

La strumentazione utilizzata è completamente conforme alle specifiche di fabbrica (i certificati di calibrazione sono disponibili su richiesta) ed agli standard qualitativi richiesti per le indagini in oggetto; ogni componente soggetto a usura, viene testato per corretto funzionamento prima dell'utilizzo. Software utilizzati: WinMasw Academy 2018 della Eliosoft. ZondST2D ver. 4.3.; Easy Refract della Geostru.

1.4 Configurazione delle indagini:

Profilo sismico # 1: Onde P e MASW onde di Rayleigh ZVF

- Lunghezza dello stendimento: 60 m;
- n. 12 geofoni verticali con frequenza propria di 4,5 Hz, distanziati (Gx) 5 m;
- n. 9 energizzazioni con tiri (Sx) esterni a 5 m, tiri interni ogni 2 geofoni;
- passo di campionatura di 256 μ s;
- lunghezza delle tracce sismiche di 512 ms;
- massa battente verticale di 7 Kg su piattello di alluminio;
- Per MASW: guadagno identico per tutte le tracce; battuta a offset minimo 4 m.

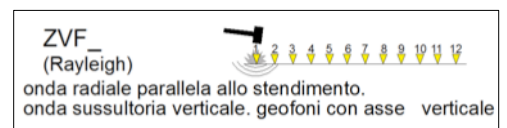


Figura 4 - acquisizione del profilo sismico. In alto, schema di acquisizione per le onde P e onde di Rayleigh.

1.5 Elaborazione dei dati

Le tracce sismiche registrate sono state analizzate e preparate per le successive analisi; il *pre-processing* comprende l'analisi delle ampiezze ed il controllo qualità dei sismogrammi acquisiti. Si è quindi proceduto all'analisi dei sismogrammi, filtraggio e pulizia del segnale, infine al *picking* dei primi arrivi delle onde P, nei rispettivi profili sismici. Dal *picking* dei primi arrivi, si sono costruite le dromocrone (diagramma spazio/tempo con diagrammati i tempi di primo arrivo delle onde), da cui interpretare i sismostrati riconoscibili; l'analisi e la restituzione dei campi di velocità è stata eseguita con tecnica tomografica mediante il software di modellazione ZondST2D.

I sismogrammi ed i *picking*, con i tempi di primo arrivo delle onde, sono riportati in Appendice.

1.6 Interpretazione del profilo sismico a rifrazione

Le elaborazioni evidenziano una zona superficiale a velocità sismica relativamente bassa ($V_p \sim 1000$ m/s), riferibile allo strato di alterazione, spesso da pochi centimetri a un massimo di 1 m, che ricopre le arenarie della Formazione del Macigno, fortemente alterate sino a 6/7 m di profondità dal p.c. ($1000 < V_p < 2000$ m/s) e quindi compatte con valori di V_p che crescono scendendo in profondità. Nella sottostante figura la ricostruzione tomografica del profilo sismico acquisito: in blu tratteggiato gli spessori dei sismostrati sopra descritti.

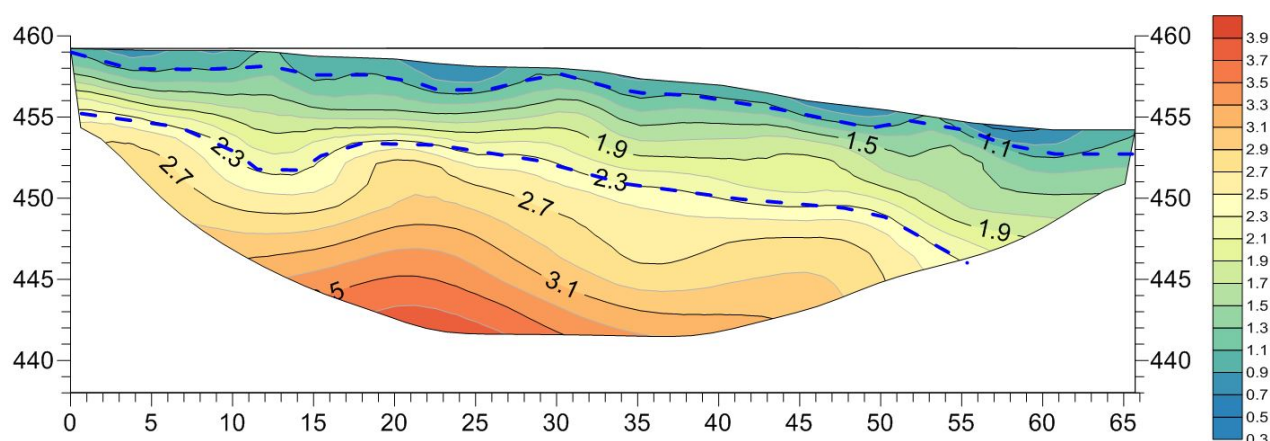


Figura 5 - Elaborazione tomografica del profilo sismico.

Le unità sismostratigrafiche individuate con la sismica a rifrazione sono:

STRATO N.	LITOLOGIA	SPESSORE (M)
1	Riporto e strato di alterazione	~1.0
2	Arenaria alterata	5/6
3	Arenarie compatte	>100

5.1. Elaborazione MASW

L'analisi MASW consiste essenzialmente in 4 fasi:

1. La prima fase consiste nella trasformazione delle serie temporali, nel dominio frequenza (f) - numero d'onda (k) (in cui è possibile cercare una correlazione tra le due grandezze);
2. La seconda fase consiste nell'individuazione delle coppie f - k cui corrispondono i massimi spettrali d'energia (densità spettrale), che consentono di risalire alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh (e/o di Love) nel piano Velocità di fase (m/sec) – frequenza (esprimibile come lentezza (s/m), o frequenza (Hz));
3. La terza fase consiste nel calcolo della curva di dispersione teorica attraverso la formulazione del profilo di velocità delle onde di taglio V_s , modificando opportunamente: lo spessore h , le velocità di taglio V_s e di volume V_p , la densità di massa ρ , degli strati che costituiscono il modello di sottosuolo;
4. La quarta ed ultima fase consiste nella modificazione della curva teorica (calcolata dal modello del sottosuolo modellato) fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale con la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica (sovrapposizione del modello sperimentale e di quello teorico).

Una tecnica alternativa al *picking* dei modi di velocità è possibile modellare in maniera diretta il profilo del sottosuolo e di conseguenza i sismogrammi sintetici corrispondenti, in modo da ottenere, attraverso il processo di inversione, una buona convergenza tra modello teorico e modello osservato. I sismogrammi sintetici consentono una migliore definizione del modello iniziale, ma soprattutto, con questa metodologia è possibile mantenere un controllo completo della definizione del modello geologico e dell'interpretazione dello spettro di velocità.

L'elaborazione dei dati schematicamente riassunta qui sopra, è stata eseguita mediante il software WINMASW® versione Academy 2018, che permette di modellare le curve di dispersione f - k relative a vari modi di vibrazione (il fondamentale, se presente, e modi superiori, oppure un modo "apparente"), di generare un modello diretto (definito dall'operatore) o automatizzato del sottosuolo tramite inversione dei dati, verificare la corrispondenza del modello con le osservazioni, ed infine generare un modello geologico-sismologico del sottosuolo, secondo metodi matematicamente rigorosi e robusti.

Dalla modellazione dei sismo-strati e delle loro velocità sismiche, si ricava il parametro della Vs30 o Vs equivalente, necessario alla classificazione del terreno di fondazione. Si rammenta che il parametro Vs(eq) va riferito al piano di posa delle fondazioni, oppure alla testa dei pali. Nel nostro caso, su indicazione del progettista, si farà riferimento al p.c..

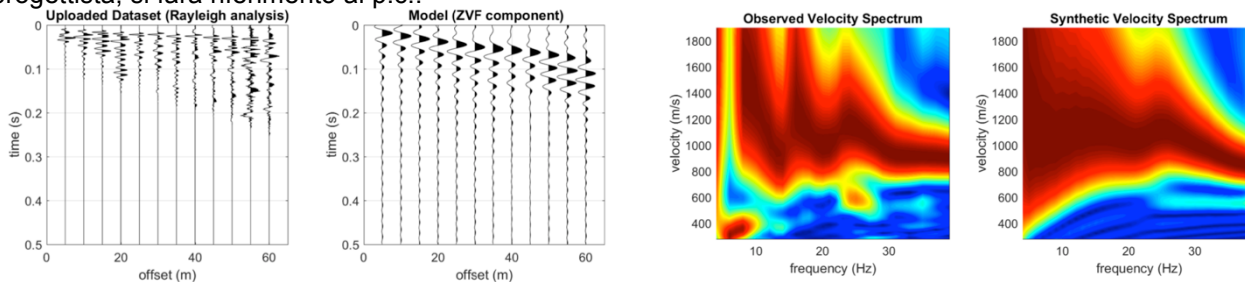


Figura 6 - Sismogrammi e relativo spettro di velocità di fase delle onde di Rayleigh con sovrapposto spettro sintetico del modello iniziale.

Lo spettro frequenza/velocità mette in evidenza uno strato superficiale poco veloce, con deciso aumento di velocità e di dispersione del segnale, a 25 Hz, che segna il passaggio a materiale più consistente (con ogni probabilità, roccia alterata). Il modello di partenza prevede quanto segue:

0-3 m: riporto; $100 < V_s < 200$ m/s;
 3-5 m: roccia molto alterata $V_s = 250-450$ m/s
 >5 m: roccia alterata; $V_s > 500$ m/s.

Tale modello approssima sufficientemente bene i valori di Vs per il tratto a maggiore coerenza dello spettro f-k. Il processo di inversione dei dati ha considerato lo spettro completo di velocità (metodo FVS), sulla base della modellazione diretta, affinando iterativamente la ricerca dei parametri di modellazione (modello geologico) che meglio soddisfano il profilo di velocità. Una volta ottenuto un modello iniziale soddisfacente, si è utilizzato l'algoritmo di ricerca -che fa parte della famiglia degli algoritmi genetici- è stato impostato per effettuare 40 realizzazioni basate su 60 modelli genetici generati. Il risultato è una serie di modelli statisticamente validi, di cui viene evidenziato il modello "migliore" (in termini di scarti quadratici) ed il modello "medio" (statisticamente più rappresentativo).

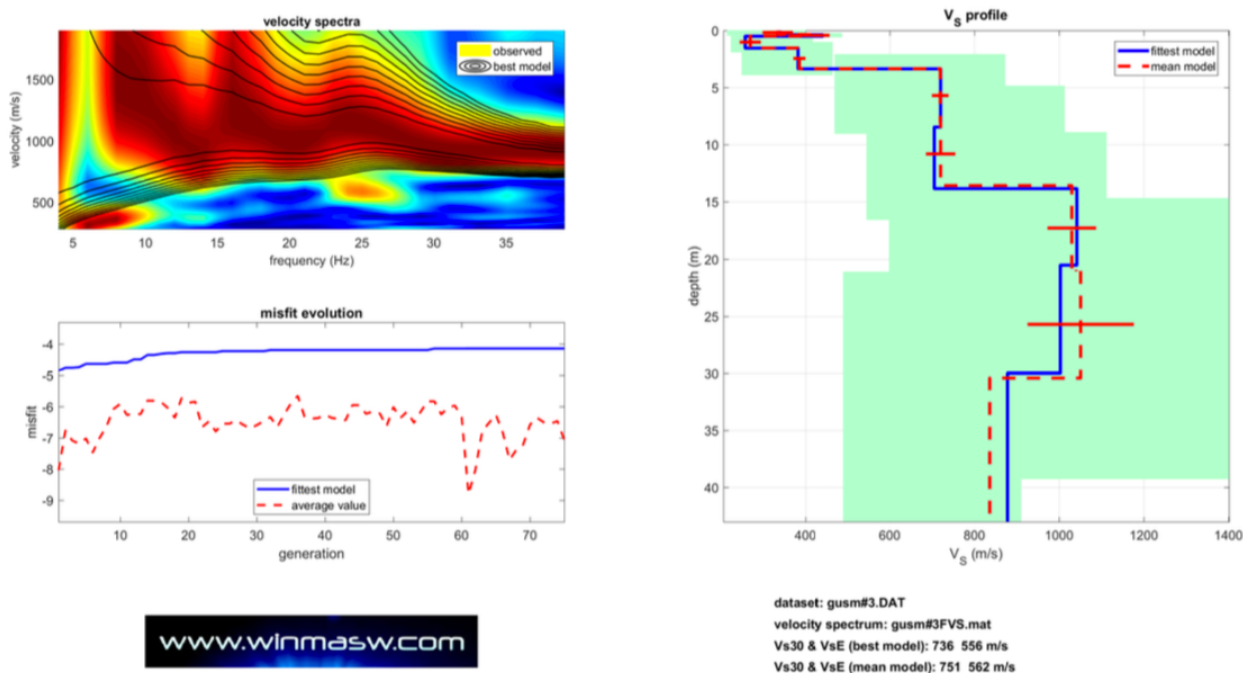


Figura 7 – Esempio di risultato dell'inversione FSV. A sinistra, spettro di velocità di gruppo con sovrapposto il modello sintetico

Il modello mette in evidenza un trend crescente con la profondità della velocità delle onde S, con un primo livello di circa 1 m caratterizzato da Vs inferiori a 400 m/sec, identificabile con lo strato superficiale alterato e successivamente il

passaggio alle arenarie del Macigno con Vs crescente per aumento del grado di compattezza. Va tenuto presente che per i limiti di acquisizione, l'attendibilità del profilo è limitata ai primi 15-20 m. D'altra parte, la geologia dell'area è ben nota e compatibile con quanto risulta dall'indagine.

Si riportano di seguito: il modello migliore e medio del sottosuolo ottenuti dall'inversione, il calcolo delle velocità sismiche, le densità modellate e la stima del modulo di taglio e del coefficiente di Poisson.

Best model

Vs (m/s): 339, 441, 258, 383, 720, 705, 1042, 1003, 878, 921, 1746, 2693

Thickness (m): 0.4, 0.1, 1.0, 1.8, 5.1, 5.4, 6.7, 9.5, 46.4, 92.8, 199.9

Vs30 and VsE (m/s): 736 556

Mean model

Vs (m/s): 335, 414, 270, 386, 719, 720, 1030, 1051, 836, 1217, 1671, 2537

Vs standard deviations (m/s): 36, 44, 25, 14, 20, 35, 57, 126, 86, 228, 194, 326

Thickness (m): 0.4, 0.1, 1.0, 1.8, 4.7, 5.5, 7.4, 9.4, 44.3, 90.4, 182.7

Vs30 and VsE (m/s): 751 562

6. Definizione della Categoria di suolo

In base alla normativa vigente, la classificazione del suolo si basa sulla velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30m di profondità, ottenibile come:

$$V_{sEq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i}}$$

dove V_i e h_i sono la velocità delle onde di taglio verticali e lo spessore dello strato i-esimo; H è la profondità del substrato ($V_s > 800$ m/s).

Per il caso in esame, utilizzando i valori del modello di velocità relativo alle onde di Rayleigh Sv (modello più conservativa ottenuto), considerato fino alla profondità di 30 metri **a partire dal piano di posa delle fondazioni** (assunto nel caso in esame a quota -1 m dal p.c), considerando sia il modello migliore che quello medio, risulta:

$$V_{s30} (m/s) = 736/751$$

il che, considerando la profondità del *bedrock* sismico, porta alla classificazione del terreno come:

SUOLO DI TIPO B: "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."

Serre di Rapolano, aprile 2019

Il Tecnico
Geologo Alessandro Lorenzini

