superficie del terreno.

In entrambi i casi, data la natura stocastica del segnale analizzato, negli studi di rumore gioca un ruolo essenziale la durata della misura che deve essere tale da garantire un campionamento statisticamente adeguato del processo indagato.

Nei prossimi paragrafi tratteremo la sola configurazione a stazione singola.

2. Il metodo H/V

La prova, comunemente nota con il termine H/V, fu applicata per la prima volta da Nogoshi e Igarashi (1970) e resa popolare da

Nakamura (1989). Si tratta di una valutazione sperimentale dei rapporti di ampiezza spettrale fra le componenti orizzontali (H) e la componente verticale (V) delle vibrazioni ambientali sulla superficie del terreno misurati in un punto con un apposito sismometro a tre componenti. Per questo motivo la prova assume anche la denominazione di prova HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) o prova HVNSR (Horizontal to Vertical Spectral Noise Ratio) o prova "di Nakamura".

L'esito di questa prova è una curva sperimentale che rappresenta il valore del rapporto fra le ampiezze spettrali medie delle vibrazioni ambientali in funzione della frequenza di vibrazione (Fig. 1A). Le frequenze alla quali la curva H/V mostra dei massimi sono legate alle frequenze di risonanza del terreno al di sotto del punto di misura. Quando la misura è effettuata su un basamento sismico affiorante (e quindi dove non sono attesi fenomeni di risonanza sismica) la curva non mostra massimi significativi e si assesta intorno ad ampiezza 1 (Fig. 2).

Pertanto, questa prova ha lo scopo prin-

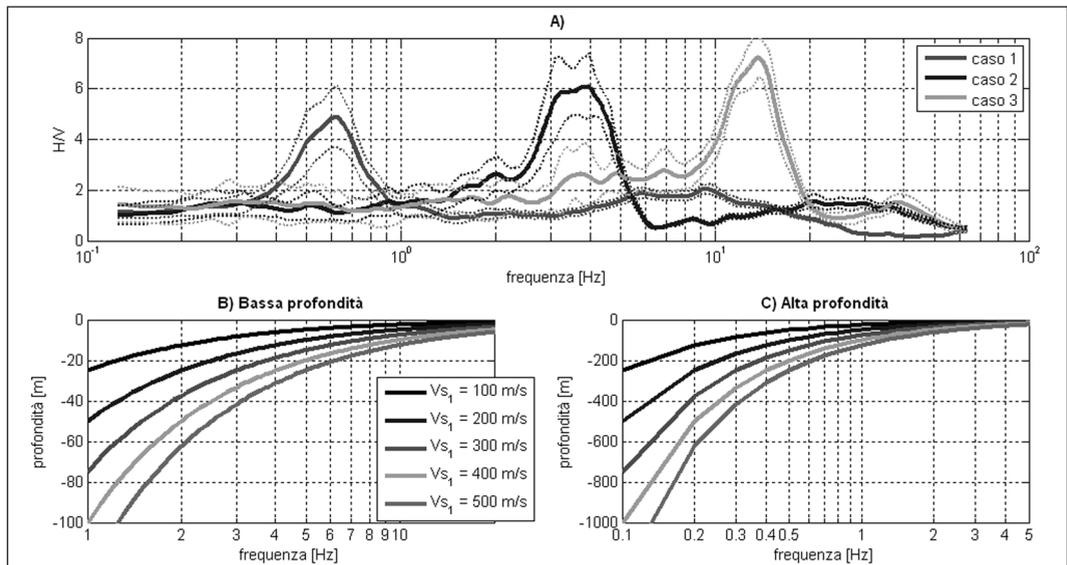


Fig. 1 - A) Esempio di bedrock sismico a diverse profondità che genera risonanze a diverse frequenze. Caso 1: bedrock a 300 m di profondità. Caso 2: bedrock a 20 m di profondità. Caso 3: bedrock a 4 m di profondità; B) relazione V - f_0 - H alle medio-alte frequenze; C) relazione V - f_0 - H alle medio-basse frequenze.

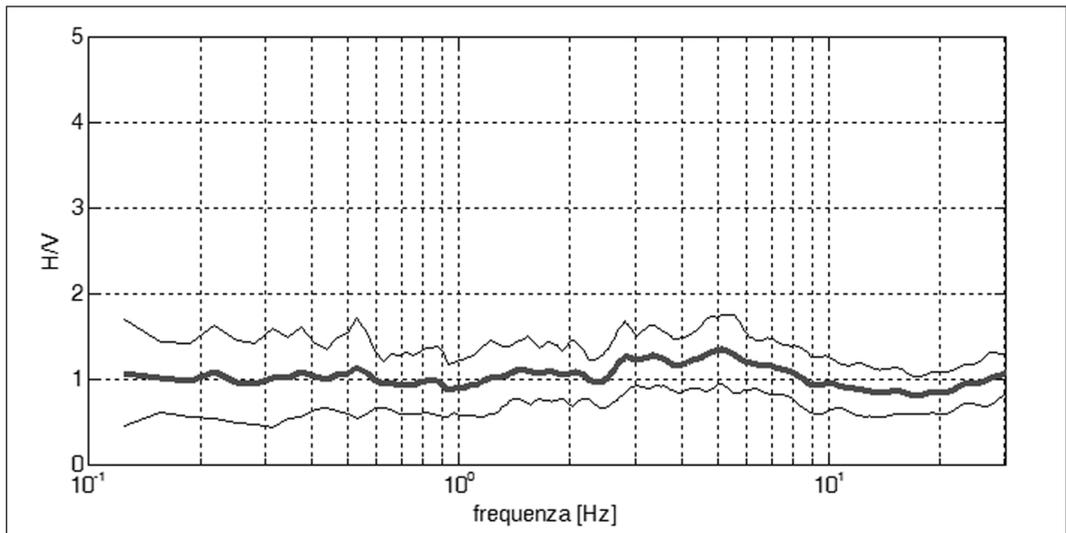


Fig. 2 - Curva H/V di un sito su roccia non fratturata e morfologicamente piatta. Si noti l'assenza di amplificazione per risonanza in tutto il dominio di frequenza.

cipale di mettere in luce la presenza di fenomeni di risonanza sismica e consentire una stima delle frequenze alle quali il moto del terreno può risultare amplificato a causa di questi fenomeni. Contestualmente fornisce indicazioni di tipo qualitativo sull'entità delle risonanze attese. In generale, la stima della frequenza di risonanza¹ f sarà tanto più precisa quanto maggiore è il contrasto di impedenza sismica responsabile del fenomeno, ovvero dove sono maggiori gli effetti potenzialmente pericolosi. Inoltre, se i risultati della prova sono invertiti mediante opportune procedure numeriche, soprattutto se in associazione ad altre indicazioni sperimentali (per esempio le curve di dispersione delle onde superficiali) possono fornire vincoli importanti al profilo di velocità delle onde di taglio nel sottosuolo.

In casi semplici (coperture soffici al di sopra di un basamento sismico rigido), è possibile stabilire una relazione fra lo spessore h dello strato soffice, la velocità media delle onde S all'interno di quest'ultimo (V_s) e la

frequenza di risonanza fondamentale f dello strato, nella forma

$$f = \frac{V_s}{4h} \quad [1]$$

Dall'equazione 1 emerge come la tecnica H/V possa fornire anche indicazioni di carattere stratigrafico: a partire da una misura di vibrazioni ambientali che vincola il valore di f , nota la V_s delle coperture, si può infatti stimare la profondità dei riflettori sismici principali o viceversa. La prima applicazione in questo senso risale al 1999 ad opera di Ibs-von Seht e Wohlenberg, che ricostruirono la profondità del basamento sismico lungo il bacino del Reno in Germania a partire da misure di risonanza del sottosuolo.

La relazione tra frequenza di risonanza e spessore della copertura che risuona, per diversi tipi di sottosuolo, ossia per diverse V_s delle coperture, è data in Fig. 1 (pannelli B e C). Nel pannello A sono presentati invece tre esempi di curve H/V misurate rispettivamente su coperture con spessori dell'ordine di diverse centinaia di metri (caso 1, $f_0 = 0.6$ Hz), di qualche decina di metri (caso 2, $f_0 = 3.5$ Hz) e di pochi metri (caso 3, $f_0 = 14$ Hz).

¹ $T = 1/f$ è il periodo di risonanza, o periodo proprio, della struttura indagata.

L'esito di misure H/V effettuate su un basamento sismico affiorante (roccia intatta) per il quale non sono attesi fenomeni di risonanza ha un andamento simile a quello di Fig. 2.

Poiché la tecnica H/V indica la risonanza verticale locale nell'assunzione di una configurazione puramente 1D (sono ammesse solo variazioni verticali del profilo di velocità), essa è sensibile alle variazioni stratigrafiche laterali, permettendo di discriminare geometrie 1D da geometrie 2D, entro i limiti di visibilità imposti dalla legge fisica $\lambda f = V$ (lunghezza d'onda x frequenza = velocità). In Fig. 3 è illustrato il caso di due misure effettuate a 40 m di distanza reciproca, una delle quali situata su terreno limoso sovrastante un paleoalveo di ghiaie posto a

circa 12 m di profondità; l'altra situata sullo stesso terreno, ma dove non si incontra il livello di ghiaie. È evidente come nel primo caso si generi a 6 Hz una risonanza dei limi sopra le ghiaie, del tutto assente nel secondo caso. 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 antropiche con modi propri attorno a 6-8 Hz.

3. Le basi fisiche del metodo H/V

Nel campo delle vibrazioni ambientali sono presenti sia onde di volume (P e S) che onde di superficie (Love e Rayleigh). La frazione di energia associata alla componente

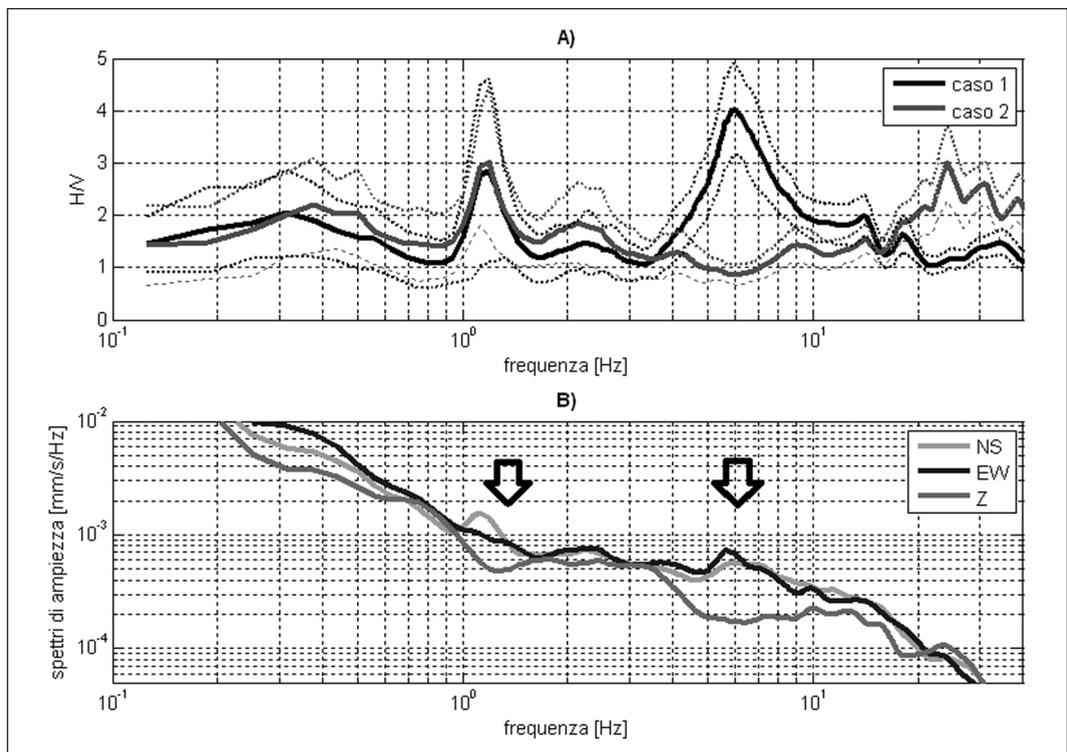


Fig. 3 - A) Esempi di curve H/V registrate a 40 m di distanza. Nella curva 1 emerge una risonanza a 6 Hz legata alla presenza di un livello di ghiaie a 12 m di profondità che è assente nella curva relativa al sito 2. Nel dominio delle medio-basse frequenze le curve sono statisticamente uguali. B) Spettri 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.

di onde di volume rispetto a quelle di onde superficiali varia da caso a caso e dipende dall'intervallo di frequenze considerato. Se si considera un intervallo di tempo dell'ordine di qualche decina di minuti, le proprietà medie del campo d'onde sismiche generato da una molteplicità di sorgenti differenti, distribuite casualmente attorno a un punto di misura, hanno un andamento che non dipende dalle singole sorgenti ma solo dalle proprietà del mezzo in cui le onde si propagano.

Si può immaginare che, in media, le componenti orizzontali e verticali del moto del suolo tendano a essere sollecitate alla sorgente in modo equivalente, con un'ampiezza media pari al livello medio del rumore in quell'intervallo temporale. In questa ipotesi, i rapporti fra le ampiezze verticali e orizzontali del moto (H/V) saranno statisticamente indipendenti dalle caratteristiche delle sorgenti e saranno condizionati dalle sole caratteristiche del mezzo attraversato.

Un elemento chiave per l'interpretazione delle curve H/V è definire quali sono le fasi sismiche responsabili dei massimi osservati. Sono state avanzate diverse ipotesi in proposito: 1. risonanza onde di volume, 2. ellitticità delle onde di Rayleigh, 3. fasi di Airy delle onde di Love. Ciascuno di questi elementi è potenzialmente presente nel campo delle vibrazioni ambientali. Tuttavia si vede che le varie ipotesi concordano nell'associare il valore sperimentale di detto massimo alla frequenza di risonanza fondamentale delle coperture:

1. Se le vibrazioni ambientali misurate fossero costituite da onde di volume stazionarie emergenti secondo una direzione perpendicolare alla superficie, il rapporto H/V avrebbe dei massimi in corrispondenza delle frequenze di risonanza delle onde S nella copertura, ovvero quando l'ampiezza delle onde S è relativamente maggiore.

2. Se invece il campo d'onda è dominato dalle onde superficiali, sarà l'ellitticità delle onde di Rayleigh (ovvero il rapporto fra le

componenti orizzontali e verticali del moto ellittico associato a questo tipo di onda) e l'ampiezza delle onde di Love (che agiscono solo sul piano orizzontale) a condizionare l'andamento della curva H/V . In questo caso argomentazioni teoriche permettono di stabilire che, in presenza di coperture soffici su un basamento rigido, la componente verticale delle onde di Rayleigh si annulla per frequenze corrispondenti alla frequenza di risonanza delle onde S per la struttura.

3. Anche la fase di Airy delle onde di Love presenta un massimo in corrispondenza delle frequenze di risonanza delle onde S . Questa generale concordanza ha origine nel fatto che le onde di Love e Rayleigh (nella componente orizzontale) sono figlie dell'interferenza di onde di volume (segnatamente le componenti SH) con la superficie del terreno: risulta quindi ragionevole che tutte risentano in qualche modo dei fenomeni di risonanza relativi alle onde S .

Questo implica che, indipendentemente dalla natura del campo d'onde, la funzione H/V sarà sempre caratterizzata da valori massimi in corrispondenza della frequenza di risonanza delle onde S . In assenza di contrasti di impedenza alla base della copertura, il rapporto H/V sarà all'incirca unitario, sia nel caso di rumore ambientale dominato da onde di volume, che da onde di superficie. Studi teorici e osservazioni sperimentali mostrano che esiste una relazione non lineare tra l'ampiezza dei massimi della curva H/V e l'entità del contrasto di impedenza sismica alla base della copertura. Altri fattori che influenzano l'ampiezza dei massimi H/V sono il contributo delle diverse fasi sismiche, lo smorzamento, il rapporto di Poisson nelle coperture e la distribuzione delle sorgenti attorno al ricevitore (Lunedei e Albarello, 2010).

Non è possibile prevedere a priori per un dato sito l'entità del contributo relativo delle onde di volume e delle onde di superficie (nei diversi modi di propagazione) al campo d'onda delle vibrazioni ambientali. I rap-

porti relativi delle diverse fasi cambiano in funzione delle frequenze, della situazione stratigrafica e della distribuzione delle sorgenti all'intorno della stazione di misura. Tuttavia questa eterogeneità non influenza la stima della frequenza di risonanza fondamentale ma solo l'ampiezza della curva H/V in corrispondenza di f , ampiezza che va quindi interpretata con cautela.

4. Schema esecutivo della prova

Strumentazione

Le misure di microtremore a stazione singola si effettuano per mezzo di sismometri tricomponenti sufficientemente sensibili nell'intervallo di frequenze di interesse ingegneristico (0.1-20 Hz, corrispondenti alle frequenze dei modi di vibrare della maggior parte delle strutture). Per definirsi sufficientemente sensibile, lo strumento deve essere in grado di rilevare segnale anche nei punti più silenziosi della superficie terrestre. Di fatto non esistono modelli statisticamente affidabili che descrivono il minimo del rumore di fondo su roccia in tutta questa banda di frequenze poiché si tratta un intervallo di modesto interesse sismologico, che tradizionalmente si concentra su frequenze inferiori. In generale si può affermare che tale minimo nei termini di intensità di potenza spettrale varia in modo non lineare da $4 \cdot 10^{-21} \text{ (m/s)}^2/\text{Hz}$ (a 10 Hz) a $10^{-16} \text{ (m/s)}^2/\text{Hz}$ (a 0.1 Hz). Il problema tuttavia è complesso e si rimanda a Peterson (1993), McNamara e Buland (2004), Berger et al. (2004) e a Castellaro e Mulargia (2011) per una revisione.

Acquisizione in campagna

Dal punto di vista pratico, nelle prove di sismica passiva si tratta di misurare vibrazioni del terreno caratterizzate da ampiezze molto piccole. Questo implica che la prova vada effettuata con cura, soprattutto per quanto riguarda l'accoppiamento dello stru-

mento di misura con il terreno e la riduzione delle possibili fonti di disturbo nelle immediate vicinanze dei sensori. Lo strumento di misura va dunque posto a diretto contatto col terreno e reso solidale con questo, possibilmente senza interfacce intermedie. Quando questo non fosse possibile è necessario tener conto dei possibili effetti indotti dai terreni artificiali rigidi in questo tipo di misure. Bisogna inoltre evitare possibili movimenti dello strumento nel corso della misura (basculamenti, assestamenti del suolo, ecc.) e curare la messa in bolla dei sensori, controllando al termine della misura che questa sia stata conservata. Infine, le eventuali parti mobili della strumentazione devono essere poste al riparo da spostamenti d'aria, va evitato il contatto con elementi mobili (fili d'erba, ecc.). Una lista di cautele per l'esecuzione di questo genere di misura è stata messa a punto nell'ambito del progetto SESAME (Site EffectS Assessment using AMBient Excitations, 2004).

Il secondo aspetto importante è che le misure di tipo passivo mirano a determinare caratteristiche medie del moto del suolo associato alle vibrazioni ambientali. Si tratta quindi di misure che devono risultare statisticamente rappresentative del fenomeno analizzato. Pertanto, la misura di microtremore a stazione singola 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, segue che un campionamento adeguato deve durare 15-40 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. Tempi di misura più lunghi garantiscono una maggiore ridondanza del segnale e quindi una maggiore robustezza dei risultati in senso statistico, anche in presenza di vibrazioni ambientali poco energetiche.

D'altro canto tempi di misura lunghi riducono l'efficienza del metodo nel caso di campagne di misura estensive. Per quanto riguarda le misure su edifici, dove le vibrazioni ambientali sono ampie, si consiglia di non scendere comunque al di sotto dei 10 minuti di misura.

Stante la rapidità della tecnica, si rammenta che è sempre preferibile effettuare 2 misure di 15 min di durata a breve distanza nello stesso sito piuttosto che una sola misura di 30 min. Due misure possono infatti rendere conto del livello di omogeneità del sito (natura 1D o 2D) e possono validarsi reciprocamente. Una singola misura è soggetta a tutte le incertezze tipiche delle tecniche geofisiche e non è pertanto raccomandabile nei siti di cui non si abbiano conoscenze pregresse.

La frequenza di campionamento adeguata per questo tipo di prove non deve essere inferiore a 50 Hz, in modo da permettere una ricostruzione spettrale sino ad almeno 20 Hz.

L'orientamento strumentale secondo il Nord geografico è solamente una convenzione. In presenza di elementi topografici o morfologici, lo strumento andrebbe allineato secondo gli assi di questi, in modo da cogliere più efficacemente eventuali direzionalità. In ogni caso l'orientamento strumentale va annotato perché risulterà necessario nei casi in cui si osservino "effetti direzionali" significativi. Poiché si riscontra un certo abuso nell'invocazione agli "effetti direzionali", si ricorda che, prima di poterli chiamare in causa, se ne deve dimostrare la significatività in senso statistico. Inoltre, qualora questa esista, si ricorda che una direzionalità nel segnale registrato può essere legata sia alle caratteristiche delle sorgenti (campo di tremore non omogeneo o sorgenti direzionali) che al sottosuolo e, in questo caso, sia per motivi topografici (es. misure effettuate su rilievi, a ridosso di una scarpata) che per motivi stratigrafici (valli sepolte, stratificazioni inclinate ecc.). A

causa di queste possibili ambiguità, le misure caratterizzate da forti anisotropie vanno interpretate con cautela.

5. Analisi dei dati e valutazioni di qualità della misura

Le serie temporali registrate nelle tre componenti del moto vengono analizzate secondo procedure spettrali di vario tipo (FFT, wavelet, ecc.) fino alla produzione delle curve H/V, dove H è la media di due componenti spettrali orizzontali ortogonali. Si rimanda a SESAME (2004) e D'Amico et al. (2008) per due possibili protocolli di analisi. Ciascuna di queste procedure presenta pregi e difetti. Tuttavia va rilevato che in presenza di un buon segnale e di fenomeni di risonanza significativi, i diversi protocolli producono gli stessi esiti.

Prima di qualsiasi interpretazione delle curve H/V sono indispensabili due accorgimenti:

- 1) la curva H/V deve essere statisticamente significativa, ossia essere caratterizzata da una deviazione in ampiezza e in frequenza ridotta. Quando questa caratteristica non sia presente sin dall'inizio, essa va ricercata tramite una pulizia del tracciato. Esistono diversi metodi per "pulire" una curva H/V. SESAME (2004) propone la rimozione nella serie temporale delle finestre caratterizzate da una deviazione del segnale (STA, media a breve termine) maggiore della media a lungo termine (LTA). Tuttavia le procedure che propongono la rimozione dei disturbi sulla base della serie temporale non appaiono le più indicate quando l'obiettivo è pulire una curva che è funzione della frequenza. La pulizia deve infatti essere rivolta alla ricerca di un rapporto H/V stabile e quindi alla rimozione delle sole finestre in cui questo rapporto risulti alterato, a parità di frequenza, tra i canali H e i canali V. Questo tipicamente avviene in presenza di segnali di natura impulsiva, che presentano

cioè spettri bianchi. Un esempio di pulizia del segnale nel dominio delle frequenze è dato in Fig. 4;

2) la curva H/V non va mai osservata da sola ma sempre congiuntamente agli spettri delle singole componenti da cui essa deriva. Questo permette di discernere agevolmente i picchi di natura stratigrafica da quelli generati da fonti di disturbo di natura antropica (motori elettrici, ecc.). In condizioni normali le componenti spettrali NS, EW e Z (verticale) hanno ampiezze simili. Alla frequenza di risonanza si genera spesso un picco H/V legato ad un minimo locale della componente spettrale verticale che determina una forma “a occhio” o “a ogiva” come quella indicata dalle frecce in Fig. 3. Questa forma è indicativa di risonanze stratigrafiche (Castellaro e Mulargia, 2009b).

È evidente però che in una misura di tremore entrano anche dei disturbi nella forma

di vibrazioni fortemente concentrate attorno ad una specifica frequenza (artefatti) indotte da macchinari o simili. Queste si traducono 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 gole o picchi spuri nelle curve H/V. Un esempio di questo tipo di disturbo sovrainposto a un picco naturale è dato in Fig. 5.

La differenza negli andamenti spettrali tra il caso naturale e quello affetto da disturbi rende agevole la distinzione dei picchi H/V stratigrafici da quelli antropici, in modo particolare lavorando su spettri poco lisciati.

Nel 2004 il progetto SESAME ha stabilito una serie di criteri per la valutazione della significatività dei picchi H/V (Appendice 1). Si tratta essenzialmente di criteri di

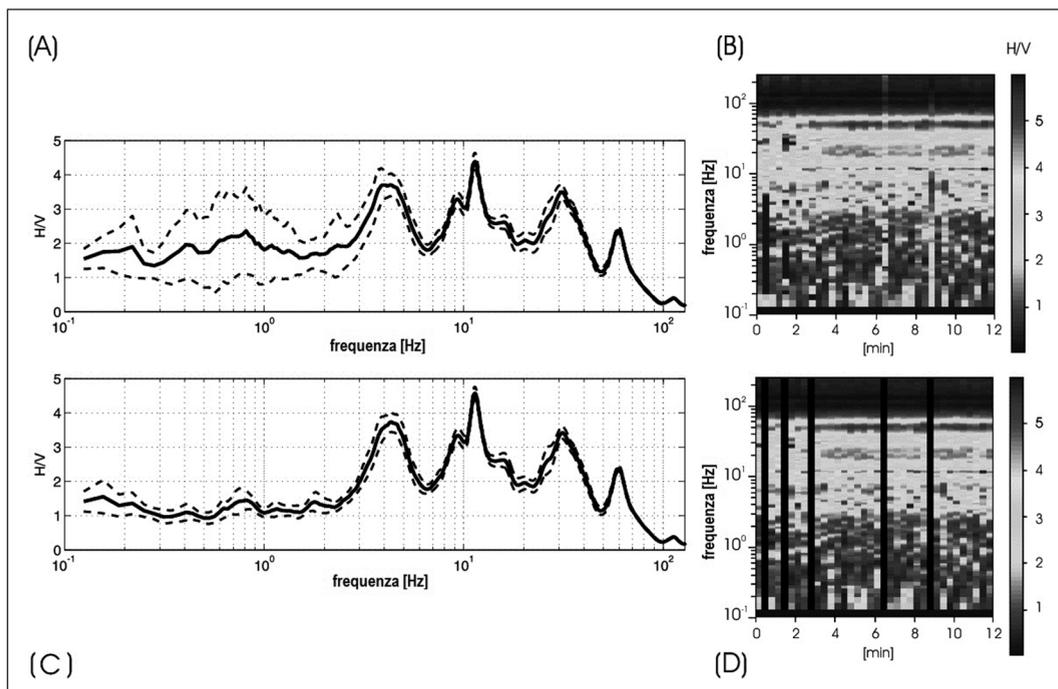


Fig. 4 - Pulizia della curva H/V nel dominio delle frequenze. (A) curva H/V media e deviazione standard non pulita; (B) serie temporale degli H/V per ciascuna finestra di analisi della durata di 20 s (ordinata: frequenze, ascissa: tempi, tono: H/V); (C) curva H/V e deviazione standard dopo la rimozione dei disturbi; (D) serie temporale degli H/V per ciascuna finestra di analisi della durata di 20 s (ordinata: frequenze, ascissa: tempi, tono: H/V) [Ridisegnato da Castellaro e Mulargia, 2009a].

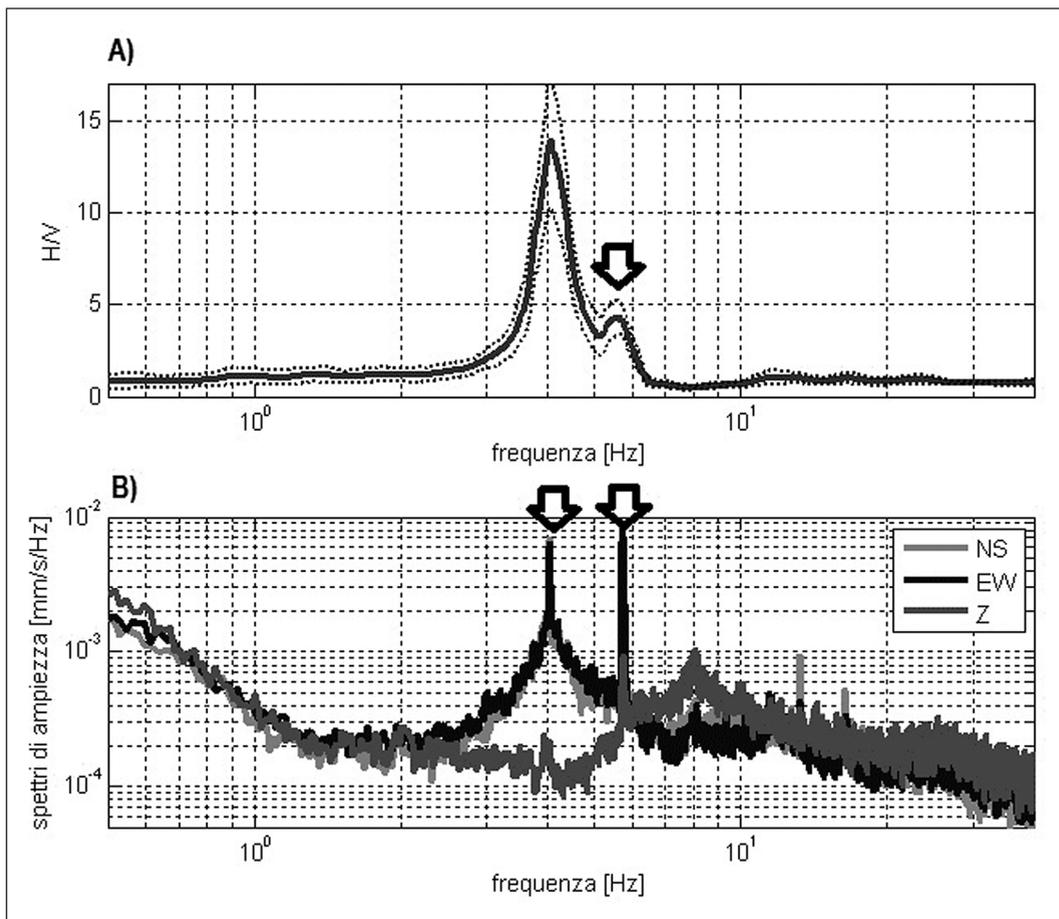


Fig. 5 - Esempio di picco H/V stratigrafico (4 Hz) cui sono sovrapposti due artefatti (a 4 e 6 Hz) di origine antropica. La curva H/V è liscia al 10% della frequenza centrale, gli spettri delle singole componenti non sono liscati.

tipo statistico che hanno lo scopo di segnalare situazioni poco chiare per le quali sono necessarie ulteriori indagini (ripetizione della misura, variazione delle condizioni di accoppiamento con il terreno, ecc.).

La prima parte di questi criteri è dedicata alla valutazione dell'attendibilità statistica della curva H/V. In pratica, individuata la frequenza del picco di risonanza, i criteri aiutano a verificare se la registrazione è stata effettuata per un periodo abbastanza lungo e analizzata per un numero sufficiente di intervalli di tempo adeguati.

La seconda parte è dedicata alla valutazione della chiarezza del picco H/V. In pratica viene analizzata la morfologia del

picco e si valuta semplicemente se il picco ha una forma geometricamente ben definita. Questa parte dei test SESAME va interpretata con cognizione di causa perché solo un contatto netto tra litotipi diversi dal punto di vista meccanico genera picchi nitidi come quelli di Fig. 3a. Al contrario, le transizioni graduali (per es. roccia fratturata su roccia sana, passaggi da limo-argilloso a sabbia-limosa, alternanze di lave con vario grado di alterazione ecc.) generano più spesso amplificazione in una banda larga di frequenze. In questo caso eventuali non superamenti dei criteri SESAME non significano che non ci siano risonanze importanti ma solo che non ci

sono picchi singoli ben definiti. Un esempio è dato in Fig. 6.

Naturalmente, i criteri SESAME (2004) risultano non soddisfatti nei siti che non presentano amplificazione (Fig. 2).

I criteri SESAME (2004) considerano significativi solo picchi con ampiezza H/V superiore a 2. Questo criterio ha carattere puramente empirico. Tuttavia va tenuto presente che massimi H/V di ampiezza inferiore a 2 indicano bassi contrasti di impedenza e, in questo caso, la frequenza corrispondente al massimo della curva H/V potrebbe fornire una indicazione meno precisa della frequenza di risonanza delle onde S. Questo non significa che il massimo osservato non sia fisicamente significativo, ma solo che l'interpretazione della curva va effettuata con maggiore cautela ed utilizzando procedure di inversione più raffinate di quella basata sull'impiego dell'equazione 1.

Come si è detto, questi criteri hanno solo

carattere statistico e non tengono conto di altre caratteristiche del campo di vibrazioni utili per individuare misure potenzialmente poco attendibili. Per ovviare a questi limiti, nell'ambito delle attività di microzonazione successive al terremoto di L'Aquila dell'aprile 2009, sono state definiti altri criteri di classificazione delle misure H/V che integrano le proposte nell'ambito del progetto SESAME (Albarello et al., 2010, Appendice 2). Anche in questo caso, lo scopo è di fornire all'operatore impegnato nell'interpretazione dei risultati alcuni criteri di giudizio sulla qualità delle singole misure.

6. Presentazione dei risultati

Alla luce di quanto finora esposto, ciascuna prova H/V dovrebbe essere corredata da una documentazione adeguata allo scopo di permettere una valutazione indipendente

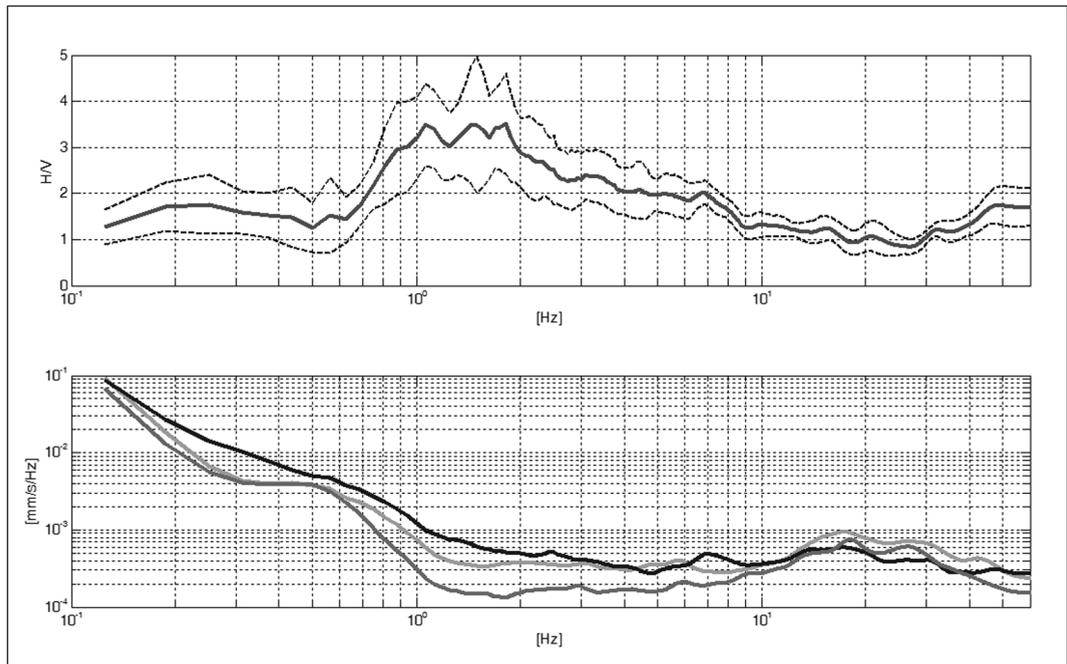


Fig. 6 - Esempio di picco H/V geometricamente meno nitido rispetto agli esempi di Fig. 3. Questo picco non supera i test SESAME (2004) ma presenta una deviazione standard in ampiezza (linee a tratteggio) e in frequenza (non rappresentata ma calcolata) statisticamente significative, pertanto va considerato comunque come risonanza fondamentale del sito.

della qualità e dell'attendibilità della misura. In particolare, questa documentazione dovrebbe contenere le seguenti informazioni:

1) indicazioni sui parametri di acquisizione (strumentazione impiegata, frequenza di campionamento, durata della registrazione),

2) indicazioni sul terreno di misura (naturale, artificiale rigido ecc.), il tipo di accoppiamento suolo-strumento di misura, orientamento dello strumento (una fotografia del terreno su cui è effettuata la misura può rivelarsi utile),

3) indicazioni sulle condizioni meteorologiche durante la misura,

4) curva H/V con deviazione standard in tutto l'intervallo di frequenze analizzato,

5) spettri delle singole componenti del moto (X, Y, Z) nello stesso intervallo di frequenze del punto 4),

6) indicazioni delle frequenze dei picchi H/V significativi e della deviazione della frequenza del picco,

7) parametri di qualità del tipo di quelli proposti dal progetto SESAME (Appendice 1) o di quelli in Appendice 2.

Eventuali indicazioni sintetiche (assenza/presenza di picchi significativi, frequenza e ampiezza del picco) andrebbero comunque corredate da un parametro di qualità del tipo di quelli suggeriti in Appendice 2.

7. Luoghi comuni e cautele

Effetto del vento e altre perturbazioni meteorologiche in una curva H/V

Viene talvolta detto che le condizioni meteo avrebbero influenza sulla forma delle curve H/V. Le condizioni atmosferiche hanno ovviamente effetti sulle ampiezze assolute e sulle forme delle singole componenti spettrali mentre il loro effetto sui rapporti H/V è marginale a frequenze superiori a circa 0.5 Hz.

Sotto questa frequenza l'origine del mi-

crotremore sismico è principalmente atmosferica e oceanica (Gutenberg, 1931; 1936) e poiché riflettori sotto 0.5 Hz sono tipicamente relativi ad un basamento sismico a centinaia di metri di profondità (equazione 1), è evidente che solo le perturbazioni atmosferiche/oceaniche possono mettere in risonanza centinaia di metri di coperture (il passaggio di un camion su una strada, per esempio, non avrebbe energia sufficiente). Pertanto è vero che gli orizzonti profondi si vedono meglio – nei termini delle risonanze che generano – nelle giornate di bassa pressione mentre è un luogo comune poco rispondente al vero il fatto che queste vadano evitate per via dei disturbi che indurrebbero nelle curve H/V.

Solo in aree caratterizzate da un'estesa copertura di erba alta o coltivazioni (es. campi di grano, girasoli), un vento intenso può produrre effetti significativi sulla misura a causa del movimento indotto delle piante su ampie zone di terreno. In queste condizioni si potrebbero ottenere misure di scarsa qualità. Per cui può risultare necessario ripetere la misura in condizioni meteorologiche più favorevoli. In ogni caso, i criteri di valutazione descritti nel paragrafo precedente possono fornire utili indicazioni in questo senso.

Il vento invece può amplificare maggiormente lo spettro dei canali orizzontali rispetto al verticale, spostando così l'intera curva H/V su valori di ampiezza nettamente maggiori di 1. Curve H/V che presentino questa caratteristica in tutto il dominio di frequenze vanno pertanto guardate con sospetto. Il fenomeno è però facilmente riconoscibile ed i suoi effetti negativi si minimizzano accoppiando bene gli strumenti al suolo, usando strumenti con una piccola superficie laterale e senza cavi esterni ed applicando un'efficiente pulizia delle tracce nel dominio delle frequenze.

La pioggia non risulta essere un agente fastidioso per questo tipo di misure a meno che non colpisca direttamente lo strumento di misura.

Effetto della vicinanza di strutture in una curva H/V

È naturalmente vero che come il suolo trasmette il suo moto alle strutture su di esso fondate, queste re-irradiano il loro moto al suolo, in modo che una misura effettuata in prossimità di una struttura può mostrare anche amplificazione alle frequenze dei modi di vibrare della struttura.

Si sente spesso dire che le misure H/V su suolo vadano effettuate ad una distanza dalle strutture circostanti non inferiore alla loro altezza. Tale affermazione deriva da una trasposizione dei risultati derivanti da esperimenti di interazione suolo-struttura condotti in modo attivo (ossia eccitando le strutture con vibratorii *ad hoc*) al caso passivo (ossia a quello in cui le strutture sono eccitate dal solo tremore ambientale). Nel caso attivo le strutture vengono assoggettate a spostamenti dell'ordine di qualche millimetro e la radiazione del moto della struttura al suolo viene percepita fino a distanze pari a 1-10 volte la lunghezza della fondazione.

Nel caso passivo le strutture vengono invece assoggettate a moti che sono 10^4 - 10^6 volte inferiori a quelli del caso attivo. Ne segue che la loro ripercussione sul sottosuolo, trattandosi principalmente di onde di superficie, sarà visibile sino a distanze di 2-3 ordini di grandezza inferiori rispetto al caso attivo. Il problema è stato trattato in Castellaro e Mulargia (2010) e referenze ivi contenute.

Nei casi in cui la radiazione del moto della struttura risulta comunque visibile nella curva H/V, l'osservazione degli spettri delle singole componenti del moto permette di distinguere agevolmente i picchi H/V stratigrafici (freccie in Fig. 3b) da quelli delle strutture antropiche, i picchi di queste ultime sono caratterizzati da massimi spettrali molto stretti (delta) nelle componenti orizzontali o anche nella verticale (a seconda dei modi di vibrare della struttura), difficilmente confondibili con quelli del terreno.

H/V di microtremore e H/V di terremoto

Il microtremore sismico ambientale è un campo d'onde costituito prevalentemente da onde di superficie (Rayleigh e Love), poiché queste si attenuano meno rapidamente delle onde di volume con la distanza. Stante il fatto che le onde di superficie hanno velocità prossime a quelle delle onde di taglio S, è riconosciuta da tempo la coincidenza di frequenze (equazione 1) tra i picchi H/V individuati col microtremore (H/V_{tremore}) e quelli individuati sfruttando come segnale registrazioni di terremoti ($H/V_{\text{terremoto}}$; Mucciarelli et al., 2001 e referenze ivi contenute).

In termini di ampiezza le curve H/V del microtremore possono differire da quelle di terremoto in funzione della magnitudo, della distanza e della profondità dell'epicentro. Nel campo lontano, dove dominano le onde di superficie anche negli H/V da terremoto, esiste anche coincidenza di ampiezze tra $H/V_{\text{terremoto}}$ e H/V_{tremore} . Questa coincidenza non esiste invece necessariamente nel campo vicino. La differenza sta dunque nelle specifiche fasi in cui viene calcolato $H/V_{\text{terremoto}}$ e, in medio-alta frequenza, anche nell'effetto di interazione suolo-struttura presso alcune stazioni di misura.

Quando si effettua una modellazione per ricavare la risposta sismica di sito (per esempio in termini di funzione di amplificazione del moto alle varie frequenze), il modello ottenuto dovrà riprodurre come minimo le frequenze sperimentalmente misurate tramite H/V_{tremore} mentre le ampiezze potranno differire per i motivi su esposti (si ricorda che i modelli di risposta sismica si basano solo sulle onde S, mentre il microtremore è composto prevalentemente da onde di superficie).

8. L'interpretazione delle misure H/V

Le misure H/V possono essere utilizzate negli ambiti:

- 1) della microzonazione sismica (uso esplorativo)

2) della stratigrafia sismica, nel qual caso la tecnica aspira a fornire indicazioni di tipo quantitativo sul profilo di velocità delle onde S nel sottosuolo (uso stratigrafico).

Uso esplorativo delle misure H/V

In questo contesto, le misure H/V hanno lo scopo di individuare la presenza di fenomeni di risonanza sismica dando indicazioni sulle frequenze interessate dal fenomeno. In funzione di questi risultati è possibile fornire indicazioni qualitative e relative sull'entità del contrasto di impedenza responsabile del fenomeno di risonanza e informazioni sullo spessore delle coperture che ne sono responsabili. Elementi chiave di questo genere di applicazione delle misure H/V sono: un buon controllo geologico dell'area di interesse e la disponibilità di un campione significativo di siti di misura (almeno 2 o 3) per ciascuna delle diverse unità litologiche o formazioni affioranti nella zona esplorata e potenzialmente interessanti ai fini della caratterizzazione sismica. Vengono prese in considerazione solo misure di classe A o B secondo la classificazione in Appendice 2. Vengono distinte le misure nelle quali è presente almeno un picco della curva H/V statisticamente significativo nell'intervallo di frequenze di interesse (misure di Tipo 1 secondo la classificazione in Appendice 2) e quelle dove non ci sono picchi significativi (misure di Tipo 2). Le prime saranno rappresentative di siti o unità litologiche caratterizzate da possibili fenomeni di risonanza.

Se tutte le stime H/V dell'area sono state ottenute utilizzando le stesse procedure numeriche per l'analisi del dato (durata delle misure, ampiezza e caratteristiche delle finestre di lisciamento, ecc.) sarà possibile distinguere in prima approssimazione le aree dove ci si aspetta la presenza nel sottosuolo di variazioni significative del contrasto di impedenza sismica alla base delle coperture (ampiezza H/V > 3) da zone dove questi contrasti hanno ampiezze ridotte (H/V < 3). Sulla base delle frequenze di risonanza de-

terminate sperimentalmente sarà poi possibile fornire una stima di massima degli spessori delle coperture soffici responsabili dei possibili fenomeni di risonanza osservati. Un abaco utile in questo senso, che è stato utilizzato nell'ambito delle attività per il livello 1 di microzonazione sismica nell'area interessata dal terremoto aquilano dell'Aprile 2009 (Albarello et al., 2010), è fornito in Tab. 1.

Va sottolineato ancora una volta che i risultati prodotti a partire da un'interpretazione semplificata delle misure H/V, quale quella effettuata mediante l'abaco in Tab. 1, hanno carattere statistico e semi-quantitativo e vanno considerati solo previo confronto con le indicazioni derivanti da prove indipendenti (sezioni geologiche di dettaglio, sondaggi geognostici, ecc.).

Uso stratigrafico delle misure H/V, vincolato a conoscenze dirette

Come già citato, a partire da una misura di frequenza di risonanza, tramite l'equazione 1, è possibile ottenere una stima delle Vs delle coperture, a patto che sia nota la profondità dello strato che la genera, o viceversa. L'equazione 1 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 (Scherbaum et al. 2003; Ohrnberger et al.

Tab. 1 - Abaco per la stima dello spessore delle coperture (h) a partire dai valori delle frequenze di risonanza (f_0) determinate dalle misure H/V.

F_0 (Hz)	h (m)
<1	>100
1-2	50-100
2-3	30-50
3-5	20-30
5-8	10-20
8-20	5-10
>20	<5

2004; Castellaro e Mulargia 2009a; Lunedei e Albarello, 2010). Si sottolinea che – oltre ad un software di calcolo adatto – condizione necessaria 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. In assenza di qualsiasi vincolo esistono infiniti modelli (cioè combinazioni, V_s -H) che soddisfano la stessa curva H/V.

Un esempio di profilo di V_s ottenuto da un adattamento (*fit*) vincolato della curva H/V è dato in Fig. 7, dove la stratigrafia vede la presenza di limi superficiali ed un paleoalveo sabbioso a 2 m di profondità, responsabile della risonanza a 25 Hz. È altresì noto dal contesto geologico che il basamento litoide di tipo calcareo, responsabile della risonanza a 4 Hz, deve trovarsi a qualche decina di metri di profondità.

Una curva H/V piatta (Fig. 2) non può dare informazioni sulle V_s del sottosuolo

perché mancherebbero gli elementi a cui vincolare il *fit*: un modello di sottosuolo che preveda un singolo strato con V_s costante (e di qualsiasi valore) si adatterebbe ugualmente bene alla curva. In presenza di terreni senza contrasti di impedenza, in altre parole, non si possono ricavare informazioni sulla V_s assoluta con il solo metodo H/V+vincolo.

Il modello teorico della curva H/V impiegato nell'esempio di Fig. 7 assume un campo di vibrazioni ambientali composto da onde di Rayleigh e Love in vari modi ed in varie percentuali. Poiché la natura del campo di microtremore è ancora dibattuta a livello scientifico e può essere anche diversa, da sito a sito, il modello di V_s che si ricava da questa tecnica va inteso solo come modello utile a definire la rigidità media degli strati ai fini 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 strati-

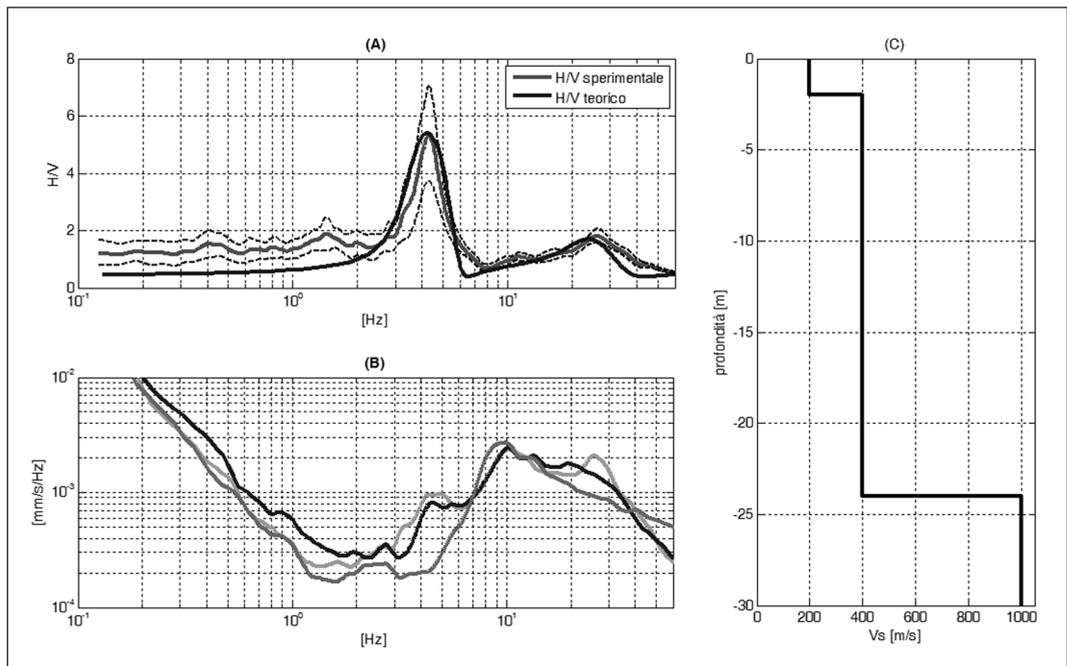


Fig. 7 - A) Curva H/V sperimentale (media a tratto continuo e deviazione standard a tratteggio) e curva H/V teorica ottenuta per il modello di sottosuolo del pannello C); B) spettri delle singole componenti del moto da cui è stata ricavata la curva H/V.

grafica 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.

Uso combinato con tecniche in array

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. È naturalmente possibile anche che il vincolo sia fornito, anziché da H, da indicazioni sul profilo di V_s ottenuto da prove indipendenti, quali quelle “in array” attivo o passivo, in configurazione 1D o 2D (es. f-k, SASW, MASW, ReMi, SPAC, ESAC, FTAN, ecc.).

I modelli sui quali si basa 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 permettono di identificare rapidamente geometrie non 1D.

Il secondo limite di molte tecniche in array (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 rimane quasi tutta confinata nel mezzo tenero e rimane poca energia disponibile per caratterizzare le velocità di propagazione delle onde sismiche nel mezzo rigido (ghiaia) e sotto di esso (Bonney et al., 2008). 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 dalla sola prova in array.

Un esempio di *fit* congiunto di questo tipo è dato in Fig. 8, dove si riportano gli spettri di velocità di fase dell'onda di Ray-

leigh derivanti da una prova MASW (pannello A), la curva H/V sperimentale e teorica ottenuta per il modello di sottosuolo (pannello B) e il profilo di V_s derivato dal *fit* congiunto delle due prove (pannello C).

Effetto delle inversioni di velocità in una curva H/V

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 l'incremento dello stato tensionale geostatico) 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.

Un'inversione di velocità interessa pesantemente le componenti spettrali orizzontali del microtremore mentre lascia la componente verticale quasi inalterata (Castellaro e Mulargia, 2009b, Fig. 9). Ne consegue che in presenza di un'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). Questo può impedire l'individuazione di risonanze esistenti. In questi contesti i picchi di risonanza vanno individuati osservando gli spettri delle singole componenti del moto e non rispetteranno i requisiti SESAME (2004).

Poiché l'interpretazione di una curva H/V che mostri i segni di un'inversione di velocità è più difficoltosa del caso normale, è sempre bene evitare le misure su terreni artificiali rigidi e nel caso in cui questo non fosse possibile si devono adottare gli opportuni accorgimenti interpretativi.

Gli effetti dell'inversione di velocità sono visibili fino a frequenze che dipendono dall'estensione laterale dello strato rigido, oltre

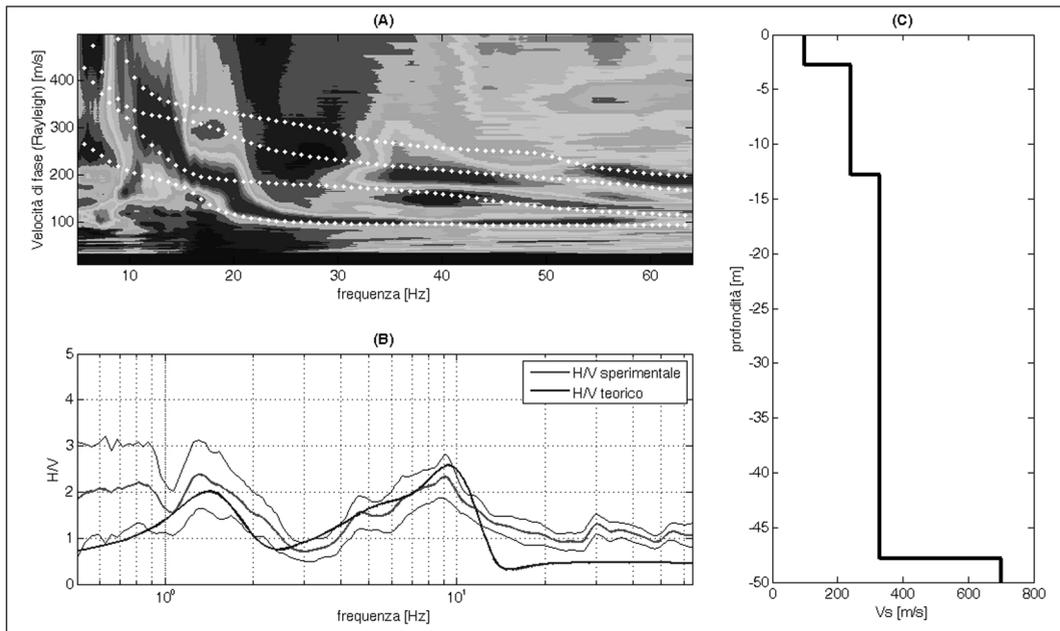


Fig. 8 - A) spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh (countour) e primi 4 modi della curva di dispersione teorica ottenuta dal modello di sottosuolo del pannello C) (pallini bianchi); B) curva H/V sperimentale (media a tratto continuo e deviazione standard a tratteggio) e teorica ottenuta dal modello di sottosuolo del pannello C); C) modello di sottosuolo in termini di Vs derivato dal fit congiunto della prova in array e della prova a stazione singola.

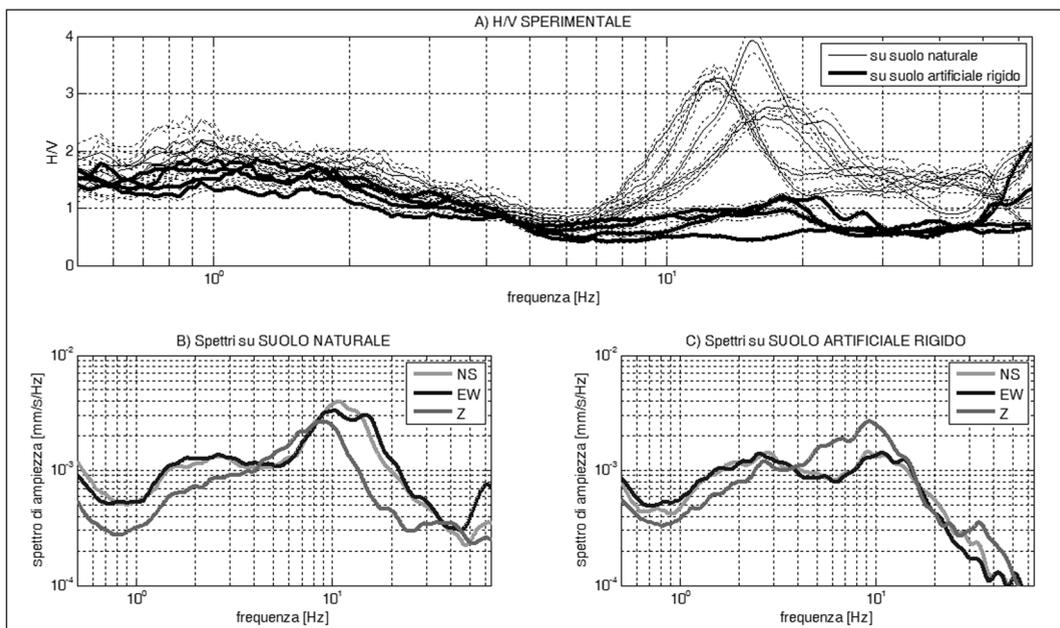


Fig. 9 - A) Confronto tra curve H/V effettuate su terreno naturale (tratto sottile) e artificiale rigido (grassetto), B) spettri delle singole componenti del moto registrati su terreno naturale, C) spettri delle singole componenti del moto registrati su terreno artificiale rigido. È immediato riconoscere in questi la presenza di una inversione di velocità (componente verticale sovrastante le orizzontali per un ampio intervallo di frequenze [4, 50] Hz) [Ridisegnato da Castellaro e Mulargia, 2009b].

che dal suo spessore. Ne segue che misure effettuate all'interno di piccoli scavi o piazzole immerse in un mezzo rigido artificiale (ad es. una piccola aiuola circondata da un piazzale asfaltato sovrastante terreni sciolti) soffrono degli stessi problemi in quanto le componenti spettrali orizzontali del microtremore vengono fortemente attenuate dall'interfaccia rigida circostante. Risulta quindi di poco aiuto l'effettuare un piccolo scavo quando si debba effettuare una misura su una ampia zona artificiale più rigida del terreno sottostante.

9. Conclusioni

La tecnica sismica passiva a stazione singola si è imposta negli anni recenti come uno dei metodi più semplici per ottenere indicazioni circa la possibilità che in un sito esista amplificazione per motivi stratigrafici e, in caso positivo, a quali frequenze. Questa prova permette di evidenziare la presenza di amplificazione per risonanze e/o inversioni di velocità significative ai fini della risposta locale², elementi di cui tener conto nella successiva modellazione sismica di sito. Essa dovrebbe essere eseguita nelle prime fasi delle indagini 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 le successive indagini.

In fase di progettazione, 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 (100-200 m per strutture con

frequenze proprie di 1 Hz) possono diventare non investigabili con la maggior parte delle tecniche geofisiche o in termini di costi, 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 della curva H/V. Pur avendo questo approccio i limiti 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 tramite la tecnica sismica passiva a stazione singola.

Bibliografia

- Albarelo D., Cesi C., Eulilli V., Guerrini F., Lunedei E., Paolucci E., Pileggi D., Puzilli L.M. (2010) - The contribution of the ambient vibration prospecting in seismic microzoning: an example from the area damaged by the 26th April 2009 l'Aquila (Italy) earthquake, *Boll. Geofis. Teor. Appl.*, in stampa.
- Berger J., Davis P., and Ekstrom G. (2004) - Ambient Earth Noise: a survey of the Global Seismic Network, *J. Geophys. Res.*, 109, B11307 10.1029/2004JB003408.
- Bonnefoy-Claudet S., Köhler A., Cornou C., Wathelet M. and Bard P.-Y. (2008) - Effects of Love waves on microtremor H/V ratio, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98, 288 – 300.
- Castellaro S., Mulargia F. (2009a) - V_s 30 estimates using constrained H/V measurements, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99, 761-773.
- Castellaro S., Mulargia F. (2009b) - The effect of velocity inversions on H/V, *Pure Appl. Geophys.*, 166, 567-592.
- Castellaro S., Mulargia F. (2010) - How far from a building does the ground-motion

² Si osservi che in questo capitolo si parla unicamente di amplificazione sismica e non di liquefazioni o cedimenti, argomenti che vanno affrontati con gli strumenti della geotecnica.

- free-field start? The cases of three famous towers and a modern building, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100 (5A), doi: 10.1785/0120090188.
- Castellaro S., Mulargia F. (2011) - A statistical model of the Earth's low seismic noise and its implication for seismic passive surveys, *Seism. Res. Lett.*, sottomesso.
- D'Amico V., Picozzi M., Baliva F. and Albarello D. (2008) - Ambient noise measurements for preliminary site-effects characterization in the urban area of Florence, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98, 1373–1388, doi: 10.1785/0120070231.
- 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.
- Ibs-von Seht M. and Wholenberg J. (1999) - Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 250-259.
- Kanai K. (1957) - The requisite conditions for predominant vibration of round, *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, 31, 457.
- Lunedei E., Albarello D. (2010) - Theoretical HVSR from the full wave field modelling of ambient vibrations in a weakly dissipative layered Earth, *Geophys. J. Int.*, 81, 1093-1108, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04560.x
- Nakamura Y. (1989) - A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface, *QR of RTRI*, 30, 25-33.
- Nogoshi M., Igarashi T. (1970) - On the propagation characteristics of microtremors., *J. Seism. Soc. Japan*, 23, 264-280.
- McNamara D.E., Buland R.P. (2004) - Ambient noise levels in the continental United States, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 1517-1527.
- Mucciarelli M., Gallipoli M.R. (2001) - A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique, *Boll. Geofis. Teorica Appl.*, 42, 255-266.
- Ohrnberger M., Scherbaum F., Krüger F., Pelzing R. and Reamer S.K. (2004) - How good are shear wave velocity models obtained from inversion of ambient vibrations in the Lower Rhine Embayment (N.W. Germany)?, *Boll. Geofis. Teorica Appl.*, 45, 215–232.
- Peterson J. (1993) - Observations and modeling of seismic background noise. U.S. Geol. Survey OpenFileReport 93322, 95 pp.
- Scherbaum, F., Hinzen, K.G. and Ohrnberger, M. (2003) - Determination of shallow shear wave velocity profiles in the Cologne Germany area using ambient vibrations, *Geophys. J. Int.*, 152, 597–612.
- SESAME Project (2004) - Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation, WP12, deliverable no. D23.12, http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Papers/HV_User_Guidelines.pdf (ultimo accesso luglio 2010).

Appendice 1: I criteri SESAME (2004)

Criteri per una curva H/V affidabile [Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]	$f_0 > 10 / L_w$ $n_c(f_0) > 200$ $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$
Criteri per un picco H/V chiaro [Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]	Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ $A_0 > 2$ $f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

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

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

Appendice 2: Classificazione delle misure H/V

Obiettivo della classificazione è fornire una indicazione immediata circa la qualità delle singole misure H/V, con lo scopo di aiutare gli operatori nella fase interpretativa e nel confronto con altri dati osservati. Questo tipo di classificazione trova il suo principale impiego nella redazione delle mappe delle indagini relative al livello 1 della microzonazione sismica. I criteri proposti sono più rigidi di quelli di SESAME in quanto includono elementi di giudizio non contemplati in precedenza, quali:

1. durata complessiva della registrazione che deve essere tale da produrre stime “robuste” del campo medio delle vibrazioni ambientali
2. stazionarietà temporale dei rapporti spettrali
3. isotropia del segnale in termini dei rapporti spettrali
4. assenza di rumore elettromagnetico
5. andamento complessivo della curva H/V

Si confrontano misure ottenute con spettri lisciati con una finestra triangolare al 5% della frequenza centrale. Valori maggiori dell'ampiezza della finestra di lisciamento possono essere utilizzati per migliorare la leggibilità della curva in fase di interpretazione.

Vengono proposte tre classi di qualità:

Classe A: H/V affidabile e interpretabile: può essere utilizzata anche da sola

1. la forma dell'H/V nell'intervallo di frequenze di interesse rimane stazionaria per almeno il 30% circa della durata della misura (*stazionarietà*)
2. le variazioni azimuthali di ampiezza non superano il 30% del massimo (*isotropia*)
3. non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse (*assenza di disturbi*)
4. i massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale (*plausibilità fisica*)
5. i criteri di SESAME per una curva H/V attendibile (primi 3 criteri) sono verificati (*robustezza statistica*)
6. la misura è durata almeno 15/20 minuti (*durata*)

ECCEZIONE: misure effettuate su roccia integra affiorante o in zone alluvionali fini con basamento sismico molto profondo (tipicamente > 1 km) possono non mostrare alcun picco statisticamente significativo della curva H/V nell'intervallo di frequenze di interesse ingegneristico, a causa dell'assenza di contrasti di impedenza sufficientemente marcati. In questi casi, in cui la curva H/V apparirà piatta e con *ampiezza circa pari a 1*, il criterio 5 risulterà non verificato anche se la misura è di fatto attendibile. In questo solo caso la misura può ricadere nella classe A ma si consiglia di ripetere la misura per confermare l'effettiva assenza di massimi significativi.

Classe B: curva H/V sospetta (da “interpretare”): va utilizzata con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze

1. almeno una delle condizioni della classe A non è soddisfatta, a condizione che non si rientri nell'ECCEZIONE citata per la Classe A

Classe C: curva H/V scadente e di difficile interpretazione: non va utilizzata

1. misura di tipo B nella quale la curva H/V mostra una ampiezza crescente al diminuire

della frequenza (deriva), indice di un movimento dello strumento durante la misura

2. misura di tipo B nella quale si evidenzia la presenza di rumore elettromagnetico nell'intervallo di frequenze di potenziale interesse

I criteri delineati sopra non riguardano l'interpretazione in chiave geologico-stratigrafica della curva, per la quale sono richiesti ulteriori criteri (per esempio i criteri SESAME per la "chiarezza" del picco).

Per le sole Classi A e B si possono pertanto definire due sottoclassi delle classi precedenti, ossia:

Tipo 1. Presenta almeno un picco "chiaro" secondo i criteri di SESAME: *possibile risonanza*

Tipo 2. Non presenta picchi "chiari" nell'intervallo di frequenze di interesse: *assenza di risonanza*

Il significato dei simboli utilizzati nelle tabelle che seguono è dato in Appendice 1.

Esempio 1

Classe A1: le variazioni azimuthali non superano il 30% e viene identificato almeno un picco chiaro

Durata registrazione: 0h12'00". Analisi effettuata sull'intera traccia.

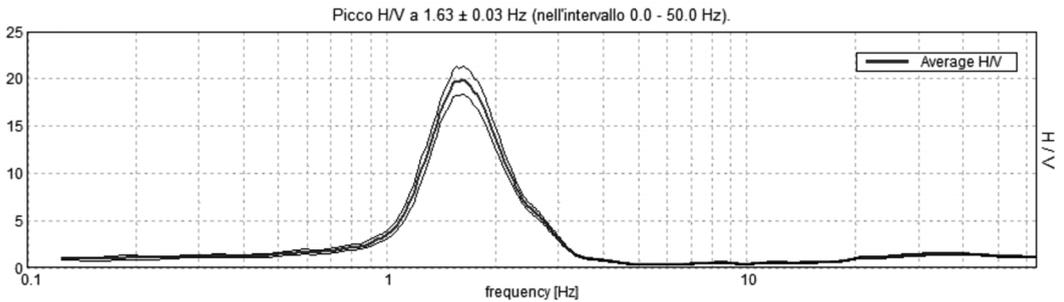
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

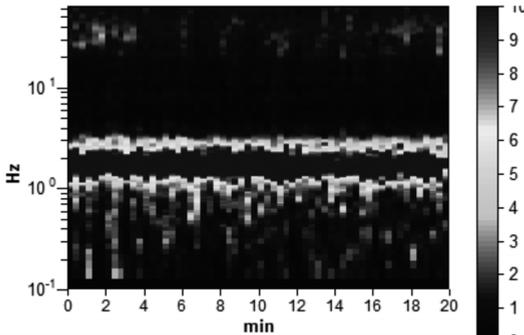
Tipo di lisciamento: triangolare

Lisciamento: 10%

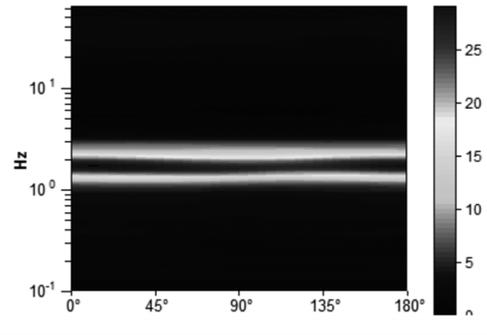
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



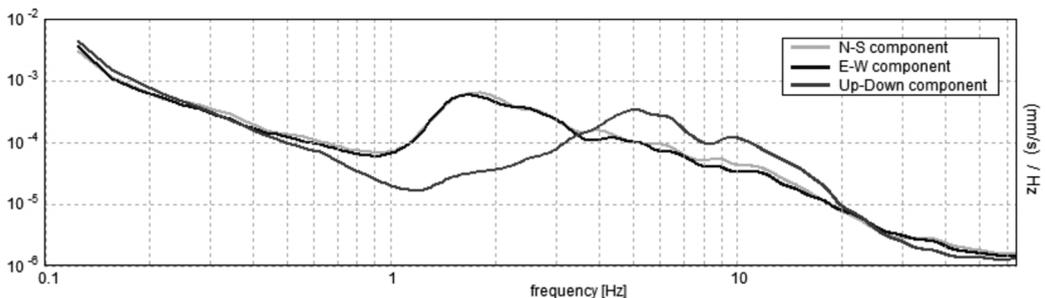
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



Picco H/V a 1.6 ± 0.03 Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$1.63 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$1950.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 79	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	1.219 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	2.219 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$19.86 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.0092 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.01495 < 0.1625$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.7439 < 1.78$	OK	

Esempio 2

Classe B1: non soddisfa la condizione di isotropia ma ha un picco chiaro

Durata registrazione: 0h20'00". Analisi effettuata sull'intera traccia.

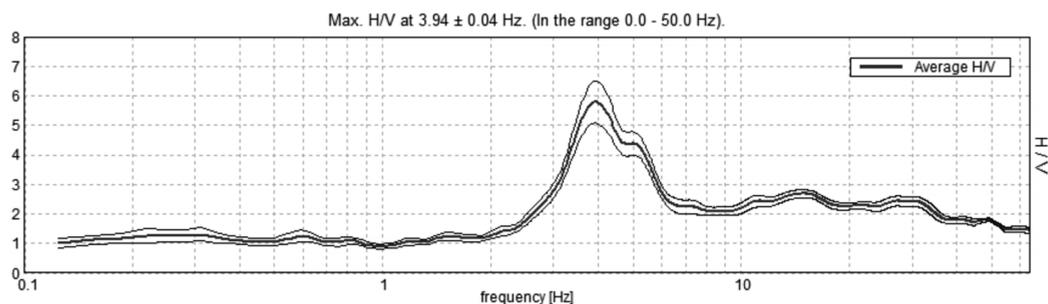
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

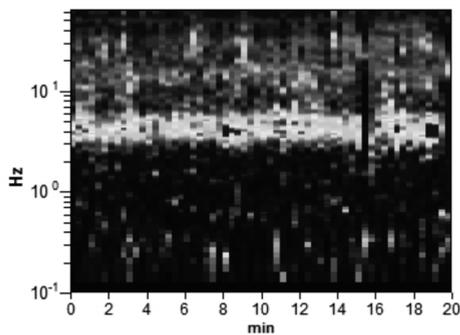
Tipo di lisciamento: triangolare

Lisciamento: 10%

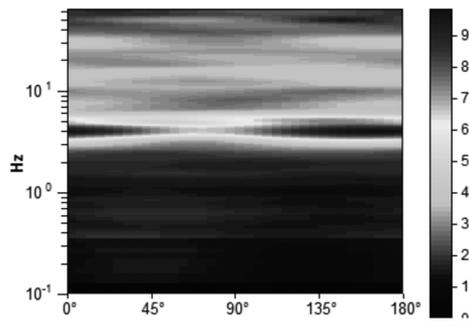
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



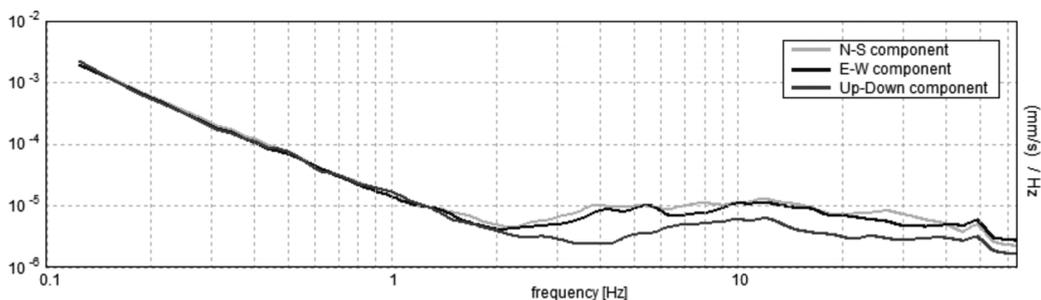
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



Picco H/V a 3.9 ± 0.04 Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$3.94 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$4725.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 190	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	3.031 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	5.938 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$5.79 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00462 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \epsilon(f_0)$	$0.01818 < 0.19688$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3534 < 1.58$	OK	

Esempio 3

Classe B2: forte direzionalità e possibile presenza di disturbi elettromagnetici in assenza di picchi chiari

Durata registrazione: 0h20'00".

Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

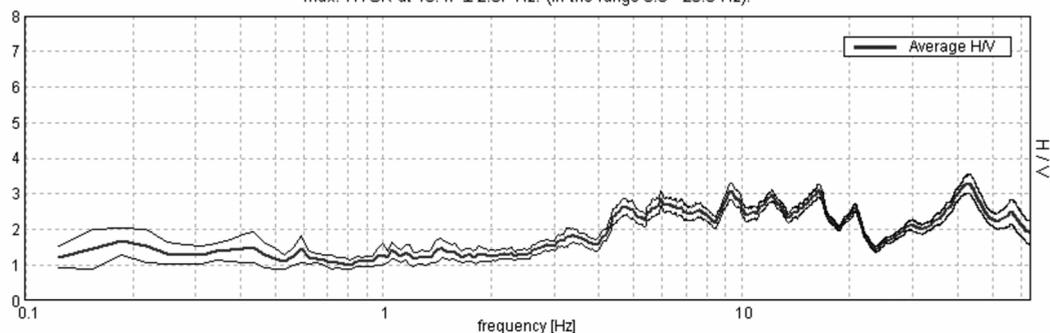
Tipo di lisciamento: triangolare

Lisciamento: 5%

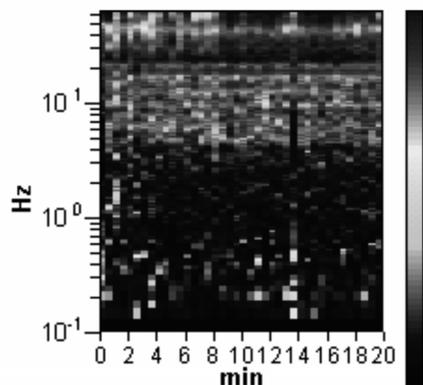
Analisi effettuata sull'intera traccia.

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

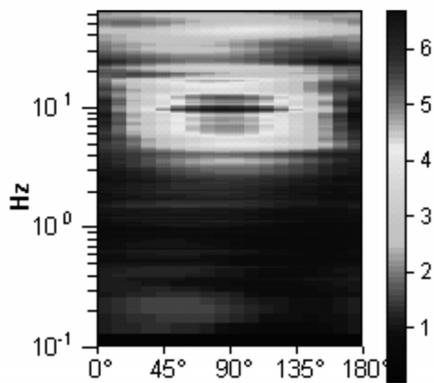
Max. HVSR at 16.47 ± 2.57 Hz. (in the range 0.0 - 20.0 Hz).



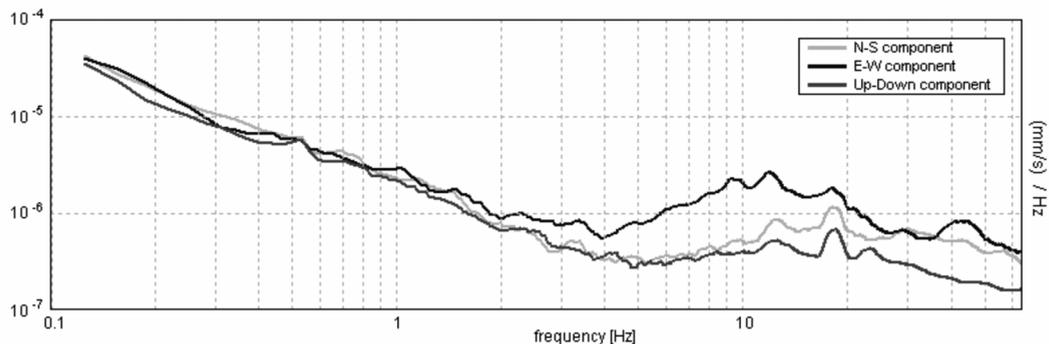
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



Picco H/V a 16.5 ± 2.6 Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$16.47 > 0.33$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$19762.5 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 792 times	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	23.063 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$3.08 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.07625 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$1.25582 < 0.82344$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.0882 < 1.58$	OK	

Esempio 4

Classe C: Misura non interpretabile sopra 1 Hz a causa di forti disturbi elettromagnetici

La forme spettrali e i test SESAME (2004) relativi al picco a 0.4 Hz indicano che esso è di chiara origine stratigrafica. Sopra 1 Hz la curva è però disturbata da un forte disturbo di possibile natura elettromagnetica e quindi non interpretabile in tutta la banda di frequenze di interesse ingegneristico.

Durata registrazione: 0h20'00". Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

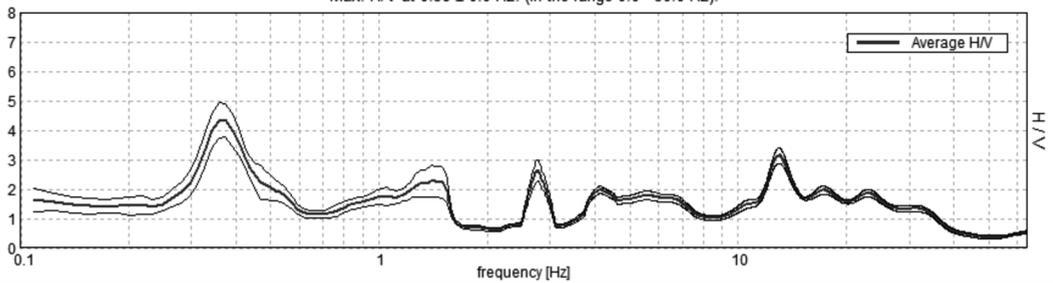
Lunghezza finestre: 40 s

Tipo di lisciamento: triangolare

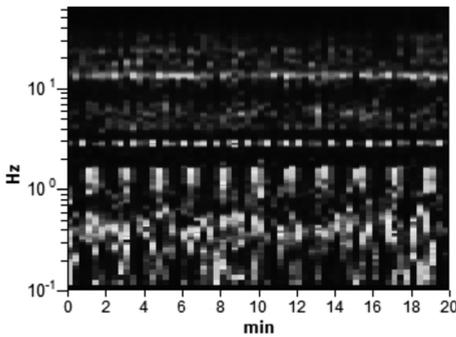
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

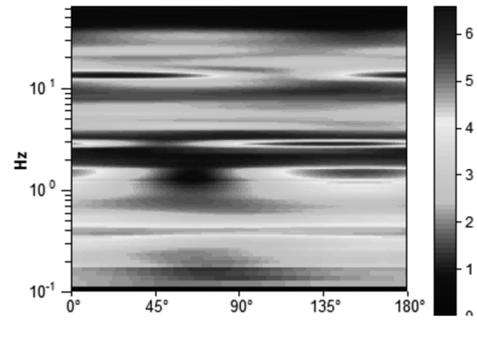
Max. H/V at 0.38 ± 0.0 Hz. (In the range 0.0 - 50.0 Hz).



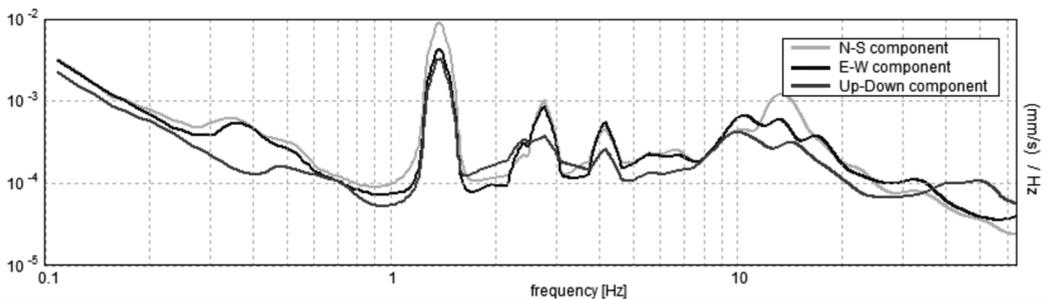
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



Picco H/V a 0.38 ± 0.0 Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.38 > 0.25$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$450.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 37	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^* in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	0.281 Hz	OK	
Esiste f^{**} in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^{**}) < A_0 / 2$	0.484 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$4.34 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00621 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.00233 < 0.075$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2752 < 2.5$	OK	

Esempio 5

Classe C: Misura non interpretabile sotto 2 Hz a causa di deriva dell'H/V legata a un possibile movimento (basculamento) dello strumento

Durata registrazione: 0h30'00".

Analisi effettuata sull'intera traccia.

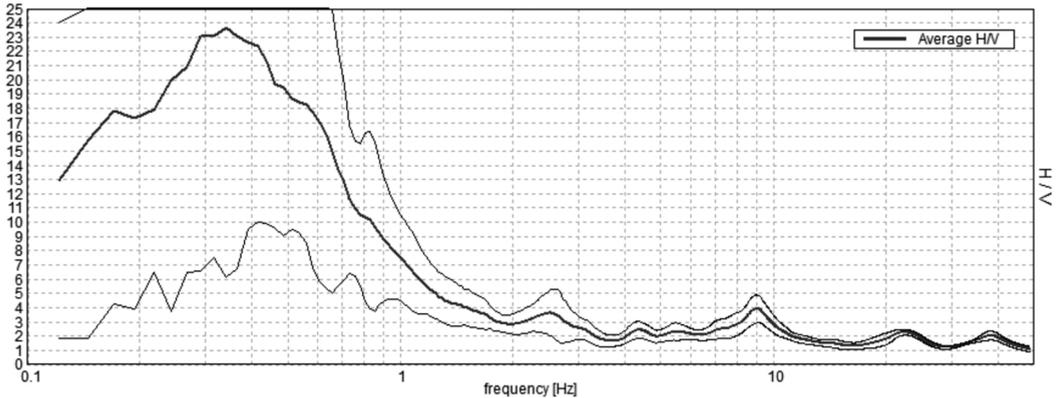
Freq. campionamento: 100 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

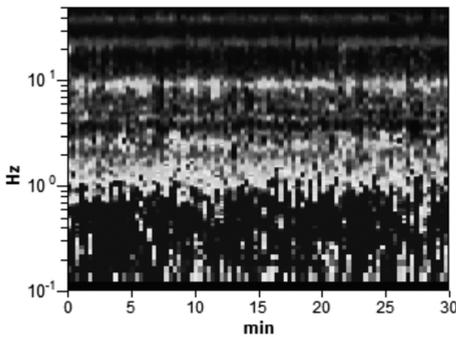
Tipo di lisciamento: triangolare

Lisciamento: 10

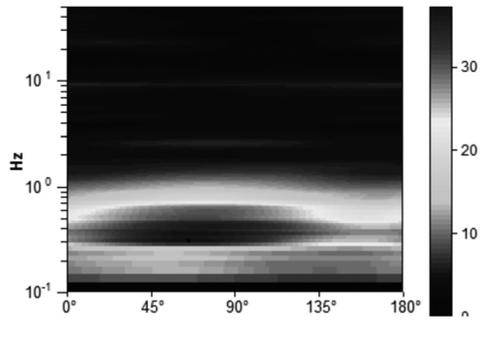
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



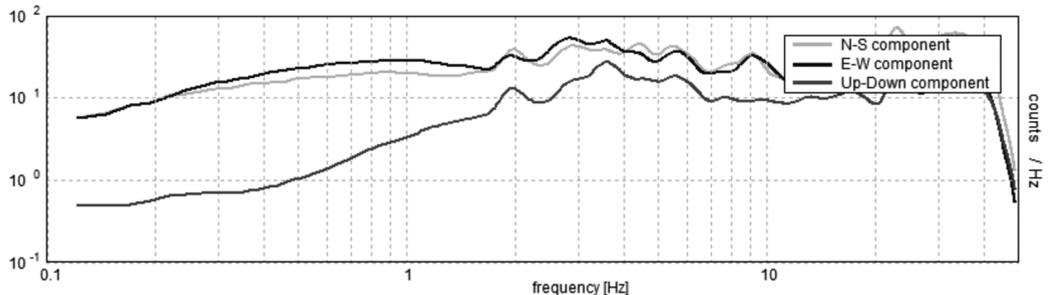
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



Picco H/V a 0.34 ± 0.1 Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.34 > 0.50$		NO
$n_c(f_0) > 200$	$615.2 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 22 volte su 22		NO

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^* in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	0.098 Hz	OK	
Esiste f^* in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	0.732 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$23.66 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.0152 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.0052 < 0.06836$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$8.7476 < 2.5$		NO

Procedura semiquantitativa per stabilire la qualità di una carta di MS di livello 1

Dario Albarello*, Sergio Castenetto**, Giuseppe Naso**

* Università di Siena

** Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico – Dipartimento della Protezione Civile

1. Introduzione

Nell'ambito della sperimentazione degli ICMS (2008) durante la MS dei comuni dell'aquilano colpiti dall'evento del 6 aprile 2009, ci si è posto il problema di definire la qualità delle carte di livello 1 che venivano redatte dai vari gruppi di lavoro.

Si è deciso allora di sviluppare una procedura molto semplice che potesse fornire alcune indicazioni semiquantitative sulla base del numero e della qualità dei dati raccolti per la redazione della carta.

2. Procedura

La procedura prevede 4 fasi:

- 1) Costruire sull'area da investigare un reticolo di celle quadrate, tutte uguali, orientate N-S e E-W, con il lato di 250 m.
- 2) Compilare la matrice della Tab. 1. La tabella prevede 6 **parametri** (carta geologico-tecnica, sondaggi a distruzione, sondaggi a carotaggio continuo, indagini geofisiche, prove geognostiche, misure delle frequenze di sito) ai quali viene assegnato un **peso**; ogni parametro prevede 3 **indicatori** (ognuno degli indicatori ha un peso di 0,33) ai quali verrà assegnato un **punteggio**.
- 3) Applicare la seguente sommatoria per definire il **fattore di qualità FQ**:

$$FQ = \left[\frac{100}{\sum_{i=1}^I P_i} \right] \sum_{i=1}^I P_i \left(\sum_{j=1}^{J_i} \frac{S_{ij}}{J_i} \right) = \left[\frac{100}{4} \right] \sum_{i=1}^I P_i \left(\sum_{j=1}^{J_i} \frac{S_{ij}}{J_i} \right)$$

I=Numero di Parametri

J_i=Numero di Indicatori relativi al parametro i-mo

P_i = peso del Parametro i-mo

S_{ij}=Punteggio relativo all'Indicatore j-mo del Parametro i-mo

FQ = Fattore di qualità (%)

- 4) Associare al risultato (FQ) una **classe di qualità**:

Classe A, valori superiori a 75%; indicazioni nessuna, carta di livello 1 di ottima qualità

Classe B, valori intervallo (50%-74%); indicazioni: migliorare almeno uno dei parametri

Classe C, valori intervallo (25%-49%); indicazioni: programmare indagini che mancano o che sono valutate di scarsa qualità

Classe D, valori inferiori a 25%; indicazioni: la carta di livello 1 è di scarsa qualità e non risponde ai requisiti minimi richiesti da ICMS08.

3. Esempio applicativo

Si applica la procedura a una carta di MS di livello 1 virtuale:

- Carta geologico tecnica (1), recente (1*0.33) alla scala 1:2000 (1*0.33) allegata al piano urbanistico (0.66*0.33) – Tot = **0.87***1
- Sondaggi a distruzione (0.50), in numero di 7 (0.66*0.33) concentrati in una sola cella (0*0.33) con nessuno che arriva al substrato (0*0.33) – Tot=**0.22***0.50
- Sondaggi a carotaggio continuo (1), in numero di uno (0.33*0.33) in una cella (0.33*0.33) che arriva al substrato (0.33*0.33) – Tot=**0.33***1
- Indagini geofisiche (0.50), in numero di 6 (0.66*0.25) su 5 celle (0.66*0.25) con una che arriva al substrato rigido (0.33*0.25) – Tot=**0.42***0.50

Tab. 1 – Parametri, indicatori e loro valutazione per la determinazione della qualità della carta di MS di livello 1.

Parametro	Peso Parametro	Indicatore (peso=0.33)	Valutazione indicatore (punteggio)			
			Nulla (0)	Bassa (0.33)	Media (0.66)	Alta (1)
Carta geologico - tecnica	1	Anno rilevamento	No data	< 2000		> 2000
		Progetto	No data	Altro	Allegato piano urbanistico	Ad hoc
		Scala rilevamento	No data	50.000-26.000	25.000-11.000	10.000-2.000
Sondaggi a distruzione	0.50	Numero di sondaggi a distruzione	No data	1-5	6-10	>10
		Percentuale di celle occupate da sondaggi a distruzione	No data	1-33%	34-66%	>66%
		Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Sondaggi a carotaggio continuo	1	Numero di sondaggi a carotaggio	No data	1-5	6-10	>10
		Percentuale di celle occupate da sondaggi a carotaggio	No data	1-33%	34-66%	>66%
		Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Indagini geofisiche	0.50	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
		Percentuale di celle occupate da indagini	No data	1-33%	34-66%	>66%
		Percentuale indagini che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Prove geotecniche in situ (Prove Penetrometriche, ecc.) e di laboratorio	0.25	Numero di prove	No data	1-5	6-10	>10
		Percentuale di celle occupate da prove	No data	1-33%	34-66%	>66%
		Percentuale prove che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Misure delle frequenze del sito	0.75	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
		Percentuale di celle occupate da misure	No data	1-33%	34-66%	>66%
		Classe di affidabilità misure (Albarellò et alii)*	No data	Classe A < 33%	Classe A 34-66%	Classe A >66%

– Prove geotecniche (0.25), non sono presenti prove - Tot=**0***0.25

– Misura delle frequenze di risonanza (0.75), in numero di 10 (0.66*0.33) distribuiti sulla metà delle celle (0.66*0.33) solo due di classe A (0.33*0.33) – Tot=**0.54***0.75

FQ=(100/4)*(1*(1*0.33+1*0.33+0.66*0.33)+0.50*(0.66*0.33+0*0.33+0*0.33)+1*(0.33*0.33+0.33*0.33+0.33*0.33)+0.50*(0.66*0.25+0.66*0.25+0.33*0.25+0*0.25)+(0.25*0)+0.75*(0.66*0.33+0.66*0.33+0.33*0.33))=**48% (Classe C)**

Commenti al risultato ottenuto:

– la cartografia geologica è buona: soddisfa le condizioni al 90%

– i sondaggi a distruzione sono scarsi: soddisfa le condizioni al 22%

– i sondaggi a carotaggio continuo sono buoni, ma pochi: soddisfa le condizioni al 33%

– le indagini geofisiche sono buone ma scarse: soddisfa le condizioni al 42%

– le prove geotecniche mancano: soddisfa le condizioni allo 0%

– le misure di rumore ambientale tante, ma mal distribuite e di bassa qualità: soddisfa le condizioni al 54%.

Suggerimento: potenziare i sondaggi a carotaggio continuo e fare prove geognostiche.

Risposta sismica locale: la MS come strumento discriminante per l'utilizzo di approcci semplificati o di specifiche analisi

Antonio Colombi*, **Massimo Compagnoni****, **Floriana Pergalani****

* Regione Lazio, Area Difesa Suolo

** Politecnico Milano, Dipartimento di Ingegneria Strutturale

1. Introduzione

Le tematiche inerenti la risposta sismica locale (RSL) sono descritte e sviluppate sia negli ICMS (2008) sia nelle NTC (2008).

Come si evince da quanto previsto nei due documenti, le procedure proposte dal livello 3 delle ICMS08 e dalle NTC08 sono del tutto simili e portano a risultati comparabili, per lo meno nel punto di indagine. Se, quindi, l'unica differenza sostanziale risulta essere l'estensione dell'area da investigare (microzona o area interessata da fondazioni dell'edificio), deriva chiaramente che, anche se le NTC08 si attuano in fase di progettazione, quando è conosciuto il punto preciso di indagine e il tipo di opera mentre la MS si utilizza per la pianificazione di un'area, in sostanza i risultati delle metodologie proposte in IMCS08 e NTC08 esprimono la stessa cosa.

NTC08 prevedono, in alternativa ad analisi specifiche (RSL nel cap. 7.11.3), l'utilizzo, in determinate condizioni, di un approccio semplificato (categorie di sottosuolo nel cap. 3.2.2). Partendo quindi dall'assunto che la Regione o l'Ente locale si sia dotata di una MS di livello 2 o di livello 3, così come definiti negli ICMS08, in che modo gli studi di MS possono orientare nella scelta tra metodi semplificati e analisi di RSL? La domanda pone due problemi, da affrontare sequenzialmente e che sono riassunti nei due quesiti seguenti:

– quale livello di approfondimento di MS (livello 2 o 3) permette di discriminare tra

l'utilizzo dell'approccio semplificato e delle specifiche analisi?

– quali informazioni si possono trasferire a chi deve progettare?

2. Quale livello di approfondimento di MS (livello 2 o 3) permette di discriminare tra l'utilizzo dell'approccio semplificato e specifiche analisi?

L'Autorità competente può scegliere, per la pianificazione territoriale, di prevedere la realizzazione di studi di MS di livello 2 o di livello 3 di approfondimento. Vediamo quali opportunità scaturiscono da questa scelta.

Se la scelta procedurale, prevista dall'Autorità competente, è quella di applicare, in fase di pianificazione, il livello 2 (non arrivare quindi al livello 3), si ritiene che non possano essere fornite indicazioni definitive e l'utilizzo del livello 2 si deve limitare a:

- stabilire una graduatoria di idoneità territoriale, utilizzabile ai fini prettamente urbanistici;
- fornire ulteriori indicazioni sulle aree nelle quali è necessario eseguire studi di MS di livello 3.

La graduatoria di pericolosità locale potrà utilizzare un qualsiasi parametro di amplificazione litostratigrafica e topografica. Negli ICMS08 si è scelto di utilizzare FA e FV, così come definiti negli stessi ICMS08, ma altri parametri, come per esempio FH (rapporti spettrali tra output ed input calco-

lati sugli spettri elastici in accelerazione nell'intervallo di periodo 0.1-0.5 s), possono essere utilizzati.

Nel caso della pianificazione di un'area, sarà logicamente buona norma assicurarsi che i risultati, derivanti dall'esecuzione di uno studio di livello 2, siano rappresentativi di tutte le situazioni sismiche omogenee presenti in quell'area, al fine di poterla suddividere efficacemente in microzone e caratterizzarla dal punto di vista geofisico nel miglior modo possibile, mediante la raccolta di indagini pregresse e eventuale esecuzione di nuovi studi (indagini *ad hoc*).

In questo senso, anche l'acquisizione dei dati del livello 2 (indagini geofisiche) e la scelta degli input sismici per la costruzione degli abachi dovranno essere fortemente condizionati dall'assetto geologico-tecnico e sismotettonico locale (abachi regionalizzati o, ancora meglio, sub regionalizzati).

Per le indicazioni su quali aree sia necessario effettuare studi di MS di livello 3, la verifica sarà effettuata paragonando il valore del fattore di amplificazione ricavato dal livello 2 (abachi regionalizzati) con l'analogo fattore dello spettro previsto dalle NTC08: il confronto dovrà avvenire tra parametri di analogo significato fisico (la proposta degli Autori è di utilizzare FH calcolato su spettri di risposta elastici in accelerazione al 5% dello smorzamento critico nell'intervallo di periodo compreso tra 0.1 – 0.5 s ed FH per lo stesso intervallo, 0.1 – 0.5 s, calcolato sugli spettri derivanti da NTC08) e riferiti allo stesso livello di pericolosità sismica (ovvero allo stesso tempo di ritorno, che normalmente per studi di MS è riferito a 475 anni).

Se il valore di amplificazione rappresentativo di una specifica area, così come calcolato dal livello 2, supera per più del 10% il corrispondente valore di FH tra 0.1 – 0.5 s calcolato sugli spettri derivanti da NTC08, l'area in oggetto dovrà essere analizzata con studi di livello 3.

Se la scelta procedurale dell'Autorità competente è quella di applicare, in fase di

pianificazione, il livello 3 degli ICMS08, allora i risultati puntuali ottenuti avranno sicuramente un miglior dettaglio e affidabilità. In questo caso, il potere discriminante tra l'applicabilità dell'approccio semplificato (NTC08) o e delle specifiche analisi è assicurato, perché, in tal caso, il paragone deve essere fatto direttamente sull'andamento degli spettri di risposta elastici.

In particolare, si confronteranno gli spettri di risposta elastici in accelerazione al 5% dello smorzamento critico calcolati in *free field* e riferiti ad un determinato livello di pericolosità sismica (ovvero ad un determinato tempo di ritorno, che normalmente per studi di MS è riferito a 475 anni) con il corrispondente spettro di risposta elastico assegnato dall'approccio semplificato di NTC08.

Lo spettro di risposta elastico calcolato dovrà essere standardizzato riportandolo nella forma usata da NTC08 ovvero delimitando i tratti ad accelerazione, velocità e spostamento costante.

Il confronto sarà eseguito in termini di valori spettrali e si riterrà accettabile lo spettro proposto da NTC08 qualora lo spettro calcolato presenti differenze inferiori al 10% in corrispondenza del periodo proprio della struttura di progetto.

3. Se si ritiene che il livello 3 della MS possa efficacemente indicare le aree dove è possibile applicare l'approccio semplificato o le specifiche analisi, quali informazioni si possono trasferire a chi deve progettare?

Verificato l'effettivo potere discriminante dei risultati del livello 3, sarà possibile l'utilizzo diretto della categoria di sottosuolo e dei vari parametri determinati (applicazione dell'approccio semplificato NTC08) oppure si potrà stabilire l'obbligatorietà di esecuzione delle specifiche analisi di RSL. La possibilità o meno di avvalersi dell'approccio

semplificato deve scaturire sempre dal confronto di parametri di ugual significato fisico che, in questo caso, sono gli spettri elastici.

Per il livello 3, l'extrapolabilità risulta essere limitata in conseguenza del dettaglio utilizzato, ma l'affidabilità puntuale è elevata e quindi, nel caso di possibilità di utilizzo dei metodi semplificati, si assegnerà direttamente la categoria di sottosuolo.

Nel caso in cui vi fosse una reale impossibilità di tale utilizzo è obbligo prescrivere nel punto analizzato una RSL o, in via alternativa, l'uso dello spettro calcolato.

Rimane comunque stabilito che le RSL sono indispensabili in tutti i casi nei quali il sito non è classificabile nelle 5 categorie di sottosuolo (A,B,C,D,E delle NTC08).

Le situazioni geologiche e geomorfologiche complesse, per le quali i risultati del livello 3 sono sufficienti per decidere l'utilizzo o meno dell'approccio semplificato, a seguito del confronto tra gli spettri calcolati e quelli proposti dalle NTC08, sono:

- substrato rigido sepolto a geometria articolata (presenza di paleovalle, substrato rigido disarticolato da faglie, andamento del substrato a *Horst* e *Graben*);
- zona di raccordo tra rilievo e pianura (zona di unghia con substrato rigido sepolto in approfondimento sotto la pianura, in maniera continua o discontinua);
- geometria del substrato rigido che crea una valle stretta colmata di sedimenti soffici (la valle stretta è definita dal coefficiente di forma, $C=h/l$, dove h è lo spessore della coltre alluvionale, l la sua semiampiezza, se il valore di C è superiore a 0.25, la valle può essere definita "stretta" oppure può essere definita stretta se è verificata la formula $h/l \geq 0.65/\sqrt{C_v - 1}$, dove C_v è il rapporto tra la velocità V_s del substrato rigido e quella media dei sedimenti soffici);
- successione litostratigrafica che preveda terreni rigidi su terreni soffici (profilo di V_s con inversioni di velocità);

- substrato rigido profondo alcune decine di metri;
- presenza di marcati contrasti di impedenza sismica;
- eventuale presenza di aree soggette a instabilità (frane, liquefazioni, cavità sepolte, ecc. nelle quali sono possibili aggravii delle amplificazioni).

Si noti che queste stesse situazioni dovrebbero essere state già valutate preliminarmente nel livello 1 di MS prescrivendo direttamente studi di livello 3.

L'approccio semplificato previsto nelle NTC08 appare purtroppo carente, perché non prevede tutte le situazioni geologico-tecniche e quelle previste sono individuate con criteri insufficienti (utilizzo del solo parametro $V_{s,30}$). Si auspica quindi che venga al più presto migliorata la metodologia, valutando l'opportunità di utilizzare più parametri per l'identificazione delle categorie di sottosuolo.

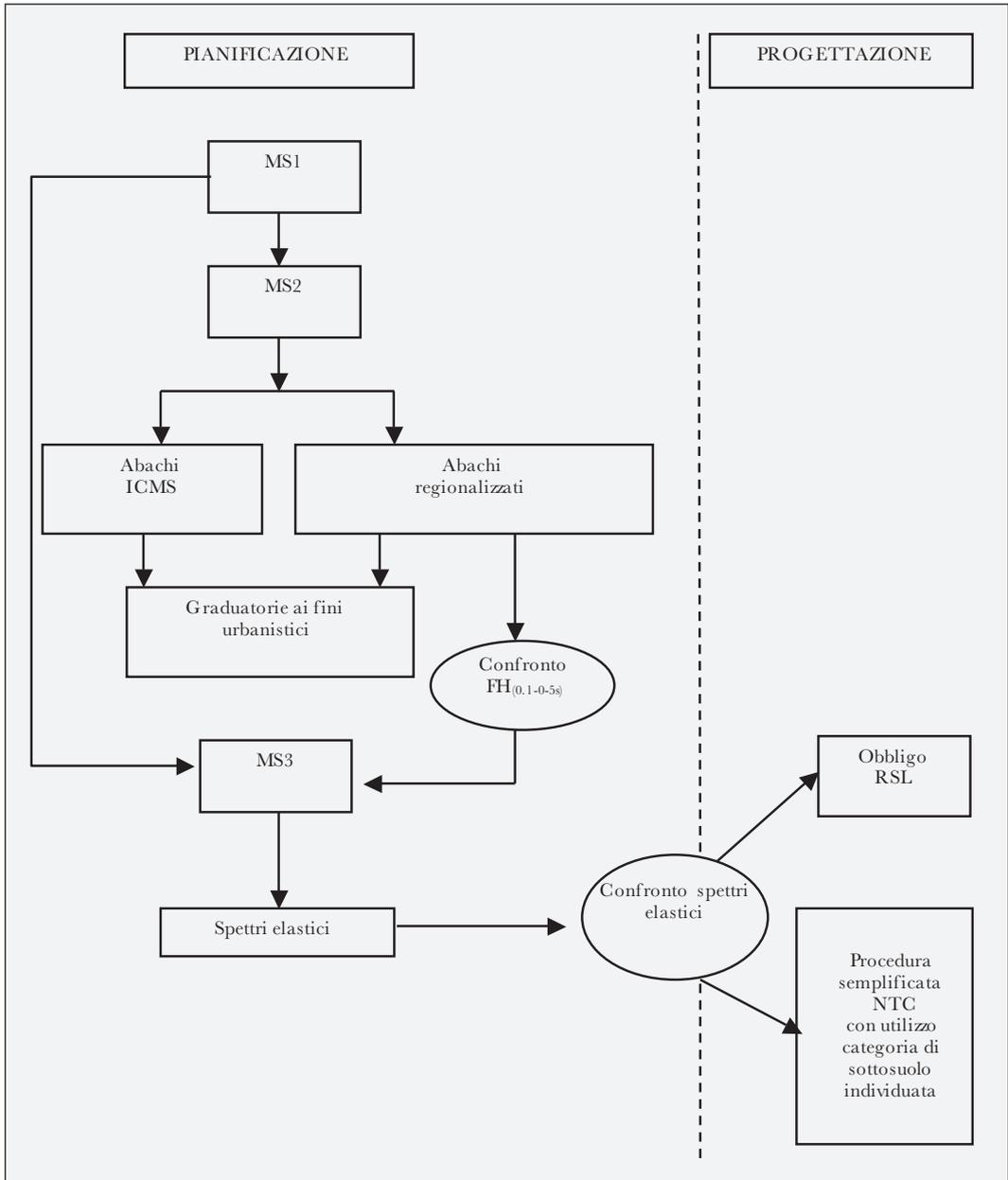
Il percorso di utilizzo della MS per la scelta tra metodi semplificati di caratterizzazione del sottosuolo e specifiche analisi di RSL è sintetizzato nel diagramma di flusso della Tab. 1.

4. Indicazioni generali

Da quanto sopra esposto, si suggeriscono le seguenti indicazioni generali per una efficace applicazione e miglioramento d'utilizzo delle NTC08, a partire dagli studi di microzonazione sismica:

- predisposizione di proposte tecnico-scientifiche di miglioramento della norma per l'approccio semplificato, in modo da rendere possibile, con maggiore consapevolezza e coerenza l'utilizzo di questo tipo di approccio da parte dei progettisti;
- nelle aree identificate dagli studi di MS di livello 3 come "aree ove è possibile applicare l'approccio semplifi-

Tab. 1 – Diagramma di flusso che sintetizza le procedure riportate nel testo.



cato di NTC08”, questa procedura non potrà essere ritenuta valida per tutti gli Edifici Strategici e/o Rilevanti (Municipi, Ospedali, Scuole, Caserme, etc.) per i quali sarà sempre obbligatoria la RSL;

- adozione della procedura di utilizzo degli studi di MS di livello 2 e 3, come sopra illustrato, da parte Amministrazioni Regionali competenti, contestualmente all’atto normativo di recepimento degli ICMS08.