



**REGIONE VENETO
PROVINCIA DI TREVISO
COMUNE DI PAESE**

**PIANO URBANISTICO ATTUATIVO ATR18 - PAESE, VIA TREFORNI
INDAGINE GEOFISICA - ANALISI ONDE DI SUPERFICIE
DETERMINAZIONE PROFILO V_s E PARAMETRO V_s EQUIVALENTE**

Relazione tecnica

CAMPOFORMIDO (UD)
MARZO 2023

DOTT. GEOL. ALESSANDRO PAVAN



RELAZIONE 10_23

*Studio dott. geol. Alessandro Pavan
Via Vecchia Postale, 23 – 33030 Campoformido (UD)
Tel/fax: 0432 663171 e mail: alessandropavan82@libero.it
Posta certificata: alessandro.pavan@pec.epap.it*

SOMMARIO

INTRODUZIONE	3
CENNI TEORICI SULLA TECNICA HVSR	4
STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	5
ACQUISIZIONE DATI	5
ELABORAZIONE DATI	5
HV 1	6
HV 2	7
RISULTATI HVSR	8
CENNI SULLA TECNICA HOLISURFACE	9
ACQUISIZIONE DATI	10
ANALISI ED INTERPRETAZIONE DATI	11
RISULTATI HOLISURFACE	15

INTRODUZIONE

Su incarico della committenza Evoluzione 21 s.r.l., nel febbraio 2023, all'interno di una lottizzazione di oltre 10.000mq sita in Località Paese (TV), Via Treforni (Fig.1), è stata realizzata un'indagine geofisica secondo le tecniche HS (HoliSurface) e HVSr (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) al fine di analizzare la dispersione delle onde di superficie, valutare eventuali contrasti di impedenza sismica, fornire un profilo Vs con la profondità e classificare la categoria di sottosuolo secondo le NTC 2018.

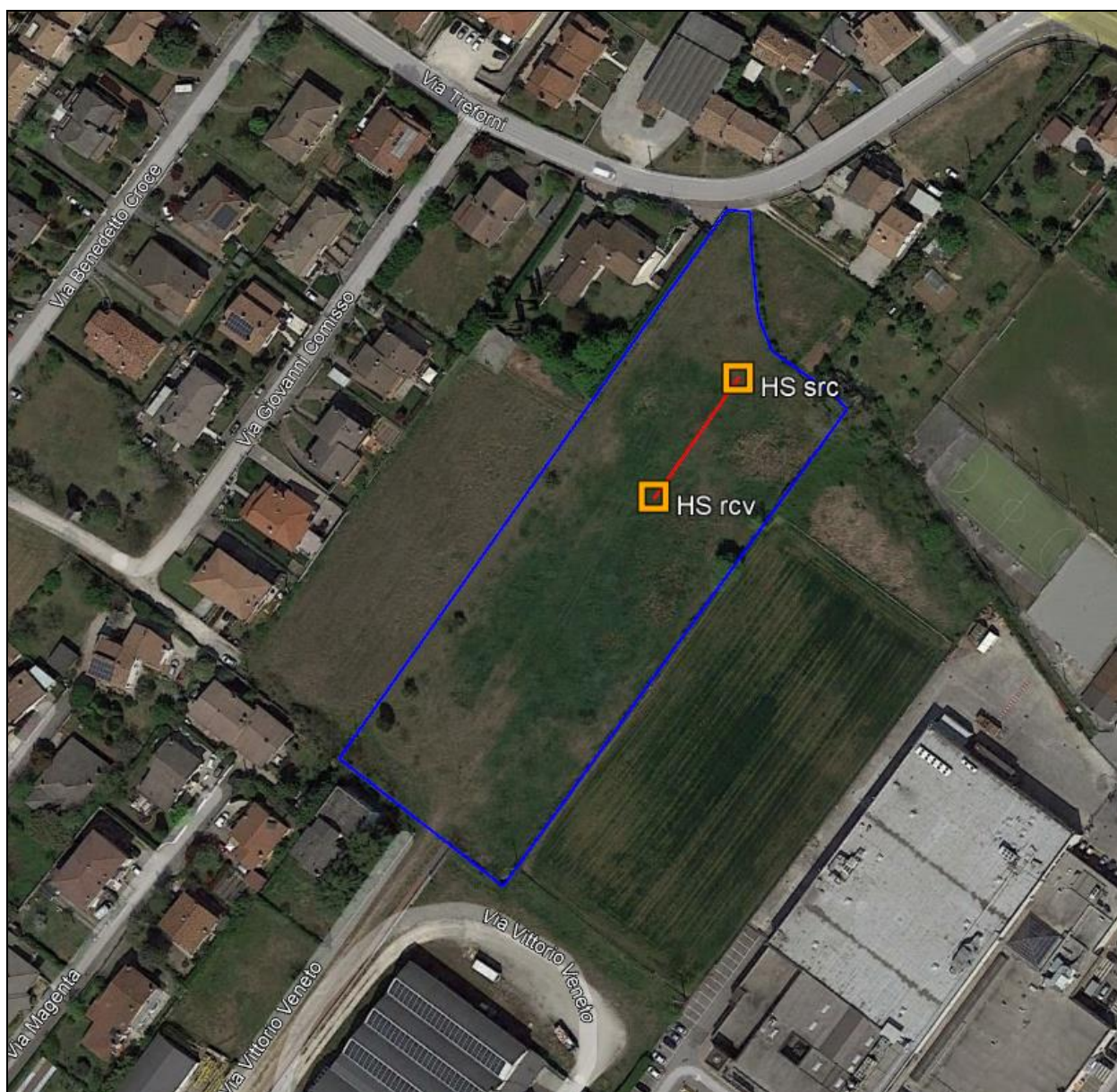


Fig.1: Sito di indagine – Ubicazione stendimento Holisurface (linea rossa) con indicazione del punto di energizzazione delle onde sismiche (HS src) e del punto di ricezione (HS rcv) delle onde ivi generate. In entrambi i punti sono state effettuate anche due misure passive di microtremore analizzate secondo la tecnica HVSr. In blu il perimetro della lottizzazione.

La tecnica HVSR consiste nella misura passiva di rumore sismico ambientale (microtremori), ovvero di oscillazioni continue di piccola ampiezza originate dalla sovrapposizione di effetti generati sia da sorgenti naturali (perturbazioni meteorologiche a larga scala, vento, onde oceaniche,...) che da sorgenti antropiche (traffico, attività industriali,...), lungo tre assi ortogonali tra loro (N-S, E-W, U-D).

Le linee guida della tecnica per l'ottimizzazione del rilievo sono state illustrate dal progetto SESAME (Site Effects assessment using Ambient Excitation).

Il risultato dell'indagine HVSR è un grafico frequenza–ampiezza del rapporto tra il moto delle particelle lungo le componenti orizzontali e il moto delle particelle lungo la componente verticale (H/V).

Ciascun picco non industriale nel grafico H/V corrisponde generalmente ad una variazione di impedenza acustica I tra due mezzi ($I=pv$, dove p è la densità del mezzo attraversato e v è la velocità di propagazione delle onde sismiche nello stesso). Generalmente, il picco HVSR di origine naturale è determinato da una depressione nello spettro di ampiezza della componente verticale rispetto alle componenti orizzontali; i picchi di natura industriale, invece, si presentano come picchi positivi, di diversa ampiezza, su tutte e tre le componenti.

Nell'esempio semplificato di un sistema omogeneo e isotropo a due strati, quando all'interfaccia tra i due mezzi il rapporto delle impedenze è significativo, si genera un picco sulla curva del rapporto spettrale H/V in corrispondenza della frequenza di risonanza del sito (f_0); tale frequenza dipende dalla profondità dell'interfaccia che genera il contrasto di impedenza (H) e dalla velocità media di propagazione delle onde di taglio (V_s) nello strato superficiale secondo la formula semplificata:

$$f_0 = V_s / 4H$$

Da ciò ne consegue che, a parità di V_s dello strato più superficiale, maggiore è la frequenza del picco di risonanza del sito e minore è la profondità della discontinuità che lo genera all'interno del sottosuolo. Viceversa, l'assenza di picchi di risonanza significativi sulla curva del rapporto spettrale H/V, indica sostanziale omogeneità all'interno del sottosuolo; tale situazione si verifica o in siti su roccia o in siti in cui la velocità di propagazione delle onde di taglio aumenta gradualmente con la profondità, senza significative variazioni di impedenza all'interno dello stesso.

STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Le acquisizioni utili ad analizzare il rapporto spettrale H/V (HVSr) sono avvenute mediante sismografo triassiale denominato Gemini-2, della ditta Pasi Srl.

ACQUISIZIONE DATI

Le acquisizioni sono avvenute mediante sismografo triassiale denominato Gemini-2, della ditta Pasi Srl.

Sono state acquisite n°2 misure di microtremore di durata 10 minuti, con frequenza di campionamento pari a 100 Hz, ubicate nei punti di energizzazione e ricezione delle onde sismiche generate per l'acquisizione della sismica attiva (HoliSurface).

ELABORAZIONE DATI

L'elaborazione è stata condotta utilizzando i parametri riportati qui di seguito.

The image shows a software interface for H/V computation, divided into two steps:

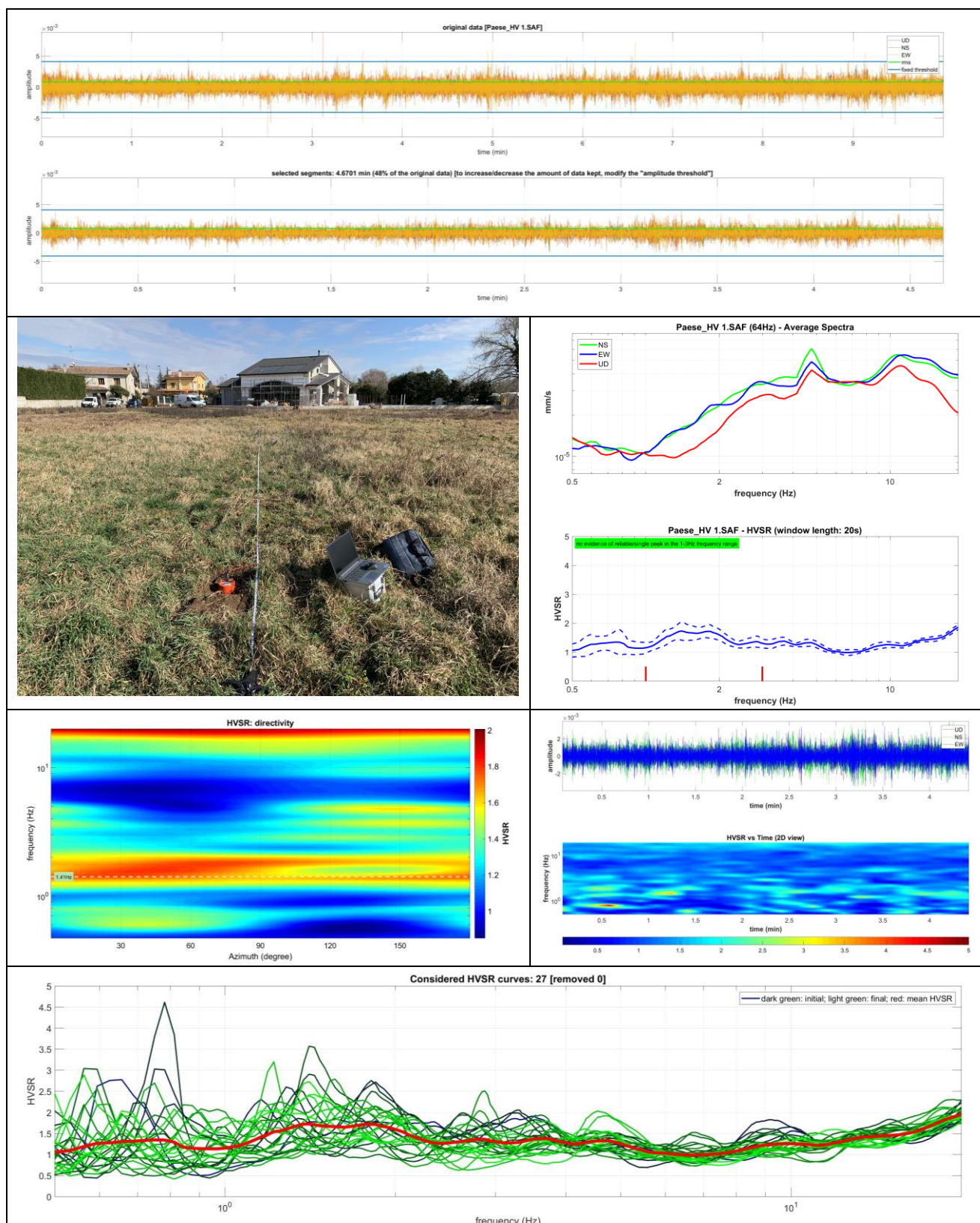
- step#1 (optional) - decimate**: Includes a dropdown menu set to "64 Hz", a "new frequency" input field, and a "resample" button.
- step#2 - H/V computation**: Includes several controls:
 - "remove events" button, "both Rad. & ..." dropdown, and "clean axes" button.
 - Input fields for "window length (s)" (20), "tapering (%)" (5), "amplitude threshold" (5), and "HVSr threshold" (3).
 - A "Min. freq.: 0.5Hz" label.
 - "spectral smoothing (triangular window)" dropdown set to "15%", "detrending order" set to "2", and "no equalization" dropdown.
 - Checkboxes for "Particle motion, all HVSrs, time lapse and video" and "full output", both checked.
 - A "test removal" button and a "compute" button.

L'intervallo di analisi utilizzato è stato 0,5÷20 Hz.

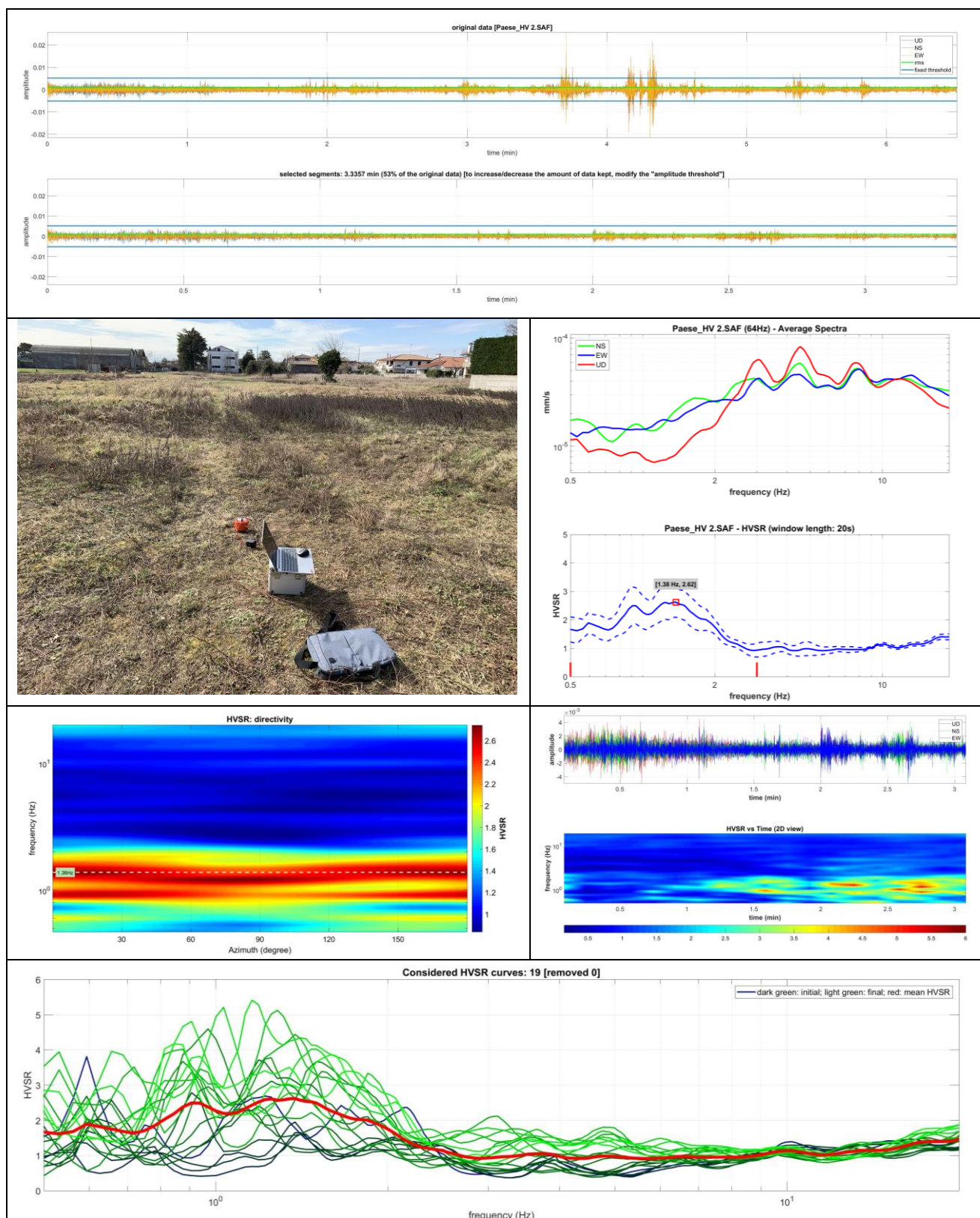
Qui di seguito si riportano i grafici relativi alle due misure effettuate che comprendono, nell'ordine:

- dati originali e soglie applicate per la rimozione di eventuali transienti;
- documentazione fotografica;
- spettri singole componenti e rapporto spettrale H/V;
- direzionalità del segnale;
- persistenza del segnale;
- curve H/V calcolate per ogni finestra di 20s.

HV 1



HV 2



RISULTATI HVSR

Le due curve H/V evidenziano entrambe un massimo relativo non molto ben definito, compreso approssimativamente tra 1 e 2 Hz (Fig. 2); tale picco è compatibile con la situazione geologica dell'area, caratterizzata da un materasso alluvionale ghiaioso da mediamente a ben addensato, presente senza soluzione di continuità fino al substrato geologico/sismico, costituito da conglomerato e situato approssimativamente entro i 100m di profondità dal piano campagna.

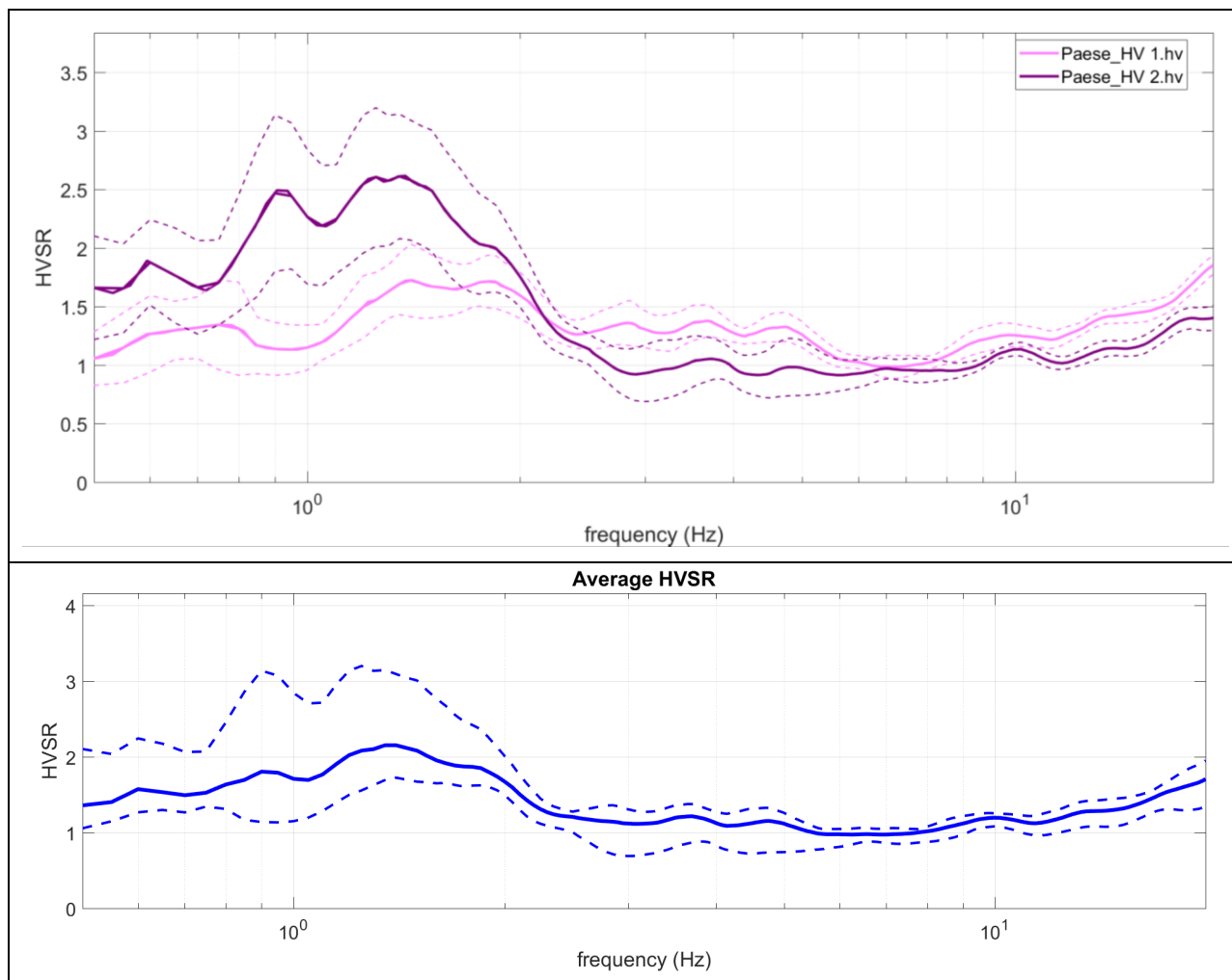


Fig.2: Confronto tra le singole curve H/V e curva H/V media

Il termine *HoliSurface*® proviene dall'unione dei termini “*Holistic*” e “*Surface*”. Questo esprime il fatto che lo scopo del metodo/software è quello di analizzare la propagazione delle onde di superficie in modo completo, cioè olistico.

HoliSurface® è un metodo innovativo (brevettato) di analizzare la propagazione delle onde di superficie allo scopo di determinare il profilo verticale della Vs e rappresenta il miglioramento di una tecnica classica della sismologia utilizzata da oltre una cinquantina d'anni (MFA - Multiple Filter Analysis).

Acquisire un dato per analisi *HoliSurface*® non è molto diverso rispetto le tradizionali acquisizioni di sismica attiva per ad esempio analisi MASW (multi-componente) o a rifrazione (lo zero dei tempi è fissato dal trigger).

La differenza sostanziale è che, a differenza dell'approccio “MASW classico” che utilizza tutta una serie di geofoni disposti lungo uno stendimento lineare, in questo caso si utilizza un unico geofono a tre componenti.

Il metodo HoliSurface studia le onde di superficie attraverso l'analisi delle velocità del gruppo d'onde di un'onda sismica generata dalla mazza battente il cui “effetto” viene registrato attraverso una terna calibrata di geofoni a stazione singola disposti in direzione x, y, e z.

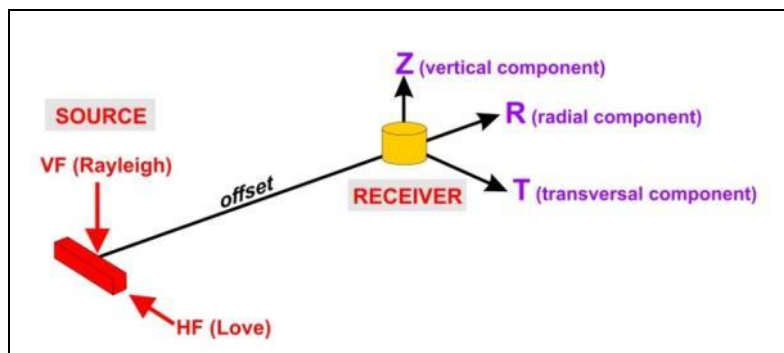


Fig. 3: Schema di acquisizione HoliSurface

L'indagine può essere svolta con acquisizione di due o più componenti distinte fino ad un massimo 5:

1. **ZVF**, acquisizione componente verticale dell'onda di Rayleigh con sorgente meccanica verticale;
2. **RVF**, acquisizione componente orizzontale dell'onda di Rayleigh con sorgente meccanica verticale;
3. **THF**, acquisizione onde di Love con sorgente meccanica orizzontale;
4. **RVS**, rapporto tra componente orizzontale e verticale dell'onda di Rayleigh in modalità attiva;
5. **RPM**, Analisi in frequenza del verso di moto dell'onda di Rayleigh.

Dal segnale raccolto si generano gli spettri di velocità di gruppo per le tre componenti ZVF, RVF e THF, (diagramma velocità di gruppo/frequenza), sul quale si individua per interpretazione il modello sismo-stratigrafico del suolo. A tale approccio, disponendo di una terna calibrata di sensori, si affianca la possibilità di analizzare l'ellitticità dell'onda di Rayleigh sia in relazione al rapporto RV/SR sia all'andamento del moto della particella, retrogrado o progrado, in funzione della frequenza e dell'assetto stratigrafico (Fig. 4).

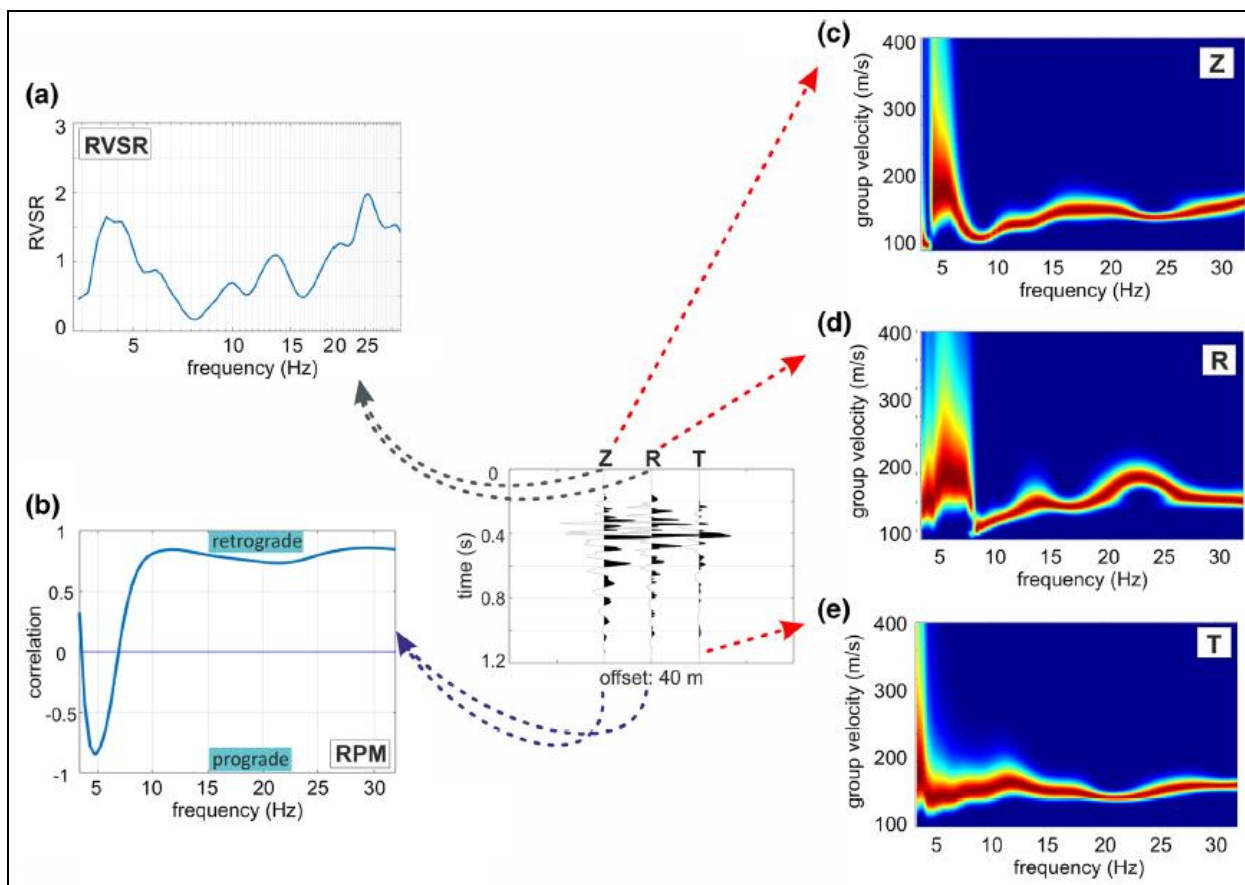


Fig. 4: Componenti che si possono ottenere da un'acquisizione HoliSurface

Anche in questo caso, analogamente a quanto accade per le "MASW classiche", la massima profondità d'indagine raggiungibile è circa $\frac{1}{2} \div \frac{2}{3}$ della lunghezza dello stendimento che rappresenta la capacità di campionamento della minima lunghezza d'onda λ per una data disposizione di sorgente-sensori.

L'elaborazione è stata effettuata con software HoliSurface in modellazione diretta (fatta direttamente dall'operatore senza inversione del dato) con successiva ottimizzazione mediante inversione in analisi FVS con algoritmi genetici. L'analisi congiunta dei n°6 dati sperimentali acquisiti, componenti ZVF, THF, RVF, RVSF, RPM e HVSR permette di comprendere il significato dei dati acquisiti attraverso i vincoli reciproci imposti dalle diverse componenti. Tale procedura evita, almeno in linea di principio, di incorrere in grossolani errori interpretativi legati alla complessa fenomenologia delle onde di superficie e ovvia al problema dell'indeterminatezza della soluzione a singola componente, sempre presente nelle indagini geofisiche, per il quale ad una singola componente sono associabili più modelli differenti pseudo equivalenti.

ACQUISIZIONE DATI

L'indagine HoliSurface è stata eseguita nel settore settentrionale della lottizzazione.

La distanza sorgente-ricevitore è stata pari a 40m.

L'acquisizione è stata effettuata sia con energizzazione orizzontale (HF) su traversina, sia con energizzazione verticale (VF).

ANALISI ED INTERPRETAZIONE DEI DATI

A partire dalle conoscenze stratigrafiche note, è stata effettuata una modellazione diretta preliminare del sottosuolo modificando Vs e spessore degli strati, cercando la maggiore coerenza possibile tra la distribuzione di energia negli spettri di velocità e le curve RVS/RPM (Fig. 5); a partire del modello diretto è stato avviato il processo di inversione delle componenti ZVF, RVF e RPM, che ha prodotto una serie di profili Vs compatibili con i dati osservati (Fig. 6).

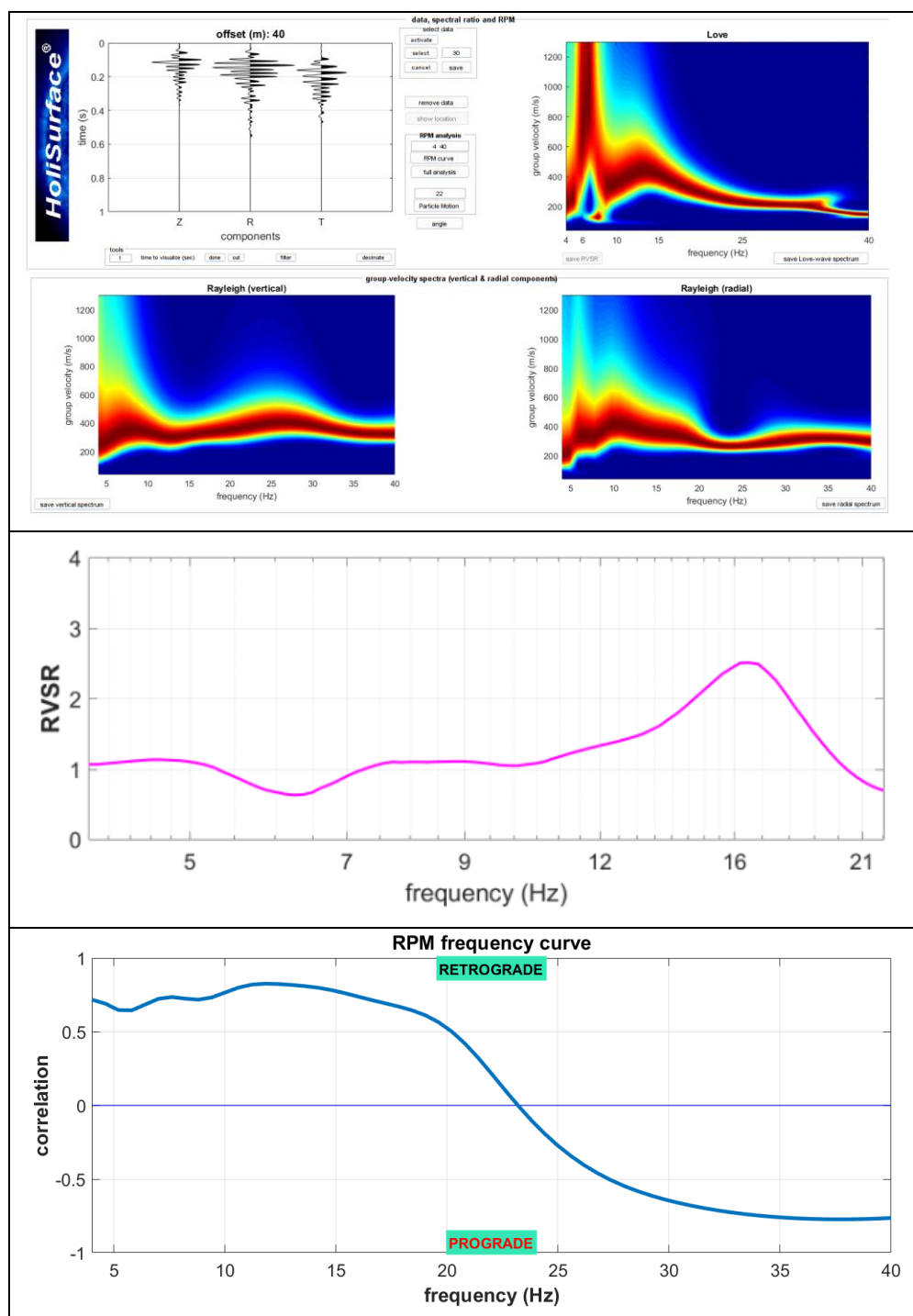


Fig. 5: Dati sperimentali e spettri delle velocità di gruppo (Rayleigh e Love), curva RVS/R, curva RPM

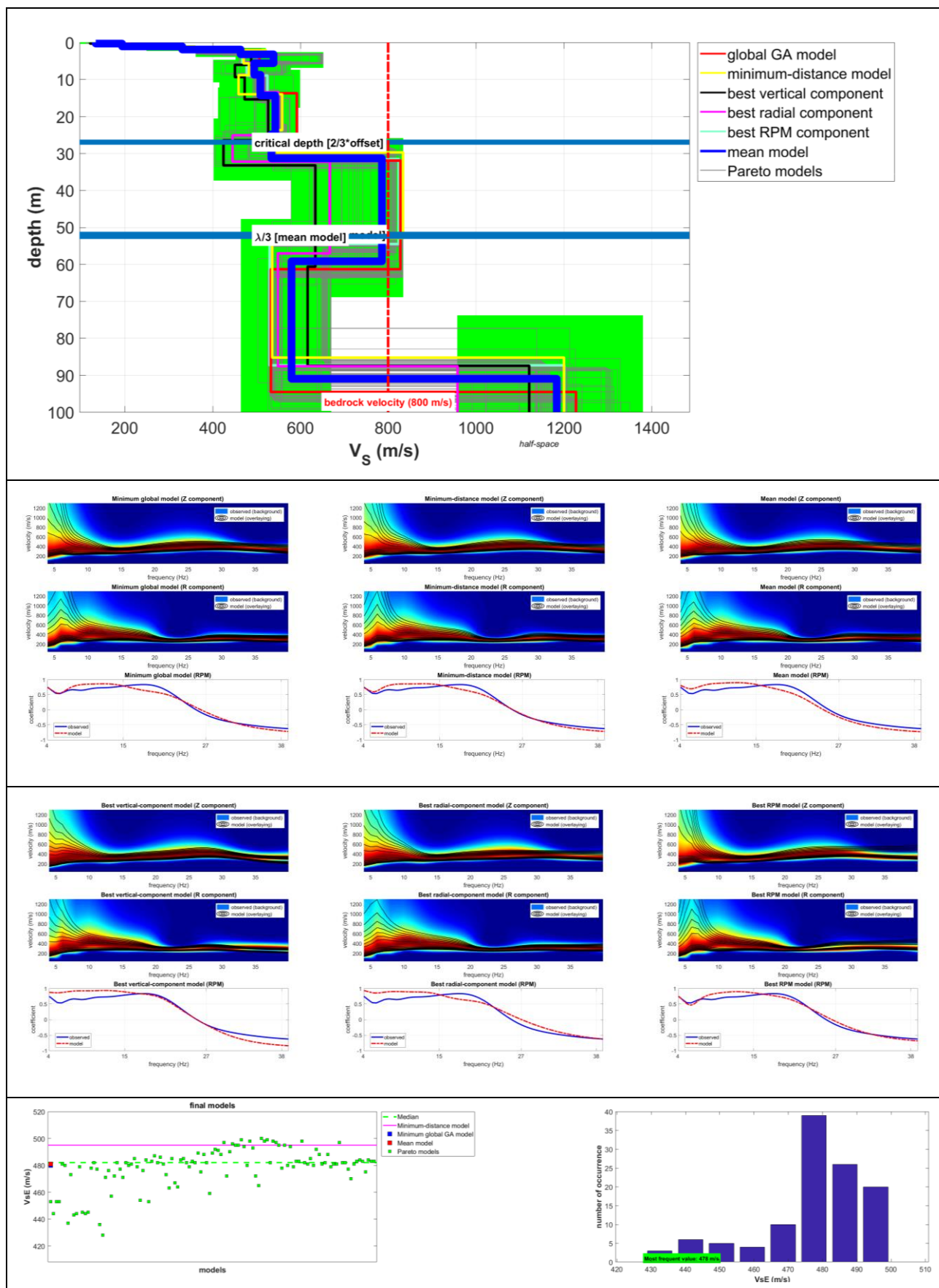


Fig. 6: Dati sperimentali e spettri delle velocità di gruppo (Rayleigh e Love), curva RVSR, curva RPM e valore statistico VsE

Tra i profili Vs derivanti dal processo di inversione, quello che presenta la minor distanza con i dati sperimentali, il “minimum distance model”, è stato ulteriormente affinato, in modo tale da ottenere una sovrapposizione ottimale delle linee di contour anche per la componente relativa alle onde di Love secondo l’approccio FVS (*Full Velocity Spectrum*) e il più possibile con le curve RVSR e HVSR media.

Il profilo Vs finale è risultato essere il seguente (Fig. 7).

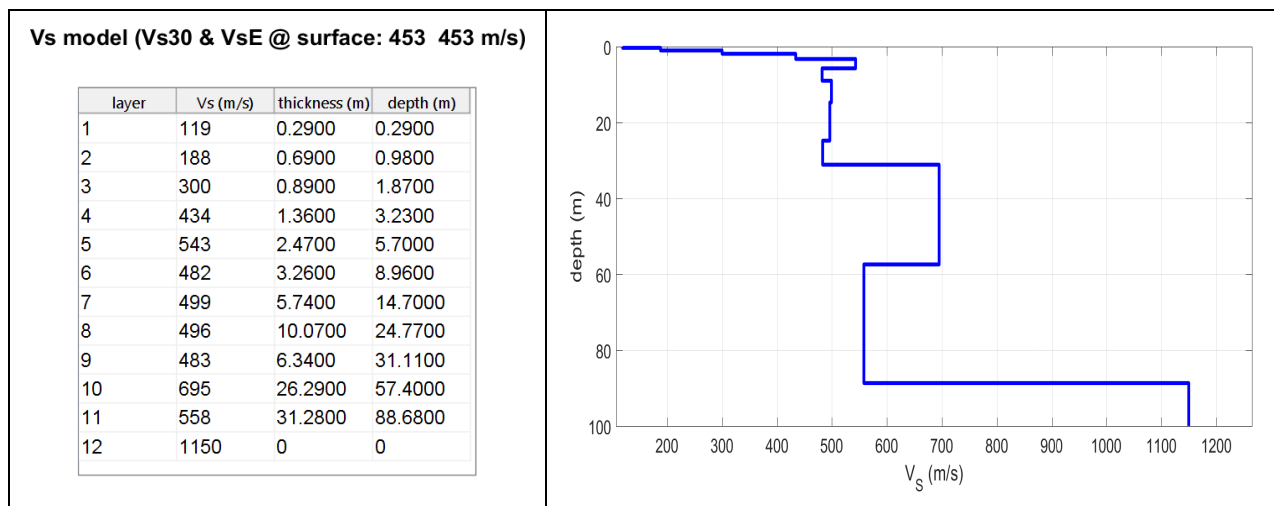


Fig. 7: Profilo Vs finale e parametro Vs Equivalente

Si riporta qui di seguito il misfit tra i dati sperimentali relativi alle singole componenti e il profilo proposto.

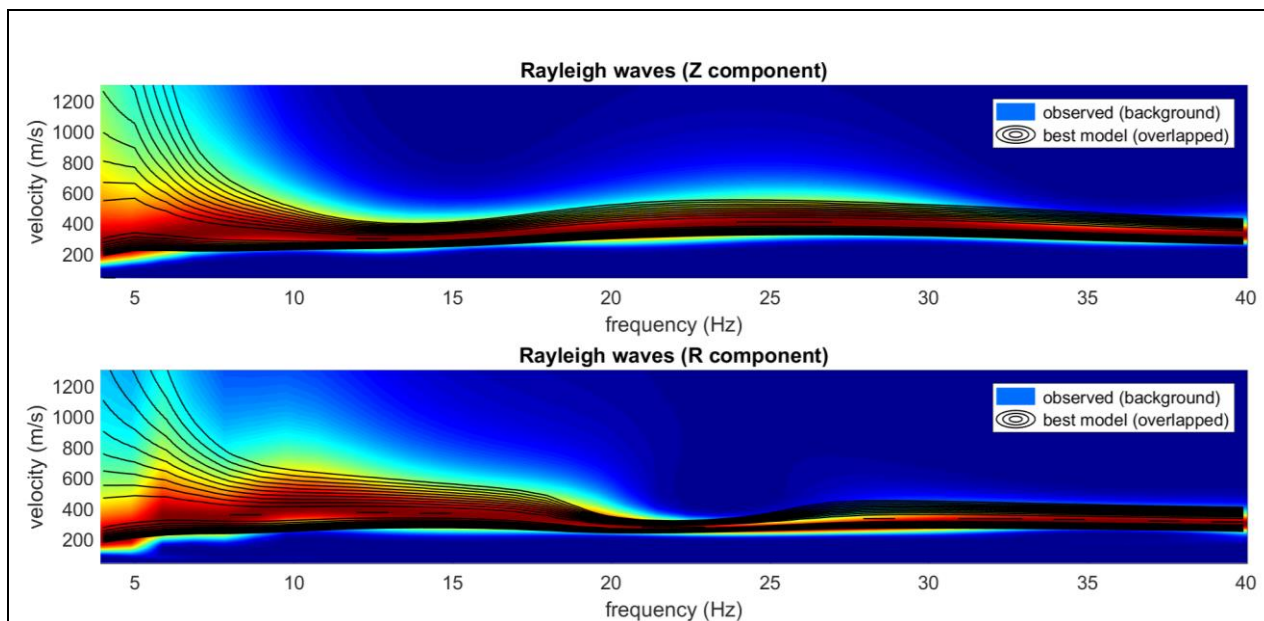


Fig. 9: Misfit tra spettro di velocità delle onde di Rayleigh (observed) e Profilo Vs finale (contour neretto)

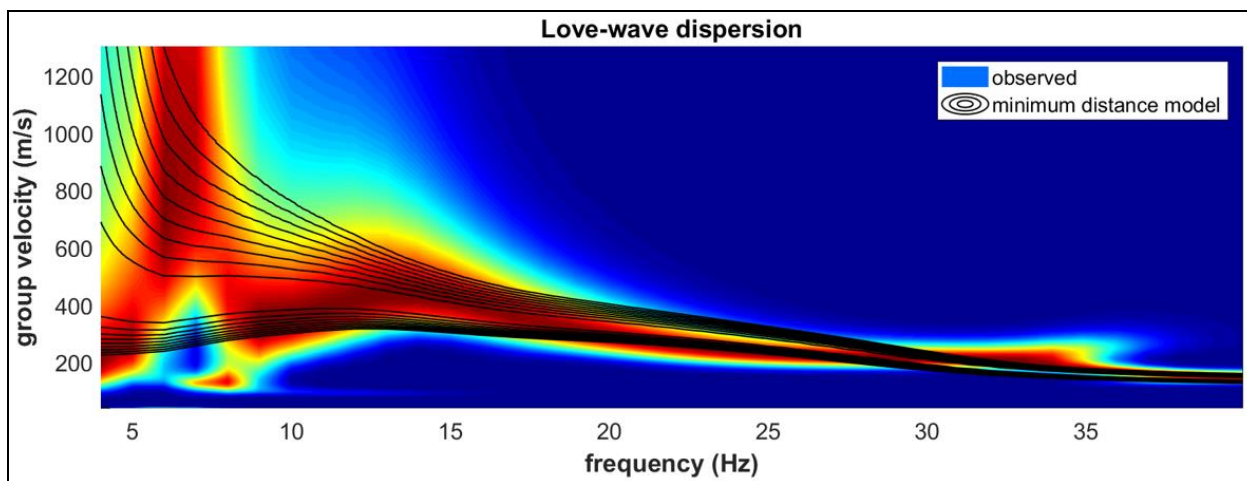


Fig. 8: Misfit tra spettro di velocità delle onde di Love (observed) e Profilo Vs finale (contour neretto)

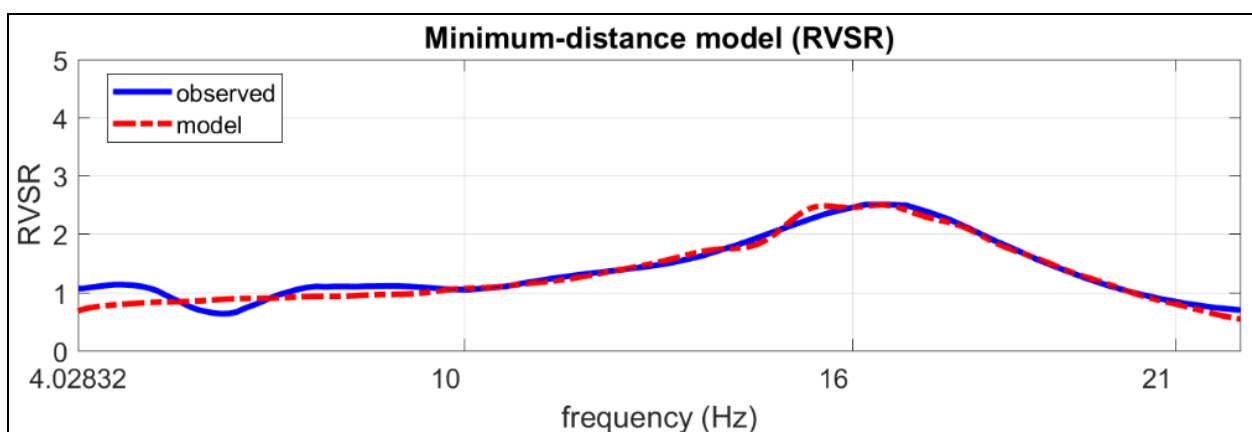


Fig. 10: Misfit tra curva RVSR (linea blu) e Profilo Vs finale (tratteggio rosso)

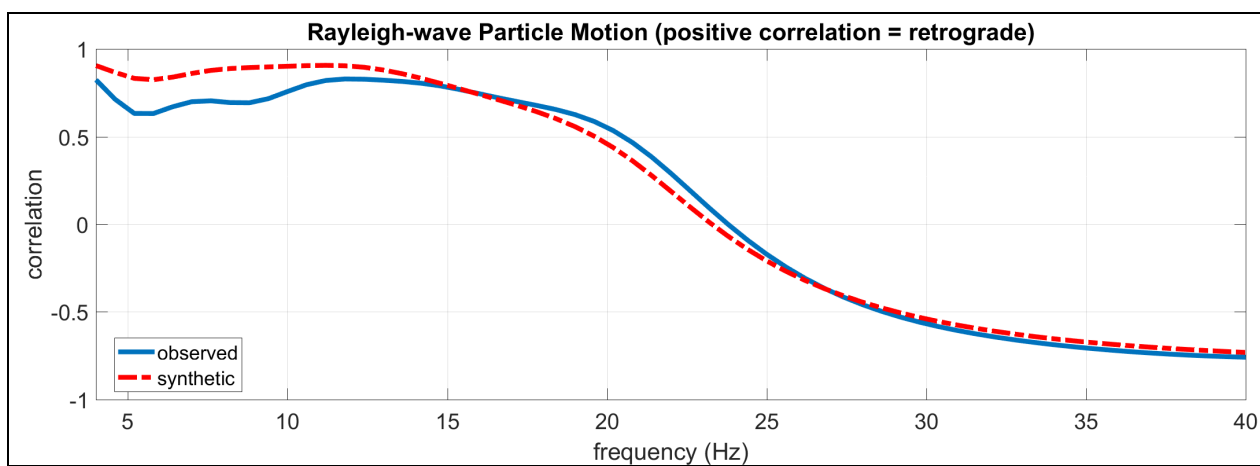


Fig. 11: Misfit tra curva RPM (linea blu) e Profilo Vs finale (tratteggio rosso)

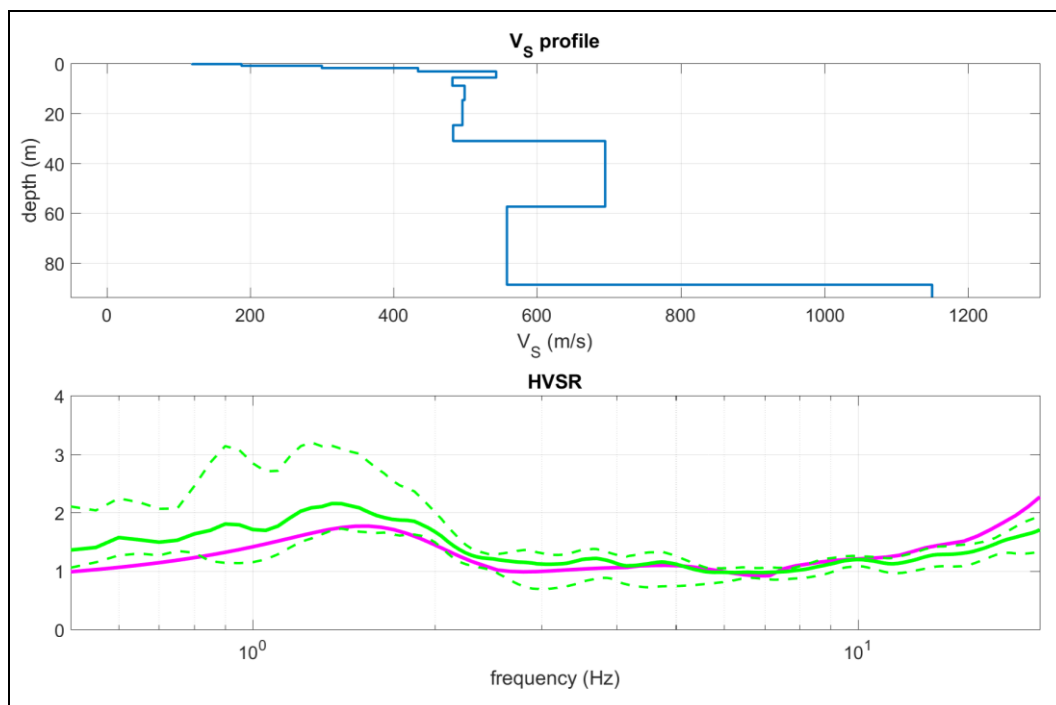


Fig. 12: Misfit tra curva HVSr (linea verde) e Profilo Vs finale (linea fucsia)

RISULTATI HOLISURFACE

Sulla base del modello proposto dall'analisi HoliSurface, si può affermare che il sottosuolo del sito di indagine, al di sotto di circa 1m di terreno vegetale ($V_s < 200$ m/s), è caratterizzato da alluvioni ghiaiose ($V_s \geq 300$ m/s), con locali orizzonti cementati ($V_s \geq 695$ m/s) presenti a partire da circa 31m di profondità dal piano campagna.

Le ghiaie poggiano direttamente su substrato geologico/sismico ($V_s \geq 800$ m/s), individuato a oltre 88m di profondità dal piano campagna.

Il valore di velocità equivalente, pari a 453 m/s, ha permesso di classificare il sito come appartenente alla categoria B dei suoli fondazionali, secondo le NTC 2018 (*Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina 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*).

Campoformido (UD), 20 marzo 2023

DOTT. GEOL. ALESSANDRO PAVAN



