Alcune problematicità nell'analisi delle onde di superficie e del rapporto spettrale H/V

Giancarlo Dal Moro,* Michele Pipan**

Sommario

L'analisi della dispersione delle onde di superficie è spesso condizionata dall'interpretazione delle curve di dispersione ed è affetta, come qualsiasi metodologia geofisica di superficie, dal problema della non-univocità della soluzione. D'altro canto, il rapporto spettrale H/V, essendo sensibile puramente ad eventuali contrasti di velocità delle onde di taglio, soffre in maniera ancora più pesante del problema della non-univocità della soluzione e può essere soggetto ad effetti topografici e variazioni legate alle condizioni metereologiche/stagionali. In questo lavoro, attraverso l'esame di dati sintetici e reali, si analizzano alcuni aspetti critici dell'analisi dei dati e i loro riflessi sulle possibili soluzioni. Un caso reale di particolare complessità illustra i punti fondamentali di una procedura di analisi che può superare i limiti delle tecniche convenzionali.

L'approccio proposto è di tipo *olistico* (analisi congiunta) ed è presentato con un duplice obiettivo. Da un lato meglio vincolare il profilo di V_S del sottosuolo, dall'altro validare l'interpretazione dei dati, in particolare nel caso di *dataset* complessi.

Poiché l'analisi *ReMi* non può essere considerata una soluzione affidabile per incrementare la profondità di indagine, a causa della non-univocità della soluzione e dell'inevitabile ambiguità della lettura dello spettro di velocità dovuta alla natura stessa del dato (sismica passiva), l'analisi congiunta delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh e Love ottenute dalla sismica attiva (MASW) e il rapporto spettrale H/V sono utilizzati insieme alla rifrazione delle onde di compressione e di taglio per vincolare ulteriormente i valori di V_S e V_P degli strati meno profondi. Infine, l'analisi dell'attenuazione delle onde di Rayleigh viene svolta allo scopo di stimare i fattori di qualità Q_S e verificare ulteriormente la coerenza del modello proposto.

Parole chiave: Dispersione; Onde di Superficie; Inversione congiunta; Non-univocità; HVSR

1. Introduzione

Negli ultimi decenni l'analisi delle onde di superficie si è dimostrata un utile strumento per la determinazione del profilo verticale di velocità delle onde di taglio, V_S, non più solamente per studi di carattere crostale (cfr. p.es. EVISON *et al.*, 1959) ma anche per indagini *near surface* [STOKOE *et al.*, 1988; GLANGEAUD *et al.*, 1999; PARK *et al.*, 1999; XIA *et al.*, 1999; 2004; SHTIVELMAN, 1999; 2002; FOTI *et al.*, 2000; LOUIE, 2001; O'NEILL *et al.*, 2006; DAL MORO *et al.*, 2007; DAL MORO, 2012]. La classica sismica a rifrazione ad onde di volume (P ed S) ha così trovato una valida integrazione, in grado di superare i limiti connessi alla presenza di *strati a bassa velocità (Low Velocity Layer*-LVL) e/o *nascosti (blind layer*).

La dispersione delle onde di superficie può essere analizzata considerando tecniche sia attive sia passive. Il termine MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves - Analisi Multicanale delle Onde di Superficie), pur applicabile in linea di principio a qualsiasi tipo di studio basato su uno stendimento (*array*) di geofoni, è normalmente utilizzato per il caso attivo, mentre *ReMi* (*Refraction Microtremor*) si riferisce comunemente ad acquisizioni passive con *array* lineare.

L'HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio - Rapporto Spettrale Orizzontale-Verticale) viene tradizionalmente utilizzato per definire il periodo fondamentale del sito in studi di amplificazione sismica [NAKA-MURA, 1989; 1996; 2000] ed è a volte proposto anche come strumento utile ad ottenere anche informazioni inerenti il profilo verticale di V_S (cfr. p.es. Arai e TOKIMATSU, 2004). Il dibattito, tuttavia, è ancora aperto su alcuni punti particolarmente delicati (numero di modi coinvolti nella curva HVSR osservata, importanza relativa delle onde di superficie (Rayleigh e Love) e di volume, ruolo dell'attenuazione, variabilità del rapporto HVSR osservato in momenti diversi ecc.) che ne caratterizzano il possibile utilizzo per indagini del sottosuolo non ambigue (e.g. FAH et al., 2001; BONNEFOY-CLAUDET et al., 2008; FOTI et al. 2011; Dal Moro, 2012).

Nessun metodo può essere considerato come la soluzione finale sia per limiti intrinseci generali sia per specifiche problematiche che possono insorgere dall'applicazione di una particolare tecnica in taluni siti. L'interpretazione e l'analisi/inversione dei da-

^{*} Eliosoft, Palmanova (UD)

^{**} Università di Trieste, Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine

ti rimangono comunque punti critici. D'altra parte bisogna sottolineare che ogni tentativo di automazione dell'analisi è necessariamente basato su assunzioni che, pur valide in talune circostanze, non possono essere sempre considerate di universale applicazione.

Il presente lavoro ha lo scopo di riassumere alcuni aspetti problematici dei metodi sopra citati e di mostrare l'efficacia di un approccio di tipo *olistico* nelle indagini geofisiche (per alcuni esempi di applicazione in vari settori della geofisica, cfr. PEREYRA e Woods, 1992; PEREYRA, 2006; DAL MORO, 2008a; 2008b; 2010; Dal MORO e FERIGO, 2011; HARRIS *et al.*, 2009). L'interpretazione dei dati (e quindi la ricostruzione del profilo V_S tramite procedura di *picking* e inversione automatica o di modellazione diretta -STOKOE, 2009; DAL MORO, 2012) deve infatti individuare un modello in grado di giustificare adeguatamente *tutti* i dati osservati.

Dopo aver messo in evidenza alcuni aspetti spesso poco considerati nell'analisi dei dati con le metodologie considerate, viene presentato un caso studio particolarmente complesso.

2. Un metodo, nessuna soluzione

L'inversione di dati geofisici di superficie porta inevitabilmente a ricostruire una molteplicità di possibili modelli del sottosuolo, ciascuno dei quali in grado di generare i medesimi valori osservati (cfr. p.es. SCALES et al., 2001; IVANOV et al.; 2005a; 2005b). Questo aspetto, poco noto, è troppe volte trascurato dagli utenti finali dei metodi non-invasivi di superficie. Si tratta tuttavia di un punto cruciale nell'applicazione pratica dei metodi geofisici, con ricadute in settori importanti dell'attività professionale, come ad esempio la valutazione del profilo Vs secondo le nuove norme tecniche per le costruzioni [NTC, DM 14.01.2008]. Tale normativa prevede una classificazione del sottosuolo basata sulla determinazione del profilo della velocità delle onde di taglio e del parametro V_{S30} (la velocità equivalente delle onde di taglio nei primi 30m dal piano di fondazione):

$$V_{\rm S30} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{V_{\rm Si}}}$$

ove Vs_i e h_i sono rispettivamente la velocità delle onde di taglio e lo spessore dell'*i*-esimo strato.

Il profilo di V_S può essere ricavato da indagini dirette, mediante perforazioni e sismica *downhole*, ma questi metodi, oltre a fornire una misura assolutamente puntuale, possono risultare onerosi dal punto di vista economico. L'analisi della dispersione delle onde superficiali può essere utilizzata a questo scopo, ma per ricostruire il modello corretto del sottosuolo la molteplicità delle possibili soluzioni richiede un'interpretazione integrata dei dati.

Al di là di questioni di carattere legislativo inerenti le NTC, è comunque bene sottolineare come la determinazione del profilo V_S abbia un importante valore geognostico rispetto a qualsiasi problema di carattere geotecnico per il quale sia necessario delineare un modello del sottosuolo completo e robusto. Si consideri come, a puro titolo di esempio, in sedimenti inconsolidati la presenza di acqua porti a forti variazioni della velocità delle onde compressionali (V_P) ma non (se non in misura estremamente limitata) delle V_S (si vedano ad esempio alcuni casi studio riportati in DAL MORO, 2012).

Diversi autori hanno messo in evidenza la nonunivocità dei risultati dell'inversione di curve di dispersione delle onde superficiali (si vedano ad es. LUKE *et al.*, 2003; DAL MORO, 2012).

La figura 1 illustra l'influenza del modello di partenza sul processo di inversione nei metodi basati sul gradiente (vedi ad es. SCALES et al., 2001). La presenza di diversi minimi locali della funzione obiettivo (cioè lo scarto, o misfit, tra dati sintetici e osservati) può portare il processo di inversione a convergere verso una soluzione diversa dal modello reale. Il sistema è attratto dal minimo locale più vicino e la soluzione finale dipende quindi dal modello di partenza. Negli ultimi anni, diversi autori hanno proposto di invertire le curve di dispersione delle onde di superficie attraverso metodi global search (cfr. YAMANAKA, 2005). Anche se in linea di principio tali metodi possono sicuramente gestire meglio l'inversione di una curva di dispersione superando il problema dei minimi locali, sarebbe ingenuo pensare che tali metodologie possano rappresentare la soluzione, poiché l'equivalenza dei modelli (che può essere pensata come un estremo caso di minimi locali) significa che il modello corret-



Fig. 1 – Inversione di dati geofisici di superficie: rappresentazione schematica del problema causato dai minimi locali. Qualora si utilizzino algoritmi di inversione basati sul gradiente, differenti modelli di partenza (pallini numerati) forniranno soluzioni finali differenti.

Fig. 1 – Data inversion: schematic representation of the problem caused by local minima. While using gradient-based inversion algorithms, different starting models (numbered circles) will provide different solutions.



Fig. 2 – Sopra: serie di profili V_S (i rapporti di Poisson utilizzati per i diversi modelli sono estremamente variabili); sotto: rispettive curve di dispersione relative al modo fondamentale.

Fig. 2 – Above: a series of V_S profiles (Poisson ratios are set free to vary remarkably); below: their Rayleigh-wave fundamental-mode dispersion curves.

to semplicemente non è determinabile (vedi commento alla figura 2).

Si ricordi incidentalmente come tale problema affligge in effetti qualsiasi metodologia di indagine geofisica di superficie e non unicamente quelle qui considerate.

Nella figura 2 è presentata una serie di profili V_S assieme alle relative curve di dispersione del modo fondamentale calcolate secondo DUNKIN [1965]: la rilevante ampiezza della variazione dei valori di V_S è resa possibile dalla deliberata scelta di permettere una gamma molto ampia dei rapporti di Poisson, quindi delle V_P .

L'esempio permette di fare alcune semplici osservazioni:

- 1. l'incertezza aumenta notevolmente con la profondità: si noti che il valore $\lambda/3 - \lambda/2$, legato alla frequenza più bassa qui considerata, (la lunghezza d'onda λ è definita dal rapporto tra la velocità e la frequenza) – *steady state approximation* – indica un valore di 30-45 m;
- 2. le V_S fino a circa 7 m di profondità sono estremamente ben definite;
- a causa di un "effetto di compensazione" i valori di V_{S30} abbracciano comunque un intervallo ragionevolmente limitato (272÷330 m/s, cioè un'incertezza del ±10%);
- 4. la somiglianza tra le curve di dispersione è tale che i modelli possono essere considerati *equivalenti* in termini di curva di dispersione del modo fondamentale. È questo il motivo per cui anche i

metodi *global search* non possono essere considerati la "soluzione finale": se diversi modelli possiedono la medesima curva di dispersione non è possibile identificarne uno "più corretto" degli altri. In realtà valori estremi del rapporto di Poisson possono determinare particolari distribuzioni di energia tra i vari modi, riducendo quindi in qualche modo questo problema (vedi paragrafo successivo).

La figura 3 mostra che anche le curve H/V calcolate secondo HERAK [2008] e relative ai profili V_S di figura 2, pur diverse, sono in effetti centrate attorno una frequenza fondamentale di circa 3-4 Hz.

Il rapporto spettrale H/V (*Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio – HVSR*) – tradizionalmente utilizzato per la stima della frequenza di risonanza del sito – viene talora proposto per ricavare informazioni sul profilo verticale V_S [ARAI e TOKIMATSU, 2004].

Per quanto l'*HVSR* sia un importante strumento per meglio vincolare i valori di V_S degli orizzonti più profondi, tipicamente mal definiti dall'analisi delle sole curve di dispersione, una sua applicazione senza il supporto di dati stratigrafici e slegata dagli stringenti vincoli quantitativi forniti ad esempio dalle analisi *MASW* è inevitabilmente ostacolata da irrisolvibili problemi di non-univocità della soluzione (vedi anche DAL MORO 2010; 2012).

Nella figura 4 sono presentati tre profili di V_S che producono rapporti spettrali H/V pressoché identici; sono chiaramente possibili molti altri modelli con analoghe curve H/V. L'esempio mostra che senza la possibilità di misurare direttamente o fissare le velocità dell'onda di taglio almeno per gli strati superficiali, l'impiego delle curve H/V per delineare un profilo verticale di V_S risulta per così dire ambiguo, in quanto la soluzione risulta fortemente non-univoca.

Un altro problema rilevante è determinato anche dalla non banale implementazione di un'affida-



Fig. 3 – Curve H/V calcolate [HERAK, 2008] per i modelli V_S riportati in Fig. 2.

Fig. 3 – H/V curves computed [HERAK, 2008] for the V_S models reported in Fig. 2.



Fig. 4 – Il problema dell'equivalenza nell'HVSR. Tre profili di V_S con pressoché identico rapporto spettrale H/V, calcolato considerando l'ellitticità delle onde di superficie [LUNEDEI e ALBARELLO, 2009].

Fig. 4 – The equivalence issue in HVSR. Three V_S models (upper panels) with identical horizontal-to-vertical spectral ratio, computed by considering the surface-wave ellipticity [LUNEDEI and ALBARELLO, 2009].

bile modellazione della curva *H/V* senza dati sismici accessori in grado di giustificare i criteri adottati, e quindi il risultato finale. In effetti è impossibile determinare a priori l'importanza relativa delle onde di Rayleigh, Love e di volume (vedi FAH *et al.* 2001; BONNEFOY-CLAUDET *et al.*, 2006; ALBARELLO e LUNEDEI, 2010), il numero dei modi rilevanti delle onde di superficie e l'influenza dei fattori di qualità Q [LUNEDEI e ALBARELLO, 2009; DAL MORO, 2010]. Tali aspetti paiono infatti essere dipendenti dal sito e quindi nessun criterio di modellazione può essere considerato universalmente valido.

È anche noto che le condizioni meteorologiche possono pesantemente influenzare gli spettri dei microtremori (e.g. TANIMOTO, 1999; ALI *et al.*, 2010; DAL MORO, 2012), mentre effetti topografici e fonti artificiali di rumore ambientale (ad es. impianti industriali o artigianali) possono introdurre segnali che, se non opportunamente filtrati, rischiano di essere interpretati in termini di caratteristiche proprie del sito.

Va infine ricordato che la modellazione del rapporto H/V attraverso l'ellitticità del moto associato alle onde di superficie è matematicamente piuttosto problematica, e il suo calcolo può soffrire di pesanti instabilità numeriche.

D'altra parte, l'inversione congiunta di diversi dati rappresenta certamente l'unico modo sia per ridurre la non-univocità della soluzione sia per giungere ad un'interpretazione affidabile e vincolata dei dati stessi [PICOZZI e ALBARELLO, 2007; DAL MORO, 2008a; 2010; 2012].

A causa dei problemi legati alla presenza dei minimi locali e all'equivalenza delle soluzioni (problemi diversi, anche se concettualmente collegati) è responsabilità di chi interpreta la prova scegliere un modello che possieda un attendibile significato geologico e stratigrafico (*Noi non invertiamo. Noi modelliamo.* STOKOE, 2009).

3. La distribuzione dell'energia tra modi nella propagazione delle onde di superficie

La corretta interpretazione dei dati di campagna può diventare complicata quando la distribuzione dell'energia tra i diversi modi di propagazione delle onde di superficie non segue modelli elementari. Al fine di mostrare come i diversi modi possano effettivamente succedersi e sovrapporsi, si fa qui dapprima riferimento ad una serie di sismogrammi sintetici [CARCIONE, 1992] calcolati per una serie di stratigrafie 'artificiali'.

Il modello in figura 5 mostra un esempio del cosiddetto *mode splitting*. Il modo fondamentale domina sino a circa 28Hz mentre, per frequenze più alte, l'energia è associata a modi superiori su intervalli di frequenza limitati e chiaramente definiti.

I dati riportati in figura 6 mettono invece in evidenza come il modo fondamentale e quelli superiori possano fondersi ed apparire un unico modo; si noti la continuità del segnale per frequenze superiori a 20 Hz.

La figura 7 riporta un esempio di doppio salto di modo, in quanto il modo fondamentale domina per frequenze superiori a 40 ed inferiori a 20Hz, mentre l'energia all'interno dell'intervallo indicato si riferisce al primo modo superiore.

Un ulteriore *dataset* sintetico è presentato in figura 8. Il modello del sottosuolo è particolarmente semplice e privo di inversioni di velocità, e considera comuni valori del coefficiente di Poisson. Si noti come, al di sotto di 13 Hz, le curve di dispersione relative al modo fondamentale ed a quello superiore si uniscano in un andamento che, per la sua continuità, rischia di essere interpretato come pertinente ad un unico modo.

Come mostrano gli esempi successivi, i dati sintetici sopra riportati rispecchiano quanto poi in effetti accade in realtà. Il primo *dataset* di campagna in esame (Fig. 9) è stato acquisito in una piana alluvionale dell'Italia nord-orientale: si osservi che la distribuzione dell'energia tra i modi è qualitativamente molto simile a quella calcolata per i dati sintetici riportati in figura 7.

Un ulteriore *dataset* di campagna, acquisito nei pressi di Pisa (Fig. 10), mostra uno splendido esempio di *mode splitting*, confrontabile con i dati sintetici riportati in figura 5.



Fig. 5 – Dataset sintetico con esempio di *mode splitting*: a) profilo di V_s (i numeri rappresentano i valori del rapporto di Poisson); b) tracce sismiche per la componente verticale (sorgente ad impatto verticale) [CARCIONE, 1992]; c) spettro di velocità calcolato e curve di dispersione teoriche (onde di Rayleigh) per i primi 6 modi [DUNKIN, 1965].

Fig. 5 – Synthetic dataset showing an example of mode splitting: a) V_s model (reported numbers indicate the adopted values for the Poisson's ratio); b) seismic traces for the vertical component (vertical impact source) [CARCIONE 1992]; c) computed velocity spectrum with overlapped the theoretical Rayleigh-wave dispersion curves for the first 6 modes [DUNKIN, 1965].



Fig. 6 – Dataset sintetico: a) profilo di V_s (i numeri rappresentano i valori del rapporto di Poisson); b) tracce sismiche per la componente verticale (sorgente ad impatto verticale); c) spettro di velocità calcolato e curve di dispersione teoriche (onde di Rayleigh) per i primi due modi.

Fig. 6 – Synthetic dataset: a) V_S model (reported numbers indicate the adopted values for the Poisson's ratio); b) seismic traces for the vertical component (vertical impact source); c) computed velocity spectrum with overlapped the theoretical Rayleigh-wave dispersion curves for the first 2 modes.

Il *mode jumping (salto di modo)* è quindi un fenomeno che può verificarsi più di una volta nello stesso *dataset* e l'energia può distribuirsi tra i diversi modi in maniera complessa ma interpretabile.

Si noti come, sebbene inversioni di V_S siano spesso responsabili di salti di modo, non è invece sempre possibile affermare che un salto di modo è causato da un'inversione, in quanto altre situazioni stratigrafiche ne possono essere causa (vedi anche DAL Mo-Ro, 2011; 2012).

Infatti se la presenza di livelli con inversioni di velocità (V_S) e/o alti valori del rapporto di Poisson possono essere spesso causa di complesse distribuzioni di energia tra i modi, è comunque da sottoli-



Fig. 7 – Dataset sintetico: a) profilo di V_s (i numeri rappresentano i valori del rapporto di Poisson); b) tracce sismiche (componente verticale, sorgente ad impatto verticale); c) spettro di velocità calcolato e curve di dispersione teoriche delle onde di Rayleigh per i primi due modi.

Fig. 7 – Synthetic dataset: a) V_S model (reported numbers indicate the adopted values for the Poisson's ratio); b) seismic traces for the vertical component (vertical impact source); c) computed velocity spectrum with overlapped the theoretical Rayleigh-wave dispersion curves for the first 2 modes.



Fig. 8 – Dataset sintetico: a) profilo di V_s (i numeri rappresentano i valori del rapporto di Poisson); b) tracce sismiche (componente verticale, sorgente ad impatto verticale); c) spettro di velocità calcolato e curve di dispersione teoriche delle onde di Rayleigh per i primi due modi.

Fig. 8 – Synthetic dataset: a) V_S model (reported numbers indicate the adopted values for the Poisson's ratio); b) seismic traces for the vertical component (vertical impact source); c) computed velocity spectrum with overlapped the theoretical Rayleigh-wave dispersion curves for the first 2 modes.

neare che tali aspetti non sono gli unici possibili responsabili di spettri di velocità complessi che richiedono particolari cautele in fase interpretativa (vedi anche Foti *et al.*, 2000; O'NEILL *et al.*, 2004; O'NEILL e MATSUOKA, 2005; DAL MORO 2008a; 2011; 2012).

Peraltro, i modi superiori, quando correttamente interpretati, non rappresentano una classe di "rumore", ma un'informazione estremamente importante per meglio definire il modello di sottosuolo, in particolare per gli strati più profondi.

Talune, spesso implicite, assunzioni secondo cui il modo fondamentale è sempre comunque dominante, mentre i modi superiori appaiono quasi unicamente ad alte frequenze, non sono in alcun modo



Fig. 9 – Dataset MASW di campagna: tracce acquisite (componente verticale, sorgente ad impatto verticale) e spettro di velocità calcolato. Si noti l'energia associata ai modi superiori nell'intervallo 10-20 Hz e per frequenze superiori ai 30 Hz. Fig. 9 – MASW field dataset: acquired traces (vertical component, vertical-impact sledgehammer) and computed velocity spectrum. Notice the energy associated to higher modes in the 10-20 Hz range and for frequencies higher than 30 Hz.



Fig. 10 – Dataset MASW di campagna: esempio di *mode splitting* (per gentile concessione dello Studio di Geologia Stefania Botti, Sarzana – SP, Italia).



generalizzabili. Diverse evidenze mostrano che, in particolare rispetto le onde di Rayleigh, si possono verificare complesse distribuzioni di energia anche in situazioni apparentemente meno complesse con anche pressoché completa assenza del modo fondamentale [DAL Moro, 2008a; 2011; 2012]. Di conseguenza è anche evidente che nessuna procedura automatica è in grado di tener conto di queste complessità, che richiedono invece un'interpretazione sotto il controllo diretto di un esperto.

4. Analisi congiunta: un caso studio

Un *dataset* sismico costituito da dati MASW, Re-Mi e HVSR è stato acquisito nell'Italia nord-orientale, in un'area di alta pianura, dove la sequenza stratigrafica è genericamente composta da strati limosi e sabbiosi, con occasionali lenti di ghiaia (nel sito non erano a disposizione sondaggi di dettaglio). I parametri di acquisizione dei dati MASW e ReMi sono riportati in tabella I; la durata di registrazione dei microtremori (effettuata con terna LE-3Dlite Mkll della *Lennartz electronic*) per la definizione della curva HVSR è pari a 20 minuti.

La notevole variazione di velocità delle onde di taglio (Vs), determinata dal contatto tra gli strati sabbiosi/limosi superficiali ed un livello ghiaioso a circa 4 m di profondità, produce effetti peculiari che rendono il sito particolarmente interessante.

I dati di sismica attiva sono stati elaborati al fine di analizzare la dispersione delle onde di Rayleigh e Love, la rifrazione delle onde P e SH e la curva di attenuazione delle onde di Rayleigh (vedi ad es. XIA *et* *al.*, 2002). Sono stati poi anche considerati dati *Re-Mi* e *HVSR*, ottenuti dalla registrazione dei microtremori.

L'analisi della rifrazione dell'onda di compressione e di taglio (P, SH - vedi Fig. 11) è risultata estremamente utile a caratterizzare gli strati più superficiali e a fornire indicazioni per l'analisi delle curve di dispersione e del rapporto spettrale. In questo caso, infatti, le curve di dispersione mostrano una complessa distribuzione dell'energia tra i diversi modi, e per adeguatamente interpretare il rapporto HVSR è stato necessario imporre alcuni vincoli quantitativi al profilo superficiale della V_S.

Prima di procedere al *picking* delle curve di dispersione dei diversi modi presenti nel *dataset*, si è provveduto ad un filtraggio dei dati nel dominio frequenza-velocità, in modo tale da porre in evidenza i segnali relativi ai modi più evanescenti (cfr. p.es. Luo *et al.*, 2009). In figura 12 sono riportati i dati relativi alle onde di Rayleigh (sia nel dominio *x-t* che in quello *v-f*) prima e dopo il filtraggio, grazie al quale si è potuto meglio evidenziare il modo fondamentale. Simili elaborazioni si sono considerate anche per le onde di Love.

L'inversione congiunta delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh e Love è stata svolta secondo la c.d. 'analisi del fronte di Pareto' [DAL MO-RO e PIPAN, 2007; DAL MORO, 2008b; 2010; DAL MORO e FERIGO, 2011; DAL MORO, 2012]. La figura 13 mostra sulla sinistra gli spettri di velocità, le curve di dispersione identificate (e pertinenti tanto al modo fondamentale quanto ai modi superiori) e quelle relative ai modelli del fronte di Pareto, mentre sulTab. I – Parametri di acquisizione per i dataset MASW e ReMi.

Tab. I – Acquisition parameters for the MASW and ReMi field datasets.

	MASW (Rayleigh e Love)	ReMi (Rayleigh)
Offset minimo	4m	_
Distanza tra geofoni (24 canali)	2m	2m
Intervallo di campionamento	0.125ms	1ms
Lunghezza della registrazione	2s	600s

la destra sono riportati i corrispondenti profili V_S. Si noti come lo spettro di velocità relativo alla componente verticale mostri chiaramente il modo fondamentale solo nella gamma di frequenza 25-30 Hz, mentre a frequenze inferiori tale modo sia estremamente evanescente (vedi anche Fig. 12). La componente trasversale, relativa alle onde di Love, mostra invece un comportamento più semplice, come già osservato da diversi autori [SAFANI *et al.*, 2005; DAL MORO, 2011; 2012]. La sostanziale coincidenza tra V_{SH} e V_{SV} indica l'assenza di significative anisotropie e mostra la presenza di consistenti livelli ghiaiosi tra circa 4 e 8m di profondità e al di sotto di circa 20 m.

In figura 14 è anche riportata la distribuzione dei modelli nello spazio bi-obiettivo che mostra la buona simmetria del fronte di Pareto, ed indica la congruenza dell'intero processo di inversione



Fig. 11 – Analisi della rifrazione: a) onde SH e b) onde P. I primi arrivi mostrano l'orizzonte a circa 4 m di profondità (vedi modello in Fig.13) (V_p : 400, 570, 1300 m/s).

Fig. 11 – Refraction data. Left and right panels report the transversal (SH) and vertical (P) datasets respectively. First arrivals show a clear horizon at about 4m depth (see model reported in Fig. 13) (V_p : 400, 570, 1300 m/s).



Fig. 12 – Evidenziazione del modo fondamentale delle onde di Rayleigh: a) spettro di velocità dei dati originali con in evidenza il poligono usato per filtrare segnali estranei al modo fondamentale; b) dati originali nel dominio x-t (evidenziato nel poligono la parte di segnale pertinente alla propagazione delle onde di superficie); c) spettro di velocità del dato filtrato; d) dati nel dominio x-t successivamente alla rimozione dei segnali estranei al modo fondamentale (vedi testo). Nei due spettri di velocità è anche indicata la curva di dispersione relativa al modo fondamentale (molto evanescente nei dati originali e bene in evidenza successivamente al filtraggio).

Fig. 12 – Rayleigh-wave fundamental-mode separation: a) raw-data velocity spectrum with overlapped the polygon used to filter out the signals not related to the fundamental mode; b) raw data in the x-t domain; c) velocity spectrum of the filtered data; d) filtered data in the x-t domain (see text for details). In the two velocity spectra is also indicated the dispersion curve pertinent to the fundamental mode (quite weak in the raw data).



Fig. 13 – Inversione congiunta delle curve di dispersione relative alle onde di Rayleigh e Love. A sinistra spettri di velocità e curve di dispersione sperimentali e invertite (modelli del fronte di Pareto). A destra profili V_S dei modelli del fronte di Pareto. Fig. 13 – Joint analysis of Rayleigh and Love dispersion curves. On the left: top and bottom panels present the velocity spectra together with the picked and inverted (Pareto front models) dispersion curves for Rayleigh and Love waves respectively. On the right: V_S profiles for the Pareto front models.



Fig. 14 – Analisi congiunta onde di Rayleigh e Love. Distribuzione nello spazio bi-obiettivo (ob#1: misfit dell'onda di Rayleigh; ob#2: misfit dell'onda di Love) dei modelli valutati. È anche riportato l'indice di simmetria (S.I.) del fronte di Pareto.

Fig. 14 – Joint inversion of Rayleigh- and Love-wave dispersion curves. Distribution of the evaluated models in the bi-objective space (obj#1: Rayleigh-wave misfit; obj#2: Love-wave misfit). Symmetry Index (S.I.) of the Pareto front models is also reported.



Fig. 15 – Spettro di velocità determinato da analisi ReMi. Si noti che, analogamente ai dati MASW (componente Rayleigh), per frequenze inferiori ai 25 Hz lo spettro è ancora completamente dominato dai modi superiori.

Fig. 15 – Velocity spectrum determined through ReMi analysis. Notice that, similarly to MASW data (Rayleigh component), for frequencies lower than about 25Hz higher modes appear to dominate.

[DAL MORO e FERIGO, 2011]. Lo spettro di velocità determinato attraverso analisi *ReMi* è presentato in figura 15 e non mostra significative differenze rispetto a quello determinato tramite *MASW* (componente verticale, onde di Rayleigh) a dimostrazione di come il modo fondamentale risulti assente anche per acquisizioni di carattere passivo (per le quali un filtraggio come quello presentato in figura 12 non risulta possibile).

La figura 16 riporta l'*HVSR* osservato e calcolato a partire dal modello individuato dall'inversione congiunta delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh e Love. Il picco a circa 1 Hz (indicato dalla lettera A) non è rappresentativo della risposta dinamica del sito, in quanto legato alla presenza di un impianto industriale a poche centinaia di metri dal sito indagato. Si noti comunque come tale picco industriale/antropico si sovrapponga ad un debole picco di natura invece litologica centrato ad un frequenza di circa 1.8Hz e con valore H/V pari a circa 2.

Insieme alla curva H/V osservata, il grafico riporta le curve H/V teoriche calcolate considerando le onde di volume [HERAK, 2008] e l'ellitticità degli spostamenti delle onde di superficie [LUNEDEI e AL-BARELLO, 2009] per due modelli caratterizzati dallo stesso profilo di Vs (Fig. 16a) ma con diversi fattori di qualità Qs e numero di modi. Nel primo caso (Fig. 16b) è stato considerato il caso puramente elastico e, per la modellazione H/Vattraverso l'ellitticità delle onde di superficie, due soli modi; quest'ultimo caso restituisce un rapporto H/V caratterizzato da un picco eccessivamente elevato a circa 20 Hz; tale picco, considerando un solo modo, avrebbe raggiunto valori altissimi. E stata quindi eseguita una seconda modellazione (Fig. 16c) considerando i valori Qs stimati dall'analisi dell'attenuazione dell'onda di Rayleigh (vedi Fig. 17 e relativo testo) e 10 modi per il calcolo della curva H/V basata sull'ellitticità delle onde di superficie. È evidente che, per il presente sito, la seconda procedura risulta la più appropriata.

L'esempio mostra che le analisi *HVSR* effettuate considerando un inadeguato numero di modi e senza considerare il ruolo dell'attenuazione rischiano di fornire un profilo V_S errato, poiché i valori dei fattori di qualità Q e il numero dei modi sono parametri dipendenti dal sito e da considerare quindi come ulteriori variabili in aggiunta ai valori di V_S e agli spessori.

Dal confronto tra rapporti H/V sperimentali e modellati si osserva altresì come, mentre i valori del rapporto H/V in corrispondenza del periodo fondamentale determinabile tramite onde di corpo e di superficie sostanzialmente coincidano (vedi picco a circa 1.8Hz), a frequenze maggiori l'*H/V* osservato è meglio riprodotto tenendo conto dell'ellitticità delle onde di superficie (cfr. ALBARELLO e LUNE-DEI, 2010).

Risulta chiaro come un approccio non-olistico non avrebbe consentito di convalidare i criteri di modellazione (il numero di modi per il calcolo della curva *H/V* attraverso l'ellitticità delle onde di super-



Fig. 16 – Rapporto Spettrale H/V: a) profilo di V_S; b) modellazione effettuata considerando il caso elastico e, per l'H/V da ellitticità delle onde di superficie (Surface Waves, SW), due soli modi; c) modellazione effettuata considerando il caso visco-elastico e, per l'H/V da ellitticità delle onde di superficie, dieci modi (vedi testo per dettagli).

Fig. 16 - H/V Spectral Ratio: a) V_S model; b) HVSR modelling performed while considering the purely elastic case and, for the HVSR from Surface Wave (SW) ellipticity, two modes only; c) HVSR modelling performed while considering the visco-elastic case and, for the HVSR from Surface Wave ellipticity, ten modes. See text for details.



Fig. 17 – Analisi dell'attenuazione dell'onda di Rayleigh: a) curve di attenuazione in funzione di $\lambda/2$; b) modello Q_S; c) curve osservate calcolate in base ai metodi "spectral ratio" e "matching" [TONN, 1991] e curva di attenuazione del modello Q_S proposto.

Fig. 17 – Rayleigh-wave attenuation analyses: a) attenuation curve as a function of $\lambda/2$; b) Q_S model; c) observed curves calculated according to spectral ratio and matching technique [TONN, 1991] together with the attenuation curve of the proposed model.

ficie) né quindi i parametri del modello (Vs e spessori).

Un'ulteriore convalida della congruenza del modello proposto è fornita dall'analisi dell'attenuazione delle onde di Rayleigh (cfr. p. es. XIA *et al.*, 2002). La figura 17 riporta il profilo Qs identificato ed il confronto tra le curve di attenuazione osservate (calcolate seguendo due diverse metodologie) e quella teorica relativa a detto profilo. È evidente la presenza di un terreno superficiale con significativo smorzamento e spessore di circa 4 m al di sopra di uno strato con Qs più elevato. Si ricorda a tale proposito come, in termini del tutto generici, a terreni con bassi valori di V_S sono tipicamente da associare fattori di smorzamento elevati e quindi bassi valori dei fattori di qualità Q.

In questo caso (come in molti altri), è evidente come i singoli *dataset* (onde di superficie Love/ Rayleigh, ReMi, HVSR) presentino caratteristiche difficili da interpretare alla luce di semplicistici paradigmi interpretativi spesso proposti come chiave universale di analisi. L'analisi di un singolo *dataset* può essere insufficiente e fuorviante, conducendo ad errori di interpretazione, mentre è necessario perseguire la generale congruenza dei risultati dell'interpretazione rispetto a tutti i dati disponibili, secondo un approccio congiunto di tipo olistico.

5. Considerazioni conclusive

In questo contributo sono stati riassunti i principali problemi di interpretazione relativi ai più comuni metodi di indagine sismica di superficie, con esempi relativi a dati sintetici o sperimentali.

Gli spettri di velocità ottenuti attraverso acquisizioni ed analisi *MASW* o *ReMi* possono contenere un complesso intreccio di modi, e l'ipotesi interpretativa di un modo fondamentale dominante o di un semplice succedersi di modi può rivelarsi spesso fuorviante. La complessità di taluni spettri di velocità è spesso (ma non esclusivamente) legata a due situazioni: presenza di significative inversioni di velocità e/o forti e repentini incrementi dei valori di V_S già nei primissimi metri. È d'altro canto chiaro che tali criticità possono essere risolte procedendo in modo appropriato nell'interpretazione degli spettri di velocità.

Negli ultimi anni si è assistito ad un fiorire di studi sull'utilizzo di metodi *global search* per l'inversione delle curve di dispersione. Questi metodi comportano un carico computazionale notevole se confrontato con quello richiesto dai metodi basati sul gradiente della matrice *jacobiana*, ma nonostante le loro prestazioni possano in generale rivelarsi più accurate, a causa dell'equivalenza dei modelli non è chiaramente possibile pensare che rappresentino *la* soluzione al problema. In effetti, in casi estremi, una domanda come: "lo schema di inversione è in grado di individuare il modello *corretto*?" è priva di senso. Come mostrato in figura 2, in particolare nel caso di schemi di inversione basati solo sul modo fondamentale, l'equivalenza dei modelli rende tale domanda priva di senso poiché, in termini di proprietà dispersive, modelli diversi possono risultare assolutamente equivalenti.

A causa della sua natura, l'*HVSR* non può fornire valori di V_S univoci, se non supportato da valori della velocità delle onde di taglio determinabili (per lo meno per gli strati più superficiali) da *MASW*e/o da appropriati studi di sismica a rifrazione/riflessione.

Per una precisa ricostruzione del profilo verticale della V_S mediante indagini di superficie, l'unico modo per affrontare il problema risulta l'analisi congiunta di più dati, quali ad esempio la dispersione delle onde di Rayleigh e Love, le curve *HVSR*, la riflessione e/o rifrazione in onde P ed SH.

L'analisi congiunta delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh e Love (possibilmente assieme ad analisi di riflessione/rifrazione di onde SH) può inoltre fornire informazioni su possibili anisotropie in termini di velocità delle onde di taglio: la dispersione delle onde di Rayleigh è associata infatti alla V_{SV}, mentre quella delle onde di Love e la riflessione/rifrazione dell'onda SH dipendono evidentemente dalla V_{SH} (vedi ad es. GAHERTY, 2004; SAFANI *et al.*, 2005).

Molti di questi aspetti sono stati documentati da un caso studio particolarmente complesso qui presentato perché utile a mostrare alcuni punti critici che, impropriamente affrontati, porterebbero ad una errata ricostruzione del sottosuolo.

I risultati dell'analisi pongono in evidenza che assunzioni comunemente adottate nell'interpretazione dei dati sismici devono essere attentamente vagliate allorché si desideri fornire un modello del sottosuolo realmente attendibile. Solo un'analisi congiunta dei dati e la verifica che il modello finale soddisfa i vincoli ottenuti da tutte le metodologie consentono infatti di evitare interpretazioni fuorvianti.

Ringraziamenti

Una parte del lavoro è stata condotta presso l'Università di Trieste (COFIN 2004 e 2006, progetto ASSESS - Protezione Civile del Friuli Venezia Giulia).

I dati presentati in figura 10 sono stati gentilmente forniti dallo Studio di Geologia Stefania Botti (Sarzana - SP, Italia).

Il testo ha beneficiato delle osservazioni di un anonimo *assessor* che l'autore desidera qui ringraziare.

Bibliografia

ALBARELLO D., LUNEDEI E. (2010) – Alternative interpretations of horizontal to vertical spectral ratios of ambient vibrations: new insights from theoretical modeling. Bulletin of Earthquake Engineering, 8, pp. 519-534.

ALI M. Y., BERTEUSSEN K., SMALL J., BARKAT B. (2010) – Low-frequency passive seismic experiments in Abu Dhabi, United Arab Emirates: implications for hydrocarbon detection. Geophysical Prospecting, 58, pp. 875-899.

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

BONNEFOY-CLAUDET S., COTTON F., BARD P.-Y. (2006) – The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review. Earth-Science Reviews, 79, pp. 205-227.

BONNEFOY-CLAUDET S., KÖHLER A., CORNOU C., WATHE-LET M., BARD P.-Y. (2008) – *Effects of Love Waves on Microtremor H/V Ratio.* Bulletin of the Seismological Society of America, 98, pp. 288-300.

CARCIONE J.M. (1992) – Modeling Anelastic Singular Surface Waves in the Earth. Geophysics, 57, pp. 781-792.

DAL MORO G. (2012) – Onde di Superficie in Geofisica Applicata – acquisizione ed analisi secondo tecniche MASW e HVSR. Dario Flaccovio Editore, 192 pp.

DAL MORO G. (2011) – Further Insights into Surface Wave Analysis: Attenuation, Dispersion and the Need for Joint Analyses. Atti 30° convegno Gruppo Nazionale Geofisica della Terra Solida, pp. 561-563.

DAL MORO G., FERIGO F. (2011) – Joint Analysis of Rayleigh and Love-wave Dispersion Curves: Issues, Criteria and Improvements. J. Appl. Geophysics, 75, 573-589

DAL MORO G. (2010) – Insights on Surface Wave Dispersion and HVSR: Joint Analysis via Pareto Optimality. Journal of Applied Geophysics, 72, pp. 29-140.

DAL MORO G. (2008b) – V_S and V_P Vertical Profiling and Poisson Ratio Estimation via Joint Inversion of Rayleigh Waves and Refraction Travel Times by means of Bi-Objective Evolutionary Algorithm. J. Appl. Geophysics, 66, pp. 15-24.

DAL MORO G. (2008a) – Tre divagazioni: il mito dell'inversione, MASW in Friuli, esempi di applicazione congiunta MASW-rifrazione. Proceedings of the workshop "Monitoraggio Dinamico per la Valutazione della Sicurezza Sismica dei Ponti", International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, 18 Aprile 2007 (http://www.provincia.udine.it/ambiente/difesadelsuolo/progetti/ponti/Documents/ Dal-Moro.pdf).

DAL MORO G., PIPAN M. (2007) – Joint Inversion of Surface Wave Dispersion Curves and Reflection Travel Times via Multi-Objective Evolutionary Algorithms. Journal of Applied Geophysics, 61, pp. 56-81.

DAL MORO G., PIPAN M., GABRIELLI P. (2007) – Rayleigh Wave Dispersion Curve Inversion via Genetic Algorithms and Marginal Posterior Probability Density Estimation. Journal of Applied Geophysics, 61, pp. 39-55.

- DUNKIN J.W. (1965) Computation of modal solutions in layered, elastic media at high frequencies. Bulletin of Seismological Society of America, 55, pp. 335-358.
- EVISON F.F., ORR R.H., INGHAM C.E. (1959) *Thickness* of the earth's crust in Antarctica. Nature, 183, pp. 306-308.
- FAH D., KIND F., GIARDINI D. (2001) A theoretical investigation of average H/V ratios. Geophys. J. Int., 145, pp. 535-549.
- FOTI S., LANCELLOTTA R., SAMBUELLI L., SOCCO L.V. (2000) Notes on fk analysis of surface waves. Annali di Geofisica. 43, pp. 1199-1210.

FOTI S., SANTUCCI DE MAGISTRIS F., SILVESTRI F., EVA C. (2011) – Valutazione degli standard di esecuzione e dell'efficacia delle indagini di sismica attiva e passiva. Supplemento a Ingegneria Sismica, 28, pp. 23-31.

GAHERTY J.B. (2004) – A surface wave analysis of seismic anisotropy beneath eastern North America. Geophys. J. Int., 158, pp. 1053-1066.

GLANGEAUD F., MARI J., LACOUME J.-L., MARS J., NARDIN M. (1999) – *Dispersive Seismic Waves in Geophysics*. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 3, pp. 265-306.

HERAK M. (2008) – ModelHVSR – A Matlab tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise. Computers & Geosciences, 34, pp. 1514-1526.

IVANOV J., MILLER R. D., XIA J., STEEPLES D. W., PARK C. B. (2005a) – The inverse problem of refraction traveltimes, part I: Types of geophysical nonuniqueness through minimization. Pure and Applied Geophysics, 162, pp. 447-459.

- IVANOV J., MILLER R.D., XIA J., STEEPLES D. (2005b) – The inverse problem of refraction traveltimes, part II: Quantifying refraction nonuniqueness using a three-layer model. Pure and Applied Geophysics, 162, pp. 461-477.
- LOUIE J.N. (2001) Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays. Bulletin of Seismological Society of America, 91, pp. 347-364.
- LUKE B., CALDERÓN-MACÍAS C., STONE R. C., HUYNH M. (2003) – Nonuniqueness in inversion of seismic surfacewave data. In "Proceedings, symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems", Environmental and Engineering Geophysical Society, CD-ROMSUR05.
- LUNEDEI E., ALBARELLO D. (2009) On the seismic noise wavefield in a weakly dissipative layered Earth. Geophys. J. Int., 177, pp. 1001-1014.
- Luo Y., XIA J., MILLER R.D., XU Y., LIU J., LIU Q. (2009) – Rayleigh-wave mode separation by high-resolution linear Radon transform. Geophysical Journal International, 179, pp. 254-264.
- NAKAMURA Y. (2000) Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications.
 Proc XII World Conf. Earthquake Engineering, New Zealand, Paper n. 2656.

- NAKAMURA Y. (1996) *Realtime Information Systems for Seismic Hazard Mitigation*. Quarterly Report of Railway Technical Research Inst. (RTRI) 37, pp. 112-127.
- NAKAMURA Y. (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of Railway Technical Research Inst. (RTRI) 30, pp. 25-33.
- O'NEILL A., SAFANI J., MATSUOKA T., SHIRAISHI K. (2006) – Rapid shear wave velocity imaging with seismic landstreamers and surface wave inversion. Exploration Geophysics, 37, pp. 292-306.
- O'NEILL A., MATSUOKA T. (2005) Dominant Higher Surface-wave Modes and Possible Inversion Pitfalls. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 10, pp. 185-201.
- O'NEILL A., MATSUOKA T., TSUKADA K. (2004) Some pitfalls associated with dominant higher mode surfacewave inversion. Near Surface 2004 – 10th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Utrecht, The Netherlands.
- PARK C. B., MILLER R. D., XIA J. (1999) Multichannel analysis of surface waves. Geophysics, 64, pp. 800-808.
- PEREYRA V., WOODS D. (1992) Numerical Algorithms for Cooperative Imaging of Complex Geological Regions. Final Report NSF (National Science Foundation).
- PEREYRA V. (2006) The Initialization Problem and Other Techniques for Robust Optimization, Final Report, Air Force Research Laboratory/VAAA.
- PICOZZI M., ALBARELLO D. (2007) Combining Genetic and Linearized algorithms for a two-step joint inversion of Rayleigh wave dispersion and H/V spectral ratio curves. Geophysical Journal International, 169, pp. 189-200.
- SAFANI J., O'NEILL A., MATSUOKA T., SANADA Y. (2005) – Applications of Love Wave Dispersion for Improved Shear-wave Velocity Imaging. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 10, pp. 135-150.
- SCALES J.A., SMITH M.L., TREITEL S. (2001) *Introductory Geophysical Inverse Theory*. Samizdat Press, open file (http://samizdat.mines.edu).
- SHTIVELMAN V. (1999) Using surface waves for estimating the shear-wave velocities in the shallow subsurface onshore and offshore Israel. European Journal of Environmental and Engineering. Geophysics, 4, pp. 17-36.
- STOKOE K.H. II, NAZARIAN S., RIX G.J., SANCHEZ-SALINE-RO I., SHEU J., MOK Y. (1988) – In situ seismic testing of hard-to-sample soils by surface wave method. Earthq. Eng. and Soil dyn. II – Recent adv. in ground-motion eval. - Park City, ASCE, pp. 264-277.
- STOKOE K.H. (2009) Sesimic and Laboratory Seismic Measurements in Civil Engineering Applications. Keynote Speech at "Near Surface 2009" (EAGE), 7-9 September 2009 Dublin, Ireland.
- TANIMOTO T. (1999) Excitation of normal modes by atmospheric turbulence: source of long-period seismic noise.

Geophysical Journal International, 136, pp. 395-402.

- TONN R. (1991) The Determination of the Seismic Quality Factor Q from VSP Data: a Comparison of Different Computational Methods. Geophysical Prospecting, 39, pp. 1-27.
- XIA J., MILLER R. D., PARK C. B. (1999) Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. Geophysics, 64, pp. 691-700.
- XIA J., MILLER R. D., PARK C. B., TIAN G. (2002) Determining Q of near-surface materials from Rayleigh waves. Journal of Applied Geophysics. 51, pp. 121-129.
- XIA J., MILLER R. D., PARK C. B., IVANOV J., TIAN G., CHEN C. (2004) – Utilization of high-frequency Rayleigh waves in near-surface geophysics. The Leading Edge, 23, pp. 753-759.
- YAMANAKA H. (2005) Comparison of Performance of Heuristic Search Methods for Phase Velocity Inversion in Shallow Surface Wave Method. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 10, pp. 163-173.

Analysis of surface waves and H/V spectral ratio: some problematic aspects

Summary

The analysis of surface waves is typically conditioned by dispersion curve interpretation and, as any non-destructive geophysical method, is affected by non-uniqueness. On the other side, due to its nature, H/V spectral ratio suffers even more heavily from non-uniqueness.

In the present work some critical aspects are illustrated through the analysis of synthetic and real datasets.

A particularly-complex field dataset is analysed to put in evidence the importance of a joint procedure able to overcome the limitations of each single methodology.

The proposed holistic approach is presented with a twofold goal: on the one side to better constrain the subsurface V_S (shear-wave velocity) model, on the other side to validate the data interpretation especially in case of complex datasets.

Due to non-uniqueness and ambiguities in data interpretation, ReMi analyses (passive seismics) cannot be considered as a reliable tool for retrieving sound information about deep layers. The joint analysis of Rayleigh and Love-wave dispersion curves obtained through active seismic surveys (MASW) and H/V spectral ratio is performed also together with V_{SH} and V_P values obtained via standard refraction methods. The analysis of Rayleigh-wave attenuation is eventually performed with the aim to estimate the quality factors Q_S and validate the overall consistency of the proposed model.

Key terms: Dispersion; Surface waves; Joint inversion; Nonuniqueness; HVSR