

INNOCENTI DR. GIULIANO

VIA F. BRUNELLESCHI, 5 – 50065 PONTASSIEVE (FI)

TEL. (055) 8323113

COD. FISC. NNC GLN 54T21 H222J

PART. IVA 03690830488

COMUNE DI: PELAGO

LOCALITÀ: “**DIACCETO – VIA DELLA CHIESA**”

PROPRIETÀ: GIANLUCA GAIETTI

**VARIANTE N. 6 AL REGOLAMENTO URBANISTICO PER L'INSERIMENTO
DI UN'AREA DI INTEGRAZIONE RESIDENZIALE B2
NEL CENTRO ABITATO DI DIACCETO**

INDAGINI GEOFISICHE

IL GEOLOGO
GIULIANO DOTT. INNOCENTI
O.G.T° 564





**GEOGNOSTICA
FIORENTINA SRL**

Geognostica Fiorentina srl

Via di Porto, 11-13 • 50018 • Scandicci (FI)

C.F./P.IVA • 05256260489

Tel. e Fax • 055 720195

E-mail • info@geognosticafiorentina.com

COMUNE DI PELAGO
Provincia di Firenze



Oggetto:

Indagine geofisica di superficie mediante
sismica a rifrazione e tomografia sismica
con onde P/SH, metodologia MASW e HVSR

RELAZIONE TECNICA



Località:

Diacceto – Pelago (FI)



Committente:

Ing. Gabriele Bacciotti

1. Introduzione

Su incarico della committenza e del dott. Geol. Giuliano Innocenti sono state eseguite n° 2 prospezioni di sismica, una a rifrazione con onde P ed SH, l'altra con analisi MASW, e n.1 analisi dei microtremori (HVSR), in data 12 aprile 2017, nel Comune di Pelago (FI), in località Diacceto, nell'ambito del progetto per la realizzazione di edifici residenziali.

Dopo aver preso visione della zona, delle problematiche ad essa connesse e degli spazi a disposizione, è stata programmata una campagna di prospezioni geofisiche con lo scopo di fornire, una caratterizzazione delle litologie presenti nell'area d'indagine nonché determinare le geometrie dei terreni (spessori e superfici di contatto) nel sottosuolo in funzione dell'andamento in profondità delle velocità delle onde sismiche. I dati ottenuti sono stati elaborati con metodologia tomografica che permette di ottenere un'ottima caratterizzazione del substrato e dei materiali di copertura.

E' stato infine eseguito il calcolo delle velocità delle onde di taglio al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità delle onde di taglio, così come previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni 2018. La classificazione dei terreni è ottenuta sulla base del valore della $V_{s,eq}$ (velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio), definita dalla relazione:

$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$	<p>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, caratterizzato da Vs non inferiore a 800 m/s.</p>
---	--

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.

2. Metodologie d'indagine

Sismica a rifrazione:

La sismica a rifrazione considera i tempi di propagazione di onde elastiche che, generate al suolo, si rifrangono su superfici di discontinuità. La velocità con cui la deformazione prodotta artificialmente si propaga nei terreni è quindi funzione delle caratteristiche elastiche dei terreni stessi. Non sempre però un orizzonte individuato con metodologie sismiche coincide con un

orizzonte litologico in quanto la velocità di propagazione può variare nell'ambito di uno stesso litotipo perché, variazioni di compattazione, fratturazione, porosità ecc., cambiano le caratteristiche elastiche. Dalla misura dei tempi di percorrenza dalla sorgente ai ricevitori, è possibile dedurre la velocità e gli spessori degli orizzonti in cui si propagano le onde elastiche generate e quindi ottenere informazioni sulla natura e sulla struttura del sottosuolo.

La condizione fondamentale nella rifrazione è che la velocità delle onde sia crescente con la profondità. I raggi che incontrano la superficie di separazione tra i due mezzi verranno riflessi e rifratti. Nel punto in cui l'angolo di incidenza con la normale alla superficie di separazione è pari all'angolo critico, il raggio verrà rifratto a 90° secondo la legge di Snell e viaggerà lungo la superficie di separazione tra i due mezzi alla velocità del mezzo più veloce (quello a maggior profondità tra i due). Per il principio di Huygens il fronte d'onda rifratto genera a sua volta onde che risalgono verso la superficie con lo stesso angolo di incidenza e possono essere intercettati dai ricevitori.

Una volta acquisiti i dati, l'interpretazione dei segnali e la conseguente stima del profilo di velocità delle onde, avviene attraverso una serie di fasi tra cui:

- mediante l'osservazione di sismogrammi, l'individuazione dei primi arrivi ed il relativo *picking*;
- ricostruzione delle dromocrone cioè di un diagramma che ha in ascisse le distanze dei geofoni e in ordinate i tempi dei primi arrivi; calcolo delle velocità delle onde elastiche analizzate e relativi tempi di intercetta;
- ricostruzione del modello del sottosuolo con stima della profondità di ciascuno strato omogeneo, continuo e isotropo.

Il metodo della tomografia sismica è una tecnica di indagine che permette l'individuazione di anomalie nella velocità di propagazione delle onde sismiche con un alto potere risolutivo, offrendo la possibilità di ricostruire anomalie e discontinuità stratigrafiche anche particolarmente complesse.

Questa tecnica fornisce l'immagine della distribuzione delle onde sismiche sotto la superficie, basate sui tempi di primo arrivo (come nella normale sismica a rifrazione) e sulla geometria di acquisizione. Si ricostruisce in tal modo un modello di velocità, migliorabile attraverso successive iterazioni fino alla migliore sovrapposizione fra i tempi di primo arrivo calcolati e quelli misurati.

Per l'analisi interpretativa sono stati utilizzati i software Easy Refract (Geostru), metodo GRM; e Rayfract 3.2. tomografia sismica.

MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di prospezione sismica che, attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh e/o Love), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro Vs30 (velocità media delle onde S nei primi 30m).

In un mezzo stratificato le onde di superficie (Rayleigh e Love) danno vita al fenomeno della dispersione, cioè lunghezze d'onda diverse si propagano con diverse velocità di fase e gruppo: le componenti ad alta frequenza (con piccola lunghezza d'onda) "sentono" solamente gli strati più superficiali del suolo, mentre le componenti a più bassa frequenza "sentono" anche gli strati più profondi consentendo quindi di determinarne le caratteristiche.

Il metodo si sviluppa attraverso la determinazione delle proprietà dispersive del mezzo individuabili dall'analisi dello spettro di velocità dei dati. Il range di frequenza si sviluppa comunemente tra i 5Hz e i 70Hz, fornendo informazioni sino a profondità di circa 30m a seconda della rigidità del suolo: la profondità massima di penetrazione è determinata dalla relazione fra velocità di propagazione dell'onda e più bassa frequenza identificabile.

Questa tipologia di prospezione si realizza con uno stendimento sismico costituito da 12/24 o più geofoni allineati a distanza intergeofonica variabile tipicamente fra 1 e 5 m (la lunghezza dello stendimento incide sulla focalizzazione del segnale nello spettro di velocità) che registrano le onde sismiche generate in corrispondenza di X punti di energizzazione effettuati tipicamente ad una distanza compresa fra 2 e 20 m dal primo geofono.

L'obiettivo della registrazione è quindi l'individuazione del treno di onde superficiali (Rayleigh e/o Love), che a causa della stratificazione del mezzo subisce una dispersione le cui modalità sono direttamente correlate alla velocità delle onde di taglio S.

L'acquisizione delle onde di Rayleigh è fatta mediante geofoni verticali ed energizzazione piastra-martello; per le onde di Love con geofoni orizzontali ed energizzazione martello-trave di legno, ortogonale allo stendimento.

HVSR:

Il metodo **HVSR (Horizontal Vertical Spectral Ratio)**, è una tecnica di sismica “passiva” che si basa sulla misura delle vibrazioni del terreno indotte da sorgenti non controllate, attraverso un apparato di registrazione dotato di 3 velocimetri disposti nelle tre direzioni dello spazio, e sull’analisi del rapporto spettrale tra le componenti orizzontali (H) e verticali (V) di quello che viene definito “rumore sismico”, “vibrazione ambientale” o “microtremore”, costituito da piccole vibrazioni del terreno dell’ordine di 10^{-4} - 10^{-2} cm. Gli spettri verticali e orizzontali variano in funzione dell’anisotropia del mezzo attraversato e dei gradienti di impedenza presenti nel sottosuolo:

$$\text{Rapporto di impedenza sismica } I = \rho r V_r / \rho s V_s$$

Dove ρr è la densità del substrato e ρs del terreno soprastante; V_r la velocità delle onde di taglio del substrato e V_s del terreno.

Gli effetti stratigrafici di amplificazione sismica sono influenzati dal rapporto d’impedenza, e le frequenze corrispondenti ai massimi della funzione di amplificazione si chiamano frequenze (periodi) naturali di vibrazioni del deposito. Il periodo proprio di sito è indicato dalla seguente formula:

$$T_0 = 4H/V_s$$

Dove: V_s è la velocità delle onde di taglio fino al bedrock (inteso come un orizzonte con forte contrasto di V_s che dà origine ad un picco dell’H/V); H lo spessore dei sedimenti sovrastanti il bedrock. Di fondamentale importanza risulta la conoscenza della frequenza di sito per il fenomeno della “doppia risonanza”, cioè la corrispondenza tra la frequenza fondamentale del segnale sismico trasmesso in superficie e la frequenza delle strutture in progetto o dei manufatti già esistenti.

3. Schema operativo

Nelle Tavole allegate è riportato un inquadramento dell’area con inserite le tracce delle sezioni sismiche eseguite e la stazione di misura HVSR.

Dopo una prima analisi dell’area con il tecnico incaricato, stabilite le finalità delle indagini da eseguire, ed in considerazione degli spazi a disposizione, sono state adottate per ciascuna prospezione le seguenti configurazioni ed eseguite le seguenti analisi schematizzate di seguito:

	Lungh. profilo (m) (distanza G1-G24)	Tomografia sismica	MASW	HVSR
Profilo sismico 1	34.5	Onde P/SH		N°3 stazione
Profilo sismico 2	33		Onde di Rayleigh/Love	

- Per quanto riguarda la rifrazione sono stati eseguiti n°7 scoppi. Eseguita l'acquisizione dei dati, l'interpretazione avviene mediante l'osservazione di sismogrammi, l'individuazione dei primi arrivi ed il relativo *picking*, la ricostruzione delle dromocrone; calcolo delle velocità delle onde elastiche e la ricostruzione del modello del sottosuolo con stima della profondità di ciascuno strato omogeneo.
- L'acquisizione MASW è avvenuta con la stessa configurazione spaziale e gli stessi geofoni, utilizzando però differenti tempi di acquisizione, frequenza di campionamento e periodo di campionamento. L'analisi dei dati acquisiti dalla metodologia avviene attraverso le seguenti fasi: 1. Calcolo dello spettro di velocità; 2. Individuazione del *modo fondamentale* e degli eventuali superiori; 3. Calcolo della curva di dispersione mediante modellazione diretta, cioè attribuzione degli spessori e delle velocità relative, sulla base di dati riguardanti il sito acquisiti precedentemente tramite indagini dirette o bibliografia. 4. Inversione della curva di dispersione e conseguente individuazione del profilo di velocità Vs mediante analisi congiunta con l'analisi HVSR_1.
- Per le analisi HVSR è stata eseguita una registrazione di 15 minuti ciascuna con frequenza di campionamento di 300 Hz (ricampionata in fase di elaborazione a 64 Hz). Per l'interpretazione, individuati eventuali transienti (eventi con eccessiva ampiezza) da rimuovere, viene creato lo spettro di frequenza delle tre componenti (le due orizzontali e quella verticale) ed il rapporto spettrale H/V, dividendo la serie temporale in n finestre da 20 secondi, in parziale sovrapposizione.

4. Strumentazione impiegata

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il

modello è denominato DOREMI (della SARA Electronic Instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 16 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile, con frequenza caratteristica di 4.5 Hz per onde P ed SH.

Come sorgente di energia sismica per le onde di corpo P e per le onde di superficie (*Rayleigh*) si è fatto uso di una mazza con maglio da 8 kg battente su una piastra di alluminio posta sul suolo in linea con lo stendimento (*array*). Per le onde SH e di superficie (*Love*) come sistema di energizzazione si è fatto uso di una mazza con maglio da 8 kg battente orizzontalmente su una trave in legno sovraccaricata, posta ortogonalmente all'*array* e parallelamente alla direzione di oscillazione dei geofoni.

L'inizio della registrazione è stato dato tramite un *trigger* che consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui la massa battente colpisce la piastra (nel nostro caso si è fatto uso di un geofono starter) e l'impulso generato, inviato al sistema di acquisizione, consente di fissare il tempo zero di riferimento per il calcolo dei tempi di percorso delle onde generate.

L'acquisizione HVSR è stata effettuata tramite sismografo triassiale SR04C3 - SARA electronic instruments, con geofoni da 4.5 Hz dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente, collegato ad un Notebook ASUS TP200SA. I dati sono stati acquisiti mediante software SEISMOLOG-MT della SARA electronic instrument.

5. Presentazione elaborati grafici

Tavola 1a: ubicazioni in pianta di ciascun profilo sismico, della stazione di misura HVSR, e la documentazione fotografica relativa.

Tavola 1b: documentazione fotografica.

Tavole 2a: Sismogrammi onde P - Linea 1

Tavole 2b: Sismogrammi onde SH - Linea 1

Tavola 3: curve tempi-distanze, dromocrone, che scaturiscono dalle letture eseguite sui dati di campagna (Linea 1). In ascisse sono riportate le distanze dei sensori dall'inizio dell'allineamento, in ordinate i tempi di arrivo espressi in millisecondi agli stessi sensori.

Tavole 4-5: sezioni tomografiche realizzata mediante la "WET Tomography" con le relative curve di isovelocità. Al di sotto di questa sezione bidimensionale (quote/lunghezza dello stendimento) viene riporta una scala in falsi colori che esprime i valori di velocità all'interno della sezione in un

range di velocità delle onde P compreso tra 200-2.400 m/s e delle onde SH compreso tra 100-1.000 m/s. (Linea 1)

Tavola 6-7-8: dati acquisiti con la stazione HVSR, spettri d'ampiezza delle tre componenti e rapporto spettrale H/V.

Tavola 9: sismogrammi con gli spettri di velocità calcolati (Linea 2).

Tavola 10: risultati delle inversioni delle curve di dispersione.

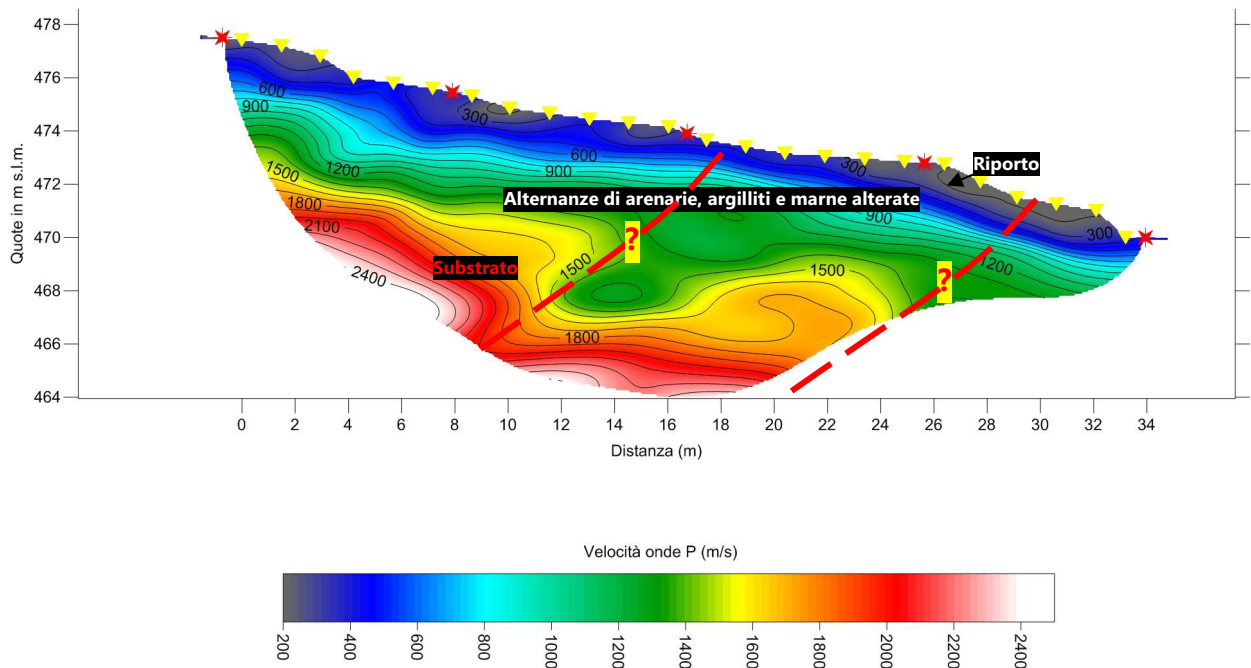
6. Analisi dei risultati

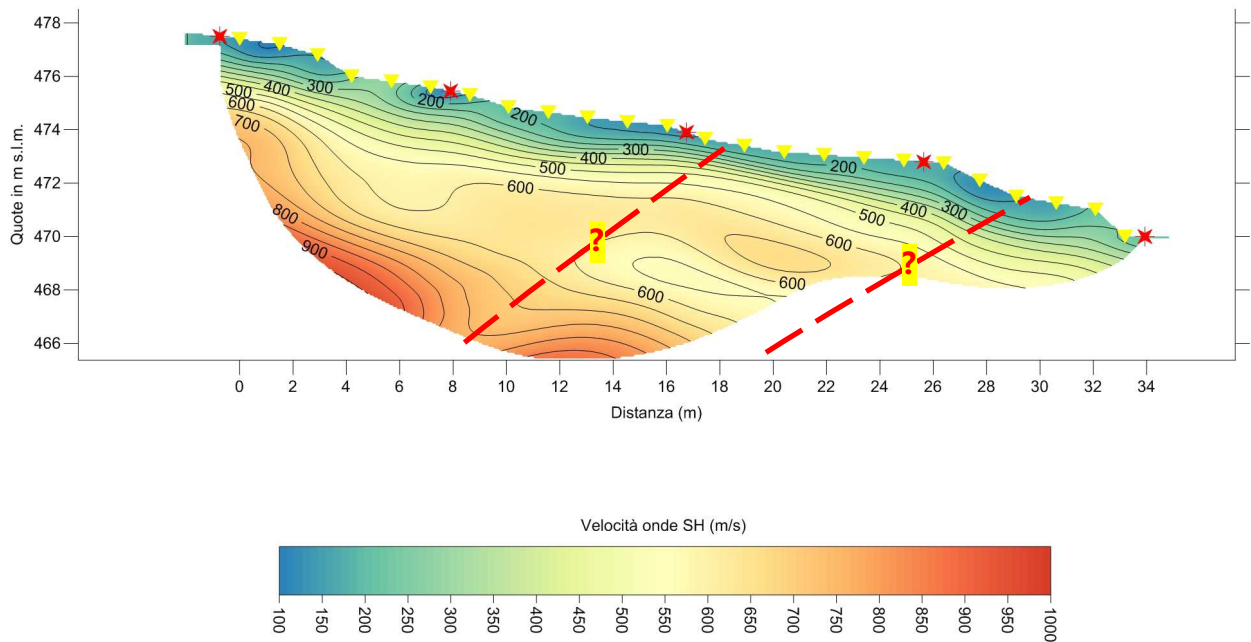
LINEA SISMICA 1

Tomografia sismica

L'elaborazione con tecnica tomografica del profilo sismico ha permesso di ottenere due sezioni sismiche nelle quali viene riportato l'andamento nel sottosuolo delle velocità delle onde P ed SH (vedi figure seguenti).

Tale andamento viene graficamente rappresentato sia mediante una scala di falsi colori, ai quali competono via via velocità sismiche sempre maggiori, sia mediante curve di isovelocità distribuite regolarmente ogni 100 m/s per le onde P e 50 m/s per le onde SH.





Entrambe le acquisizioni (onde P e SH) mostrano una sostanziale concordanza nei risultati. Lungo tutta la linea nei primi 2-3 m circa di profondità si osserva un rapido incremento delle velocità, intorno ai 1.200 m/s per le P e 500 m/s per le SH, attribuibile a materiale dalle buone caratteristiche meccaniche, confermato dalle indagini dirette (prove penetrometriche e saggi con escavatore) eseguite nella stessa area.

Nella zona più a monte della sezione, in particolare nella tomografia con onde P fino alla progressiva dei 6 m circa, il gradiente si mantiene pressoché costante con velocità che superano i 2.000 m/s per le P e gli 800 m/s per le SH, che potrebbe essere dovuto alla presenza di materiale lapideo (arenarie). Dalla progressiva dei 6 m le curve di isovelocità tendono ad allargarsi diminuendo quindi il gradiente per lo meno fino a circa 7 m di profondità. Questa anomalia nella propagazione delle velocità, rappresentata dalla flessione delle curve, è evidente in entrambe le analisi (onde P ed SH) a partire dalla progressiva degli 8-10 m e sembra ripetersi più a valle intorno a quella dei 24 m. Ciò potrebbe essere dovuto a materiale con caratteristiche più scadenti dal punto di vista meccanico rispetto a quelle più a monte, tipo arenarie alterate, argilliti e marne alterate e/o fratturate per possibili dislocazioni tettoniche tra Formazione di Sillano e Arenarie di Monte Senario.

LINEA SISMICA 2

Analisi HVSR e MASW

Nell'analisi dei dati **HVSR** vengono inizialmente individuati eventuali transienti (eventi con eccessiva ampiezza) da rimuovere, e viene poi creato lo spettro di frequenza delle tre componenti (le due orizzontali e quella verticale) ed il rapporto spettrale H/V, dividendo la serie temporale in n finestre da 20 secondi, in parziale sovrapposizione. Vengono infine elencati i criteri SESAME (Site EffectS assessment using AMbient Excitations) che definiscono la robustezza statistica della curva HVSR e degli eventuali picchi presenti.

Dai risultati ottenuti non risultano evidenti picchi di frequenza statisticamente significativi, per cui si potrebbe escludere un effetto di amplificazione sismica per motivi stratigrafici, per lo meno nel range di interesse ingegneristico.

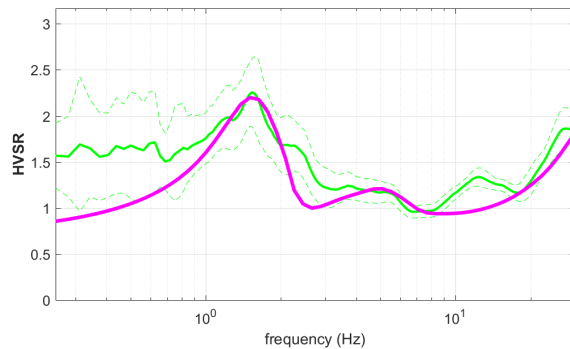
L'analisi dei dati mediante metodologia **MASW** con onde di Rayleigh e Love è stata eseguita in analisi congiunta con l'HVSR_1 che è stato eseguito più o meno al centro della linea.

Per analisi congiunta si intende l'utilizzo di tutti i dati a disposizione all'interno dello stesso strumento di analisi. Questo tipo di analisi offre numerosi vantaggi, primo fra tutti quello di diminuire il numero dei possibili modelli sismostratigrafici (spessori/velocità) determinati dal problema della non-univocità (cioè dell'equivalenza di modelli diversi per una data curva di dispersione) che in effetti tocca tutti i metodi geofisici di superficie.

Dai dati acquisiti mediante MASW si è effettuato il calcolo della curva di dispersione (con attribuzione degli spessori e delle velocità relative), ed a partire da questo la creazione, mediante il software utilizzato, di una "curva teorica" H/V. Infine confrontando tale curva con quella misurata empiricamente, si è cercato di affinare il modello sismostratigrafico in modo da ottenerne uno che rappresenti al meglio la curva di dispersione e che faccia sovrapporre le curve H/V ed in particolare la frequenza del principale picco, tipicamente legato al più profondo contatto litologico "significativo". Tale operazione consente di vincolare il modello Vs specialmente in profondità dove il margine di incertezza è maggiore.

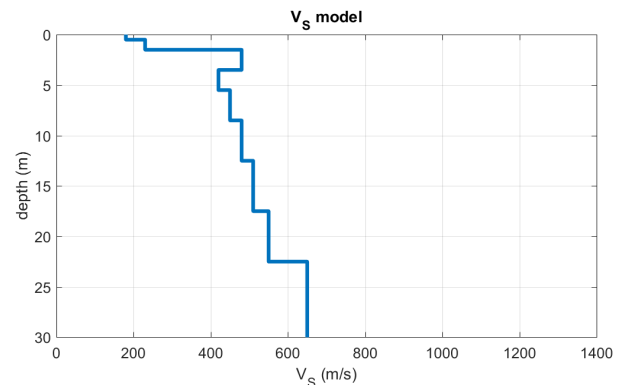
Nella Tabella e nelle figure sottostanti vengono riportati il risultato dell'analisi congiunta e il modello medio (spessori e velocità Vs) stimato.

MASW-HVSR_1



Risultati dell'analisi congiunta MASW – HVSr a partire dal modello di V_s utilizzato per la dispersione delle onde di superficie, secondo la formulazione basata sulle onde di superficie (Albarelo & Lunedei, 2009). La curva magenta ottenuta dalla modellazione, genera un picco di frequenza (ipotetico) che si sovrappone a quello misurato empiricamente (curva verde).

Linea 2 - MASW	
Spessore (m)	Vsh (m/s)
0.5	180
1.0	230
2.0	480
2.0	420
3.0	450
4.0	480
5.0	510
5.0	550
80.0	650
semi-spazio	1.400
Modello sismostratigrafico stimato	



I risultati dell'analisi congiunta MASW-HVSR confermano quanto visto con l'analisi tomografica e le indagini dirette. In particolare, come da Tavola 1, la *Linea 2* passa trasversalmente alla *Linea 1* ed a circa metà di quest'ultima dove non sembrano essere presente le bancate arenacee rinvenute nella zona a monte. Le velocità, che si mantengono infatti tra i 400 e i 650 m/s, sono compatibili con orizzonti marnosi.

La stima del profilo verticale di V_s , sia attraverso tomografia sismica ma soprattutto tramite la dispersione delle onde superficiali abbinata all'analisi HVSr che ha consentito di investigare profondità maggiori rispetto a quanto fatto con la rifrazione, ha consentito di calcolare il valore del cosiddetto parametro **Vseq** (in questo caso corrisponde al V_{s30}) che è pari a **488 m/s** considerando come riferimento il piano campagna.

Sulla base del profilo sismostratigrafico ottenuto, il sito risulta compatibile con la categoria di sottosuolo B secondo le NTC 2018 - Tabella 3.2.II, riportata sotto.

Sarà comunque cura del progettista, in base alle caratteristiche dell'opera da realizzare, alla effettiva profondità di imposta delle fondazioni, al modello sismostratigrafico riportato con il conseguente profilo verticale della Vs, ed a tutte le considerazioni del caso che riterrà opportune, attribuire il definitivo valore di Vseq e conseguentemente la categoria di suolo.

Categorie di sottosuolo (NTC 2018 - Tabella 3.2.II)	
Categoria	Descrizione
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>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> , 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>Depositi 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, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Scandicci, lì 04/05/2018