

COMUNE DI SAN FELICE DEL BENACO
PROGETTO DI MESSA IN SICUREZZA DI UN PENDIO INTERESSATO
DA UN DISSESTO IDROGEOLOGICO (RIPRISTINO DEL VERSANTE
MEDIANTE OPERE GEOTECNICHE IN TERRA RINFORZATA)

TITOLO DOCUMENTO:

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA
COMPONENTE GEOLOGICO-GEOTECNICA-SISMICA

PROGETTISTA GEOLOGO DOTT. GEOL. MAURO PIAZZA Via Sanson N.20 25123 BRESCIA – Tel. 329 4320996		COMMITTENTE CAMPING VILLAGE WEEKEND VIA VALLONE DELLA SELVA N.2 25010 SAN FELCE DEL BENACO		
		NUMERO		
Numerazione Progetto N. 20/17		1.0		

Redatto	Approvato	Ragione dell'emissione	Periodo	Revisione
M. Piazza	M. Piazza	Prima emissione	Aprile _ 2017	0



Indice generale

1.	INTRODUZIONE	pag. 3
1.1	Premesse.....	pag. 3
1.2	Riferimenti normativi.....	pag. 3
2.	ATTIVITA' PROPEDEUTICHE AL PROGETTO ESECUTIVO	pag. 4
2.1	Riferimento agli studi di governo del territorio.....	pag. 4
2.2	Inquadramento geologico.....	pag. 7
2.3	Indagini geofisiche.....	pag. 9
2.4	Elaborazione del modello geologico.....	pag. 10
2.5	Elaborazione del modello geotecnico.....	pag. 12
2.6	Definizione della pericolosità sismica locale.....	pag. 14
3.	CONCLUSIONI E PRESCRIZIONI	pag. 16

ALLEGATI:

- Indagine geofisica mediante sismica a rifrazione e HVSR.

NOTA: congiuntamente alla presente relazione sarà predisposta l'**Asseverazione di congruità dei contenuti della Relazione geologica** ai requisiti richiesti dal punto 6.2.1 delle N.T.C. - D.M. 14.01.2008 e/o dalla D.G.R. IX 2616/2011 (**Mod. 9**).

1- INTRODUZIONE

1.1 - Premesse

Su incarico del Geom. Roberto Del Mancino, con Studio a San Felice del Benaco in Via Cavour n.30, per conto del Camping Village Weekend, è stata redatta la presente relazione geologica e geotecnica, propedeutica (ai sensi della D.G.R. IX/2616/201 e del Capitolo-6 delle NTC_2008), all'ottenimento del titolo abilitativo per il progetto di “Messa in sicurezza di un pendio interessato da un dissesto idrogeologico”, avvenuto nel mese di agosto del 2016 all'interno del camping, sito in Via Vallone della Selva N.2, comune di San Felice del Benaco.

La presente relazione è stata sviluppata per definire, allo stato attuale, la situazione lito-stratigrafica del pendio interessato dal dissesto, e NON per valutare le cause dello stesso: queste ultime sono, infatti, molto chiare, e sono legate a storiche problematiche idrauliche che sono state analizzate, e saranno successivamente superate, mediante uno specifico studio idraulico affidato al dott. ing. Enrico Corinaldesi. Si anticipa, che le opere geotecniche necessarie al ripristino del versante oggetto di studio saranno realizzate con la tecnica delle Terre Rinforzate (NTC-2008 _ P.6.8 _ Opere di materiali sciolti rinforzati).

Il lavoro è stato espletato secondo le seguenti fasi:

- 1) vari sopralluoghi per valutare lo stato di fatto,
- 2) raccolta di documentazione geologica riguardante il sito di progetto, in particolare le indicazioni contenute nello Studio Geologico, a supporto del PGT, redatto dal dott. Geol. Rosanna Lentini ed approvato nel mese di Gennaio del 2012,
- 3) definizione ed esecuzione del piano di indagini geognostiche (mediante prove speditive in sito, e soprattutto mediante indagine sismica eseguita dal dott. Massimo Compagnoni con strumentazione del SismoSoilLab del Politecnico di Milano),
- 4) definizione del modello geologico e del modello geotecnico a lungo termine,
- 5) definizione della categoria di sottosuolo,
- 6) definizione dei parametri e dei coefficienti sismici.

1.2 – Riferimenti normativi

Per quanto attiene alle competenze del geologo l'opera in oggetto comporta l'osservazione della normativa nazionale e regionale vigente tra cui ricordiamo le principali:

- Circolare del Ministero LL.PP. del 09/01/96 n. 218/24/3: “Istruzioni applicative per la redazione della relazione geologica e della relazione geotecnica”;
- OPCM n. 3274 del 20 marzo 2003, pubblicata sul supplemento ordinario 72 alla Gazzetta Ufficiale n. 105 del 8 maggio 2003 recante “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”
- Decreto Ministeriale (Infrastrutture e Trasporti) del 14/01/2008 con cui si approvano le “Norme tecniche per le costruzioni” e Circolare Ministeriale esplicativa;
- DGR 28 maggio 2008 n. VIII/7374 “Criteri e indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del P.G.T., in attuazione dell’art. 57, comma 1, della l.r. 12/2005”,
- D.G.R. 2129/2014 “Nuova classificazione sismica regionale”,
- LR 33/2015 “Costruzioni in zona sismica e relativa vigilanza”,
- DGR 5501/2016 “Criteri attuativi previsti dalla LR 33/2015”.

Tali normative sono state prese a riferimento per la stesura della relazione, insieme ad altre ad esse collegate ed alle numerose circolari e linee guida.

2 – ATTIVITA' PROPEDEUTICHE AL PROGETTO ESECUTIVO

2.1 – Riferimento agli studi di governo del territorio

Per quanto riguarda la fattibilità geologica, la tavola del PGT identificata come T11SG - “Carta della Fattibilità per l'applicazione delle norme geologiche di piano” inserisce l’area in questione nella **CLASSE 3 - FATTIBILITÀ CON CONSISTENTI LIMITAZIONI**: un estratto della tavola è inserito di seguito come Figura-1.

Sulla base del rischio idrogeologico e delle situazioni di pericolosità sono state distinte otto sottoclassi; l’area oggetto di studio è inserita nella **SOTTOCLASSE 3d**, nella quale sono inserite le aree *“interessate da diffusi fenomeni di intensa erosione e/o di instabilità superficiale. Aree a pericolosità sismica locale H2 per le quali è richiesto in fase progettuale un livello di approfondimento 3 ”*. In questa sottoclasse si hanno consistenti limitazioni alla modifica della destinazione d'uso, *derivanti da versanti interessati da fenomeni di instabilità prevalentemente di tipo superficiale, in graduale evoluzione o anche quiescenti*.

Sono consentiti, in particolare, **interventi di viabilità pubblica e opere di urbanizzazione.**

La loro realizzazione è subordinata alla predisposizione di una relazione geologica eseguita *ai sensi del D.M.LL.PP. 14/01/2008, supportata da indagini geognostiche mediante prove in situ (sondaggi, prove penetrometriche, **indagini sismostratigrafiche**, ecc.) e/o in laboratorio su campioni di terreno. Lo studio geologico dovrà valutare la compatibilità dell'intervento con le caratteristiche geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche dell'area, con **particolare attenzione alla stabilità dei luoghi, alla regimazione delle acque superficiali ed in funzione degli eventuali interventi di bonifica del dissesto e/o di messa in sicurezza del versante (consolidamento, ecc.). Dovranno essere valutate attentamente le modalità realizzative per qualsiasi tipo d'intervento ed in particolare di quelli che prevedano l'esecuzione di operazione di scavo, predisponendo all'occorrenza opere di contenimento preventivo e/o di consolidamento del versante. Eventuali interventi di rimodellamento del terreno (riprofilatura) potranno essere consentiti solo se finalizzati alla bonifica dei dissesti e/o alla messa in sicurezza del versante.***

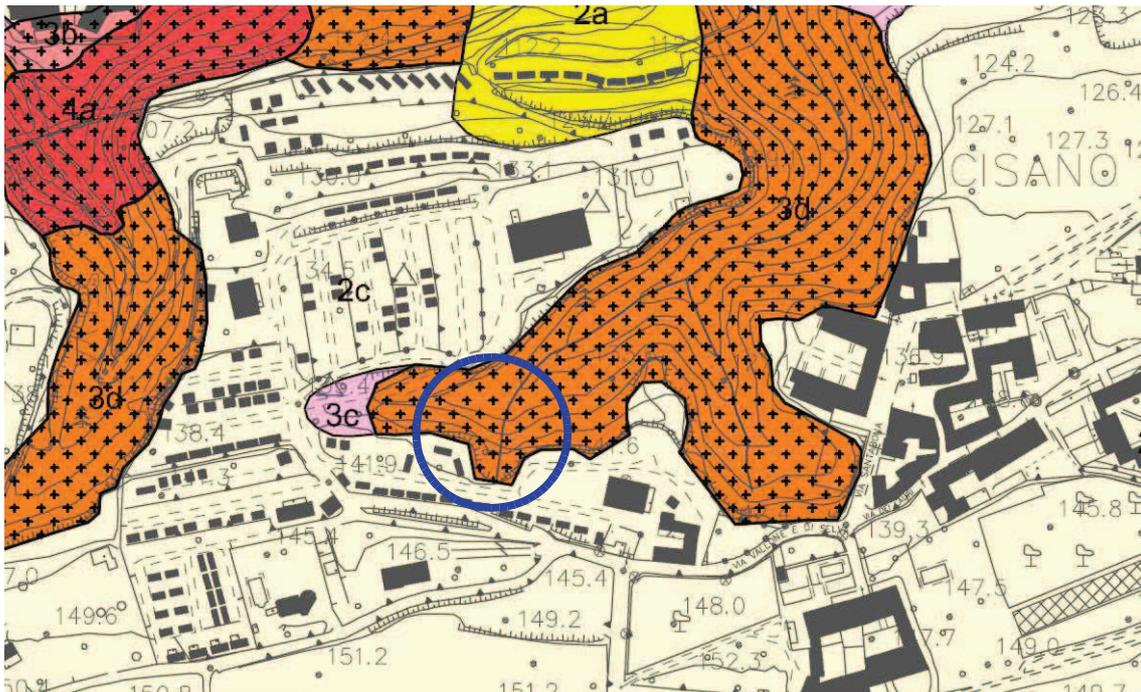


Figura-1 _ Estratto “Carta della fattibilità ...” (area in cerchio blu)

Alle “Norme geologiche di attuazione”, valide per ciascuna classe di fattibilità, devono essere aggiunte le prescrizioni generali di carattere sismico (Scenari di Pericolosità Sismica Locale, all. 5 DGR n.8/1566 del 22/12/2005).

NOTA_2: per gli effetti dovuti alle amplificazioni topografiche e litologiche, è necessaria l'applicazione del 2° livello di approfondimento previsto dal già citato All.5, che consente una caratterizzazione semi-quantitativa degli effetti di amplificazioni attesi, in quanto fornisce una stima della risposta sismica dei terreni in termini di Valore di Amplificazione (Fa).

LEGENDA

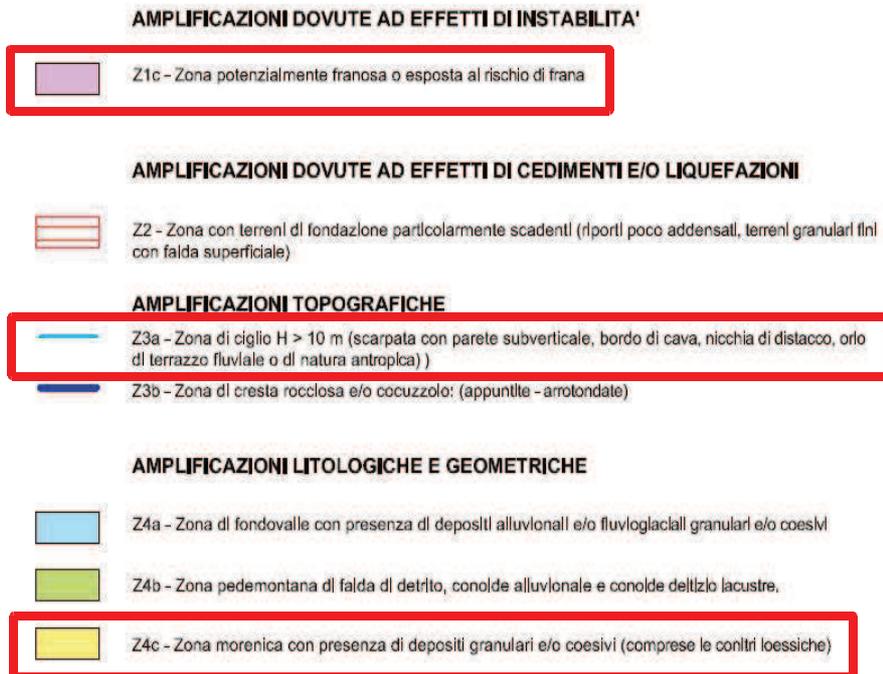


Figura-3 _ Estratto Legenda “Carta di pericolosità sismica locale”

Per una valutazione approfondita di questi aspetti si rimanda al **paragrafo 2.6** della presente relazione.

2.2 – Inquadramento geologico

Lo studio è stato condotto ai sensi della D.G.R. IX/2616/2011 e del capitolo 6 “PROGETTAZIONE GEOTECNICA” delle “NTC_2008” entrate in vigore il giorno 1 luglio 2009, in particolare del paragrafo 6.1.2 “PRESCRIZIONI GENERALI” che così recita: “*Le scelte progettuali devono tener conto delle prestazioni attese delle opere, dei caratteri geologici del sito e delle condizioni*”

ambientali.” Pertanto deve essere eseguito uno “studio rivolto alla caratterizzazione e modellazione geologica” i cui risultati “devono essere esposti in una specifica relazione geologica”.

L'inquadramento geologico è stato sviluppato in modo da costituire un utile elemento di riferimento per il progettista e per inquadrare i problemi geotecnici.

2.2.1 – Geologia e geomorfologia

La Figura-4 sottostante è tratta dalla tavola del PGT identificata come T01SG - “Carta geologica e strutturale con elementi geomorfologici”, e l'area è evidenziata con un cerchio rosso.

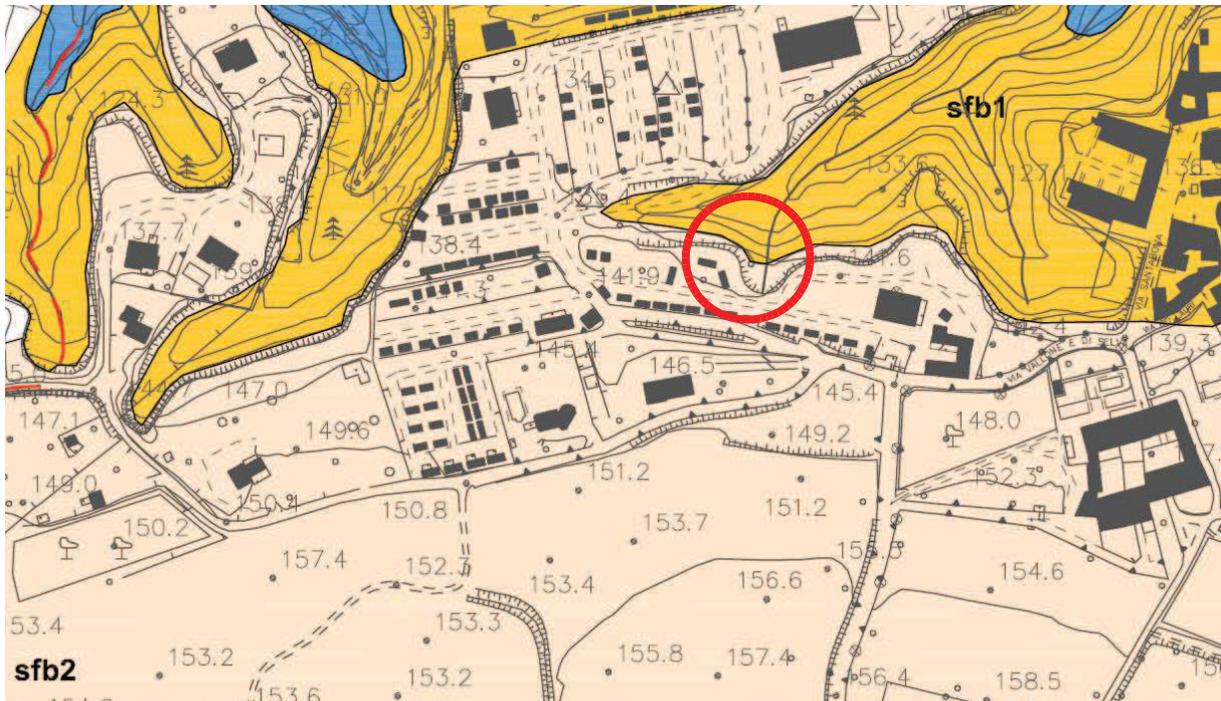


Figura-4_ Estratto “Carta geologica e strutturale...”

Nell'area oggetto di studio è segnalata (con color rosa) la presenza di **Depositi di contatto glaciale (sfb2)**, ragionevolmente posizionati, in corrispondenza del ciglio morfologico, su **Depositi Morenici (sfb1)**, evidenziati con color senape, che affiorano verso valle. Entrambe le unità sono datate Pleistocene Superiore, e sono appartenenti all'Unità di San Felice del Benaco.

Queste unità lito-stratigrafica quaternaria sono ragionevolmente costituite da “*depositi morenici di cordone formano l'ossatura delle cerchie moreniche delineando per le avanzate delle masse glaciali i fronti di massima espansione in corrispondenza dei quali si aveva l'accumulo caotico dei*

materiali glaciali. Sono costituiti da diamicton massivi per lo più a supporto clastico (Dcm) ma talora a supporto di matrice (Dmm). Risultano frequentemente presenti anche grossi trovanti poligenici con dimensioni fino a vari m3.

Le problematiche dovute alle **dinamiche geomorfologiche del sito** sono già state anticipate nei paragrafi precedenti, e sono fedelmente evidenziate anche nella tavola del PGT identificata come T02a SG - “Carta della dinamica geomorfologica e del reticolo idrografico”.

Si segnala, infine, che nella tavola del PGT identificata come T13SG - “**Carta del dissesto con legenda uniformata PAI**”, non è segnalato nulla per l'area oggetto di studio.

2.2.2 – Idrogeologia

In generale si può affermare che i Depositi glaciali sopra indicati, molto addensati e con matrice limoso-sabbiosa, siano caratterizzati da bassa permeabilità; di conseguenza non possono partecipare ad alimentare falde locali, tipiche di queste zone, che normalmente restano indipendenti rispetto all'andamento generale della tavola d'acqua e costituiscono dei sistemi isolati, spesso in contrasto con l'idrogeologia delle aree circostanti.

Tenendo poi conto del limitato volume degli scavi, si ritiene che in alcun modo l'opera oggetto di studio **possa creare scompensi all'assetto idrogeologico** dell'area.

Per quanto riguarda la **falda freatica, le linee isopiezometriche** inserite nella tavola del PGT identificata come T04SG - “Carta idrogeologica con indicazioni sulla vulnerabilità degli acquiferi” (con area in cerchio rosso), indicano un **valore prossimo a 70m s.l.m.**

Essendo la locale quota topografica pari a circa 142 metri s.l.m., **si deduce che la soggiacenza della falda** (profondità rispetto alla superficie topografica), risulti **superiore a 70.0m.**

2.3 – Indagini geofisiche

Vista l'impossibilità di accedere con mezzi meccanici (sonde o penetrometri) alla zona dove si vorrebbe impostare l'opera di ripristino e di consolidamento del pendio interessato dal dissesto idrogeologico, l'indagine geognostica è stata condotta mediante un metodo indiretto (**indagine simica** eseguita dal dott. Massimo Compagnoni con strumentazione del SismoSoilLab del

Politecnico di Milano), che ha consentito di indagare il corpo di frana e l'orlo della stessa fino ad una profondità pari a circa 10.0m., e di:

- ◆ ricostruire, mediante sismica a rifrazione, la stratigrafia lungo i due stendimenti (sezioni 1-D),
- ◆ ipotizzare la natura dei terreni,
- ◆ definire le loro caratteristiche litotecniche,
- ◆ eseguire la caratterizzazione sismica del sito mediante 3 indagini HVSR, ai sensi del DM 14.01.2014, con definizione dell'andamento delle Vs30 e della categoria di sottosuolo.

La relazione interpretativa delle **indagini sismiche** è riportata come **Allegato N.1**

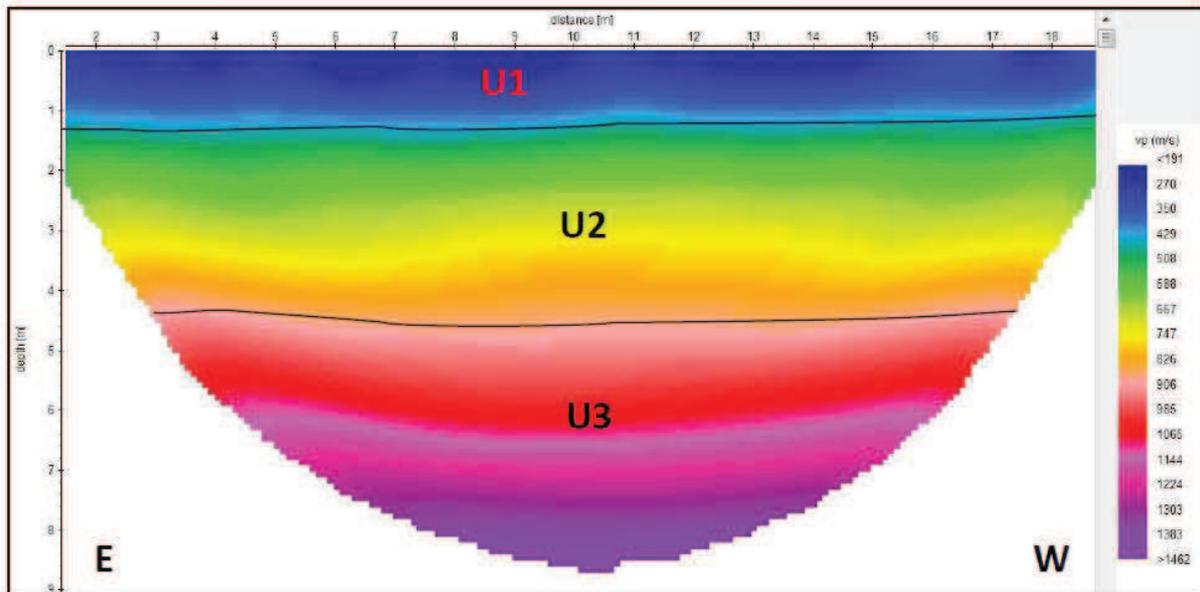
2.4 – Elaborazione del modello geologico

Le informazioni ottenute mediante l'indagine sismica, unitamente alle osservazioni di campagna hanno consentito di elaborare un modello geologico in corrispondenza delle sezioni indagate (evidenziate in Figura-5), e di estrapolare la situazione lito-stratigrafica lungo la sezione più rappresentativa del pendio oggetto del dissesto (posizionata al contorno della sezione N.2 di progetto).



Figura-5_ Estratto indagine sismica con posizione delle 2 linee di stesa e delle 3 indagini HVSR

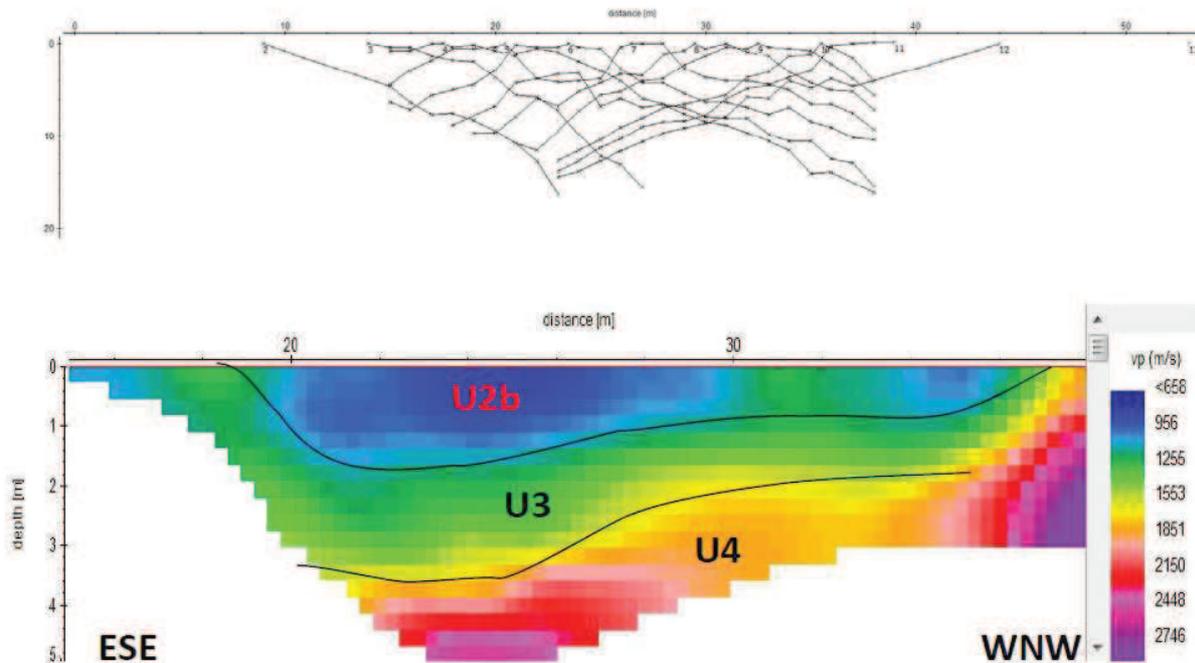
2.4.1 - Sezione ST-1: è la sezione estratta dall'indagine sismica a rifrazione eseguita in corrispondenza del corpo di frana (orientata E-W, circa 9.0m di profondità). Si riporta in Figura-6 l'elaborazione tomografico del dott. Massimo Compagnoni e, di seguito, le Unità individuate.



- **UNITA'-1: materiale in frana rimaneggiato** costituito da terreno limoso-argilloso con sabbia, soffice ($V_p < 400$ m/s), con spessore variabile da 1.0m a 2.0m lungo la stesa,
- **UNITA'-2a: materiale in frana mobilitato** costituito da terreno limoso-argilloso con sabbia, poco consistente (V_p tra 500 m/s e 700 m/s), con spessore variabile da 2.0m a 3.0m lungo la stesa,
- **UNITA'-2b: deposito morenico non mobilitato** costituito da terreno limoso-argilloso con sabbia, moderatamente consistente (V_p tra 700 m/s e 800 m/s), con spessore pari a circa 1.0m lungo la stesa,
- **UNITA'-3: deposito morenico** costituito da costituito da terreno limoso-sabbioso con ciottoli, consistente (V_p tra 900 m/s e 1500 m/s), con spessore maggiore di 4.0m lungo la stesa.

2.4.2 - Sezione ST-2: è la sezione estratta dall'indagine sismica a rifrazione (orientata E-SE - W-NW., fino a circa 6.0m di profondità), eseguita in corrispondenza del ciglio del pendio. Si riportano

in Figura-7 le dromocrone e l'elaborazione tomografico del dott. Massimo Compagnoni e, di seguito, le Unità individuate.



- **UNITA'-2b: deposito morenico non mobilitato** costituito da terreno limoso-argilloso con sabbia, **moderatamente consistente** ($V_p < 800$ m/s), con spessore variabile da 1.0m a 2.0m lungo la stesa,
- **UNITA'-3: deposito morenico** costituito da terreno limoso-sabbioso con ciottoli, **consistente** (V_p tra 900 m/s e 1500 m/s), con spessore variabile da 1.0m a 2.0m lungo la stesa,
- **UNITA'-4: deposito morenico** costituito da terreno limoso-sabbioso con ciottoli, **compatto** (V_p tra 1800 m/s e 2500 m/s), con spessore maggiore di 2.0m lungo la stesa.

2.5 – Elaborazione del modello geotecnico

Secondo l'Eurocodice 7 e le NTC, i valori caratteristici X_k consistono in una stima cautelativa del valore che influenza l'insorgere dello stato limite. Il § C6.2.2.4 della Circolare CSLLPP 2 febbraio 2009, n. 617, illustra chiaramente come tali valori debbano essere scelti. In particolare: *“Nelle valutazioni che il progettista deve svolgere per pervenire ad una scelta corretta dei valori*

caratteristici, appare giustificato il riferimento a valori prossimi ai valori medi quando nello stato limite considerato è coinvolto un elevato volume di terreno, con possibile compensazione delle eterogeneità o quando la struttura a contatto con il terreno è dotata di rigidità sufficiente a trasferire le azioni dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti. Al contrario, valori caratteristici prossimi ai valori minimi dei parametri geotecnici appaiono più giustificati nel caso in cui siano coinvolti modesti volumi di terreno, con concentrazione delle deformazioni fino alla formazione di superfici di rottura nelle porzioni di terreno meno resistenti del volume significativo, o nel caso in cui la struttura a contatto con il terreno non sia in grado di trasferire forze dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti a causa della sua insufficiente rigidità.

Nel caso in esame **i valori caratteristici saranno ubicati in prossimità dei valori medi.**

I principali parametri geotecnici caratteristici che devono essere stimati per il terreno oggetto di studio, sono i seguenti:

Peso di volume naturale (γ_k), Angolo di attrito efficace (ϕ_k), Coesione efficace (C'_k).

Nella Tabella-1 sono riportati i valori dei parametri geotecnici caratteristici attribuibili alle Unità lito-stratigrafiche individuate nel Modello Geologico.

Tabella N.1 _ Modello Geotecnico secondo NTC_2008 _ Valori caratteristici

Unità Litostratigrafica	Spessore (m)	Peso di volume naturale γ_k (kN/m ³)	Angolo d'attrito Φ_k (°)	Coesione efficace c'_k (kPa)
UNITA'-1	1,2	15,5	BT – 22 LT - 22	BT – 0 LT - 0
UNITA'-2a	2,4	17,0	BT – 28 LT - 28	BT – 5 LT - 0
UNITA'-2b	1,0	18,0	BT – 28 LT - 28	BT – 15 LT - 15
UNITA'-3	> 10	20,0	BT – 28 LT - 28	BT – 30 LT - 30

NOTA-1: in favore di sicurezza, non si dovrà tenere conto della presenza dell'**Unità-4** nelle verifiche di stabilità del pendio a lungo termine, in quanto **individuata solo in corrispondenza della ST2.**

2.6 – Definizione della pericolosità sismica locale

Come già anticipato, l'area in oggetto potrebbe ricadere, in seguito ad un'analisi di I° Livello, in 3 differenti scenari di pericolosità sismica locale, che affronteremo separatamente, partendo dall'applicazione del II° Livello eseguita dal dott. Geol. Rosanna Lentini (inserita nel Paragrafo 3.2 della Relazione A01 SG del PGT):

2.6.1 - Scenario identificato come “Z1c - Zona potenzialmente franosa o esposta a rischio di frana”

A riguardo si può sintetizzare quanto segue:

Ai sensi del paragrafo 2.3.1 dell'Allegato 5 della D.G.R. n.8/7374 ed in **ottemperanza alle** Norme tecniche per le costruzioni _ D.M. 14 Gennaio 2008 (P.6.3_ Stabilità dei pendii naturali), saranno eseguite le verifiche di stabilità del pendio in condizioni statiche ed in prospettiva sismica nella **TAV.2.0 di progetto** (Verifiche globali delle opere di ripristino in terra rinforzata).

2.6.2 - Scenario identificato come “Z3a - Zona di ciglio $H > 10m$ ” (effetti morfologici).

A riguardo si può sintetizzare quanto segue:

- la valutazione degli effetti di amplificazione dovuti alla morfologia è stata eseguita mediante l'applicazione delle procedure indicate nell'All.5 della D.G.R. n° 8/7374 del 28/05/2008. La procedura semplificata di 2° livello fornisce valori di Fa relativi al solo intervallo 0.1- 0.5 s e richiede la conoscenza di alcuni parametri legati all'andamento topografico del pendio,
- la sezione ortogonale al versante e all'orlo morfologico oggetto di studio è la N.7,
- il Fa di amplificazione calcolato è risultato inferiore a 1.1 (come si evince dall'analisi della tavola del PGT identificata come T08SG - “**Carta di individuazione delle aree di amplificazione topografica**”,
- il valore stimato risulta **inferiore ai valori di soglia indicati dalla normativa e relativi al valore di St** (amplificazione topografica) previsti dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008). Ciò comporta che la normativa vigente risulti sufficientemente cautelativa rispetto ai fenomeni di potenziale amplificazione topografica.

2.6.3 - Scenario identificato come “Z4c -Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi (comprese le coltri loessiche)” (effetti litologici).

A riguardo si può sintetizzare quanto segue:

- in base ai valori delle onde di taglio (V_s) ricavati dalle indagini geofisica MASW eseguite sui Depositi Morenici, ai terreni compresi nell'area di studio è possibile assegnare una **categoria di sottosuolo B**, cioè “Depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti” (V_{s30} comprese tra 360 m/s e 800 m/s, ovvero $NSPT_{30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $C_u > 250$ Kpa nei terreni a grana fina),
- i valori di **Fa calcolati** con la procedura di II° livello sono **inferiori ai valori di soglia** comunale validi per il Comune di San Felice del Benaco ai sensi delle NTC_2008, ovvero: per intervalli 0.1-0.5 s è stato riscontrato un valore di $F_a=1.30$ contro $1.4+0.1$, mentre per intervalli 0.5-1.5 s è stato riscontrato un valore di $F_a=1.0$ contro $1.7+0.1$),
- visti i risultati ottenuti con l'indagine sismica eseguita dal dott. Massimo Compagnoni si è ritenuto più corretto e più favorevole alla sicurezza assegnare la **categoria di sottosuolo “C”** (Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di VS_{30} compresi tra 180 m/s e 360 m/s).

La pericolosità sismica di base del sito, che costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche, è stata poi definita secondo i principi contenuti nell'ALLEGATO A “Pericolosità Sismica” alle Norme Tecniche per le Costruzioni.

Secondo questi principi l'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire da una “pericolosità sismica di base”, in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale di categoria A. Per la valutazione della pericolosità sismica si è fatto riferimento ai dati nell'intervallo di riferimento forniti nelle tabelle riportate nell'ALLEGATO B delle NTC: “tabelle dei parametri che definiscono l'azione sismica”, in funzione della latitudine e longitudine del sito di progetto.

L'azione sismica di base così individuata è stata successivamente variata per definire la risposta sismica locale, nei modi precisati dalle NTC, tenendo conto delle modifiche prodotte dalle condizioni locali stratigrafiche del sottosuolo presente nel sito di costruzione, dalla morfologia della superficie, e dalle indicazioni/vincoli contenute/i negli studi per il governo del territorio.

Le azioni sismiche di cui al paragrafo 3.2 delle NTC e le forme spettrali correlate al reticolo di riferimento, sono riferite alle seguenti coordinate ED50 (ellissoide di riferimento per la mappa di pericolosità INGV) del sito oggetto dell'intervento:

Latitudine $\phi_{ED50} = 45,596268$

Longitudine $\lambda_{ED50} = 10,534528$

- i. Vita nominale della struttura, V_N (Tab.2.4.I delle NTC): **50 anni**
- ii. Classe d'uso della struttura: **II**
- iii. Coefficiente d'uso, C_U (Tab. 2.4.II delle NTC): **1.0**

Categoria topografica: **T2** (Classificazione delle condizioni topografiche secondo quanto previsto nelle tabelle 3.2.IV e 3.2.VI delle NTC)

In conclusione, nella Tabella presentata di seguito si riportano i parametri ed i coefficienti sismici che dovranno essere utilizzati nelle verifiche di progetto.

Parametri e Coefficienti sismici per Verifiche della Stabilità dei Pendii

Parametri sismici	Coefficienti Sismici
<u>Danno (SLD):</u> Probabilità di superamento: 63% Tr: 50 [anni] ag: 0,057 g Fo: 2,488 Tc*: 0,243 [s]	SLD: Ss: 1,500 Cc: 1,680 St: 1,200 Kh: 0,021 Kv: 0,0105 Amax: 1,008 Beta: 0,200
<u>Salvaguardia della vita (SLV):</u> Probabilità di superamento: 10% Tr: 475 [anni] ag: 0,159 g Fo: 2,481 Tc*: 0,273 [s]	SLV: Ss: 1,460 Cc: 1,610 St: 1,200 Kh: 0,067 Kv: 0,0335 Amax: 2,738 Beta: 0,240

NOTA: il fenomeno della liquefazione, causato dalla progressiva riduzione delle tensioni efficaci nel corso di un terremoto, può verificarsi, limitatamente ai primi 10-15 m dalla superficie, solo in terreni costituenti depositi superficiali sotto falda, sciolti e saturi, che presentano granulometria delle sabbie fini e medie con contenuto in limo variabile generalmente dallo 0 al 25 % e grado di addensamento medio-basso. Nel caso in esame, **i terreni non sono da considerarsi liquefacibili.**

3 – CONCLUSIONI E PRESCRIZIONI

Su incarico del Geom. Roberto Del Mancino, con Studio a San Felice del Benaco in Via Cavour n.30, per conto del Camping Village Weekend, è stata redatta la presente relazione geologica e geotecnica, propedeutica (ai sensi della D.G.R. IX/2616/201 e del Capitolo-6 delle NTC_2008),

all'ottenimento del titolo abilitativo per il progetto di “Messa in sicurezza di un pendio interessato da un dissesto idrogeologico”, avvenuto nel mese di agosto del 2016 all'interno del camping, sito in Via Vallone della Selva N.2, comune di San Felice del Benaco.

La presente relazione è stata sviluppata per definire, allo stato attuale, la situazione lito-stratigrafica del pendio interessato dal dissesto, e NON per valutare le cause dello stesso: queste ultime sono, infatti, molto chiare, e sono legate a storiche problematiche idrauliche che sono state analizzate, e saranno successivamente superate, mediante uno specifico studio idraulico affidato al dott. ing. Enrico Corinaldesi.

Il parere dello scrivente è che le condizioni geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche e sismiche del sito oggetto di studio **permettano di procedere con la progettazione delle opere di messa in sicurezza** (progetto di sistemazione basato sull'utilizzo della tecnica definita “Terre Rinforzate”), con le seguenti prescrizioni:

- il rilevato in terra rinforzata andrà appoggiato, anche solo parzialmente, sulla Unità-2b e/o sulla Unità-3 ancora più consistente,
- per realizzare un idoneo piano di appoggio del rilevato sarà necessario rullare adeguatamente il terreno di fondazione, fino ad ottenere un modulo elastico M_d pari ad almeno 15 MPa (circa 150 kg/cmq),
- per la gestione degli eventuali terreni di risulta, la normativa di riferimento è la legge di conversione 9 agosto 2013 n. 98 (del D.L. n. 69/2013 c.d. “Decreto del fare”), in particolare l'Art. 41 Bis.

Brescia, Aprile 2017

dott. Geol. Mauro Piazza



ALLEGATI:

- All.-1 _ Indagine geofisica mediante sismica a rifrazione e HVSR (34 pagg.).

Dott. Geol. Massimo Compagnoni

Studio di Geologia Applicata Ambientale e Territoriale

Via G. Zanardelli, 3 – 25020 Capriano del Colle (BS) – Tel. 3384679767 – email massimo.compagnoni@geo3studio.it

**INDAGINE DI SISMICA SUPERFICIALE COMBINATA ATTIVA E PASSIVA
PER LA CARATTERIZZAZIONE DI UN'AREA IN FRANA
PRESSO IL CAMPEGGIO VILLAGGIO WEEKEND**

FRAZIONE CISANO - COMUNE DI SAN FELICE DEL BENACO (BS)



Il geologo incaricato
Dott. Geol. Massimo Compagnoni

DATA EMISSIONE:

20 aprile 2017

INDICE

1	PREMESSA	2
2	TIPOLOGIA D'INDAGINE E STRUMENTAZIONE ADOTTATA	2
3	CENNI TEORICI	4
4	METODO DI ACQUISIZIONE	6
5	METODO DI ELABORAZIONE	7
6	RISULTATI	10
6.1	RISULTATI INDAGINE PUNTUALE	11
6.2	RISULTATI INDAGINE LINEARE ST1	20
6.3	RISULTATI INDAGINE LINEARE ST2	26
7	CONSIDERAZIONI FINALI	27
8	BIBLIOGRAFIA	29
9	DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA	30

1 PREMESSA

Su incarico e per conto del Campeggio Villaggio Weekend è stata eseguita una campagna di indagine geofisica di sismica superficiale, finalizzata alla caratterizzazione di un'area in frana sita presso il campeggio nella Frazione di Cisano in Comune di San Felice del Benaco (BS).

La campagna d'indagine si colloca nell'ambito dello studio geologico e geotecnico di caratterizzazione del sito, oggetto di sistemazione.

2 TIPOLOGIA D'INDAGINE E STRUMENTAZIONE ADOTTATA

La campagna di indagine è stata così organizzata:

- n. 3 indagini puntuali con acquisizione di rumore sismico ambientale a stazione singola, finalizzate all'applicazione della tecnica HVSr e alla determinazione della relativa curva HV del sito.
- n. 2 indagini lineari di sismica a rifrazione, finalizzate alla ricostruzione della sezione 2D in termini di velocità delle onde longitudinali (V_p); lungo la linea sismica eseguita all'interno del corpo di frana è stata associata un'indagine MASW finalizzata all'individuazione del profilo di rigidità medio e al parametro V_{S30} rappresentativo del sito, dal quale è possibile definire la categoria di sottosuolo di appartenenza ai sensi delle *Norme Tecniche per le Costruzioni* - DM 14 gennaio 2008, Gazzetta Ufficiale, n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, paragrafo 3.2.2. Tabella 3.2.II;

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata è costituita da:

- un sistema di energizzazione per le onde P: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 8 Kg battente verticalmente su piastra posta direttamente sul p.c. per la generazione prevalentemente di onde P e secondariamente di onde SV, in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali;
- un sistema di ricezione: costituito da 24 geofoni verticali monocomponente del tipo elettromagnetico a bobina mobile a massa sospesa con frequenza propria 4.5 Hz, ovvero dei trasduttori di velocità in grado di tradurre in segnale elettrico la velocità con cui il suolo si sposta al passaggio delle onde sismiche longitudinali e trasversali prodotte da una specifica sorgente;
- un sistema di acquisizione dati: con memoria dinamica a 24 bit composto da sismografo a 24 canali della Geometrics, con range dinamico di sistema di 144 dB, intervallo di campionamento compreso tra 0.02 e 16 ms, fino a 16000 campioni per traccia; il sismografo

è alimentato con batteria al Pb a 12 V ed è collegato al notebook PC per il salvataggio delle acquisizioni e la gestione dei parametri di configurazione spaziali e temporali; i geofoni sono collegati al sismografo tramite cavo sismico;

- un sistema di trigger: consiste in un circuito elettrico che viene chiuso (attraverso sensore di movimento applicato alla mazza) nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato a un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e fissare l'inizio della registrazione;
- tre velocimetri tridirezionali del tipo Trillium compact 20 s della Nanometrics, collegati ad acquirente Centaur, fornito di antenna GPS per la rilevazione del tempo universale UTC.

Di seguito si riporta il sito e la configurazione dell'indagine (per il dettaglio si veda il rilievo topografico in formato .dwg, nel quale è stato inserito il layer "sismica"):



3 CENNI TEORICI

Il metodo sismico a rifrazione si basa sul concetto della bi-rifrazione delle onde elastiche a seguito del fronte d'onda conico. Data una sorgente di onde elastiche e uno stendimento di geofoni lungo un profilo giungeranno in superficie ai geofoni onde dirette, onde riflesse ed onde coniche o bi-rifratte (*head wave*): le onde analizzate sono quelle birifratte, cioè quelle che giungono sulla superficie di separazione con un angolo d'incidenza critico (secondo la legge di Snell) e che quindi vengono rifratte con un angolo di 90° propagandosi parallelamente alla superficie rifrangente e venendo nuovamente rifratte verso la superficie con lo stesso angolo di incidenza. I contrasti di proprietà possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali, idrogeologiche.

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) (Park et al., 1999) è una tecnica di indagine non invasiva che permette di individuare il profilo medio di velocità delle onde di taglio V_s , sulla base della misura delle onde superficiali eseguita in corrispondenza di diversi sensori (geofoni nel caso specifico) posti sulla superficie del suolo. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di *Rayleigh*, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo omogeneo ed isotropo la velocità di propagazione delle onde di *Rayleigh* è indipendente dalla frequenza e il moto indotto dalla propagazione si smorza rapidamente con la profondità, sino ad estinguersi ad una profondità circa pari ad una lunghezza d'onda. In un mezzo verticalmente eterogeneo, ovvero stratificato, le onde di *Rayleigh* sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di *Rayleigh* dipende dalla frequenza di propagazione.

La natura dispersiva delle onde di *Rayleigh* è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

La propagazione delle onde di *Rayleigh* in un mezzo stratificato è un fenomeno multi-modale, ovvero in corrispondenza di una certa frequenza, per un determinato sito caratterizzato da una specifica stratigrafia, possono esistere diverse velocità di propagazione, a cui corrisponde un determinato modo di vibrazione del sito.

Il metodo di indagine MASW attivo consiste nella generazione artificiale di onde superficiali in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con mazza battente parallelamente

all'array) e nell'acquisizione della perturbazione generata lungo uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una curva di dispersione sperimentale apparente nel *range* di frequenze compreso tra 10-15Hz e 70-100Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente. Lungo lo stendimento di sensori così predisposto è possibile acquisire anche rumore ambientale.

I fondamenti teorici del metodo MASW fanno riferimento ad un semispazio stratificato con strati paralleli e orizzontali, quindi una limitazione alla sua applicabilità potrebbe essere rappresentata dalla presenza di pendenze significative superiori a 20°, sia della topografia sia delle diverse discontinuità elastiche.

Il metodo HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) è finalizzato all'individuazione delle frequenze caratteristiche di risonanza di un sito, le quali risultano correlabili a contatti litologici presenti nel sottosuolo e caratterizzati da un sufficiente contrasto di impedenza sismica in termini di rigidità. Il rumore sismico ambientale o microtemore è caratterizzato da vibrazioni ambientali di bassa energia con ampiezze dell'ordine dei 10^{-2} - 10^{-4} mm, non percepibili dall'uomo, e originate da una molteplicità di sorgenti agenti a diverse frequenze: le onde marine e le perturbazioni atmosferiche contribuiscono al campo d'onda prevalentemente con frequenze inferiori a 0.5 Hz, mentre il vento, il traffico veicolare e le attività antropiche contribuiscono prevalentemente a frequenze superiori a 0.5 Hz. La tecnica a stazione singola analizza, in termini di ampiezza, il campo delle vibrazioni ambientali, sfruttando la sua irregolarità temporale, in quanto questa è legata all'indipendenza dinamica delle sorgenti e alla molteplicità dei percorsi delle onde da esse generate; questa irregolarità permette di definire la struttura media del segnale costituente il campo delle vibrazioni ambientali come statisticamente indipendente dalla natura e posizione delle sorgenti e di considerare quindi il segnale acquisito condizionato esclusivamente dalla struttura del sottosuolo. L'ipotesi di base è pertanto la presenza di sorgenti distribuite in modo statisticamente omogeneo attorno al sito di misura, che si attivano in modo non coordinato tra loro. In particolare la tecnica HVSR permette di determinare la curva sperimentale che rappresenta il rapporto tra le ampiezze spettrali medie delle componenti orizzontali e quelle della componente verticale delle vibrazioni ambientali in funzione della frequenza (Nogoshi e Igarashi, 1970; Nakamura, 1989).

4 METODO DI ACQUISIZIONE

Per quanto riguarda l'indagine puntuale (acquisizione del rumore ambientale) i sensori sono stati posizionati in tre punti posti lungo il versante interessato dal movimento franoso: il primo (HVS1) posizionato in prossimità del ciglio di frana, il secondo (HVS2) in corrispondenza del corpo franoso, al piede della scarpata principale, e il terzo (HVS3) in corrispondenza del piede del corpo franoso. L'orizzontalità dei tre sensori è stata garantita mediante utilizzo di bolla sferica. La durata delle acquisizioni è stata di 2h eseguite con frequenza di campionamento di 200 Hz.

Per quanto riguarda l'indagine lineare (sismica a rifrazione), sulla base delle condizioni logistiche del sito, sono stati allestiti due stendimento lineari, lungo i quali sono stati disposti e collegati in serie i 24 geofoni. Il primo stendimento è stato collocato in corrispondenza del corpo franoso, al piede della scarpata principale, disponendo i geofoni con distanza intergeofonica di 0.75 m ed eseguendo n. 9 punti di energizzazione, organizzati simmetricamente con 7 shots interni ugualmente spazati e 2 shots esterni per ciascun estremo dello stendimento posti a 1.5 m dai geofoni esterni; il secondo stendimento è stato collocato in prossimità del ciglio di frana, disponendo i geofoni con distanza intergeofonica di 1.00 m ed eseguendo n. 13 punti di energizzazione, organizzati simmetricamente con 7 shots interni ugualmente spazati e 6 shots esterni per ciascun estremo dello stendimento posti rispettivamente a 1.0, 6.0 e 15.0 m dai geofoni esterni. Sono stati utilizzati sistemi di riferimento relativi, con origine dell'ascissa posta in corrispondenza dello shot S1 esterno al 1° geofono posto ad W. Di seguito si riportano in modo sintetico i parametri configurazionali (spaziali e temporali) delle 2 acquisizioni lineari:

PARAMETRI CONFIGURAZIONALI SISMICA LINEARE		
Sigla _ Orientamento	ST1 _ E-W	ST2 _ ESE-WNW
Dislivello altimetrico tra gli <i>shots</i> esterni	0 m	0 m
Lunghezza stendimento compresi <i>shots</i> esterni	20.25 m	53.00 m
Lunghezza stendimento ricevitori	17.25 m	23.00 m
Numero Geofoni	24	24
Distanza intergeofonica	0.75 m	1.00 m
Numero punti di energizzazione (<i>shots</i>)	9	13
1° <i>Shot</i> esterno	1.5 m	1.0 m
2° <i>Shot</i> esterno	-	6.0 m
3° <i>Shot</i> esterno	-	15.0 m
Durata acquisizione	2 s	
Pre-triggering delay	0 ms	
Intervallo di campionamento	0.25 ms	
Numero di campioni per traccia	8000	
Massima frequenza campionabile	2 kHz	

La conformazione del sito non ha permesso di allestire stendimenti sismici con copertura geofonica superiore ai 17-23 m, compromettendo pertanto la capacità penetrativa dell'indagine di sismica a rifrazione, che è risultata limitata a 5-8 m, a seconda della chiarezza ed attendibilità dei segnali acquisiti a maggiore distanza dalle sorgenti.

5 METODO DI ELABORAZIONE

L'analisi delle acquisizioni puntuali è stata eseguita selezionando l'intervallo di registrazione centrale, eliminando la prima parte poco rappresentativa legata alla fase di stabilizzazione del sensore e la parte finale, disturbata dalle operazioni di spegnimento dell'acquisitore; sono stati inoltre rimossi eventuali transienti presenti nella registrazione, attraverso la procedura che si basa sul confronto tra la media dell'ampiezza del segnale calcolata su un periodo breve di tempo "STA" (Short Time Average, fissato pari a 1 s) e quella calcolata su una finestra di tempo più lunga dell'ordine delle decine di secondi "LTA" (Long Time Average, fissato pari a 40 s); in caso di presenza di transienti non rimovibili con l'algoritmo STA/LTA, si è operato tramite eliminazione manuale della stessa dall'intera registrazione.

Il segnale ottenuto è stato segmentato in finestre di campionamento, il cui numero e lunghezza minima sono funzione della frequenza principale di risonanza f_0 ; per ciascuna finestra di elaborazione (fissata pari a 30 s) sono calcolati gli spettri di Fourier di ciascuna componente, prevedendo una procedura di lisciamiento con un'opportuna funzione di smoothing (lisciamiento con filtro Konno & Ohmachi con costante pari al 40%); per ciascuna finestra vengono combinati gli spettri delle componenti orizzontali con una media quadratica e calcolato, frequenza per frequenza, il rapporto tra la componente orizzontale così ottenuta e quella verticale; il rapporto HVSR è dato dalla media del valore spettrale delle componenti orizzontali (NS e EW) e il valore spettrale della componente verticale (Z), secondo la formula:

$$HVSR = \frac{\sqrt{NS^2 + EW^2}}{Z}$$

I risultati ottenuti da ciascuna finestra di elaborazione sono stati elaborati statisticamente, definendo la curva HV media con la relativa deviazione standard e, per le stesse finestre di elaborazione, è stata analizzata la direzionalità del campo d'onda acquisito.

L'elaborazione dei segnali è stata eseguita tramite il software *Geopsy 2.9* (*Geopsy team, SESAME European Project, 2005*).

Tramite l'applicazione dei criteri del progetto SESAME (2004) sono state valutate le caratteristiche dei picchi di risonanza della curva HV, ove presenti, in termini di affidabilità statistica e chiarezza:

la prima parte dei criteri è dedicata alla valutazione dell'attendibilità statistica della curva HVSR, ovvero viene valutato se la registrazione sia stata effettuata per un periodo sufficientemente lungo ed analizzata per un numero sufficiente di finestre temporali; la seconda parte dei criteri è dedicata alla valutazione della chiarezza del picco H/V attraverso un'analisi morfologica.

Di seguito si riportano, estratti dal progetto *SESAME WP12 – Deliverable D23.12, dicembre 2004* i criteri per la valutazione dell'affidabilità statistica e della chiarezza del picco, come sopra descritto:

<p>Criteria for a reliable H/V curve</p> <p>i) $f_0 > 10 / l_w$ <i>and</i></p> <p>ii) $n_c(f_0) > 200$ <i>and</i></p> <p>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 $f_0 < 0.5\text{Hz}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 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
<p>Criteria for a clear H/V peak (at least 5 out of 6 criteria fulfilled)</p> <p>i) $\exists f \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$</p> <p>ii) $\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$</p> <p>iii) $A_0 > 2$</p> <p>iv) $f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$</p> <p>v) $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$</p> <p>vi) $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$</p>	

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 $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

L'analisi delle acquisizioni lineari ha permesso di individuare il tempo di primo arrivo in corrispondenza di ciascun ricevitore per ciascun punto di energizzazione, attraverso la procedura di picking manuale; tali valori sono stati riportati in un grafico distanza-tempo per ottenere l'andamento delle dromocrone; la profondità totale investigata è legata alla lunghezza dello stendimento di ricevitori.

La ricostruzione del modello sismostratigrafico può avvenire attraverso l'utilizzo di molteplici metodi di interpretazione; tra i metodi disponibili in letteratura si è scelto di utilizzare:

- il metodo di interpretazione tradizionale basato sul tempo di intercetta, computando la profondità dei rifrattori in corrispondenza dei soli punti di scoppio (griglia *shot-point*) ed interpolando linearmente tra uno shot e il successivo; il metodo richiede la scelta a priori del numero di sismo-strati costituenti il modello (funzione del modello geologico) e la relativa linearizzazione delle dromocrone; il modello interpretativo del mezzo investigato è di tipo elastico, omogeneo, continuo ed isotropo; questo metodo è applicabile in situazioni litostratigrafiche approssimabili a modelli stratificati a strati piani orizzontali e/o inclinati. Per le analisi interpretative è stato utilizzato il *software WinSism versione 10 – Seismic Refraction Processing Software (2004) della W-GeoSoft*, associato ad altri software autocostruiti;
- il metodo di tomografia sismica, il quale, partendo dal modello iniziale 1D di velocità e dai dati di *traveltime* ottenuti dal *picking* manuale, modella il percorso bidimensionale di un fascio di raggi curvilinei per ogni arrivo (Hermann, 1980; Worthington, 1984; Nolet, 1987), mediante sia l'algoritmo tomografico basato sull'adattamento iterativo SIRT (*Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*) con interpretazione mediante il *software Reflexw versione 7.5 della Sandmeier software (2014)*, sia l'algoritmo WET (*Wavepath Eikonal Traveltime*) con interpretazione mediante *software Rayfract (2009)*.

L'interpretazione dello stendimento ST1 ha fornito risultati compatibili con un modello monodimensionale tale da poter giustificare l'interpretazione delle acquisizioni esterne anche in termini di onde superficiali con tecnica MASW; i dati di campagna acquisiti sono stati pertanto trasformati tramite una doppia trasformata di Fourier in dominio f-k (frequenza – numero d'onda): i massimi di energia individuati sono associabili alle onde di Rayleigh; per ogni frequenza il picco spettrale è associato a un determinato valore del numero d'onda k, da cui è possibile ricavare la velocità di fase delle onde di Rayleigh. Per ciascuna acquisizione si determina quindi lo spettro di velocità ottenuto tramite operazioni di filtraggio, con le quali si cerca di rimuovere l'influenza delle onde di volume e degli eventuali modi superiori dell'onda di Rayleigh, al fine di evidenziare al meglio la curva di dispersione sperimentale rappresentativa del sito. L'osservazione degli spettri di velocità ottenuti permette di scegliere l'acquisizione che fornisce una curva di dispersione sperimentale apparente meglio definita per quanto riguarda il modo fondamentale dell'onda di Rayleigh; l'acquisizione così selezionata viene sottoposta ad elaborazione e successiva inversione.

Sulla base del modello geologico dell'area, del modello sismo-stratigrafico medio individuato con il metodo della sismica a rifrazione in onde longitudinali e considerando i risultati ottenuti dall'indagine puntuale HVSR, viene stimato un modello 1D preliminare in termini di V_s , prevedendo la modifica controllata dei valori di densità di massa ρ , spessore h , velocità delle onde di taglio V_{SV} e del coefficiente di Poisson ν di ciascun strato che costituisce il modello stesso.

Successivamente, tramite procedura diretta, viene calcolata la relativa curva di dispersione numerica utilizzando il *software winMASW5.2* (2013) della Eliosoft. Il modello preliminare così individuato viene utilizzato come modello di partenza nella procedura di inversione, che prevede come target la curva di dispersione sperimentale apparente individuata tramite picking sullo spettro di velocità.

L'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio rappresentativo del sito avviene integrando tra loro i risultati ottenuti con la modellazione diretta e quelli ottenuti con l'inversione automatica.

L'interpretazione dello stendimento ST2 ha evidenziato forti variabilità laterali in termini di velocità delle onde longitudinali, rendendo non attendibile l'interpretazione delle acquisizioni esterne in termini di onde superficiali con tecnica MASW.

6 RISULTATI

Di seguito vengono riportati le elaborazioni e i risultati ottenuti.

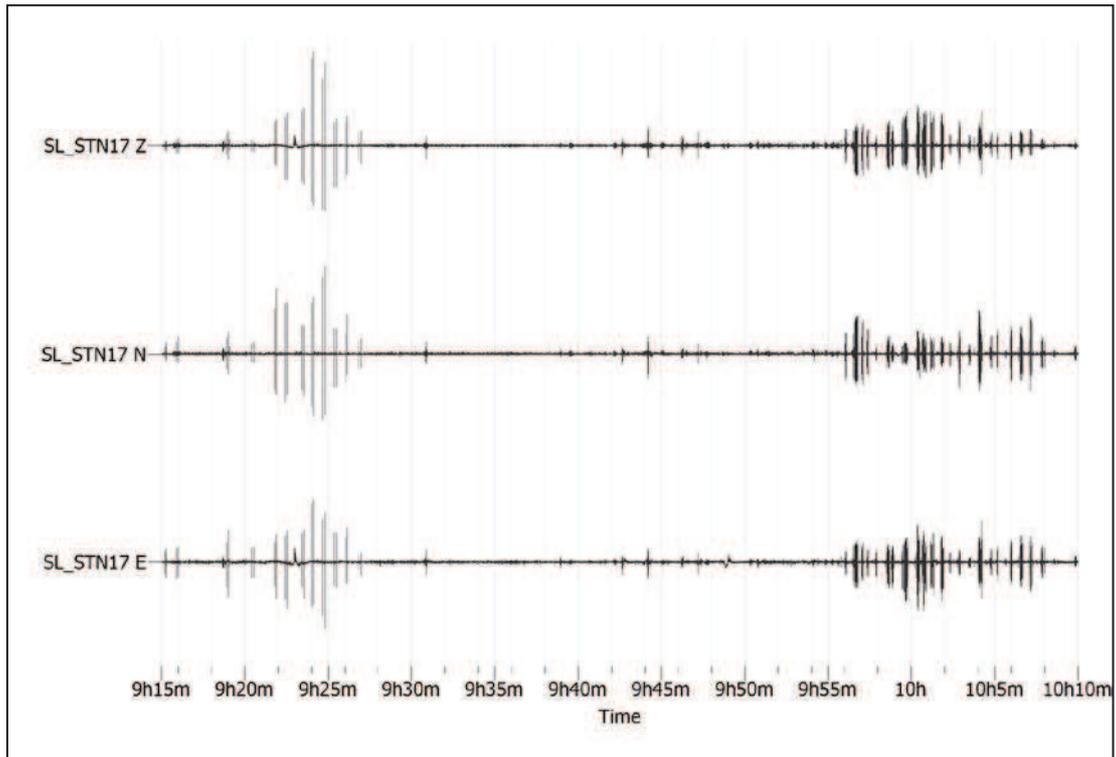
Per le elaborazioni in termini di indagine HVSR sono riportati gli spettri di Fourier medi di ciascuna componente, la curva HV calcolata per ciascuna finestra di elaborazione, la curva HV media e relativa deviazione standard e il grafico della direzionalità della curva HV.

Per le elaborazioni in termini di sismica a rifrazione sono riportati le dromocrone e i risultati delle elaborazioni tomografiche.

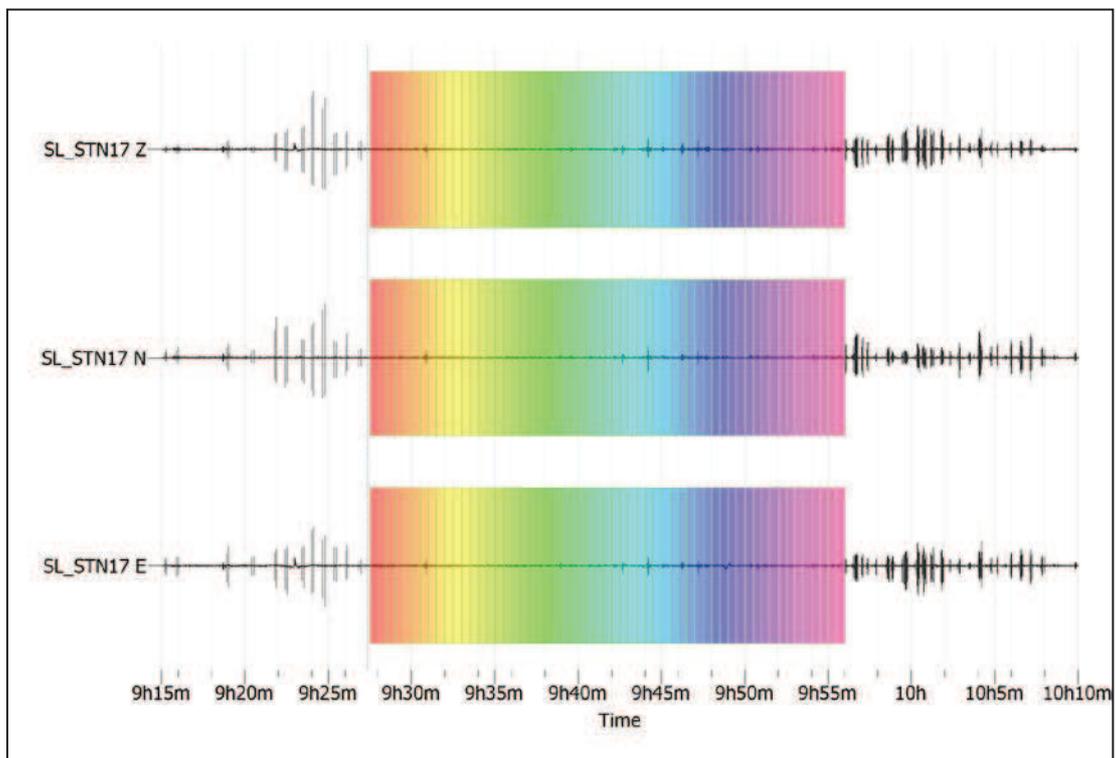
Per l'elaborazione in termini di indagine MASW sono riportati gli spettri $f-V_f$ (frequenza-velocità di fase) di ciascuna acquisizione coniugata, l'elaborazione tramite rimozione dal sismogramma delle onde di volume e dei disturbi, la curva di dispersione apparente sperimentale individuata tramite picking dall'acquisizione selezionata, la curva di dispersione sperimentale scelta come caratteristica del sito e la curva di dispersione numerica che meglio approssima quella sperimentale con il relativo profilo 1D di rigidezza con la profondità.

6.1 RISULTATI INDAGINE PUNTUALE

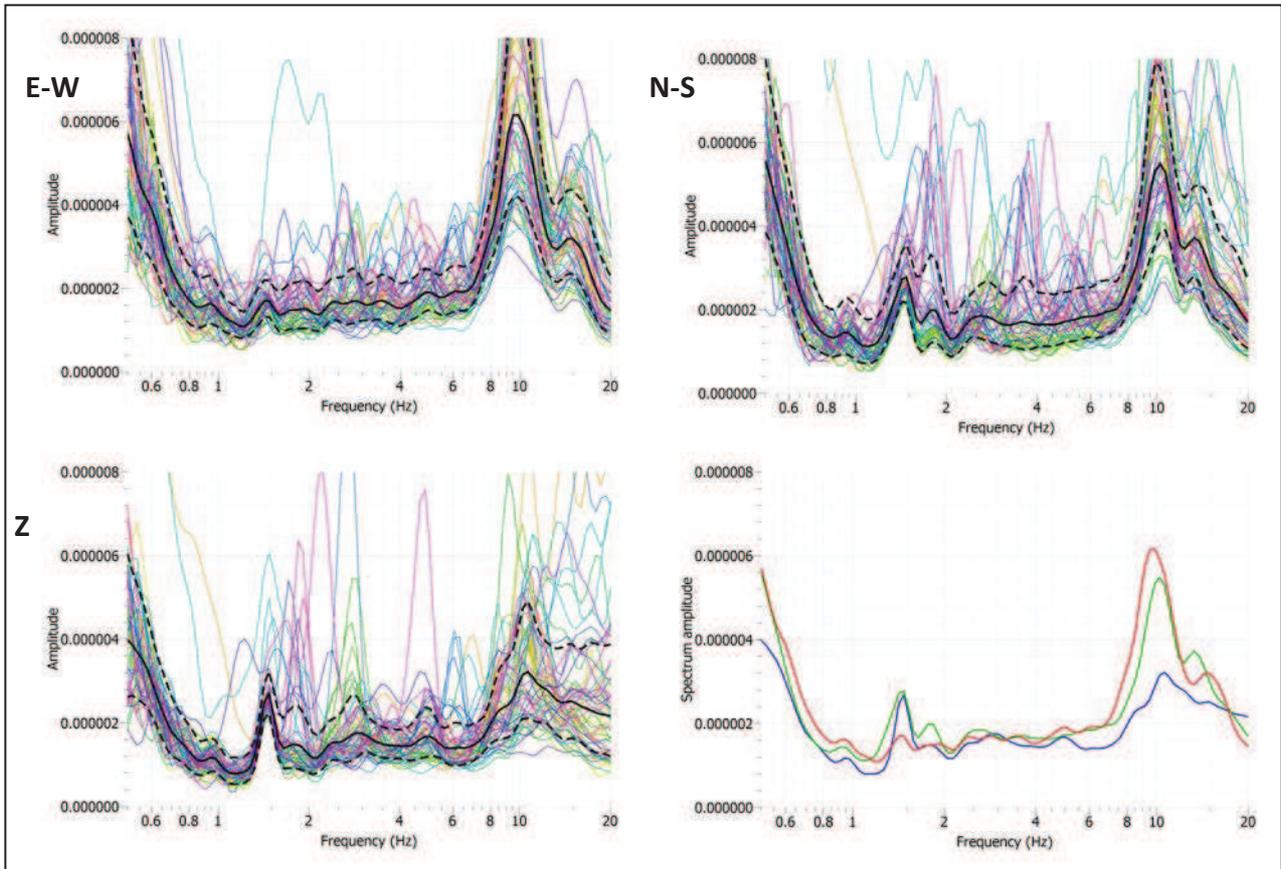
Di seguito si riportano le elaborazioni e i risultati dell'acquisizione a stazione singola HVSR1.



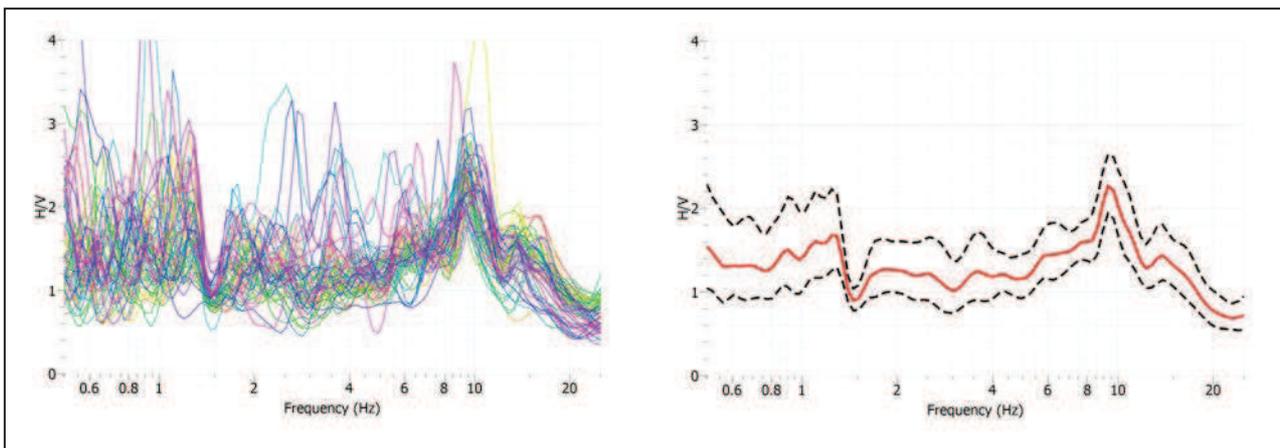
Campo di moto acquisito nelle tre direzioni ed estratto dall'acquisizione totale



Fenestratura del segnale utile (numero 57 finestre di lunghezza 30 s senza sovrapposizione)



Spettri di ampiezza calcolati per ciascuna finestra e per ciascuna componente: in basso a destra gli spettri di ampiezza medi di ciascuna componente (E-W: Rossa – N-S: Verde – Z: Blu)



Curve HV calcolate per ciascuna finestra di elaborazione (a sinistra) e curva HV media e relativa deviazione standard (a destra)

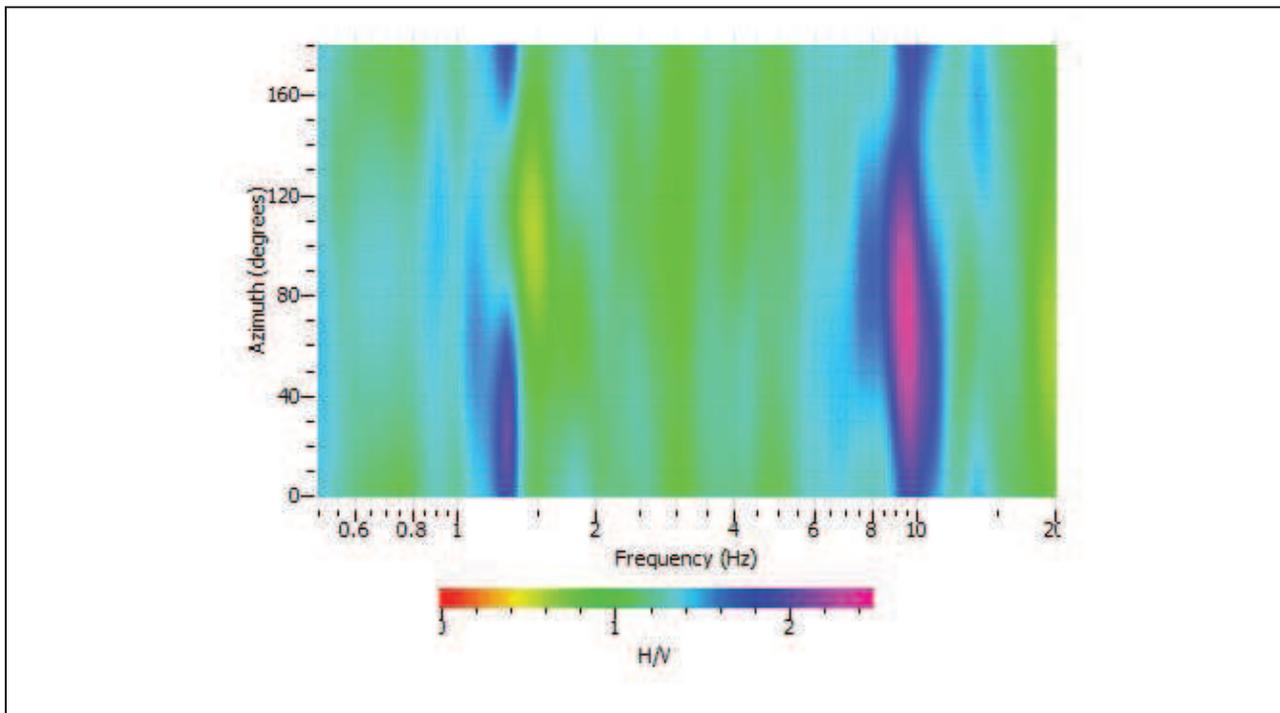
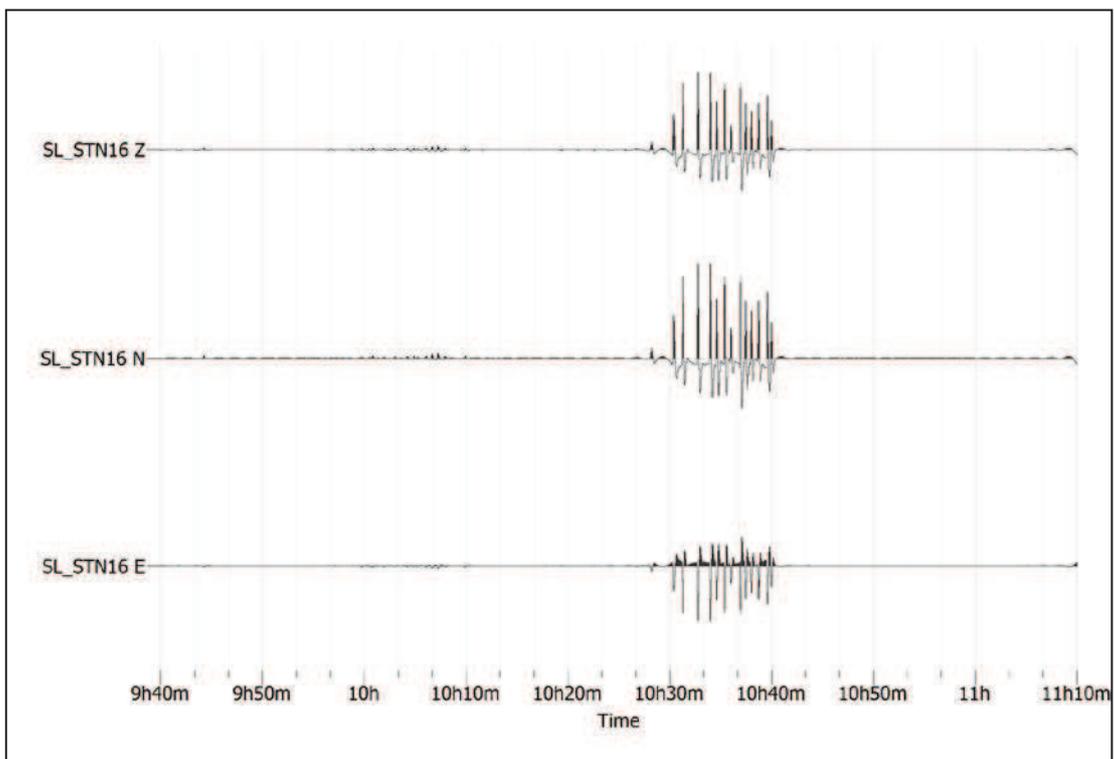


Grafico di direzionalità della curva HV

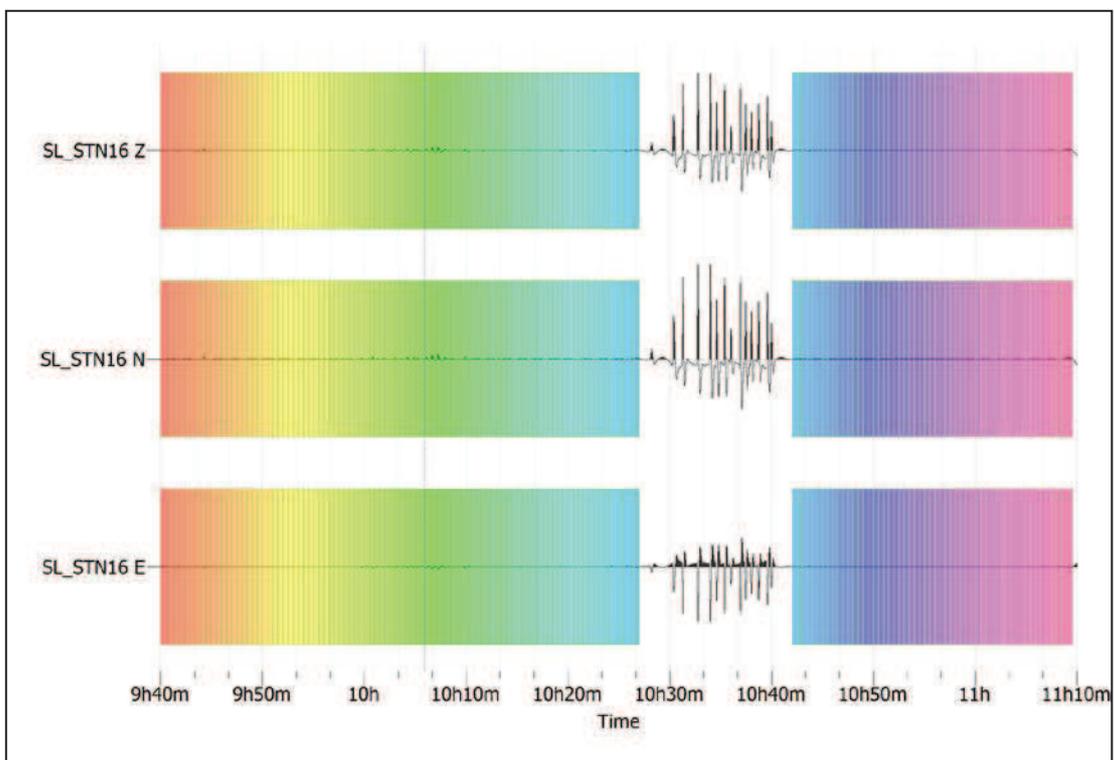
Picco H/V 9.4 Hz \pm 0.6			
Criteri per una curva H/V affidabile			
[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]			
$f_0 > 10/Lw$	9.43	> 0.333	OK
$n_c(f_0) > 200$	16127	> 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	$f_0 > 0.5\text{Hz}$	SI	OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	$f_0 < 0.5\text{Hz}$	NO	
Criteri per un picco H/V chiaro			
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]			
Esiste f in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f) < A_0/2$			OK
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$			OK
$A_0 > 2$	2.25	> 2	OK
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0.01	< 0.05	OK
$\sigma_f < \epsilon(f_0)$	0.576	< 0.472	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.170	< 1.580	OK

Criteri Sesame, 2004 per la valutazione dell'affidabilità statistica della curva HV e della chiarezza dei picchi di risonanza individuati

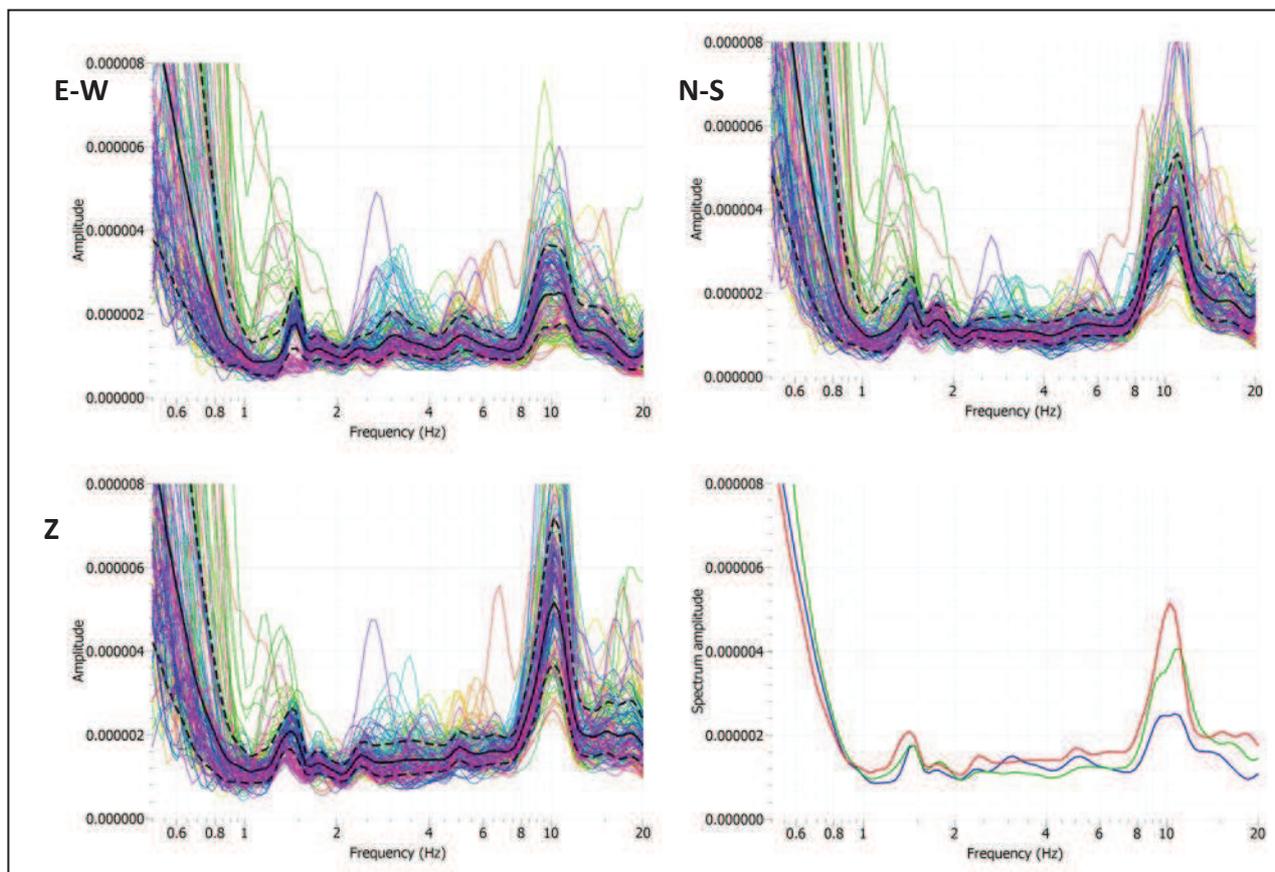
Di seguito si riportano le elaborazioni e i risultati dell'acquisizione a stazione singola HVSR2.



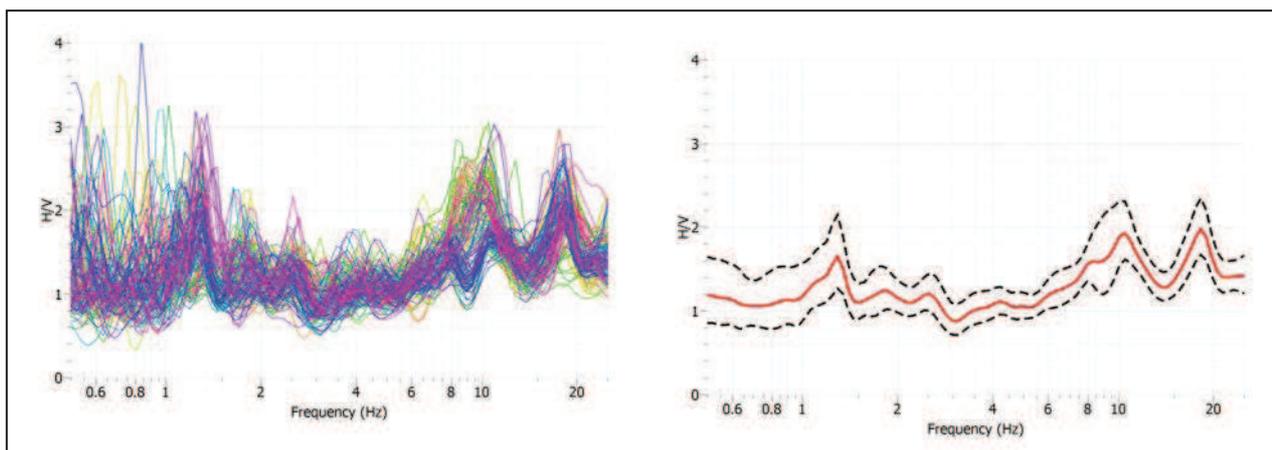
Campo di moto acquisito nelle tre direzioni ed estratto dall'acquisizione totale



Fenestratura del segnale utile (numero 149 finestre di lunghezza 30 s senza sovrapposizione)



Spettri di ampiezza calcolati per ciascuna finestra e per ciascuna componente: in basso a destra gli spettri di ampiezza medi di ciascuna componente (E-W: Rossa – N-S: Verde – Z: Blu)



Curve HV calcolate per ciascuna finestra di elaborazione (a sinistra) e curva HV media e relativa deviazione standard (a destra)

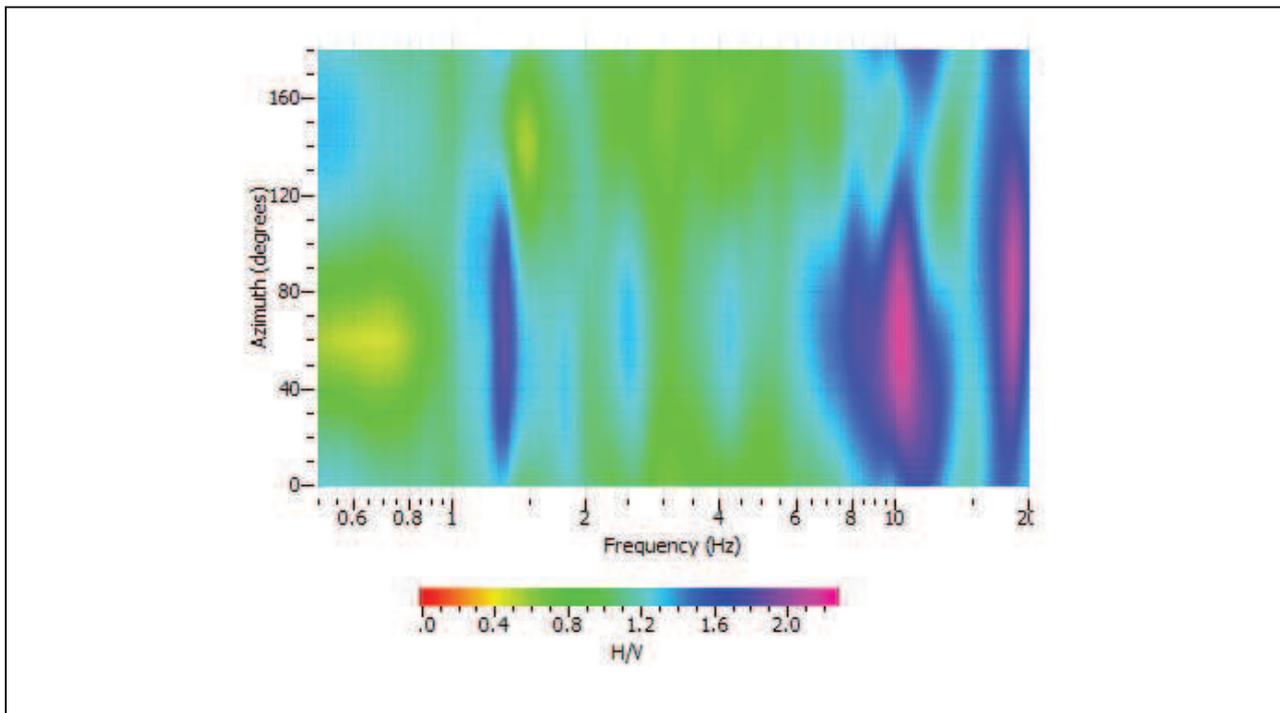


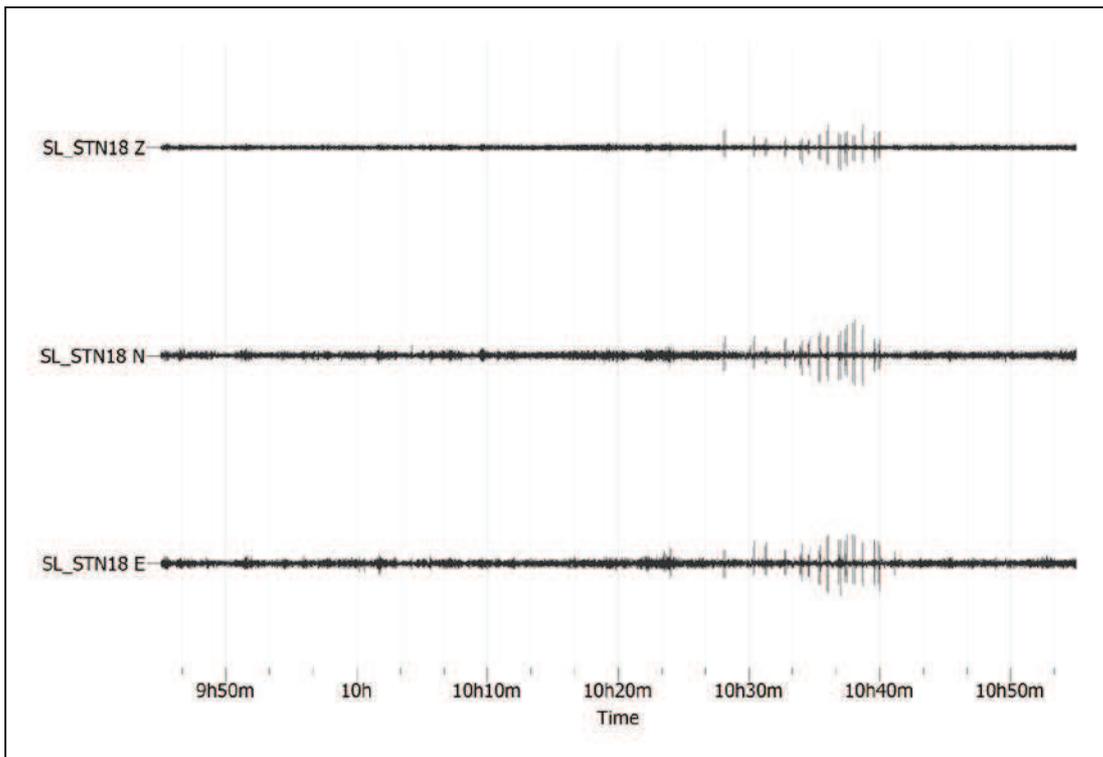
Grafico di direzionalità della curva HV

Picco H/V 18.2 Hz ± 0.9			
Criteri per una curva H/V affidabile			
[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]			
$f_0 > 10/Lw$	18.24	> 0.333	OK
$n_c(f_0) > 200$	81522	> 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	$f_0 > 0.5\text{Hz}$	SI	OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	$f_0 < 0.5\text{Hz}$	NO	
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 $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^*) < A_0/2$			NO
$A_0 > 2$	1.98	> 2	NO
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0.00	< 0.05	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.935	< 0.912	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.185	< 1.580	OK

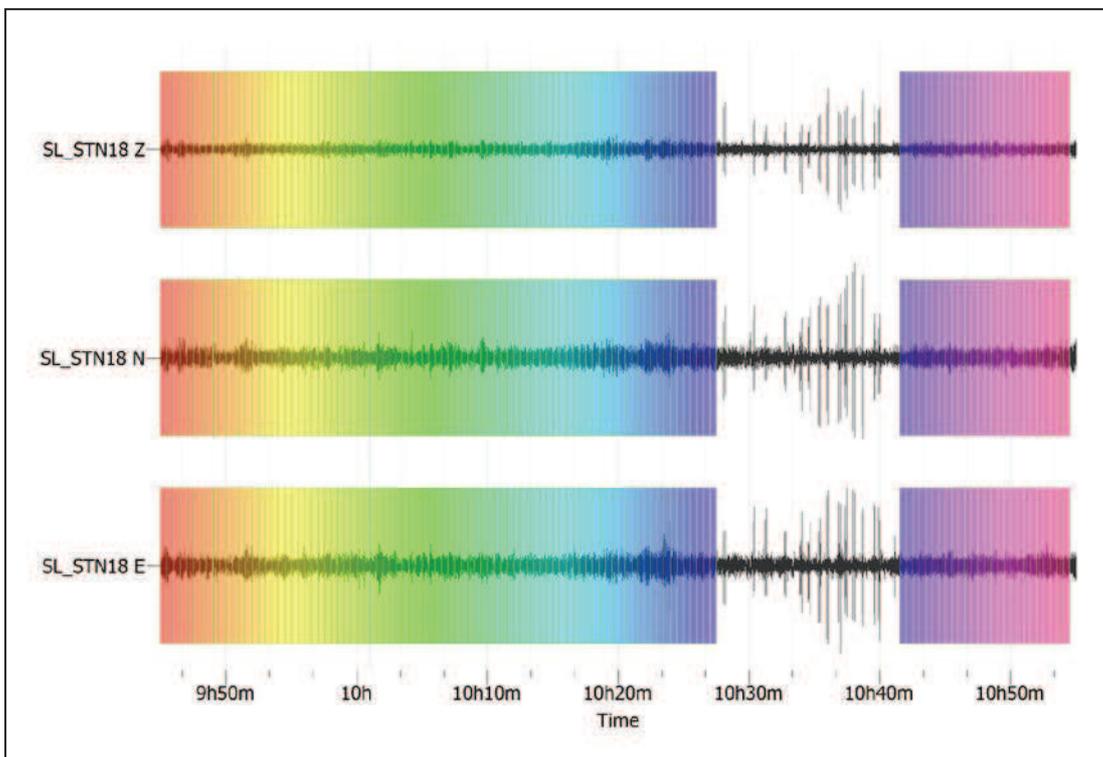
Picco H/V 10.3 Hz ± 1.1			
Criteri per una curva H/V affidabile			
[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]			
$f_0 > 10/Lw$	10.32	> 0.333	OK
$n_c(f_0) > 200$	46151	> 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	$f_0 > 0.5\text{Hz}$	SI	OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	$f_0 < 0.5\text{Hz}$	NO	
Criteri per un picco H/V chiaro			
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]			
Esiste f in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$			OK
Esiste f^* in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^*) < A_0/2$			NO
$A_0 > 2$	1.93	> 2	NO
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0.02	< 0.05	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	1.090	< 0.516	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.205	< 1.580	OK

Criteri Sesame, 2004 per la valutazione dell'affidabilità statistica della curva HV e della chiarezza dei picchi di risonanza individuati

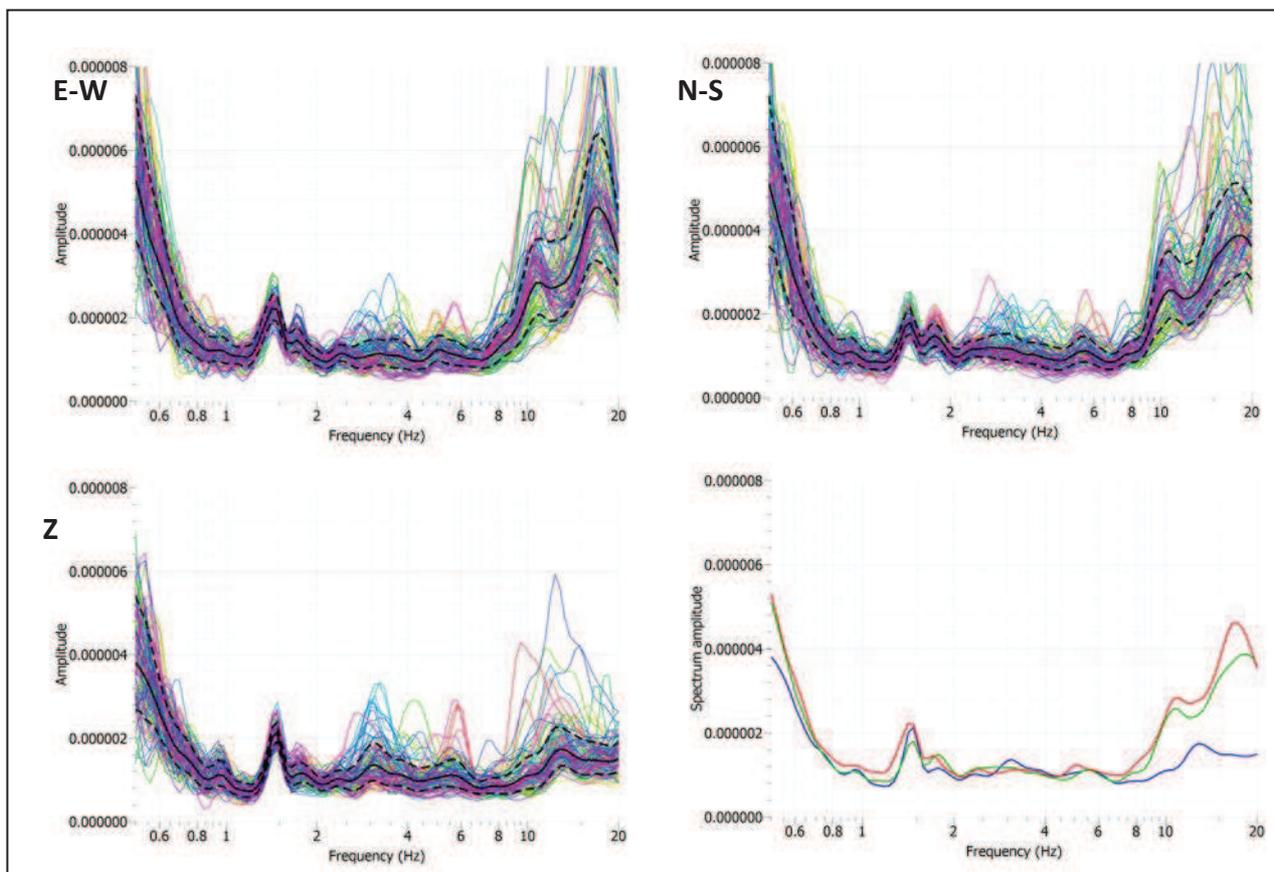
Di seguito si riportano le elaborazioni e i risultati dell'acquisizione a stazione singola HVSR3.



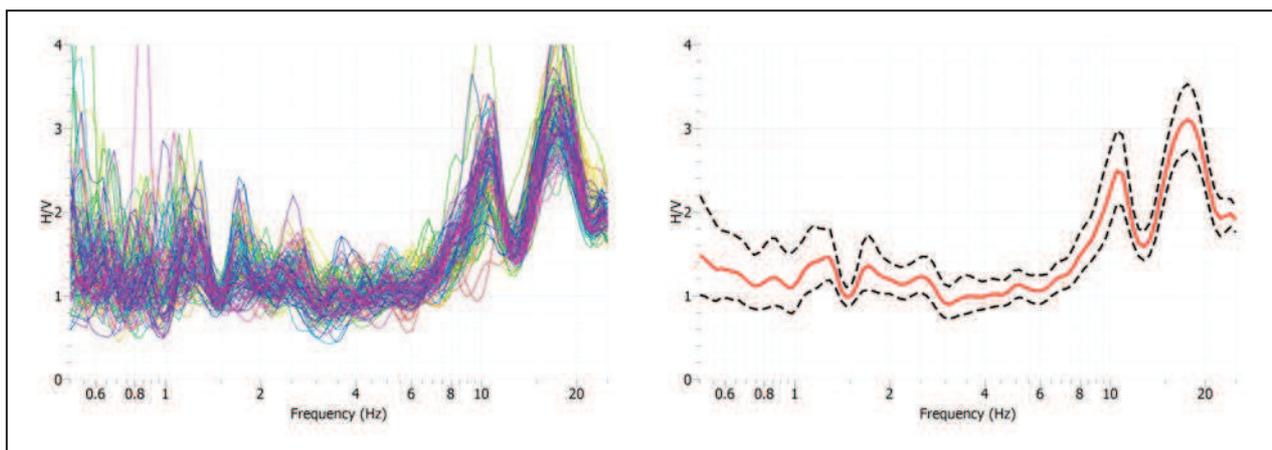
Campo di moto acquisito nelle tre direzioni ed estratto dall'acquisizione totale



Fenestratura del segnale utile (numero 111 finestre di lunghezza 30 s senza sovrapposizione)



Spettri di ampiezza calcolati per ciascuna finestra e per ciascuna componente: in basso a destra gli spettri di ampiezza medi di ciascuna componente (E-W: Rossa – N-S: Verde – Z: Blu)



Curve HV calcolate per ciascuna finestra di elaborazione (a sinistra) e curva HV media e relativa deviazione standard (a destra)

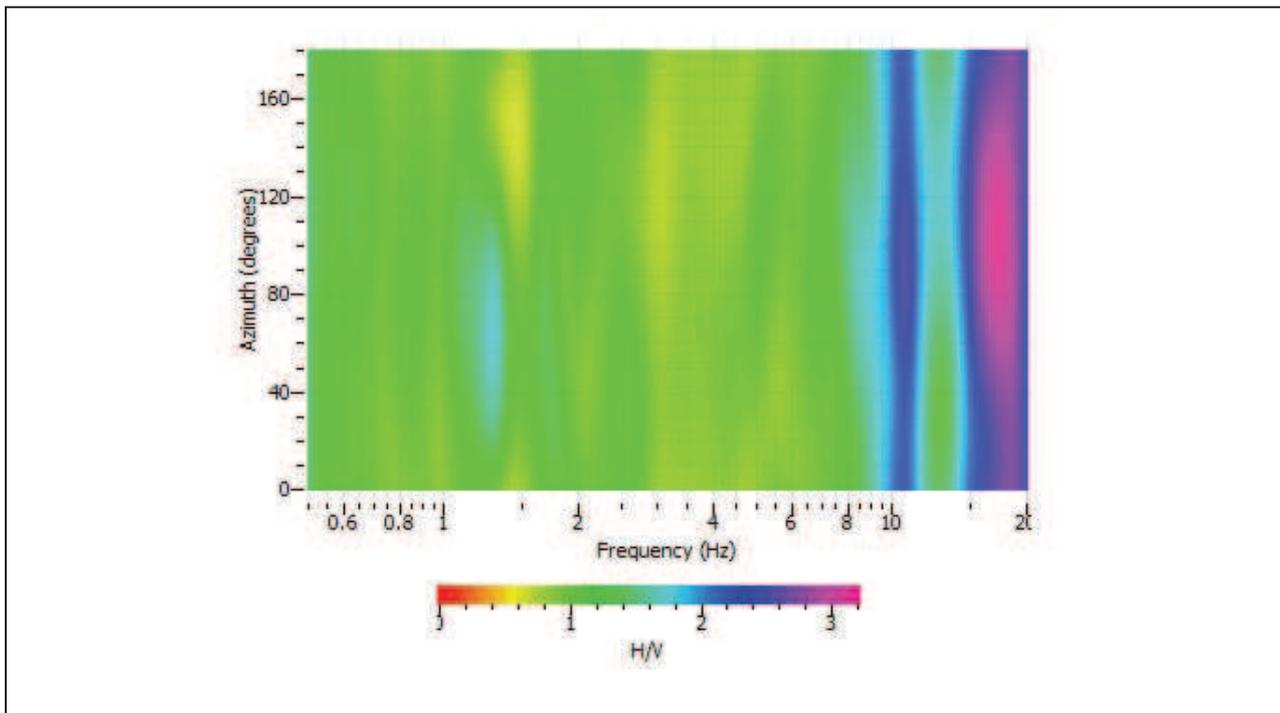


Grafico di direzionalità della curva HV

Picco H/V 17.5 Hz ± 1.0			
Criteri per una curva H/V affidabile			
[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]			
$f_0 > 10/Lw$	17.49	> 0.333	OK
$n_c(f_0) > 200$	58238	> 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	$f_0 > 0.5\text{Hz}$	SI	OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	$f_0 < 0.5\text{Hz}$	NO	
Criteri per un picco H/V chiaro			
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]			
Esiste f in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$			OK
Esiste f^* in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^*) < A_0/2$			NO
$A_0 > 2$	3.10	> 2	OK
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0.00	< 0.05	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.971	< 0.874	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.137	< 1.580	OK

Picco H/V 10.6 Hz ± 0.3			
Criteri per una curva H/V affidabile			
[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]			
$f_0 > 10/Lw$	10.56	> 0.333	OK
$n_c(f_0) > 200$	35180	> 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	$f_0 > 0.5\text{Hz}$	SI	OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	$f_0 < 0.5\text{Hz}$	NO	
Criteri per un picco H/V chiaro			
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]			
Esiste f in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$			OK
Esiste f^* in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^*) < A_0/2$			NO
$A_0 > 2$	2.49	> 2	OK
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0.01	< 0.05	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.313	< 0.528	OK
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.191	< 1.580	OK

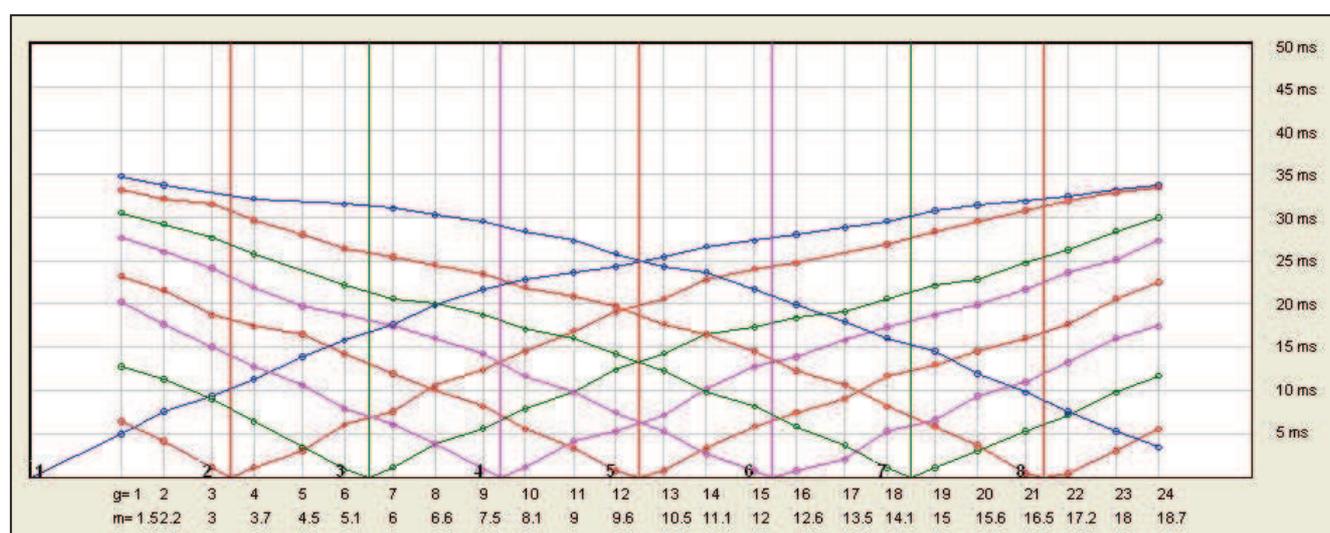
Criteri Sesame, 2004 per la valutazione dell'affidabilità statistica della curva HV e della chiarezza dei picchi di risonanza individuati

6.2 RISULTATI INDAGINE LINEARE ST1

Di seguito si riporta la tabella contenente i parametri di configurazione relativizzati dello stendimento e il tempo di primo arrivo calcolato per tutti i punti di energizzazione eseguiti.

N° shot			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Distanza relativa (m)			0.00	3.37	5.62	7.87	10.12	12.37	14.62	16.87	20.25
Quota (m s.l.m.)			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Geofono	Distanza relativa (m)	Quota (m s.l.m.)	Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.50	0.00	5.0	6.5	12.8	20.2	23.2	27.6	30.5	33.1	34.7
2	2.25	0.00	7.6	4.2	11.3	17.6	21.6	26.0	29.2	32.1	33.7
3	3.00	0.00	9.4	1.2	9.1	15.0	18.7	24.1	27.6	31.5	-
4	3.75	0.00	11.3	1.2	6.5	12.8	17.4	21.9	25.7	29.6	32.1
5	4.50	0.00	13.9	3.1	3.5	10.6	16.5	19.7	-	28.0	-
6	5.25	0.00	15.8	6.1	0.9	7.9	14.2	18.7	22.2	26.4	31.5
7	6.00	0.00	17.6	7.6	1.2	6.1	12.0	17.4	20.6	25.4	31.0
8	6.75	0.00	19.9	10.6	3.9	3.9	10.1	16.1	20.0	24.5	30.3
9	7.50	0.00	21.7	12.4	5.7	0.9	8.2	14.2	18.7	23.5	29.5
10	8.25	0.00	22.8	14.6	7.9	1.2	5.6	11.7	17.1	21.9	28.4
11	9.00	0.00	23.6	16.9	9.8	4.2	3.4	9.8	16.1	20.9	27.3
12	9.75	0.00	24.3	19.1	12.4	5.3	0.8	7.5	14.2	19.7	25.8
13	10.50	0.00	25.4	20.6	14.3	7.2	0.8	5.3	12.3	17.7	24.3
14	11.25	0.00	26.6	22.8	16.5	10.2	3.4	2.7	9.8	16.5	23.6
15	12.00	0.00	27.3	24.0	17.3	12.8	5.9	0.8	8.2	14.6	21.7
16	12.75	0.00	28.0	24.7	18.4	13.9	7.5	0.8	5.9	12.3	19.9
17	13.50	0.00	28.8	0.0	19.1	15.8	9.1	2.1	3.7	10.7	18.0
18	14.25	0.00	29.5	26.9	20.6	17.3	11.7	5.3	1.1	8.2	16.1
19	15.00	0.00	30.7	28.4	22.1	18.7	13.0	6.6	1.1	5.9	14.6
20	15.75	0.00	31.4	29.5	22.8	19.9	14.6	9.4	3.1	3.7	12.0
21	16.50	0.00	31.8	30.7	24.7	21.7	16.1	11.0	5.3	0.5	9.8
22	17.25	0.00	32.4	31.8	26.2	23.6	17.7	13.3	7.2	0.5	7.6
23	18.00	0.00	33.1	32.8	28.4	25.1	20.6	16.1	9.8	3.1	5.3
24	18.75	0.00	33.7	33.4	29.9	27.3	22.5	17.4	11.7	5.6	3.5

"-" Indica assenza di picking in quanto la traccia è caratterizzata da un rapporto S/N troppo basso per essere considerata rappresentativa

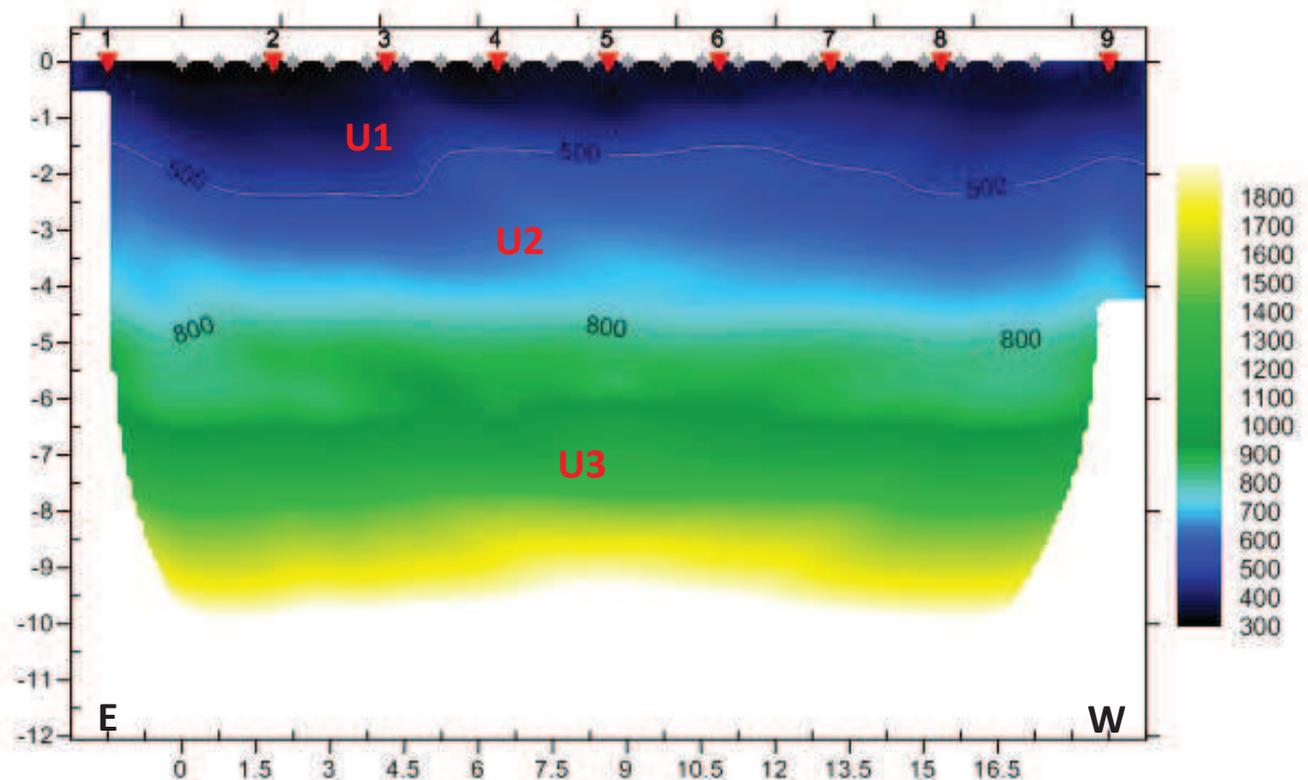


Applicando il metodo tradizionale del tempo intercetta, linearizzando le dromocrone e considerando un modello iniziale a 3 strati, sono stati ottenuti i seguenti valori sperimentali in corrispondenza di ciascun punto di energizzazione (velocità delle onde longitudinali P (V_P) e spessore (S) delle interfacce elastiche individuate:

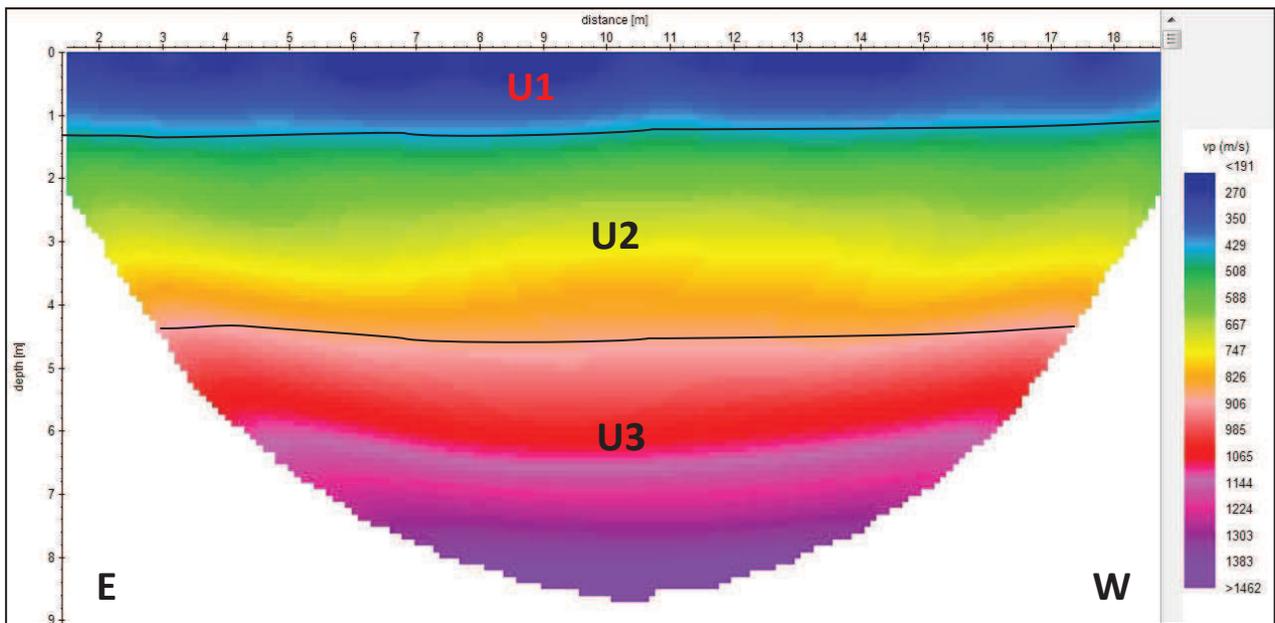
Punti di energizzazione esterni allo stendimento di geofoni			
S1		S9	
S (m)	V_P (m/s)	S (m)	V_P (m/s)
2.2	330	2.3	377
3.1	815	4.3	668
-	1258	-	1261

Punti di energizzazione interni allo stendimento di geofoni													
S2		S3		S4		S5		S6		S7		S8	
S (m)	V_P (m/s)	S (m)	V_P (m/s)	S (m)	V_P (m/s)	S (m)	V_P (m/s)	S (m)	V_P (m/s)	S (m)	V_P (m/s)	S (m)	V_P (m/s)
1.8	307	1.1	322	-	326	-	346	-	356	1.0	346	1.5	326
-	645	-	556	-	-	-	-	-	-	-	509	-	555

Di seguito si riporta l'elaborazione tomografica eseguita mediante algoritmo WET (Rayfract, 2009):



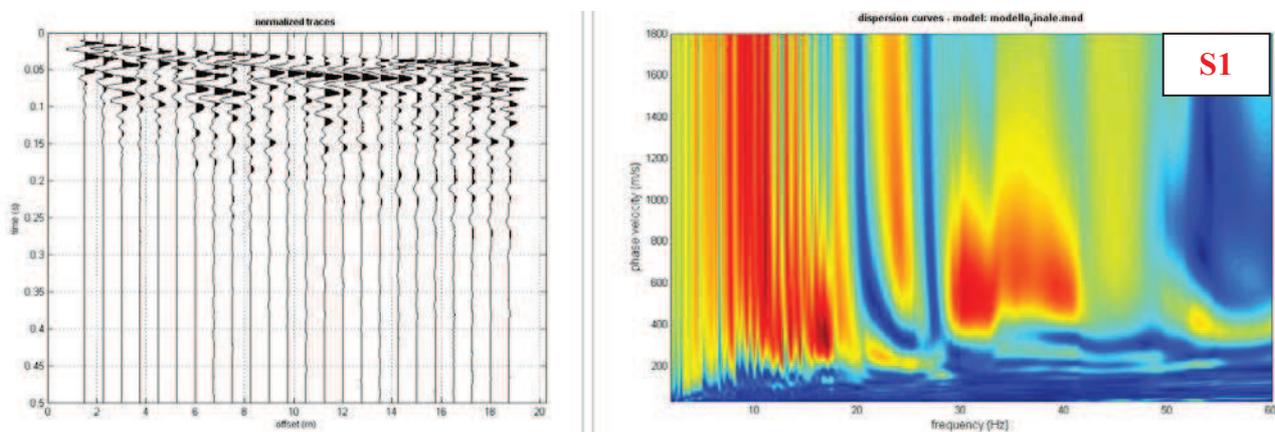
Di seguito si riporta l'elaborazione tomografica eseguita mediante algoritmo SIRT (Reflexw, 2014):

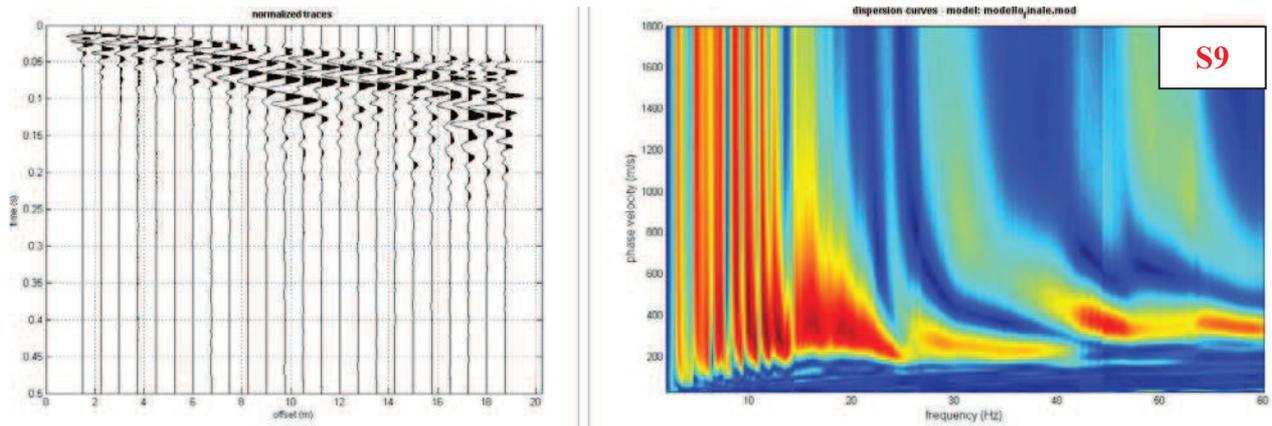


Le elaborazioni tomografiche sono tra loro coerenti e mostrano:

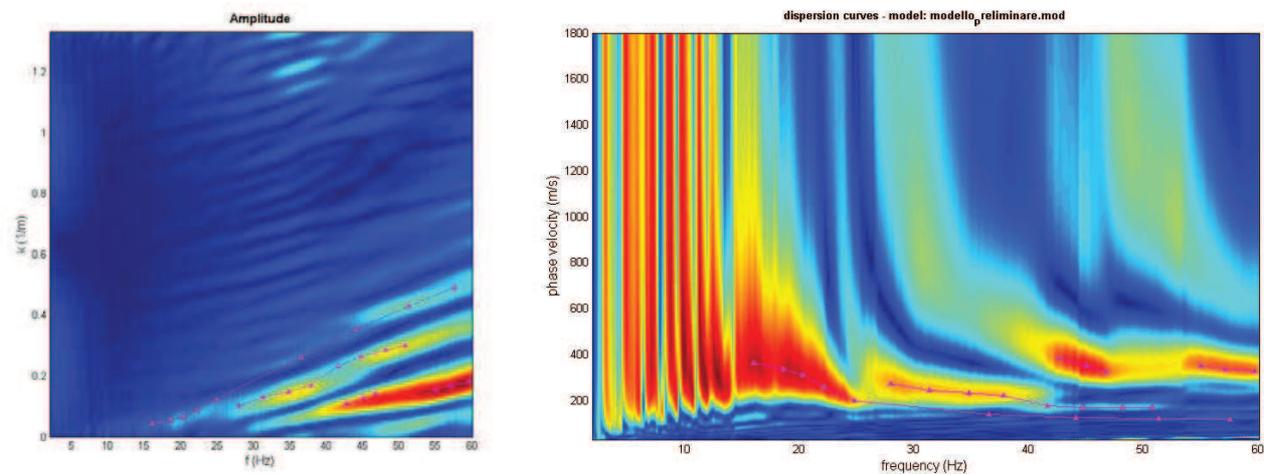
- un primo sismo-strato U1 soffice caratterizzato da valori di V_P inferiori a 400 m/s e di spessore compreso tra 1 e 2 m;
- un secondo sismo-strato U2 caratterizzato da valori di V_P compresi tra un minimo di 500 m/s e un massimo di 800 m/s e di spessore variabile dai 3 ai 4 m;
- un terzo sismo-strato U3 caratterizzato da valori di V_P compresi tra 900 m/s e 1500 m/s.

In considerazione dei risultati ottenuti è stato possibile interpretare le acquisizioni esterne anche in termini di dispersione delle onde superficiali; sono state pertanto considerate le due acquisizioni esterne, dalle quali sono stati ottenuti i relativi spettri di velocità f - V_f :



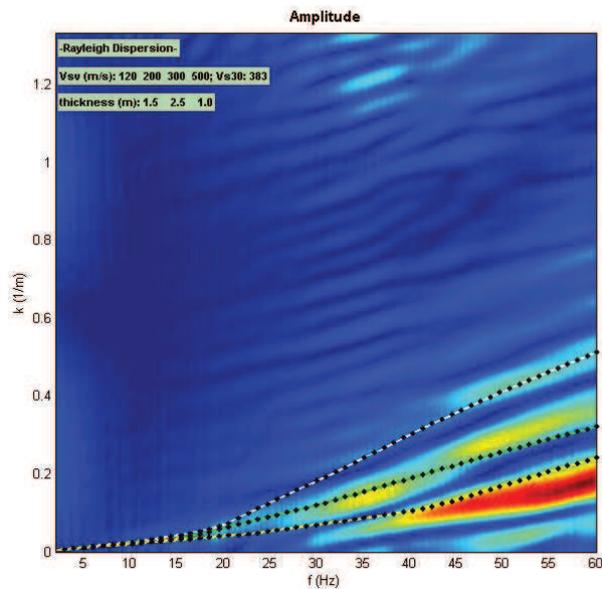
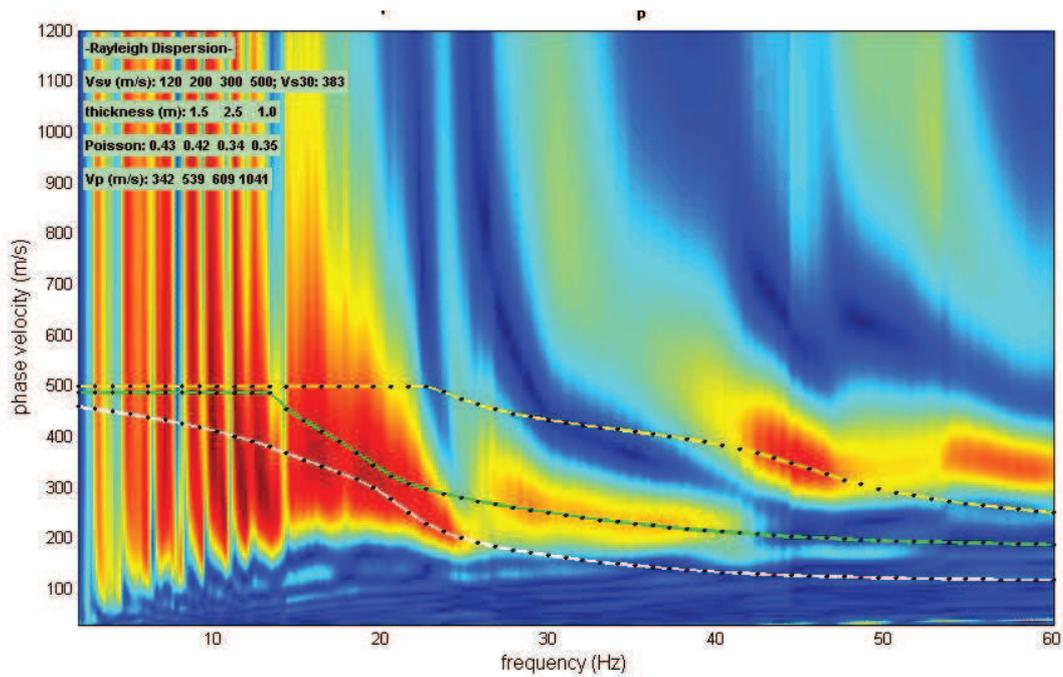


Le elaborazioni mostrano un forte contributo energetico dei modi superiori dell'Onda di Rayleigh, soprattutto per l'acquisizione eseguita all'estremo S1. In considerazione del fatto che l'acquisizione S9 è risultata la migliore in termini di contributo energetico del modo fondamentale dell'Onda di Rayleigh, nella banda di frequenza compresa tra 15 e 25 Hz, si è scelto di individuare su di essa la curva di dispersione sperimentale rappresentativa del sito nei domini f_k e f_v , mediante picking manuale:



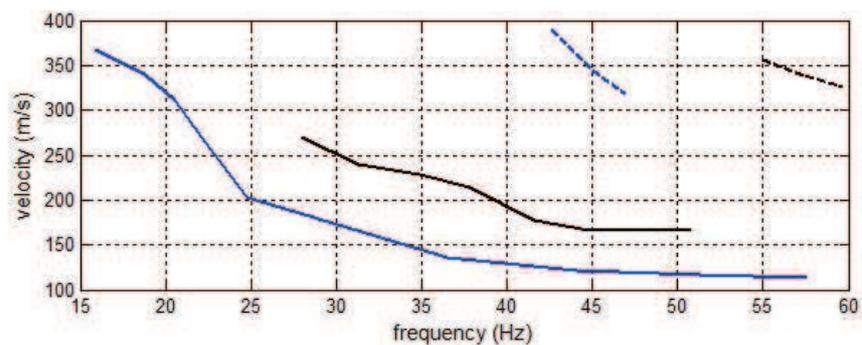
Con riferimento al modello monodimensionale in termini di onde di volume longitudinali ricavato per i primi 8 m con la sismica a rifrazione, è stato individuato un modello di rigidità preliminare, al quale ci si è riferiti durante le elaborazioni eseguite sia in procedura diretta sia tramite l'inversione automatica a mezzo di algoritmo genetico.

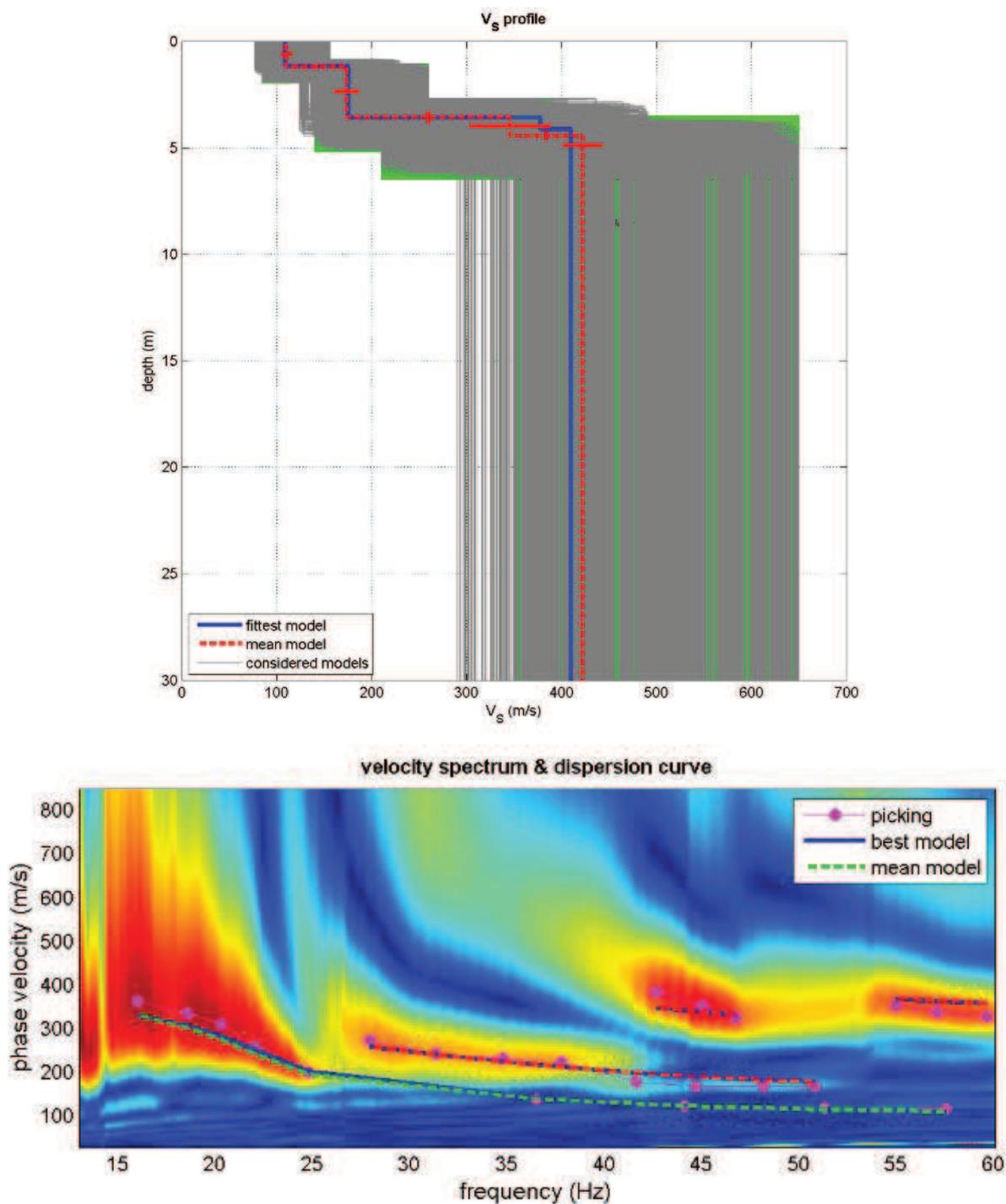
Di seguito si riportano i risultati della modellazione condotta in procedura diretta sul modello preliminare, attraverso la determinazione della curva di dispersione numerica del modo fondamentale e dei 2 modi superiori dell'Onda di Rayleigh:



A fianco sono rappresentate nel dominio fk le curve di dispersione numeriche calcolate per il modello preliminare.

Al fine di affinare la ricerca del modello sismo-stratigrafico caratterizzato dal minor misfit rispetto ai dati sperimentali è stata implementata la procedura di inversione automatica, utilizzando come target la curva di dispersione delle onde di Rayleigh individuata tramite picking:

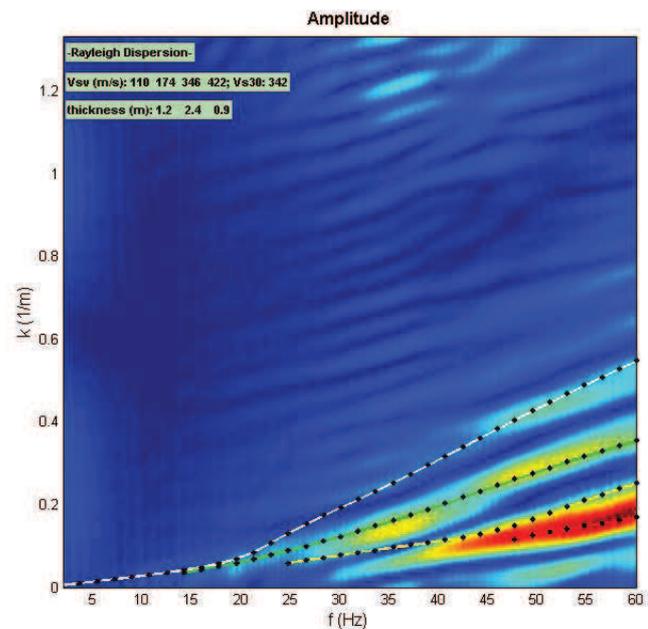




Il modello preliminare di partenza, il modello medio calcolato secondo l'operazione statistica MPPD (Dal Moro et al., 2006) e il modello migliore in termini di discrepanza tra curva di dispersione osservata e quella calcolata sono riportate nella tabella seguente, ove S e V_s indicano rispettivamente il valore di spessore e velocità delle onde S di ciascun sismo-strato considerato:

Unità	Modello preliminare		Modello medio		Modello migliore	
	S (m)	V _s (m/s)	S (m)	V _s (m/s)	S (m)	V _s (m/s)
U1	1.5	120	1.2	110	1.2	109
U2	2.5	200	2.4	174	2.4	176
	1.0	300	0.9	346	0.5	378
U3	∞	500	∞	422	∞	410

In considerazione dei risultati ottenuti si è scelto di riferirsi al modello medio, la cui soluzione numerica mostra una buona sovrapposizione con lo spettro f_k sperimentale:

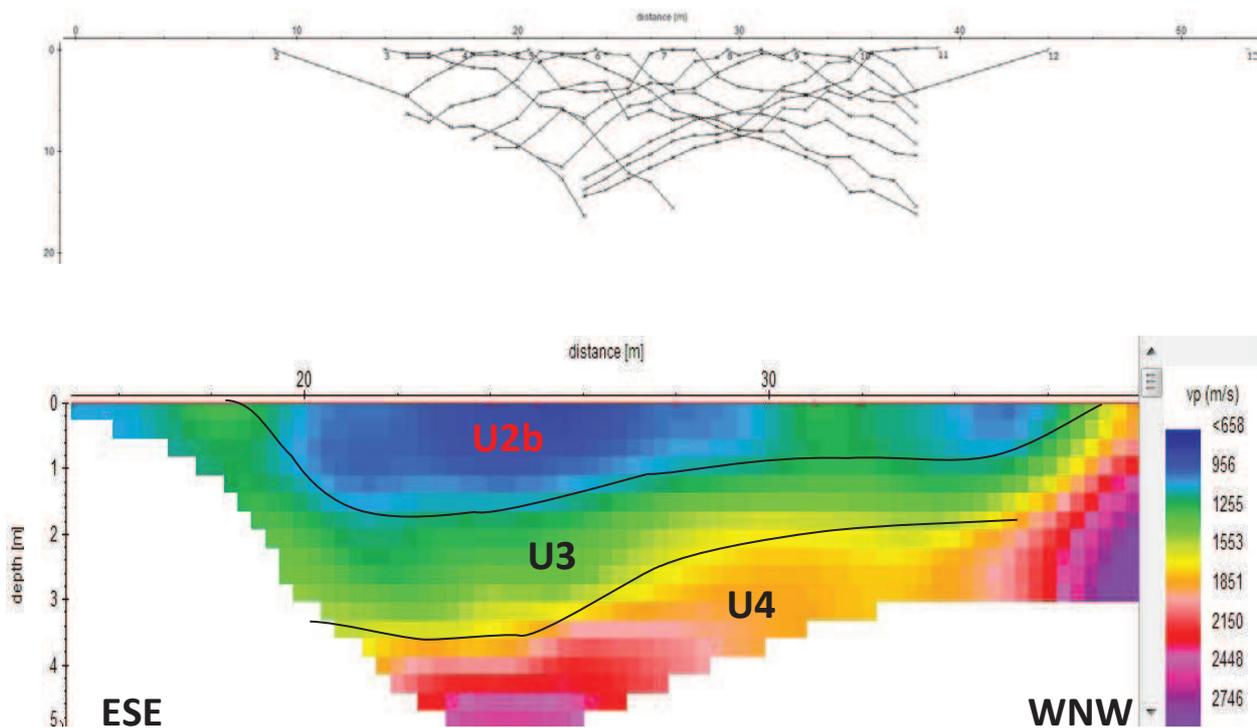


6.3 RISULTATI INDAGINE LINEARE ST2

Per lo stendimento ST2 è stata eseguita la sola elaborazione tomografica, considerando i segnali acquisiti nella parte centrale dello stesso, in quanto i segnali acquisiti a maggiore distanza dalle sorgenti non sono stati ritenuti di buona qualità, presumibilmente a causa della presenza di pavimentazione rigida ed eterogenea (asfalto nei settori esterni e terra battuta nella parte centrale).

Di seguito si riportano le dromocrone e l'elaborazione tomografica, la quale mostra una forte variabilità laterale in termini di velocità delle onde longitudinali:

- un primo sismo-strato U2b caratterizzato da valori di V_p inferiori a 800 m/s e di spessore variabile da 2 m nel settore ESE e 1 m nel settore WNW;
- un secondo sismo-strato U3 caratterizzato da valori di V_p compresi tra 900 e 1500 m/s e di spessore variabile da 1 a 2 m;
- un terzo sismo-strato U3 caratterizzato da valori di V_p superiori a 1800 m/s con valori massimi superiori a 2500 m/s.



7 Considerazioni finali

Sulla base dei risultati ottenuti dall'indagine di sismica a rifrazione si individua lungo il versante investigato il seguente modello sismo-stratigrafico espresso in termini di velocità delle onde longitudinali e densità (stimata empiricamente dal valore di V_P):

VERSANTE IN FRANA – CAMPEGGIO WEEKEND – SAN FELICE DEL BENACO (BS)			
<i>Unità</i>	ρ (g/cm ³)	V_P (m/s)	<i>Interpretazione stratigrafica</i>
U1	1.51 – 1.59	300 – 400	Materiale in frana rimaneggiato
U2a	1.66 – 1.77	500 – 700	Materiale in frana mobilitato
U2b	1.77 – 1.82	700 – 800	Deposito moderatamente consistente non mobilitato
U3	1.86 – 2.05	900 – 1500	Deposito consistente
U4	2.12 – 2.26	1800 – 2500	Deposito compatto

L'indagine individua pertanto due unità sismo-stratigrafiche costituenti il materiale mobilitato dal fenomeno franoso, la cui interfaccia di separazione è responsabile del picco di risonanza a più alta frequenza individuato nelle acquisizioni HVS2 e HVS3 (rispettivamente di 18.2 Hz e 17.5 Hz); lo spessore dell'unità U1 è dell'ordine di 1.0-1.5 m, mentre l'unità U2a presenta spessori compresi tra 2.0 e 3.0 m lungo tutto il corpo franoso.

L'interfaccia di separazione tra il materiale mobilitato e il deposito non interessato dal fenomeno franoso (U2a-U2b) è posta tra i 3.5 e i 4.5 m di profondità ed è responsabile del picco di risonanza a frequenza rispettivamente di 10.3 Hz (HVS2) e 10.6 Hz (HVS3).

In corrispondenza del ciglio di frana in posizione indisturbata si individua direttamente come primo sismo-strato l'unità U2b, che presenta forte variabilità laterale e che appoggia sull'unità U3 posta a 1-2 m di profondità a monte della frana e a 4-5 m di profondità lungo il versante in frana. L'unità U4 più compatta si individua tra i 2-4 m di profondità nella zona a monte della frana, mentre non è stato intercettato dall'indagine eseguita lungo il versante, in quanto posta a profondità superiore alla sua massima penetrazione (6-8 m dal piano d'indagine).

Il picco di risonanza individuato nell'acquisizione HVSR1 a 9.4 Hz è presumibilmente generato da un contrasto di rigidezza presente all'interno dei materiali compatti appartenenti all'unità U4.

Come più volte ricordato, solo lo stendimento ST1 garantisce il rispetto dell'ipotesi di monodimensionalità e quindi rende legittimo interpretare le acquisizioni coniugate in termini di dispersione delle onde superficiale di Rayleigh; data la limitata lunghezza dello stendimento e la bassa rigidezza delle unità superficiali la penetrazione dell'indagine è limitata a poco più di 10 m.

In corrispondenza del corpo franoso si individua il seguente modello di rigidezza:

Unità	S (m)	Z (m)	V _P (m/s)	V _S (m/s)	ν
U1	1.2	1.2	313	110	0.43
U2a	2.4	3.6	639	174	0.46
U2b	0.9	4.5	848	346	0.40
U3	> 10.0	> 14.5	1034	422	0.40

SIMBOLOGIA

- s = spessore unità
- Z = profondità letto unità
- V_P = velocità delle onde di compressione
- V_S = velocità delle onde di taglio
- ν = coefficiente di Poisson

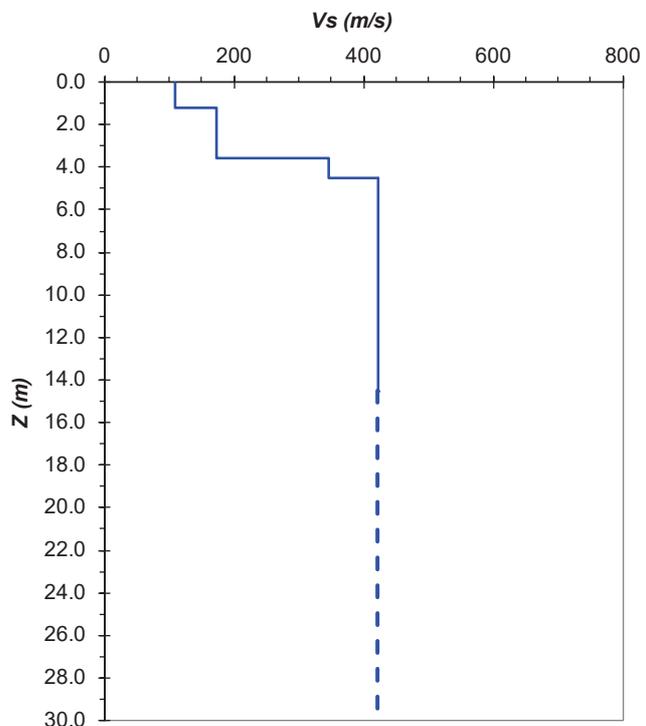
Capriano del Colle, aprile 2017

Il geologo incaricato

Dott. Geol. Massimo Compagnoni



ANDAMENTO DELLE Vs CON LA PROFONDITA'



Ipotizzando cautelativamente costante la rigidezza fino a 30 m di profondità il parametro V_{S30} è pari a 342 m/s

8 Bibliografia

Achenbach, J.D. (1999) "Wave Propagation in Elastic Solids". North-Holland, Amsterdam, Netherlands.

Aki, K. and Richards, P.G. (1980) "Quantitative Seismology, Theory and Methods". Vol. 1-2 W.H. Freeman & Co., New York, 1980

Dal Moro G., Forte E., Pipan M. & Sugan M. (2006) "Velocity Spectra and Seismic Signal Identification for Surface Wave Analysis". Near-Surface Geophysics, 4, 243-251

Herman, G. T. (1980) "Image reconstruction from projections - The fundamentals of computerized tomography". Academic Press, New York, 316

Nakamura, Y. (1989) "A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface". Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), Vol. 30, No.1.

Nogoshi M. e Igarashi T. (1970) "On the propagation characteristics of microtremor". J. Seism. Soc. Jpn., 23, 264-280.

Nolet, G. (1987) "Seismic tomography". D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, pp. 386, 1987

Park C. B., Miller R. D., & Xia J. (1999) "Multichannel analysis of surface waves". Geophysics, 64, 3; 800-808

Sandmeier software (2014) "Reflex versione 7.5"

SESAME Project (2004) "Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation". WP12, deliverable no. D23.12, http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Papers/HV_User_Guidelines.pdf

Worthington, M. H. (1984) "An introduction to geophysical tomography". First Break, 20-26

www.geopsy.org

www.rayfract.com

www.winmasw.com

9 Documentazione fotografica



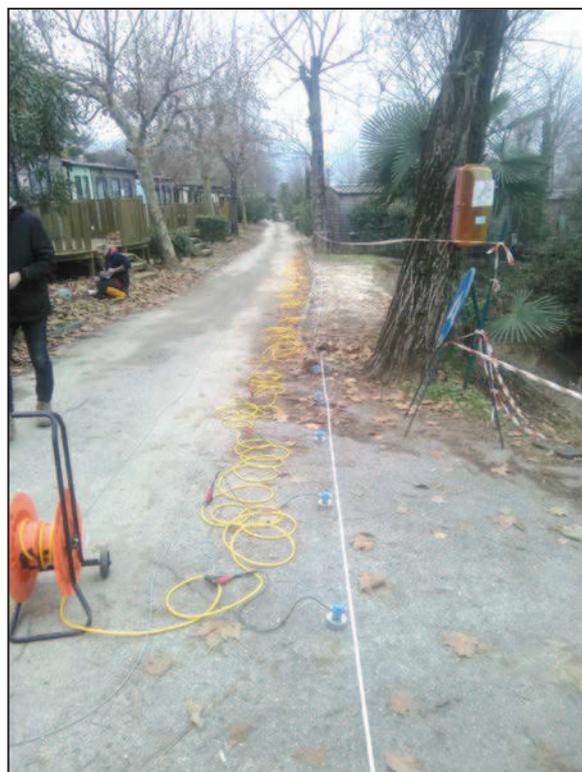
Indagine lineare ST1: vista verso E



Indagine lineare ST1: vista verso W



Indagine lineare ST2: vista verso ESE



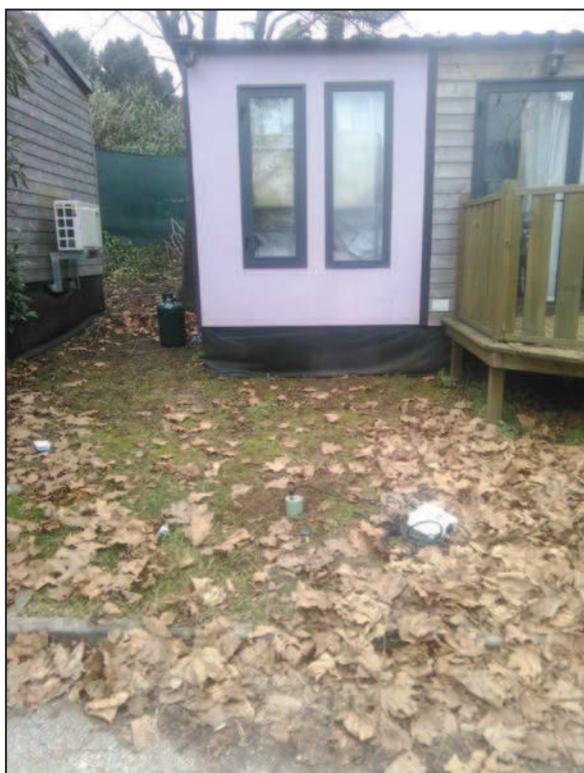
Indagine lineare ST2: vista verso WNW



Indagine puntuale HVS1: vista verso N



Indagine puntuale HVS1: vista verso E



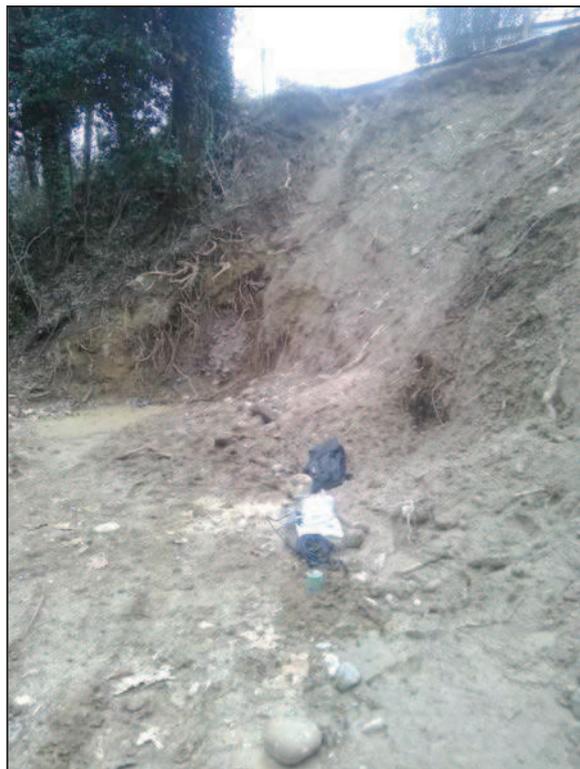
Indagine puntuale HVS1: vista verso S



Indagine puntuale HVS1: vista verso W



Indagine puntuale HVSR2: vista verso N



Indagine puntuale HVSR2: vista verso E



Indagine puntuale HVSR2: vista verso S



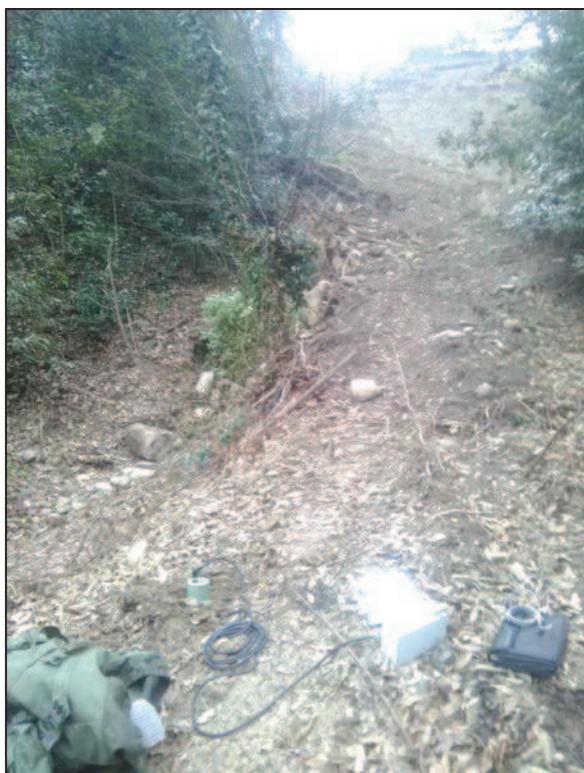
Indagine puntuale HVSR2: vista dettaglio



Indagine puntuale HVS3: vista verso N



Indagine puntuale HVS3: vista verso E



Indagine puntuale HVS3: vista verso S



Indagine puntuale HVS3: vista verso W