

Comune di Cembra Lisignago

**Realizzazione collegamento stradale
Lona-Cembra**

INDAGINI GEOFISICHE

Cig:Z182D47C02



GG Service sas
via Bellavista, 13/A
38069 Torbole s/G (TN)
P.Iva/C.F./Reg. TN:01999920224
tel/fax:0464-664799/506041
infoggservice@gmail.com

1. INTRODUZIONE

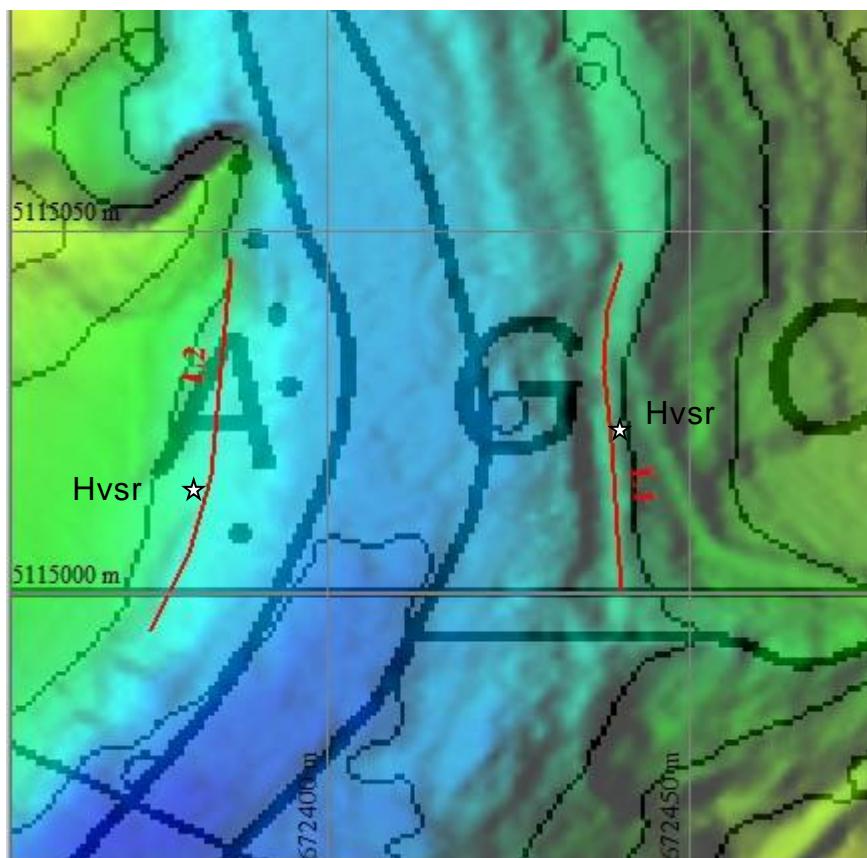
Nell'ambito della progettazione della costruzione del nuovo ponte stradale sull'Avisio per il collegamento Cembra-Lona la GG Service sas ha eseguito una serie di misure sismiche ed elettriche in corrispondenza delle due spalle per verificare la rigidità dell'ammasso roccioso e tentare la ricostruzione della geometria del sottosuolo (roccia-copertura).

Per entrambe le spalle sono stati eseguiti due profili sismici (attivi e passivi), due elettricotomografici e due test HVSR.

La strumentazione impiegata consta di un acquisitore sismico ad elevata dinamica (24bit nominali -daq linkIV-) prodotti dalla Seismic Source Co.-Ponca City Oklahoma U.S.A.). Le energizzazioni sono avvenute ogni 3 stazioni geofoniche attraverso l'impiego di una mazza -hand held- da 8Kg ed i geofoni utilizzati hanno una frequenza di risonanza di 10Hz e interspaziatura di 1,5m. Per la passiva HVSR si è utilizzato un sensore da 4,5HZ 3C e acquisitore sigma a 32bit nominale della I-Seis. Il trattamento analitico è avvenuto mediante algoritmo di rifrazione tomografica tipo Ray trace(Firstomo).

La strumentazione per tomografia elettrica è costituita da un sistema multicanale a 25 elettrodi interspaziati di 2m. per l'analisi dei dati è stato utilizzato il software di inversione Res2DInv.

La posizione delle linee è stata rilevata mediante strumento GPS Garmin62STC a mediobassa risoluzione 2-3m ed i dati topografici ricostruiti in base ai dati lidar.





Stendimenti spalla Sinistra



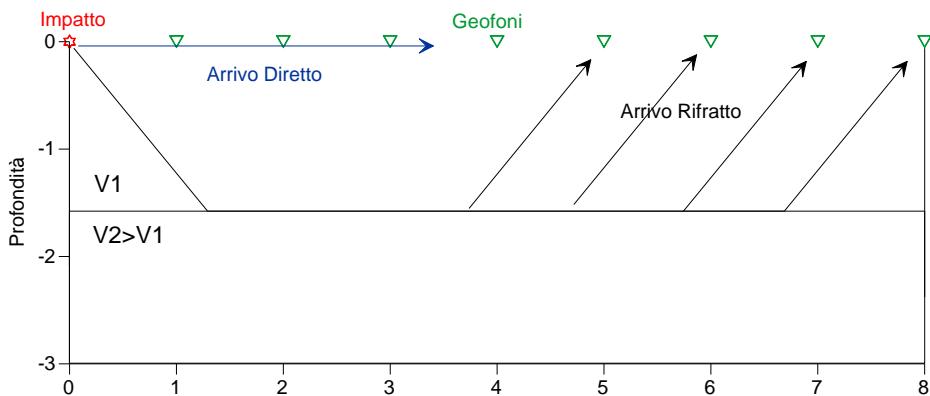
Stendimenti spalla destra

2. CENNI METODOLOGICI

Sismica a rifrazione tomografica

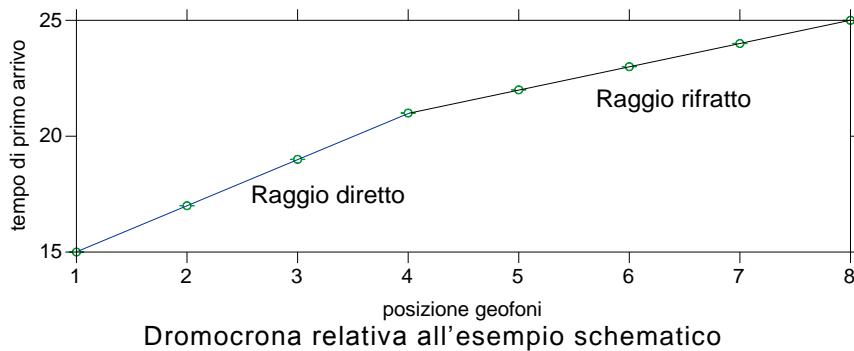
La tecnica di sismica a rifrazione si basa sul concetto che una sorgente meccanica eccita il sottosuolo inviando onde elastiche che si propagano in profondità e vengono parzialmente deviate (rifratte) lungo l'interfaccia che separa due mezzi a differente impedenza acustica (ρ^*V) ed in parte proseguono verso il basso finché l'energia viene completamente assorbita dal mezzo in cui si propaga.

L'effetto di queste onde è la formazione di vibrazioni che vengono captate da sensori posti sulla superficie, generalmente elettromagnetici, in grado di trasformare la sollecitazione meccanica, che subisce la massa mobile del magnete, in un segnale elettrico che, debitamente amplificato, viene riprodotto su monitor e memorizzato su supporto informatico.



Esempio schematico (total-rifrazione) del percorso dei raggi sismici “tiro esterno” di un modello sismico a due strati

La lettura dei tempi di primo arrivo della vibrazione ai differenti sensori (geometricamente disposti in linea sul terreno secondo un profilo) è riferita all’istante zero, che è quello che corrisponde all’istante dell’energizzazione del terreno. Essa consente la loro ubicazione su un diagramma cartesiano ottenendo le dromocronie relative ad ogni punto di energizzazione. Il grafico che ne risulta è costituito da una serie di segmenti la cui inclinazione corrisponde alla velocità di propagazione delle onde elastiche nel mezzo.



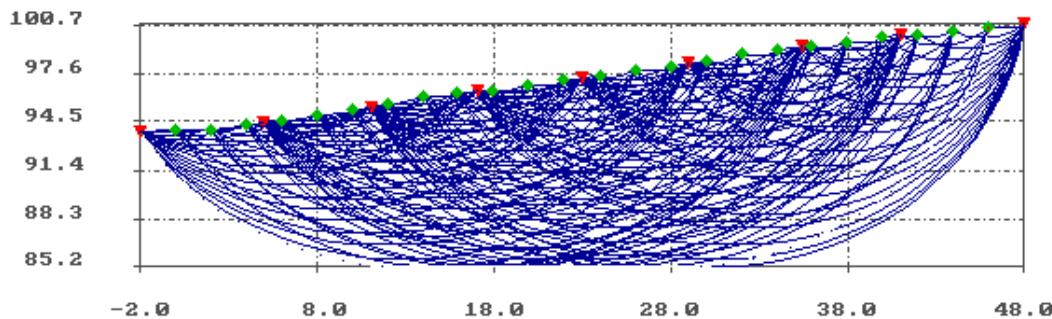
Dromocrona relativa all’esempio schematico

Dall’analisi delle dromocronie è possibile (e questo è il dato fondamentale dell’interpretazione) definire il numero dei sismostrati presenti nel sottosuolo (ovviamente per la finestra temporale adottata che è funzione della lunghezza dello stendimento e della quantità di energia utilizzata).

L’interpretazione per la risoluzione geometrica dei sismostrati (profondità e velocità) si avvale di diverse metodologie di calcolo dalle più semplici procedure dirette (Hagedoorn, 1959; Barry, 1967), seguendo le leggi generali dell’ottica, a quelle più complesse sia 1D che 2D che elaborano i dati mediante la tecnica del GRM (Palmer, 1980), del Ray-tracing o della tomografia (Hampson & Russell, 1984; Olsen, 1989).

La finalità della tomografia è la dettagliata esplorazione del modello di distribuzione della velocità in un mezzo. Essa si basa sui primi arrivi ottenuti per set plurimi di coppie sorgente-ricevitore: la sola limitazione è quella che i raggi sismici formino una rete completa

e cioè, idealmente, ciascun punto del mezzo investigato dovrebbe essere attraversato dai raggi in tutte le direzioni.



Esempio applicativo di una fitta rete di raggi ideale per la tomografia
(24 geofoni e 9 basi di energizzazione)

Il metodo tomografico si basa sul principio della rifrazione critica di raggi monocromatici che si retro-propagano in superficie e per la cui simulazione è richiesto un gradiente velocità positivo.

Pertanto l'applicabilità dell'analisi è limitata a variazioni laterali di velocità non elevate e per morfologie della superficie topografica e dei rifrattori non esasperate.

Oltre all'input fornito dai tempi di primo arrivo misurati (t_{obs}), è sempre necessario introdurre un modello iniziale, che può essere scelto tra semispazio a velocità costante, mezzo stratificato a velocità crescente con gradiente fisso o con step di velocità o modello 2D strutturato in base al livello di conoscenza del sito indagato; la risoluzione del problema diretto avviene per semplice computazione geometrico-temporale tracciando i raggi che attraversano nel minor tempo disponibile le celle in cui è stato suddiviso il modello iniziale.

Il calcolo dei residuali rappresenta cella per cella l'input per la risoluzione del problema inverso che è di tipo linearizzato con la possibilità di scelta di diversi criteri di ricerca (back projection, damped least squares, max. smoothness e max. flatness constrain).

Abitualmente la prima soluzione dell'inversione viene utilizzata come input 2D per la successiva, ripetendo l'analisi in maniera iterativa ed adottando l'ottimizzazione per smoothness o max. flatness constrain. In questo caso l'inversione è di tipo non lineare ed il risultato principale è l'estremizzazione del bending dei raggi.

Questo accorgimento permette di approdare a soluzioni più realistiche soprattutto nei casi in cui sono presenti impedenze acustiche elevate.

Elettrica

La tecnica dell'imaging elettrico (o tomografia elettrica) adotta una procedura automatizzata sia per l'acquisizione che per l'elaborazione e consente di raccogliere dati elettrici del sottosuolo con una densità elevata impiegando cavi *multicore* con spaziatura interelettrodica molto piccola (generalmente 1-2m ed anche meno).

L'unità di misura è costituita da un georesistivimetro classico assistito da un computer che mediante un software dedicato gestisce

la configurazione geometrica e la sequenza del grande numero di letture che vengono effettuate. Gli elettrodi da controllare sono molte decine, spesso qualche centinaio, ed i vari cavi impiegati vengono tra loro connessi, e collegati all'unità di misura.

In pratica, il rilievo consiste dapprima nel posizionare gli elettrodi nel terreno secondo arrays 2D o 3D, quindi nell'effettuare il collegamento ai take-out dei cavi che portano il segnale (di input ed output) all'unità di misura.

Da software vengono poi impostate la configurazione prescelta ed i relativi parametri geometrici (passo di misura, numero di misure ecc.). Le misure sono ciclicamente ripetute fino ad un massimo di 4-6 volte qualora non si raggiunga prima una stabilizzazione della lettura (indicata da un basso scarto percentuale tra il 2-6%). Le misure non soddisfacenti, comunque salvate nel data set, potranno essere eliminate in sede di analisi. Per ottenere una densità di valori idonea alla costruzione di una pseudosezione di resistività è necessario che il passo di misura non superi la distanza interelettrodica.

Il primo risultato dell'analisi è costituito da una pseudosezione che è solo rappresentativa della sezione reale. Ritrae, infatti, l'andamento della resistività apparente, una specie di valore mediato, con la pseudoprofondità, calcolata con semplici considerazioni geometriche. Ogni misura viene posta convenzionalmente al centro del quadripolo attivo ed alla pseudoprofondità che gli compete.

I dati acquisiti in campagna e rappresentati secondo pseudosezioni (2D) o pseudopiani (3D) vengono successivamente elaborati per risalire alla elettrostratigrafia reale (resistività vera) del volume indagato che si ottiene utilizzando una tecnica di inversione.

Il sistema è interfacciato ad un PC su cui è installato un software (GeoTest 2.0) che lavora su piattaforma Windows per gestire l'attivazione successiva e programmata di 4 elettrodi alla volta (due di corrente e due di potenziale nel caso configurazioni convenzionali quali Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo o polo-polo).

Le misure vengono effettuate in corrente alternata con periodo di misura che può essere compreso tra 0,8s e 0,12s con cicli di alcuni secondi; i voltaggi variano da un minimo di 0,2mV a massimi di 300V picco-picco mentre l'intensità di corrente varia da minimi di 0,001 mA a massimi di 100A.

Ogni valore di resistività apparente fornito strumentalmente è il risultato di un ciclo di misura che è costituito generalmente da 3-8 ripetizioni delle misure. Il valore proposto rappresenta il risultato di una media mobile tra le letture (minimo di 3 letture) protratta fino al punto in cui la differenza tra successive letture scende al di sotto di scarti compresi tra 3 e 5%.

Per evitare disturbi legati a fenomeni di polarizzazione le misure sono separate da un ritardo di regime che di default è fissato a 2500ms.

Nelle indagini geoelettriche è possibile scegliere diversi tipi di configurazioni in base a criteri che considerano, ad esempio, il tipo di target da individuare, la profondità massima da raggiungere o la sensibilità delle misurazioni condotte. Le configurazioni si

distinguono in base alla distribuzione geometrica della programmazione di attivazione delle coppie di elettrodi attivati per l'acquisizione.

Nel caso in questione è stata adottata in acquisizione la configurazione DipoloDipolo con il seguente array geometrico: fino a 50 elettrodi attivi e spaziatura interelettrodica di 2.0m; gli elettrodi in acqua sono stati alloggiati su un materiale galleggiante e la linearità dello stendimento e l'interspaziatura fissa è stata raggiunta utilizzando una sagola guida e dei distanziatori artigianalmente realizzati.

L'elaborazione è effettuata in termini bidimensionali con inversione del modello utilizzando il software Res2Dinv v3.55 prodotto dalla Geotomo (Malesia).

Di seguito viene esposto il procedimento utilizzato comunemente per l'analisi:

- Il procedimento di calcolo prevede la suddivisione iniziale del volume in una griglia di regolarizzazione (analogia a quella impiegata nelle computazioni ad elementi finiti). Ad ogni cella della griglia viene attribuito un valore di resistività sulla base dei dati misurati ed a quelle di confine viene impostata una resistività pari alla media delle letture eseguite.
- Il modello iniziale viene quindi sottoposto ad un processo di inversione che utilizza una routine conosciuta con il nome di *smoothness-constrained least-square method* (de Groot-Hedlin e Constable 1990, Sasaki 1992) implementata con una tecnica di ottimizzazione quasi-Newtoniana (Loke e Barker 1996a) che la velocizza notevolmente. Le elaborazioni considerano in blocco tutti i dati acquisiti ed ottimizzano un modello a celle di resistività. Questo modello è meno viziato dalla assunzione di una elettrostratigrafia piana valida per il monodimensionale e risulta, quindi, più adattabile alle complesse geometrie che si incontrano nella realtà.
- L'inversione ha termine al momento in cui si ottiene una buona coincidenza, in senso statistico (scarto quadratico medio), tra i dati sperimentali e quelli teorici (confronto tra pseudosezioni misurate e calcolate).
- Disponendo di una taratura (sondaggio meccanico o dati desunti da scavi) il modello geoelettrico del sottosuolo proposto al termine dell'analisi può essere ricondotto a quello geologico.

ReMi

La normativa più recente che disciplina le costruzioni, richiede la caratterizzazione del sottosuolo di fondazione ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto. Per ottenere questo dato è previsto il calcolo del parametro V_{s30} o $V_{s\text{equivalente}}$. Detto parametro si calcola attraverso la relazione:

$$V_{s30} = 30 / \sum_{i=1, N} h_i / V_i$$

dove h_i e V_i indicano lo spessore in metri e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio $\gamma < 10^{-6}$) dello strato i esimo per un totale di N strati presenti nei 30 metri superiori.

Si ricorda che la velocità delle onde di taglio (V_s) è quella che meglio di ogni altro parametro fisico caratterizza i materiali dal punto di vista del loro comportamento meccanico.

Il profilo verticale delle V_s può essere ricavato per inversione monodimensionale o per modellizzazione diretta della velocità di fase delle onde di superficie (Rayleigh e/o Love) (Dorman e Ewing, 1962).

Le onde di Rayleigh (1885) costituiscono un particolare tipo di onde di superficie che si trasmettono sulla superficie libera di un mezzo isotropo e omogeneo e sono il risultato dell'interferenza tra onde di pressione (P-waves) e di taglio verticali (Sv-waves).

Tali onde sono presenti in natura e sono conosciute con il termine di microtremori. Possono venire accuratamente captate ed analizzate nei loro contenuti cromatici ed energetici con un array geometrico lineare simile a quelli utilizzati nella prospezione sismica classica.

In un mezzo stratificato queste onde sono di tipo guidato e dispersivo e vengono definite pseudo-Rayleigh.

La dispersione è un fenomeno indotto dalla deformazione del treno d'onda che produce una variazione di propagazione di velocità con la frequenza. Le componenti a frequenza minore penetrano più in profondità rispetto a quelle a frequenza maggiore, per un dato modo, e presentano normalmente più elevate velocità di fase.

Un apposito grafico (spettro di potenza p-f) in cui è diagrammato in ascissa la frequenza f (Hz) ed in ordinata lo slowness, che altro non è che l'inverso della velocità di fase (m/s), consente agevolmente di individuare il trend dispersivo che contraddistingue il sito sottoposto ad indagine.

Dalla curva di dispersione si passa al profilo di velocità verticale mediante modellazione diretta. Viene cioè costruito il modello teorico la cui curva di dispersione calcolata presenta il minor errore rispetto alla curva sperimentale.

Il processo di modellazione diretta soffre delle limitazioni prodotte dal principio dell'equivalenza secondo il quale possono esistere più modelli che soddisfano la medesima curva di dispersione. In questo caso quindi diventa importante avere dei punti di calibrazione per una ricostruzione "litologica" della struttura sismica del sottosuolo. Tuttavia questa limitazione non inficia la correttezza della determinazione dei valori di V_{s30} che rappresentano una relazione tra spessori e velocità dei singoli strati.

Per il trattamento di questo tipo di dati è stato utilizzato il software ReMi® aggiornato alla sua ultima versione V.5 e commercializzato dalla Optim LLC (Reno, Nevada -USA). L'approccio analitico si basa sugli studi condotti da J.Louie presso la Nevada University.

Nakamura o HVSR

La tecnica di indagine adottata a supporto di questo studio è conosciuta come *metodo di Nakamura* (1989), dal nome dello scienziato giapponese che l'ha messa a punto, parte dal presupposto che:

- 1 Il rumore ambientale è generato da riflessioni e rifrazioni di onde di taglio con gli strati superficiali e dalle onde di superficie;
2. Le sorgenti di rumore superficiale non interessano il rumore ambientale alla base di una struttura non consolidata;
3. Gli strati soffici non amplificano la componente verticale del rumore ambientale: questo è composto da onde di superficie tipo Rayleigh generate dall'interazione del vento con le strutture, dal traffico e da altre attività urbane.

Le funzioni di trasferimento **S_E** e **A_s** che sono rispettivamente l'effetto intrinseco di sito e l'effetto della singola onda Rayleigh possono essere definite come:

$$\mathbf{S_E} = \mathbf{H_s/H_b} \quad \mathbf{A_s} = \mathbf{V_s/V_b}$$

Dove **H** e **V** sono gli spettri per le componenti orizzontali e verticali delle registrazioni di rumore ambientale alla superficie (s) o al top del basamento rigido. Gli effetti di sito, che non comprendono il contributo della sorgente, sono definiti da **S_M** come:

$$\mathbf{S_M} = \mathbf{S_e/A_s} \Leftrightarrow \mathbf{S_M} = \mathbf{H_s V_b / V_s H_b}$$

Nakamura e Theodulidis *et al.* (1996) hanno dimostrato che gli spettri delle componenti verticali (**V_b**) e orizzontali (**H_b**) sono equivalenti al top del basamento rigido:

$$\text{Se } \mathbf{H_b/V_b} = 1 \text{ allora } \mathbf{S_M} = \mathbf{H_s/V_s}$$

Alla fine quindi, gli effetti di sito **S_M** (ampiezza del rapporto spettrale) possono essere espressi come *rapporto spettrale delle componenti orizzontali e verticali del rumore ambientale alla superficie del suolo*.

In conclusione questa affermazione implica che **una stima della risposta del terreno in un determinato sito può essere ottenuta con un singolo sismometro a tre componenti**. Esperienze di campagna hanno dimostrato che registrazioni di una quindicina di minuti per sito sono sufficienti per fornire risultati stabili nei differenti contesti urbani.

3. SINTESI DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

Caratterizzazione sismica del sottosuolo di fondazione

Sulla base delle mappe interattive dell'INGV l'area in esame è inseribile nella fascia distinta da un valore di accelerazione sismica orizzontale a_g riferito a suoli rigidi caratterizzati da $V_{s30} > 800$ m/s

compreso tra **0,050g** e **0,075g** valori riferiti ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni –mappa 50° percentile).

Il progetto è relativo alla caratterizzazione sismica di un sito, in territorio comunale di Cembra Lisignago (in prossimità della centrale di Pozzalago), ove è prevista la costruzione di un ponte sul F. Avisio per il collegamento stradale tra Cembra e Lona Lases. Per esso è prevista una vita nominale di progetto (V_n)=100anni e una Classe d'uso (CU) IV.

Nella sottoriportata tabella sono indicati i tempi di ritorno relativi alla strategia progettuale scelta sia per gli stati limite di esercizio (SLO e SLD) che per quelli ultimi (SLV e SLC) ed i relativi parametri di pericolosità sismica (a_g , F_0 e T_C^*) con i valori di accelerazione a_g che, per SLV e SLC, diventano superiori a **0.09g**.

Tipo costruzione (Art. 2.4.1)	Tipo 2 ($V_n \geq 50$ anni)	Classe d'uso (Art. 2.4.2)	Classe IV
Vita Nominale di progetto V_n (anni): <input type="text" value="100.00"/>			
Periodo di riferimento per l'azione sismica: $VR = V_n \cdot Cu = 100.00 \cdot 2.00 = 200.00$ anni			
Pvr % [Art. 3.2.1]	SLO 81.00	Periodo di ritorno T_r (anni)	SLO 120.43
SLD 63.00	SLD 201.16	SLV 1898.24	SLC 2475.00
SLV 10.00	SLC 5.00		
Posizione del sito	Nodi intorno al sito		
Comune: Cembra - (TN)	ID 9182	Longitudine 11.2540	Latitudine 46.2140
Longitudine 11.2210	9181	11.1820	46.2130
Latitudine 46.1760	9403	11.1840	46.1630
<input type="button" value="Cerca con Google Map"/>	9404	11.2560	46.1640
<input type="radio"/> Isola: Sardegna			
Parametri di pericolosità sismica			
	a_g (g/10)	F_0 (adim)	T_C^* (sec)
SLO	0.41253432	2.51043666	0.27871866
SLD	0.48845713	2.51072625	0.31515253
SLV	0.91290520	2.76400091	0.40500285
SLC	0.97902109	2.77860758	0.41818258

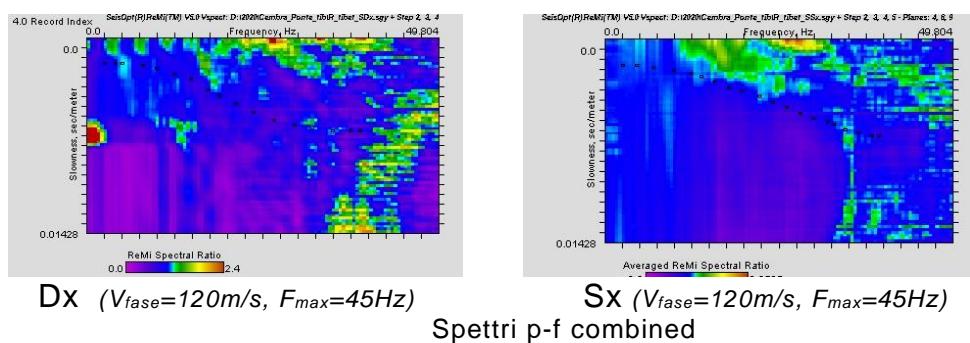
Per ottenere il valore di a_g in (g) va diviso il valore in tabella per 10.

Sarà compito del progettista strutturale scegliere i parametri da utilizzare nei calcoli in funzione della “Strategia di progettazione” adottata una volta definita la Vita Nominale, la Classe d’uso ed il Periodo di Riferimento assegnate alla struttura

Sfruttando gli stendimenti attivi a scopo geotecnico sono stati realizzati due profili ReMi di 34.5m (spaziatura geofonica 1.5m, 5 e 10 record da 20s) uno in sponda destra (Dx) e uno in sponda sinistra (Sx). I dati sono risultati di qualità scadente soprattutto a causa delle condizioni geologiche del sito e del vicino fragore del T.Avisio. E’

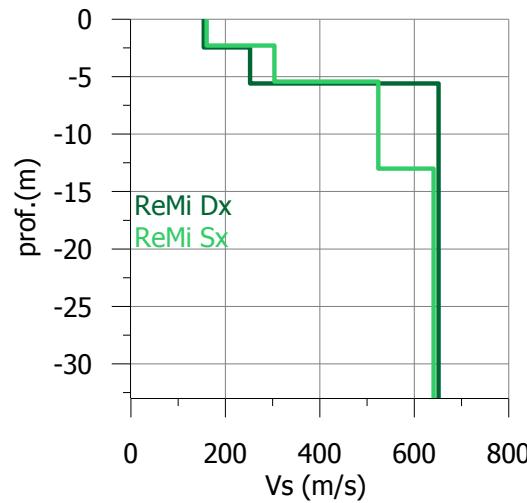
stata più volte sperimentata la bassa dispersività dei siti dove è presente il substrato vulcanitico lastrificato. Ciò è imputabile alla elevata irregolarità delle interfacce stratigrafiche di copertura (con blocchi importanti 2-3x spaziatura) e alla presenza di uno strato regolitico a volte importante in grado di provocare lo scattering del segnale sismico e la perdita di focalizzazione dovuto a condizioni molto distanti dalla casistica monodimensionale che consente l'ottimizzazione della analisi del segnale.

In queste condizioni le onde di superficie vengono rapidamente smorzate e gli spettri, pur avendo adottato una spaziatura geofonica contenuta (1.5m), non rivelano alcuna struttura modale significativa a causa dello scattering..



Le curve di dispersione proposte sono quindi sostanzialmente frutto di un'interpolazione che garantisce di non sovrastimare le Vs e, nel contempo, di fornire una sismostratigrafia coerente con il contesto geologico locale caratterizzato dalla presenza, a debolissima profondità, di materiali da addensati a molto addensati.

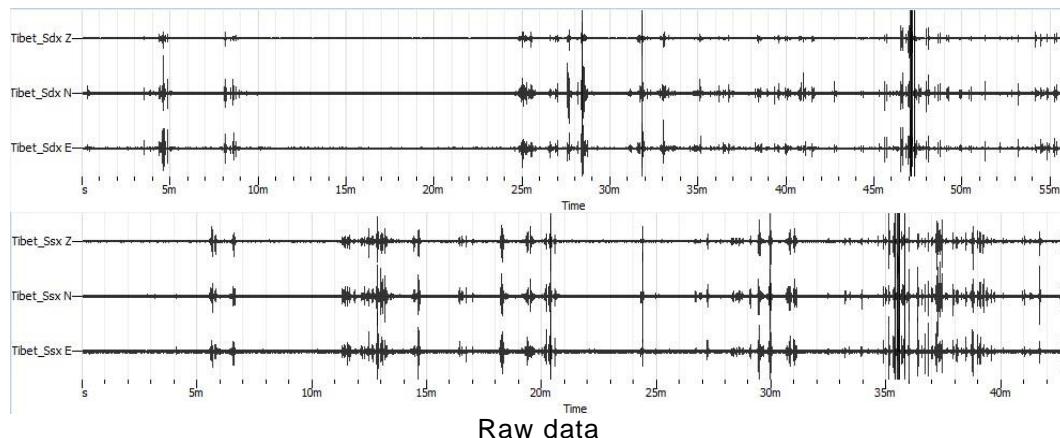
Così i profili verticali di Vs, derivati dalla modellazione diretta interattiva della curva di dispersione, propongono una sequenza costituita da una sottile coltre superficiale areata che poggia su un corpo mediamente addensato ($250\text{m/s} < Vs < 300\text{m/s}$) potente un paio si metri e seguito da depositi più veloci ($>500\text{m/s}$) fino alla base della sezione investigata. Le sequenze dei due siti sono comuni fino a circa 5m di profondità dove, verosimilmente, si intercetta il substrato roccioso (anisotropico) che in spalla Sx pare presentare uno strato regolitico di spessore importante. Le vulcaniti lastrificate, come è stato provato in molteplici situazioni non raggiungono mai le velocità del bedrock nella prima quindicina di metri. In questo caso, la bassa qualità dei dati impedisce una sismo stratigrafia affidabile al di sotto di questa quota.



I valori di Vs_{30} per entrambi i profili sono $>360\text{m/s}$ per incastri fondazionali $\geq 0\text{m}$ e quindi la categoria sarà la **B**. Risulta difficile infatti adottare la dicitura di $Vs_{\text{equivalente}}$ in quanto pur essendo il substrato roccioso prossimo alla superficie topografica esso non presenta $Vs > 800\text{m/s}$ almeno per la prima decina-quindicina di metri.

Più avanti si presenteranno i risultati delle prove attive Masw per le semisezioni che aiuteranno a comprendere come la situazione osservata nella modellazione Vs media ($HV+DispReMi$) rappresenti una sorta di risultato mediato lateralmente. Per le Masw si noterà che sarebbe possibile ricavare i valori del $Vseq$ (con $H=10-20\text{m}$) e che esso localmente potrebbe definire categorie **E** in quanto le Vs medie delle coperture scendono al di sotto di 360m/s . È vero però che considerando l'approfondimento fondazionale delle spalle e l'avvicinamento alla roccia superficiale -con Vs di $450-600\text{m/s}$ tipiche di porfidi fessurati e/o di vulcanodetritici- determinerà il reintegro in cat. **B**.

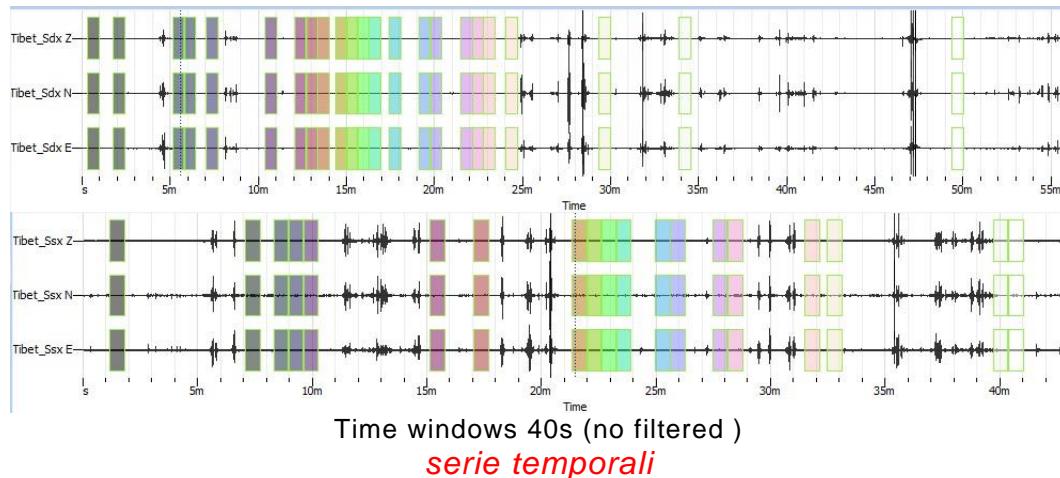
Le serie temporali dei test Hvsr si riferiscono a due registrazioni del rumore di fondo (in spalla destra Dx e in spalla sinistra Sx) della durata rispettivamente di 56 minuti e 43 minuti.



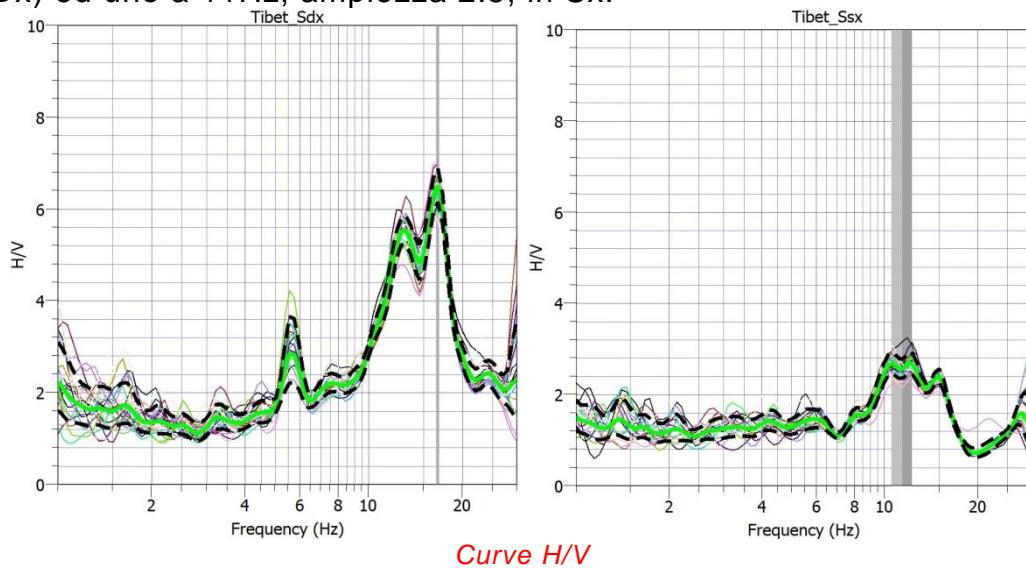
Esse appaiono perturbate da interferenze frequenti e di ampiezza non trascurabile, riconducibili a sorgenti vibrazionali

transienti (esecuzione delle rifrazioni attive) e, subordinatamente, da altre stazionarie (fragore del torrente).

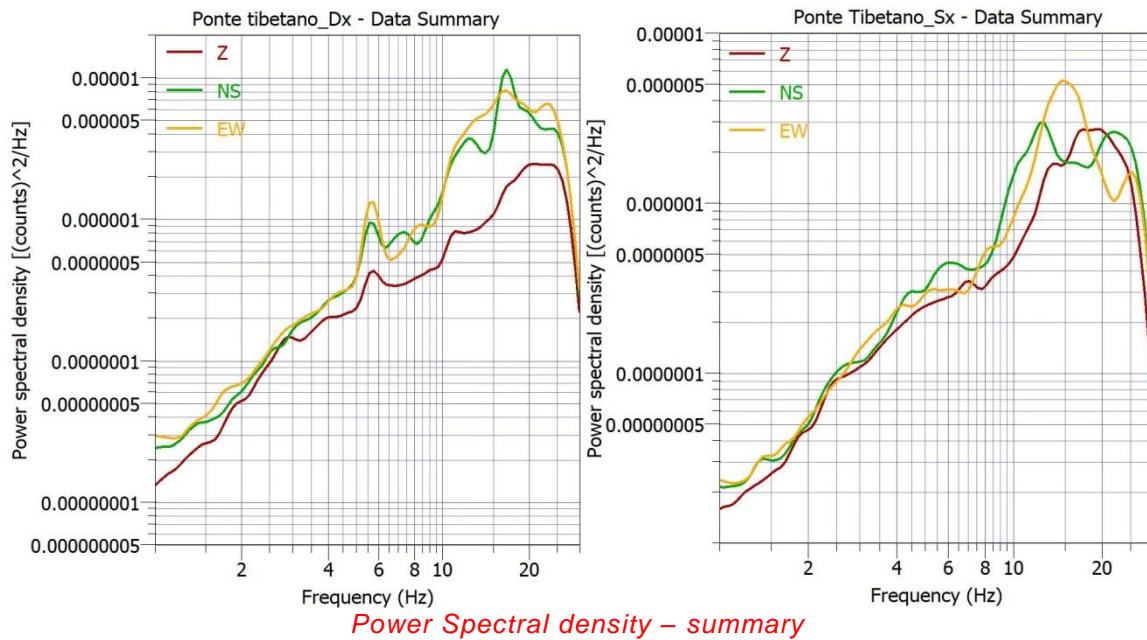
Non si è ritenuto opportuno sottoporre i dati a filtraggio in considerazione del fatto che la finestra di interesse appare compresa tra 10Hz e 30Hz. Sono state selezionate finestre temporali di 40s e nell'immagine sottostante è riportato il windowing dove sono visibili le finestre salvate dopo il "taglio" eseguito direttamente sul plot per l'eliminazione di quelle che, pur rientrando nelle soglie, peggioravano la qualità delle curve H/V.



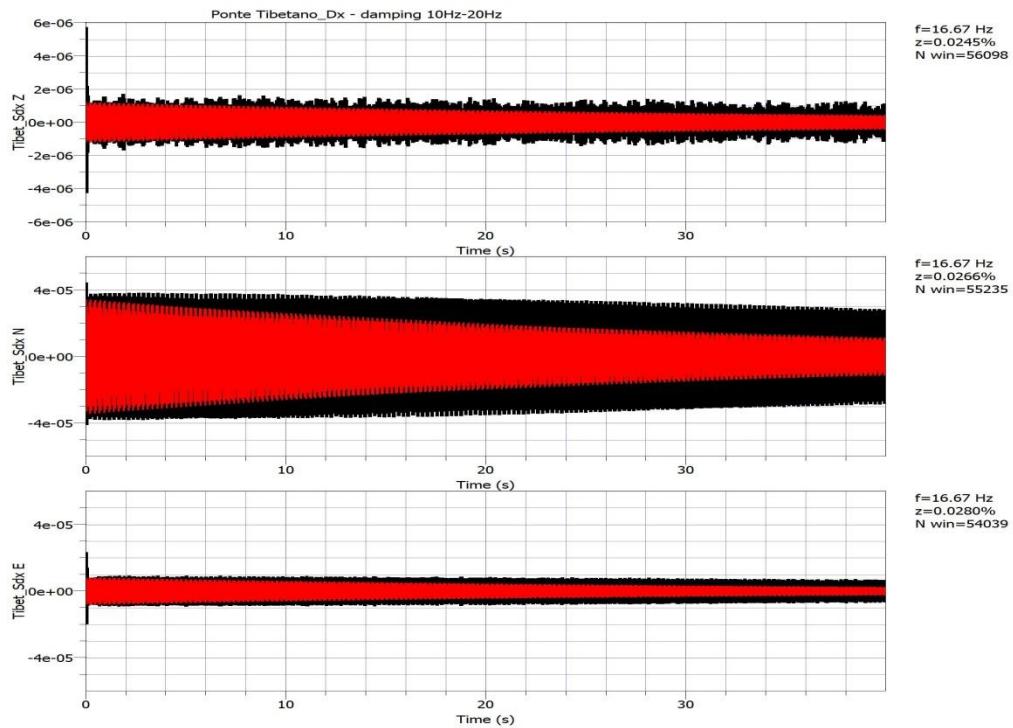
Le curve H/V calcolate nell'intervallo di frequenza 1Hz-30Hz mostrano un evidente massimo di ampiezza 6.5 centrato su 20Hz (Dx) ed uno a 11Hz, ampiezza 2.5, in Sx.



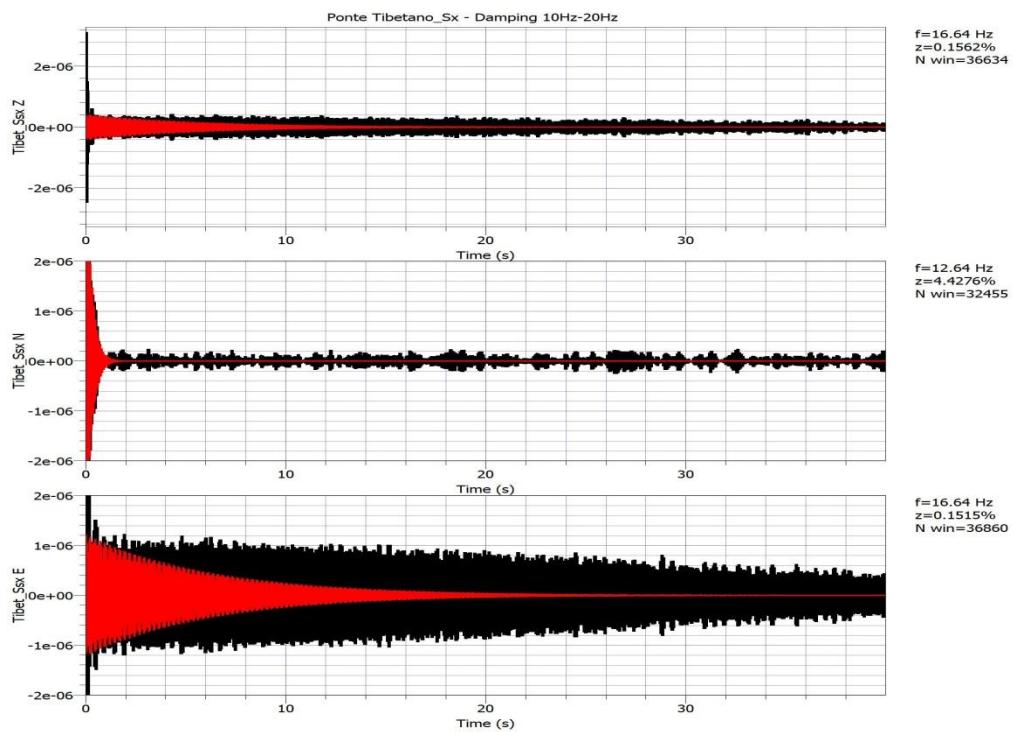
Il summary degli spettri di potenza mostra come i massimi H/V non siano localizzati in corrispondenza di minimi della componente verticale e quindi la loro origine non è verosimilmente geologica.



Il damping eseguito sulle serie temporali della prova Dx nella banda di frequenza 10Hz-20Hz evidenzia che lo smorzamento z in corrispondenza del massimo H/V è <<1% e ciò significa che esso è stato indotto da una sorgente antropica monocromatica molto vicina al sito.

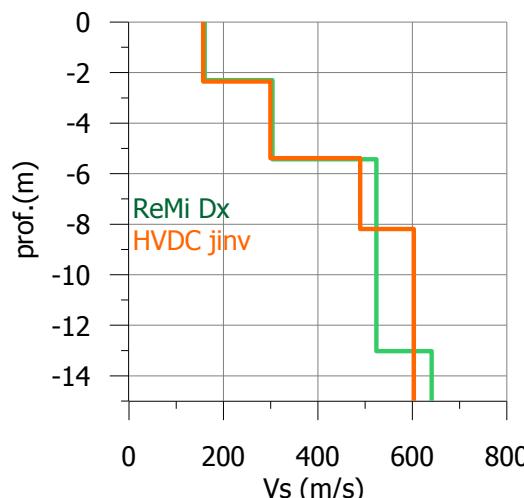


Ugualmente test è stato eseguito anche per la prova Sx ottenendo che impulsi di origine antropica si osservano per frequenze appena superiori a quella del massimo H/V. E' quindi probabile che vi sia contaminazione anche per il massimo di quella prova.

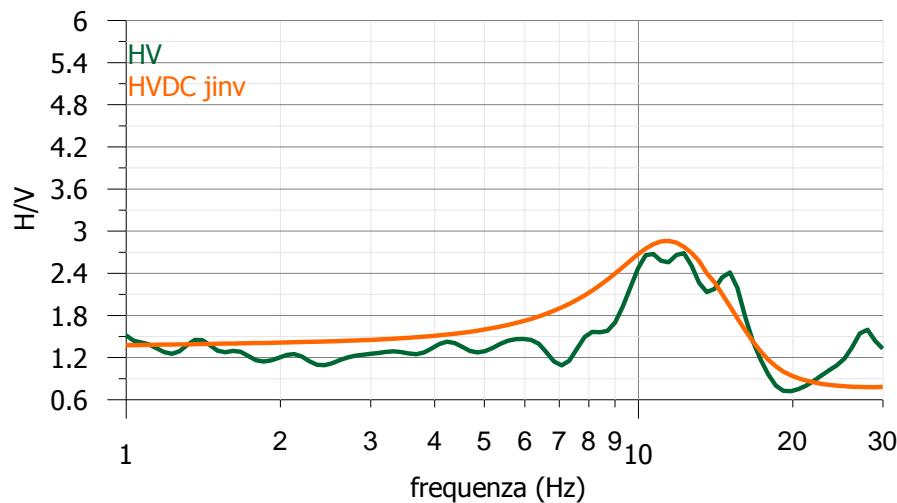


Come abbiamo già enunciato le sismo stratigrafie sono state ricavate da una modellazione diretta dei dati di dispersione (della cui attendibilità abbiamo già detto). Esse sono solo due delle decine di soluzioni che possono vantare la medesima correttezza in termini di errore quadratico medio, dal momento che si affronta e risolve solo un problema lineare. Abbiamo perciò voluto sperimentare, e solo per la prova Sx che appare "meno" antropica di quella Dx, l'inversione congiunta dei dati di ellitticità (H/V) con quelli di dispersione (DC). Con questo approccio di tipo non lineare la questione della non unicità della soluzione si riduce notevolmente proprio per il contributo fornito dalla curva di dispersione.

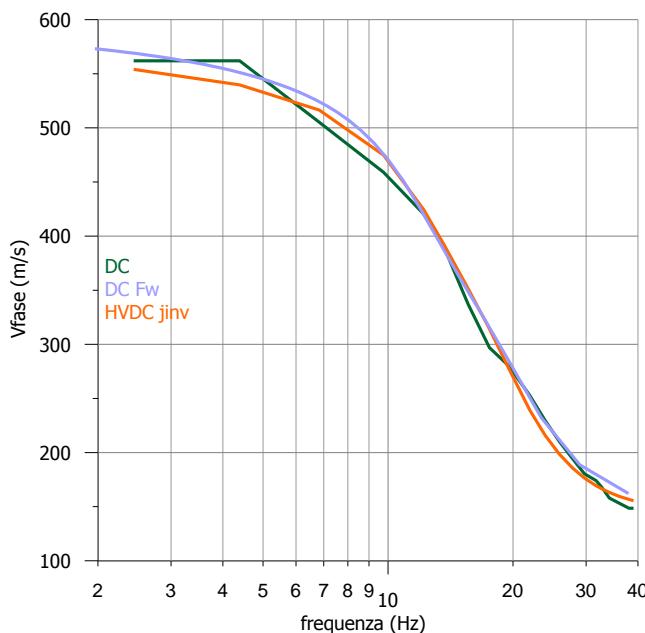
E' stato utilizzato il software HVinv (García-Jerez,A.,Piña-FloresJ.,Sánchez-Sesma ,F.J., Luzón F., Perton M (2016)) fondato sulla teoria del "diffuse field assumption" (DFA).



Il risultato confermerebbe l'attendibilità delle prime due interfacce della soluzione "diretta" che, però, sovrastimerebbe la profondità del corpo a $V_s > 600 \text{ m/s}$.



Dall'inversione congiunta emergerebbe quindi che il picco potrebbe essere naturale. La curva sintetica HV infatti è costruita soltanto con la risposta delle onde di superficie ed è depurata dalle interferenze di quelle di tipo body (onde P e onde S). Questo lo si può apprezzare dalla sua "lisciatura".



Il grafico rappresenta il confronto tra la curva di dispersione sperimentale (DC), quella relativa alla modellazione diretta (DC Fw) e quella corrispondente alla inversione congiunta (HVDC jinv). Le due curve sintetiche sono coincidenti alle alte frequenze, mentre divergono alle basse frequenze, conformemente alle relative sismo stratigrafie. Le differenze sono quindi derivanti dal fatto che la HVDC jinv deriva dalle constrains che la curva di dispersione sperimentale impone a quella sintetica di ellitticità. In tal modo essa aiuta, come

sopra scritto, a riconoscere la soluzione vera tra i molti minimi locali dei modelli ottenibili della modellazione disgiunta.

Indagini Geofisiche a scopo geotecnico

Spalla Sinistra idrografica

Le sezioni elettriche e sismiche eseguite in questo settore sono costituite da un terreno subpianeggiante di chiara connotazione antropica. Sul posto e' infisso un palo con un corrugato arancione che e' stato preso di riferimento e sulle progressive parziali da corda metrica stesa misura 31.3m. Il test Hvsr e' posizionato al metro 26 ed il primo geofono upstream e' posizionato a 7m mentre il primo elettrodo allo 0 numerico. Le sezioni sono state presentate con il limite destro in posizione upstream.

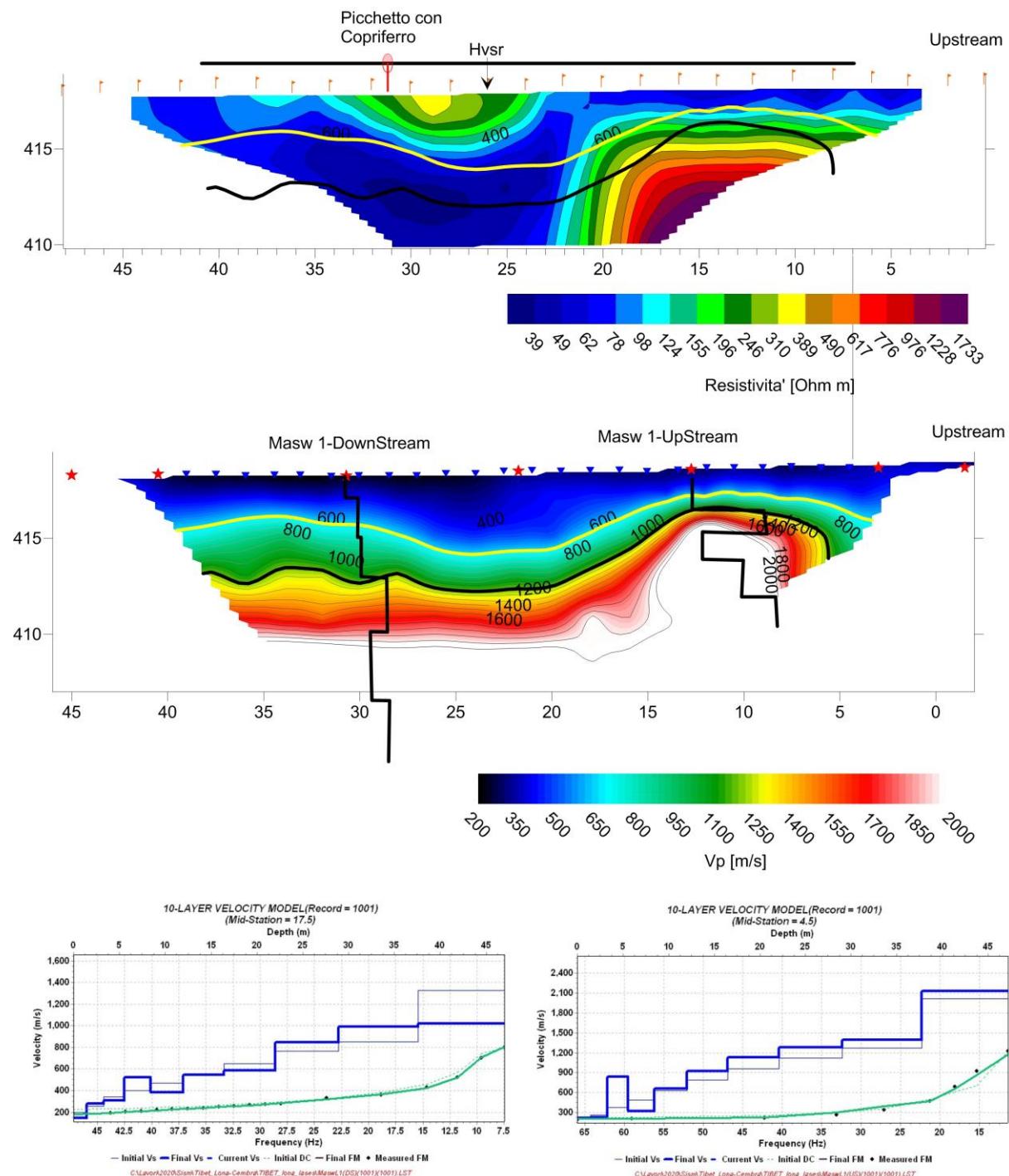
Sia la sismica che l'elettrica tomografica mostrano la presenza di una copertura di almeno 4-5m, considerando che la loro rappresentazione non e' prettamente verticale ma puo' subire una distorsione laterale proporzionale all'inclinazione della superficie di erosione del substrato roccioso.

Il modello appare comunque ben vincolato evidenziando una netta differenziazione tra la metà stendimento upstream e la metà downstream: la prima mostra la presenza subsuperficiale dell'ammasso roccioso poco alterato (contrasto di resistività elevato) e $V_p >> 2000 \text{ m/s}$ già a 3-4m di distanza dalla superficie.

La condizione nella porzione downstream mostra la presenza di una sacca resistiva (riporti) e lenta ($V_p < 400 \text{ m/s}$). Quindi in profondità esistono materiali alterati (conduttori e di velocità media V_p 800-1600m/s). In base alle osservazioni geologiche del rilievo geologico del Dott.Vigna la riduzione di velocità di questolitotipo potrebbe essere giustificata dalla presenza di roccia vulcanodetritica contrariamente a quanto accade in condizione upstream in cui affiorano poco lontano rocce porfiriche rossastre e tenaci. Il Vulcanodetritico puo' di conseguenza mostrare un aumento della porzione regolitica che si manifesta in tomografia elettrica come un'estensione in profondità dell'alterazione (>conduttivo).

Sulla verticale delle due semiporzioni dello stendimento e' stata compiuta l'analisi delle onde di superficie con lo scopo di ricavare la sismoverticale media V_s : per l'ambiente vulcanodetritico sotto la copertura e alterazione regolitica si osservano V_s che raggiungono a stento i 600m/s mentre per quella upstream la roccia mostra un costante incremento di V_s che da 600m/s sale a 1200m/s.

Spalla Sinistra



Spalla Destra idrografica

La situazione topografica di questa spalla si presenta molto più articolata rispetto alla sinistra: la parte downstream è eseguita alla base di un muro che sostiene la pista di accesso all'area; in seguito nel punto centrale della sezione sismica e dove è stato posizionato il test Hvsr vi è una porzione rialzata (zona della pista di accesso e di imposta della spalla del ponte) e quindi si entra nel

bosco in una conca morfologica che termina upstream su un evidente affioramento roccioso.

La sezione elettrica e' stata estesa fino a tale affioramento mentre la sismica si e' preferito centrarla sulla spalla e premiare la risoluzione dettata dall'interspaziatura geofonica inferiore a quella elettrica.

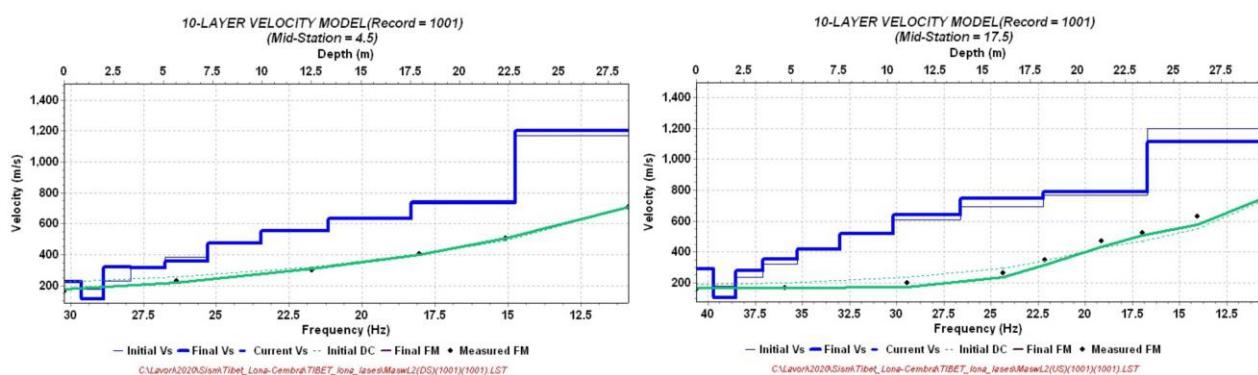
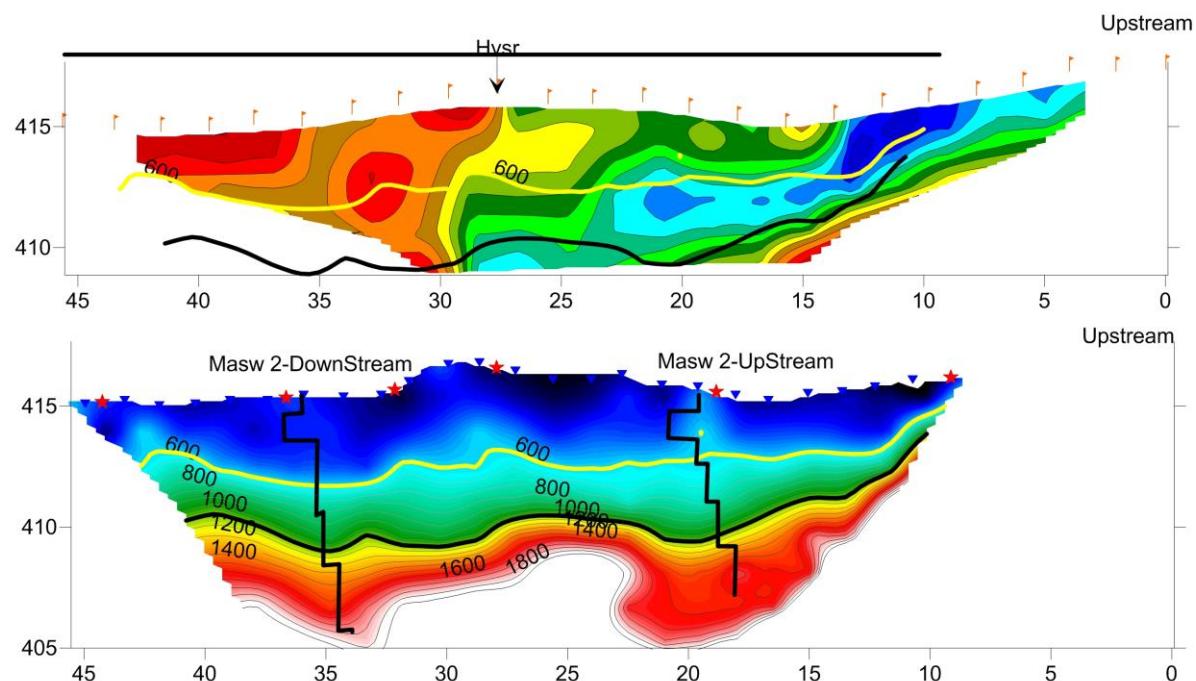
Si puo' cosi' notare come la roccia vulcanica appare resistiva mentre la sua regolite e alterazione eluvio-colluviale sia conduttiva.

La resistivita' non raggiunge i minimi della spalla opposta e quindi si ritiene che su questo lato vi siano meno apporti idrici da monte.

Anche qui la copertura (resistiva e lenta) si attesta intorno a 3-4m e grossomodo segue il contatto della linea gialla. La linea nera che indica il passaggio a situazioni fessurative piu' chiuse si potrebbe spostare in questo caso dai 1200m/s di Vp ai 1800m/s: cosi' facendo si identificherebbe piu' facilmente il fatto che il substrato roccioso e' permeato da fasce di fratturazione importanti e che comunque la zona della spalla presenta un setto localmente piu' rigido e vicino alla superficie.

Le due sismoverticali Vs indicano una roccia mediotenace con Vs che da 600m/s incrementano a 800-850m/s nei primi 10-20m.

Spalla Destra



Torbole s/G 18/07/2020

GG Service s.a.s.
di
Garbari Tomas &C.

