



REGIONE AUTONOMA VALLE D'AOSTA
Region Autonome Vallée d'Aoste



COMUNE DI VALTOURNENCHE
Commune de Valtournenche

Loc. Breuil-Cervinia

Relazione indagine sismica tramite tecnica MASW
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Committente:

COMUNE DI VALTOURNENCHE

Geologo

Dott. Pietro Di Sopra

Cell: +39 320 3815305

Email: pietro.disopra93@gmail.com

PI : 01257420073

PEC: pietro.disopra@pec.it



Pietro Di Sopra

SOMMARIO

1. PREMESSA	3
2. QUADRO NORMATIVO.....	3
3. NOTE METODOLOGICHE.....	5
3.1 Cenni teorici sulla metodologia MASW	5
3.2 Strumentazione tecnica utilizzata	7
3.3 Caratteristiche dello stendimento eseguito.....	8
4. ELABORAZIONE E RISULTATI INDAGINE MASW	9
5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	13
6. ALLEGATO FOTOGRAFICO	14

1. PREMESSA

Nell'ambito del progetto di "Costruzione del nuovo Centro Congressi", in data 27/08/2021 in loc. Breuil-Cervinia, nel Comune di Valtournenche, è stata eseguita una campagna di indagini volta alla caratterizzazione sismica del sito oggetto di intervento. Nel dettaglio è stata eseguita una prospezione sismica di tipo MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) finalizzata alla definizione del parametro $V_{S,eq}$ per la classificazione sismica del suolo (in accordo al D.M. 17.01.2018).

La seguente relazione illustra le modalità esecutive e i risultati dell'indagine realizzata.

2. QUADRO NORMATIVO

Per la definizione dell'azione sismica è necessario individuare la classe di sottosuolo, secondo le modalità di seguito esposte. La normativa di riferimento è rappresentata dal D.M. n.8 del 17.01.18 – "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni" (NTC 2018), e raccomanda la misura diretta della velocità delle onde sismiche come primario approccio per la caratterizzazione geotecnica a fini sismici. L'obiettivo del presente lavoro è dunque quello di definire il profilo verticale delle velocità di taglio " V_S " alle varie profondità dedotte, in modo tale da poter dedurre il valore di $V_{S,eq}$. "Velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio", di seguito riportato nelle parti salienti:

Categorie di sottosuolo

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite dalle NTC 2018, si può fare riferimento ad un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_S . I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità V_S per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo. I valori di V_S sono ottenuti mediante specifiche prove.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

con:

h_i spessore dell'i-esimo strato;

$V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono le seguenti:

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Per queste cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto dalle presenti norme. Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

Riguardo a considerazioni sull'interpretazione del contesto litostratigrafico dei terreni in esame è da specificare, che, le prospezioni sismiche MASW sono sempre indagini indirette. In ogni caso è sempre raccomandabile combinare i dati ottenuti da tale tipologia d'indagine con l'impiego di indagini dirette, oggetto di altro studio.

Le caratteristiche tecniche della strumentazione utilizzata, le modalità di esecuzione della prova, l'interpretazione dei risultati ed i relativi grafici sono riportati nei paragrafi successivi.

3. NOTE METODOLOGICHE

3.1 Cenni teorici sulla metodologia MASW

L'indagine sismica con metodologia **MASW** "**Multichannel Analysis Of Surface Waves**", consiste in una tecnica di superficie non invasiva, che permette di individuare i profili delle velocità delle onde di taglio " V_s " in relazione alla misurazione delle onde superficiali in corrispondenza di diversi sensori utilizzati ("geofoni verticali").

L'indagine sismica con tecnica MASW si fonda sull'apprendimento della dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di tipo *Rayleigh*, che danno il contributo preponderante alle onde superficiali, la cui velocità è correlata alla rigidezza degli spessori di terreno interessati dalla propagazione delle stesse onde; in mezzi non omogenei le velocità delle onde V_s variano con la profondità. Come specificato, infatti, nella letteratura tecnica proposta da svariati autori, in mezzi stratificati le onde di *Rayleigh* sono dispersive, in quanto onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980), e ciò sta ad indicare, che le velocità di fase apparenti delle onde di *Rayleigh* dipendono dalla frequenza di propagazione; pertanto, si hanno velocità differenti per differenti valori di frequenza. In mezzi eterogenei, le onde superficiali hanno velocità di fase che sono in funzione della frequenza. La condizione specificata è in relazione alla distribuzione spaziale delle caratteristiche sismiche dei substrati litologici, e la relazione che associa la frequenza alla velocità di fase è rappresentata dalla curva di dispersione. Alle alte frequenze la velocità di fase corrisponde con la velocità delle onde di *Rayleigh* dello strato più superficiale, mentre alle basse frequenze con la velocità dello strato più profondo.

La curva di dispersione risulta essere importante nel caso delle onde di *Rayleigh* per la caratterizzazione dei terreni, in quanto si pone in relazione alle caratteristiche di rigidezza del sottosuolo. La propagazione delle onde di *Rayleigh* in un mezzo verticalmente eterogeneo è un fenomeno multimodale, poiché in corrispondenza di una certa frequenza possono esserci diverse lunghezze d'onda. Ad una specificata frequenza possono infatti coincidere differenti velocità di fase ad ognuna delle quali corrisponde un modo di propagazione, e diversi modi di vibrazione possono mostrarsi nello stesso tempo. La curva di dispersione che scaturisce è una curva apparente, che deriva dalla sovrapposizione delle curve attinenti ai vari modi di vibrazione, e non per forza corrisponde con singoli modi negli intervalli di frequenza.

In termini del tutto generali l'analisi delle onde di superficie avviene in 3 passi fondamentali:

- 1) acquisizione;

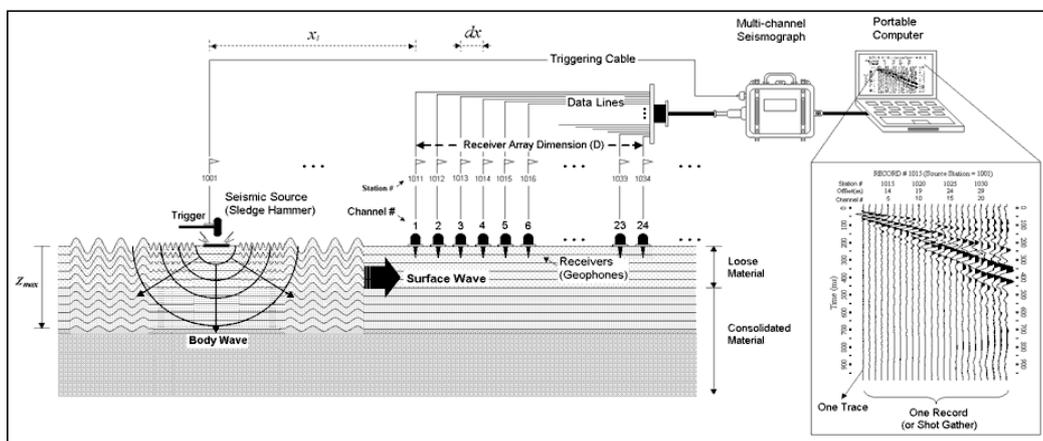


Fig. 1 – Schema di un'acquisizione di tipo MASW

2) determinazione dello spettro di velocità (sul quale identificare la curva di dispersione);

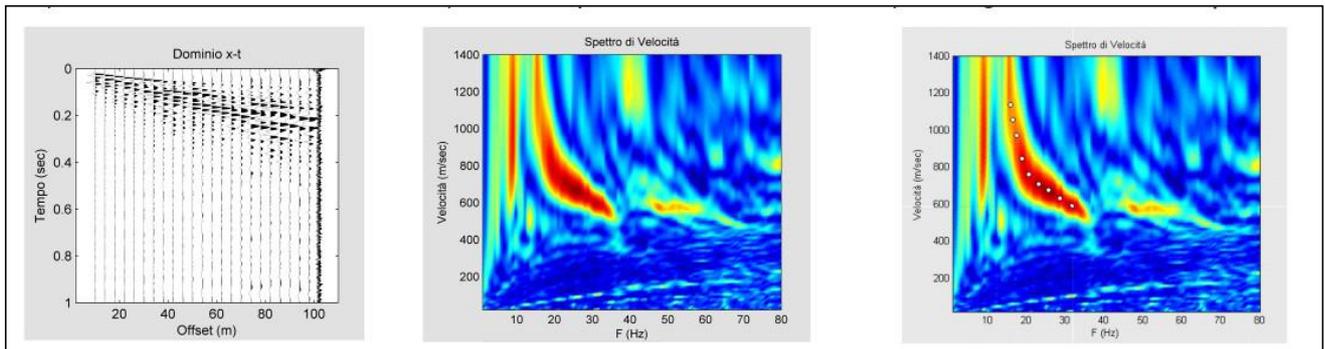


Fig. 2 – Sismogramma, determinazione della curva di dispersione e successiva fase di “picking”.

3) inversione (o modellazione) della/e curva/e di dispersione;

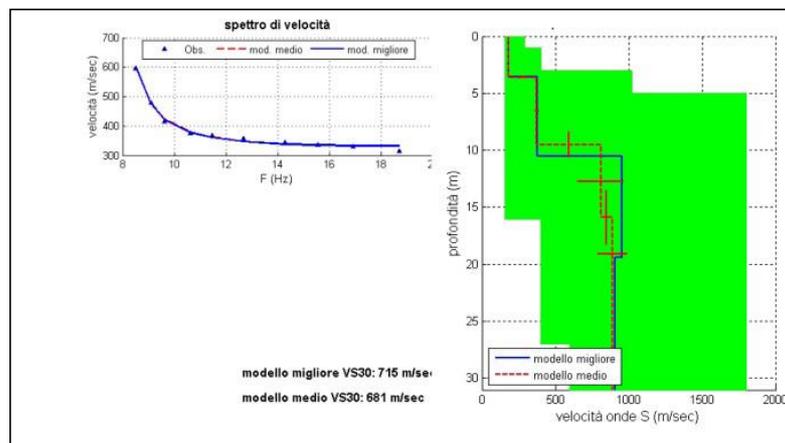


Fig. 3 – Profilo verticale di propagazione delle $V_{s,30}$

Nel caso specifico l'elaborazione dei dati acquisiti è stata effettuata per mezzo del programma “WinMasw 7.0” della “Eliosoft geophysical software and services”. A partire dai dati registrati in sito con le acquisizioni multicanale il programma ricostruisce l'immagine di dispersione, detta anche “Overtone”, che indica la distribuzione della velocità di fase (asse delle ordinate) delle onde sismiche rispetto alla frequenza d'onda (asse delle ascisse): in particolare, esistono diverse tecniche di processing per estrarre dai sismogrammi le caratteristiche dispersive del sito. La metodologia più diffusa è rappresentata dall'analisi spettrale in dominio f-k (frequenza-numero d'onda). I dati sismici registrati vengono sottoposti a una doppia trasformata di Fourier che consente di passare dal dominio x-t (spazio tempo) al dominio f-k. Lo spettro f-k del segnale consente di ottenere una curva di dispersione per le onde di Rayleigh, nell'ipotesi che, nell'intervallo di frequenze analizzato, le onde che si propagano con il maggiore contenuto di energia siano proprio le onde di Rayleigh, e se le caratteristiche del sito sono tali da consentire la propagazione delle onde superficiali ed un comportamento dispersivo delle stesse. Si dimostra infatti che la velocità delle onde di Rayleigh è associata ai massimi dello spettro f-k; si può ottenere facilmente una curva di dispersione individuando ad ogni frequenza il picco spettrale, al quale è associato un numero d'onda k e quindi una velocità delle onde di Rayleigh V_R , determinabile in base alla teoria delle onde dalla relazione:

$$V_R(f) = 2\pi f/k$$

Riportando le coppie di valori (V_R, f) in un grafico, si ottiene la curva di dispersione riportata in Fig. 2 utilizzabile nella successiva fase di inversione.

Quindi per mezzo del processo di inversione il programma ricava l'andamento della velocità delle onde di taglio (V_S) dei depositi costituenti il sottosuolo secondo la configurazione correlata alla curva di dispersione teorica che meglio approssima (fase di "*picking*") la curva di dispersione ottenuta. In particolare il programma si avvale di algoritmi genetici che rappresentano un tipo di procedura di ottimizzazione appartenente alla classe degli algoritmi euristici (o anche *global-search methods* o *soft computing*). Rispetto ai comuni metodi di inversione lineare basati su metodi del gradiente (matrice Jacobiana), queste tecniche di inversione offrono un'affidabilità del risultato di gran lunga superiore per precisione e completezza. I comuni metodi lineari forniscono infatti soluzioni che dipendono pesantemente dal modello iniziale di partenza che l'utente deve necessariamente fornire. Per la natura del problema (inversione delle curve di dispersione), la grande quantità di minimi locali porta infatti ad attrarre il modello iniziale verso un minimo locale che può essere significativamente diverso da quello reale (o globale). In altre parole, i metodi lineari richiedono che il modello di partenza sia già di per sé vicinissimo alla soluzione reale. In caso contrario il rischio è quello di fornire soluzioni erranee.

Gli algoritmi genetici offrono invece un'esplorazione molto più ampia delle possibili soluzioni

3.2 Strumentazione tecnica utilizzata

L'acquisizione dei dati sismici è stata effettuata con un sismografo PASI Mod. GEA 24 a 24 canali modello dotato di un convertitore analogico/digitale a 24 bit, con interfaccia USB per la comunicazione con un computer portatile su cui è installato un apposito programma (GEA_24) che gestisce la visualizzazione, l'analisi e la memorizzazione delle forme d'onda registrate. I geofoni verticali utilizzati possiedono una frequenza di risonanza pari 4.5 Hz con distorsione inferiore allo 0.2%. L'energizzazione è stata ottenuta con mazza battente da 10 Kg su piastra metallica 20x20 cm. Per l'innesco (*trigger*) è stato utilizzato uno "*shock sensor*" collegato alla mazza battente e connesso via cavo al sismografo (Fig. 4).



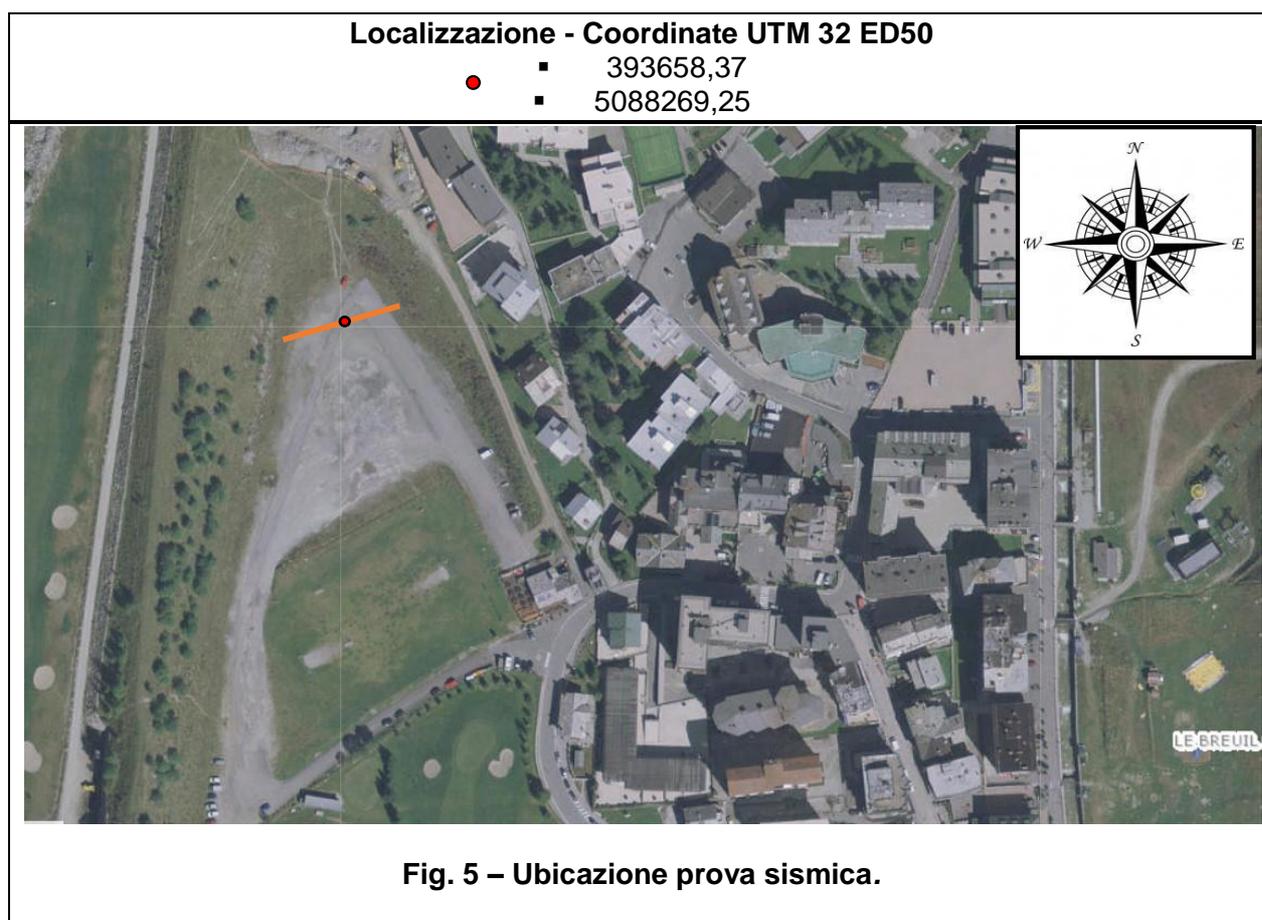
Fig. 4

3.3 Caratteristiche dello stendimento eseguito

Come già anticipato nei paragrafi precedenti, l'indagine ha previsto la realizzazione di una prova sismica MASW il cui stendimento, per motivi logistici e di spazio, è stato ubicato in direzione circa E-W (vedi ortofoto riportata in Figura 5), nel settore a nord dell'area parcheggio, presso il sito oggetto di intervento. Dal punto di vista plano-altimetrico il terreno si presenta completamente pianeggiante e privo di salti di quota significativi, tali da dover richiedere una correzione geometrica in fase di input dei dati all'interno del software di elaborazione.

Lo stendimento è stato realizzato posizionando 24 geofoni verticali da 4.5 Hz con interasse di 1,5 m, e per l'acquisizione dei dati sono stati individuati un totale di 2 punti di energizzazione ("sorgenti"), disposti a partire dalle estremità della stesa a 4 m di distanza (*offset*) dall'ultimo/primo geofono. Per ogni punto di energizzazione sono stati generati almeno 3 impulsi sismici, attivando la procedura di "*vertical stacking*" in corrispondenza di ciascun punto sorgente di onde, al fine di limitare l'effetto del rumore sismico di fondo e di conseguenza aumentare il Rapporto S/N (Segnale/Rumore).

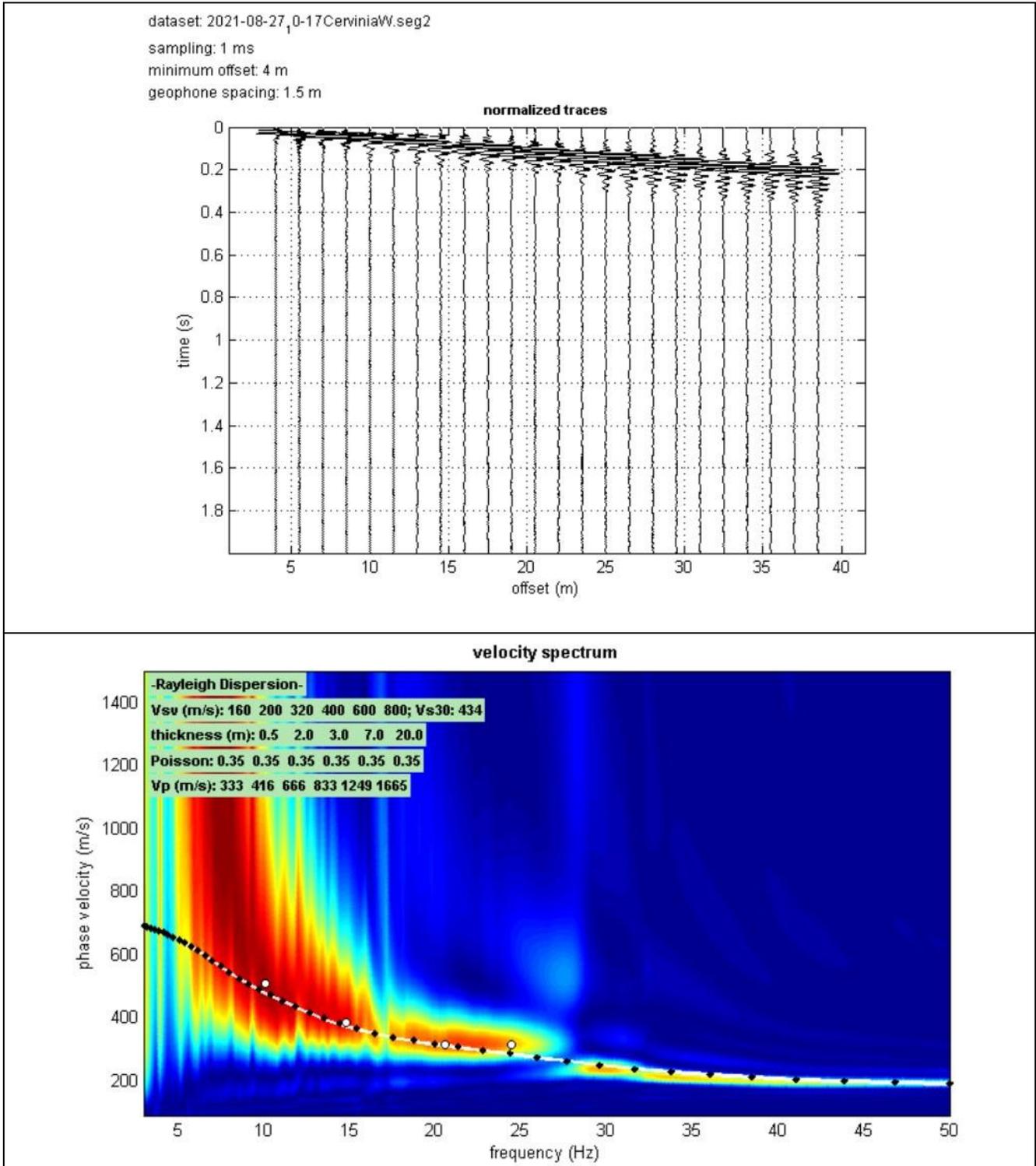
Le coordinate geografiche UTM riferite al punto mediano del profilo MASW (per il calcolo V_{Seq}) sono le seguenti:



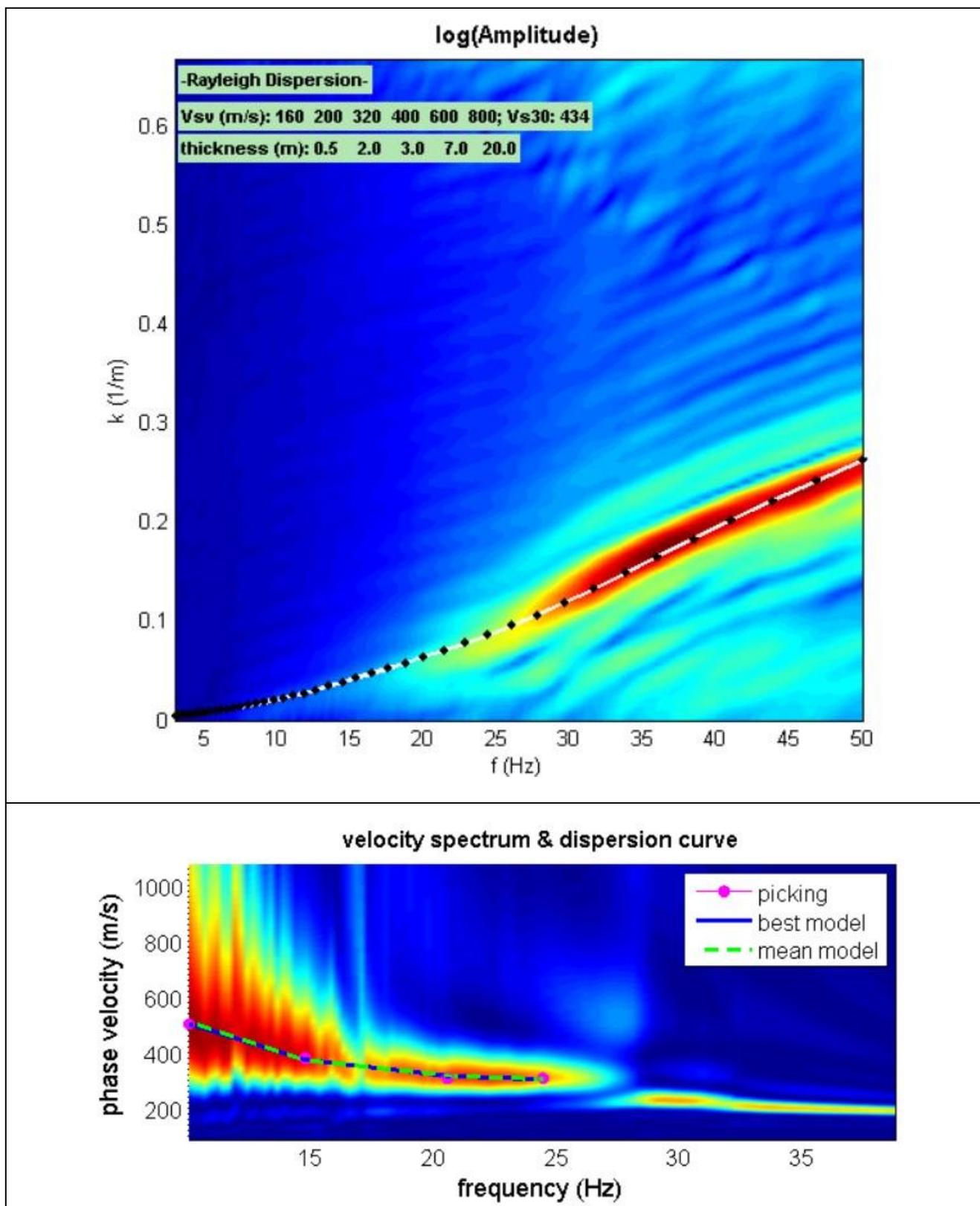
4. ELABORAZIONE E RISULTATI INDAGINE MASW

Nel seguente paragrafo vengono riportati i risultati ottenuti prendendo in considerazione uno degli “scoppi” ritenuto più rappresentativo tra quelli realizzati nella modalità MASW.

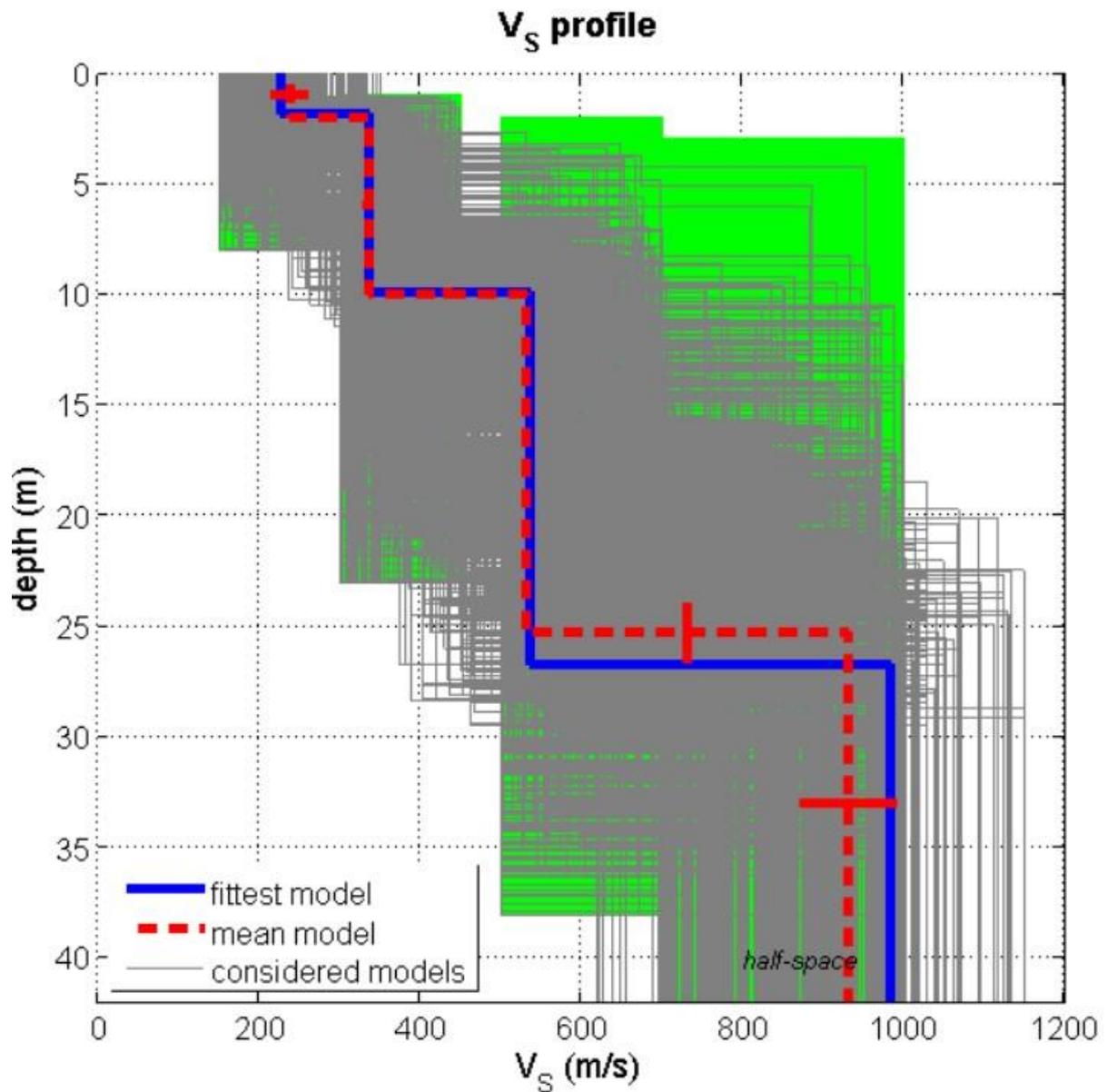
In particolare si riporta di seguito il grafico relativo alle tracce sperimentali acquisite dai vari geofoni con tempo di campionamento pari a 1 ms, lo **spettro di frequenza** ed il relativo **spettro di velocità** nel range 0 – 50 Hz con sovrapposizione dei singoli punti corrispondenti all’operazione di “*picking*” manuale.



Di seguito viene presentata la **curva di modellazione** utilizzata sovrapposta **allo spettro di velocità nel dominio f/k** e successivamente la **curva di dispersione estratta** tramite operazione di “*picking*” manuale sovrapposta allo spettro di velocità.



A seguire il profilo verticale delle onde di taglio ottenuto tramite fase di *processing* ed inversione.



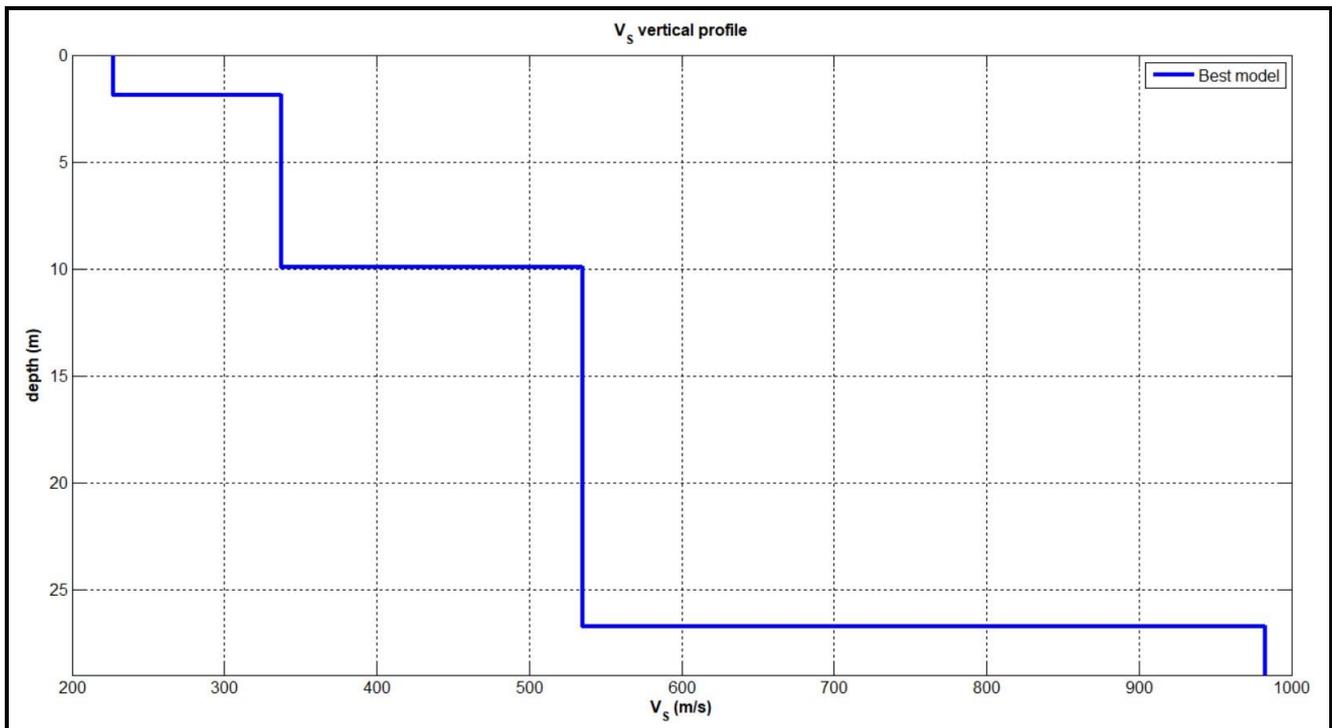
dataset: 2021-08-27_10-17CerviniaW.seg2

dispersion curve: pick-Cervinia.cdp

V_{s30} (best model): 449 m/s

V_{s30} (mean model): 454 m/s

Infine si riporta il profilo verticale delle onde di taglio riferito al “best model” ricavato dalla fase di inversione.



Nel caso in esame, è stato individuato il substrato rigido (riferito a un sismo-strato omogeneo con $V_s = 800$ m/s) alla profondità di **24,9 m** dal piano campagna; a seguito dell’applicazione del metodo di modellazione sullo spettro di velocità a partire dal seguente modello sismostratigrafico:

<i>Sismostrato</i>	<i>Profondità [m]</i>	<i>Spessore [m]</i>	<i>Velocità Vs [m/s]</i>
1	0-2,0	2,0	238
2	2,0-9,9	7,9	336
3	9,9-24,9	15,0	531
4	24,9-29,6	4,7	931

Si ottiene che:

$$V_{S,eq} = 414 \text{ m/s}$$

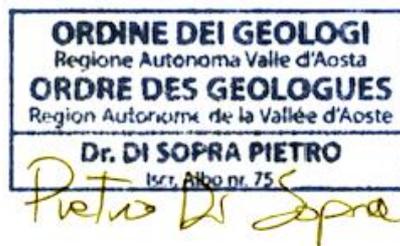
CATEGORIA SOTTOSUOLO	DESCRIZIONE GEOTECNICA	V _{s,eq} CALCOLATO
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s</i>	414 m/s

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

I risultati della prova sismica con metodologia MASW eseguita in località Breuil-Cervinia, nel territorio comunale di Valtournenche, nell'ambito del progetto di "Costruzione del nuovo Centro Congressi" ha evidenziato valori del parametro V_{s,eq} compatibili con un sottosuolo di categoria "B" (414 m/s) così definita nella normativa sismica (NTC 2018): *"Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s"*.

Valtournenche, 1 settembre 2021

Il tecnico incaricato:
Dott. Geol. Pietro Di Sopra



6. ALLEGATO FOTOGRAFICO



