

FIUMICINO
WATERFRONT

SOGGETTO ESECUTORE E FINANZIATORE



INTERVENTO N. 146



CITTÀ DI
FIUMICINO

SOGGETTO PROPONENTE ED ATTUATORE



RINA CONSULTING S.P.A.

Via Antonio Cecchi 6, 16129 Genova
tel +39 010 31961
www.rina.org
Registro imprese di Genova: 03476550102
Partita IVA: 03476550102



Atelier(s) Alfonso Femia s.r.l.

Via Interiano 3/11, 16124 Genoa
tel. +39 010.540095 fax 010.5702094
Via Cadolini 32/38, 20137 Milan
tel. +39 02.54019701 fax 010.54115512
55 rue des petites écuries, 75010 Paris
tel +331.42462894
genova@atelierfemia.com - www.atelierfemia.com
Registro imprese di Genova: 01601780990
Partita IVA: 01601780990



RESPONSABILE COORDINAMENTO
DELLE DISCIPLINE SPECIALISTICHE

Ing. **ALESSANDRO ODASSO**
Direttore Tecnico - Rina Consulting S.p.A.

GRUPPO DI PROGETTAZIONE

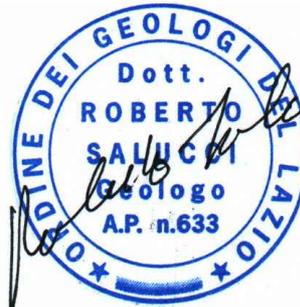
Arch. Alfonso FEMIA - Architettura e Landscape
Ing. Marco COMPAGNINO - Studio di impatto ambientale
Dott. Sandro LORENZATTI - Archeologia
Ing. Michele DI LAZZARO - Studio Idraulico e idrologico
Arch. Riccardo COCCIA - Prevenzione incendi
Ing. Alessandro VITA - Studio Geotecnico
Dott. Geol. Roberto SALUCCI - Geologia
Ing. Federico BARABINO - Sicurezza
Dott. Geol. Paolo RAVASCHIO - Rilievi e indagini
Ing. Flavio MARANGON - Studio trasportistico
Ing. Bruno RAMPINELLI ROTA - Compatibilità vincoli aeronautici

COORDINAMENTO DELLA PROGETTAZIONE

Ing. Marino BALZARINI - Project Management Consultancy
Arch. Paola DEL BIANCO - Project Manager Deputy
Ing. Alessandro PIAZZA - Coordinamento Opere Civili
Ing. Damiano SCARCELLA - Coordinamento Opere Marittime
Arch. Sara GOTTARDO - Coordinamento Architettura e Landscape

UNITÀ DI PROGETTO

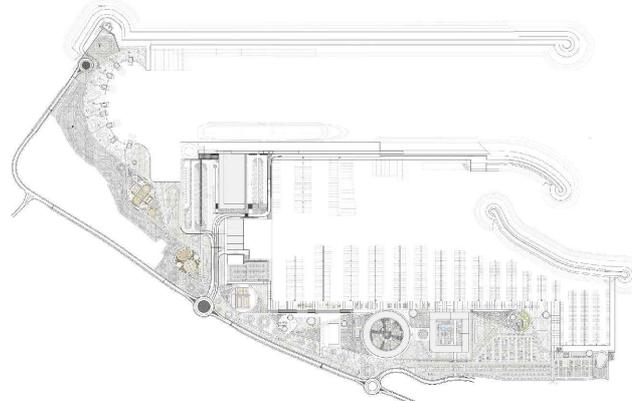
Ing. Massimo GUIDI - Dirigente Comune di Fiumicino



PORTO TURISTICO-CROCIERISTICO DI FIUMICINO ISOLA SACRA

CUP:F1122000320007

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA



INQUADRAMENTO GENERALE GEOLOGIA E IDROLOGIA-GEOTECNICA-SISMICA RISULTATI INDAGINI GEOGNOSTICHE INTEGRATIVE 2023

COMMESSA	SERVIZIO LOTTO	OPERA	DISCIPLINA	TIPO	PROG.	REV.	SCALA
P0031150	D0	MP00	GI	REP	01	00	

REV.	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	DATA
00	Emissione per approvazione	R. Salucci	A. Piazza	A. Odasso	31/07/2023
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

NOME FILE: P0031150D0MP00GIREP0100

Geo-Colnar C.FISC: nd P.IVA: 02966240604	Via Fabrateria Vetus, 4B 03023 Ceccano (FR) - Email: geocolnar@libero.it
---	---

OGGETTO: indagini geognostiche

	Data: Giugno 2023
	Il committente: RINA
	Il Tecnico Geol. ROBERTO SALUCCI
	Il Progettista
Indagini geognostiche per il progetto del nuovo Porto Turistico Crocieristico di Isola Sacra nel comune di Fiumicino	

Geol. Andrea Nardoni



Geol. Luca Colagiaco



Indice

1. PREMESSA	3
2. PROSPEZIONI MASW	5
2.1 Prova masw	7
3. PROVA HVSR	25

Allegati

- Tabulati prospezioni Masw
- Tabulati prova HVSR
- Documentazione fotografica
- Planimetria ubicazione indagini

1. PREMESSA

La presente nota descrive i risultati di una campagna di indagini eseguite nell'ambito della progettazione del nuovo Porto Turistico Crocieristico di Isola Sacra nel territorio del comune di Fiumicino (Roma),

Nell'ambito del lavoro sono state eseguite le seguenti indagini :

- N. 1 misura HVSR

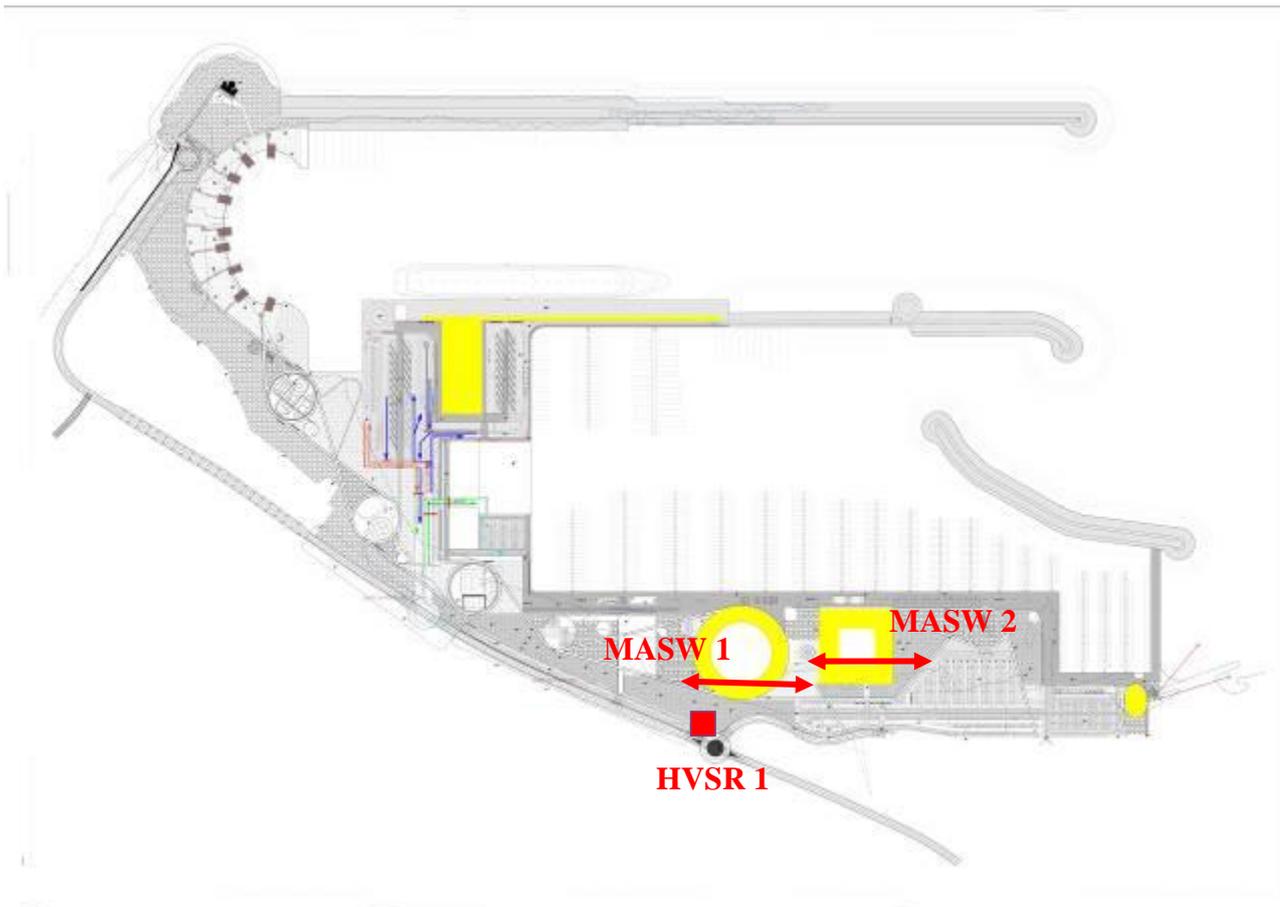
-N. 2 prospezioni sismiche Masw che in modalità sismica a rifrazione in onde P

L'ubicazione di dettaglio delle indagini eseguite è stata riportata su una planimetria dell'area.

Le indagini geognostiche sono state eseguite in ottemperanza alle normative di riferimento elencate di seguito:

- AGI: “Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche”. Giugno 1997;
- “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione” D.M. 11.03.1988.
- Norme standard previste per l'esecuzione delle prove in situ e in laboratorio (ASTM, AASHO, AASHTO).

**STRALCIO PLANIMETRICO
CON UBICAZIONE DELLE INDAGINI ESEGUITE**



LEGENDA

- Prova HVSR
- ↔ Prospezione Masw

2 PROSPEZIONI MASW

Nell'ambito dell'area in esame sono state eseguite due prospezioni sismiche Masw di cui si riporta il dettaglio nella tabella che segue:

PROVA	Numero geofoni (m)	Interdistanza geofoni (m)	Lunghezza stendimento (m)
Masw 1	12	3	33
Masw 2	12	3	33

Le indagini sismica è stata eseguita utilizzando la strumentazione combinata MAE A6000SE che rappresenta la soluzione più compatta e versatile per prospezione sismica attiva e passiva (12/24 canali, 24 bit).



Attrezzatura utilizzata per le prospezioni sismiche

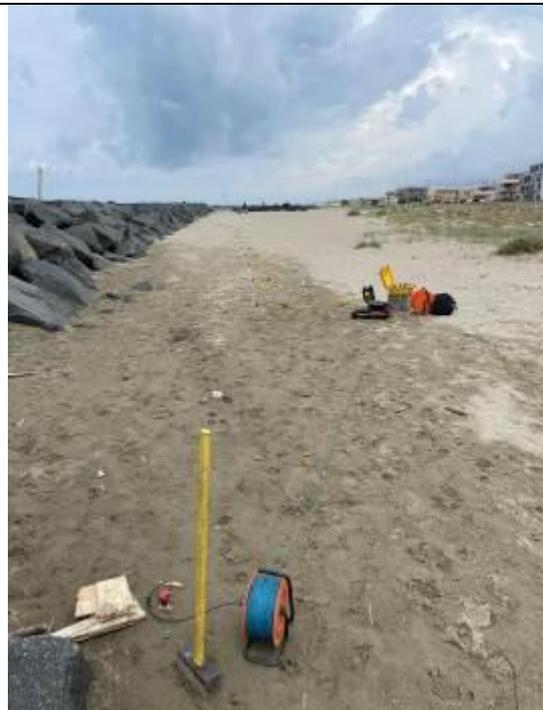
REPORTAGE FOTOGRAFICO



MASW 1



MASW 1



MASW 2



MASW 2

2.1 Prova masw

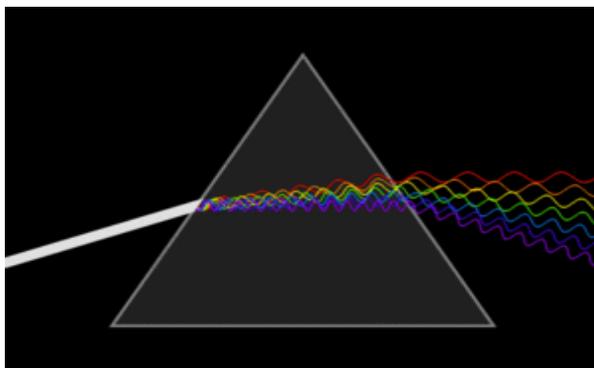
Principi generali del metodo Masw

Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di Rayleigh, la componente principale delle onde superficiali. Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase). Questa proprietà si chiama dispersione.

Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali.

La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio (V_s), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali. Questo tipo di analisi fornisce i parametri fondamentali comunemente utilizzati per valutare la rigidità superficiale, una proprietà critica per molti studi geotecnici.

La dispersione è un fenomeno fisico che causa la separazione di un'onda in componenti spettrali con diverse lunghezze d'onda, a causa della dipendenza della velocità dell'onda dalla lunghezza d'onda nel mezzo attraversato. È spesso descritta in onde luminose, ma può avvenire in ogni tipo di onda che interagisce con un mezzo o che può essere confinata in una guida d'onda, come le onde sonore. La dispersione è anche chiamata dispersione cromatica per enfatizzare la sua dipendenza dalla lunghezza d'onda. Un mezzo che esibisce queste caratteristiche nei confronti dell'onda in propagazione è detto dispersivo. (http://it.wikipedia.org/wiki/Dispersione_ottica)



Dispersione di un raggio di luce in un prisma

Per ottenere un profilo Vs bisogna produrre un treno d'onde superficiali a banda larga e registrarlo minimizzando il rumore.

L'inversione della curva di dispersione viene realizzata iterativamente, utilizzando la curva di dispersione misurata come riferimento sia per la modellizzazione diretta che per la procedura ai minimi quadrati.

Dei valori approssimati per il rapporto di Poisson e per la densità sono necessari per ottenere il profilo verticale Vs dalla curva di dispersione e vengono solitamente stimati utilizzando misure prese in loco o valutando le tipologie dei materiali.

Quando si generano le onde piane della modalità fondamentale delle onde di Reyleigh, vengono generate anche una molteplicità di tipi diversi di onde. Fra queste le onde di corpo, le onde superficiali non piane, le onde riverberate (back scattered) dalle disomogeneità superficiali, il rumore ambientale e quello imputabile alle attività umane.

Le onde di corpo sono in vario modo riconoscibili in un sismogramma multicanale. Quelle rifratte e riflesse sono il risultato dell'interazione fra le onde e l'impedenza acustica (il contrasto di velocità) fra le superfici di discontinuità, mentre le onde di corpo dirette viaggiano, come è implicito nel nome, direttamente dalla sorgente ai ricevitori (geofoni).

Le onde che si propagano a breve distanza dalla sorgente sono sempre onde superficiali. Queste onde, in prossimità della sorgente, seguono un complicato comportamento non lineare e non possono essere trattate come onde piane.

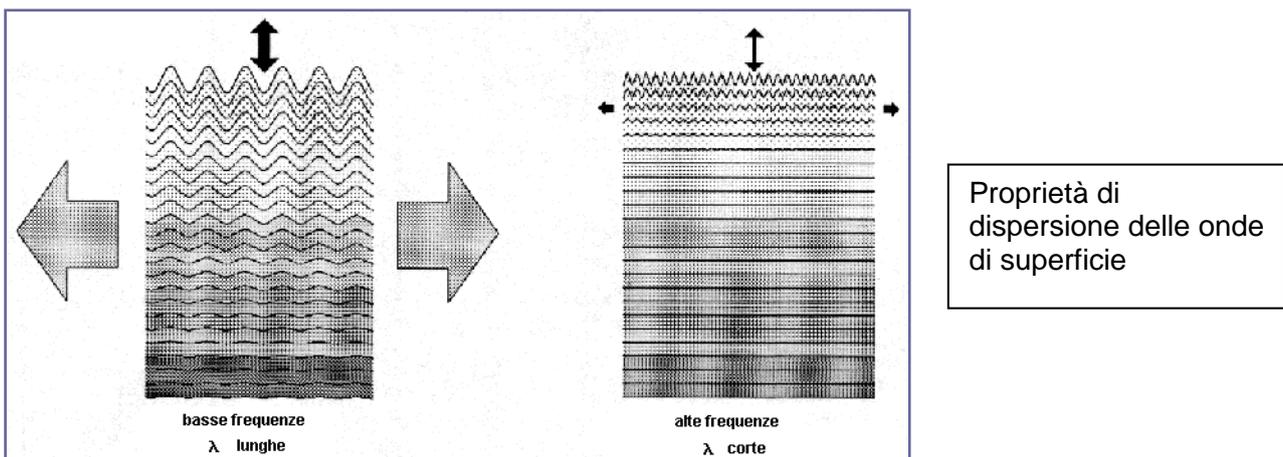
Le onde superficiali riverberate (back scattered) possono essere prevalenti in un sismogramma multicanale se in prossimità delle misure sono presenti discontinuità orizzontali quali fondazioni e muri di contenimento. Le ampiezze relative di ciascuna tipologia di rumore generalmente cambiano con la frequenza e la distanza dalla sorgente. Ciascun rumore, inoltre, ha diverse velocità e proprietà di attenuazione che possono essere identificate sulla registrazione multicanale grazie all'utilizzo di modelli di coerenza e in base ai tempi di arrivo e all'ampiezza di ciascuno.

La scomposizione di un campo di onde registrate in un formato a frequenza variabile consente l'identificazione della maggior parte del rumore, analizzando la fase e la frequenza in funzione dalla distanza dalla sorgente. La scomposizione può essere quindi utilizzata in associazione con la registrazione multicanale per minimizzare il rumore durante l'acquisizione. La scelta dei parametri di elaborazione così come del miglior intervallo di frequenza per il calcolo della velocità di fase, può essere fatto con maggior accuratezza utilizzando dei sismogrammi multicanale. Una volta

scomposto il sismogramma, una opportuna misura di coerenza applicata nel tempo e nel dominio della frequenza può essere utilizzata per calcolare la velocità di fase rispetto alla frequenza.

La velocità di fase e la frequenza sono le due variabili (x ; y), il cui legame costituisce la curva di dispersione. E' anche possibile determinare l'accuratezza del calcolo della curva di dispersione analizzando la pendenza lineare di ciascuna componente di frequenza delle onde superficiali in un singolo sismogramma. In questo caso la tecnica MASW permette la miglior registrazione e separazione ad ampia banda ed elevati rapporti S/N. Un buon rapporto S/N assicura accuratezza nel calcolo della curva di dispersione, mentre l'ampiezza di banda migliora la risoluzione e la possibile profondità di indagine del profilo V_s di inversione.

La MASW può essere efficace con anche solo dodici canali di registrazione collegati a geofoni singoli a bassa frequenza (<10Hz).



L'illustrazione mostra le proprietà di dispersione delle onde di superficie. Le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte), hanno meno energia e una penetrazione superficiale. Grazie a queste proprietà, una metodologia che utilizzi le onde superficiali può fornire informazioni sulle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità. La velocità delle onde S (V_s) è il fattore dominante che governa le caratteristiche della dispersione.

Il principale vantaggio di un metodo di registrazione multicanale è la capacità di riconoscimento dei diversi comportamenti, che consente di identificare ed estrarre il segnale utile dall'insieme di varie e differenti tipi di onde sismiche. Quando un impatto è applicato sulla superficie del terreno, tutte

queste onde vengono simultaneamente generate con differenti proprietà di attenuazione, velocità e contenuti spettrali. Queste proprietà sono individualmente identificabili in una registrazione multicanale e lo stadio successivo del processo fornisce grande versatilità nell'estrazione delle informazioni utili.

L'intero processo relativo al metodo MASW comprende i seguenti passi successivi:

- acquisizione delle onde superficiali
- estrazione dello spettro di dispersione
- picking di una curva di dispersione
- calcolo del profilo Vs-Profondità (profilo 1-D) tramite modellizzazione diretta e/o inversione della curva di dispersione

Gli allegati relativi alle prove MASW riportano il sismogramma acquisito sperimentalmente, lo spettro di dispersione estratto dal sismogramma, le curve di dispersione misurate e calcolate, la stratigrafia delle Vs ricavata dalla prova ed infine la documentazione fotografica delle attività di campagna.

Viene inoltre indicato il valore del parametro Vs30, calcolato utilizzando la stratigrafia Vs e la seguente formula:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

- 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 inferiori a 800 m/sec

Strumentazione impiegata

L'indagine sismica è stata eseguita utilizzando la strumentazione combinata MAE A6000SE che rappresenta la soluzione più compatta e versatile per prospezione sismica attiva e passiva (12/24 canali, 24 bit) e per la prospezione geoelettrica, con tecniche quadripolo (SEV) o tomografia elettrica multielettrodo.

La tipologia di sondaggio sismico effettuata viene selezionata dal menu principale mediante un semplice tocco sul monitor a colori dotato di touch screen. Una volta impostata la modalità di acquisizione dati (misura singola o ciclo) basta la pressione di un tasto e l'acquisizione dati viene eseguita in modalità automatica dalla strumentazione.

Caratteristica principale della sezione sismografo è la risoluzione di 24 bit effettivi per ogni singolo canale. Tale risultato è possibile grazie all'adozione della nuova scheda di acquisizione dati MAE 24 bit, che adotta un convertitore digitale A/D per ciascun canale di ingresso di cui è dotato il sismografo (tecnologia SST). L'adozione di tale architettura rende ideale l'A6000SE per tutte le tipologie di prospezione sismica attiva e passiva.

E' inoltre possibile effettuare una prima analisi dei sismogrammi acquisiti, anche per singola onda, direttamente in campagna, visualizzando i sismogrammi molto dettagliatamente con poche e semplici operazioni.

Si riportano di seguito le principali caratteristiche tecniche del sismografo utilizzato per le acquisizioni delle prove sismiche

- Convertitori: risoluzione 24 bit, tecnologia sigma-delta
- Range dinamico: 144 dB (teorico)
- Distorsione massima: +/-0.0010%
- Banda passante: 2Hz-30KHz
- Common mode rejection: 110 dB a 60 Hz
- Diafonia: -120dB a 20Hz
- Soglia di rumore dell'amplificatore programmabile: 27nV
- Precisione del trigger: 1/30 del tempo di campionatura
- Range massimo segnale in ingresso: +/-5V
- Impedenza di ingresso a 1000 campioni /secondo: 20MΩ
- Livelli di amplificazione: 0 dB, 6 dB, 12 dB, 18 dB, 24 dB, 30 dB, 36 dB impostabili singolarmente per ogni canale o per gruppi di canali liberamente organizzabili
- Filtro anti-alias: -3dB,80% della frequenza di Nyquist,-80dB
- Tempo pre-trigger: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 50, 100, 200, 300, 400, 500ms

- Intervalli di campionamento: 1/30, 1/15, 1/7.5, 1/3.75, 0.5, 1.0, 2.0, 10.0, 20.0 ms; 8.0, 4.0, 2.0 ms in registrazione continua
 - Modalità di acquisizione: con trigger esterno su tutti i canali e a tempo su max 12 canali
 - Numero di campioni per evento: impostabile da 1024 a 21800 con incrementi di 512
 - Canali: configurazioni da 12, 24 o 36. Possibilità di utilizzare da 1 al numero massimo di canali installati per ogni acquisizione.
 - Test della strumentazione: Auto-calibrazione interna dei convertitori prima di ogni acquisizione
 - Filtri digitali: selezionati automaticamente in base alla frequenza di campionatura
 - Test geofoni: verifica automatica per individuare interruzioni dei cavi oppure geofoni rotti o in corto
 - Visualizzazione in tempo reale dei segnali provenienti dai geofoni
 - Archiviazione dati: in memoria FLASH interna (fino a 3GB disponibili) e/o su USB pen-drive rimovibile
 - Trigger: positivo, negativo (opzionale a chiusura di contatto) con soglia regolabile da software
 - Formato dei dati: SEG-2 standard (32-bit long integer) o ASCII
- L'elaborazione dei dati sismici è stata eseguita con software dedicato “

Analisi delle prospezioni masw

La campagna geofisica eseguita ha permesso di caratterizzare i terreni del sito indagato in termini di velocità delle onde sismiche trasversali (V_s).

Entrambe le prospezioni non hanno intercettato il substrato sismico entro la profondità di mt 30 dal p.c. ed hanno evidenziato valori di V_{seq} tali da far ricadere il sito nella categoria C.

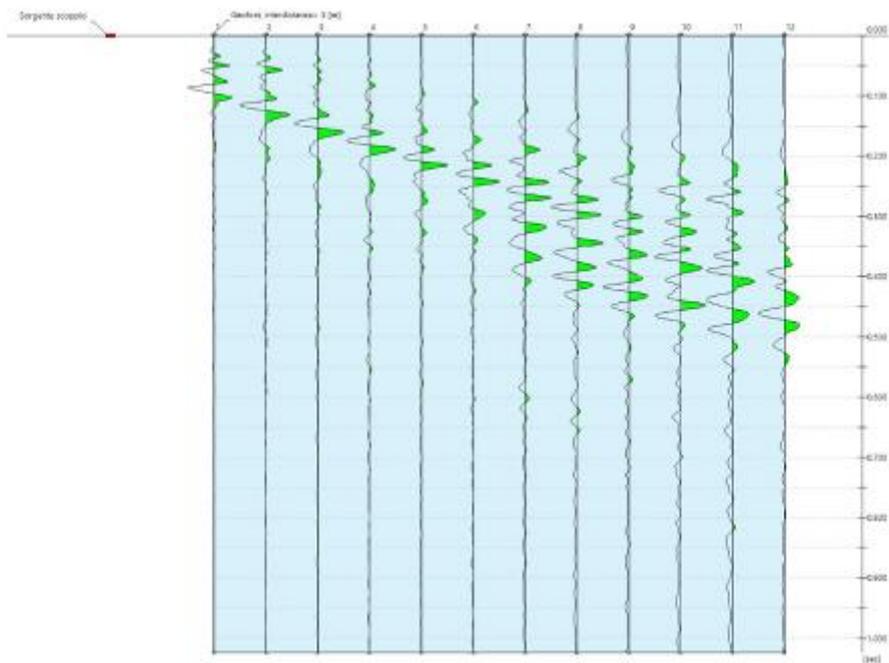
Di seguito è riportata una tabella relativa al calcolo del suddetto parametro V_{seq} .

PROSPEZIONE	$V_{s30} = V_s Eq$	Classificazione secondo NTC 17/01/2018
MASW 1	$V_{seq} = 238$ m	C
MASW 2	$V_{seq} = 209$ m	C

MASW 1

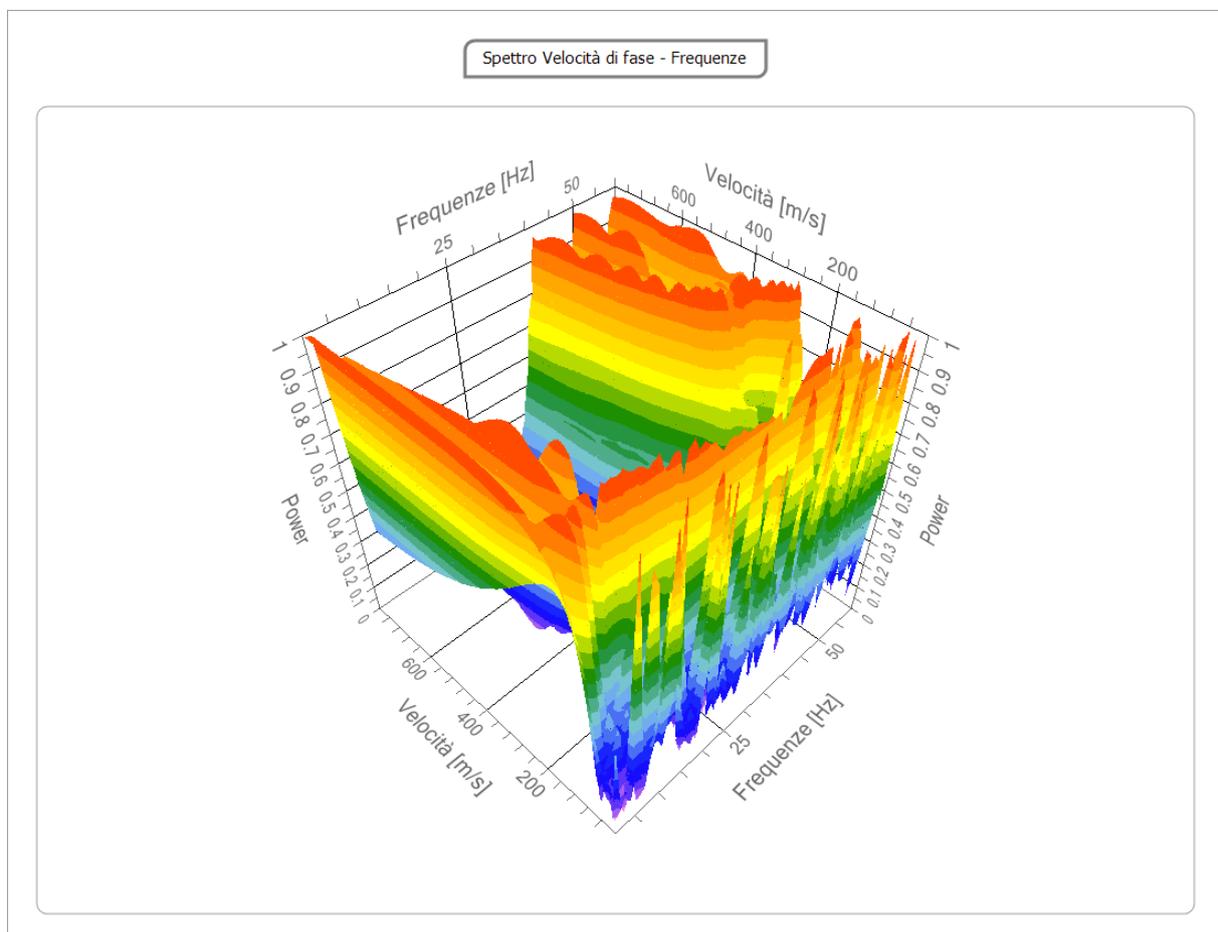
Tracce

N. tracce	12
Durata acquisizione [msec]	1024,0
Interdistanza geofoni [m]	3,0
Periodo di campionamento [msec]	0,50



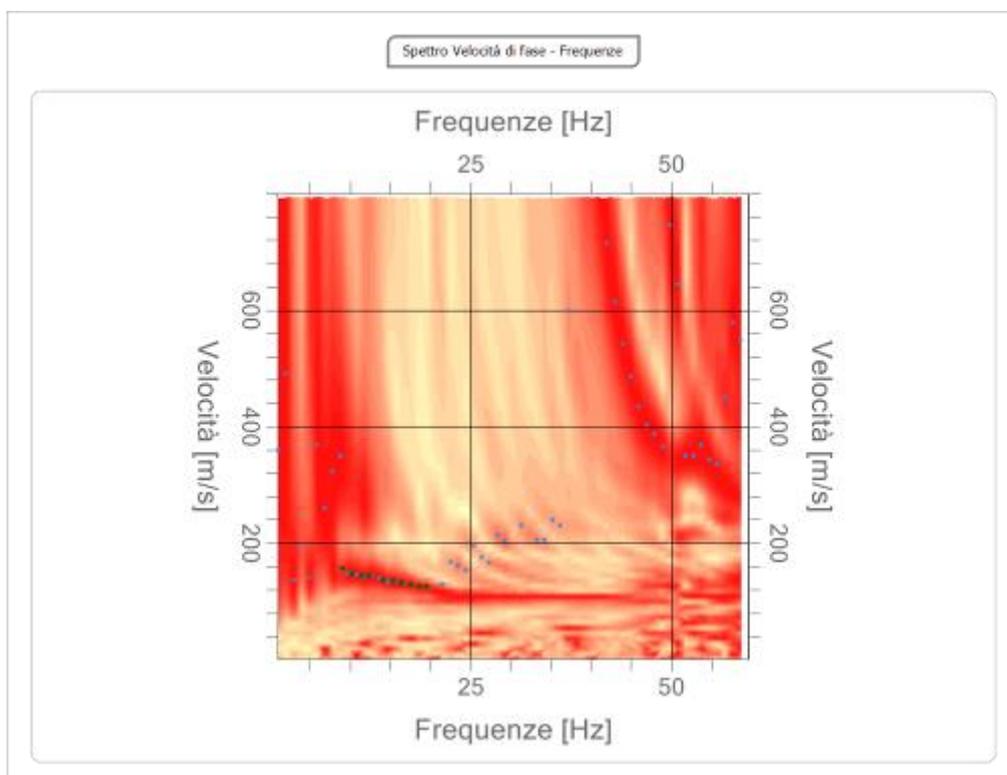
Analisi spettrale

Frequenza minima di elaborazione [Hz]	1
Frequenza massima di elaborazione [Hz]	60
Velocità minima di elaborazione [m/sec]	1
Velocità massima di elaborazione [m/sec]	800
Intervallo velocità [m/sec]	1



Curva di dispersione

n.	Frequenza [Hz]	Velocità [m/sec]	Modo
1	9.0	156.2	0
2	10.2	148.1	0
3	11.4	144.8	0
4	12.4	144.8	0
5	14.1	136.6	0
6	15.4	135.0	0
7	16.4	131.7	0
8	17.6	128.4	0
9	18.5	125.2	0
10	19.5	125.2	0



Inversione

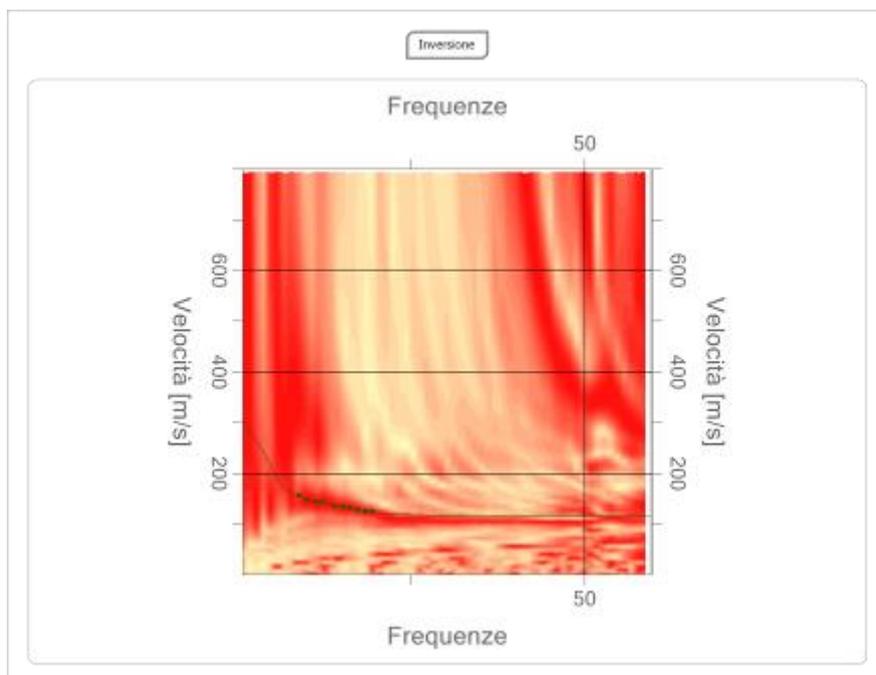
n.	Descrizione	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso unità volume [kg/mc]	Coefficiente Poisson	Falda	Vp [m/sec]	Vs [m/sec]
1		3.00	3.00	1800.0	0.20	No	204.1	125.0
2		7.42	4.42	1800.0	0.20	No	300.2	183.9
3		12.57	5.15	1800.0	0.20	No	312.0	191.1
4		19.76	7.19	1800.0	0.20	No	556.9	341.0
5		26.84	7.08	1800.0	0.20	No	557.8	341.6
6		∞	∞	1800.0	0.20	No	581.8	356.3

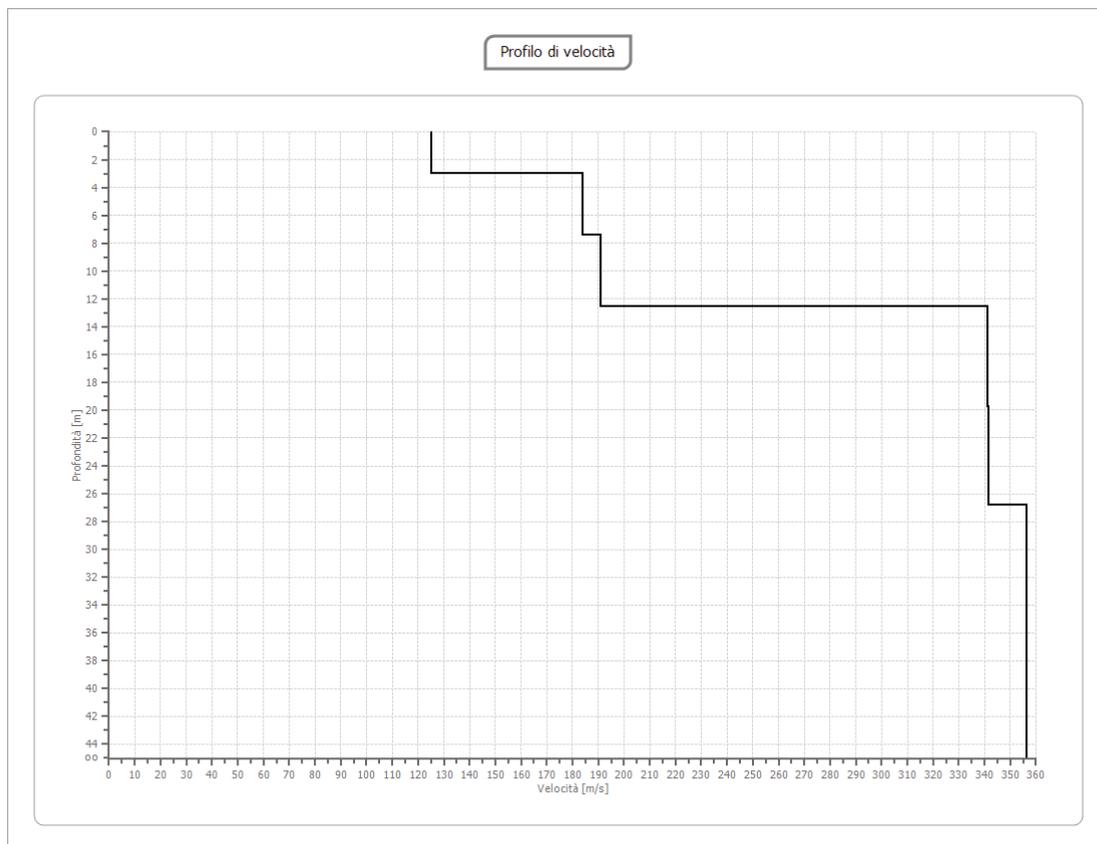
Percentuale di errore

0,008 %

Fattore di disadattamento della soluzione

0.008





Risultati

Profondità piano di posa [m]	0.00
Vs,eq [m/sec] (H=30,00 m)	238,70
Categoria del suolo	C

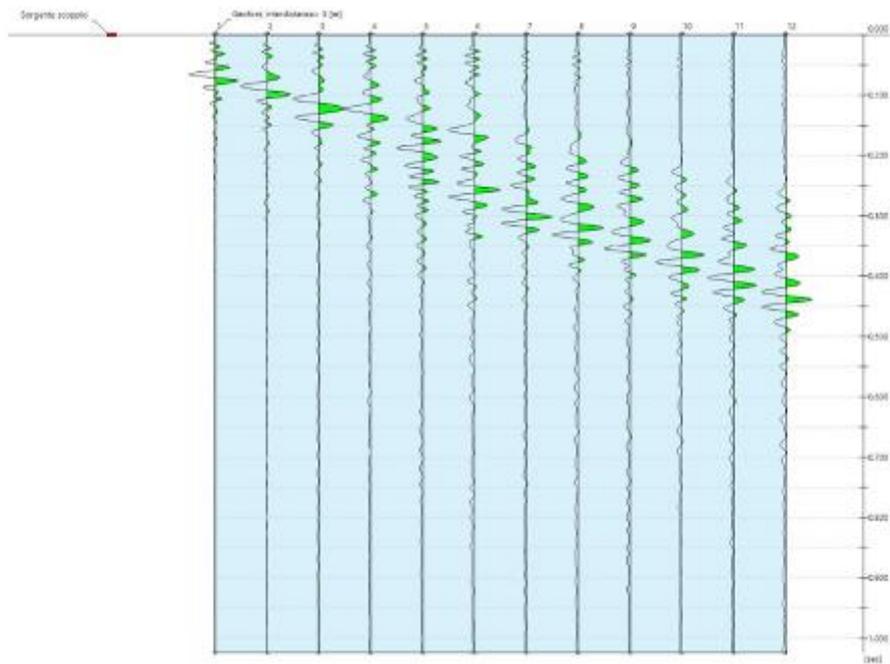
Suolo di tipo C: Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

Altri parametri

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]
1	3.00	3.00	124.98	204.10
2	7.42	4.42	183.86	300.24
3	12.57	5.15	191.07	312.02
4	19.76	7.19	341.05	556.92
5	26.84	7.08	341.57	557.77
6	oo	oo	356.26	581.78

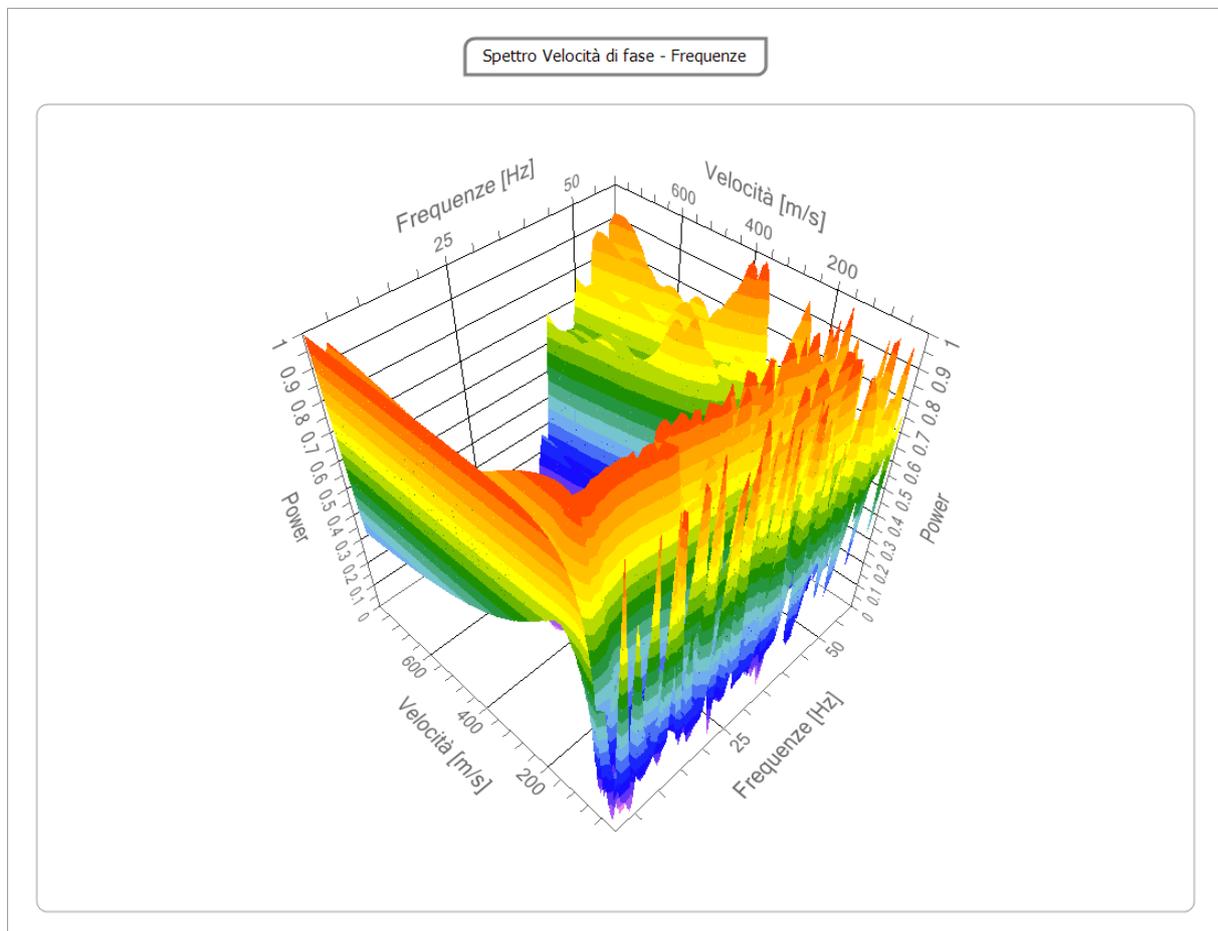
MASW 2
Tracce

N. tracce	12
Durata acquisizione [msec]	1024.0
Interdistanza geofoni [m]	3.0
Periodo di campionamento [msec]	0.50



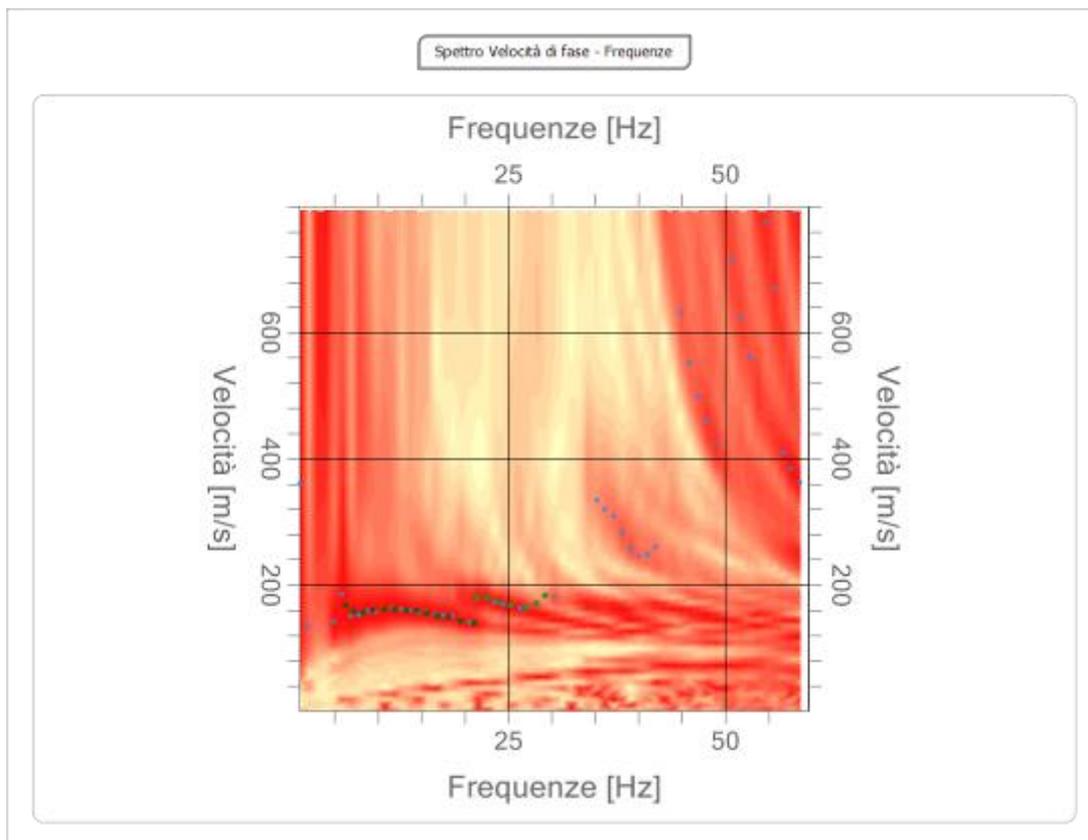
Analisi spettrale

Frequenza minima di elaborazione [Hz]	1
Frequenza massima di elaborazione [Hz]	60
Velocità minima di elaborazione [m/sec]	1
Velocità massima di elaborazione [m/sec]	800
Intervallo velocità [m/sec]	1



Curva di dispersione

n.	Frequenza [Hz]	Velocità [m/sec]	Modo
1	6.3	167.7	0
2	7.2	157.9	0
3	8.3	156.2	0
4	9.4	159.5	0
5	10.7	161.1	0
6	11.9	161.1	0
7	13.2	159.5	0
8	14.4	159.5	0
9	15.6	154.6	0
10	16.8	151.3	0
11	18.2	149.7	0
12	19.5	143.2	0
13	21.1	139.9	0
14	21.4	182.4	1
15	22.6	180.7	1
16	23.8	172.6	1
17	25.3	167.7	1
18	26.9	162.8	1
19	28.3	170.9	1
20	29.2	184.0	1



Inversione

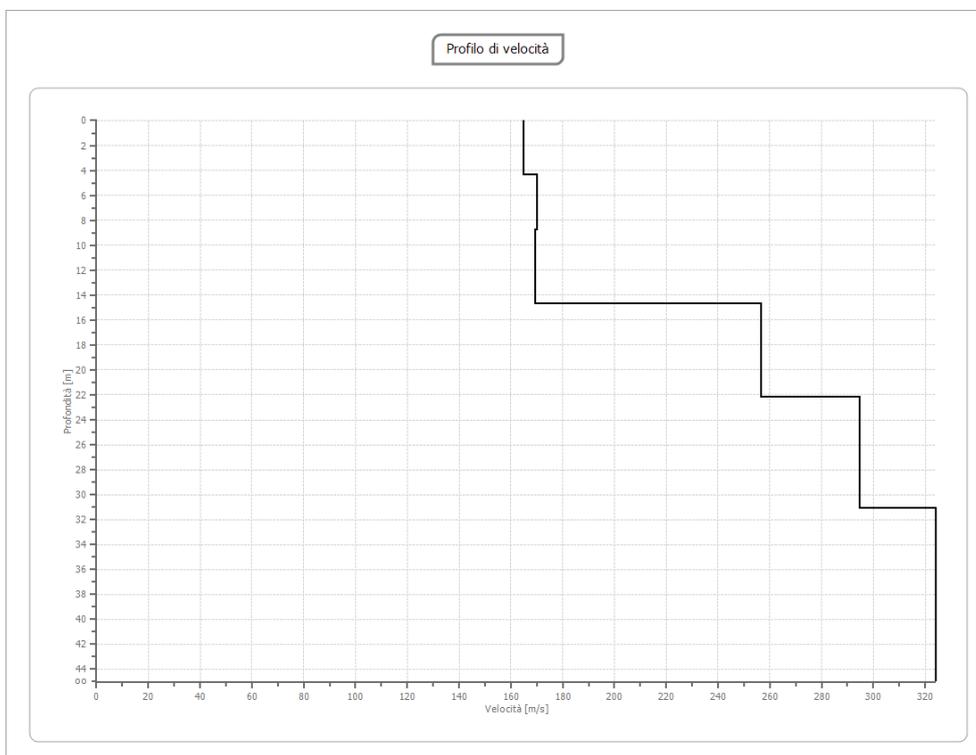
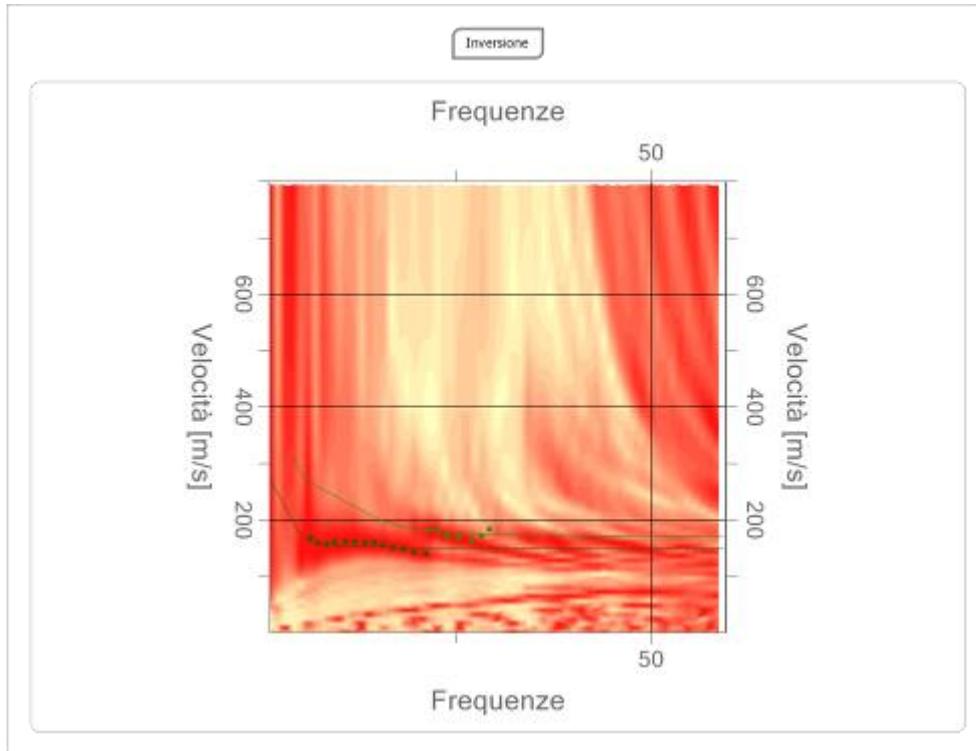
n.	Descrizione	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso unità volume [kg/mc]	Coefficiente Poisson	Falda	Vp [m/sec]	Vs [m/sec]
1		4.33	4.33	1800.0	0.20	No	269.1	164.8
2		8.74	4.40	1800.0	0.20	No	277.5	169.9
3		14.72	5.99	1800.0	0.20	No	276.8	169.5
4		22.18	7.45	1800.0	0.20	No	418.8	256.5
5		31.09	8.92	1800.0	0.20	No	481.3	294.7
6		oo	oo	1800.0	0.20	No	529.5	324.3

Percentuale di errore

0.167 %

Fattore di disadattamento della soluzione

0.042



Risultati

Profondità piano di posa [m]	0.00
Vs,eq [m/sec] (H=30,00 m)	209,60
Categoria del suolo	C

Suolo di tipo C: Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti 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 180 m/s e 360 m/s.

Altri parametri geotecnici

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]
1	4.33	4.33	164.82	269.14
2	8.74	4.40	169.94	277.52
3	14.72	5.99	169.50	276.79
4	22.18	7.45	256.46	418.80
5	31.09	8.92	294.72	481.28
6	∞	∞	324.28	529.54

3 PROVA HVSR

In corrispondenza dell'area di intervento è stata eseguita una indagine di sismica passiva a stazione singola consistente in una acquisizione del microtremore ambientale in campo libero che ha permesso di misurare le frequenza di risonanza dei terreni.



Posizionamento prova HVSR

Il tipo di stratigrafia che le tecniche sismiche possono restituire si basa sul concetto di contrasto di impedenza. Per strato si intende cioè un'unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto di impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato, oltre che dall'attività dinamica terrestre, dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto più piccole di quelle indotte dai terremoti nel campo vicino. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva. Nelle zone in cui non è presente alcuna sorgente di rumore locale e in assenza di vento, lo spettro in frequenza del rumore di fondo in un terreno roccioso e pianeggiante presenta l'andamento

illustrato in Figura 1. A tale andamento generale, che è sempre presente, si sovrappongono le sorgenti locali, antropiche (traffico, industrie o anche il semplice passeggiare di una persona) e naturali che però si attenuano fortemente a frequenze superiori a 20 Hz, a causa dell'assorbimento anelastico originato dall'attrito interno delle rocce.

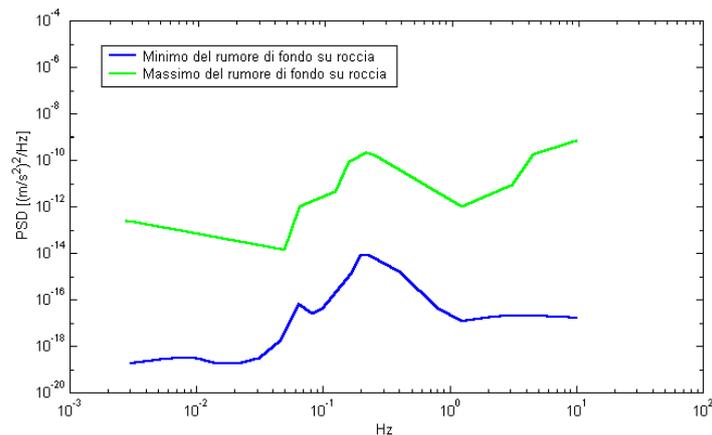


Figura 1. Modelli standard del rumore sismico massimo (in verde) e minimo (in blu) per la Terra secondo il servizio geologico statunitense (USGS). Gli spettri di potenza sono espressi in termini di accelerazione e sono relativi alla componente verticale del moto.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo a partire dagli spettri del rumore sismico registrati in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è la tecnica dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o H/V), applicata da Nogoshi e Igarashi (1970). Il metodo fu in seguito reso popolare principalmente da Nakamura (1989) come strumento per la determinazione dell'amplificazione sismica locale. Mentre su questo punto non è ancora stato raggiunto consenso, è invece ampiamente riconosciuto che la curva H/V è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali di risonanza dei sottosuoli e, tramite opportuna inversione, delle profondità dei substrati rocciosi sotto le coperture sedimentarie.

Studi recenti hanno dimostrato che ulteriori picchi a frequenza maggiori di quelle del bedrock sono riconducibili a contrasti di impedenza interni alla copertura sedimentaria e picchi a frequenze minori di quella del bedrock sono invece riconducibili a contrasti di impedenza interni al bedrock stesso. Riconosciuta questa capacità e dato che, se è disponibile una stima delle velocità delle onde elastiche, le frequenze di risonanza possono essere convertite in stratigrafia, ne risulta che il metodo H/V può essere usato come strumento stratigrafico.

Le basi teoriche dell'H/V sono relativamente semplici in un sistema bistrato del tipo sedimenti + bedrock in cui i parametri variano solo con la profondità (1-D). In questi casi la profondità h della discontinuità sismica viene ricavata tramite la formula semplice della risonanza $h = V / (4 f_r)$ o, al più, tramite la formula [1] in cui V_0 è la velocità al tetto dello strato, x un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione ecc.) e f_r la frequenza fondamentale di risonanza (cf. ad esempio Ibs-Von Seht e Wohlenberg, 1999).

$$h = \left[\frac{V_0(1-x)}{4f_r} \right] \frac{1}{x} \quad [1]$$

Nei sistemi multistrato, teoricamente l'effetto di risonanza è sommabile, ma non in modo lineare e senza una corrispondenza 1:1. Ciò significa che la curva H/V relativa ad un sistema a più strati contiene l'informazione relativa alle frequenze di risonanza (e quindi allo spessore) di ciascuno di essi, ma non è interpretabile semplicemente applicando l'equazione [1]. L'inversione richiede l'analisi delle singole componenti e del rapporto H/V, che fornisce un'importante normalizzazione del segnale per a) il contenuto in frequenza, b) la risposta strumentale e c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto.

L'inversione delle misure di tremore a fini stratigrafici, nei casi reali, sfrutta la tecnica del confronto degli spettri singoli e dei rapporti H/V misurati con quelli 'sintetici', cioè con quelli calcolati relativamente ad un modello. L'interpretazione è tanto più soddisfacente, e il modello tanto più vicino alla realtà, quanto più i dati misurati e quelli sintetici sono vicini. I modelli sintetici di inversione impiegati in questo lavoro partono dalla modellizzazione del campo d'onde superficiali (onde di Rayleigh e Love) in sistemi multistrato (Aki, 1964; Ben-Menahem e Singh, 1981). L'inversione delle curve H/V per ottenere un profilo di V_s è possibile a patto di disporre di un punto di taratura (es. penetrometria o sondaggio) che fornisca la profondità di un riflettore - anche molto superficiale - riconoscibile nella curva H/V oppure a patto di conoscere la V_s del primo strato a partire da tecniche indipendenti (Castellaro e Mulargia, 2007).

Le misure di microtremore ambientale sono state effettuate per mezzo di un tromografo digitale portatile sperimentale progettato specificamente per l'acquisizione del rumore sismico. Lo strumento è dotato di tre sensori ortogonali (geofoni senshe con periodo proprio 4,5 Hz).

I dati di microtremore ambientale, amplificati e digitalizzati a 24 bit, sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 250 Hz.

La tecnica H/V è la tecnica dedicata quando si vogliono mettere in luce le frequenze di risonanza dei terreni. Dalle registrazioni del rumore sismico ambientale su terreno sono state ricavate le curve H/V, secondo la procedura classica, descritta per esempio in SESAME (2005), con parametri:

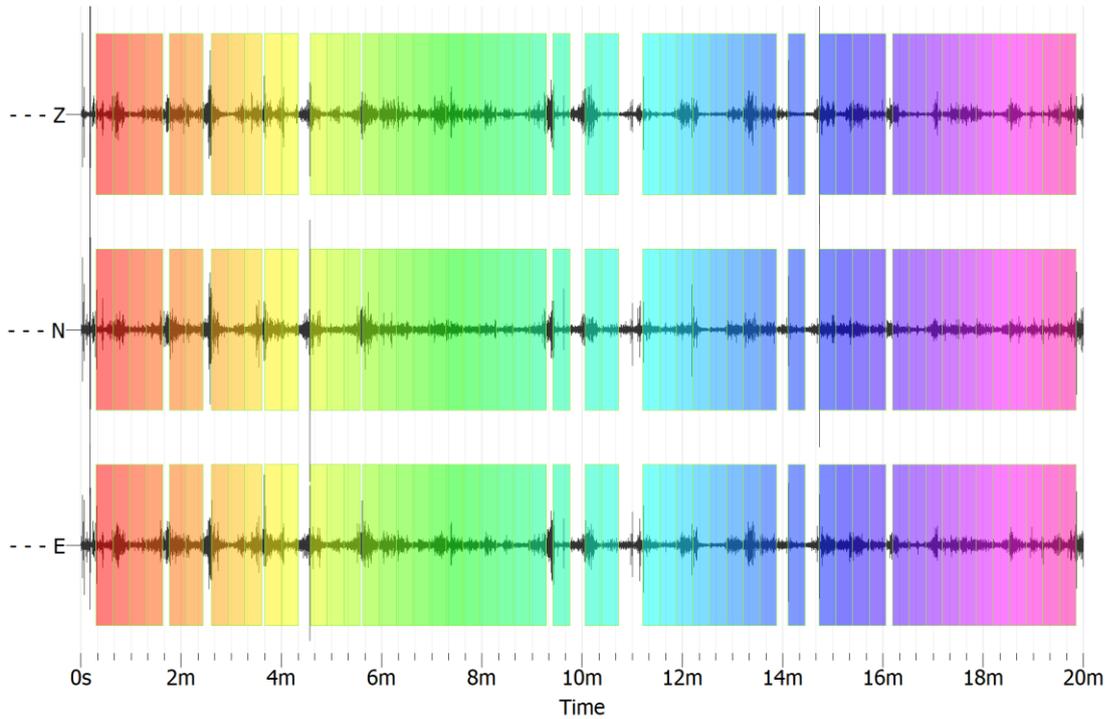
- ⇒ larghezza delle finestre d'analisi: 20 s,
- ⇒ costante di lisciamento: 5; finestra: triangolare;
- ⇒ rimozione dei transienti sulla finestra di acquisizione;

Dalla visualizzazione dei grafici relativi ai rapporti H/V e dagli spettri delle singole componenti, è stato individuato un picco principale alla frequenza di circa 0,7 Hz.

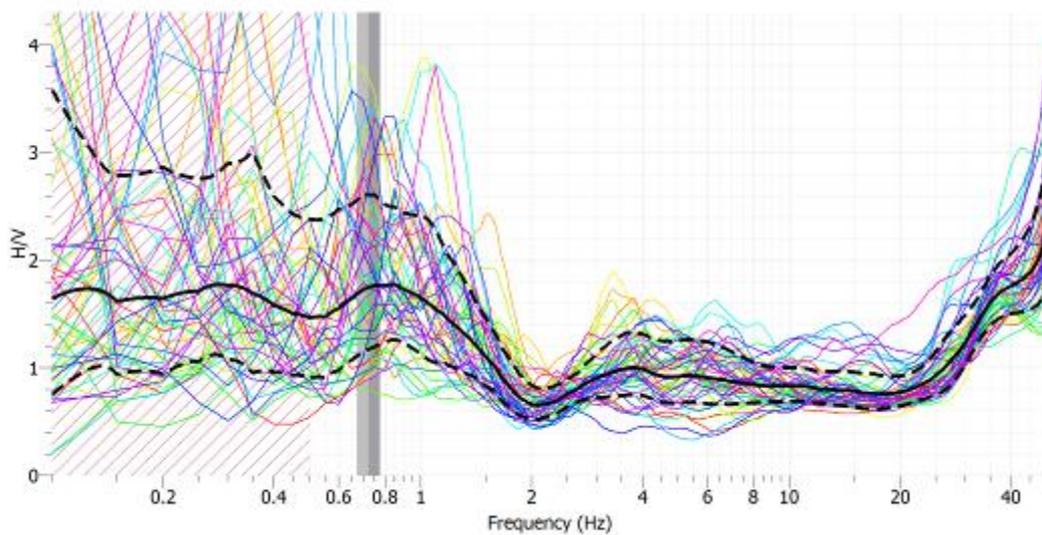
Di seguito sono riportati i dettagli di elaborazione.

SIGNAL FILE NAME = portofiumicino_2023_6_13_10_54.saf
 WINDOW MIN LENGTH (s) = 20
 SMOOTHING TYPE = constant - SMOOTHING CONSTANT = 5.0 - WINDOW TYPE=Triangular
 MINIMUM FREQUENCY = 0,1
 MAXIMUM FREQUENCY = 50
 -SAMPLES NUMBER FREQUENCY = 1000

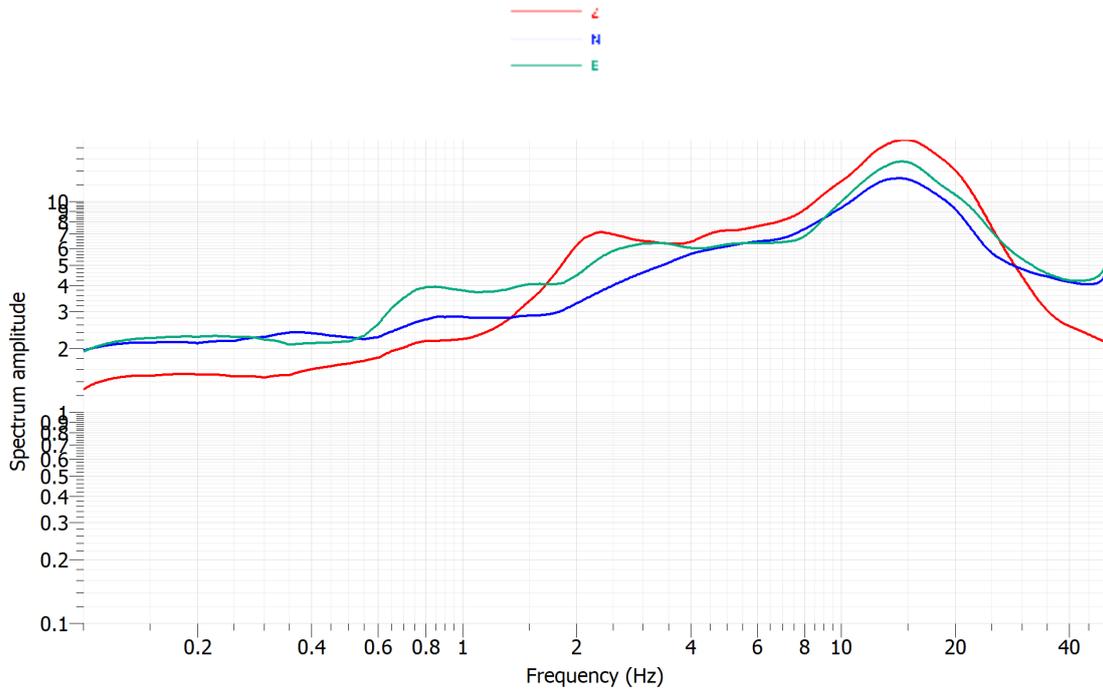
TRACCE DI ACQUISIZIONE E SELEZIONE DELLE FINESTRE



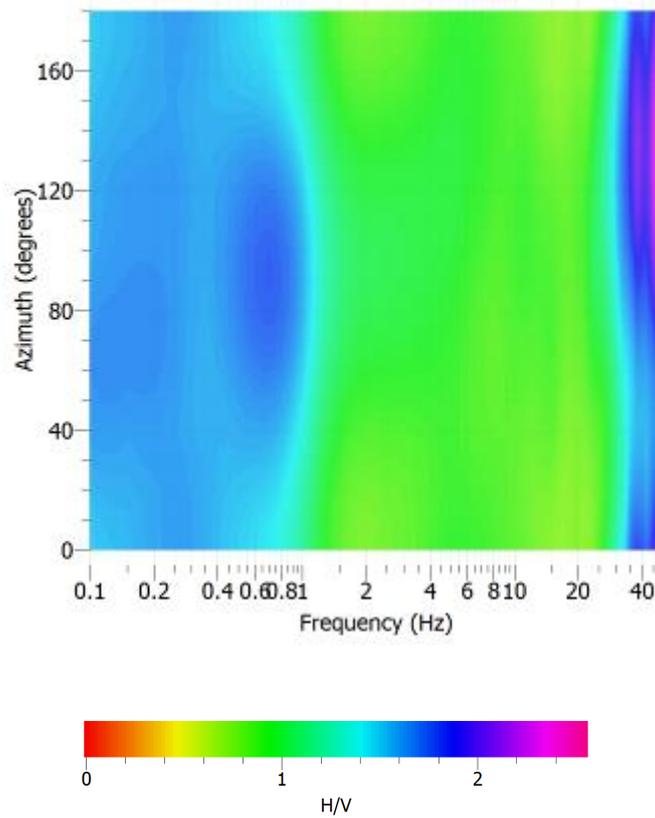
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



DIREZIONALITÀ



GEOPSY output version 1,1
 # Number of windows = 52
 # f0 from average 0,286143
 # Number of windows for f0 = 27
 # f0 from windows 0,723992 0,67165 0,776334
 # Peak amplitude 1,74966

Criteria for a reliable H/V curve					
i)	$f_0 > 10 / l_w$	0,724	>	0,500	OK
ii)	$n_c(f_0) > 200$	391	>	200	OK
iii)	$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ or $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded	0	out of 223 times	OK

Criteria for a clear H/V peak						
(at least 5 out of 6 criteria fulfilled)						
i)	$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	$A_{H/V} [f_0/4, f_0]:$	1,46584	<	0,87483 at 0,50088 Hz	NO
ii)	$\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	$A_{H/V} [f_0, 4f_0]:$	0,65064	<	0,87483 at 2,09468 Hz	OK
iii)	$A_0 > 2$	1,750	>	2		NO
iv)	$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0,724	[0,68779 , 0,76019]		OK
v)	$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0,052	<	0,1086		OK
vi)	$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1,490	<	2,00		OK

l_w = window length
 n_w = number of windows selected for the average H/V curve
 $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0$ = number of significant cycles
 f = current frequency
 f_{sensor} = sensor cut-off frequency
 f_0 = H/V peak frequency
 σ_f = standard deviation of H/V peak frequency ($f_0 \pm \sigma_f$)
 $\varepsilon(f_0)$ = threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
 A_0 = H/V peak amplitude at frequency f_0
 $A_{H/V}(f)$ = H/V curve amplitude at frequency f
 f^- = frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
 f^+ = frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
 $\sigma_A(f)$ = "standard deviation" of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
 $\sigma_{\log H/V}(f)$ = standard deviation of the $\log A_{H/V}(f)$ curve, $\sigma_{\log H/V}(f)$ is an absolute value which should be added to or subtracted from the mean $\log A_{H/V}(f)$ curve
 $\theta(f_0)$ = threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$
 $V_{s,av}$ = average S-wave velocity of the total deposits
 $V_{s,surf}$ = S-wave velocity of the surface layer
 h = depth to bedrock
 h_{min} = lower-bound estimate of h

Threshold Values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Frequency range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	0.25 f_0	0.20 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3	2,5	2	1,78	1,58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0,48	0,4	0,3	0,25	0,2