

Analisi del segnale HVSR in zone di contatto tra carbonati e depositi argilloso-arenacei: l'esempio di Monte Pellegrino, Palermo

Tesista: Giulia Di Frisco

Relatori: Prof. Pietro Di Stefano & Prof. Raffaele Martorana

Durante un terremoto, a causa di particolari condizioni lito-stratigrafiche e morfologiche, possono verificarsi fenomeni che amplificano localmente l'intensità del moto sismico. Queste condizioni sono note come effetti di sito (*fig.1*).

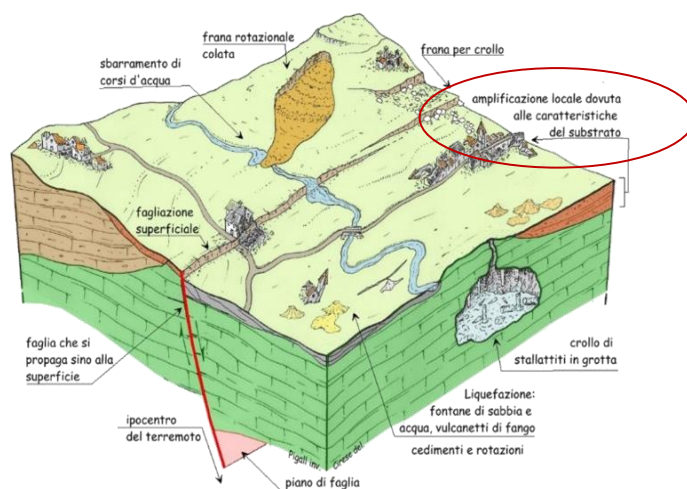


Fig. 1 - Possibili effetti di sito.

Tra questi fenomeni, si è scelto di analizzare l'amplificazione sismica legata alle caratteristiche del substrato, dato che particolari configurazioni del sottosuolo possono contribuire all'intensificarsi dei danni dovuti ad un terremoto.

In quest'ambito, l'obiettivo dello studio è stato quello di verificare la congruenza tra i dati geofisici ed il modello geologico del sottosuolo.

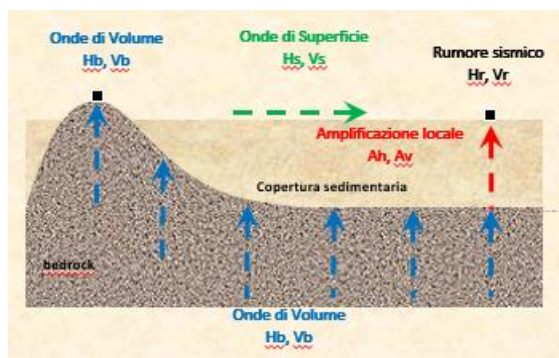


Fig. 2 – Schema di riferimento del metodo Nakamura.

Le indagini geofisiche sono state realizzate con l'utilizzo della tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) o tecnica di Nakamura (*fig.2*), la quale effettua un'analisi delle tre componenti del moto del suolo (una componente verticale e due componenti orizzontali), in termini di rapporti spettrali. Nello specifico, il metodo calcola la *funzione di trasferimento del mezzo*, ovvero le

modalità con cui il moto sismico viene alterato nel suo passaggio da una roccia rigida profonda ad una copertura sedimentaria superficiale. Tale funzione viene calcolata attraverso la formula del

Quasi Transfer Spectrum (QTS); si tratta di un'equazione in grado di approssimare lo spettro della funzione di trasferimento generata dalla copertura sedimentaria.

$$QTS = \frac{H_r}{V_r} = \frac{A_h \cdot H_b + H_s}{A_v \cdot V_b + V_s}$$

nella quale:

- A_h e A_v rappresentano i fattori di amplificazione del moto orizzontale e verticale delle onde di volume;
- H_b e V_b sono gli spettri orizzontale e verticale del moto nel bedrock;
- H_s e V_s sono gli spettri del moto orizzontale e verticale delle onde di superficie.

Come sorgente di energizzazione del terreno, il metodo HVSR utilizza i microtremori, ovvero delle piccole oscillazioni onnipresenti nel sottosuolo, generate da sorgenti naturali (onde che impattano sulla costa, condizioni meteorologiche, tremore vulcanico, ecc.) o da sorgenti antropiche (traffico veicolare, industrie, ecc.).

Per scopi di natura stratigrafica, la tecnica HVSR consente di effettuare delle ricostruzioni del sottosuolo e di definire la risposta sismica di una zona analizzata, indagando la frequenza di risonanza f_0 dei mezzi attraversati dalle onde sismiche.

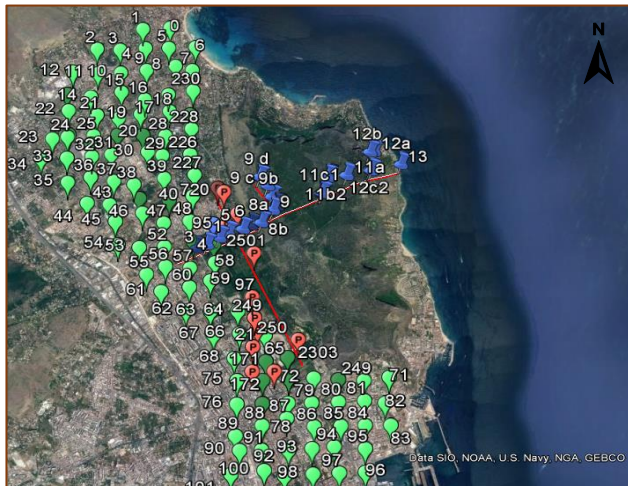


Fig. 3 – Ubicazione dell'area e delle misure HVSR.

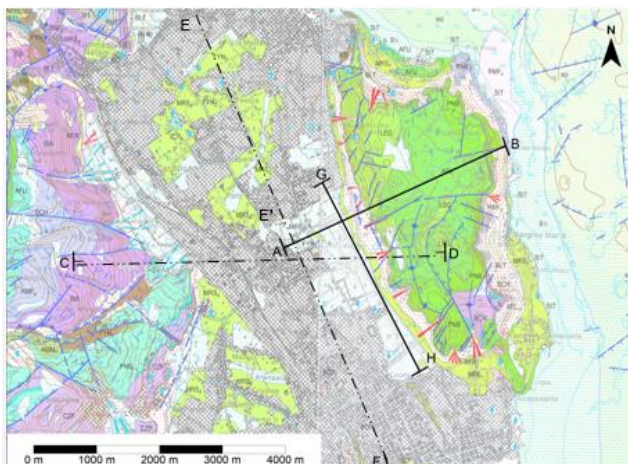


Fig. 4 – Stralcio della carta geologica CARG, foglio n°595 "Palermo", con ubicazione delle tracce realizzate (A-B; G-H) e delle sezioni di Cusimano & Di Cara, 1995 (E-E'-F; C-D).

L'area scelta per le indagini comprende Monte Pellegrino e la piana di Palermo, nel suo settore centro-settentrionale (fig.3).

Dal punto di vista geologico, Monte Pellegrino è costituito dai terreni appartenenti alla Piattaforma Carbonatica Panormide.

Si tratta, per lo più, di calcari e calcareniti bioclastiche depositatisi in un periodo compreso tra il Triassico (Fm. Capo Rama) e l'Eocene (Fm. Valdesi).

Nella piana affiorano, invece, le argille e le quarzareniti del Flysch Numidico e le calcareniti bioclastiche del Pleistocene.

In questa zona sono stati realizzati i profili geologici e geofisici A-B e G-H, i cui risultati sono stati confrontati con le sezioni geologiche E-F e C-D di Cusimano & Di Cara, 1995 (fig.4).

Lungo le tracce A-B e G-H sono state acquisite n°32 misure di microtremore. A queste, sono state aggiunte n°124 misure effettuate dal Comune di Palermo nella piana metropolitana. L'elaborazione di questi dati ha previsto un'analisi del segnale HVSR nel dominio del tempo e nel dominio della frequenza (*fig.5*).

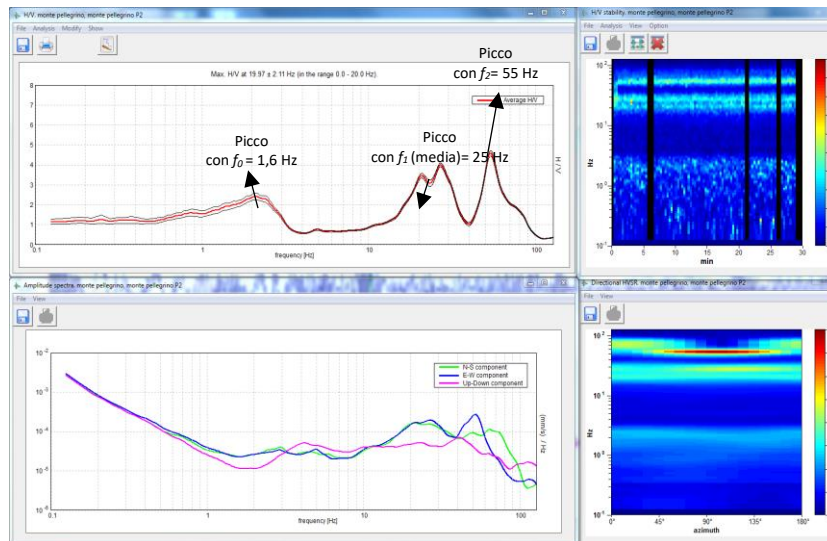


Fig. 5 – Analisi del segnale HVSR. In alto a sinistra: grafico H/V (curva HVSR); in alto a destra: grafico H/V stability; in basso a sinistra: grafico Amplitude Spectra; in basso a destra: grafico Directional HVSR.

L'analisi integrata dei grafici *H/V* ed *Amplitude Spectra*, permette di ricavare la frequenza di risonanza del limite di contatto tra due strati litologici con comportamento meccanico differente. In particolare, il grafico *H/V* è un grafico frequenza - ampiezza con il quale è possibile visualizzare eventuali picchi identificativi di fenomeni di risonanza. Questo grafico consente, inoltre, di stimare la profondità del limite litologico che genera il fenomeno. Infatti, la risonanza dovuta a fenomeni superficiali si trova, nel grafico, alle frequenze più alte; i fenomeni dovuti a fenomeni profondi sono, invece, identificati da picchi alle basse frequenze. In altri termini, le basse frequenze indicano una maggiore profondità dell'interfaccia litologica che ha generato il picco di risonanza. Il grafico *H/V stability* permette, invece, di visualizzare il segnale in finestre temporali. Con l'utilizzo di questo grafico è possibile eliminare eventuali transienti costituiti da rumori transitori. Infine, il grafico *Directional HVSR* consente di indagare l'eventuale direzione azimutale assunta dai picchi HVSR rispetto al Nord.

Dalla fase di elaborazione, è emerso che la gran parte delle misure HVSR analizzate riporta dei picchi stratigrafici, dovuti alla presenza di strati litologici con differente comportamento meccanico (*fig.6*).

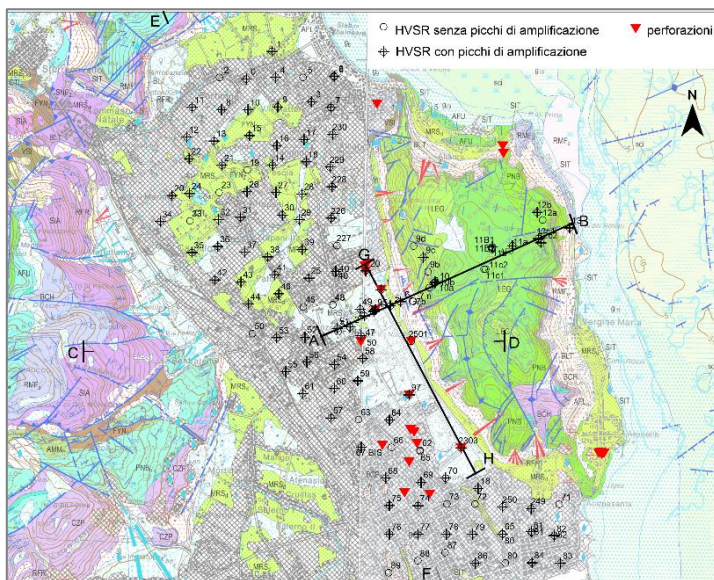


Fig. 6 – Risultati dell'elaborazione dei dati HVSR.

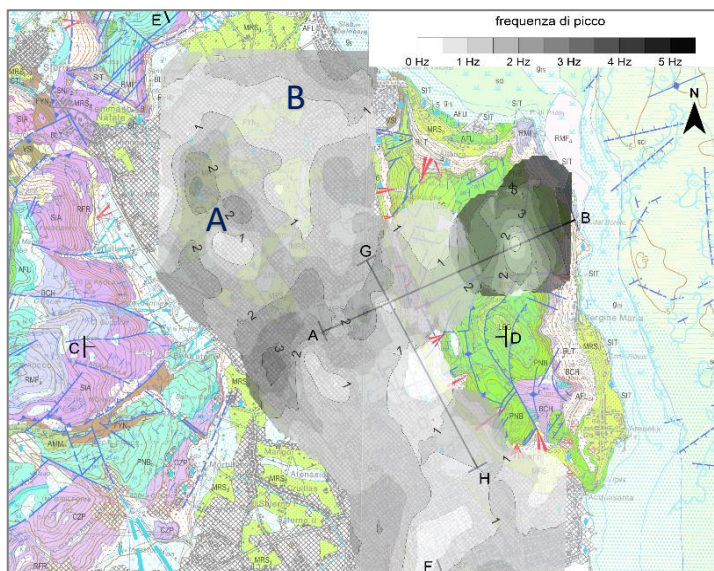


Fig. 7 – Mappa delle frequenze di picco.

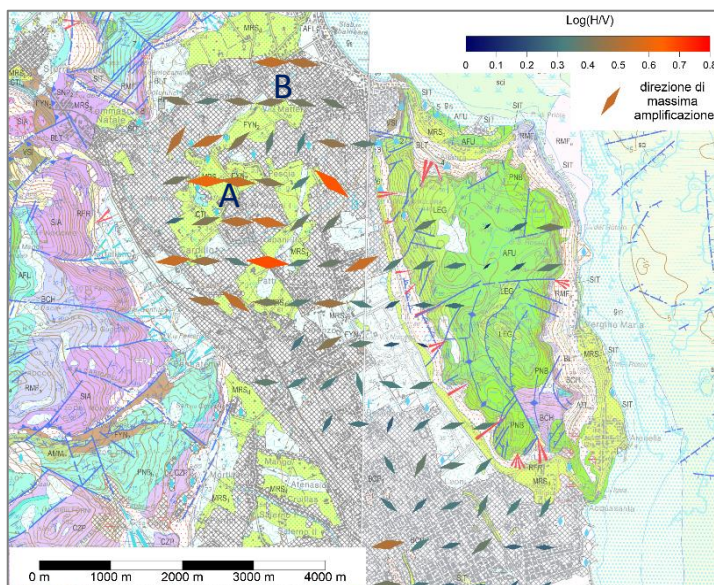


Fig. 8 – Carta delle amplificazioni di sito.

In particolare, dallo studio delle frequenze della curva HVSR, è stata realizzata una *Mappa delle frequenze di picco* (fig.7) con valori compresi tra 0 e 5,5 Hz.

Le frequenze maggiori sono state riscontrate nei dintorni di via Lanza di Scalea, di Viale Strasburgo e sulla sommità di Monte Pellegrino, in particolare in prossimità del suo versante Est.

Lo studio delle ampiezze dei picchi HVSR ha, invece, permesso di realizzare una *Carta delle amplificazioni di sito* (fig.8) che evidenzia i fenomeni amplificativi e la direzionalità associati ai picchi stratigrafici.

Le ampiezze più elevate sono ubicate nella parte settentrionale della piana, negli stessi settori in cui la Mappa delle frequenze rileva frequenze di picco più alte.

In particolare, confrontando le due carte emerge che nell'area "A" le frequenze sono più elevate (2 Hz), per cui il fenomeno di risonanza, generato dal limite di contatto tra due litologie, risulta più superficiale rispetto alla zona "B" nella quale, invece, le frequenze sono più basse (1 Hz) indicando, in questo modo, un limite di contatto più profondo.

Nelle aree a frequenza ed ampiezza maggiori, la sezione geologica E-F di Cusimano & Di Cara (fig.9), riporta un contatto poco profondo tra il complesso calcarenitico-sabbioso ed il sottostante complesso carbonatico. Quest'ultimo, avendo un comportamento meccanico più rigido rispetto alle calcareniti, genera un forte contrasto di impedenza sismica rilevato in termini di elevate ampiezze e frequenze di picco.

Nelle zone limitrofe, l'assetto geologico mostra, invece, un contatto litologico tra il complesso calcarenitico-sabbioso ed il complesso argilloso-sabbioso. Questi terreni, avendo granulometria e comportamento meccanico simili, non generano un marcato contrasto di impedenza e, di conseguenza, non danno origine ad un picco ben definito.

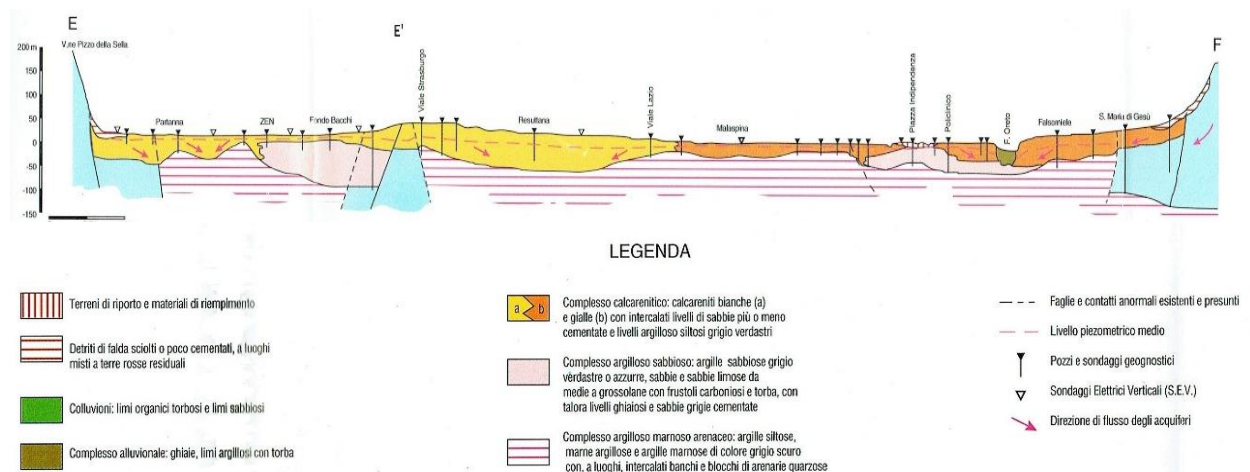


Fig. 9 – Sezione geologica di Cusimano & Di Cara, ubicata in fig. 4.

La Carta delle amplificazioni riporta, inoltre, un evidente fenomeno di direzionalità mostrato dall'orientazione dei simboli grafici in senso Est-Ovest, nella zona centro-settentrionale della piana. Il fenomeno è generato dalla forza "polarizzante" esercitata dai rilievi di Monte Billiemi e di Monte Pellegrino entro cui è circoscritta la piana.

Lungo il profilo A-B, ubicato in fig.4, è stata realizzata una sezione geologica che percorre un tratto di pianura attraversando, poi, Monte Pellegrino in senso trasversale (fig.10).

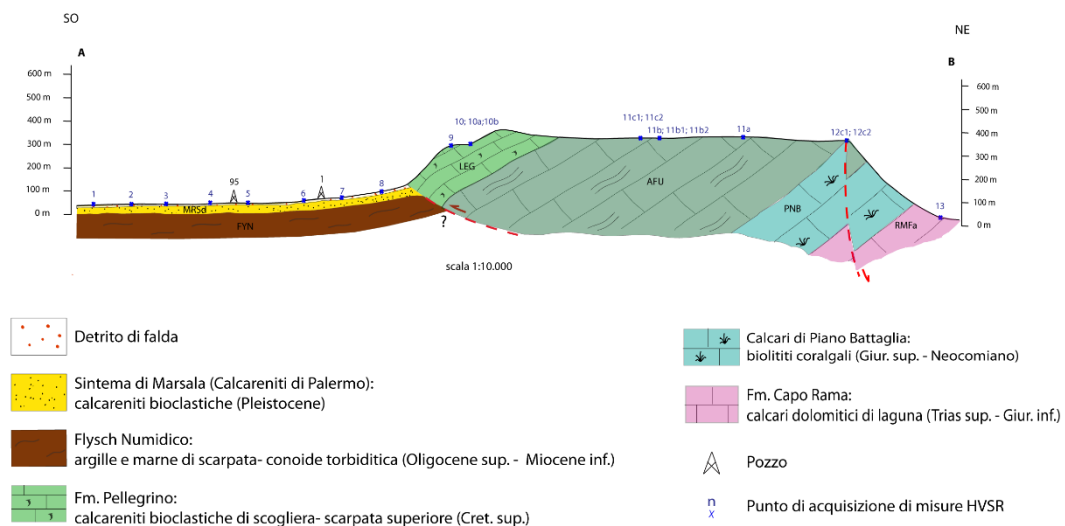


Fig. 10 - Sezione geologica A-B di Monte Pellegrino e dell'antistante pianura.

I terreni più antichi intercettati sono costituiti dai calcari dolomitici del Triassico (Fm Capo Rama, RMF), presenti sul versante Est del rilievo. A questi, si trovano sovrapposte le biolititi del Giurassico superiore (Calcari di Piano Battaglia, PNB). Seguono i calcari stromatolitici del Cretaceo inferiore (Calcari di Capo Gallo, AFU) e le calcareniti a radiolariti del Cretaceo superiore (Formazione Pellegrino, LEG) le quali costituiscono la parete che incombe sulla Favorita. Su questo settore occidentale della sezione, si trova un contatto per sovrascorrimento tra i terreni carbonatici del Monte ed i depositi del Flysch Numidico, a loro volta coperti dalle calcareniti pleistoceniche.

Le misure di microtremore effettuate sul Monte non evidenziano picchi significativi perché non ci sono contrasti litologici netti nelle prime centinaia di metri di spessore (massima profondità di indagine raggiunta dalle indagini HVSr). Viene, così, confermato che Monte Pellegrino è costituito da roccia compatta che non crea effetti di amplificazione di sito.

Nella piana metropolitana, invece, lo spessore del Flysch Numidico è stato ricavato dalle informazioni stratigrafiche di pozzo. Tramite il modello geofisico è stata anche ricavata la velocità media di questo strato litologico e del soprastante strato calcarenitico, come esposto qui di seguito. Lungo la traccia G-H, ubicata in fig.4, si è scelto di evidenziare i dati del sottosuolo riportando, in un profilo topografico, le stratigrafie dei pozzi (fig.11).

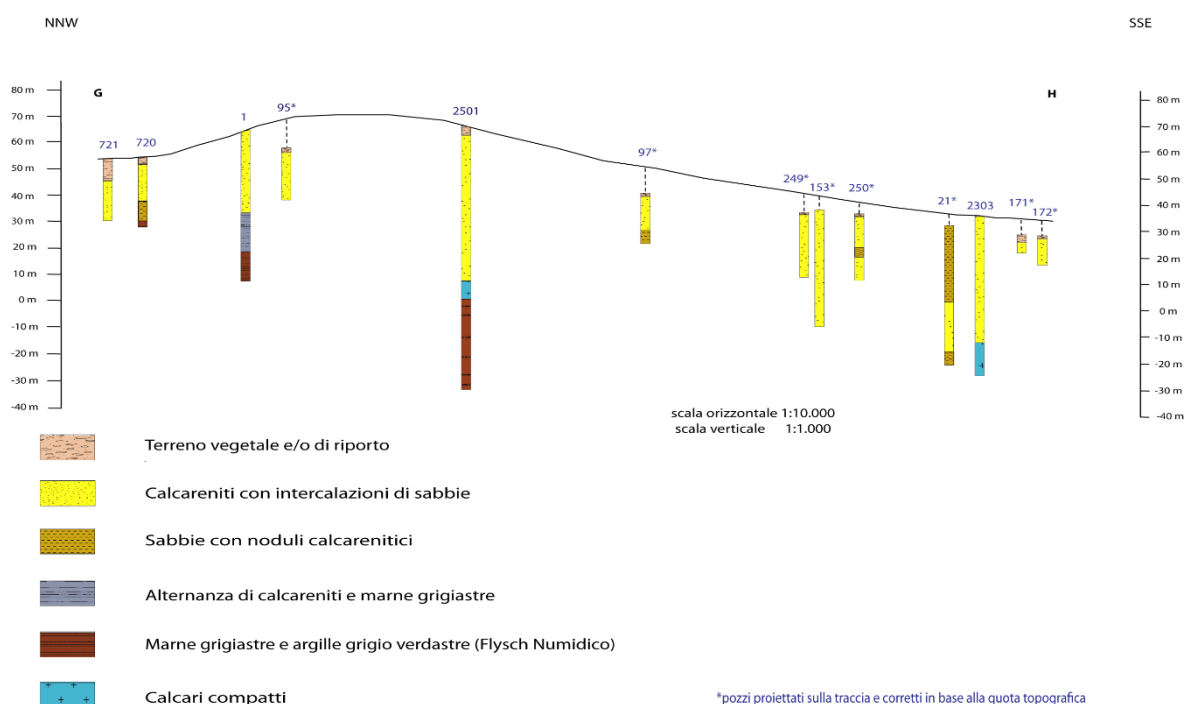


Fig. 11 - Profilo stratigrafico ricavato dalle informazioni stratigrafiche di pozzo.

Tali stratigrafie sono costituite prevalentemente da calcareniti e sabbie alternate o con passaggi graduali. Tre di questi pozzi hanno profondità tali da intercettare anche il Flysch Numidico, permettendo di ipotizzare l'andamento, in profondità, del contatto tra questa unità e la copertura calcarenitico-sabbiosa.

Il sondaggio n°2303 rileva, invece, al di sotto delle calcareniti, uno strato di calcari compatti. Lungo la stessa traccia è stato realizzato un modello geofisico 2D tramite l'inversione di velocità di alcune misure HVSR, ubicate vicino ai pozzi geognostici (*fig.12*).

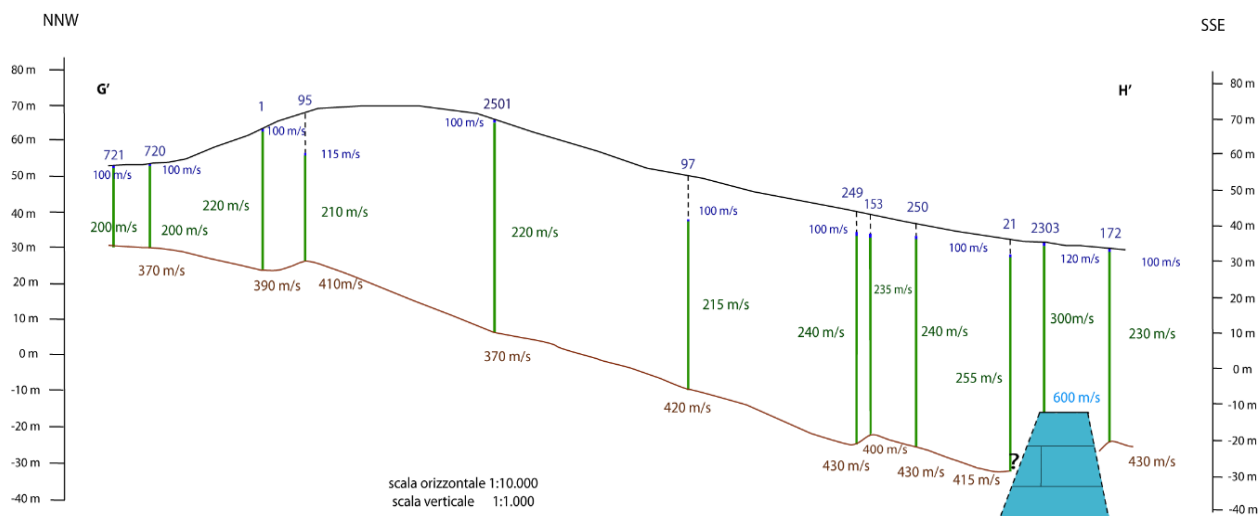


Fig. 12 - Sezione geofisica 2D ottenuta dall'interpolazione dei modelli inversi HVSR, lungo la traccia di figura 4.

Il modello ha permesso di attribuire un valore di velocità delle onde S (V_s) ad ogni strato litologico intercettato. In particolare, al sottile strato di terreno vegetale e/o di riporto, è stato attribuito un valore di 100 m/s; al complesso calcarenitico-sabbioso è stato dato un valore medio di 230 m/s ed infine, all'interfaccia "calcarenite-Flysch" è stato assegnato un valore di circa 400 m/s.

Il punto 2303 costituisce, invece, un'eccezione. Le velocità qui riscontrate sono di 300 m/s per lo strato calcarenitico e di 600 m/s per lo strato calcareo; risultano, quindi, più elevate rispetto alla media, a causa della presenza dello strato calcareo evidenziato dall'omonimo pozzo stratigrafico di *fig.11*.

Dal confronto tra i dati del profilo litologico e del modello geofisico (*fig.11* e *fig.12*) risulta che laddove i carotaggi fornivano informazioni stratigrafiche poco significative, a causa della ridotta profondità raggiunta, il modello geofisico ha fornito elementi integrativi nuovi ricavando la profondità delle interfacce tra gli strati litologici. Questa procedura è stata supportata dalle informazioni stratigrafiche dei pozzi con profondità di fondo foro maggiore, usati come vincolo nell'interpretazione dei dati geofisici.

Come prodotto finale di sintesi tra i dati geofisici e geologici, è stato realizzato il *profilo di caratterizzazione geofisica delle litologie* (*fig.13*) che evidenzia un aumento delle velocità V_s sia come variazione laterale che con l'aumentare della profondità:

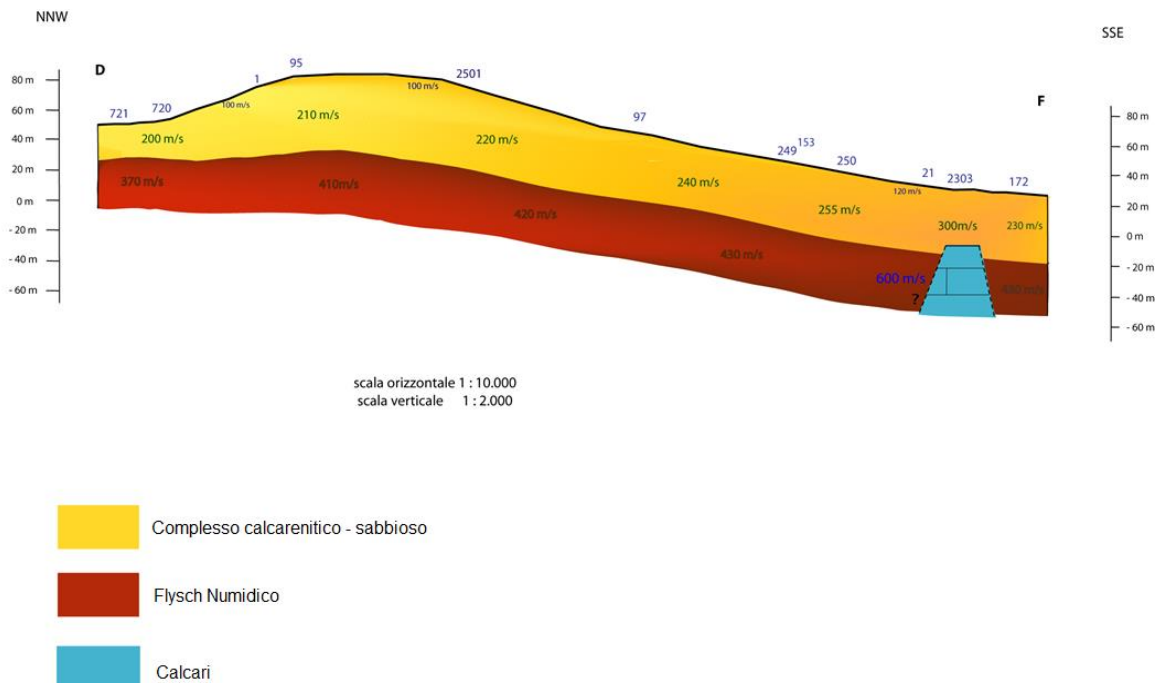


Fig. 13 - Sezione litologica con interpretazione geofisica.

Dai dati discussi, è possibile affermare che il modello geofisico ed il modello geologico delle varie sezioni analizzate risultano in buona correlazione.

In particolare, su Monte Pellegrino non sono stati rilevati fenomeni amplificativi, trattandosi di una roccia compatta; nel settore settentrionale della piana di Palermo sono stati, invece, individuati dei settori critici che possono essere soggetti a fenomeni di amplificazione di sito durante un evento sismico.

La tecnica HVSR ha, inoltre, permesso di attribuire un valore di velocità medio (V_s) agli strati litologici del sottosuolo ed ha fornito elementi integrativi nuovi (rispetto alle stratigrafie in possesso) indagando la profondità del Flysch Numidico e, di conseguenza, lo spessore del soprastante complesso calcarenitico-sabbioso.

Lo strumento si è, quindi, dimostrato valido per scopi di natura stratigrafica finalizzati a studi sulla frequenza di risonanza di un'area e ad indagini volte alla ricostruzione di un profilo del sottosuolo, disponendo di informazioni stratigrafiche che fungano da vincolo nell'interpretazione dei dati.

Il metodo HVSR, dunque, fornisce delle informazioni utili nell'individuare situazioni critiche nel territorio. Va, tuttavia, sottolineato che la distribuzione areale delle misure HVSR e la conseguente interpolazione dei valori di amplificazione di sito determinati, consentono di ottenere delle stime indicative e non di dettaglio, volte ad evidenziare i settori nei quali si renderà necessario procedere con indagini più specifiche, come previsto dalle vigenti norme di microzonazione sismica.