COMMITTENTE

RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE

PROGETTAZIONE:

ITALFERR
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE

U.O. GEOLOGIA TECNICA, DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO

PROGETTO DEFINITIVO

UPGRADING PRESTAZIONALE CORRIDOIO RENO ALPI - TORINO

Adeguamento a modulo 750 metri della linea Savona - Genova

Stazione di Cogoleto (GE)

RELAZIONE

INDAGINI GEOFISICHE

SCALA: ---

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.
NT1N	00	D	69	IG	GE0005	001	A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	P. Chiara	Ottobre 2020	F. Paolucci Dott. Francesco Paolucci	Ottobre 2020	F. Perrone	Ottobre 2020	M. Comedini Ottobre 2020 ITALFERR Dott. Geol. Massimo Comedini Ordine dei Geologi del Lazio n° 2103

File: NT1N00D69IGGE0005001A .doc | n. Elab.

INDICE

1. INTRODUZIONE....3
1.1 PREMESSA E SCOPI DELL'INDAGINE GEOFISICA....3
2. METODOLOGIE IMPIEGATE....4
2.1 INDAGINE SISMICA PER ONDE SUPERFICIALI MASW....4
2.2 INDAGINE HVSR....7
3. RISULTATI....11
3.1 RISULTATI MASW – ALLEGATO 1....11
3.1.1 MASW COGOLETO_1C....12
3.1.2 MASW COGOLETO_2C....12
3.2 RISULTATI HVSR – ALLEGATO 2....14
3.2.1 HVSR 1_C....14
4. BIBLIOGRAFIA....16
5. ALLEGATO N.1 – RISULTATI INDAGINI M.A.S.W. 18
6. ALLEGATO N.2 – RISULTATI INDAGINI HVSR 23

1. INTRODUZIONE

1.1 Premessa e scopi dell'indagine geofisica

La presente relazione illustra i risultati della campagna di prospezioni geofisiche eseguite nella stazione di Cogoleto (GE) nell'ambito del progetto definitivo relativo alle opere di Upgrading prestazionale del Corridoio Reno Alpi-Torino per l'adeguamento a modulo 750 metri della stazione di Cogoleto lungo la linea Savona-Genova.

Le indagini sono state eseguite utilizzando le seguenti metodologie:

- indagini sismiche tipo MASW;
- indagini HVSR.



Figura 1.1.1: Posizioni delle indagini eseguite – foto satellitare

Le indagini sismiche per onde superficiali con metodologie M.A.S.W sono state eseguite con lo scopo di ottenere la distribuzione monodimensionale della velocità di propagazione delle onde di taglio Vs, lungo un profilo verticale, utile alla attribuzione della categoria del sottosuolo pertinente rispetto alle NTC 2018.

Al fine di ottenere delle misure dirette delle frequenze di risonanza dei terreni sovrastanti il "bedrock", sono state effettuate delle registrazioni di microtremore sismico ambientale (HVSR).

Il presente documento, oltre a riportare le evidenze dei risultati emersi dalle campagne di acquisizione dati condotte in sito, contiene una breve descrizione delle metodologie geofisiche utilizzate.

2. METODOLOGIE IMPIEGATE

2.1 Indagine sismica per onde superficiali MASW

2.1.1 *Principi di funzionamento e cenni sul metodo*

Nelle diverse aree sono state allestite stese sismiche per onde superficiali con tecnica multicanale identificata con l'acronimo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

La propagazione delle onde superficiali (o di Rayleigh) avviene, in un mezzo eterogeneo, secondo modalità dispersive. Cioè, a differenti frequenze, corrispondono velocità di fase diverse: in particolare la dispersione geometrica, in opposizione alla dispersione intrinseca dei materiali, dipende dalle geometrie (spessori) delle formazioni o delle stratificazioni attraversate.

In un terreno non omogeneo o stratificato avente proprietà meccaniche variabili, il comportamento delle onde superficiali varia con tali caratteristiche. Differenti lunghezze d'onda, pertinenti a diverse profondità, coinvolgono materiali con disuguali proprietà meccaniche: ciascuna lunghezza d'onda si propaga secondo velocità di fase dipendenti dalle medesime proprietà meccaniche di cui sopra.

Le onde di superficie dunque non possiedono una singola velocità bensì una velocità di fase in funzione della frequenza; la relazione tra frequenza e velocità di fase è contenuta nelle curve di dispersione e di attenuazione. Attraverso un procedimento matematico di inversione è possibile risalire ai profili verticali delle onde di taglio S, proporzionali alle velocità di fase delle onde di superficie secondo un coefficiente invariabile.

Il metodo MASW, impiegato solo qualitativamente ai fini della ricostruzione sismo-stratigrafica di massima, è invece efficace per il calcolo speditivo del parametro $Vs_{,eq}$.

Il 22 marzo 2018 è entrato in vigore il D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni" (NTC 2018) pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n° 42 del 20.2.2018 che prevede nell'impiego, nell'approccio semplificato nella progettazione, della classificazione del sottosuolo in base ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione riportata di seguito:

$$Vs_{,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^{N} \frac{h_i}{V_{s,1}}} \qquad (1)$$

con

hi = spessore dello stato i-sesimo;

Vs,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, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/sec.

Dal valore del parametro Vs_{eq} è possibile risalire alla categoria di sottosuolo secondo il D.M. 2018 dal quale è tratta la successiva tabella.

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	*Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* 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	*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.
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.
D	*Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente 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 100 e 180 m/s.
E	*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.

2.1.2 *Strumentazione utilizzata, configurazione di indagine, codice di configurazione ed inversione dati*

Per il presente lavoro è stato utilizzato un sismografo ECHO 48/2014. Lo strumento, prodotto dalla Ambrogeo (Piacenza, Italia), è un sistema a 48 canali e possiede le seguenti caratteristiche tecniche principali:

- Convertitore analogico digitale A/D a 24-bits ;
- intervalli di campionamento: 1/32, 1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 1, 1 ½, 2 ms.



Figura 2.1.2.1: Sismografo digitale a 24 bit.

L'indagine per onde superficiali è stata condotta secondo le seguenti specifiche:

- sismografo utilizzato in configurazione a 24 canali;
- 24 geofoni con frequenza naturale a 4.5 Hz e distanza intergeofonica di 2 m;
- piastra di battuta in alluminio;
- massa battente da 10 Kg con interruttore starter e cavo trigger;
- finestra di acquisizione pari a 1 e/o 2 secondi in relazione alla tipologia di terreno.

La tecnica di trattamento dati utilizzata è basata sul "f-k processing". I file grezzi subiscono un primo "processing" di muting selettivo per eliminare le tracce o le porzioni di tracce ad elevato rumore. Quindi si esegue un calcolo della FFT usando un "windowing" opportuno. Attraverso una procedura semiautomatica si ricercano i massimi dello spettro (ricerca degli zeri della funzione secolare di Rayleigh) per ricavare i punti appropriati per la costruzione della curva di dispersione da utilizzarsi in un processo di inversione multimodale.

La tecnica di trattamento dati utilizzata è stata ottimizzata utilizzando un Software commerciale validato (SWAN, Italia).

2.2 Indagine HVSR

2.2.1 *Principi di funzionamento e cenni sul metodo*

Le registrazioni di microtremore sismico ambientale forniscono la misura diretta delle frequenze di risonanza dei livelli sedimentari sovrastanti il “bedrock”.

In particolare la tecnica di sismica passiva si basa sul concetto di contrasto di impedenza.

Per sismostrato si intende 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 e la densità del mezzo attraversato dalle medesime.

Il rumore sismico ambientale è l’insieme delle piccole vibrazioni sismiche presenti ovunque sulla superficie terrestre e generate da sorgenti naturali o antropiche, per esempio le perturbazioni atmosferiche, l’effetto delle onde del mare, il traffico veicolare e le attività industriali.

Il rumore sismico ambientale diventa una sorgente di eccitazione per la risonanza del sottosuolo ma anche delle strutture e degli Edifici, da cui la possibilità di estrarre da esso, mediante opportune tecniche di analisi, alcune informazioni sui sistemi risonanti studiati e, nel nostro caso sui modi di vibrare dei suoli correlata alla amplificazione sismica di sito.

Nel caso del presente studio, si tratta pertanto di misurare la distribuzione delle frequenze di risonanza dei suoli (laddove per frequenza di risonanza si intende la frequenza a cui l’amplificazione è massima), la quale è correlata generalmente alla profondità dei riflettori che la creano.

I metodi basati su dati acquisiti con tecniche di sismica passiva, consentono di 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 quella 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).

Studi recenti hanno dimostrato che 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 (es. Guillier et al., 2005). Riconosciuta questa capacità è possibile anche, se è disponibile una stima delle velocità delle onde elastiche, convertire in stratigrafia le frequenze di risonanza (e.g., Kanai e Tanaka, 1954; Lermo, 1993; Yamanaka et al.,1993, Ibs-Von Seht and Wohlenberg 1999; Castellaro et al., 2005; Guillier et al., 2005 e molti altri); ne risulta che il metodo H/V può essere usato come strumento stratigrafico efficace, se correttamente impiegata, con una accuratezza comparabile a quella delle tecniche classiche di prospezione geofisica.

Si rimanda in ogni caso per la trattazione teorica sui modi di vibrare dei suoli ai testi degli Autori in precedenza citati e contenuti in Bibliografia, non ultimo il programma SESAME, 2005, impiegato talora, nonostante la sua non completa esaustività nell'affrontare le diverse condizioni sismostratigrafiche, come criterio di significatività dei picchi di risonanza.

In questa sede si rammenta solamente che 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). Il microtremore sismico è basato sul calcolo del rapporto degli spettri di Fourier del rumore nel piano orizzontale H (generalmente lo spettro H viene calcolato come media degli spettri di Fourier delle componenti orizzontali NS ed EW) e della componente verticale V (Nakamura, 1989).

L'onda di superficie che viaggia nello strato superficiale viene riflessa all'interfaccia tra gli strati. Nel caso in cui la frequenza dell'onda fm sia uguale a:

$$f_m = \frac{V_s}{4H}(2m-1)$$

dove Vs è la velocità di propagazione dell'onda di superficie ed m rappresenta i vari modi di vibrazione incidente, l'onda riflessa interferisce costruttivamente con le onde incidenti, si somma e raggiunge ampiezze massime per l'effetto di risonanza.

Quindi ritornando al nostro mezzo semplice, formato da due soli strati, tutto sommato molto simile al caso di studio, ovvero uno strato superficiale più soffice che poggia su di uno strato profondo e rigido, denominato bedrock la profondità *h* della discontinuità sismica viene ricavata tramite la formula semplice della risonanza $H = V_S / (4\ f_r)$, ovvero

$$f_r = \frac{V_s}{4H}$$

o, al più, tramite la formula [1] in cui V_0 è la velocità delle onde di taglio 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).

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

Nei sistemi multistrato, come precedentemente notato, 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) contenuto in frequenza;

b) risposta strumentale;

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 in cui si simula il campo d'onde di superficie completo (Rayleigh e Love), nei modi fondamentale e superiori, in sistemi multistrato 1-D.

L'interpretazione è tanto più soddisfacente, e il modello tanto più vicino alla realtà, quanto più i dati misurati e quelli sintetici sono vicini (si rimanda alla letteratura per le basi teoriche, es. Aki, 1964; Ben-Menahem e Singh, 1981, Fäh et al. 2001-2003; Castellaro and Mulargia, 2007, Mulargia and Castellaro, 2007).

La f_r in precedenza citata, può essere individuata come picco del rapporto H/V.

Le frequenze proprie del sottosuolo possono essere quindi eccitate dal rumore di fondo e diventare visibili nello spettro del rumore sismico misurato in superficie.

2.2.2 *Metodologia di misura, strumentazione e software utilizzati*

La strumentazione utilizzata in questa indagine consiste in un sismometro costruito e commercializzato dalla MOHO S.r.l. (Italia), impiegato per le misure HVSR.

Il TROMINO ENGI© impiegato, nello specifico, nel presente studio è un sensore passivo (tromografo) progettato specificamente per l'acquisizione del rumore sismico.

Questo sensore è dotato di una doppia terna di accelerometri e velocimetri (questi ultimi anche di doppia sensibilità), capaci di misurare vibrazioni e microtremori in continuo secondo le tre componenti spaziali con una autonomia di oltre 100 ore di registrazione in continuo.

Le principali caratteristiche del "Tromino Engi" impiegato sono di seguito elencate:

- Alimentazione con 2 batterie AA da 1,5 V;
- canali velocimetrici per l'acquisizione del microtremore sismico ambientale (fino a ±1.5 mm/s ~);
- 3 canali velocimetrici per la registrazione di vibrazioni forti (fino a ± 5 cm/s ~);
- 3 canali accelerometrici per monitoraggio di vibrazioni;
- Ricevitore GPS integrato, antenna interna e/o esterna per eventuale localizzazione e/o sincronizzazione tra diverse unità, senza cavi esterni;
- Modulo radio per eventuale sincronizzazione tra diverse unità e trasmissione di allarmi;
- I dati di rumore sono amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti.



Figura 2.2.2.1: Tromografo per la misura microtremori - TROMINO©Engi

Tutte le misure sono state effettuate poggiando gli strumenti direttamente sul terreno. Sono state eseguite misure di lunghezza pari a 30 minuti, con attivi tutti e 9 i sensori e con una frequenza di campionamento pari a 128 Hz.

L'elaborazione delle tracce acquisite è stata effettuata mediante il software Grilla realizzato dalla stessa ditta produttrice dello strumento. Tale software permette l'analisi della vibrazione, l'equalizzazione del segnale, l'analisi della traccia e l'analisi H/V per valutare gli effetti di sito.

3. RISULTATI

3.1 Risultati MASW – ALLEGATO 1

Nell'Allegato grafico 1, per ciascuno dei due MASW eseguiti, sono riportati il sismogramma medio utilizzato per l'elaborazione, il profilo monodimensionale di velocità onde S inerente, lo spettro F-K e la curva di dispersione sperimentale oggetto del "picking" dei massimi sulla curva F-K sovrapposta a quella ottimizzata secondo il modello interpretativo che meglio si accoppia a quello sperimentale.

Si riporta infine il calcolo della $V_{S,eq}$ e l'attribuzione del valore alla classe di suolo idonea. Si ricorda che, per la progettazione di opere civili, il DM 2018 non prevede l'applicabilità del metodo semplificato con attribuzione della categoria di sottosuolo nei casi siano presenti inversioni di velocità lungo il profilo verticale.

Nella presente indagine, in fase di elaborazione dei dati, il comportamento sismostratigrafico nei primi 30 m a partire dal piano di calpestio (di seguito indicato come p.c.) è stato ottimizzato con un modello a 30 sismostrati, ciascuno indicativamente di uguale spessore minimo pari a 1 m.

Questa procedura permette di approssimare al meglio il modello fisico reale della velocità delle onde S nel sottosuolo, caratterizzandolo secondo variazioni graduali quasi continue all'interno dei terreni oggetto di prospezione.

Tale approccio consente un processo di affinamento dei risultati e accresce la confidenza tra la curva sperimentale di dispersione e quella del modello ai fini dell'inversione, permettendo di ottenere una curva Velocità onde S – Spessori in funzione della profondità del sottosuolo, la più attendibile possibile.

3.1.1 *MASW COGOLETO_1C*

Il M.A.S.W_1C è stato eseguito a Cogoleto in un piazzale adibito a parcheggio auto, adiacente alla ferroviaria (v. Allegato 1). A seguito dell'indagine e dell'elaborazione effettuata, i risultati del MASW_1C sono riassunti nella tabella sottostante.

Tabella 3.1.1.1: Modello sismo-stratigrafico dei terreni – M.A.S.W_1C.

Sismostrato	Spessore (m)	Profondità (m dal p.c.)	Vs (m/s)
1	1	0	280
2	1	1	169
3	1	2	148
4	1	3	281
5	1	4	406
6	1	5	463
7	1	6	455
8	1	7	419
9	1	8	400
10	1	9	424
11	1	10	488
12	1	11	570
13	1	12	655
14	1	13	733
15	1	14	801
16	1	15	858
17	1	16	906
18	1	17	945
19	1	18	977
20	1	19	1003
21	1	20	1025
22	1	21	1042
23	1	22	1056
24	1	23	1067
25	1	24	1076
26	1	25	1083
27	1	26	1089
28	1	27	1094
29	1	28	1099
30	INF	29	1102

Sulla base del profilo di velocità delle onde di taglio Vs nei primi 30 m dal piano campagna (massima profondità raggiunta), è possibile determinare la velocità equivalente $Vs_{,eq} = Vs_{,(30)}$.

Il valore calcolato per H = 14 m (H spessore delle terre poste al di sopra del substrato di riferimento rigido 800 m/s) è pari a $Vs_{,(14)}$ = **345** m/s; visto il profilo di velocità delle onde di taglio, il sito appartiene alla categoria di sottosuolo di fondazione di riferimento "**E**".

3.1.2 *MASW COGOLETO_2C*

Il M.A.S.W_2C è stato eseguito a Cogoleto in una viuzza parallela al tracciato ferroviario disposta a Sud Est rispetto al medesimo (v. Allegato 1). A seguito dell'indagine e dell'elaborazione effettuata, i risultati del MASW_2C sono riassunti nella tabella sottostante.

Tabella 3.1.2.1: Modello sismo-stratigrafico dei terreni – M.A.S.W_2C.

Sismostrato	Spessore (m)	Profondità (m dal p.c.)	Vs (m/s)
1	1	0	179
2	1	1	197
3	1	2	296
4	1	3	399
5	1	4	470
6	1	5	505
7	1	6	513
8	1	7	503
9	1	8	482
10	1	9	456
11	1	10	429
12	1	11	405
13	1	12	387
14	1	13	379
15	1	14	383
16	1	15	398
17	1	16	424
18	1	17	460
19	1	18	504
20	1	19	554
21	1	20	609
22	1	21	667
23	1	22	728
24	1	23	791
25	1	24	855
26	1	25	895
27	1	26	928
28	1	27	967
29	1	28	983
30	INF	29	1000

Sulla base del profilo di velocità delle onde di taglio Vs nei primi 30 m dal piano campagna (massima profondità raggiunta), è possibile determinare la velocità equivalente $Vs_{,eq} = Vs_{,(30)}$.

Il valore calcolato per H = 24 m (H spessore delle terre poste al di sopra del substrato di riferimento rigido 800 m/s) è pari a $Vs_{,(24)}$ = **413** m/s; visto il profilo di velocità delle onde di taglio, il sito appartiene alla categoria di sottosuolo di fondazione di riferimento "**B**".

3.2 Risultati HVSR – ALLEGATO 2

Nell'allegato grafico 2, per l'indagine (HVSR 1_C) sono riportati lo spettro del rapporto H/V, il grafico del rapporto H/V nel tempo e lo spettro delle varie componenti. Inoltre, per ogni picco di H/V evidenziato, è presente la verifica ai criteri SESAME.

3.2.1 *HVSR 1_C*

I risultati completi comprensivi del report sul rispetto degli aspetti SESAME sono visibili nelle tavole allegate.

Picco rilevato	Frequenza (Hz)
1	12,69

Tabella 3.2.1.1 – Picchi in frequenza evidenziati nell'indagine HVSR.

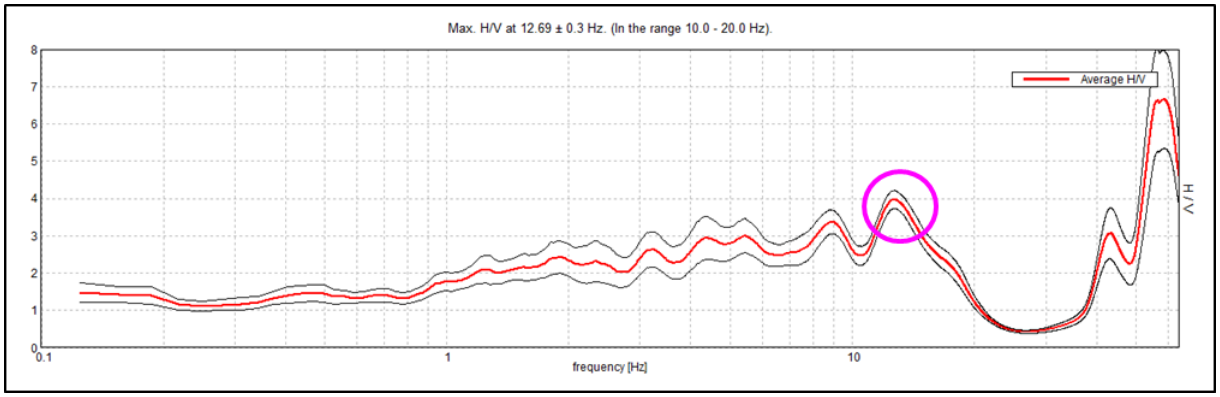


Figura 3.2.1.1: Rapporto H/V in funzione della frequenza.

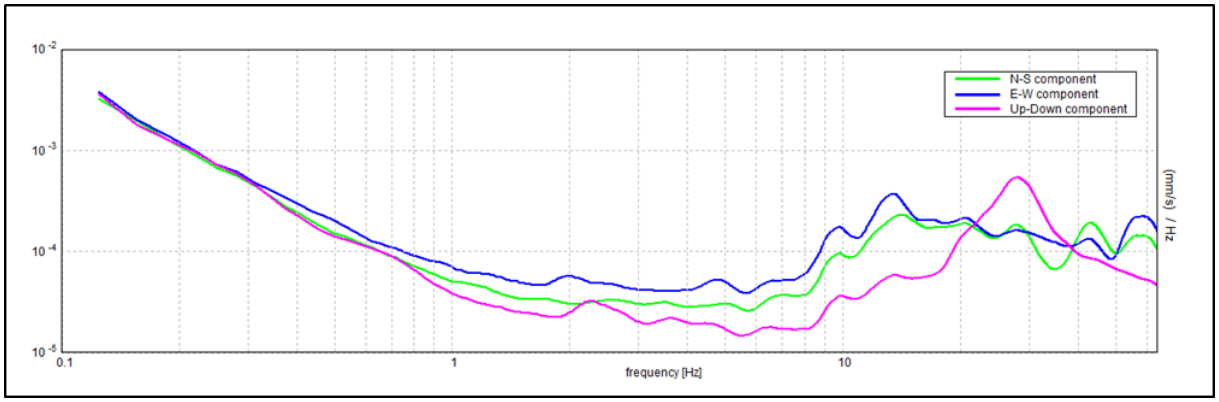


Figura 3.2.1.2: Spettro delle singole componenti.

Gli spettri elaborati mostrano la presenza di forti disturbi antropici.

L'analisi dei risultati ottenuti ha mostrato la presenza di un unico picco di tipo "stratigrafico" generato dal contrasto di impedenza nei terreni.

Il picco a 12,69 Hz non rispetta uno dei criteri SESAME.

Considerando una velocità media delle onde di taglio in tali depositi di circa 220 m/s e sfruttando la seguente formula:

$$f_r = \frac{V_s}{4H}$$

si evince una profondità del contatto di circa 4,5 m.

Il rapporto H/V, per frequenze comprese tra 20,5 e 37,5 Hz, risulta essere inferiore ad 1. Tale andamento può indicare una inversione di velocità immediatamente al di sotto della pavimentazione sulla quale è stata eseguita l'indagine.

4. BIBLIOGRAFIA

- Aki K., 1964. A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the earth's crust, Geophysics, 29, 665–666.
- Albarello D., Castellaro S., Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola, «Ingegneria Sismica», 2012, 2, pp. 32 – 61.
- Ben-Menahem A. E SINGH S.J., 1981. Seismic Waves and Sources, Springer-Verlag, New York.
- Bindi D., Parolai S., Spallarossa D., Cattaneo M., 2000. Site effects by H/V ratio: comparison of two different procedures, J. Earthq. Eng., 4, 97-113.
- Castellaro S., Mulargia F. E Bianconi L., 2005. Stratigrafia sismica passiva: una nuova tecnica accurata, rapida ed economica, Geologia Tecnica e Ambientale, vol. 3.
- Castellaro, S., and Mulargia, F., 2007. Constrained H/V only estimates of Vs30, Bull. Seism. Soc. Am., submitted.
- Castellaro, S., and Mulargia, F., Estimates of Vs30 Based on Constrained H/V Ratio Measurements Alone, in: Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data, DORDRECHT, Springer, 2009, pp. 85 – 97.
- Castellaro, S., and Mulargia, F, The Effect of Velocity Inversions on H/V, «PURE AND APPLIED GEOPHYSICS», 2009, 166, pp. 567 – 592
- Castellaro, S., and Mulargia, F., VS30 Estimates Using Constrained H/V Measurements, «BULLETIN OF THE SEISMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA», 2009, 99, pp. 761 – 773
- European Commission (2005), User guideline for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibration: Measurement, processing and interpretation, Res. Gen. Dir. Proj. EVG1-CT-2000- 00026 SESAME, Rep. D23.12, 62 pp., Brussels. (Available at http://SESAME-fp5.obs.ujf-grenoble.fr.).
- Fa˙H, D., et al. (2001), A theoretical investigation of average H/V ratios, Geophys. J. Int.,145, 535–549.
- Fa˙H, D., et al. (2003), Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site-effects, J. Seismol., 7, 449–467.
- Foti S., 2000, Multi-Station Methods for Geotechnical Characterisation Using Surface Waves, PhD Diss., Politecnico di Torino, 229 pp..
- Kanai, K., Tanaka, T. (1954). Measurement of the microtremor, Bulletin of Earthquake Research Institute 32, 199–209.
- Ibs-Von Seht M., and Wohlenberg J., Microtremor Measurements Used to Map Thickness of Soft Sediments, Bulletin of the Seismological Society of America,

Vol. 89, No. 1, pp. 250-259, February 1999.

- Lermo J., Chavez-Garcia F.J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, Bulletin of Seismological Society of America, 83, 1574−1594.
- Mcmechan G.A., Yedlin M.J., 1981, Analysis of dispersive wave by wave field transformation, Geophysics, 46, 869-874;
- Mulargia F., Castellaro S., Passive Imaging in Nondiffuse Acoustic Wavefileds, «PHYSICAL REVIEW LETTERS», 2008, 100, pp. 218501-1 - 218501-4.
- Nakamura, Y. (1989), A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Quat. Rep. Railway Tech. Res. Inst., 30 (1), 25–30.
- Nazarian S., Stokoe K.H., 1986, Use of surface waves in pavement evaluation, Transp. Res. Rec, 1070, 132-144.
- Park C.B., Miller R.D., Xia J., 2001, Offset and resolution of dispersion curve in multichannel analysis of surface waves (MASW), proc. SAGEEP 2001.
- Schuster G T, Aksel Q B. 1993. Wave-path Eikonal travel-time inversion: Theory. Geophysics, 58(9): 1314–1323.
- Stokoe K.H., Wright S.G., Bay J., Roesset J.M., 1994, characterization of geotechnical sites by SASW method, in Geophysical characterization of sites, (ISSMFE TC#10) by R.D. Woods (ed), Oxford & IBH Publ., pp. 15-25.
- Xia J., Miller R.D., Park C.B., 1999, Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves, Geophysics, 64, 691-700.
- Yamanaka, H., Dravinski, M., Kagami, H. (1993). Continuous measurements of microtremors on sediments and basement in Los Angeles, California. Bulletin of the Seismological Society of America, 83,1595−1609.

5. ALLEGATO N.1 – Risultati indagini M.A.S.W.

INDAGINE SISMICA COGOLETO – MASW_1C

TAVOLA
1

Ubicazione dell'indagine



Fase di acquisizione dati



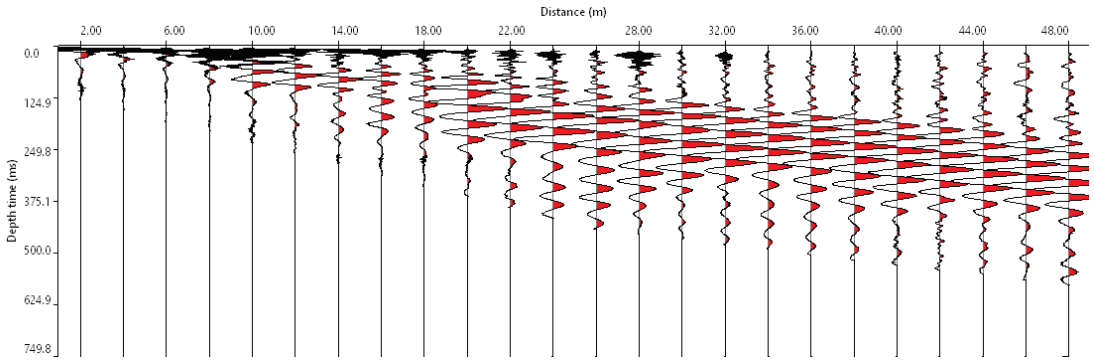
OGGETTO:
Indagine geofisiche MASW

Progetto:
UPGRADING PRESTAZIONALE CORRIDOIO RENO ALPI - TORINO
Adeguamento a modulo 750 metri della linea Savona - Genova
Stazione di Cogoleto (GE)

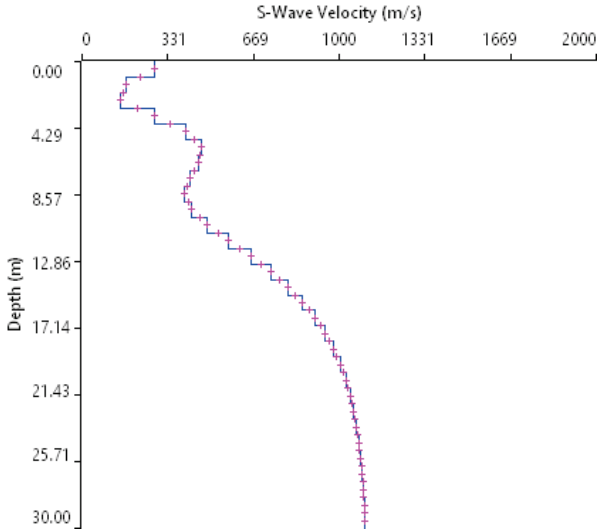
SOING
STRUTTURE & AMBIENTE

Per la SOING Strutture e Ambiente srl	
ELAB	G. Luciani
VERIFICA	A. Morelli
APPROV.	P. Chiara

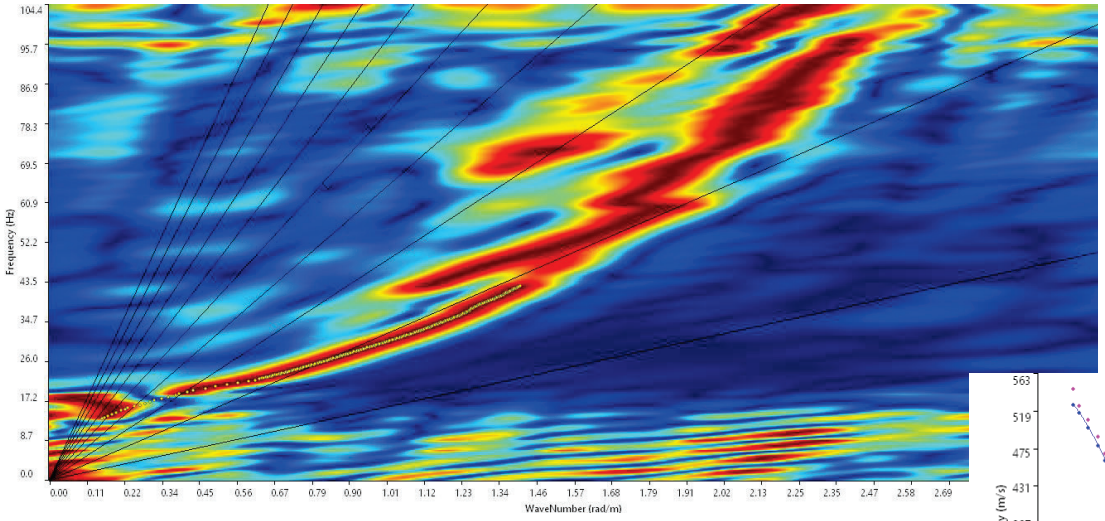
INDAGINE SISMICA COGOLETO – MASW_1C



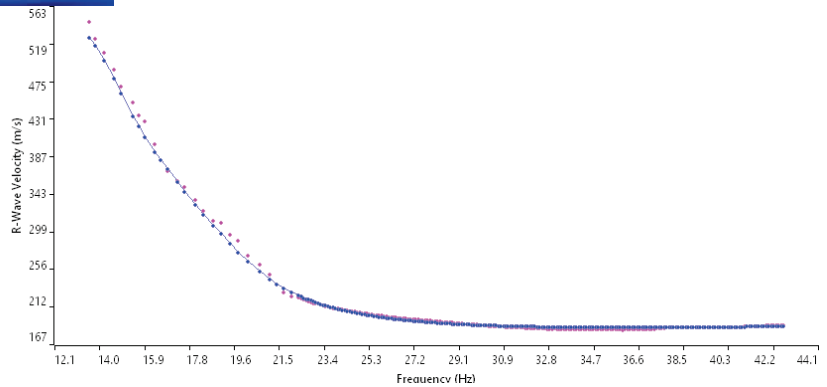
Sismogramma medio utilizzato



Profilo velocità onde S



Spettro F-K



Accoppiamento curve di dispersione

TAVOLA
2

OGGETTO:
Indagine geofisiche MASW

Progetto:
UPGRADING PRESTAZIONALE CORRIDOIO RENO ALPI - TORINO
Adeguamento a modulo 750 metri della linea Savona - Genova
Stazione di Cogoleto (GE)

SOING
STRUTTURE & AMBIENTE

Per la SOING Strutture e Ambiente srl

ELAB	G. Luciani
VERIFICA	A. Morelli
APPROV.	P. Chiara

INDAGINE SISMICA COGOLETO – MASW_2C

TAVOLA
3

Ubicazione dell'indagine



Fase di acquisizione dati



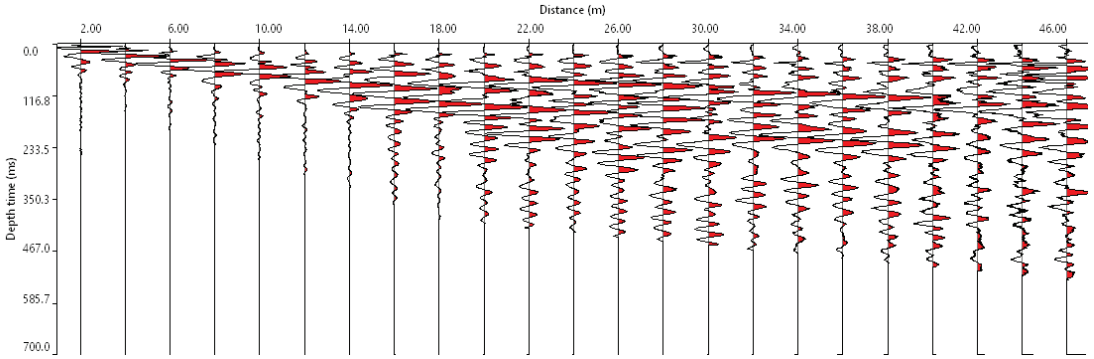
OGGETTO:
Indagine geofisiche MASW

Progetto:
UPGRADING PRESTAZIONALE CORRIDOIO RENO ALPI - TORINO
Adeguamento a modulo 750 metri della linea Savona - Genova
Stazione di Cogoleto (GE)

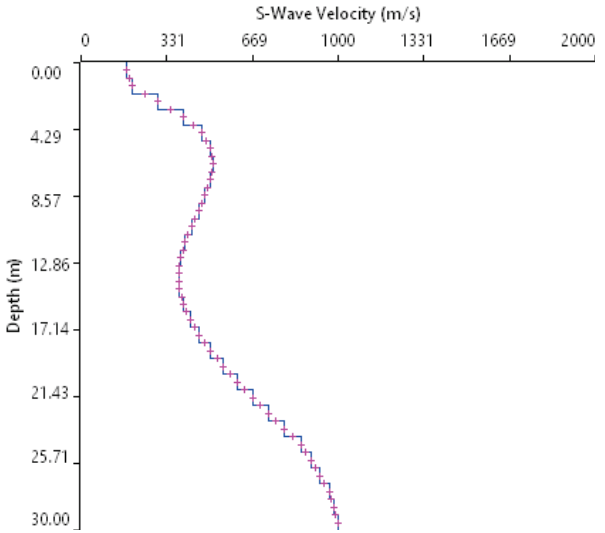
SOING
STRUTTURE & AMBIENTE

Per la SOING Strutture e Ambiente srl	
ELAB	G. Luciani
VERIFICA	A. Morelli
APPROV.	P. Chiara

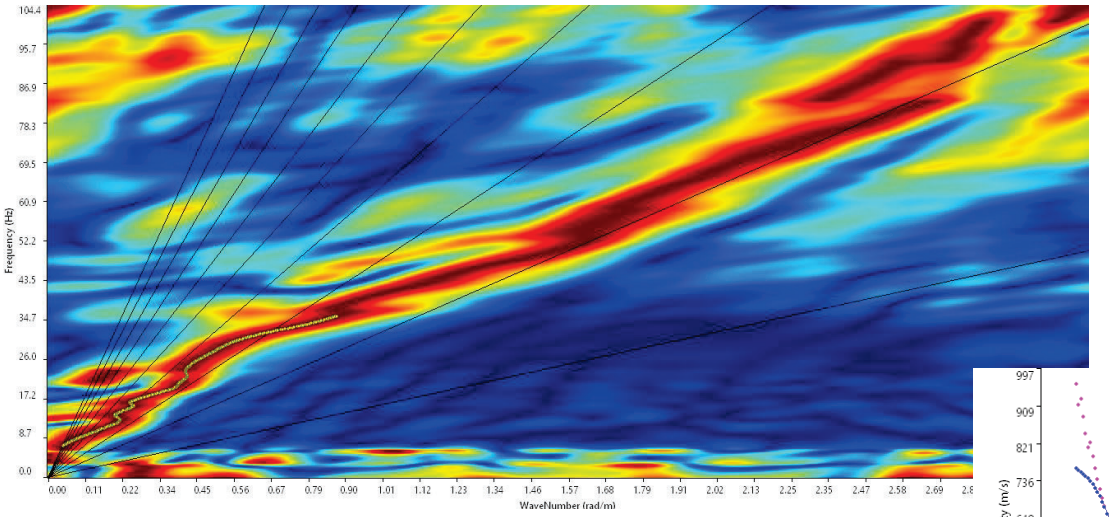
INDAGINE SISMICA COGOLETO – MASW_2C



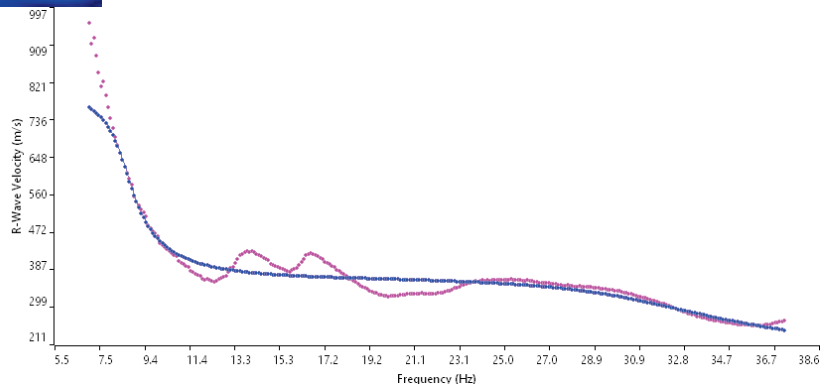
Sismogramma medio utilizzato



Profilo velocità onde S



Spettro F-K



Accoppiamento curve di dispersione

TAVOLA
4

OGGETTO:
Indagine geofisiche MASW

Progetto:
UPGRADING PRESTAZIONALE CORRIDOIO RENO ALPI - TORINO
Adeguamento a modulo 750 metri della linea Savona - Genova
Stazione di Cogoleto (GE)

SOING
STRUTTURE & AMBIENTE

Per la SOING Strutture e Ambiente srl

ELAB	G. Luciani
VERIFICA	A. Morelli
APPROV.	P. Chiara

6. ALLEGATO N.2 – Risultati indagini HVSR

INDAGINI SISMICHE HVSR 1_C

TAVOLA
1

OGGETTO:
Indagine geofisiche HVSR

Progetto:
UPGRADING PRESTAZIONALE CORRIDOIO RENO ALPI - TORINO
Adeguamento a modulo 750 metri della linea Savona - Genova
Stazione di Cogoleto (GE)

Ubicazione Indagine

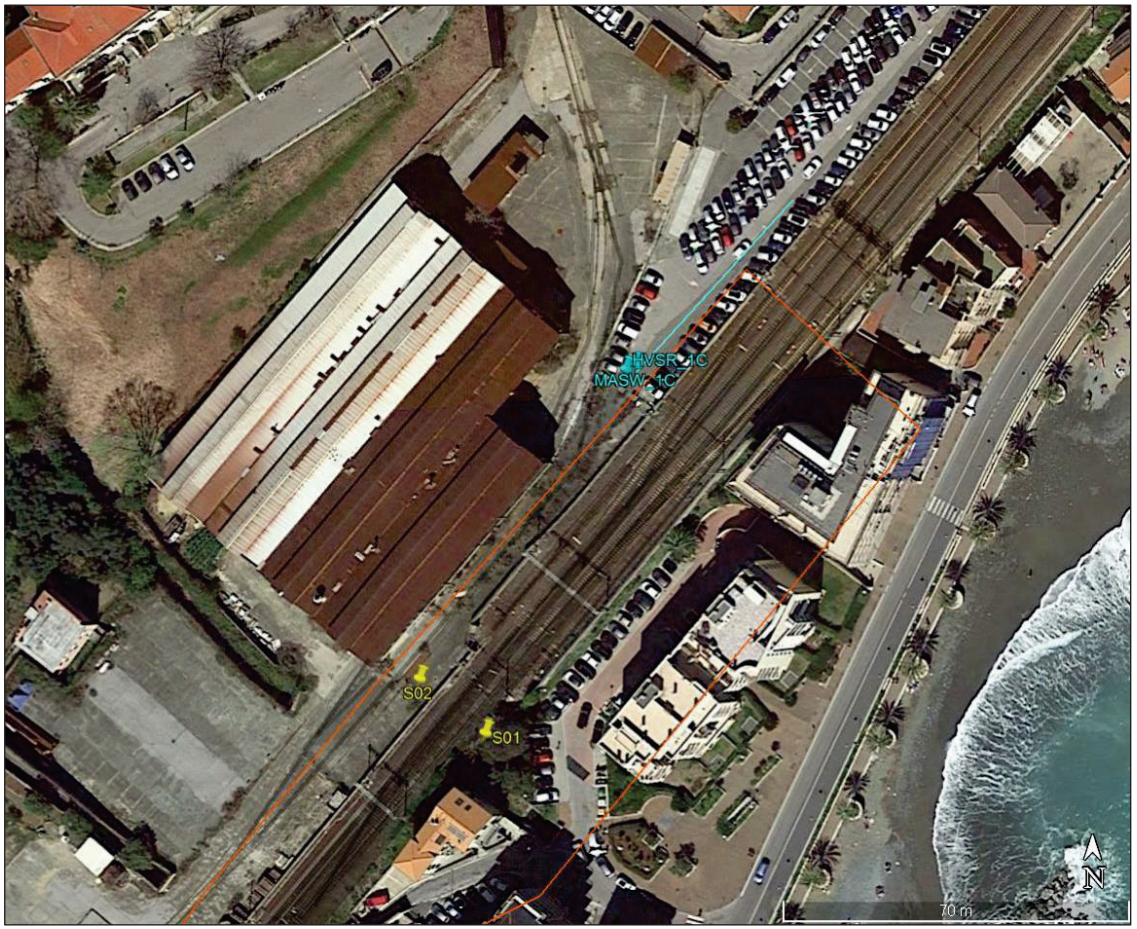


Immagine area indagine



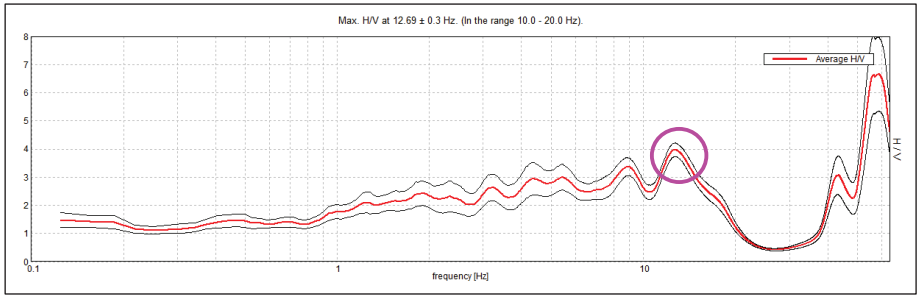
SOING
STRUTTURE & AMBIENTE

Per la SOING Strutture e Ambiente srl

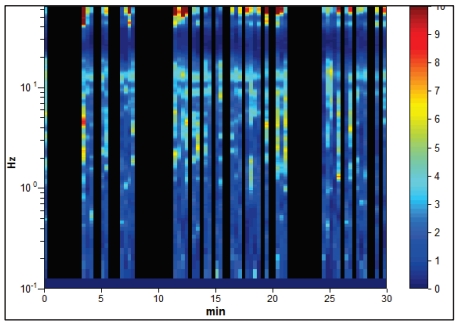
ELAB	**E. Benvenuti**
VERIFICA	A. Morelli
APPROV.	P. Chiara

INDAGINI SISMICHE HVSR 1_C

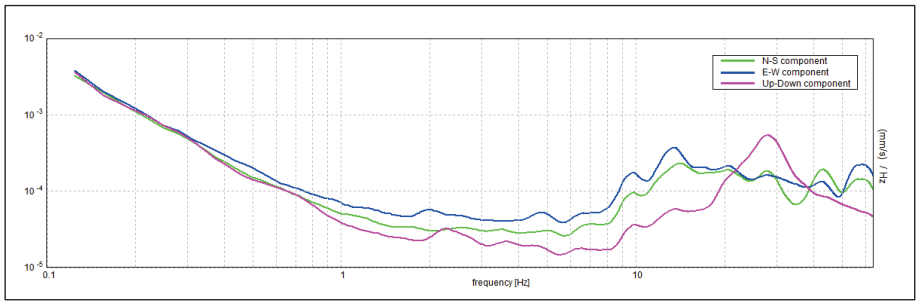
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



H/V TIME HISTORY



SINGLE COMPONENT SPECTRA



ITALFERR, COGOLETO HVSR COGOLETO 1

Strumento: TEP-0155/01-11
Formato dati: 16 byte
Fondo scala [mV]: n.a.
Inizio registrazione: 08/09/20 16:13:20 Fine registrazione: 08/09/20 16:43:20
Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN ; north south; east west ; up down ; Y + Y - ; X + X - ; Z + Z -
Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h30'00". Analizzato 48% tracciato (selezione manuale)
Freq. campionamento: 128 Hz
Lunghezza finestre: 20 s
Tipo di lisciamento: Triangular window
Lisciamento: 12%

Picco H/V a 12.69 ± 0.3 Hz (nell'intervallo 10.0 - 20.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile
[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	12.69 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	10911.3 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5$Hz $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5$Hz	Superato 0 volte su 610	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	18.188 Hz	OK	
$A_0 > 2$	3.97 > 2	OK	
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	|0.02346| < 0.05	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.29769 < 0.63438	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.2396 < 1.58	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ_f	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{logH/V}(f)$	deviazione standard della funzione log $A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$					
Intervallo di freq. [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	0.2 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
log $\theta(f_0)$ per $\sigma_{logH/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

TAVOLA
2

OGGETTO:
Indagine geofisiche HVSR

Progetto:
UPGRADING PRESTAZIONALE CORRIDOIO RENO ALPI - TORINO
Adeguamento a modulo 750 metri della linea Savona - Genova
Stazione di Cogoleto (GE)

SOING
STRUTTURE & AMBIENTE

Per la SOING Strutture e Ambiente srl

ELAB E. Benvenuti
VERIFICA A. Morelli
APPROV. P. Chiara