

Analisi congiunta MASW + HVSR

Perché una sola tecnica non basta a determinare il profilo delle velocità, e come interpretare insieme dispersione e rapporto spettrale con Easy MASW ed Easy HVSR.

1. Il problema: un dato, molti sottosuoli

Ogni tecnica geofisica soffre di non unicità: a una stessa misura corrispondono molti modelli di sottosuolo diversi, tutti compatibili con il dato. Non è un difetto degli strumenti: è una proprietà dell'informazione che la misura contiene.

Per misurare quanto pesi davvero questo effetto abbiamo condotto un esperimento controllato. Siamo partiti da un profilo di sottosuolo **noto**, a otto strati, con V_{s30} di 325 m/s. Da quel profilo abbiamo generato la curva di dispersione che una prova MASW avrebbe misurato. Poi abbiamo fatto finta di non conoscere la risposta e siamo ripartiti al contrario: dal dato, ricostruire il terreno. Duecento volte, con ipotesi iniziali diverse.

Centoventidue tentativi hanno prodotto un profilo che spiega il dato con un errore inferiore al 3 % — un fit che qualunque operatore considererebbe ottimo. Ma quei profili non sono varianti dello stesso terreno.

122 profili · V_{s30} da 300 a 679 m/s

tutti compatibili con la stessa identica curva di dispersione

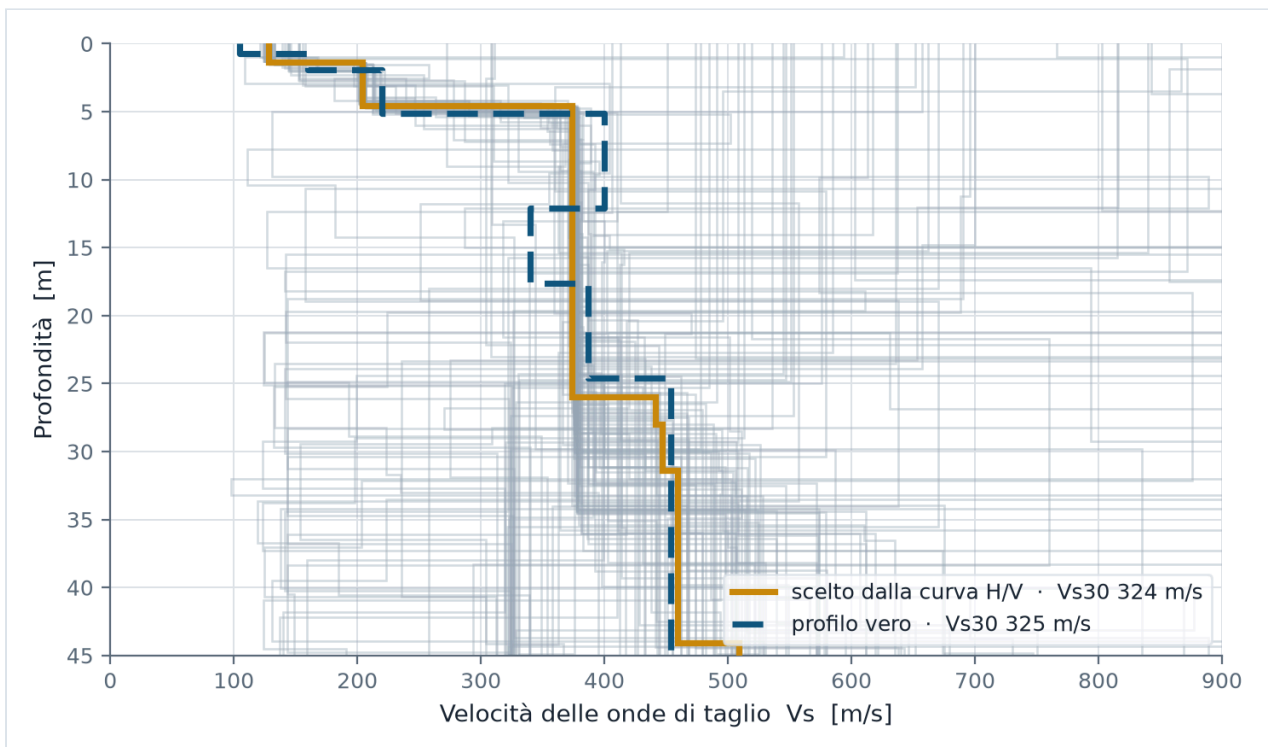


Figura 1. In grigio i 122 profili che spiegano ugualmente bene lo stesso dato MASW. In blu tratteggiato il profilo vero; in oro quello selezionato aggiungendo la curva H/V. La sola dispersione non distingue fra le linee grigie: le considera tutte accettabili.

Il confine fra **categoria B e categoria C** (360 m/s secondo NTC 2018) cade in mezzo alla distribuzione: 83 di quei profili ricadono in categoria C, 39 in categoria B. Un profilo su tre, a parità di dato, porta a una classificazione sismica diversa.

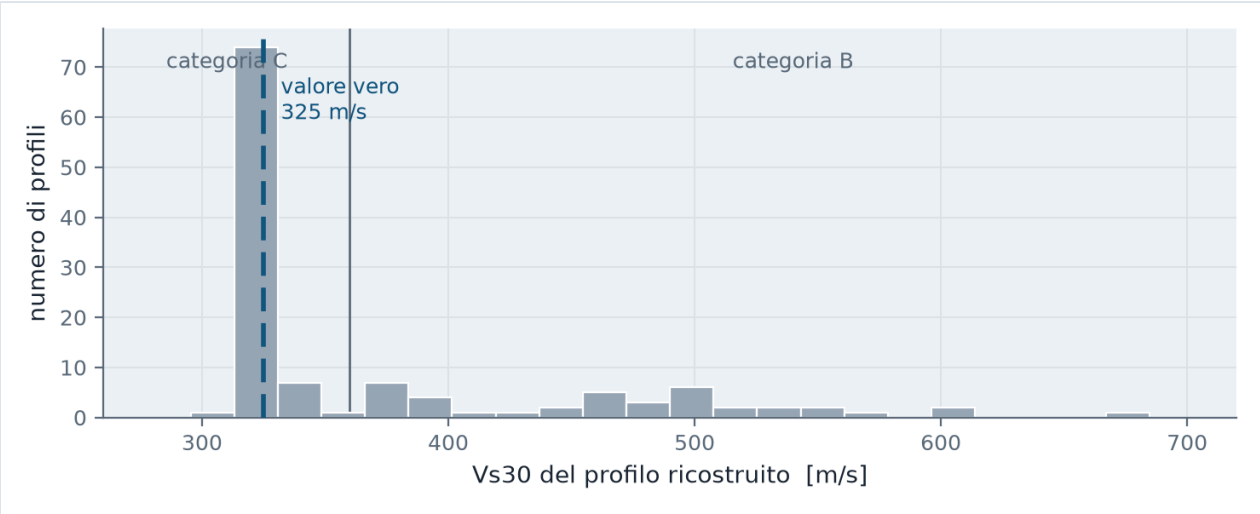


Figura 2. Distribuzione dei Vs30 dei 122 profili equivalenti, con le bande di categoria di sottosuolo. La linea tratteggiata indica il valore vero.

DA RICORDARE

Quando un software restituisce *un* profilo, non sta affermando che gli altri siano sbagliati: sta restituendo uno dei profili compatibili con la misura. Un misfit basso dice che il modello è compatibile con il dato, **non che sia l'unico**.

2. I limiti della MASW, in dettaglio

2.1 La profondità che il dato può descrivere

Una prova MASW risolve in modo affidabile lunghezze d'onda dell'ordine della **lunghezza dello stendimento**. Ogni punto pickato, a frequenza f e velocità di fase v , corrisponde a una lunghezza d'onda $\lambda = v/f$; la profondità indagata è indicativamente compresa fra $\lambda/3$ e $\lambda/2$.

Lunghezza stendimento	λ massima utile	Profondità indagata	Vs30 determinabile?
24 m	~24–48 m	8–12 m	no, in gran parte estrapolato
48 m	~48–96 m	16–24 m	parzialmente
72 m	~72–144 m	24–36 m	sì

Il confronto con i 30 m richiesti dal Vs30 è immediato. Con stendimenti corti — cioè la maggior parte di quelli che si realizzano in pratica — **la parte profonda del profilo non è misurata, è estrapolata**.

CRITICITÀ: I PUNTI OLTRE LA PORTATA DELLA MISURA

Su un caso reale con stendimento di 24 m, due punti erano stati pickati a 4,7 e 5,0 Hz con velocità di 491 e 428 m/s: lunghezze d'onda di **104 e 85 metri**, oltre quattro volte lo stendimento. Per spiegarli, l'inversione ha collocato un substrato a 717 m/s a 18 metri di profondità — un bedrock inesistente. Il fit rimaneva eccellente e nessun indicatore segnalava il problema. Rimossi quei due punti, il conflitto è scomparso.

2.2 L'ambiguità modale

La curva di dispersione non è una sola: esiste un modo fondamentale e una serie di modi superiori. Nello spettro di velocità si individua una curva ben definita e la si interpreta, normalmente, come modo fondamentale. **A volte non lo è**: quando l'energia si distribuisce sui modi superiori, il fondamentale può essere debole o del tutto assente, e la curva più evidente è in realtà un modo superiore.

Nei nostri test, attribuire al fondamentale una curva che era invece il primo modo superiore ha portato il Vs30 da 325 a **451 m/s**: una categoria di sottosuolo sbagliata, con un errore sul fit della dispersione inferiore all'1 %. Ripetuto 155 volte, l'errore si è rivelato **sistematico** — sempre nella stessa direzione, mai casuale.

2.3 Le onde di Love: cosa aggiungerebbero

Un modo per smascherare l'errore modale è acquisire un secondo tipo di onda. Le **onde di Love**, che richiedono geofoni orizzontali trasversali e sorgente dedicata, forniscono una seconda curva di dispersione che deve essere spiegata dallo stesso modello: un'attribuzione modale errata sulla componente Rayleigh emerge come incompatibilità con la componente Love.

Va detto con onestà che, nelle nostre verifiche, l'analisi congiunta con la sola curva H/V si è mostrata in grado di scartare i modelli errati nella quasi totalità dei casi esaminati. L'utilità aggiuntiva delle onde di Love resta plausibile e documentata in letteratura, ma **non è stata dimostrata quantitativamente** sui nostri dati: per questo la trattiamo come sviluppo possibile e non come requisito.

3. Che cosa aggiunge l'HVSR

La tecnica HVSR ricava dal rumore sismico ambientale, registrato con un tromometro a tre componenti in una singola stazione, il rapporto spettrale fra le componenti orizzontali e quella verticale. Il picco di quella curva individua la **frequenza fondamentale di risonanza** del sito.

3.1 L'ellitticità: il ponte fra dato e stratigrafia

Per ricavare un profilo dalla curva H/V serve un modello fisico che dica quale H/V produrrebbe un dato terreno. L'ipotesi adottata — la stessa dei principali strumenti scientifici del settore — è che il rumore ambientale sia dominato da onde di Rayleigh nel modo fondamentale, e che quindi la curva H/V misurata

sia approssimabile con la curva di **ellitticità** delle onde di Rayleigh: il rapporto fra la componente orizzontale e verticale del moto ellittico che una particella descrive al passaggio dell'onda.

L'ellitticità vincola bene la frequenza di risonanza, che dipende in prima approssimazione dal *rapporto* fra la velocità media e la profondità del contrasto principale — non dai due termini presi separatamente. Un terreno lento e poco spesso e uno più veloce e più profondo producono la stessa f_0 e curve H/V quasi indistinguibili.

IN UNA FRASE

La curva H/V dice **dov'è il fondo**; la dispersione MASW dice **com'è fatto sopra**. Nessuna delle due, da sola, dice entrambe le cose.

3.2 Perché insieme funzionano

Richiedere che un **unico** modello a strati spieghi contemporaneamente la curva di dispersione e la curva H/V elimina gran parte dell'ambiguità: la dispersione fissa le velocità dei primi metri, l'H/V ancora la profondità del contrasto principale e vincola la porzione profonda che lo stendimento non raggiunge. Nell'esperimento della Figura 1, fra i 122 profili indistinguibili sulla sola dispersione, quello che spiega meglio anche la curva H/V ha **$V_{s30} = 324 \text{ m/s}$** contro i 325 reali.

4. Come si esegue l'analisi

1

In campo

Sullo stesso punto: il consueto stendimento MASW con sorgente attiva, e una registrazione HVSR di 15–20 minuti con tromometro a tre componenti, preferibilmente al centro dello stendimento.

Le due prove devono riferirsi allo stesso punto: se appartengono a posizioni diverse, l'analisi congiunta non ha significato.

2

In Easy MASW — picking ed esportazione

Si elaborano le tracce e si esegue il picking della curva di dispersione, attribuendo a ciascuna curva il proprio numero di modo. Prima di esportare conviene verificare la lunghezza d'onda dei punti a bassa frequenza ($\lambda = v/f$) ed escludere quelli che superano il doppio della lunghezza dello stendimento.

Il comando **Esporta dispersione** produce un file `.dsp`: testo semplice, una riga per punto, con tipo d'onda, numero di modo, frequenza e velocità di fase. Vengono esportate tutte le curve modali pickate.

3 In Easy HVSR — importazione e inversione

Elaborata la curva H/V, il comando **Importa dispersione MASW** carica il file .dsp e ne riporta il numero di punti e di modi. La casella **Usa dispersione MASW** permette di attivare e disattivare il contributo della dispersione senza reimportare nulla: è il modo per confrontare, sullo stesso progetto, il risultato con e senza.

Si definisce il modello a strati e si avvia la **Ricerca**: l'inversione valuta ogni modello candidato confrontandolo con entrambe le curve, minimizzando la somma pesata dei due scarti.

5. Consigli operativi per l'inversione in Easy HVSR

5.1 Costruire il modello

- **Cinque o sei strati**, non tre. Con pochi parametri liberi il modello non ha i mezzi per soddisfare due curve contemporaneamente, e il risultato è un compromesso che scontenta entrambe.
- **Limiti di ricerca ampi in profondità**. La velocità di fase delle onde di Rayleigh non può superare di molto la V_s del semispazio: se i dati contengono velocità di 400–500 m/s, un limite $V_s \text{ max}$ di 900 m/s sull'ultimo strato è già restrittivo. Valori di 1500–2000 m/s lasciano lavorare l'inversione.
- **Profondità complessiva almeno pari a 30 m**, se interessa il V_{s30} : altrimenti quel valore dipende in larga parte dal semispazio.

5.2 Bloccare o non bloccare il primo strato

Nell'inversione della sola curva H/V si raccomanda di bloccare il primo strato con valori noti, perché senza un'informazione esterna il problema resta indeterminato. **Con la dispersione importata quella raccomandazione decade**: i primi metri sono proprio ciò che la MASW misura meglio. Bloccare il primo strato su un valore di tentativo significa imporre al modello un'informazione meno affidabile di quella contenuta nel dato.

Il blocco resta appropriato quando il valore proviene da una misura diretta — un sondaggio, una prova in foro — e non da una stima.

5.3 Leggere il risultato

Vanno controllate **entrambe** le curve calcolate, non una sola: l'ellitticità sovrapposta alla curva H/V misurata, e la curva di dispersione sovrapposta ai punti importati.

Che cosa si osserva	Che cosa significa
La curva calcolata non raggiunge i punti alle basse frequenze	Il modello non ha materiale abbastanza veloce in profondità: alzare $V_s \text{ max}$ dell'ultimo strato. Se il limite è già alto, verificare che quei punti rientrino nella banda utile dello stendimento

Che cosa si osserva	Che cosa significa
La curva calcolata corre sopra i punti alle alte frequenze	Le velocità superficiali del modello sono troppo alte; se il primo strato è bloccato, è il blocco a impedirne la discesa
Un parametro coincide con il proprio limite di ricerca	È il vincolo a decidere il risultato, non il dato: allargare l'intervallo per capire dove l'inversione si fermerebbe davvero
Una curva è riprodotta bene e l'altra visibilmente male	Le due misure sono in conflitto: la causa va cercata nei dati (punti fuori banda, modo attribuito male, prove in punti diversi) prima che nei parametri
L'ellitticità raggiunge valori molto più alti dell'H/V misurata	Contrasto di impedenza molto brusco: l'ellitticità teorica diverge alla risonanza. Inserire uno strato intermedio o ammorbidire il salto di velocità

Easy HVSR analizza automaticamente queste condizioni al termine di ogni ricerca e le riporta nel riquadro **Suggerimenti**. Conviene leggerlo prima di modificare i parametri a tentativi: nella maggior parte dei casi indica già la direzione giusta.

5.4 Convergenza

Il numero di parametri liberi cresce rapidamente con gli strati: sei strati con spessori e velocità liberi significano undici incognite. Se compare l'avviso di massimo numero di iterazioni raggiunto, conviene procedere in due passaggi — prima con gli spessori bloccati, per determinare le velocità, poi liberando la geometria a partire dal risultato ottenuto — invece di aumentare soltanto le iterazioni.

LA REGOLA CHE VALE PIÙ DI TUTTE

Non è la qualità del fit a dirci se un profilo è corretto, ma **quanti profili diversi ottengono lo stesso fit**. L'analisi congiunta non migliora un risultato già buono: riduce il numero di risposte possibili, ed è questo che rende il risultato utilizzabile.

I dati sperimentali citati provengono da prove controllate su modelli noti, elaborate con il motore di calcolo GeoStru. La scelta di dati sintetici è deliberata: solo conoscendo la risposta esatta è possibile misurare l'errore. Su dati reali la non unicità è maggiore, non minore.

Easy MASW e Easy HVSR — GeoStru · geostru.eu

Manuali: help.geostru.io/masw · help.geostru.io/easyhvsr