



## **MASW + HVSR – UN CASO REALE A DIMOSTRAZIONE DELLA NECESSITA' DELL'ANALISI CONGIUNTA**

La tecnica MASW, correntemente usata per la stima del profilo di Vs (e di conseguenza del parametro Vs30), viene spesso ed erroneamente associata al solo studio delle Onde di Rayleigh; tale convinzione è assolutamente errata, in quanto è possibile e addirittura raccomandabile estendere l'indagine anche alle Onde di Love, eseguendo un'analisi congiunta; difatti, limitare lo studio alle sole Onde di Rayleigh comporta la possibilità di errori legati all'interpretazione degli spettri di velocità, dove il modo fondamentale spesso risulta non facilmente identificabile e in alcuni casi quasi del tutto assente. In queste situazioni, l'utilizzo dell'analisi congiunta è il solo modo per ridurre notevolmente la possibilità di interpretazioni errate, in quanto il modello estrapolato dovrà essere coerente con gli spettri di velocità di entrambi i tipi di Onde, riducendo, in ogni caso, il grado di approssimazione dell'indagine stessa.

A questo proposito è importante sottolineare che tutte le tecniche geofisiche (che si tratti di MASW, HVSR o qualsiasi altra) soffrono del problema della non univocità, ovvero ad un dato strumentale possono essere associati molteplici modelli, tutti diversi tra loro e tutti teoricamente coerenti con il dato acquisito.

L'unico modo per limitare il problema della non-univocità, ricostruendo così un modello del sottosuolo veritiero, è quello di unire più tipologie di dati, estrapolando da una loro analisi congiunta un risultato coerente con tutte le informazioni a disposizione.

A questo proposito, nella pratica professionale è sicuramente utile eseguire MASW con analisi congiunte Rayleigh + Love, unendo anche lo studio della Curva H/V (Tecnica HVSR), la quale, oltre a fornire ulteriori indicazioni riguardo le Vs, permette di ottenere informazioni riguardanti le frequenze di sito.

E' assolutamente necessario tenere presente che la tecnica HVSR, spesso usata singolarmente per la ricostruzione del profilo di Vs, soffre anch'essa di pesanti problemi di non-univocità, specie in assenza di precise indicazioni stratigrafiche e di Vs. Ulteriori questioni sono legate alla ripetibilità e alla chiarezza della curva H/V, frequentemente caratterizzata da picchi di origine antropica e da altri spiccatamente direzionali, di difficile interpretazione; la presenza di tali picchi conferisce alla curva H/V forti elementi di ambiguità, legati sia alla loro corretta interpretazione, sia alla possibilità che essi nascondano completamente eventuali picchi stratigrafici o comunque ne modifichino l'andamento. In tali circostanze, lo studio deve essere supportato da altre informazioni da cui è impossibile prescindere, in modo da poter definire l'origine di quei picchi, che se di natura antropica invalidano parzialmente (e in alcuni casi totalmente) la curva H/V.

Riassumendo, un'indagine MASW con analisi congiunta in Onde di Rayleigh e di Love, risulta essere assolutamente raccomandabile, in quanto permette di:

- fornire un modello di sottosuolo affetto da un minore grado di incertezza (limitando la non-univocità attraverso lo studio congiunto delle due componenti)
- ridurre notevolmente la possibilità di erronee interpretazioni legate allo studio di un solo tipo di onde, le quali porterebbero inevitabilmente a ricostruzioni del profilo di Vs anche pesantemente errate.



## CONFRONTO TRA ANALISI IN SOLE ONDE DI RAYLEIGH + HVSR E ANALISI CONGIUNTA RAYLEIGH E LOVE + HVSR

Si riporta di seguito un'indagine MASW + HVSR eseguita su un sito reale, in cui risulterà evidente come l'utilizzo di una sola tecnica di indagine (HVSR o MASW in sole Onde di Rayleigh) possa portare a ricostruzioni approssimative o addirittura errate del profilo di  $V_s$ , e quindi ad una stima erronea della  $V_{s30}$ .

### ANALISI IN SOLE ONDE DI RAYLEIGH + HVSR

Lo spettro di velocità delle Onde di Rayleigh mostra apparentemente un unico modo, continuo fino a circa 12 Hz, mentre a frequenze minori tale modo risulta essere meno chiaro e definito.

Eseguendo un'analisi in sole Onde di Rayleigh, il modo visibile nello spettro di velocità può essere interpretato come modo fondamentale; sulla base di tale assunzione si è proceduto con l'elaborazione, i cui risultati sono riportati in Fig.1.

Si noti come la curva H/V teorica associata al modello estrapolato sia relativamente concorde con quella sperimentale del sito, dando così un'apparente conferma della soluzione ottenuta.

In Fig.2 viene riportata la sismostratigrafia risultante, il cui valore stimato di  $V_{s30}$  è pari a 423 m/s (riferito al p.c.).

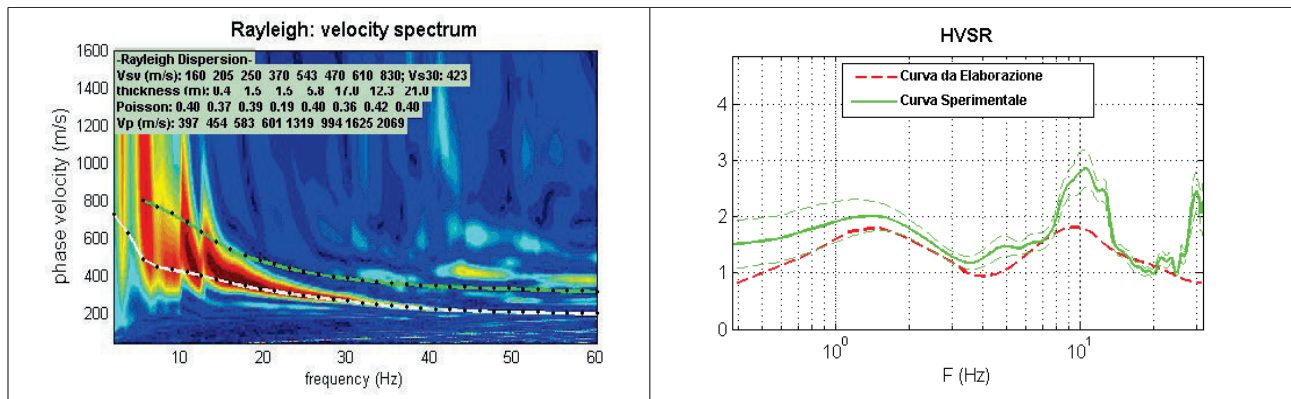


Fig. 1 – Spettro di velocità con curva di dispersione (a sinistra) e curve H/V (a destra)

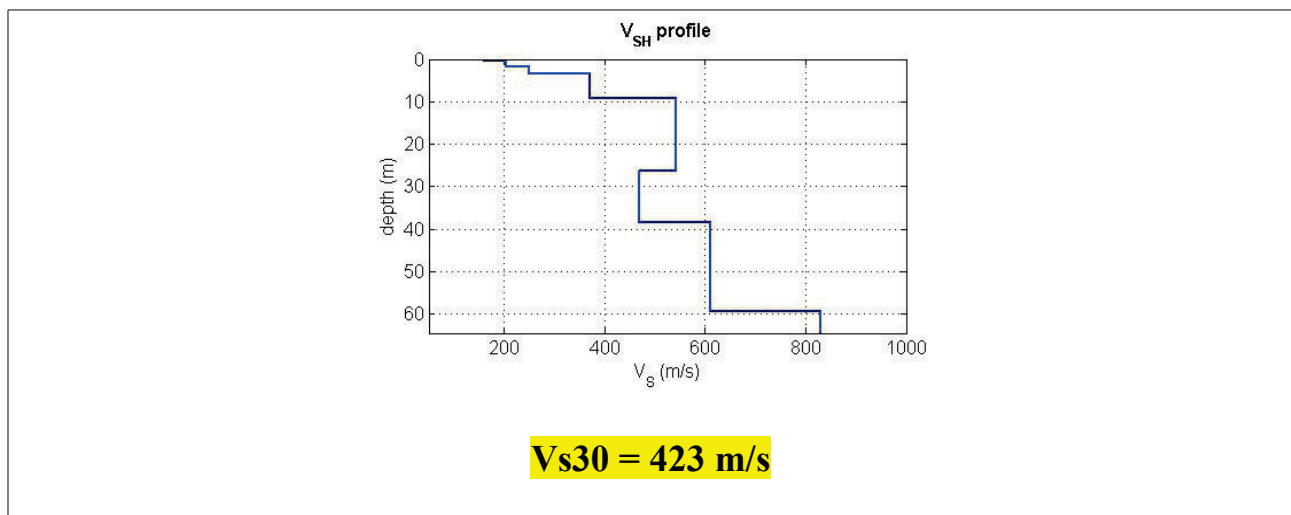


Fig. 2 – Sismostratigrafia associata al modello estrapolato



### ANALISI CONGIUNTA ONDE DI RAYLEIGH E ONDE DI LOVE + HVSr

Analizzando lo spettro di velocità delle Onde di Love, si osserva anche in questo caso un modo continuo e ben definito a frequenze inferiori a circa 40 Hz. Eseguendo ora un'analisi congiunta Rayleigh + Love, i cui risultati sono riportati in Fig.3 e Fig.4, è evidente l'errata interpretazione dello spettro di velocità delle Onde di Rayleigh effettuata precedentemente. Anche in questo caso si può notare come la curva H/V teorica sia sostanzialmente concorde con quella sperimentale.

Come ultimo dato, la stima della Vs30 riferita al p.c. derivante dal modello estrapolato mediante analisi congiunta, è pari a 325 m/s.

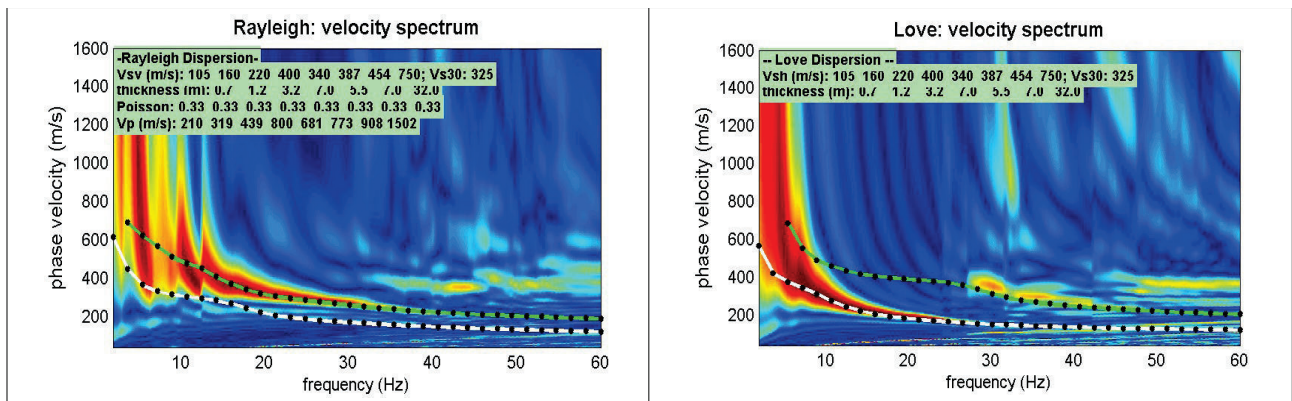


Fig. 3 – Spettri di velocità con curve di dispersione: Onde di Rayleigh (a sinistra) e Onde di Love (a destra)

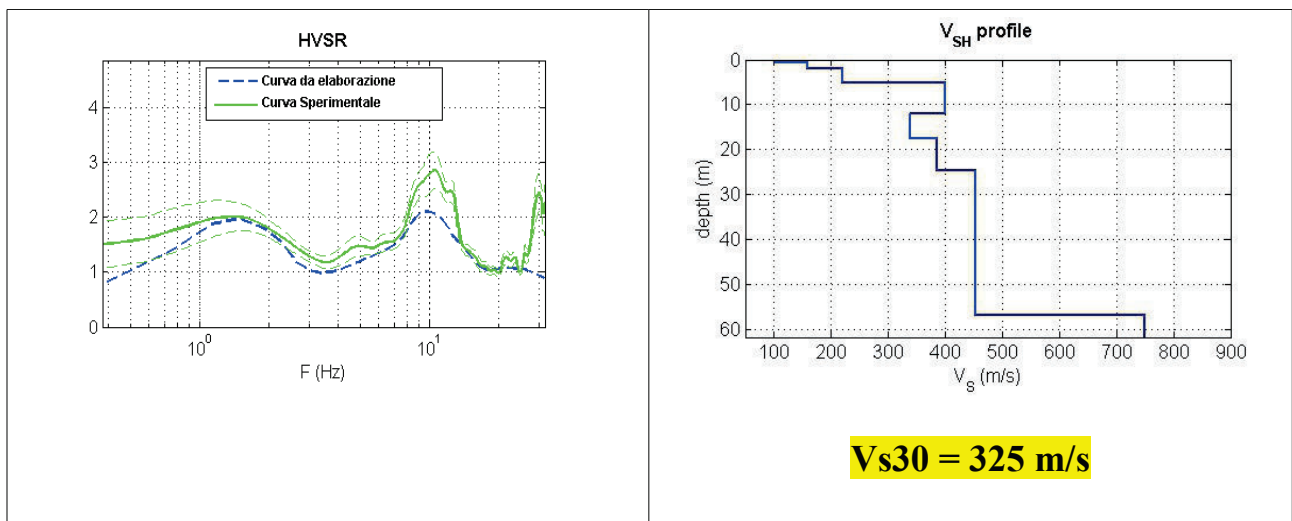


Fig. 4 – Curve H/V (a sinistra) e sismostratigrafia associata al modello estrapolato (a destra)



## CONFRONTO TRA ANALISI SINGOLA ED ANALISI CONGIUNTA

Andando a confrontare i risultati ottenuti si evince chiaramente la marcata differenza sia in termini di spessori che di Vs (e quindi di Vs30) delle sismostratigrafie generate dai due diversi approcci.

Analizzando la Fig.5, che riporta sugli spettri di velocità la curva di dispersione relativa alla sola analisi Rayleigh, appare lampante come essa risulti congruente con lo spettro Rayleigh, ma assolutamente non concorde con lo spettro Love. Difatti, sebbene la curva di dispersione abbia un buon fitting con il modo continuo e ben definito dello spettro Rayleigh, nello spettro Love essa risulta assolutamente discordante con qualsiasi modo, e in aggiunta con velocità decisamente sovrastimate rispetto a quelle associabili al modo che domina lo spettro. Attraverso l'analisi congiunta diventa così immediato il riconoscimento dell'errore interpretativo commesso, che, in caso di analisi in sole Onde di Rayleigh, sarebbe stato molto probabile commettere.

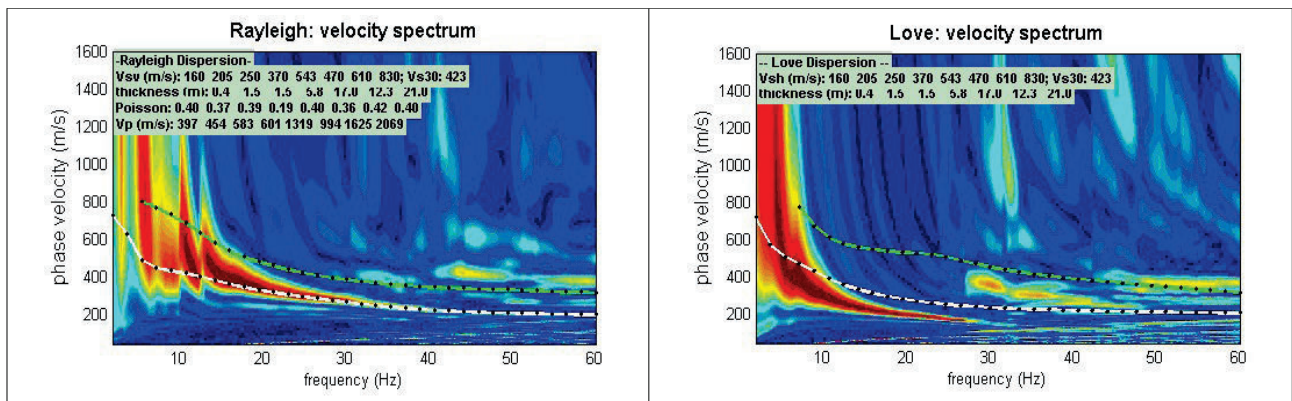


Fig. 5 – Spettri di velocità con curva di dispersione da analisi in sole Onde di Rayleigh: Spettro Rayleigh (a sinistra) e Spettro Love (a destra)

Passando ai risultati ottenuti attraverso l'analisi congiunta Rayleigh + Love per il sito in esame (Fig.6), si può osservare come il modello ottenuto produca una curva di dispersione con un buon fitting con il modo fondamentale dello spettro Love, e con il primo modo superiore dello spettro Rayleigh.

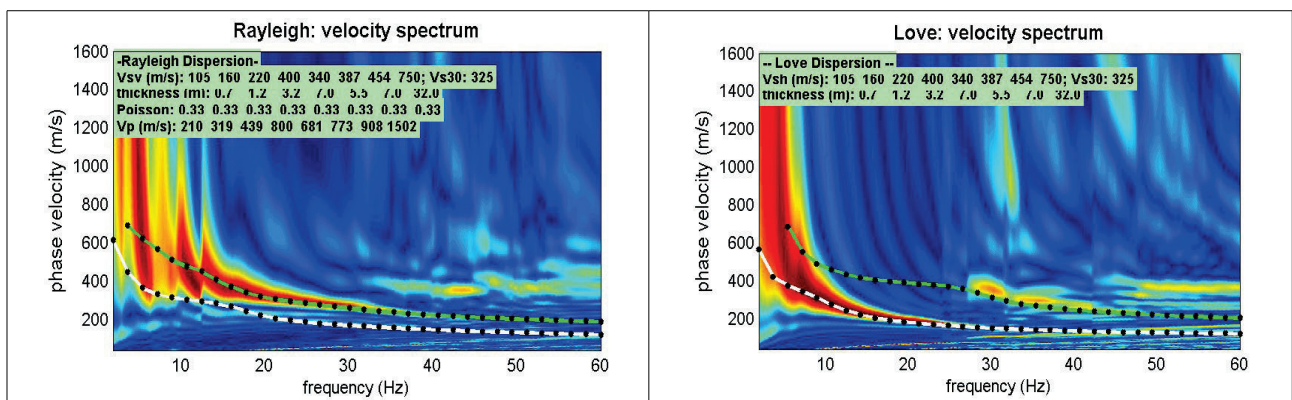


Fig. 6 – Spettri di velocità con curva di dispersione da analisi congiunta Onde di Rayleigh + Onde di Love Spettro Rayleigh (a sinistra) e Spettro di Love (a destra)



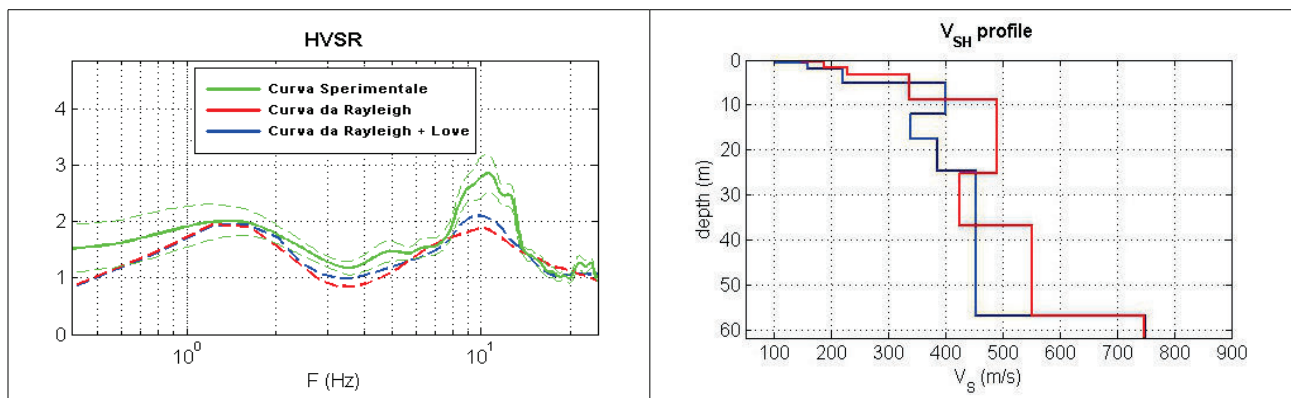
Bisogna evidenziare come l'errata interpretazione dei modi dell'indagine in sole onde di Rayleigh abbia condotto ad una "classica" sovrastima della Vs30, peraltro significativa:

- Analisi solo Rayleigh - Vs30 = 423 m/s
- Analisi congiunta Rayleigh + Love - Vs30= 325 m/s

L'assenza del modo fondamentale vista nello spettro Rayleigh è dovuta alle peculiarità del sito; in questi casi l'energia tende a distribuirsi nei modi superiori molto più che in quello fondamentale, situazione piuttosto frequente nella pratica comune che può facilmente far incappare in errori anche molto gravi, laddove non si operi con il giusto approccio.

### **CONSIDERAZIONI SULLA TECNICA HVSr**

In merito all'indagine HVSr con cui si è implementato lo studio, è indubbio il merito di aver fornito informazioni utili, ma è comunque da evidenziare come le curve associate ai due modelli (quello solo Rayleigh e quello da analisi congiunta) siano molto simili (Fig.7); di conseguenza, appare evidente come l'utilizzo della sola indagine HVSr non avrebbe di certo permesso di definire un modello univoco, ma avrebbe altresì comportato un notevole grado di incertezza sui risultati ottenuti.



**Fig. 7 – Confronto delle curve H/V (a sinistra) e delle sismostratigrafie (a destra) derivanti dalle precedenti analisi.**

Nella pratica reale, spesso solo per meri motivi di risparmio, tali studi vengono effettuati utilizzando come strumento di indagine la sola tecnica HVSr; questa consuetudine porta spesso ad avere risultati legati a un sensibile grado di incertezza, specie in assenza di ulteriori informazioni, con la conseguente possibilità di errori più o meno importanti anche dal punto di vista progettuale.

Queste considerazioni possono essere valutate anche utilizzando il caso reale esposto in precedenza, dove attraverso l'uso di più tecniche e tipologie di dati si è arrivati a definire una sismostratigrafia risultata poi ragionevolmente congruente con la realtà del sito. Pertanto, volendo ora effettuare una stima del profilo di Vs utilizzando solo i dati HVSr, quello che è evidente è che si possono ottenere è una serie di modelli sismostratigrafici anche marcatamente differenti tra loro, ma aventi comunque curve H/V confrontabili con quella sperimentale del sito in esame, come illustrato nelle Fig.8.

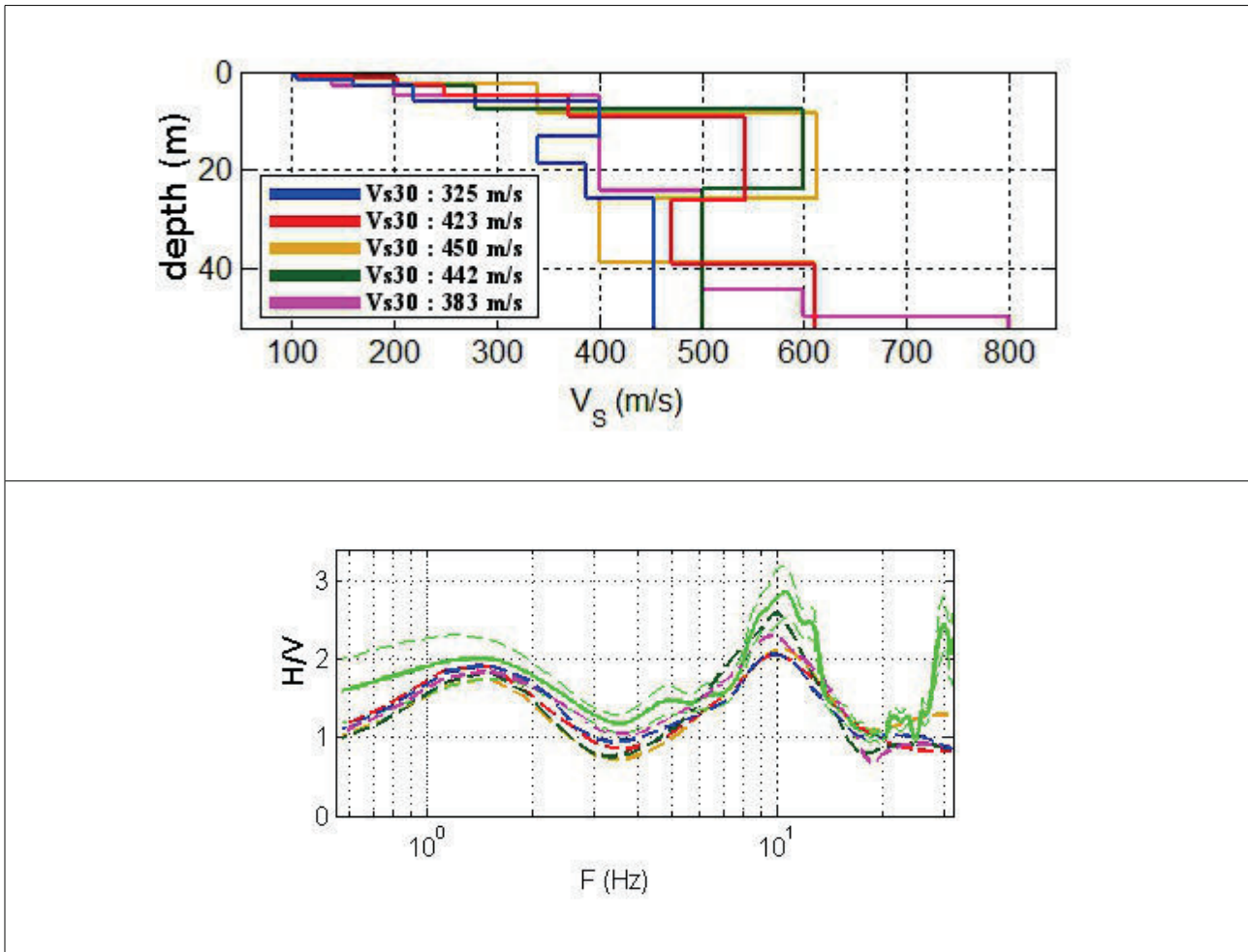


Fig. 8 – Sopra: alcuni dei possibili modelli sismostratigrafici estrapolati da sola indagine HVSR  
 Sotto: Curve H/V dei modelli ottenuti (verde = sito in esame; altri colori = curve modelli da sola indagine HVSR)

Sebbene questi modelli siano corretti dal punto di vista teorico (curve H/V simili a quella sperimentale), è palese come in assenza di ulteriori dati sia impossibile discriminare quale dei modelli sia quello rispondente alla realtà e quali siano imprecisi o completamente differenti dalla realtà del sito in esame.

## CONCLUSIONI

A conclusione dell'articolo, si vuol sottolineare come l'utilizzo di una sola tecnica non permetta di ottenere soluzioni univoche, ma comporti invece un notevole grado di incertezza, il quale può portare a soluzioni imprecise o addirittura completamente differenti dalla realtà e di conseguenza a errori anche significativi dal punto di vista progettuale. L'utilizzo di MASW con analisi congiunta Rayleigh + Love e l'integrazione con indagini HVSR consentono di ridurre tali incertezze, contribuendo in tal modo ad ottenere un maggiore livello di qualità degli studi eseguiti.