

# Problemi e soluzioni per la corretta definizione del profilo $V_s$ (velocità delle onde di taglio) in studi di geotecnica e microzonazione sismica

di Giancarlo Dal Moro

Eliosoft (www.winmasw.com) Palmanova (UD - Italia)

Institute of Rock Structure and Mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Praga (Rep. Ceca)

## Termini chiave:

MASW multi-componente, ReMi (Refraction Microtremor), SPAC (SPatial AutoCorrelation), ESAC (Extended Spatial AutoCorrelation), HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio), Vs30, Vs equivalente, risonanza, Risposta Sismica Locale, curve di dispersione modale, curva di dispersione effettiva, analisi Full Velocity Spectrum (FVS), analisi congiunta, integrazione di dati, HoliSurface (HS), velocità di fase, velocità di gruppo, RPM (Rayleigh-wave Particle Motion), RVSR (Radial-to-Vertical Spectral Ratio), MAAM (Miniature Array Analysis of Microtremors)

## Keywords:

multi-component MASW, ReMi (Refraction Microtremor), SPAC (SPatial AutoCorrelation), ESAC (Extended Spatial AutoCorrelation), HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio), Vs30, resonance, Site Response, modal dispersion curves, effective dispersion curve, Full Velocity Spectrum (FVS) analysis, joint analysis, data integration, HoliSurface (HS), phase velocity, group velocity, RPM (Rayleigh-wave Particle Motion), RVSR (Radial-to-Vertical Spectral Ratio), MAAM (Miniature Array Analysis of Microtremors)

## Abstract

The article summarizes a series of problems related to the acquisition and analysis of surface waves according to a series of active and passive techniques useful to define the dispersive properties of the medium and eventually obtain a model of the subsoil in terms of shear-wave velocities ( $V_s$ ). The goal is to clarify that behind a series of often-abused acronyms (MASW, ReMi, ESAC, SPAC, MFA/FTAN, HS, MAAM) can hide significant ambiguities and differences that can be solved only by properly considering a series of theoretical facts. We also briefly highlight some fundamental points regarding the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR) and the analysis of borehole seismic

data (VSP, Vertical Seismic Profiling), too often used uncritically, taking for granted a series of assumptions that are not always applicable. Eventually, the difference between joint analysis (a rigorous and quantitative way of analyzing several data) and data integration (a merely qualitative and approximate approach) is also highlighted.

## Riassunto

In questo articolo vengono sintetizzati una serie di problemi relativi all'acquisizione ed analisi delle onde di superficie secondo una serie di tecniche (attive e passive) utili a definire le proprietà dispersive del mezzo e poter poi ricavare un modello del sottosuolo in termini di velocità delle onde di

taglio ( $V_s$ ). L'obiettivo è chiarire come dietro ad una nutrita serie di abusati acronimi (MASW, ReMi, ESAC, SPAC, MFA/FTAN, HS, MAAM eccetera) si possano celare significative ambiguità e differenze che solamente un approccio fondato sulla consapevolezza di alcuni snodi teorici può risolvere e superare.

Analogamente, vengono anche ribaditi alcuni aspetti riguardanti il rapporto spettrale H/V (HVSR) e l'analisi di dati di sismica di pozzo (VSP, *Vertical Seismic Profiling*), troppo spesso utilizzati in modo acritico dando per scontate una serie di assunzioni che la teoria insegna non essere sempre e comunque applicabili.

Viene inoltre puntualizzata la profonda differenza concettuale (e quindi pratica) tra *analisi congiunta* (pratica puntuale e quantitativa) e *integrazione di dati* (modalità del tutto qualitativa e approssimativa).

### **Introduzione: ambiguità terminologiche e alcuni chiarimenti**

Nella sismica non esiste il concetto di *prova* così come viene inteso in geotecnica. La *prova* geotecnica consiste in una serie di procedure completamente standardizzate grazie alle quali i numeri che si ottengono sono tra loro confrontabili in modo semplice e univoco. Le *prove* geotecniche possono quindi essere eseguite da tecnici seguendo dei protocolli standardizzati - cioè uguali per tutti - grazie ai quali i valori ottenuti risultano alla fine confrontabili.

Questo in geofisica non è possibile per almeno due motivi:

- 1) nulla in campagna è di fatto standardizzabile;
- 2) i dati raccolti richiedono sempre e comunque il lavoro di comprensione di un professionista esperto in quella specifica metodologia.

Come non si può parlare di "*prove di sismica a riflessione*" (mai sentito e sarebbe un'assurdità), non si può quindi in nessun modo parlare di "*prove MASW*" (ReMi/ESAC/SPAC/MAAM eccetera), come

pur troppo si sente spesso dire.

Una *prova* fornisce un dato oggettivo, mentre l'analisi di un qualsiasi dato sismico è invece un qualcosa in cui la persona, professionista o ricercatore, dovrebbe far confluire tutte le sue specifiche competenze.

Chiamare *prova* un'indagine sismica significa attribuire ai risultati un valore che prescinde dalle capacità di chi ha acquisito i dati e svolto le analisi. Poiché i fenomeni fisici sono di per sé esatti (la natura non segue leggi diverse a seconda di un capriccio momentaneo), se il profilo  $V_s$  ricavato da, ad esempio, un'indagine MASW è impreciso o errato, lo è perché chi ha analizzato quei dati ha sbagliato il suo lavoro e non perché le onde di superficie "han sbagliato a propagarsi in quel modo". Di fatto, come vedremo in questa nota, tutti gli acronimi utilizzati in questo ambito (MASW, ReMi, SPAC, ESAC, eccetera) sono oramai di fatto del tutto privi di un significato stringente in quanto non descrivono in nessun modo le specifiche modalità di acquisizione e analisi del dato.

Un esempio tra i molti possibili. Se MASW (*Multi-channel Analysis of Surface Waves*) significa *Analisi Multicanale delle Onde di Superficie*, una serie di sostanziali ambiguità comunque sorge:

1) *Surface Waves*: di quali onde (di superficie) stiamo parlando? Rayleigh? Love? Quale componente delle onde di Rayleigh? La verticale e/o la radiale?

2) *Multichannel*: che tipo di geofoni colleghiamo ai vari canali del sismografo? Collegare 12 o 24 geofoni verticali consente, di fatto, di fare molto meno rispetto a quello che si può fare collegando un geofono verticale e uno o due geofoni orizzontali (in questo secondo caso si può infatti andare a definire una numerosa serie di "oggetti di analisi" da considerare per meglio vincolare il modello del sottosuolo - vedi oltre).

3) *Analysis*: come vengono analizzati i dati acquisiti? Utilizzando le curve modali (cosa non sempre possibile)? Utilizzando la curva effettiva (cosa assolutamente necessaria quando si analizzano

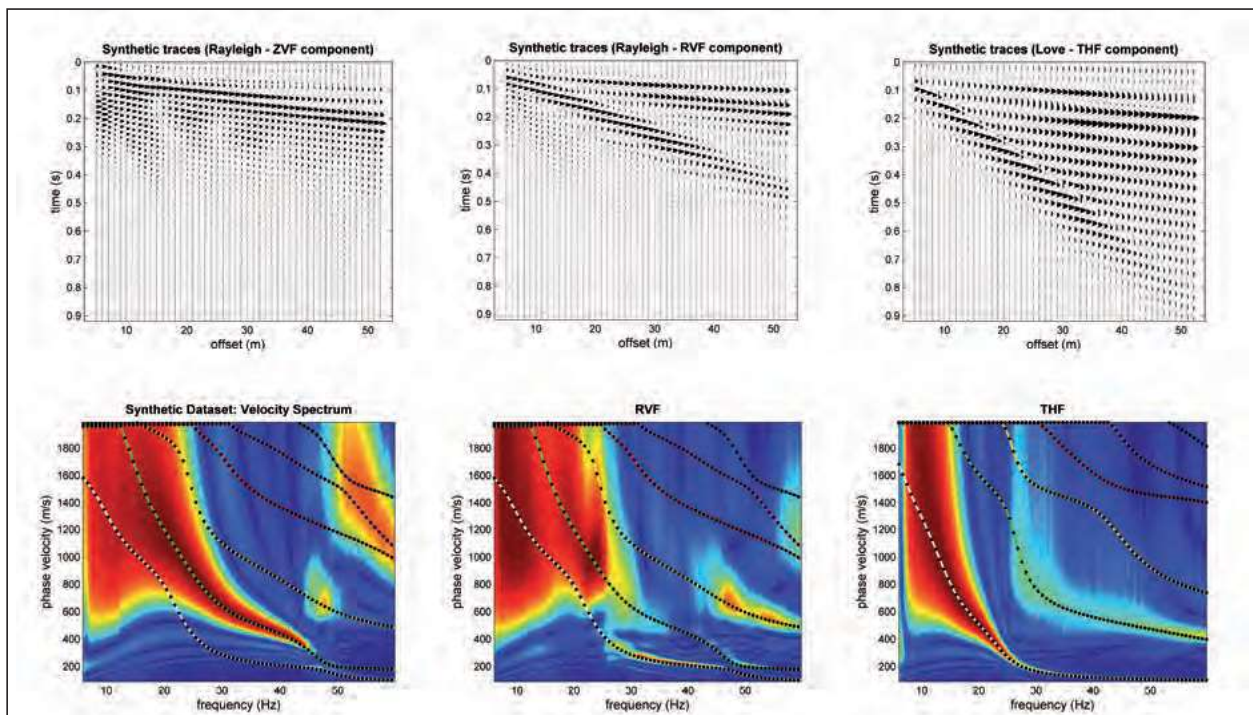
dati passivi da indagini ESAC/ReMi/MAAM)? Utilizzando l'intero spettro di velocità (approccio FVS - *Full Velocity Spectrum*)?

Riguardo poi, ad esempio, le indagini ESAC (fortunatamente le ReMi stanno rapidamente cadendo in disuso) si deve sottolineare come con tale acronimo si definisce unicamente come i dati raccolti in campagna sono elaborati per ricavare lo spettro di velocità, ma il passo successivo (cioè il modo in cui si procede con la modellazione/inversione dei dati) non è in alcun modo definito e codificato ed è assolutamente errato pensare che la curva ottenuta da un'indagine ESAC (o SPAC, o ReMi o MAAM - tutte tecniche passive) sia rappresentativa del modo fondamentale (alcuni dettagli saranno ricordati nel paragrafo finale).

Tutto questo incide inevitabilmente sul contenuto di bandi pubblici o incarichi professionali privati. Da un punto di vista tecnico, infatti, nel momento

in cui un bando menziona ad esempio la tecnica MASW, di fatto non dice nulla proprio perché non definisce quali onde sono utilizzate, se parliamo di velocità di fase o gruppo, di che tipo di analisi, eccetera (vedi ad esempio Dal Moro et al., 2018). È d'altronde del tutto insensato un bando che imponga un numero minimo di canali superiore a 12 per l'effettuazione di un'indagine MASW. In Dal Moro et al. (2003) e Dal Moro (2014 - paragrafo 2.2.1) è mostrato come, per stendimenti di lunghezza non estrema, con anche solamente 12 canali il metodo *phase shift* consenta di ottenere spettri di velocità assolutamente identici a quelli ottenibili con un numero triplo di tracce (ciò che conta non è il numero di canali ma la lunghezza complessiva dello stendimento).

Analogamente, un bando che menzioni l'ESAC o la ReMi senza specificare come poi debba essere modellata/invertita la dispersione risulta del tutto



**Fig. 1** - Da sinistra a destra: tracce sintetiche (in alto) e spettri di velocità di fase (in basso) delle componenti verticale (Z) e radiale (R) dell'onda di Rayleigh e delle onde di Love (componente THF). In sovrapposizione le curve modali teoriche per il modello considerato (da Dal Moro, 2014). Per commenti vedi testo.

vago, lasciando spazio ad interpretazioni personali che possono sfociare in analisi - e quindi in risultati - del tutto errati: la tecnica ESAC è utilizzata per definire la curva di dispersione, ma se poi tale curva viene invertita considerandola come rappresentativa del modo fondamentale si commette un macroscopico errore (le curve di dispersione derivanti da tecniche passive vanno modellate facendo riferimento non alle curve modali ma alla *curva effettiva* così come definita ad esempio in Tokimatsu et al., 1992).

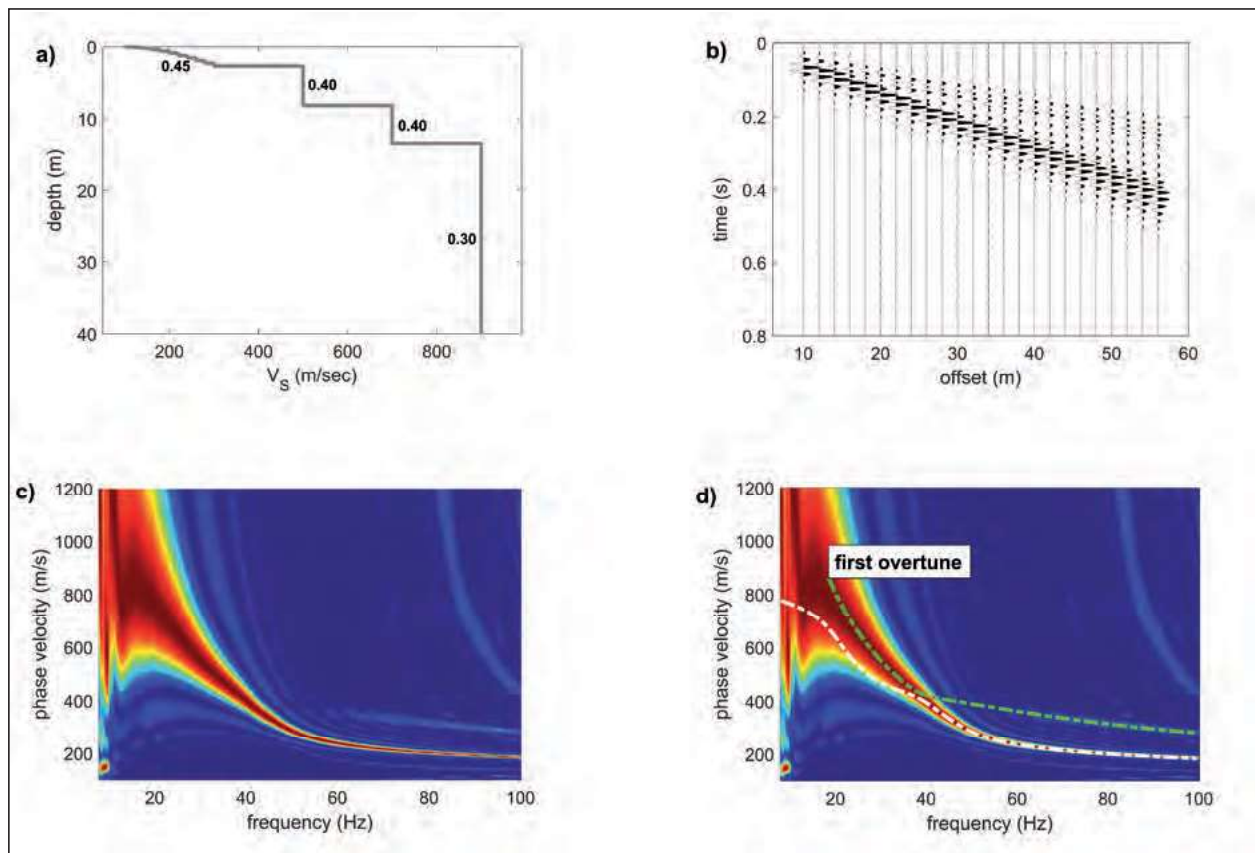
Considerata l'opacità di molte procedure, sarebbe incidentalmente auspicabile che, assieme alla relazione geologica/sismica, si rendesse obbligatorio il deposito dei relativi dati sismici acquisiti e analizzati. In questo modo, tanto i committenti che gli enti di controllo sarebbero nelle condizioni

di procedere a verifiche tecniche puntuali e non meramente formali.

### Come si comportano le onde di superficie (e non solo)

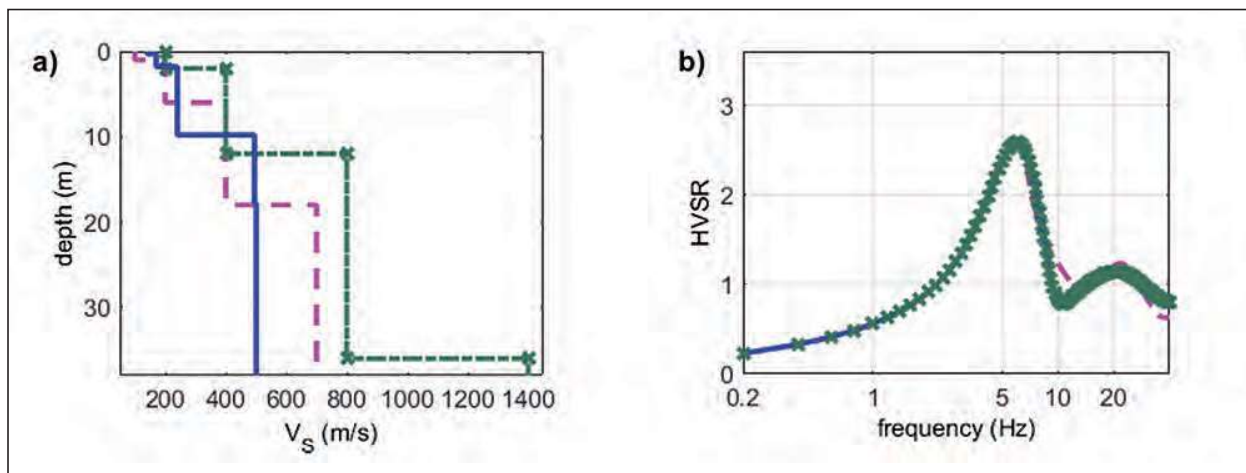
I dati illustrati nelle prime tre figure di questa nota mirano a ricordare e sottolineare quanto complessa possa risultare l'analisi delle onde di superficie (delle onde di Rayleigh in particolare) e, quindi, quanto siano infondate molte semplificazioni e assunzioni da molti spesso purtroppo adottate.

La Fig. 1 riporta le tracce sismiche sintetiche per un modello (noto in quanto fissato da noi) del sottosuolo (per maggiori dettagli vedi Dal Moro, 2014). Sono riportate le onde di Love ed entrambe



**Fig. 2** - Dati sintetici: a) modello  $V_s$  (i numeri indicano i rapporti di Poisson adottati); b) tracce sintetiche (componente verticale); c) spettro di velocità di fase; d) spettro di velocità di fase con, sovrapposte, le curve modali teoriche dei primi due modi. È chiaro come il modo fondamentale e il primo superiore si uniscano (in questo caso a circa 40 Hz) e non possano quindi essere distinti.

Fig. 3 - Modellazione dell'HVSR e non univocità della soluzione.



le componenti delle onde di Rayleigh (la verticale Z e la radiale R).

Dal confronto tra spettri di velocità (colori in sottofondo) e curve modali in sovrapposizione (note in quanto stiamo analizzando un dataset sintetico), è possibile comprendere come la componente verticale delle onde di Rayleigh (quella che molti considerano erroneamente la *classica* MASW) risulti in sostanza dominata esclusivamente dal primo modo superiore (con porzioni di modi superiori a frequenze maggiori di 50 Hz).

Le conseguenze sono inevitabili: chi dovesse interpretare il segnale che domina lo spettro di velocità a frequenze inferiori a 50 Hz come modo fondamentale (cosa inevitabile considerato che è l'unico segnale di fatto presente) andrebbe a sovrastimare pesantemente i valori di  $V_s$ .

È altresì chiaro come le altre componenti mostrino con maggiore chiarezza significative porzioni del modo fondamentale e risulterebbero quindi fondamentali per una corretta comprensione e interpretazione del dato sismico.

Da un punto di vista pratico la procedura “minima” da adottare in caso di acquisizioni del tipo MASW è assolutamente elementare: utilizzando anche solamente 12 geofoni orizzontali è possibile infatti acquisire tanto le onde di Love che la componente radiale delle onde di Rayleigh (le

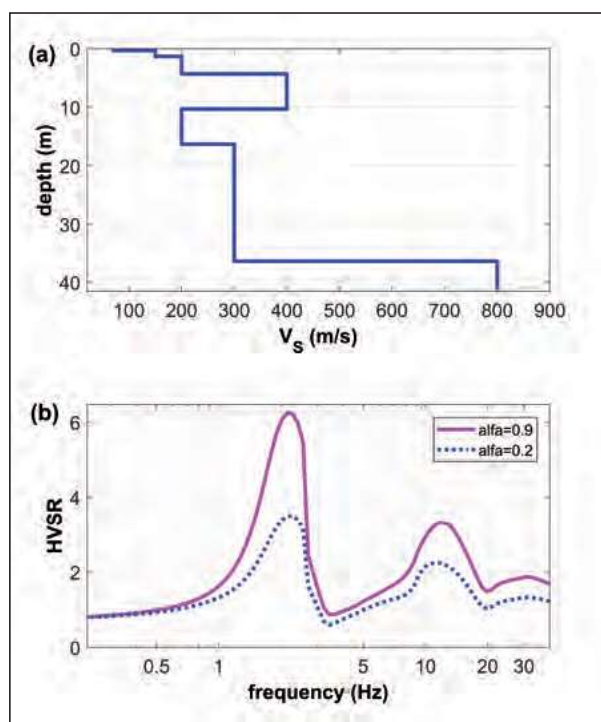
semplicissime procedure di campagna sono ampiamente descritte in Dal Moro, 2012).

Così facendo ci porteremmo a casa due componenti avendo investito solamente un paio di minuti in più (considerato che raggiungere il sito oggetto di indagine ed installare e poi disinstallare la strumentazione richiede, in genere almeno un paio d'ore, due minuti di fatto non incidono in nessun modo sull'economia dell'acquisizione e consentono di acquisire molti più dati utili ad evitare pericolosi errori interpretativi).

È da ribadire come l'utilizzo di 24 geofoni sia del tutto inutile nel momento in cui gli spettri di velocità sono computati con il metodo *phase shift* e non con il metodo *f-k* (per dettagli vedi Dal Moro et al., 2003 e Dal Moro, 2012).

La Figura 2 riporta un ulteriore esempio di dataset sintetico relativo alla componente verticale delle onde di Rayleigh (quella purtroppo spesso utilizzata come unico oggetto di analisi). In questo caso, modo fondamentale e primo superiore si uniscono attorno ai 40 Hz in modo tale da risultare di fatto inscindibili: chi dovesse analizzare questi dati sarebbe inevitabilmente portato a pensare che il segnale di Fig. 2c si riferisce ad un unico modo (magari proprio quello fondamentale) mentre, in realtà, da 40 Hz in giù l'energia si riferisce unicamente al primo modo superiore. La conseguenza

**Fig. 4** - Onde di Love e modellazione della curva HVSR: a) profilo  $V_s$  considerato; b) curve HVSR ottenute dal modello sopra indicato (anche tutti gli altri parametri del modello del sottosuolo sono invariati) considerando una diversa quantità di onde di Love nel campo dei microtremori (parametro  $\alpha$  - in un caso fissato al 20%, nell'altro al 90%). Da Dal Moro (2014) (vedi anche Arai e Tokimatsu, 2004). Ulteriori commenti nel testo.



è, di nuovo, che analisi svolte facendo affidamento unicamente su questa (unica) componente porterebbero inevitabilmente a erronee stime delle  $V_s$ . Va certamente sottolineato come la presenza di modi superiori non sia di per sé un problema. Lo è la loro mancata o errata identificazione (nel successivo paragrafo si chiarirà come è possibile affrontare e risolvere il problema).

Considerato l'abuso che si tende a fare in Italia del rapporto spettrale H/V, in Figura 3 e 4 si ricordano brevemente tre fatti principali:

**1)** in relazione all'utilizzo dell'HVSR per ricavare informazioni inerenti il profilo  $V_s$ , va ricordato come, anche in condizioni ideali (vedi successivi punti), la curva HVSR soffre pesantemente della cosiddetta **non-univocità della soluzione** (diversi modelli del sottosuolo hanno la medesima curva HVSR - vedi Figura 3) e l'utilizzo di dati

penetrometrici non è sufficientemente vincolante (Dal Moro e Puzzilli, 2017);

**2)** la curva HVSR osservata in campagna (molto vi sarebbe da dire sull'accuratezza dei dati non sempre raccolti in modo rigoroso) non dipende unicamente dal profilo  $V_s$  ma in una certa misura anche dagli altri parametri visco-elastici ( $V_P$  e fattori di qualità), nonché dalla quantità di onde di Love effettivamente presenti nel campo dei microtremori di fondo (vedi Figura 4);

**3)** la curva HVSR non rappresenta *sic et simpliciter* l'amplificazione di sito (vedi esempio riportato in Figura 5) e l'amplificazione di sito non rappresenta in nessun modo una sintesi del "rischio sismico" (espressione quanto mai generica e abusata) che è, invece, determinato innanzitutto dalle caratteristiche del sisma, cioè dal suo meccanismo focale, spettro e azimuth/orientazione della sorgente, meccanismi di attenuazione, eccetera (Panza e Peresan, 2016). In altre parole, quello che si deve verificare attraverso una puntuale analisi delle caratteristiche sismogenetiche dell'area è quale sia la distribuzione di energia alle varie frequenze. Se ad esempio (e dovendo qui semplificare) l'energia che una certa tipologia di sismi genera attorno ai 4 Hz fosse significativamente inferiore rispetto a quella attorno ai 10 Hz, un'eventuale locale amplificazione attorno ai 4 Hz non genererebbe necessariamente un particolare pericolo rispetto quest'ultima frequenza.

Ritenere che con  $V_{s30}$  (o, seguendo le NTC2018, le  $V_s$  equivalenti) e HVSR si possa affrontare una seria caratterizzazione del rischio sismico rappresenta una grossolana e pericolosa semplificazione, che in Italia si osserva anche in relazione ad importanti opere di carattere strategico progettate, contro le stesse indicazioni delle NTC e in assenza di reali e puntuali controlli tecnici, con una caratterizzazione di sito del tutto inadeguata o palesemente errata nel metodo e/o nel merito.

Un fattore poco noto inerente la modellazione della curva HVSR riguarda, come accennato nel secondo punto, il contributo delle onde di Love. In

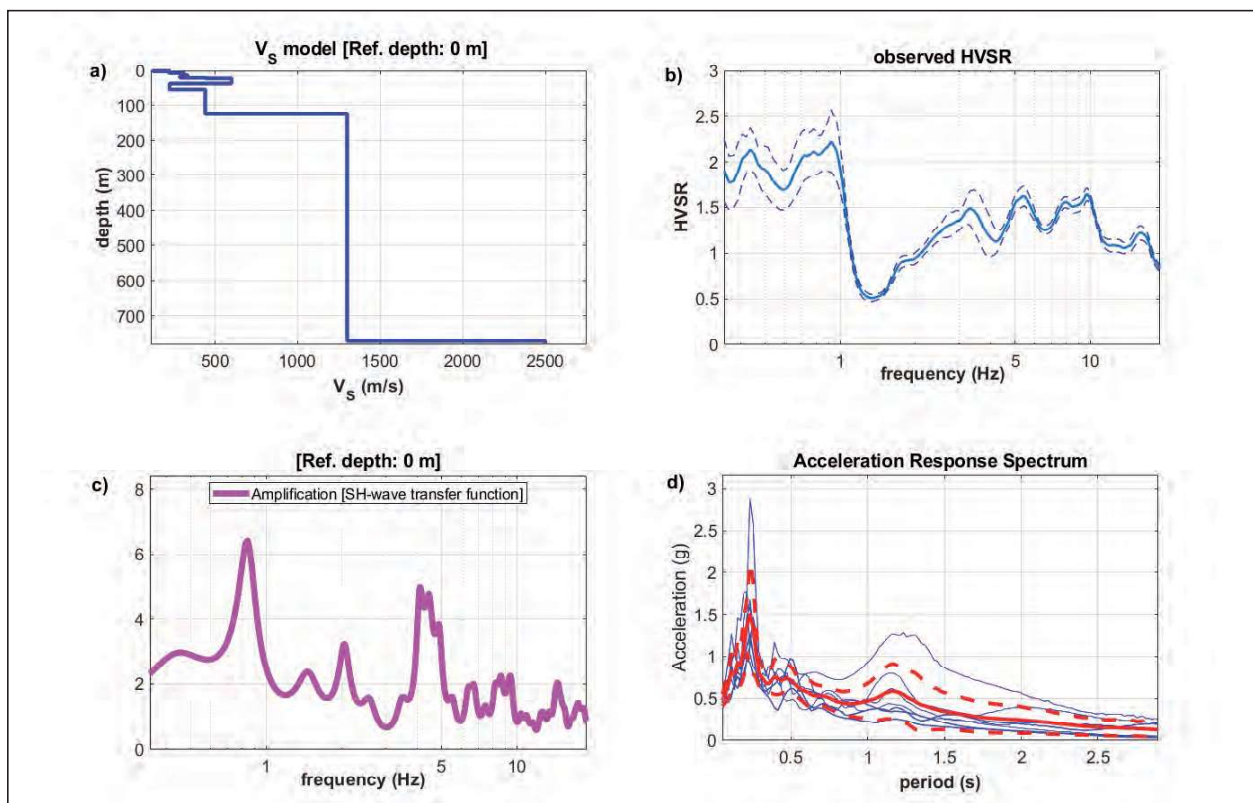
Figura 4 sono riportate due curve HVSR computate a partire dallo stesso modello di sottosuolo al variare della quantità di onde di Love nel campo dei microtremori. Tale valore, sintetizzato dal parametro  $\alpha$  (vedi Arai e Tokimatsu, 2004 e Dal Moro, 2014), esprime la quantità di onde di Love rispetto a quelle di Rayleigh.

Chiaramente, muovendosi unicamente lungo il piano orizzontale, una maggiore quantità di onde di Love determinerà un aumento del moto sul piano orizzontale e quindi del rapporto H/V, andando quindi ad aggiungere una ulteriore fonte di indeterminazione alle modellazioni della curva HVSR. Va infatti ricordato come l'HVSR possa variare a seconda delle condizioni meteo-climatiche che modificano le caratteristiche del campo dei

microtremori.

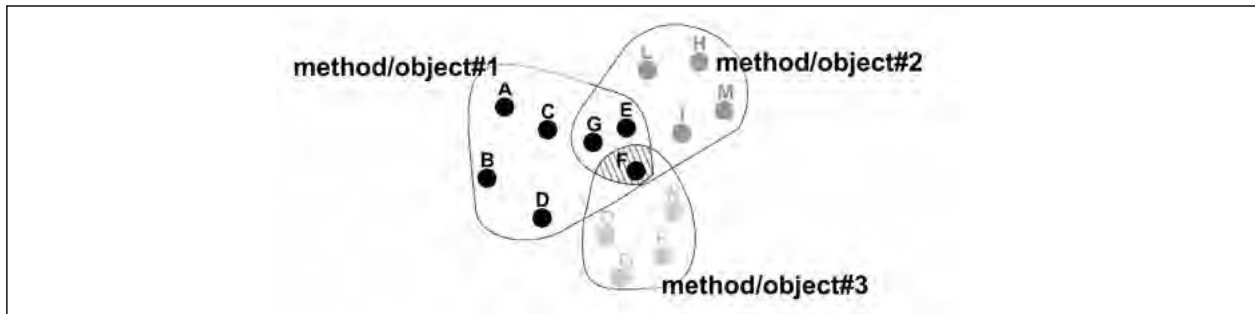
Riguardo la cosiddetta (e spesso malamente intesa) amplificazione di sito, da non confondersi in alcun modo con l'effettiva pericolosità di sito che per essere puntualmente determinata richiede la definizione delle caratteristiche spettrali del sisma, in Figura 5 si riportano alcuni dati riguardanti un lavoro svolto per la caratterizzazione dei terreni circostanti una grande diga lungo il fiume Reno (Germania).

Sono presentati il profilo  $V_s$  determinato dall'analisi congiunta dei dati (più avanti si sottolineerà la differenza tra reale *analisi congiunta* e mera *integrazione di dati*), la curva HVSR di campagna e la funzione di trasferimento delle onde SH che descrive (in prima battuta) l'amplificazione di sito.



**Fig. 5** - HVSR e amplificazione di sito: a) profilo  $V_s$  identificato tramite analisi congiunta di diverse componenti (vedi paragrafo successivo e bibliografia); b) HVSR di campagna (uno degli oggetti considerati nell'analisi congiunta); c) funzione di trasferimento delle onde SH (cioè la funzione di amplificazione che, come si vede, risulta significativamente diversa rispetto la curva HVSR di campagna); d) spettri di risposta determinati considerando 6 diversi possibili sismi di input.

Fig. 6 - Schema concettuale di un'analisi congiunta (vedi testo).



A questo proposito si deve anche ricordare come le NTC2018 (D.M. 17 gennaio 2018), oltre a modificare leggermente le definizioni di categoria di suolo, tendano a dare una certa enfasi alla Risposta Sismica Locale. Quest'ultima può in effetti essere più articolata di come spesso si tende ad assumere in maniera monolitica e poco consapevole - vedi ad esempio il dibattito sulla correttezza dell'approccio probabilistico (PSHA - *Probabilistic Seismic Hazard Assessment*) rispetto all'approccio fisico (NDSHA - *NeoDeterministic Seismic Hazard Assessment*) (Panza e Peresan, 2016).

Come conseguenza della riduzione del lavoro del professionista a mero fatto burocratico, si è infatti completamente perso di vista il reale significato fisico che avrebbe dovuto animare la lettera della legge. In questo senso, e considerata la quantità di analisi e relazioni del tutto errate depositate in tutti gli uffici pubblici, risulta assolutamente profetico il monito di Umberto Galimberti: *Il carattere a finalistico della tecnica, che non si muove in vista di fini ma solo di risultati che scaturiscano dalle sue procedure, abolisce qualsiasi orizzonte di senso, determinando così la fine della storia come tempo fornito di senso (Psiche e techne, Umberto Galimberti).*

Se la citazione può risultare sin troppo alta, nei fatti identifica un punto cruciale di questi 10 anni di NTC: l'utilizzo di metodologie mal comprese da parte di molti professionisti e organi di verifica ha ridotto una legge potenzialmente ben strutturata in un'applicazione acritica di tecniche non

adeguatamente intese nel loro senso. Il lavoro di verifica sismica è di fatto divenuto un fatto di *routine* il cui unico scopo è quello di chiudere una pratica burocratica (che di fatto non subirà un serio e puntuale controllo di carattere tecnico) e non quello di fare in modo che un'opera possa reggere alle sollecitazioni di un sisma.

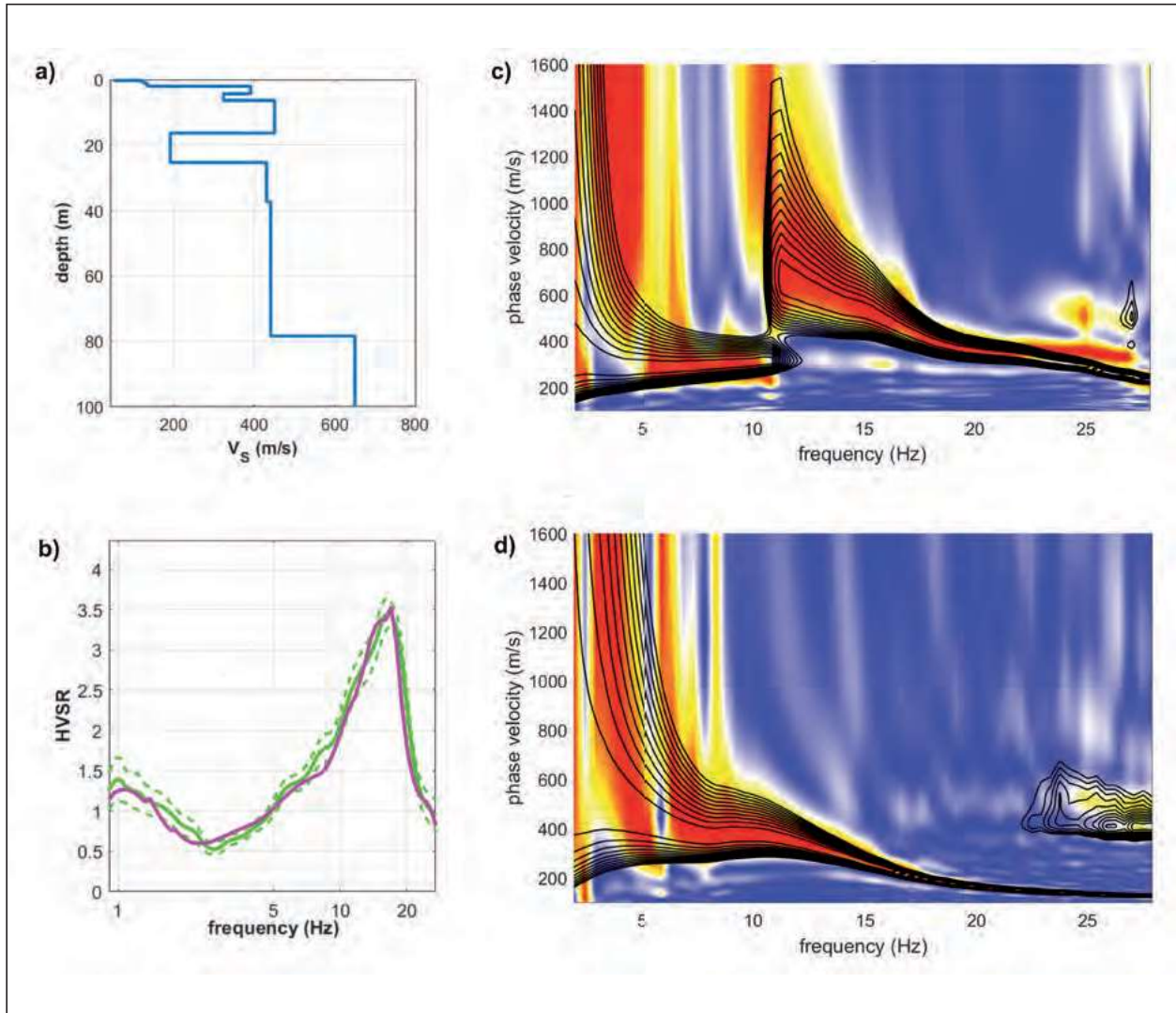
Rispetto i dati riportati in Fig. 5, è possibile notare la notevole differenza tra l'HVSR di campagna e la reale funzione di amplificazione.

Riguardo quest'ultima, sono da ricordare e sottolineare due fatti assolutamente cruciali:

1. **L'attendibilità della curva di amplificazione calcolata in relazione a studi di RSL dipende in tutto e per tutto dalla precisione del modello  $V_s$  identificato e l'analisi semplicistica di un unico "oggetto di analisi"** (MASW a componente singola e curve modali, ESAC, HVSR, eccetera) **non consente in alcun modo di ottenere un modello sufficientemente preciso;**
2. la curva di amplificazione non rappresenta in nessun modo un dato sufficiente a caratterizzare la risposta sismica locale in quanto quest'ultima dipende in misura preponderante dalla effettiva sorgente sismica (suo meccanismo focale e sequenza temporale di rottura), dai meccanismi di attenuazione e dell'azimuth tra sorgente e sito di riferimento eccetera (vedi Panza e Peresan, 2016).



**Fig. 7** - Esempio di analisi congiunta Rayleigh + Love (secondo l'approccio FVS - *Full Velocity Spectrum*) + HVSR: a) modello  $V_s$  identificato; b) HVSR di campagna e sintetico (riferito al modello identificato); c) e d) spettri di velocità di campagna (colori in sottofondo) e spettri sintetici (linee di *contour* nere in sovrapposizione). Si noti l'ottima sovrapposizione tra dati di campagna e sintetici (vedi anche Fig. 8 e relativo testo).



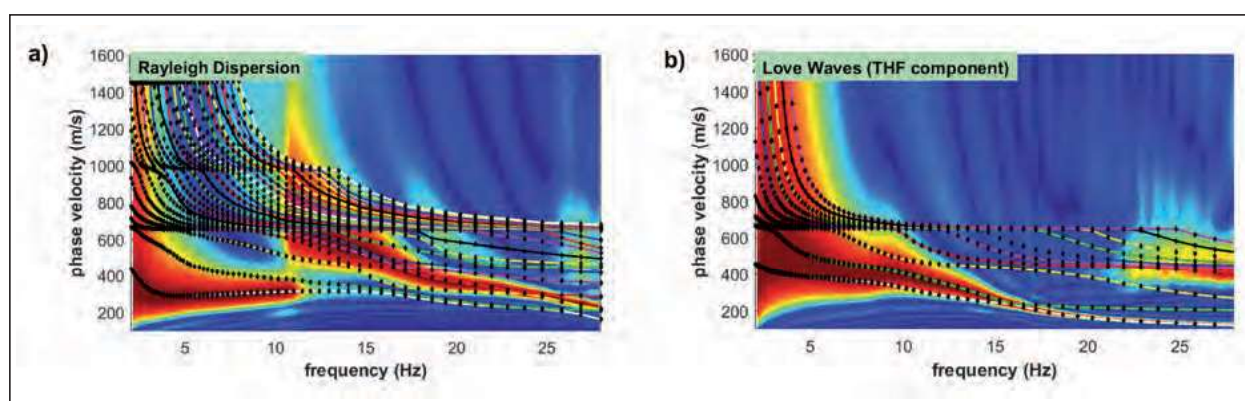
Un problema molto spinoso nella valutazione delle curve HVSR riguarda la corretta identificazione e gestione dei segnali industriali spesso presenti ad “inquinare” i microtremori naturali. È infatti relativamente comune vedere picchi HVSR prodotti da componenti di natura industriale e, non compresi come tali, spacciati per evidenze di “riso-nanze di sito” che nemmeno gli organi di controllo e verifica sono spesso in grado di interpretare correttamente.

### Le soluzioni

Per evitare di fornire profili  $V_s$  imprecisi o del tutto errati, vi è un’unica via d’uscita: l’accurata **analisi congiunta di diverse componenti o “oggetti di analisi”** (per una panoramica vedi Dal Moro, 2014).

In Figura 6 è riportato uno schema concettuale utile a comprendere il concetto di **analisi congiunta**, pratica ben diversa dalla mera **integrazione di**

**Fig. 8** - Sullo sfondo gli spettri sintetici delle onde di Rayleigh (componente Z) e Love relativi all'esempio riportato in Fig. 7 (in cui gli spettri sintetici sono riportati come *contour lines* nere). In sovrapposizione le curve di dispersione modali. È chiaro come i vari modi si combinano in maniera tale da risultare inseparabili. In questo caso non sarebbe quindi possibile procedere ad analisi secondo il classico approccio basato sull'identificazione delle curve modali.



**dati** che consiste in una valutazione qualitativa *ex post* di dati ed analisi di fatto eseguite in maniera separata. Il metodo/oggetto#1 può venire spiegato da una molteplicità di modelli (in Figura 6 indicati con le lettere da A a G), mentre il metodo/oggetto #2 e #3 da una serie di altri modelli. È solo il modello F, identificabile dall'analisi congiunta di tutti gli oggetti presi in esame, che rende conto di tutte le componenti considerate.

È certamente necessario puntualizzare la differenza tra *analisi congiunta* e *analisi integrata* (da molti sistematicamente confuse nonostante la sostanziale differenza concettuale e quindi pratica). L'analisi congiunta è un tipo di analisi in cui i diversi "oggetti di analisi" (ad esempio i dati di dispersione multi-componente e le curve HVSr, RVSr, RPM, eccetera) sono analizzati assieme (per così dire all'unisono) all'interno dello stesso (unico) algoritmo di inversione congiunta: al variare del modello di sottosuolo viene analizzata quanto tale variazione vada ad incidere su **tutti** gli oggetti considerati. Si tratta di un'analisi puntuale e quantitativa e, per così dire, olistica.

L'integrazione di dati è invece una pratica meramente qualitativa e del tutto indicativa: gli oggetti considerati sono analizzati separatamente e i risultati confrontati *ex post* tentando di intravedere un generico accordo di carattere appunto

qualitativo e per così dire *verbale* (non quantitativo). Va da sé che questo secondo *modus operandi* ha un peso del tutto diverso (molto inferiore) rispetto al primo.

Per quanto riguarda le onde di superficie (MASW, ReMi, ESAC, MAAM, HS/MFA/FTAN, eccetera), le **curve modali** non sono sempre utilizzabili poiché il modo in cui si eccitano e combinano i vari modi può essere estremamente complesso e i modi (come visto nel precedente paragrafo) possono non essere distinguibili/separabili (quest'ultimo fatto è particolarmente problematico nell'analisi di dati passivi quali ad esempio ReMi, ESAC e MAAM - vedi Dal Moro, 2014 e Tokimatsu et al., 1992).

**L'approccio da seguire allo scopo di fornire profili  $V_s$  sufficientemente puntuali da consentire di procedere ad un computo della Risposta Sismica Locale, dovrebbe basarsi sull'acquisizione di diverse componenti e l'analisi congiunta di diversi "oggetti" (rappresentati ad esempio dagli spettri di velocità di gruppo e/o fase, le curve RVSr, RPM e HVSr modellate in modo puntuale e rigoroso** (vedi anche Panza, 1989; Natale et al., 2004; Hermann, 2013; Dal Moro et al., 2015a; 2015b; 2016; 2017; 2018).

In Fig. 7 e 8 sono riportati i dati riferiti ad un caso studio piuttosto complesso relativo ad un sito marchigiano (i cui dati erano incidentalmente piuttosto rumorosi) e risolto considerando l'analisi congiunta delle onde di Rayleigh e Love (analizzati secondo l'approccio FVS - vedi Dal Moro, 2014 e Dal Moro et al., 2018) congiuntamente all'HVSR. Confrontando i dati e le modellazioni riportati in Fig. 7b, 7c e 7d, si può apprezzare l'ottimo accordo rispetto a tutti i tre "oggetti di analisi" in questo caso considerati.

In estrema sintesi, l'approccio FVS consiste nel simulare l'intero spettro di velocità senza passare attraverso una fase di interpretazione dello spettro in chiave di curve modali. Analizzando ad esempio le Fig. 7c e 7d, possiamo vedere come gli spettri sintetici (curve nere di *contour*) riferiti al modello identificato (Fig. 7b) si sovrappongono ai segnali a colori sullo sfondo (che si riferiscono al dato di campagna).

Se in questo specifico i dati raccolti erano in effetti piuttosto sporchi, ulteriori e più completi esempi sono presentati nel paragrafo finale (Fig. 9c e 9d e 10a - in questo caso analizzando gli spettri di velocità di gruppo) come anche ad esempio in Dal Moro (2014) e Dal Moro et al. (2018).

È solo attraverso l'accordo puntuale e quantitativo di tutti gli oggetti considerati che possiamo essere certi della bontà del modello del sottosuolo (Fig. 7a) identificato.

È da sottolineare con forza come, in questo caso, non sarebbe stato possibile analizzare la dispersione delle onde di superficie (Rayleigh e Love) facendo riferimento alle curve modali. Il segnale che domina le onde di Rayleigh a frequenze superiori a 10 Hz (Fig. 7c e 8a) non è un unico modo superiore (come un approccio semplicistico potrebbe far pensare) ma la combinazione di molti modi, indicativamente dal terzo (alle frequenze più alte) al trentesimo (frequenze attorno ai 12 Hz).

Nonostante il segnale sia continuo (Fig. 7d e 8b), le stesse onde di Love sono dominate dal modo fondamentale a frequenze inferiori a circa 7 Hz e superiori a 16 Hz e dal primo superiore a frequenze tra 7 e 16 Hz.

Quindi, come già visto per i dati sintetici riportati in Fig. 2, si verifica come **la continuità di un segnale sullo spettro di velocità non significa che tale segnale si riferisca ad un unico modo** (e questo significa che non è sempre applicabile l'approccio semplificato basato sulle curve di dispersione modale).

Infatti, a causa della complessità del sito/dataset, accade anche alle onde di Love quanto già evidenziato in Figura 2 per le onde di Rayleigh (che sono in generale ben più complesse): a circa 7-8 Hz (Fig. 8b) l'energia relativa al modo fondamentale si unisce a quella relativa al primo modo superiore e non risulta quindi possibile una loro separazione, rendendo così inutilizzabile qualsiasi tentativo di seguire un approccio basato sulle semplici curve modali.

A frequenze superiori ai 22 Hz compare un segnale associabile essenzialmente al terzo modo superiore (deve essere comunque molto chiaro che per le analisi FVS (*Full Velocity Spectrum*) riportate in Fig. 7c e 7d i dati non vanno interpretati in chiave di modi in quanto lo spettro viene modellato nella sua interezza).

Negli ultimi tempi, anche in Italia si è cominciato ad utilizzare la cosiddetta ESAC (*Extended Spatial AutoCorrelation*) ed alcune precisazioni possono risultare utili.

Innanzitutto va ricordato come l'ESAC sia una generalizzazione della SPAC (*Spatial AutoCorrelation*) e come tale è chiaramente di rango superiore (un ESAC è di fatto una SPAC in grado di gestire dati raccolti secondo una qualsiasi geometria mentre lo SPAC solo secondo geometrie circolari). Chi ha avuto modo di confrontare spettri di velocità da MASW (componente verticale) ed ESAC sa bene che di fatto questi sono molto simili e l'unico vantaggio dell'ESAC è che, se le dimensioni dello stendimento sono sufficienti, è possibile ottenere informazioni a frequenze leggermente inferiori rispetto a quelle ottenibili con la tecnica attiva.

Tre aspetti sono comunque da porre in evidenza: 1) con il termine ESAC si indica una procedura atta a determinare le proprietà dispersive del mezzo

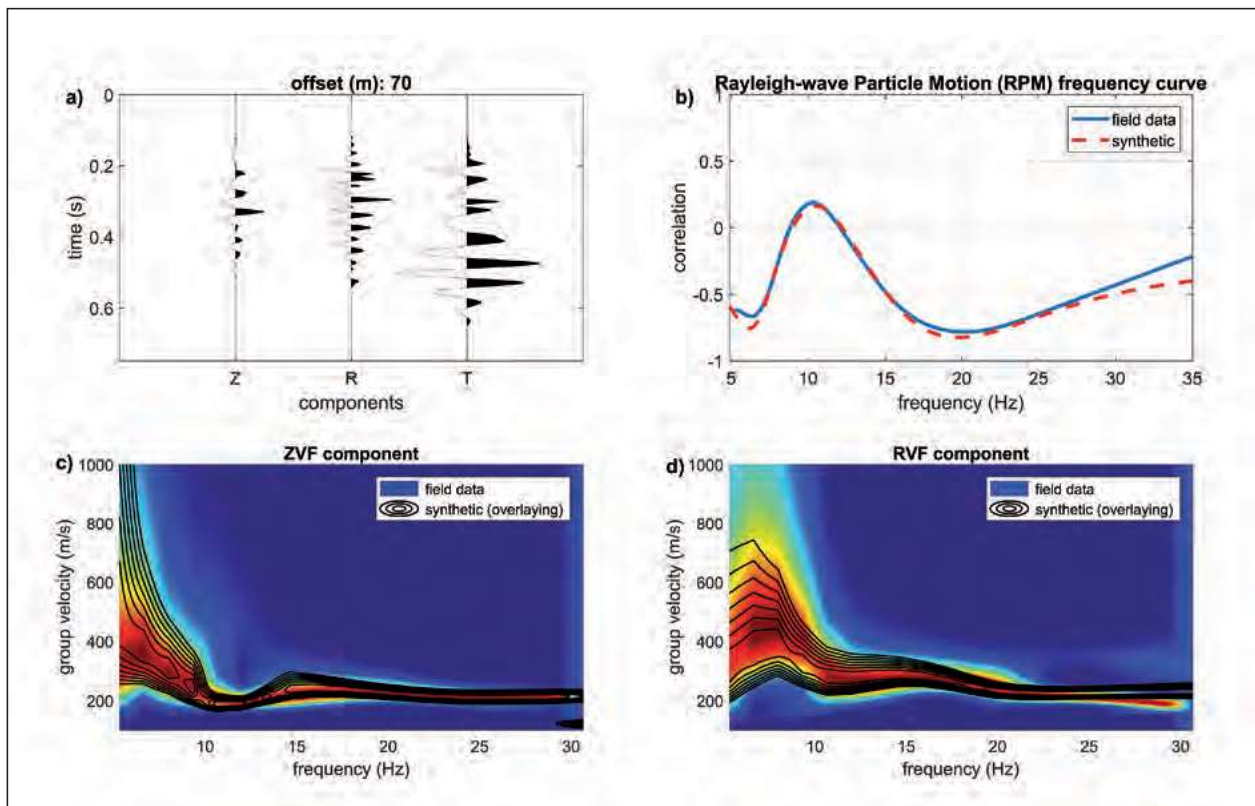
(curva di dispersione effettiva) ma non si dice nulla di come tale informazione venga poi utilizzata. Come si effettua l'inversione (modellazione)?

2) La curva che si ottiene (detta *effettiva*) è la combinazione dei modi di fatto eccitati dal sito e va modellata come curva effettiva seguendo la formulazione di Arai e Tokimatsu (1992). Non è qui possibile approfondire il tema ma è da ribadire con forza che **in nessun modo** la curva ottenuta da analisi ESAC (o SPAC o ReMi o MAAM - vedi successivo paragrafo) sia rappresentativa del modo fondamentale. Considerare che la curva di dispersione ricavabile da indagini passive sia rappresentativa del modo fondamentale è un grossolano (ma purtroppo comune) errore.

3) Poiché le basse frequenze sono di fatto facilmente determinate dall'HVSR, quanto senso ha dedicarsi ad acquisizioni/analisi ESAC per recuperare un paio di Hz in più rispetto una sismica attiva?

Si consideri che, mentre la sismica attiva consente di acquisire diverse componenti (e ritorniamo al concetto sintetizzato in Figura 6), con la sismica passiva è possibile acquisire unicamente la componente verticale (in passiva le altre componenti sono determinabili unicamente con complesse e costosissime acquisizioni/analisi accessibili, di fatto, unicamente a limitatissimi ambienti accademici).

Quando potrebbe avere senso utilizzare l'ESAC? In situazioni urbane, in cui il rumore di fondo e la logistica possono rendere problematiche le



**Fig. 9** - Analisi congiunta e olistica delle onde di superficie acquisite da un unico geofono triassiale posto a 70 m dalla sorgente: a) tracce attive (componenti Z, R e T - cioè verticale, radiale e trasversale); b) curva RPM di campagna e da modello identificato (vedi Figura 10d); c) spettro di velocità di gruppo di campagna e da modello identificato per la componente Z; d) spettro di velocità di gruppo di campagna e da modello identificato per la componente R. Da Dal Moro e Keller (2017).

acquisizioni di sismica attiva e si ha a disposizione abbastanza spazio per uno stendimento ESAC. Si deve considerare come, del tutto indicativamente, le informazioni raccolte dall'ESAC si riferiscono sino ad una profondità pari a circa la metà della distanza tra i geofoni tra loro più distanti. Ciò non significa che in questo modo vado ad ottenere informazioni sino a quella profondità, perché comunque resta sempre valido il problema dell'ambiguità legata tanto alla non-univocità della soluzione che al significato della curva apparente determinata (per motivi di spazio non è certamente possibile approfondire in questa sede i dettagli).

Ad ogni modo la dispersione ricavata va assolutamente analizzata facendo riferimento alla curva *effettiva* (o *apparente*) e mai attribuendo tale curva al modo fondamentale (esattamente come andrebbe fatto per gli spettri derivanti da analisi ReMi, tecnica oramai fortunatamente in disuso). Nel prossimo paragrafo vedremo come esistano

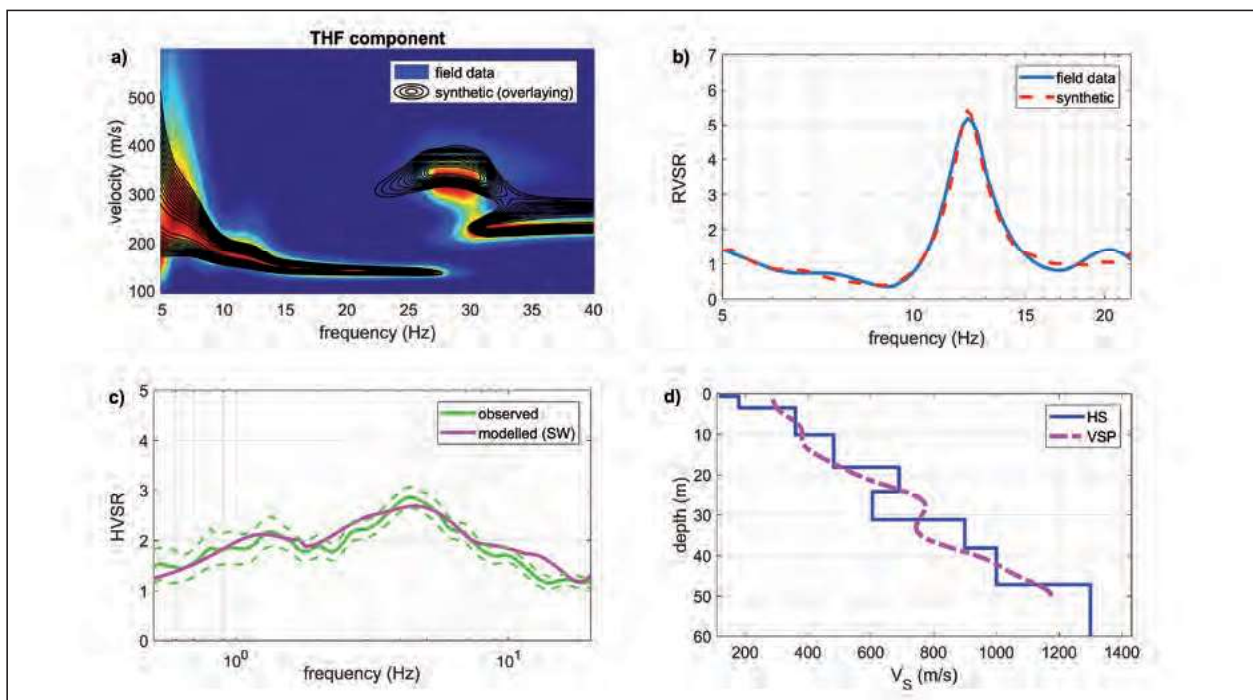
alcune tecniche (attive e passive) che consentono di muoversi in modo molto snello in ambienti urbani e/o dai limitati spazi e che vanno ben oltre a quelle comunemente più diffuse in Italia.

### Alcune conclusioni: dentro le analisi e oltre il cosiddetto multi-canale

Tra i molti fraintendimenti linguistici alla base di tanti problemi tecnici in materia di analisi di dati sismici, vi sono certamente quelli legati ad una superficiale interpretazione e conseguente cattivo uso del termine *multichannel* (multi-canale).

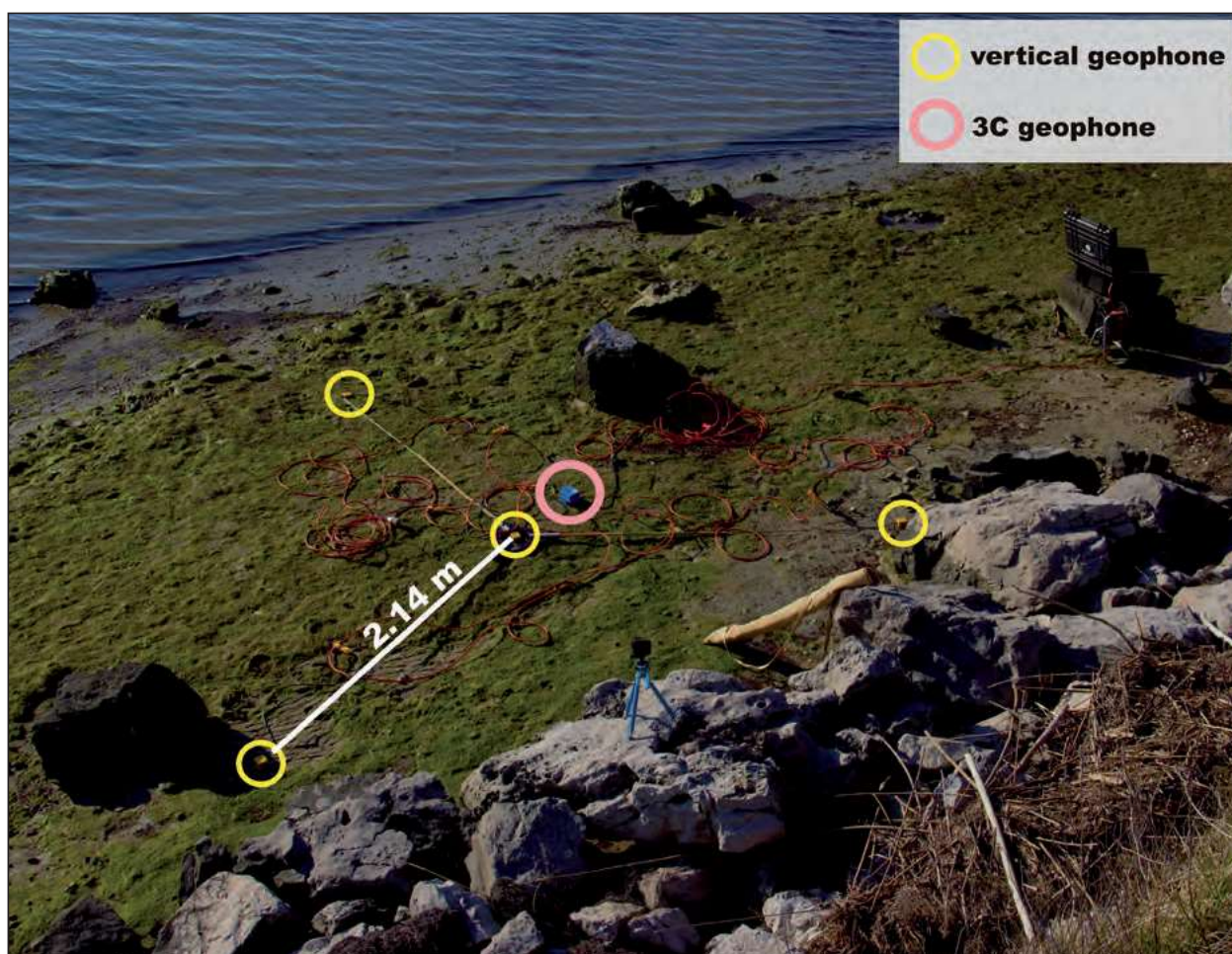
L'espressione *multichannel* in effetti non è indicativa di nulla di puntuale e rigoroso come non lo è, a ben vedere, nemmeno l'espressione MASW (vedi paragrafo introduttivo).

Le onde di Rayleigh forniscono indicazioni preziose ma, come abbiamo brevemente ricordato nel secondo paragrafo di questa nota, i dati possono



**Fig. 10** - Analisi congiunta e olistica delle onde di superficie acquisite da un unico geofono triassiale (continuazione del dataset presentato in Figura 9): a) spettro di velocità di gruppo di campagna e da modello identificato (grafico d) per la componente T (onde di Love); b) curva RVSr di campagna e sintetica; c) HVSR osservato e sintetico; d) confronto tra profilo  $V_s$  identificato da misure HS+HVSR e ottenuto da dati VSP (sismica di pozzo).

**Fig. 11** - Acquisizione MAAM (*Miniature Array Analysis of Microtremors*) in ambiente lagunare (l'area investigata emerge solamente per circa un paio di ore). Quattro geofoni verticali (dalle appropriate caratteristiche) sono posti secondo un triangolo equilatero con un geofono al centro. Un geofono triassiale è utilizzato per acquisire contemporaneamente i dati per la determinazione della curva HVSR (ma lo stesso geofono può essere utilizzato anche per l'acquisizione di dati attivi HS, vibrazionali eccetera).

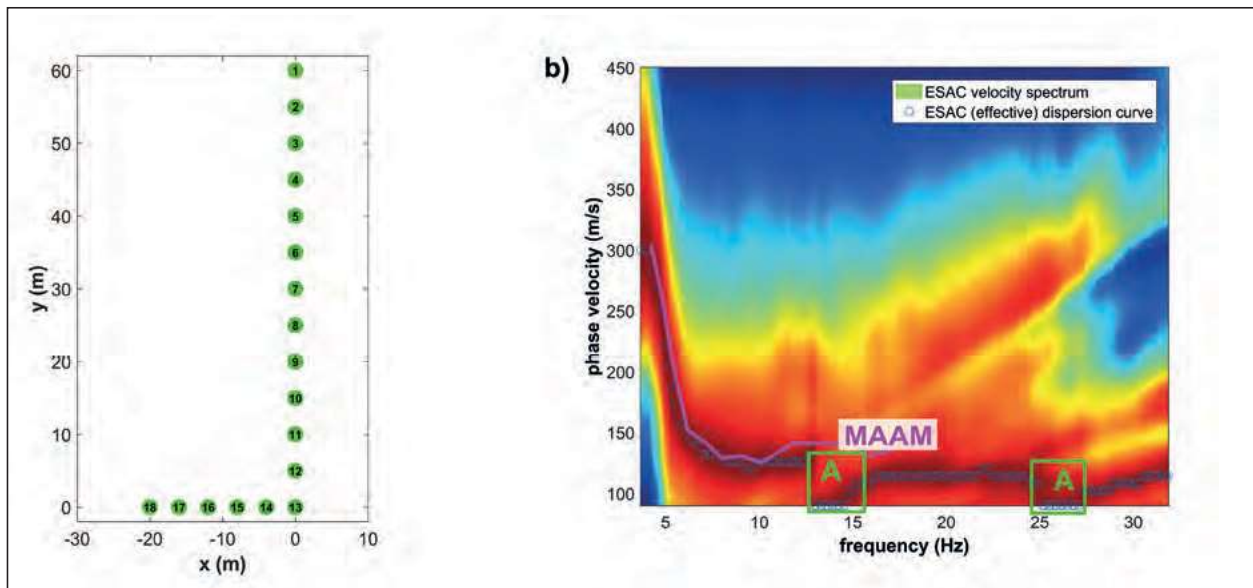


essere piuttosto complessi da comprendere. A causa di questo, svolgere la loro analisi secondo un approccio semplificato (curve modali) e senza l'utilizzo di ulteriori dati sismici può essere pericoloso. Per questo motivo sempre più ricercatori nel mondo supportano l'analisi delle onde di Love che, sebbene in alcune condizioni siano meno sensibili a dettagli stratigrafici minori, sono certamente di più semplice ed immediata lettura e comprensione e consentono quindi di evitare macroscopici errori possibili nel caso si consideri unicamente una componente delle onde di Rayleigh (molto più complesse) e l'approccio a curve modali.

Inoltre, le onde di Rayleigh possono essere analizzate in modo più completo e puntuale, considerando gli spettri di velocità di entrambe le componenti (quella verticale e quella radiale) come anche analizzando l'effettivo movimento della particella. Quest'ultimo non è in effetti *retrogrado* (come spesso si tende a semplificare), essendo di fatto un complesso mix di moto *progrado* e *retrogrado* che si combinano in vario modo in funzione della frequenza.

Un modo piuttosto semplice di verificare l'effettivo moto della particella indotto dal passaggio dell'onda di Rayleigh è dato dal computo della cosiddetta

**Fig. 12** - Confronto tra le proprietà dispersive determinate via MAAM e ESAC analizzando dati raccolti in un'area urbana dell'Italia del Nord-Ovest: a) array utilizzato per l'ESAC; b) spettro di velocità di fase ottenuta da ESAC (colori in sottofondo e curva a cerchi blu) e curva di dispersione effettiva ricavata da MAAM considerando un triangolo dal raggio di 2 m (curva magenta). I "segnali" evidenziati all'interno dei quadrati A sono artefatti degli spettri ottenuti da analisi ESAC dovuti a meri effetti di *aliasing spaziale* che possono essere tranquillamente ignorati. Si noti l'ottima corrispondenza tra MAAM e ESAC.



curva RPM (*Rayleigh-wave Particle Motion* - Dal Moro et al., 2017; 2018).

Un esempio è riportato in Figura 9b. I dati e le analisi riportati in Fig. 9 e 10 si riferiscono alla metodologia HS (*Holistic analysis of Surface waves*), una sorta di ottimizzazione del metodo MFA/FTAN (Natale et al., 2004) (vedi anche Dal Moro et al., 2015a; 2015c; 2016; 2017; 2018).

Basandosi sull'analisi delle velocità di gruppo, per tali analisi è necessario un unico geofono triassiale posto ad una distanza che andrà a influire sulla massima profondità di penetrazione del segnale stesso.

Riguardo la curva RPM (Fig. 9b), i valori di correlazione pari a +1 indicano un moto puramente *retrogrado*, mentre valori pari a -1 puramente *progrado*. Se in generale il moto è un complesso mix con valori di correlazione intermedia, nel caso riportato in Figura 9b si può notare come il moto sia largamente dominato da un andamento *progrado* lungo quasi tutto il *range* di frequenze considerato.

Essere in grado di definire l'effettivo moto della

particella, non è un fatto dal valore meramente accademico: la o le curve RPM rappresentano infatti un utilissimo oggetto di analisi da affiancare agli spettri di velocità e alle curve HVSR e/o RVSR (*Radial-to-Vertical Spectral Ratio*, una sorta di HVSR definito per misure di sismica attiva) al fine di definire con sempre maggiore precisione il profilo  $V_s$ .

Rispetto ai dati e alle analisi sintetizzate in Figura 9 e 10 va sottolineato un fatto cruciale. Nel caso delle acquisizioni e analisi HS (Dal Moro et al., 2015a; 2015c; 2018) i dati vengono raccolti da un unico geofono triassiale e opportunamente elaborati in modo tale da ottenere sino a cinque diversi "oggetti" di analisi (gli spettri di velocità di gruppo delle due componenti delle onde di Rayleigh, quello delle onde di Love e le curve RPM e RVSR) a cui si aggiunge poi la curva HVSR (che va a costituire un ulteriore "oggetto" di analisi).

Di fatto si pone il triassiale ad una certa distanza rispetto la sorgente e si acquisiscono i dati attivi. È possibile associare a tale tecnica l'acronimo MASW? Certamente sì in quanto:

1) stiamo parlando di dati multi-canale (tre canali ai quali sono associati due geofoni orizzontali tra loro perpendicolari ed uno verticale);

2) stiamo analizzando le onde di superficie (sia le Love che le Rayleigh).

In questo modo la soluzione che si va ad ottenere è necessariamente molto più vincolata (si torni allo schema di Figura 6) rispetto a quando, piantando 24 geofoni verticali ed effettuando classiche acquisizioni "MASW" (le virgolette sono utilizzate per ribadire che tale acronimo ha di fatto poco valore perché oramai vago rispetto gli sviluppi delle tecniche odierne), si va in effetti a definire un unico oggetto di analisi (lo spettro di velocità di fase della componente verticale dell'onda di Rayleigh - vedi ad esempio Fig. 2).

Una tecnica di carattere passivo che può rivelarsi molto utile specie nell'esplorazione di aree urbane o remote con poco spazio a disposizione è la MAAM (*Miniature Array Analysis of Microtremors* - Cho et al., 2013). Si tratta di disporre regolarmente un numero dispari di sensori attorno ad un sensore centrale. La configurazione più semplice è quella a triangolo equilatero (Figura 11), ma un maggior numero di sensori è potenzialmente in grado di migliorare il rapporto segnale/rumore (la seconda possibile configurazione è quindi a pentagono).

Si tratta, per alcuni versi, di una sorta di mini-ESAC che, per essere affrontata con successo, richiede:

- solido bagaglio teorico (presupposto in effetti necessario per qualsiasi tecnica);
- puntualità della strumentazione adottata (sensori dalle identiche curve di risposta e sismografo dall'ottimo range dinamico in grado di assicurare un'adeguata qualità del dato acquisito);
- accuratezza delle procedure di acquisizione (ottimo accoppiamento e perfetta verticalità dei geofoni).

I tempi di registrazione sono sempre dell'ordine di poche decine di minuti (come qualsiasi tecnica passiva utilizzata in ambito professionale) e, al fine di individuare la curva di dispersione in un range approssimativamente attorno ai 4-40 Hz,

il raggio del triangolo o pentagono è indicativamente di 2-3 m.

In Figura 12 sono ad esempio riportati i dati di dispersione ricavati da un'acquisizione ESAC (in Fig. 12a è riportata la geometria dell'array utilizzato) e MAAM. La perfetta congruenza delle curve di dispersione ricavate dimostra tanto la sostanziale omogeneità dell'area investigata (di per sé la tecnica MAAM è chiaramente influenzata dalle condizioni locali mentre l'ESAC si riferisce ad un'area più vasta) quanto la correttezza delle operazioni svolte e la buona qualità dei dati.

È infine da sottolineare come la sismica di pozzo (VSP - *Vertical Seismic Profiling*) consente, come anche qualsiasi penetrometria, di ricavare informazioni estremamente locali e non è di per sé garanzia di qualità o correttezza dei risultati. Infatti, come qualsiasi lavoro di carattere professionale, è soggetta ad errori legati alle effettive competenze di chi acquisisce e analizza i dati e alle conseguenze di una bassa qualità del pozzo e di specifiche stratigrafie che possono provocare complessi fenomeni che non rendono valide le assunzioni comunemente adottate in sede di analisi (non sono rare le relazioni di carattere professionale in cui i modelli del sottosuolo derivati da VSP sono manifestamente incongruenti).

In un'indagine VSP, i primi arrivi non necessariamente si riferiscono infatti all'onda trasmessa poiché complessi fenomeni di rifrazione e conversione delle onde possono complicare notevolmente i dati rendendo priva di significato la soluzione (una possibile pratica, in effetti ben poco frequentata ma utile a verificare dati e analisi, è ad esempio quella di acquisizioni multi-offset).

Quanto riportato in questa nota e sintetizzato in Tab. 1 intende fornire una rapida ma in qualche modo ampia panoramica di quanto è in effetti possibile fare con le onde di superficie andando anche a risolvere i problemi legati all'ambiguità o complessità dei dati.

L'auspicio è che l'emanazione delle NTC2018 possa rappresentare l'occasione per una svolta



Metodi attivi	MASW a componente singola e curve modali	Possibili significative ambiguità dei dati e, conseguentemente, interpretazioni significativamente errate o comunque imprecise
	MASW multi-componente e curve modali	Per quando le curve modali non consentano una verifica puntuale, si evitano errori macroscopici
	MASW multi-componente secondo approccio FVS	Potendo utilizzare anche una serie di “oggetti di analisi” ancillari quali ad esempio le curve RPM o RVSR, consente potenzialmente una puntuale determinazione del profilo $V_s$
	HS	Analisi congiunta di cinque “oggetti di analisi” (quindi processo di inversione particolarmente vincolato)
Metodi passivi	ESAC, SPAC, MAAM, ReMi	Non univocità della soluzione (del tutto analogamente alla MASW a componente singola); necessità di modellazione secondo la curva effettiva (e non modale). A causa soprattutto della direttività del segnale, la tecnica ReMi è di fatto stata abbandonata a favore delle altre tecniche (in grado di gestire la direttività del segnale passivo)

**Tab. 1** - Sintesi delle principali metodologie atte ad analizzare la velocità di propagazione delle onde di superficie con indicati alcuni dei principali aspetti da considerare per una corretta valutazione dei dati e delle analisi. Si ricordi come nel campo della libera professione (fuori cioè dall'ambito accademico), con i metodi passivi è possibile considerare solamente la componente verticale delle onde di Rayleigh, mentre i metodi attivi consentono di registrare e analizzare le onde di Love ed entrambe le componenti delle onde di Rayleigh.

qualitativa che richiede la puntuale definizione di specifiche competenze atte a poter porre in essere serie procedure di verifica utili, infine, a valorizzare le migliori professionalità.

### Alcune letture

ARAI H., TOKIMATSU K. (2004). *S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum*. Bull. Seism. Soc. Am., 94, 53–63

CHO I., SENNA S., FUJIWARA H. (2013). *Miniature array analysis of microtremors*. Geophysics, 78, KS13–KS23

DAL MORO G., AL-ARIFI N., MOUSTAFA S.R. (2018). *Improved Holistic Analysis of Rayleigh Waves for Single- and Multi-Offset Data: Joint Inversion of Rayleigh-wave Particle Motion and Vertical- and Radial-Component Velocity Spectra*. Pure and Applied Geophysics, 175, 67–88 (disponibile online)

DAL MORO G., KELLER L. (2017). *RPM Analysis and Advanced Joint Processing of a SED (Swiss Seismological Service) Dataset*. Atti convegno nazionale NGTTS (Trieste, 14-16 Novembre 2017), 693-696

DAL MORO G., PUZZILLI L.M. (2017). *Single- and Multi-Component Inversion of Rayleigh Waves Acquired by a Single 3-Component Geophone: an Illustrative Case Study*. Acta Geodyn. Geomater., 14, No. 4 (188), 431–444

Dal Moro G. (2017). *A ESAC+HVSr case study. Technical report*. <http://www.winmasw.com/download/prodotti/Report-ESAC-HVSr-winMASW.pdf>

DAL MORO G., AL-ARIFI N., MOUSTAFA S.R. (2017). *Analysis of Rayleigh-Wave Particle Motion from Active Seismics*. Bulletin of the Seismological Society of America, 107, 51-62

DAL MORO G., KELLER L., MOUSTAFA S.R., AL-ARIFI N. (2016). *Shear-wave velocity profiling according to*

*three alternative approaches: a comparative case study.* Journal of Applied Geophysics, 134, 112-124

DAL MORO G., KELLER L., POGGI V. (2015A). *A Comprehensive Seismic Characterization via Multi-Component Analysis of Active and Passive Data.* First Break, 33, 45-53

DAL MORO G., MOURA R.M., MOUSTAFA S. (2015b). *Multi-component Joint Analysis of Surface Waves.* J. Appl. Geophysics, 119, 128-138

DAL MORO G., PONTA R., MAURO R. (2015c). *Unconventional Optimized Surface Wave Acquisition and Analysis: Comparative Tests in a Perilagoon Area.* J. Appl. Geophysics, 114, 158-167

DAL MORO G. (2014). *Surface Wave Analysis for Near Surface Applications*, ISBN 978-0-12-800770-9, Elsevier, 252pp.

DAL MORO G. (2012). *Onde di superficie in Geofisica Applicata - acquisizione ed analisi secondo le tecniche MASW e HVSR*, pp. 191, ISBN 978-8857901169, Dario Flaccovio Editore

DAL MORO G., PIPAN M., FORTE E., FINETTI I. (2003). *Determination of Rayleigh wave dispersion curves*

*for near surface applications in unconsolidated sediments.* Proceedings SEG. In: 73rd Annual Meeting, Dallas, Texas, October 26-31, 2003. Society of Exploration Geophysicists, pp. 1247-1250

NATALE M., NUNZIATA C., PANZA G.F. (2004). *FTAN method for the detailed definition of  $V_s$  in urban areas.* In: 13th World Conference on Earthquake Engineering, August 1-6, 2004, Vancouver, B.C., Canada

HERRMANN R. B. (2013). *Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research.* Seism. Res. Lett., 84, 1081-1088

PANZA G.F., PERESAN A. (2016). *Difendersi dal terremoto si può.* EPC Editore, pp 184

PANZA G.F. (1989). *Attenuation measurements by multimode synthetic seismograms.* In: Cassinis, R., Nolet, G., Panza, G.F. (Eds.), Digital Seismology and Fine Modeling of the Lithosphere. Plenum Publishing Corporation, pp. 79-115

TOKIMATSU K., TAMURA S., KOJIMA H. (1992). *Effects of multiple modes on Rayleigh wave dispersion characteristics.* J. Geotech. Eng. ASCE 118 (10), 1529-1543