

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP J84C19000370009

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

PROGETTO DEFINITIVO

LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA

NODO DI BRESCIA

POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA

RELAZIONE

INDAGINI GEOFISICHE

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA Progr. REV.


I N 1 M 1 0 D 6 9 I G G E 0 0 0 1 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	P. Chiara	Maggio 2021	F. Paolucci <i>Dott. Francesco Paolucci</i>	Giugno 2021	L. Barchi <i>LB</i>	Luglio 2021	M. Comedini Novembre 2021



File: IN1M10D69IGGE0001001A.doc

n. Elab.:

	PROGETTO DEFINITIVO LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA					
	RELAZIONE INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE0001 001	REV. A

INDICE

1.	INTRODUZIONE	3
1.1	PREMESSA E SCOPI DELL'INDAGINE GEOFISICA.....	3
2.	METODOLOGIE IMPIEGATE	4
2.1	INDAGINE TOMOGRAFICA ELETTRICA ERT	4
2.1.2	Principi base della tecnica tomografica elettrica (ERT)	5
2.1.3	Proprietà elettriche del suolo ed interpretazione dei valori di resistività.....	5
2.1.4	Configurazione delle misure ed elaborazione dati.....	7
2.2	INDAGINE SISMICA PER ONDE SUPERFICIALI MASW.....	7
2.2.1	Principi di funzionamento e cenni sul metodo	7
2.2.2	Strumentazione utilizzata, configurazione di indagine, codice di configurazione ed inversione dati	9
2.3	INDAGINE HVSR.....	10
2.3.1	Principi di funzionamento e cenni sul metodo	10
3.	RISULTATI.....	15
3.1	PREMESSA.....	15
3.2	RISULTATI TOMOGRAFIE ELETTRICHE ERT 2D – ALLEGATO 1	15
3.2.1	Linea ERT_PD_BS.....	15
3.3	RISULTATI MASW – ALLEGATO 2	15
3.3.1	MASW_PD_BS.....	16
3.4	RISULTATI HVSR – ALLEGATO 3	17
3.4.1	HVSR_PD_BS.....	17
4.	BIBLIOGRAFIA.....	20
5.	ALLEGATO N.1 – RISULTATI INDAGINE TOMOGRAFICA ELETTRICA	22
6.	ALLEGATO N.2 – RISULTATI INDAGINE MASW.....	23
7.	ALLEGATO N.3 – RISULTATI INDAGINE HVSR	24

1. INTRODUZIONE

1.1 Premessa e scopi dell'indagine geofisica

La presente relazione illustra i risultati della campagna di prospezioni geofisiche, condotte secondo le modalità previste nelle specifiche tecniche Italferr ed eseguite a supporto del Progetto Definitivo per il Potenziamento infrastrutturale dello Scalo di Brescia sulla Linea AV/AC Milano – Verona.

Le indagini, la cui ubicazione è riportata in Figura 1.1.1., sono state eseguite utilizzando le seguenti metodologie:

- indagini elettriche tomografiche ERT (n.1);
- indagini sismiche MASW (n.1);
- indagini sismiche HVSr (n.1).

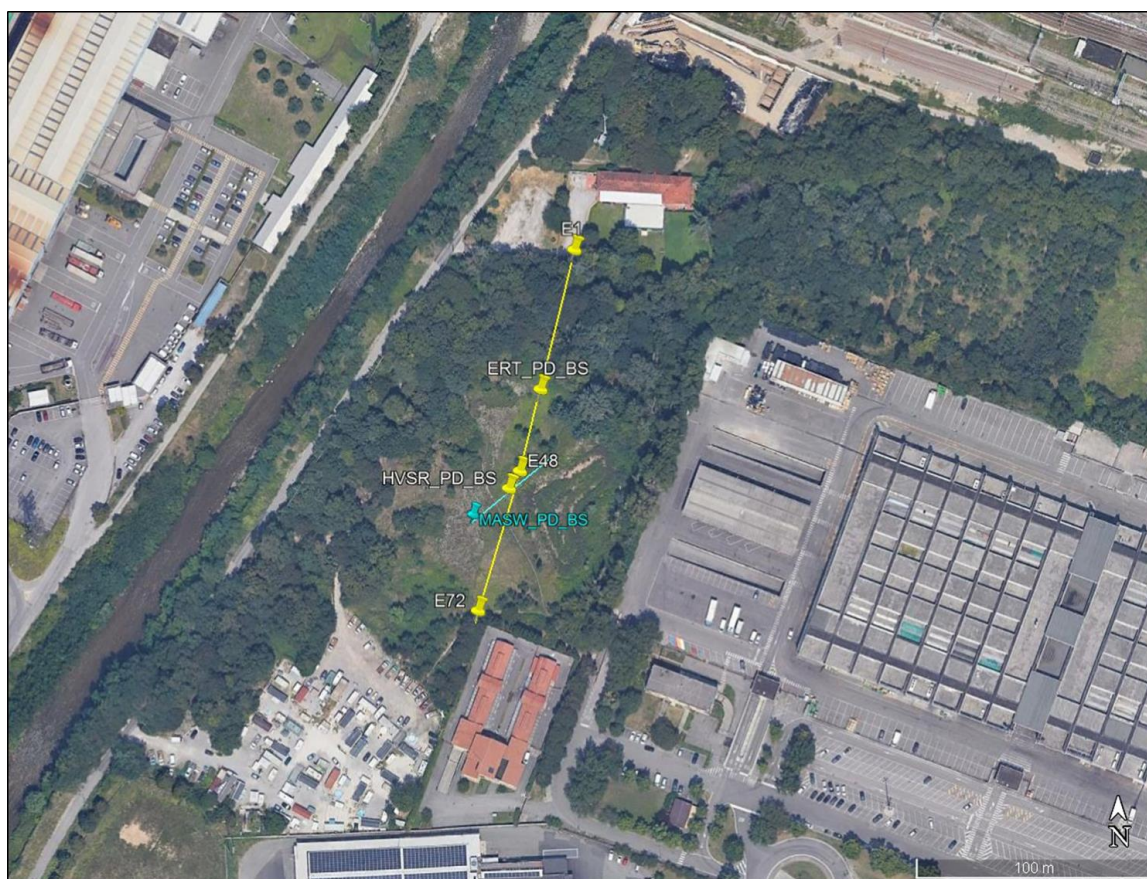


Figura 1.1.1: Ubicazioni delle indagini eseguite – foto satellitare.

La tomografia elettrica bidimensionale, attraverso la misura della distribuzione del parametro di resistività estesa al volume di terreno soggetto ad indagine, è stata eseguita al fine di ottenere un dettaglio diagnostico elettrostratigrafico.

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 descrizione sintetica delle metodologie geofisiche utilizzate.

2. METODOLOGIE IMPIEGATE

2.1 INDAGINE TOMOGRAFICA ELETTRICA ERT


2.1.1 Strumentazione

La strumentazione adottata (Syscal Pro fino a 96 canali a commutazione concentrata, prodotto da IRIS Instruments, Francia – Figura 2.1.1.1), ha permesso di eseguire misure di alta precisione, con correnti indotte fino ad oltre 2 Ampere. Fondamentale in fase di acquisizione dati è stata la continua ed automatica compensazione del potenziale spontaneo, specie nei casi in cui tale valore è risultato essere dell’ordine di qualche decina di milliVolts.



Figura 2.1.1.1: Georesistivimetro - Syscal Pro (Iris Instruments).

Il Syscal-Pro utilizzato, rispetto ai resistivimetri di più classica concezione, ha la possibilità di ricevere su 10 coppie di elettrodi contemporaneamente, abbattendo di un ordine di grandezza il tempo necessario per l’acquisizione.

	PROGETTO DEFINITIVO					
	LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA					
RELAZIONE INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE0001 001	REV. A	FOGLIO 5 di 24

2.1.2 *Principi base della tecnica tomografica elettrica (ERT)*

Il metodo della tomografia elettrica (ERT, Electrical Resistivity Tomography), si basa sulla misura eseguita sulla sequenza di migliaia di quadripoli, ciascuno di essi caratterizzato da due elettrodi di potenziale (detti convenzionalmente MN) che misurano la caduta di potenziale “ ΔV ” a seguito di una corrente elettrica “ I ” immessa nel sottosuolo da una diversa coppia di elettrodi, detti AB. I diversi valori di resistività elettrica misurati (resistività apparenti ρ_a), ciascuno aggregato ad un punto diverso nel volume del terreno, in profondità, dipendono pertanto da “ ΔV ” e “ I ” secondo la seguente relazione generale:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$


che è funzione, oltre che della posizione reciproca dei quattro elettrodi anzidetti (dipendenza contenuta nella costante K , che ne definisce il fattore geometrico), della distribuzione del valore del parametro di resistività elettrica nel sottosuolo interessato dalla propagazione della corrente “ I ”; il parametro citato della resistività elettrica è quello che permette di caratterizzare il diverso comportamento elettrico dei materiali indagati. Esso fornisce un supporto in termini di caratterizzazione del sottosuolo, nonché informazioni estensive per integrare le conoscenze derivanti dalle informazioni stratigrafiche provenienti dalle indagini dirette puntuali, quali sondaggi geognostici, allo scopo di estendere sensibilmente la conoscenza della stratigrafia e di altri attributi geologici, geomorfologici e idrogeologica dei terreni all’intera area oggetto di indagine geofisica.

2.1.3 *Proprietà elettriche del suolo ed interpretazione dei valori di resistività*

La resistività dei sedimenti è controllata principalmente dai seguenti fattori:

- grado di saturazione dei pori,
- porosità,
- fluidi,
- salinità del fluido, se presente nei pori,
- temperatura,
- eventuale presenza di sostanze organiche (idrocarburi, solventi, ecc.),
- presenza di argilla,
- presenza di minerali particolari (ad esempio le miche, minerali metalli),
- grado di compattazione.

La relazione empirica proposta da Archie è valida per suoli avente scarsa

	PROGETTO DEFINITIVO LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA					
	RELAZIONE INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE0001 001	REV. A

componente argillosa (sabbie, ghiaie):

$$\rho_s = \rho_f a \phi^{-n} S^{-m}$$

dove:

- ρ_s : resistività ($\Omega \cdot m$) del suolo parzialmente saturo di fluido,
- ρ_f : resistività ($\Omega \cdot m$) del fluido presente nei pori,
- **S**: frazione del volume di pori occupata dal fluido,
- **m**: coefficiente di saturazione (solitamente assunto essere pari a 2),
- **a**: costante empirica, detta di Winsaur (tipico per sabbia: 0.62)
- **n**: coefficiente empirico, detto di "tortuosità" (tipico per sabbia: 2.15),
- ϕ : porosità del suolo

La resistività del fluido ρ_f è calcolabile qualora si conoscano le concentrazioni di ioni in soluzione (ad es. Cl^- , $SO_4^{=}$, NO_3^- , ecc.) utilizzando la formula:


$$\rho_f = 0.0123 + 10^{(3.562 - 0.955 \log_{10} C)}$$

dove **C** è la somma delle concentrazioni (pesate da opportuni coefficienti ricavati sperimentalmente per ciascun ione) di tutti gli ioni presenti.

In linea generale, la distribuzione della resistività elettrica consente di discriminare eventuali variazioni dei/nei geomateriali dovute alla presenza di litologie differenti o con caratteristiche di maggior o minor cementazione, fratture o discontinuità tettoniche, presenza di sostanze fluidi a comportamento elettrico resistivo o conduttivo all'interno dei pori o fratture dell'ammasso oggetto d'indagine.

Rispetto al modello elettrostratigrafico medio rappresentativo di un sito d'indagine, le variazioni di resistività verso valori più alti sono rappresentate da viraggi verso il colore rosso (così come sono rappresentate le scale di rappresentazione della resistività nelle tavole degli allegati grafici); oppure nel caso di variazioni di umidità, circolazione d'acqua, maggior contenuto in componenti limo-argillose o fini, le resistività si evidenziano graficamente con viraggi verso valori relativamente più bassi (rappresentati dal colore viola-blu-azzurro nelle medesime tavole degli allegati grafici succitati).

Nel caso di presenza di argilla, i cationi adsorbiti sulla superficie delle particelle di tale sostanza offrono cammini addizionali per la corrente elettrica e quindi aumentano la conducibilità dei sedimenti. Esistono relazioni semi-empiriche valide per il calcolo della resistività di sedimenti con componente argillosa non trascurabile, che non riporteremo in questo contesto.

	PROGETTO DEFINITIVO LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA					
	RELAZIONE INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE0001 001	REV. A

Terreni sabbio-limosi o ghiaioso-sabbiosi, se saturi, risultano sempre più conduttivi rispetto ai medesimi asciutti.

Nell'ambito del presente lavoro, i depositi argillosi, limo-argillosi e limo sabbiosi, specie se umidi, manifestano valori di resistività elettrica estremamente bassi, in certe circostanze inferiori alla decina di Ohm·m e fino a pochi Ohm·m.

La presenza di materiali consistenti litoidi superficiali ("trovanti") con litotipi riconducibili ad arenarie presentano comportamento maggiormente resistivo rispetto alle marne argillose od argilliti; ghiaie poligeniche asciutte con scarsa o nulla matrice limosa o limo-argillosa rispondono in modo maggiormente resistivo; qualora sia presente abbondante matrice limo-argillosa e naturalmente in presenza di acque di circolazione, anche tali formazioni possono manifestare comportamenti maggiormente e talvolta marcatamente conduttivi.

2.1.4 Configurazione delle misure ed elaborazione dati

Per l'esecuzione della linea sono state utilizzate basi con cavi multiconduttori fino a 72 elettrodi.

La spaziatura elettrodica minore di 2,5 metri ha fornito una risoluzione ed un dettaglio ottimale per gli scopi prefissati.

Nel profilo d'indagine sono state impiegate configurazioni miste Wenner-Schlumberger e Dipolo-Dipolo, in modo da sfruttare, di ognuna, le diverse sensibilità intrinseche laterali e verticali.

L'elaborazione bidimensionale delle misure di campagna, è stata effettuata con software proprietario a discretizzazione FEM (elementi finiti), correzione topografica, procedura di inversione robusta con possibile inserimento di vincoli complessi, capace di ricostruire la distribuzione di resistività reale in due e tre dimensioni attraverso inversione completa dei dati (basata sulla "Occam inversion").


La sezione geoelettrica è rappresentata nelle figure degli allegati grafici seguendo un criterio di presentazione sinottica. La rappresentazione dei dati consiste in una immagini o vista tomografica del parametro di resistività elettrica.

I risultati grafici di resistività elettrica presentati nell'allegato, sono visualizzati con campiture a colori caratterizzate da una scala cromatica rappresentativa della dinamica dei valori di resistività elettrica incontrati (espressi in Ohm·m); tale rappresentazione consente di identificare aree elettricamente omogenee (medesimo comportamento cromatico). Queste zone di isovalori di resistività elettrica sono anche correlabili ad ammassi di materiale con caratteristiche affini.

2.2 INDAGINE SISMICA PER ONDE SUPERFICIALI MASW

2.2.1 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

	PROGETTO DEFINITIVO					
	LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA					
RELAZIONE INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE0001 001	REV. A	FOGLIO 8 di 24

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 sismostratigrafica di massima, è invece efficace per il calcolo speditivo del parametro $V_{s,eq}$.

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:

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


con

h_i = spessore dello stato i-sesimo;

$V_{s,i}$ = 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, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/sec.

	PROGETTO DEFINITIVO LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA					
	RELAZIONE INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE0001 001	REV. A

Dal valore del parametro V_{seq} 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	<i>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.</i>
B	<i>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.</i>
C	<i>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.</i>
D	<i>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.</i>
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>

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

L'acquisizione MASW è stata effettuata a mezzo di un sismografo ECHO 48/2014. Lo strumento (Figura 2.2.2.1o), prodotto dalla Ambrogeo (Piacenza, Italia), è un sistema di acquisizione con le seguenti caratteristiche tecniche principali:

- Numero di canali 48+1;
- convertitore analogico digitale A/D a 24-bits;
- intervalli di campionamento: 32, 64, 128, 256, 480 e 960 us;
- filtri in acquisizione passa basso: 10-15-25-35-50-70-100-200-280-400 Hz;
- accuratezza nel trigger di 1/32 dell'intervallo di campionamento.


	PROGETTO DEFINITIVO					
	LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA					
RELAZIONE INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE0001 001	REV. A	FOGLIO 10 di 24



Figura 2.2.2.1: 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. L'elaborazione si ottiene attraverso la ricerca manuale dei massimi energetici dello spettro al fine di ricavare i punti appropriati per la costruzione della curva di dispersione da utilizzarsi in un processo di inversione.

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


2.3 INDAGINE HVSR

2.3.1 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

	PROGETTO DEFINITIVO					
	LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA					
RELAZIONE INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE0001 001	REV. A	FOGLIO 11 di 24

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 f_m sia uguale a:

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

dove V_s 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):

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

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

- contenuto in frequenza;
- risposta strumentale;
- l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto.

**PROGETTO DEFINITIVO****LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA
NODO DI BRESCIA
POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI
BRESCIA**RELAZIONE
INDAGINI GEOFISICHE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN1M	10	D 69 IG	GE0001 001	A	13 di 24

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.

2.3.2 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 (Figura 2.3.2.1), 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 \sim);
- 3 canali velocimetrici per la registrazione di vibrazioni forti (fino a ± 5 cm/s \sim);
- 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 2.3.2.1: 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.

	PROGETTO DEFINITIVO					
	LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA					
RELAZIONE INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE0001 001	REV. A	FOGLIO 15 di 24

3. RISULTATI

3.1 Premessa

I risultati relativi alle indagini geofisiche eseguite a supporto del Progetto Definitivo Progetto Definitivo per il Potenziamento infrastrutturale dello Scalo di Brescia sulla Linea AV/AC Milano – Verona sono suddivisi in n. 3 Allegati grafici e sono altresì riportati nei paragrafi seguenti per ciascuna metodologia impiegata.

3.2 RISULTATI TOMOGRAFIE ELETTRICHE ERT 2D – ALLEGATO 1

La localizzazione del profilo ERT_PD_BS eseguito è riportato su immagine satellitare nella Tavola 1 dell'Allegato grafico 1. I principali risultati sono descritti di seguito. La presenza di due sondaggi (S1 e S2) realizzati nelle immediate vicinanze ha consentito di avere una chiave di lettura e di interpretazione della sezione di tomografia elettrica ottenuta.

3.2.1 Linea ERT_PD_BS

Il profilo, eseguito con 72 elettrodi a passo interelettrodo variabile ed inferiore od uguale 2,5 metri e con una lunghezza totale di circa 148,5 metri, ha consentito di indagare i terreni fino alla profondità di circa 25 metri dal piano campagna (Tavole 1 e 2 dell'Allegato 1).

Nella parte superficiale della sezione elettrica si individua un primo elettrostrato con valori di resistività inferiori 100 Ohm*m e spessore variabile tra i 2 ed i 5 metri. Tale elettrostrato è associabile a depositi sabbioso debolmente limosi con ghiaia.

Al di sotto si sviluppa un secondo elettrostrato che presenta valori di resistività compresi inferiori tra i 100 Ohm*m ed i 280 Ohm*m. Questo elettrostrato è associabile a delle sabbie ghiaiose.

E' presente un terzo elettrostrato che ha la forma di una lente all'interno dell'elettrostrato 2.

E' caratterizzato da alti valori di resistività (maggiori di 280) ed è costituito probabilmente da ghiaie in matrice sabbiosa.

3.3 Risultati MASW – ALLEGATO 2

Nell'Allegato grafico 2, per il MASW eseguito, 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 sottosuolo 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 metri 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.

3.3.1 MASW_PD_BS

I risultati del M.A.S.W _PD_BS sono riassunti nella tabella sottostante.

Tabella 3.3.1.1: Modello sismo-stratigrafico dei terreni – M.A.S.W_PD_BS.

Sismostrato	Spessore (m)	Profondità (m dal p.c.)	Vs (m/s)
1	1	0	221
2	1	1	217
3	1	2	236
4	1	3	253
5	1	4	248
6	1	5	229
7	1	6	216
8	1	7	227
9	1	8	268
10	1	9	325
11	1	10	383
12	1	11	433
13	1	12	468
14	1	13	486
15	1	14	487
16	1	15	473
17	1	16	447
18	1	17	413
19	1	18	377
20	1	19	342
21	1	20	315
22	1	21	298
23	1	22	295
24	1	23	307
25	1	24	333

26	1	25	372
27	1	26	420
28	1	27	474
29	1	28	533
30	INF	29	594

Sulla base del profilo di velocità delle onde di taglio V_s nei primi 30 metri dal piano campagna (massima profondità raggiunta), è possibile determinare la velocità equivalente $V_{s,eq}$. Il valore calcolato per $H = 30$ m è pari a $V_{s,(30)} = 326$ m/s; vista la stratigrafia presente ed il profilo di velocità delle onde di taglio, il sito appartiene alla categoria di sottosuolo di fondazione di riferimento “C”.

3.4 Risultati HVSR – ALLEGATO 3

Nell'allegato grafico 3, per l'indagine HVSR_PD_BS 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.

3.4.1 HVSR_PD_BS

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

Picco rilevato	Frequenza (Hz)
1	0,81
2	2,38
3	8,75

Tabella 3.4.1.1 – Picchi in frequenza evidenziati nell'indagine HVSR.

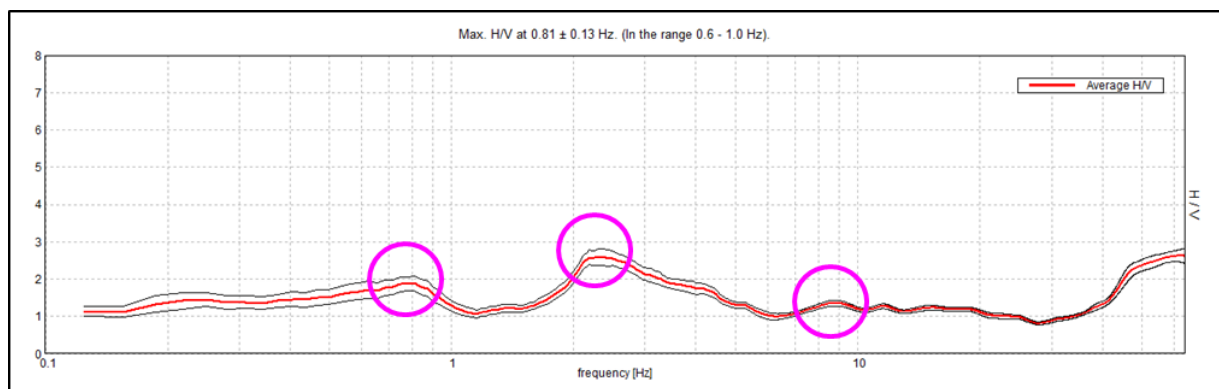


Figura 3.4.1.1: Rapporto H/V in funzione della frequenza.

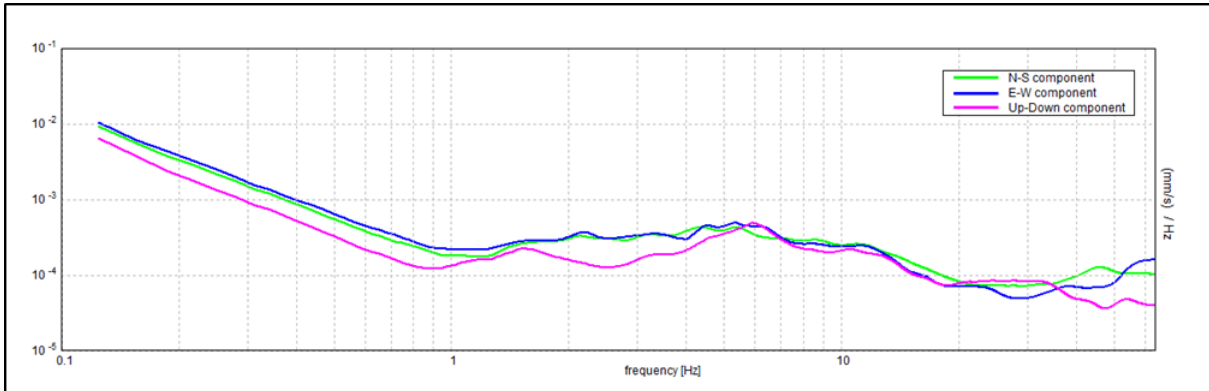


Figura 3.4.1.2: Spettro delle singole componenti.

L'analisi dei risultati ottenuti ha mostrato la presenza di tre picchi significativi generati da contrasti di impedenza nei terreni a diversa profondità.

Il picco a 0,81 Hz non rispetta cinque criteri SESAME.

Considerando una velocità media delle onde di taglio nel pacco dei terreni di circa 450 m/s e sfruttando la seguente formula:

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

si evince una profondità del contatto di circa 139 metri.

Il picco a 2,38 non rispetta due criteri SESAME.

Considerando una velocità media delle onde di taglio nel pacco dei terreni di circa 350 m/s e sfruttando la seguente formula:

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

si evince una profondità del contatto di circa 37 metri.

Il picco a 8,75 Hz non rispetta tre criteri SESAME.

Considerando una velocità media delle onde di taglio nel pacco dei terreni di circa 250 m/s e sfruttando la seguente formula:

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

si evince una profondità del contatto di circa 7,15 metri.

Il rapporto H/V, per frequenze comprese tra 24 e 34 Hz, risulta essere inferiore ad 1. Tale andamento può indicare una inversione di velocità al di sotto dei terreni




PROGETTO DEFINITIVO

**LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA
NODO DI BRESCIA
POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI
BRESCIA**

RELAZIONE
INDAGINI GEOFISICHE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN1M	10	D 69 IG	GE0001 001	A	19 di 24

superficiali.

	PROGETTO DEFINITIVO					
	LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA					
RELAZIONE INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE0001 001	REV. A	FOGLIO 20 di 24

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.
- 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.
- Coffeen, J.A., 1978. «*Seismic exploration fundamentals*». Pubb. Co..
- D. Albarello, S. Castellaro, Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola, «*Ingegneria Sismica*», 2012, 2, pp. 32 – 61.
- Diebold J.B. and Stoffa P.L. 1981. The travelttime equation, tau-p mapping, and inversion of common midpoint data. *Geophysics*, volume 46, p. 238-254.
- Dobrin, M.B., 1976. «*Introduction to Geophysical prospecting*». McGraw-Hill Book Co..
- 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..



PROGETTO DEFINITIVO

**LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA
NODO DI BRESCIA
POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI
BRESCIA**

RELAZIONE
INDAGINI GEOFISICHE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN1M	10	D 69 IG	GE0001 001	A	21 di 24

- Herrmann R.B. and Ammon C. J., 2002. "Computer Programs in Seismology" ver. 3.20.
- 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.
- John m. Reynolds, (1997). "An introduction to applied and environmental geophysics", pp. 415-488, Wiley, England.
- 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.
- Milton B. Dobrin, Carl H. Savit, 1988, Introduction to Geophysical Prospecting, fourth Edition, McGraw-Hill International Editions e R.E. Goodman, 1989, Introduction to Rock Mechanics, second Edition, John Wiley & Sons.
- 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 Wavefiles, «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.
- 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.
- Watanabe, T.; Matsuoka, T.; Ashida, Y., 1999, Seismic traveltime tomography using Fresnel volume approach, SEG Houston 1999, Expanded Abstracts. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1820777>.



PROGETTO DEFINITIVO

UPGRADING PRESTAZIONALE

Potenziamento Infrastrutturale della linea AV/AC Milano – Verona

Stazione di Brescia Scalo

RELAZIONE
INDAGINI GEOFISICHE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NIXX	00 D 69	IG	GE0XXX 001	A	20 di 30

5. ALLEGATO N.1 – Risultati indagine tomografica elettrica

INDAGINE TOMOGRAFICA ELETTRICA ERT_PD_BS

Ubicazione dell'indagine



Fase di acquisizione dati



TAVOLA
1

OGGETTO:

Indagine geofisiche
TOMOGRAFIA
ELETTRICA

Progetto Definitivo:

POTENZIAMENTO
INFRASTRUTTURALE
DELLO SCALO DI
BRESCIA –
LINEA A/VAC MILANO –
VERONA, NODO DI
BRESCIA



Per la
**SOING Strutture e
Ambiente srl**

ELAB. M.G. Idilli
VERIFICA A. Morelli
APPROV. P. Chiara

INDAGINE TOMOGRAFICA ELETTRICA ERT_PD_BS

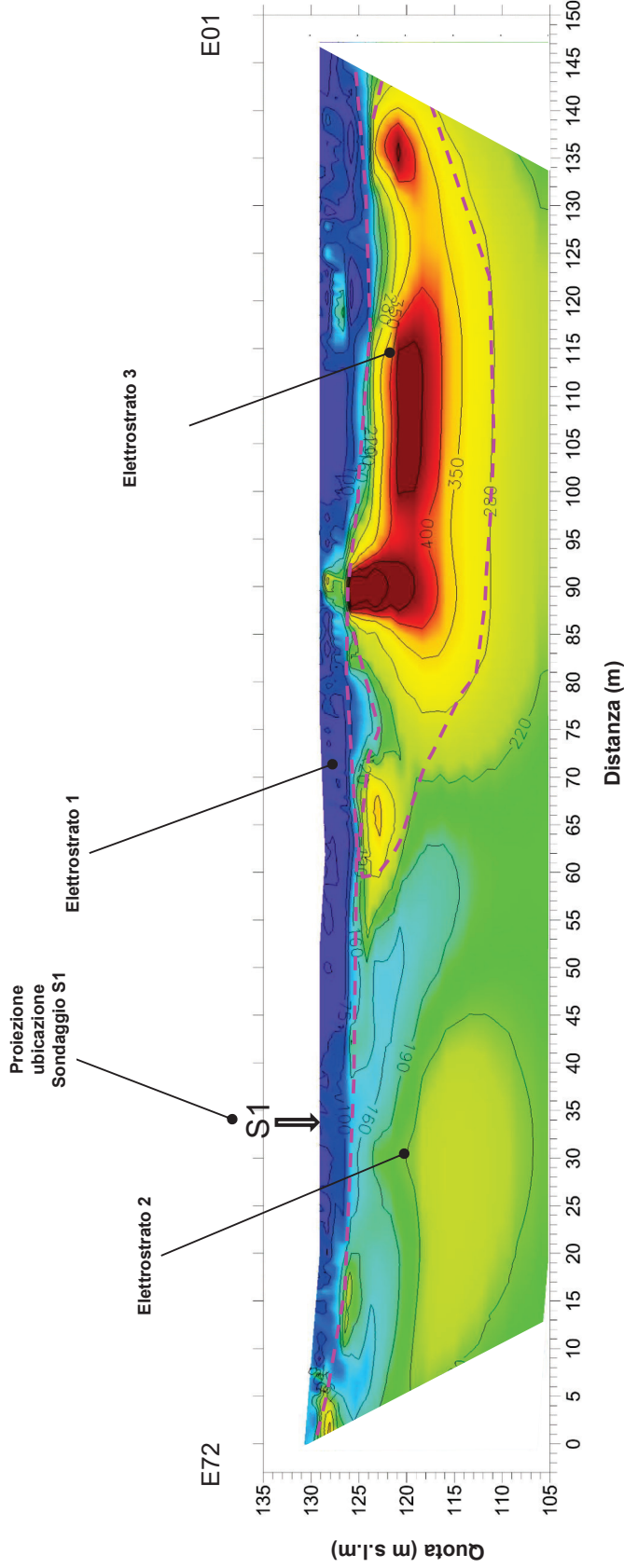
TAVOLA
2

OGGETTO:

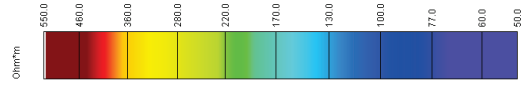
Indagine geofisiche
TOMOGRAFIA
ELETTRICA

Progetto Definitivo:

POTENZIAMENTO
INFRASTRUTTURALE
DELLO SCALO DI
BRESCIA -
LINEA A/VAC MILANO -
VERONA, NODO DI
BRESCIA



Scala di resistività



Per la
**SOING Strutture e
Ambiente srl**

ELAB

M.G. Idilli

VERIFICA

A. Morelli

APPROV.

P. Chiara



PROGETTO DEFINITIVO

UPGRADING PRESTAZIONALE

Potenziamento Infrastrutturale della linea AV/AC Milano – Verona

Stazione di Brescia Scalo

RELAZIONE
INDAGINI GEOFISICHE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NIXX	00 D 69	IG	GE0XXX 001	A	23 di 30

6. ALLEGATO N.2 – Risultati indagine MASW.

INDAGINE SISMICA – MASW_PD_BS

Ubicazione dell'indagine



Fase di acquisizione dati MASW



TAVOLA
1

OGGETTO:

Indagine geofisiche
MASW

Progetto Definitivo:

POTENZIAMENTO
INFRASTRUTTURALE
DELLO SCALO DI
BRESCIA –
LINEA AV/AC MILANO –
VERONA, NODO DI
BRESCIA



Per la
**SOING Strutture e
Ambiente srl**

ELAB

G. Luciani

VERIFICA

A. Morelli

APPROV.

P. Chiara



PROGETTO DEFINITIVO

UPGRADING PRESTAZIONALE

Potenziamento Infrastrutturale della linea AV/AC Milano – Verona

Stazione di Brescia Scalo

RELAZIONE
INDAGINI GEOFISICHE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NIXX	00 D 69	IG	GE0XXX 001	A	26 di 30

7. ALLEGATO N.3 – Risultati indagine HVSR

INDAGINI SISMICHE HVSR_PD_BS

Ubicazione Indagine



Immagine area indagine



TAVOLA
1

OGGETTO:

Indagine geofisiche
HVSR

Progetto Definitivo:

POTENZIAMENTO
INFRASTRUTTURALE
DELLO SCALO DI
BRESCIA –
LINEA AVIAC MILANO –
VERONA, NODO DI
BRESCIA



Per la
**SOING Strutture e
Ambiente Srl**

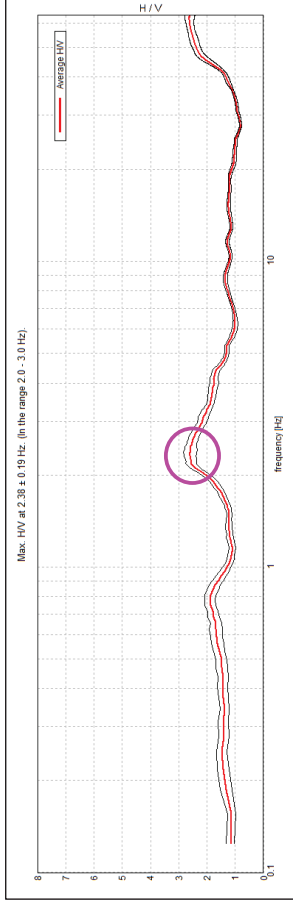
ELAB E. Benvenuti

VERIFICA A. Morelli

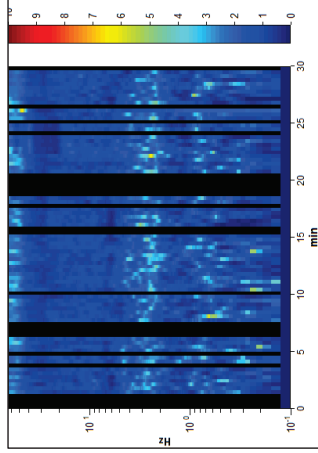
APPROV. P. Chiara

INDAGINI SISMICHE HVSR_PD_BS

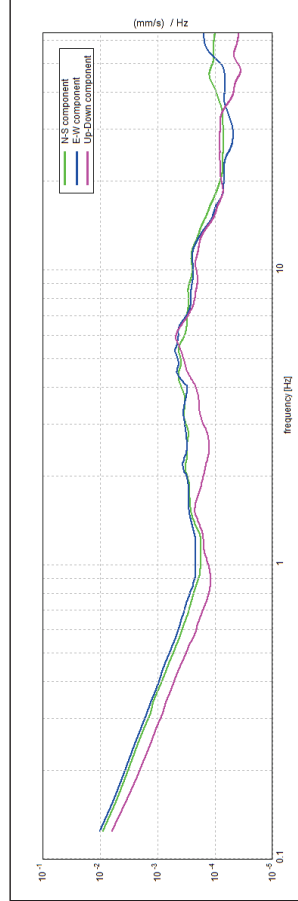
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



H/V TIME HISTORY



SINGLE COMPONENT SPECTRA



ITALFERR BRESCIA, BRESCIA HVSR_PD_BS

Strumento: TEP-0155/01-11
 Formato dati: 16 byte
 Fondo scala [mV]: n.a.
 Inizio registrazione: 04/05/21 12:08:12 Fine registrazione: 04/05/21 12:38:12
 Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN; north south; east west; up down;
 Y + Y-; X + X-; Z + Z-
 Data GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h30'00"
 Freq. campionamento: 128 Hz
 Lunghezza finestra: 20 s
 Tipo di lisciamiento: Triangular window
 Lisciamiento: 10%

Picco H/V a 2.38 ± 0.19 Hz (nell'intervallo 2.0 - 3.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	2.38 > 0.50	OK
$n_c(f_0) > 200$	3135.0 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5$ Hz	Superato 0 volte su 115	OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5$ Hz		

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$	1.594 Hz	OK
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$	5.031 Hz	OK
$A_0 > 2$	2.60 > 2	OK
$f_{picco}(A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)) = f_0 \pm 5\%$	0.07835 < 0.05	NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.18607 < 0.11875	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.228 < 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
$A_{HV}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{HV}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{HV}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{HV}(f)$. $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{HV}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{logHV}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{HV}(f)$
$\theta(f_0)$	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 $\sigma_{logHV}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

TAVOLA

3

OGGETTO:

Indagine geofisiche
 HVSR

Progetto Definitivo:

POTENZIAMENTO
 INFRASTRUTTURALE
 DELLO SCALO DI
 BRESCIA -
 LINEA AV/AC MILANO -
 VERONA, NODO DI
 BRESCIA



Per la SOING Strutture e Ambiente Srl

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

